



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**Diseño y fabricación de manguetas  
traseras para prototipo Fórmula Student**

**Autor:**

**Martín Temprano, Carlos**

**Tutor:**

**Magdaleno Martín, Jesús**

**Construcciones Arquitectónicas,  
I.T. y M.M.C. y Teoría de  
Estructuras**

**Valladolid, abril 2016.**





## RESÚMEN

En este trabajo de fin de grado se realiza una propuesta de diseño y fabricación de las manguetas traseras de un prototipo de automóvil para la competición universitaria Fórmula Student.

La metodología aplicada se basa en la utilización de tecnologías asistidas por ordenador que integran los procesos de diseño y fabricación, el CAD/CAM, utilizando el software CATIA V5.

Se comienza con una descripción del entorno de la competición y los sistemas de suspensión utilizados para introducir conceptos y parámetros de diseño.

A continuación, se realiza una descripción en profundidad del proceso de diseño de la pieza, dividida en tres etapas: fase de definición, diseño preliminar y diseño de detalle.

El último paso se centra en la fabricación. Consiste en hacer un prototipado rápido y la simulación del proceso de mecanizado utilizando herramientas de fabricación asistidas por ordenador, que son aplicadas al modelo CAD de la pieza previamente creado.

**PALABRAS CLAVE:** *mangueta, Fórmula Student, diseño, fabricación, CAD/CAM.*



## ABSTRACT

In this document, a proposal of design and manufacturing of the rear uprights of a concept car for the Formula Student university competition takes place.

The methodology is based on the use of computer technologies that integrate design and manufacturing processes, CAD / CAM, using the CATIA V5 software.

It begins with a description of the environment of the competition and suspension systems used, to introduce concepts and design parameters.

Then, a detailed description of the design process of the piece is made, divided into three phases: definition phase, preliminary design and detailed design.

The last step focuses on manufacturing. It consists of making a rapid prototyping and simulation of the machining process using tools of computer-aided manufacturing, which are applied to the CAD model of the part previously created.

**KEYWORDS:** *upright, Formula Student, design, manufacturing, CAD/CAM.*



# ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 JUSTIFICACIÓN .....	1
1.2 ESTRUCTURA .....	1
1.3 ALCANCE .....	2
1.4 OBJETIVOS .....	3
<b>CAPÍTULO 2: CONTEXTO .....</b>	<b>5</b>
2.1 PISUERGA SPORT .....	5
2.1.1 EL COCHE .....	6
2.2 FÓRMULA STUDENT .....	9
2.2.1 DESCRIPCIÓN .....	9
2.2.2 HISTORIA.....	10
2.2.3 PRUEBAS .....	11
2.2.3.1 PRUEBAS ESTÁTICAS .....	13
2.2.3.2 PRUEBAS DINÁMICAS.....	14
2.2.4 NORMATIVA .....	15
<b>CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN .....</b>	<b>19</b>
3.1 INTRODUCCIÓN.....	19
3.2 SISTEMAS DE SUSPENSIÓN .....	19
3.2.1 EJE RÍGIDO.....	20
3.2.2 EJE INDEPENDIENTE .....	20
3.3 SISTEMAS DE COMPETICIÓN .....	22
3.4 MODELADO .....	24
3.5 PARÁMETROS DE DISEÑO .....	28
3.6 DESCRIPCIÓN COMPONENTES.....	35



3.6.1 GEOMETRÍA .....	36
3.6.2 EMPAQUETAMIENTO RUEDAS .....	38
3.6.3 BIELETAS .....	43
3.6.4 ANTI-ROLL .....	44
3.6.5 CONJUNTO MUELLE AMORTIGUADOR .....	45
<b>CAPÍTULO 4: DISEÑO DE LAS MANGUETAS .....</b>	<b>47</b>
4.1 INTRODUCCIÓN.....	47
4.2 DEFINICIÓN .....	48
4.2.1 INVESTIGACIÓN PREVIA .....	49
4.2.2 ANÁLISIS FUNCIONAL.....	51
4.2.3 OBJETIVOS DE DISEÑO .....	52
4.3 DISEÑO PRELIMINAR .....	53
4.3.1 MATERIAL Y PROCESO DE FABRICACIÓN .....	53
4.3.2 ESQUEMA.....	56
4.4 DISEÑO DE DETALLE .....	57
4.4.1 SUPERFICIE INTERACCIÓN BUJE.....	58
4.4.2 ANCLAJES GEOMETRÍA SUSPENSIÓN .....	59
4.4.3 SISTEMA DE VARIACIÓN DEL CAMBER .....	60
4.4.4 ANCLAJE PINZA DE FRENO .....	60
4.4.5 DETALLES CONSTRUCTIVOS.....	62
4.4.6 MODELADO CAD .....	62
4.5 ENSAMBLAJE .....	67
4.5.1 CONJUNTOS.....	67
4.5.2 COMPROBACIONES DE MONTAJE .....	68
4.6 ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN .....	70
4.6.1 CARGAS.....	70



4.6.2 RESULTADOS.....	71
4.6.3 MODIFICACIONES.....	72
<b>CAPÍTULO 5: FABRICACIÓN .....</b>	<b>75</b>
5.1 INTRODUCCIÓN AL CAM.....	75
5.2 PROTOTIPADO RÁPIDO .....	76
5.2.1 PASOS DEL PROCESO .....	77
5.2.2 APLICACIÓN A LA MANGUETA.....	78
5.3 MECANIZADO .....	80
5.3.1 SELECCIÓN DE HERAMIENTAS.....	80
5.3.2 TOLERANCIAS .....	80
5.3.3 CÁLCULO CONDICIONES DE CORTE.....	84
5.3.4 MODELADO.....	86
5.3.5 TABLA DE OPERACIONES.....	87
5.3.4 ESTIMACIÓN DE COSTES .....	88
<b>CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES .....</b>	<b>91</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>93</b>
<b>ANEXO: PLANOS .....</b>	<b>97</b>



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2.1: Equipo Pisuerga Sport .....	5
Ilustración 2.2: Prototipo Pisuerga Sport .....	6
Ilustración 2.3: Sistema de coordenadas del vehículo .....	8
Ilustración 2.4: Batalla y vía .....	8
Ilustración 2.5: Masa suspendida y no suspendida .....	9
Ilustración 2.6: Equipos participantes Formula Student Germany 2015 .....	10
Ilustración 2.7: Mapa de competiciones .....	11
Ilustración 2.8: Prueba de inclinación .....	13
Ilustración 2.9: Prueba de Ski-Pad .....	14
Ilustración 2.10: Prueba de resistencia y eficiencia.....	15
Ilustración 3.1: Funcionamiento sistema de eje rígido .....	20
Ilustración 3.2: Ejemplo sistemas de eje rígido .....	20
Ilustración 3.3: Funcionamiento sistema de eje independiente .....	20
Ilustración 3.4: Sistema McPherson.....	21
Ilustración 3.5: Sistema de paralelogramo deformable.....	22
Ilustración 3.6: Sistema Pull-Rod.....	23
Ilustración 3.7: Sistema Push-Rod.....	23
Ilustración 3.8: Diagrama de bloques del modelo de cuarto de suspensión ..	25
Ilustración 3.9: Gráficas salida modelado .....	26
Ilustración 3.10: Definición camber .....	28
Ilustración 3.11: Gráfica variación camber/desplazamiento .....	29
Ilustración 3.12: Definición divergencia.....	29
Ilustración 3.13: Gráfica variación divergencia/desplazamiento.....	30
Ilustración 3.14: Definición caster.....	31
Ilustración 3.15: Gráfica variación caster/desplazamiento.....	32
Ilustración 3.16: Definición Anti-squat .....	32
Ilustración 3.17: Gráfica variación anti-squat/desplazamiento .....	33
Ilustración 3.18: Definición anti-lift .....	34
Ilustración 3.19: Gráfica variación anti-lift/desplazamiento .....	35
Ilustración 3.20: Sistema de suspensión de un Fórmula Student.....	35
Ilustración 3.21: Triángulos suspensión .....	36
Ilustración 3.22: Barra de reglaje .....	36
Ilustración 3.23: Push-Bar.....	37
Ilustración 3.24: Rótulas .....	37
Ilustración 3.25: Portarrótulas mecanizado.....	38
Ilustración 3.26: Portarrótulas comercial.....	38
Ilustración 3.27: Esquema empaquetamiento .....	38
Ilustración 3.28: Conjunto buje.....	39
Ilustración 3.29: Tuerca de seguridad y arandela de retención.....	40



Ilustración 3.30: Eje apoyado sobre rodamientos de contacto angular .....	40
Ilustración 3.31: Dimensiones rodamiento interior.....	41
Ilustración 3.32: Dimensiones rodamiento exterior .....	41
Ilustración 3.33: Parámetros llantas .....	42
Ilustración 3.34: Llanta Braid.....	43
Ilustración 3.35: Neumáticos Michelin.....	43
Ilustración 3.36: Bieleta .....	44
Ilustración 3.37: Funcionamiento Anti-roll .....	44
Ilustración 3.38: Barra Anti-roll .....	45
Ilustración 3.39: Conjunto muelle amortiguador.....	46
Ilustración 4.1: Etapas de diseño .....	47
Ilustración 4.2: Tiempo de diseño.....	48
Ilustración 4.3: Fabricación por perfiles de acero soldados.....	50
Ilustración 4.4: Fabricación por mecanizado .....	50
Ilustración 4.5: Fabricación por moldeo.....	51
Ilustración 4.6: Interrelación Procesado-Material-Diseño.....	53
Ilustración 4.7: Mecanizado .....	54
Ilustración 4.8: Esquema diseño .....	56
Ilustración 4.9: Mangueta .....	58
Ilustración 4.10: Sección centro de rueda .....	59
Ilustración 4.11: Sistema de ajuste del camber.....	60
Ilustración 4.12: Anclaje pinza de freno.....	61
Ilustración 4.13: Cortante simple vs cortante doble .....	61
Ilustración 4.14: Radios de redondeo mínimos.....	62
Ilustración 4.15: Procesos de diseño y fabricación integrados .....	63
Ilustración 4.16: Esquema sección .....	64
Ilustración 4.17: Esquema frontal .....	64
Ilustración 4.18: Secuencia modelado cuerpo mangueta.....	65
Ilustración 4.19: Modelado anclaje pinza de freno.....	66
Ilustración 4.20: Secuencia modelado soporte triángulo superior .....	66
Ilustración 4.21: Ensamblaje empaquetamiento rueda .....	67
Ilustración 4.22: Ensamblaje suspensión trasera .....	68
Ilustración 4.23: Ensamblaje vehículo completo.....	68
Ilustración 4.24: Comprobación anclajes.....	69
Ilustración 4.25: Comprobación montaje portarrótulas.....	69
Ilustración 4.26: Tensiones caso frenada y bache.....	71
Ilustración 4.27:Tensiones caso curva y bache.....	71
Ilustración 4.28: Desplazamientos .....	72
Ilustración 4.29: Modificaciones espesor .....	72
Ilustración 4.30: Modificaciones radios de acuerdo .....	73
Ilustración 5.1: Distintas aplicaciones CAM.....	76
Ilustración 5.2: Ciclo del prototipado rápido .....	77
Ilustración 5.3: Orientación modelo .....	78



Ilustración 5.4: Laminado del relleno y material de soporte .....	79
Ilustración 5.5: Fresa aluminio .....	80
Ilustración 5.6: Posiciones recomendadas de ajuste para los rodamientos...	81
Ilustración 5.7: Tolerancias geométricas asiento rodamientos.....	83
Ilustración 5.8: Relación tolerancia/coste .....	84
Ilustración 5.9: Modelado herramientas .....	86
Ilustración 5.10: Modelado operaciones de corte.....	87

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Características generales vehículo .....	7
Tabla 2.2: Sistema de puntuación .....	12
Tabla 3.1: Parámetros sistema de suspensión .....	27
Tabla 3.2: Coordenadas puntos anclaje suspensión .....	28
Tabla 4.1: Objetivos diseño .....	53
Tabla 4.2: Propiedades físicas material .....	55
Tabla 4.3: Propiedades tecnológicas material.....	56
Tabla 4.4: Cargas .....	70
Tabla 5.1: Tiempo y material consumidos .....	79
Tabla 5.2: Intervalos de tolerancia .....	82
Tabla 5.3: Tabla de operaciones mecanizado .....	88
Tabla 5.4: Estimación costes material .....	89
Tabla 5.5: Estimación costes mecanizado.....	89
Tabla 5.6: Estimación costes totales.....	89

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 3.1: Fórmula anti-squat.....	32
Ecuación 3.2: Fórmula anti-lift .....	34
Ecuación 5.1: Cálculo tolerancia geométrica t1.....	83
Ecuación 5.2: Cálculo tolerancia geométrica t2 .....	83
Ecuación 5.3: Cálculo tolerancia geométrica t3.....	83
Ecuación 5.4: Cálculo tolerancia geométrica t4 .....	83
Ecuación 5.5: Velocidad de giro.....	85
Ecuación 5.6: Velocidad de avance .....	85
Ecuación 5.7: Volumen de viruta .....	85
Ecuación 5.8: Potencia de corte .....	85
Ecuación 5.9: Rugosidad superficial .....	85



# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1 JUSTIFICACIÓN

En el presente trabajo, se describen los procesos de diseño y fabricación de las manguetas de la suspensión trasera de un automóvil de competición. Más concretamente, se trata de un monoplaza participante en la Formula Student, dentro de cuyo marco se encuentra englobado.

El trabajo nace, por tanto, de la necesidad real de disponer de uno de los componentes centrales del sistema de suspensión del vehículo, siendo este desarrollado utilizando los medios al alcance del equipo de diseño y de la universidad.

Al tratarse del primer prototipo que se fabrica por este equipo, se cuenta con el inconveniente de la ausencia de precedentes, teniéndose que desarrollar todos los diseños desde cero. Esto supone una dificultad añadida, además de no tener ningún tipo de referencia real del comportamiento del coche en pista. Una vez finalizada la construcción y montaje del mismo, se deberán hacer exhaustivas comprobaciones del diseño con el objeto de descubrir errores no detectados en las fases previas.

Tanto por la posibilidad de completar el proceso de diseño de un componente mecánico, como por la de preparar su fabricación real, se ha considerado la temática de la competición automovilística idónea para el desarrollo de un trabajo de fin de grado, sirviendo esta para la aplicación de los conocimientos adquiridos a lo largo del plan de estudios.

## 1.2 ESTRUCTURA

Los contenidos de la memoria se estructuran en seis capítulos. Se podrían también dividir en tres partes diferenciadas: planteamiento del problema, desarrollo y conclusiones.

El planteamiento del problema abarca los tres primeros capítulos, empezando por el presente, en el que se realiza una introducción al proyecto. En el segundo se describe el entorno en el que se desarrolla, introduciendo la Fórmula Student y el equipo Pisuerga Sport. Y para concluir esta fase, el tercer capítulo hace una breve descripción referente a los sistemas de suspensión, donde se explican conceptos que aparecerán posteriormente.

El desarrollo se lleva a cabo en los dos siguientes capítulos, correspondiendo con la solución al problema planteado. En el cuarto capítulo se describe detalladamente el proceso de diseño del componente, mientras que en el quinto se especifican los procesos de fabricación y prototipado rápido.

Para finalizar, se exponen las conclusiones obtenidas durante la realización del proyecto y las futuras líneas de trabajo en el sexto capítulo.

### 1.3 ALCANCE

Para el desarrollo del trabajo se han utilizado como base herramientas de diseño y fabricación asistidas por ordenador. Esta integración de técnicas informáticas, también denominada CAD/CAM, busca aprovechar al máximo el potencial que aportan este conjunto de nuevas tecnologías, las cuales han experimentado un espectacular desarrollo en los últimos años, consolidándose como el método más efectivo de desarrollo de componentes mecánicos.

Se emplea CATIA V5, software del desarrollador *Dassault Systemes*, para la realización del diseño CAD. El modelado de la pieza se lleva a cabo utilizando los módulos de *Skech* y *Part Desing* y el ensamblado de conjuntos con el módulo *Assembly Desing*. También se incluye un plano del componente realizado utilizando el módulo *Drafting*.

La pieza es sometida a un análisis de elementos finitos por miembros del departamento de cálculo del equipo, utilizando el software de ingeniería asistida por ordenador (CAE) *Hyperworks* de *Altair*. Dicho análisis no forma parte del trabajo, limitándose este a interpretar sus resultados con la finalidad de optimizar el diseño del componente.

En el capítulo correspondiente a la fabricación se busca explorar las aplicaciones de la fabricación asistida por ordenador al componente modelado previamente. Esto consistirá en obtener programas de código CNC para dos aplicaciones, prototipado 3D y mecanizado. El prototipado rápido se realizará en una impresora 3D utilizando el software *RepetierHost* para la laminación de la pieza. En cuanto al mecanizado se utiliza el módulo *Prismatic Machining* de CATIA V5 para modelar el proceso de fresado. Además, se realizará el cálculo de las condiciones de corte, la selección de las herramientas y la descripción de las operaciones del proceso de mecanizado. El objetivo de esta parte del trabajo es hacer una propuesta de fabricación que luego podrá ser modificada en función de las circunstancias por el responsable de fabricación designado por el equipo, encargado de llevar a cabo en los próximos meses la fabricación definitiva.



## 1.4 OBJETIVOS

El objetivo principal del trabajo es completar un diseño para las manguetas traseras del monoplaza, con el suficiente grado de detalle como para que puedan ser fabricadas. Este objetivo se englobaría en el de diseñar y fabricar un monoplaza de competición que participe en la Fórmula Student Spain de 2016, que tendrá lugar en el circuito de Montmeló.

De la realización del trabajo también se podrían extraer otros objetivos de carácter general:

- Conocer y dominar los procesos de diseño de componentes mecánicos utilizados hoy en día.
- Explorar las posibilidades de integración entre las herramientas de CAD y CAM y aplicarlas a componentes reales.
- Potenciar los conocimientos sobre los sistemas de suspensión y del mundo del automovilismo de competición.
- Participar en una competición universitaria internacional de diseño como experiencia enriquecedora previa a la inserción en el mundo laboral.
- Servir de guía para futuros equipos de Fórmula Student, con la esperanza de que sigan documentando sus avances y se produzca una transferencia de conocimiento dentro del ámbito universitario.



# CAPÍTULO 2: CONTEXTO

## 2.1 PISUERGA SPORT

El presente proyecto tiene su origen en un grupo de trabajo formado por estudiantes de diversas titulaciones de la Universidad de Valladolid, cuya meta es la de diseñar y construir un monoplaza de competición para participar en la Formula Student Spain.

En el curso académico 2013/2014 se constituye la asociación Pisuerga Sport con la intención de dar soporte a este proyecto y sentar las bases para que más universitarios pudieran sumarse en años posteriores. El equipo surge en parte como continuación de un proyecto anterior que consistió en la construcción de dos bólidos de competición.



Ilustración 2.1: Equipo Pisuerga Sport

Tras dos años de aprendizaje y adquisición de experiencia en los que se tuvo una primera toma de contacto con las pruebas estáticas de la competición, da comienzo una nueva fase de diseño de detalle y posteriormente fabricación de componentes del vehículo. El equipo afronta la presente campaña con el objetivo claro de tener completamente construido el monoplaza y a punto para la competición de 2016.

La forma de trabajar es similar a la de cualquier empresa del sector, existiendo distintos departamentos al cargo de los cuales se sitúa un líder. Este se encarga de las labores de gestión y coordinación del trabajo de los miembros, así como de portavoz del departamento.

Los distintos departamentos de los que se compone el equipo son los siguientes:

- Suspensión dirección y frenos
- Hardware y software
- Administración
- Marketing
- Chasis, Cockpit y Carenado

### 2.1.1 EL COCHE

El tipo de coches con el que se compete en la Fórmula Student son monoplazas de pequeñas dimensiones. Poseen un chasis tubular que puede ir parcialmente carenado debiendo dejar al descubierto las ruedas. Están propulsados por un motor de motocicleta de cuatro tiempos y alrededor de 600 centímetros cúbicos de cilindrada. Esto da como resultado un vehículo con una gran agilidad y capaz de desarrollar elevadas aceleraciones, el cual deberá ser manejado por los propios estudiantes.



Ilustración 2.2: Prototipo Pisuerga Sport

En la siguiente tabla se recogen algunos datos y dimensiones básicas del monoplaza diseñado por el equipo Pisuerga Sport:

Masa (kg)	300
Vía Delantera (m)	1,3
Vía Trasera (m)	1,3
Altura CDG (m)	0,275
Batalla (m)	1,6
Distancia Eje Delantero/CDG (m)	0,8
Peso Eje delantero (N)	1471,5
Peso Eje trasero (N)	1471,5

Tabla 2.1: Características generales vehículo

A continuación, se explican brevemente una serie de conceptos básicos relacionados con el vehículo para facilitar la comprensión del trabajo.

- **SISTEMA DE COORDENADAS**

Se utilizará un eje de coordenadas que servirá para referenciar tanto las fuerzas y aceleraciones sufridas por el monoplaza, como para posicionar cada uno de sus componentes. Su origen estará situado en el centro de gravedad del vehículo.

La orientación del eje z coincide con la vertical, mientras que la del eje y coincide con la de los ejes de las ruedas y la del eje x con el largo del coche.

En la siguiente figura se muestran las distintas velocidades longitudinales y de giro que se podrían dar en función del eje de coordenadas del vehículo.

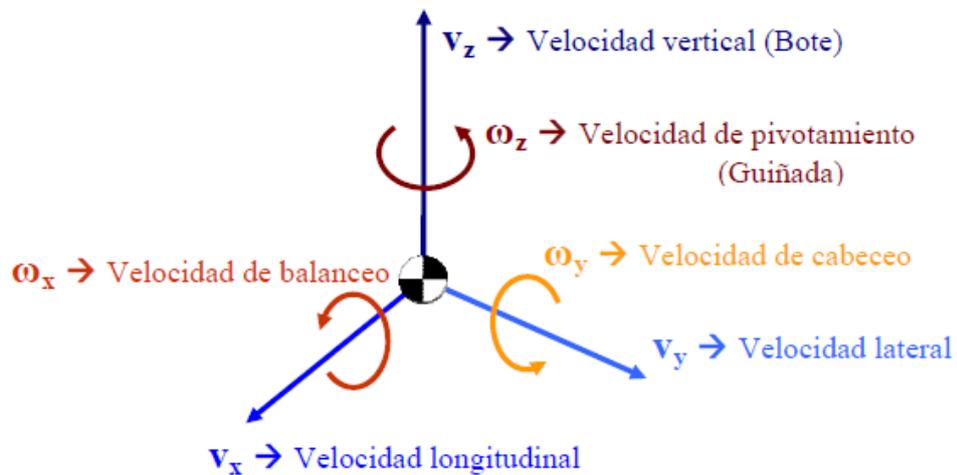


Ilustración 2.3: Sistema de coordenadas del vehículo

- **BATALLA**

Se denomina batalla o base de ruedas, a la distancia medida entre los ejes delantero y trasero de un vehículo.

Esta distancia influye directamente en su estabilidad. Una batalla larga alargará la longitud de vehículo haciéndolo más estable, mientras que una corta hará que se comporte de una manera más ágil y nerviosa.

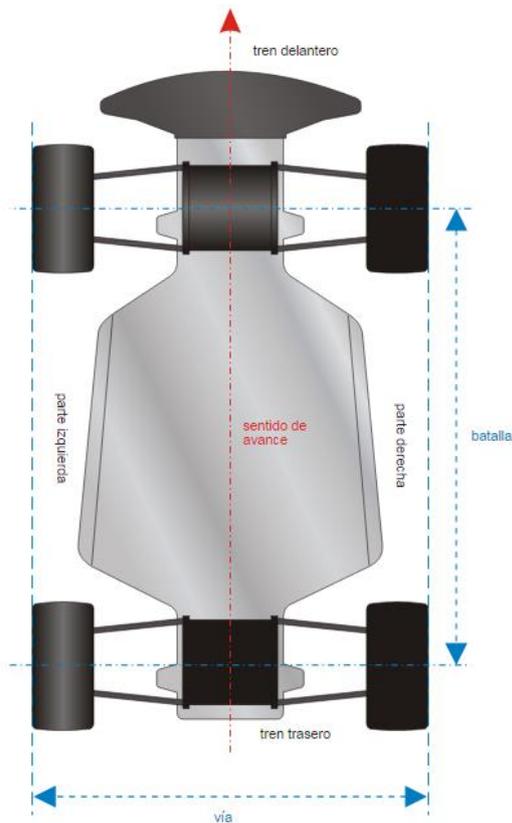


Ilustración 2.4: Batalla y vía

- **VÍA**

Se denomina vía a la distancia entre las ruedas de un mismo eje de un vehículo.

Este parámetro también afecta a la estabilidad del vehículo, dotándole una vía ancha de un mayor control en el paso por curva.

- **MASA SUSPENDIDA Y NO SUSPENDIDA**

Es importante recalcar la diferencia entre estos dos conceptos, ya que son básicos en la función que hace la suspensión en el vehículo.

Se entiende por masa suspendida todos aquellos elementos que son soportados por el sistema de suspensión. En este caso incluirían el chasis y todo lo que éste contiene: motor, transmisión, piloto...

Las masas no suspendidas estarían constituidas por el resto de los componentes del vehículo, es decir, la propia suspensión, los frenos y las ruedas.

Se tratará de disminuir todo lo posible la masa no suspendida, minimizando el peso de los elementos que la componen, lo cual mejorará la dinámica y control del vehículo.

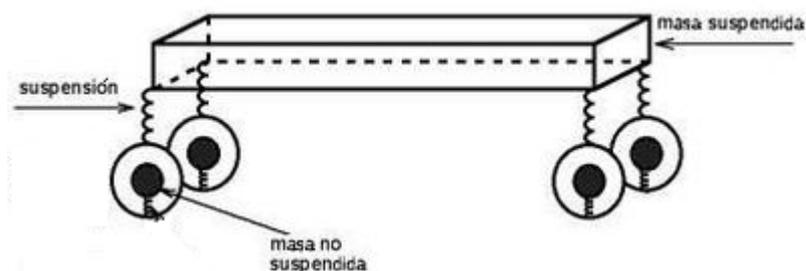


Ilustración 2.5: Masa suspendida y no suspendida

## 2.2 FÓRMULA STUDENT

### 2.2.1 DESCRIPCIÓN

La Formula Student es una competición automovilística, en la que universidades de todo el mundo son retadas a diseñar y construir un monoplaza. En ella los estudiantes tienen la oportunidad de poner en práctica los conocimientos adquiridos durante la carrera, fomentando su aprendizaje autónomo y mejorando su formación. En el transcurso del proyecto se demuestran sus conocimientos y capacidad de trabajar en equipo, además de tener una toma de contacto con las carreras y la industria automotriz.

El propósito general es simular una situación real en la que una compañía contrata ingenieros de carreras para desarrollar un prototipo de altas prestaciones en cuanto a potencia, estabilidad, mantenimiento y fiabilidad, a un coste razonable.

Los diseños son examinados de manera práctica y teórica y se evalúa aparte de la construcción del coche, aspectos económicos y de marketing de cada participante. El equipo ganador no es simplemente el que tenga el coche más rápido, sino el que presente un proyecto más sólido en todos los aspectos evaluados.

Los fondos necesarios para la construcción del prototipo son normalmente proporcionados por proveedores o patrocinadores, entrando en juego la estrategia de negocio de cada equipo.



Ilustración 2.6: Equipos participantes Formula Student Germany 2015

### 2.2.2 HISTORIA

En 1981 la SAE (*Society of Automotive Engineers*) organiza en Estados Unidos la primera edición bajo el nombre de Fórmula SAE, la cual tuvo lugar en la Universidad de Texas, Austin.



En las pruebas estáticas se evalúa la presentación del equipo, el diseño y el análisis de costes. Previamente se realiza una inspección técnica al monoplaza para comprobar que cumple con la normativa, que, aunque no puntúa, ha de ser favorable para que el equipo pueda seguir adelante en la competición.

Las pruebas dinámicas se realizan en el circuito y se dividen en aceleración, ski-pad, autocross y resistencia. También se evalúa la eficiencia mediante el consumo de combustible en esta última prueba.

El total de puntos obtenibles es 1000 y el ganador será el equipo que consiga la puntuación mayor.

### SISTEMA DE PUNTUACIÓN

	<i>PRUEBAS</i>	<i>PUNTUACION</i>
<b>EVENTOS ESTÁTICOS</b>	Presentación	75
	Diseño	150
	Análisis de Costes	100
<b>EVENTOS DINÁMICOS</b>	Aceleración	75
	Ski-Pad	50
	Autocross	150
	Eficiencia	100
	Resistencia	300
<b>TOTAL</b>		<b>1000</b>

Tabla 2.2: Sistema de puntuación

A continuación, se describe cada tipo de prueba en detalle.

### 2.2.3.1 PRUEBAS ESTÁTICAS

#### INSPECCIÓN TÉCNICA

En ella los jueces determinan si el vehículo cumple con la normativa SAE y si puede participar en las pruebas dinámicas.

Se compone de tres pruebas:

- Revisión eléctrica y mecánica.

Se realizan las comprobaciones pertinentes a estos dos campos con respecto a la normativa

- Prueba de inclinación.

En ella el monoplaza se inclina en una plataforma, debiendo aguantar 45° sin perder combustible ni fluido de ningún tipo y 60° sin volcar.

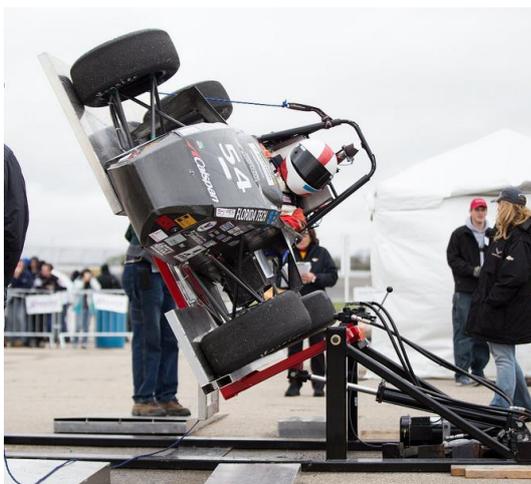


Ilustración 2.8: Prueba de inclinación

- Prueba de ruido, interruptor principal, test de lluvia y prueba de frenada.

Se realizan una serie de comprobaciones de seguridad que varían dependiendo del tipo de vehículo.

#### PRESENTACIÓN

En esta prueba se evalúa el plan de negocio planteado por cada equipo, en la que se debe convencer a un supuesto grupo de clientes de que el proyecto es viable en cuanto a su fabricación y comercialización.

## DISEÑO

Se evalúa la viabilidad de las soluciones adoptadas en el diseño realizado por el equipo según criterios de ingeniería. Un conjunto de jueces examina su realización y las discute con los estudiantes.

## ANÁLISIS COSTES

Cada equipo debe presentar un informe antes de la competición en el que se detallan todos los costes asociados a los materiales y procesos utilizados en la fabricación del prototipo, el cual será discutido con los jueces.

### 2.2.3.2 PRUEBAS DINÁMICAS

#### ACELERACIÓN

En esta prueba se trata de medir la máxima aceleración longitudinal que el monoplaza es capaz de desarrollar recorriendo un tramo recto y llano de 75 metros, obteniendo mayor puntuación mientras menor sea el tiempo empleado.

#### SKI-PAD

En esta prueba se evalúa el comportamiento ante la aceleración lateral generada al recorrer una pista en forma de 8 de radio constante y pavimento llano. El diámetro interior de cada círculo es de 15,25m, y el exterior 21,25m. Los centros de ambos círculos se encuentran a 18,25m el uno del otro. El ancho del camino queda de 3m en todos los puntos del recorrido.



Ilustración 2.9: Prueba de Ski-Pad

## AUTOCROSS

La prueba trata de evaluar el comportamiento en circuito, recorriendo un tramo de aproximadamente 1km que combina tramos rectos y curvas, en los que se ponen a prueba las capacidades de aceleración frenada y paso por curva de los monoplazas

## RESISTENCIA

Es la prueba de mayor peso de la competición y la más exigente. Consiste en recorrer un total de 22km poniendo a prueba la fiabilidad y rendimiento general del monoplaza.

## EFICIENCIA

Se lleva a cabo durante la prueba de resistencia de la que se evalúa el combustible consumido, obteniendo mayor puntuación mientras menor haya sido este.



Ilustración 2.10: Prueba de resistencia y eficiencia

### 2.2.4 NORMATIVA

La organización suministra una extensa normativa en la que se detallan aspectos del diseño que no deben ser infringidos.

A continuación, se incluyen los que podrían afectar al diseño de las manguetas traseras del cual se ocupa este proyecto.

## RECORRIDO DE LA SUSPENSIÓN

El vehículo debe estar equipado con un sistema de suspensión totalmente operativo con amortiguadores delanteros y traseros, con un recorrido de la rueda utilizable de al menos 50,8 mm (2 pulgadas), 25.4 mm (1 pulgada) arriba y 25.4 mm (1 pulgada) abajo, con el conductor sentado. Los jueces se reservan el derecho a descalificar a los coches que no representan un intento serio de un sistema de suspensión de funcionamiento o que demuestran la manipulación inapropiada para un circuito de Autocross.

(Norma T6.1.1 2015 Formula SAE® Rules)

## PUNTOS DE LA SUSPENSIÓN

Todos los puntos de montaje de suspensión deben ser visibles en la Inspección Técnica, ya sea por visión directa o mediante la eliminación de las cubiertas.

(Norma T6.1.2 2015 Formula SAE® Rules)

## RUEDAS

Las ruedas del coche deben ser 203,2 mm (8,0 pulgadas) o más de diámetro.

(Norma T6.3.1 "Wheels" 2015 Formula SAE® Rules)

Cualquier sistema de montaje de la rueda que utiliza una sola tuerca de retención debe incorporar un dispositivo para retener la tuerca y la rueda en el caso de que la tuerca se afloje. Una segunda tuerca ("contra tuerca") no cumple con estos requisitos.

(Norma T6.3.2 "Wheels" 2015 Formula SAE® Rules)

## ELEMENTOS DE SUJECIÓN Y SEGURIDAD

Todas las uniones roscadas utilizados en la estructura celular del conductor, los sistemas de dirección, frenado, arnés y suspensión del conductor deben cumplir o superar, grado 5 SAE, grado 8.8 Métricas y/o especificaciones AN/MS.

(Norma T11.1.1 "Fastener Grade Requirements" 2015 Formula SAE® Rules)



Se prohíbe el uso de tornillos Allen de cabeza redonda, cabeza chaflanada, cabeza plana o tornillos de cabeza redonda o tornillos en lugares críticos. Estos lugares incluyen la estructura celular del conductor, y el arnés del conductor.

Nota: Se permiten los tornillos o pernos (a veces llamados tornillos de cabeza hueca o tornillos/pernos Allen) de cabeza hexagonal empotrada.

(Norma T11.1.2 “Fastener Grade Requirements” 2015 Formula SAE® Rules)

Todo perno, tuerca y otros elementos de sujeción críticos, en la dirección, los frenos, arnés del conductor y la suspensión, se deben asegurar el aflojamiento no intencionado por uso de mecanismos de bloqueo. Los mecanismos de bloqueo incluyen:

1. Cables de seguridad instalados correctamente.
2. Doble tuerca de seguridad.
3. Pasadores con alas.
4. Tuercas con inserción de nailon.
5. Tuercas autoblocantes.

Nota: Las arandelas de seguridad y pegamento de fijación, por ejemplo, *Loctite*, no cumplen con el requisito de mecanismos de bloqueo.

(Norma T11.2.1 “Securing Fasteners” 2015 Formula SAE® Rules)

Debe haber un mínimo de dos filos de rosca completos que sobresalgan de cualquier tuerca de seguridad.

(Norma T11.2.2 “Securing Fasteners” 2015 Formula SAE® Rules)

Todos los extremos de la barra con rótula y rodamientos esféricos en la dirección o la suspensión, deben estar entre dos cuerpos capturados por un conjunto tornillo/tuerca o distanciados con un diámetro exterior más grande que el diámetro interior de la rótula, evitando que escapen.

(Norma T11.2.3 “Securing Fasteners” 2015 Formula SAE® Rules)



Los extremos de las rótulas ajustables deben ser restringidos con una tuerca de seguridad para evitar que se aflojen.

(Norma T11.2.3 “Securing Fasteners” 2015 Formula SAE® Rules)

# CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN

---

## 3.1 INTRODUCCIÓN

Las manguetas son un componente crítico de la suspensión, al interactuar con ellas buena parte de la geometría del sistema. La localización de estos componentes determinará posteriormente ciertos conceptos importantes para la configuración del sistema.

El siguiente capítulo hace una breve descripción de estos conceptos, así como de algunos de los diferentes tipos de sistemas de suspensión y sus componentes, buscando facilitar la comprensión de la fase de diseño en la que será importante tener claros algunos de ellos.

## 3.2 SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

El sistema de suspensión de un automóvil es uno de sus conjuntos más importantes. Su función es garantizar el confort de los ocupantes y la estabilidad de la trayectoria al absorber las irregularidades del terreno. El principio de funcionamiento básico es interponer elementos elásticos y de amortiguación entre las masas suspendida y no suspendida.

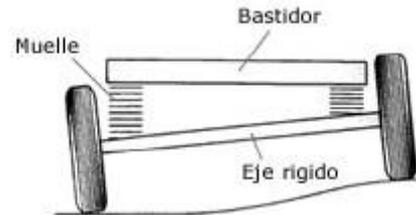
En competición, a diferencia de los sistemas montados en coches de calle, el diseño se enfoca en aumentar las prestaciones del coche en detrimento de la comodidad del piloto. Se busca obtener la máxima tracción posible que puedan ofrecer los neumáticos para así mejorar la aceleración y el paso por curva, manteniéndolos en todo momento en contacto con el suelo.

Otros de los requerimientos que tiene este sistema, es proporcionar una estabilidad adecuada ante el balanceo del vehículo, transmitir las fuerzas de aceleración y frenada entre el chasis y los ejes y resistir los esfuerzos generados durante la conducción del vehículo.

Existen muchos tipos y clasificaciones de los sistemas de suspensión. A continuación, se incluye una breve descripción de los sistemas de eje rígido e independiente y los tipos más utilizados de cada uno.

### 3.2.1 EJE RÍGIDO

Es uno de los sistemas más básicos y antiguos que se utilizan. Destaca por su sencillez, en especial la configuración de ballestas longitudinales. En él, las ruedas están unidas mediante un eje conjunto. Cuando el vehículo atraviesa un obstáculo, el eje entero se inclina según la dirección del terreno.



Ofrece una robustez considerable, por eso es utilizado en vehículos pesados y en todoterrenos, al permitir una gran elevación del chasis y mantener invariable la orientación de las ruedas con respecto al terreno.

Ilustración 3.11: Funcionamiento sistema de eje rígido

Tiene la desventaja de producir inestabilidades y vibraciones, sobre todo si se utiliza en el eje delantero, además de tener un peso elevado.



Ilustración 3.2: Ejemplo sistemas de eje rígido

### 3.2.2 EJE INDEPENDIENTE

Es el sistema más utilizado actualmente y el que mejores prestaciones ofrece. Permite independizar el movimiento de ambas ruedas del eje mediante el anclaje de los muelles y amortiguadores directamente entre las ruedas y el chasis. Posee varias ventajas sobre los sistemas de eje rígido, como la disminución de la masa no suspendida y una menor oscilación del chasis ante los

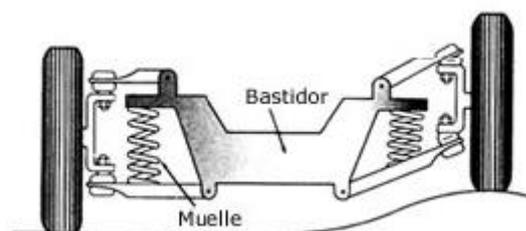


Ilustración 3.3: Funcionamiento sistema de eje independiente

obstáculos, ofreciendo mayor comodidad.

Existen muchos tipos de suspensiones con eje independiente, a continuación, se describen dos de ellos.

## MCPHERSON

Fue desarrollada por Earle S. McPherson, ingeniero de Ford del cual recibe su nombre. Es el sistema más extendido actualmente para el tren delantero, aunque también se puede montar en el trasero.

Su éxito se debe a que es uno de los diseños más sencillos en cuanto a fabricación y mantenimiento, además de tener un bajo coste de fabricación y ocupar poco espacio, lo que lo hace muy apropiado para las ruedas directrices y para motores transversales.

Está compuesto por un mecanismo de tipo triángulo articulado con un solo grado de libertad. Sus componentes principales son el brazo inferior, la mangueta y el conjunto muelle-amortiguador. Este último va montado sobre la propia mangueta y por el otro extremo se ancla directamente al bastidor, lo que hace necesaria una alta rigidez para no sufrir roturas. Por tanto, cumple además de la función de amortiguación de las irregularidades del terreno, funciones estructurales y de guiado.

Como desventajas se podría citar que al comprimirse la suspensión el ángulo de caída varía, lo cual no es deseable y también que al ser el amortiguador un elemento estructural produce más vibraciones que otro tipo de suspensiones y un menor confort.



Ilustración 3.4: Sistema McPherson

## PARALELOGRAMO DEFORMABLE

También denominada de triángulos superpuestos o de trapecio articulado, es junto con el sistema McPherson la más utilizada actualmente tanto para el eje delantero como para el trasero.

A diferencia del sistema McPherson consta de dos brazos y el sistema muelle-amortiguador no va montado directamente sobre la mangueta, sino sobre el brazo inferior.

Es uno de los sistemas más avanzados y además es el precursor de los sistemas más modernos que se utilizan hoy en día en competición y que se explican en el apartado siguiente.



*Ilustración 3.512: Sistema de paralelogramo deformable*

### 3.3 SISTEMAS DE COMPETICIÓN

Buscando mejorar la aerodinámica y reducir el peso al máximo, se desarrolla en el mundo de la competición un sistema similar al de triángulos superpuestos, pero con mayor esbeltez y ligereza.

Como consecuencia se construyen los triángulos con tubo de mínima sección y se coloca el muelle y el amortiguador dentro de la carrocería, siendo estos accionados mediante una barra adicional a través de una bieleta.

Existen dos sistemas básicos:

## PULL-ROD

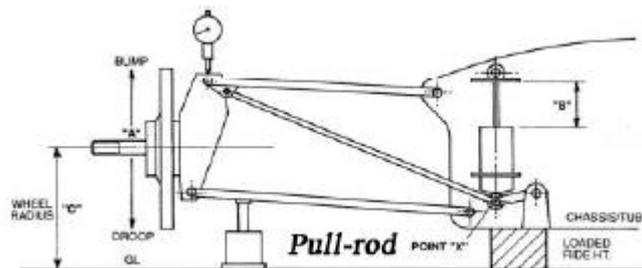


Ilustración 3.6: Sistema Pull-Rod

## PUSH-ROD

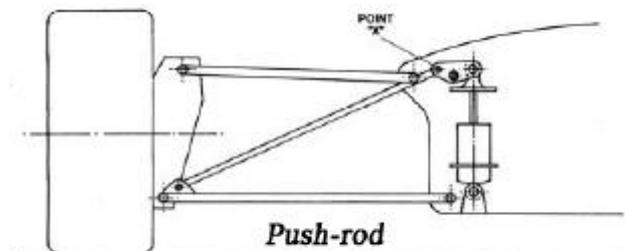


Ilustración 3.713: Sistema Push-Rod

La única diferencia entre ellos consiste en la disposición de la barra que sirve de accionamiento del amortiguador, que en el sistema Pull-Rod está sometida a tracción y en el sistema Push-Rod a compresión.

Esto puede suponer una ligera ventaja para el sistema que trabaja a tracción, el más utilizado, ya que al no tener problemas de pandeo se podría reducir su sección, haciéndola más ligera y aerodinámica. Por otra parte, el sistema Pull-Rod permite colocar los amortiguadores más abajo, reduciendo la altura del centro de gravedad y mejorando la dinámica del vehículo.

### 3.4 MODELADO

El modelo de suspensión elegido ha sido de triángulos superpuestos asimétricos con la barra de accionamiento en disposición Push-rod, al considerarse que era el que mejor se adaptaba a los requerimientos de la competición.

Se desarrolló un modelo cinemático multicuerpo para poder analizar el comportamiento de la suspensión trasera ante diferentes solicitaciones. Para ello se utilizó el módulo *Simulink* del programa MATLAB, concretamente la herramienta *SimMechanics*, un entorno de simulación de sistemas mecánicos en el que se pueden modelar mediante bloques los diferentes componentes y las articulaciones entre ellos.

El modelado de la suspensión se realiza definiendo las conexiones de las barras que la componen, con cinco puntos de anclaje al chasis y cuatro a la mangueta, siendo la mayor restricción el espacio disponible.

Después se crean distintos modelos matemáticos en los que son formuladas ecuaciones de movimiento que permiten resolver el sistema. Uno de ellos es el modelo de cuarto de suspensión del coche, cuya representación en el diagrama de bloques se muestran en la siguiente figura.

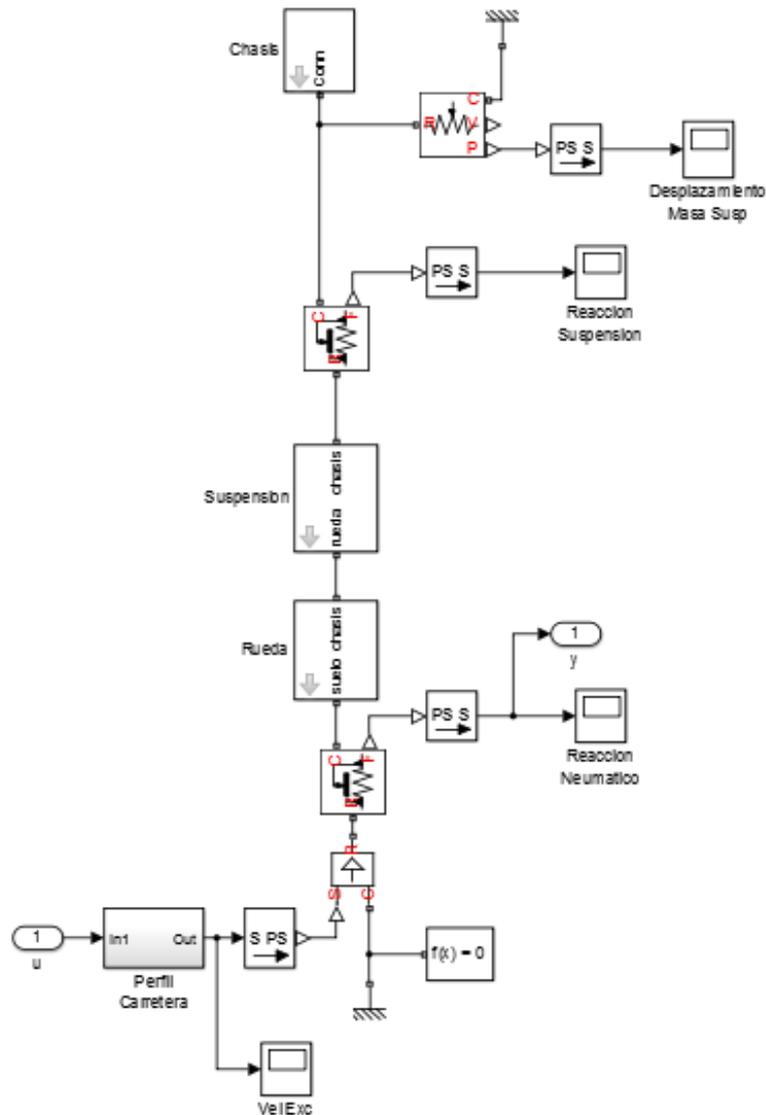


Ilustración 3.8: Diagrama de bloques del modelo de cuarto de suspensión

Una vez constituido el modelo permite determinar el comportamiento cinemático del conjunto y las reacciones en la suspensión y en la rueda ante un determinado perfil de carretera u otro tipo de entrada. Por ejemplo, analizando la respuesta ante una entrada bache de 30mm se obtienen las siguientes gráficas.

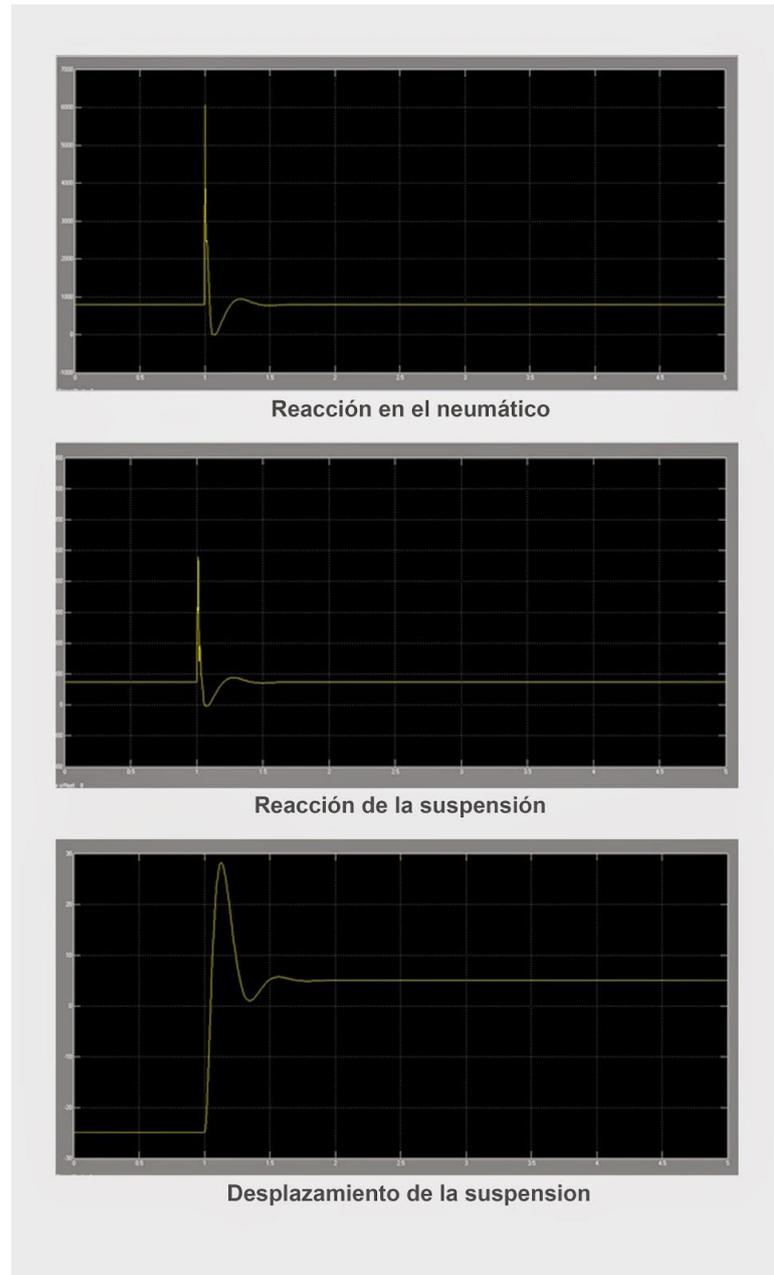


Ilustración 3.9: Gráficas salida modelado

A partir de este estudio es posible definir características importantes para el diseño y posicionamiento de los componentes del sistema. Por ejemplo, los puntos de anclaje óptimos en función de los parámetros de diseño del sistema de suspensión definidos previamente por miembros del equipo.

### COMPORTAMIENTO SUSPENSIÓN TRASERA

Desplazamiento máx. Suspensión Trasera (m)	0,03
Deformación Rueda Trasera Posición neutra (m)	5,73E-03
Deformación Rueda Trasera (m)	2,80E-03
Anti-Lift	30%
Rigidez Centro Rueda Trasera (N/m)	9,23E+03
Rigidez Suspensión Rueda T por Rueda(N/m)	1,27E+03
Relación transmisión Bieleta	0,5
Rigidez Muelle Suspensión Trasera (N/m)	1,85E+04
Rigidez Torsión delantera (Nm/rad)	4,50E+04
Rigidez Torsión por Suspensión (Nm/rad)	1,07E+03
Rigidez Sistema Anti Vuelco (Nm/rad)	4,39E+04
Vuelco Aceleración Lateral (grados)	1,04E+00
Frecuencia (Hz)	0,65471624

Tabla 3.1: Parámetros sistema de suspensión

Siguiendo un proceso iterativo de optimización de los parámetros de diseño, las coordenadas obtenidas para los puntos exactos de anclaje del sistema de suspensión trasero fueron:

<b>Anclaje chasis 1</b>	[0 200 129.8]
<b>Anclaje chasis 2</b>	[-580.7 200 143.3]
<b>Anclaje chasis 3</b>	[-580.7 230 318.9]
<b>Anclaje chasis 4</b>	[0 230 325.9]

Anclaje chasis 5	[80 200 122]
Anclaje mangueta 1	[0 -41.1 -97]
Anclaje mangueta 2	[0 -64.6 127]
Anclaje mangueta 3	[80 -41.1 -97]
Anclaje mangueta 4	[20 -40 -70]

Tabla 3.2: Coordenadas puntos anclaje suspensión

### 3.5 PARÁMETROS DE DISEÑO

A la hora de definir un sistema de suspensión hay una serie de parámetros cruciales que deben ser estudiados y tenidos en cuenta en el diseño. Algunos de los más importantes, como el ángulo de caída o la divergencia, se describen en este apartado.

#### ÁNGULO DE CAÍDA O CAMBER

Se define como el ángulo entre el plano de la rueda y el plano vertical del vehículo. Se considera positivo cuando la parte inferior de la rueda se acerca al vehículo y negativo cuando se produce lo contrario.

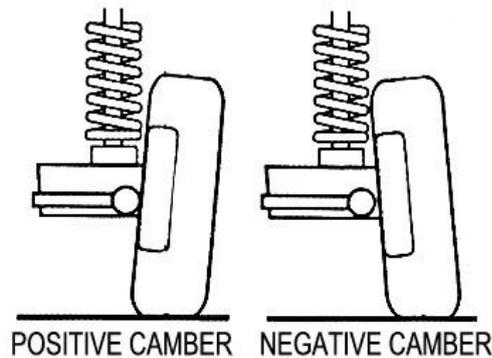


Ilustración 3.10: Definición camber

Es uno de los parámetros de diseño más importantes de la suspensión ya que propiedades como el agarre de los neumáticos están fuertemente relacionadas con del ángulo de caída.

Un ángulo negativo proporciona un mejor manejo del vehículo en el paso por curva comparado con un ángulo positivo, debido a la transferencia de carga que se produce desde la rueda interior hacia la rueda exterior. Esto provoca

que la rueda exterior tenga una influencia mucho mayor en el agarre, pudiéndose hacer máxima la fuerza lateral si el ángulo de caída es el óptimo, al aumentar el área de contacto del neumático. Sin embargo, esto resulta al revés en la rueda interior, aunque no es significativo debido a la transferencia de carga. Por otro lado, al considerar el caso de aceleración y frenada máxima, la mayor fuerza longitudinal se obtiene para un camber nulo.

En la siguiente gráfica se muestran los resultados de la relación entre el cambio de ángulo y el desplazamiento de la suspensión ante un bache obtenidos del modelo cinemático.

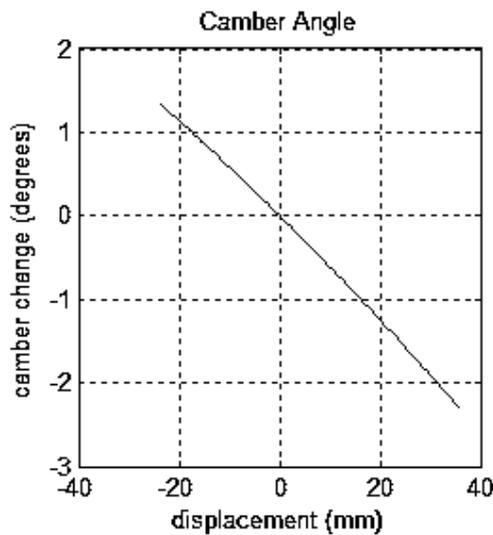


Ilustración 3.11: Gráfica variación camber/desplazamiento

### DIVERGENCIA O TOE

Es un parámetro de alineación que describe como están las ruedas orientadas entre ellas.

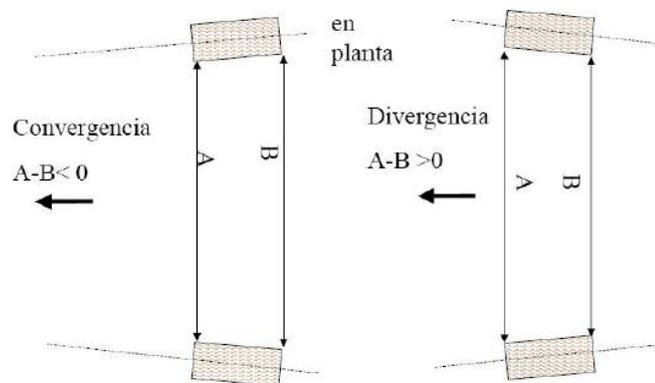


Ilustración 3.12: Definición divergencia

La divergencia tiene influencia en el comportamiento del coche a la entrada de las curvas.

Será más difícil para un vehículo girar, cuanto mayor sea la divergencia entre las ruedas y más fácil mientras menor divergencia (mayor convergencia).

Este fenómeno puede ser explicado por el hecho de que los radios del giro de las ruedas interior y exterior son diferentes al tomar una curva y una divergencia negativa hace que en la rueda interior dicho radio sea menor. Esto provoca una tendencia al coche hacia el interior de la curva, además de compensar la transferencia de carga hacia el exterior, facilitando la trayectoria.

Además, la divergencia afecta al comportamiento subvirador del vehículo. Al aumentar el ángulo se incrementa la fuerza lateral durante el paso por curva, y si esto se produce en las ruedas traseras, habrá tendencia al subviraje lo que supone un aumento de la estabilidad.

También aumenta el desgaste de los neumáticos al estar orientado el uno hacia al otro y producirse algo de deslizamiento. Una divergencia positiva hará que se desgaste más el borde exterior, mientras que con una negativa el exceso de desgaste se producirá en la parte interior del neumático. Una rueda con camber negativo también favorece mayor desgaste en su parte interior, por lo tanto, la combinación de ambos parámetros ha de ser elegida cuidadosamente para evitar que se produzca un desgaste excesivo de los neumáticos.

A continuación, se muestra la gráfica de la relación entre el valor del ángulo de divergencia de las ruedas y el desplazamiento de la suspensión ante un bache obtenido del modelo cinemático.

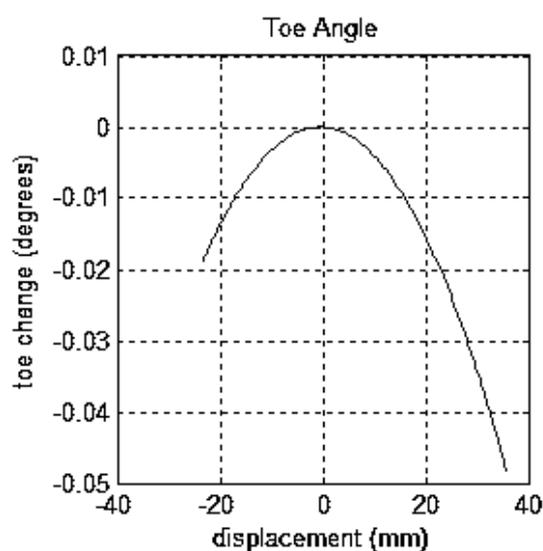


Ilustración 3.13: Gráfica variación divergencia/desplazamiento

## ÁNGULO DE AVANCE O CASTER

Se define como el ángulo formado entre el eje vertical pasante por el centro de la rueda y el eje del pivote desde la vista lateral del vehículo.

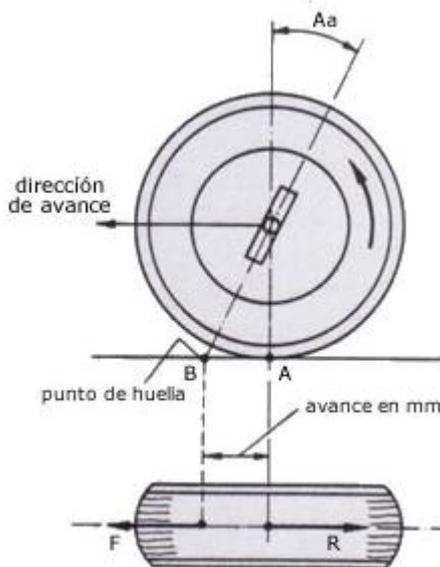


Ilustración 3.14: Definición caster

Cuando la tracción se realiza desde las ruedas traseras tiende a producirse cierta inestabilidad en la dirección.

El motivo de este ángulo es corregir la inestabilidad de forma que el eje del pivote corte a la línea de desplazamiento algo por delante del punto de apoyo de la rueda. Con ello se consigue que se produzca un par de autoalineamiento de la rueda, al hacer que ambos puntos tiendan a estar siempre en la misma línea.

A continuación, se muestra la gráfica con la relación entre la variación del ángulo de avance y el desplazamiento de la suspensión ante un bache obtenida del modelo cinemático.

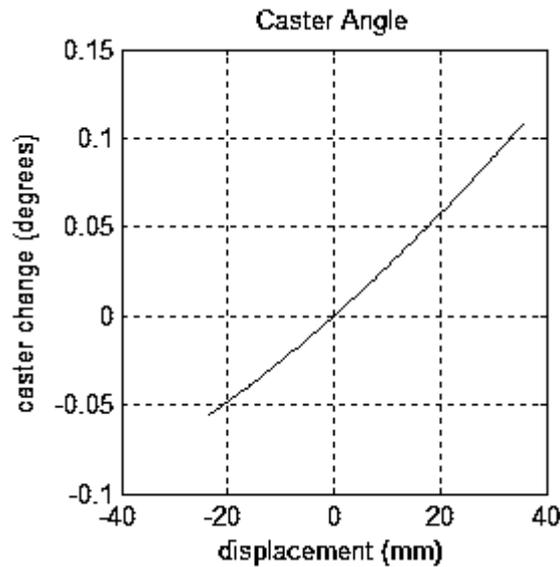


Ilustración 3.15: Gráfica variación caster/desplazamiento

**ANTI-SQUAT**

Anti-squat o anti-hundimiento, sirve para cuantificar el total de fuerzas longitudinales generadas en la suspensión durante la aceleración. Se expresa como un porcentaje:

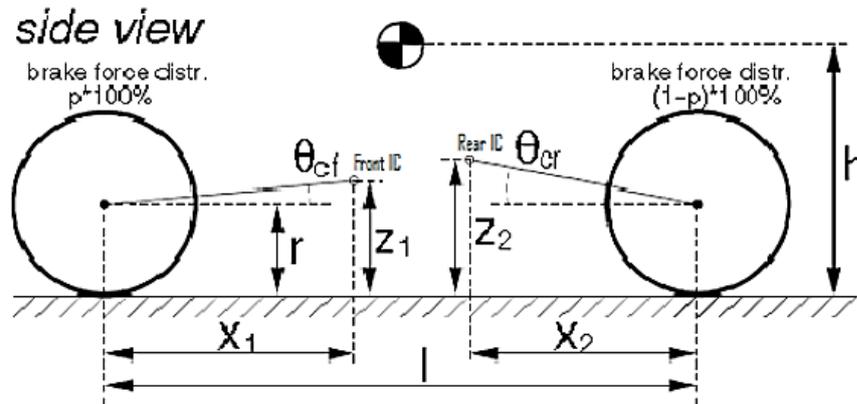


Ilustración 3.16: Definición Anti-squat

En la figura,  $h$  y  $l$ , representan, respectivamente, altura del centro de gravedad y distancia entre ejes. El anti-squat se define de la siguiente manera:

$$anti - squat = \frac{\tan(\theta_{cr})}{\frac{h}{l}} \cdot 100\%$$

Ecuación 3.1: Fórmula anti-squat

El porcentaje anti-squat se determina calculando la relación entre la tangente del ángulo formado por la línea que, trazada desde el centro de la rueda trasera intersecta con el centro instantáneo de rotación de esta en vista lateral, con la relación entre la altura del centro de gravedad y la distancia entre ejes. Si la altura de este punto de intersección está a la misma altura del centro de gravedad, se dice que la suspensión tiene un 100% de anti-squat.

Diferentes porcentajes de anti-squat pueden ser aplicados dependiendo del diseño de la suspensión. Para los porcentajes más altos, la transferencia de peso en aceleración será absorbida por las barras de suspensión en lugar de los muelles. En cambio, para los porcentajes más bajos de anti-squat, la transferencia de carga longitudinal es en su mayoría tomada por los resortes. En este caso, durante los primeros milisegundos de transferencia de carga, un porcentaje del aumento de la carga vertical se absorbe a través de la compresión del muelle en lugar de ser aplicado directamente a la superficie de contacto del neumático.

En la siguiente gráfica se muestran los resultados para el anti-squat obtenidos del modelado.

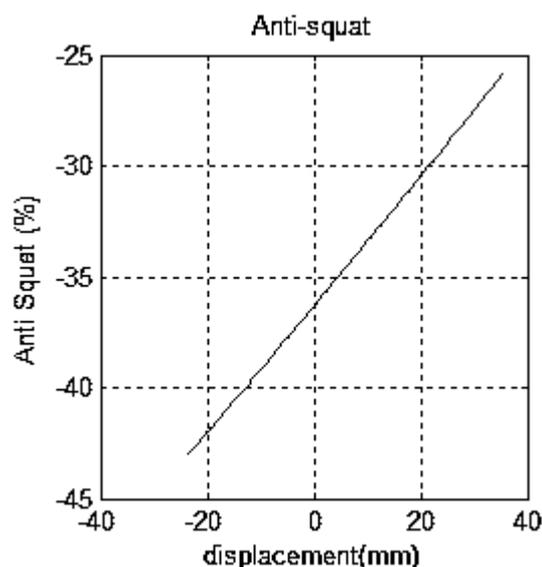


Ilustración 3.17: Gráfica variación anti-squat/desplazamiento

## ANTI-LIFT

El porcentaje anti-lift o anti-levantamiento, es importante en la parte trasera cuando se produce el frenado. Sirve para cuantificar las fuerzas de frenado que se transmiten longitudinalmente a través de los enlaces de suspensión, la cual evita la elevación de la parte trasera del vehículo.

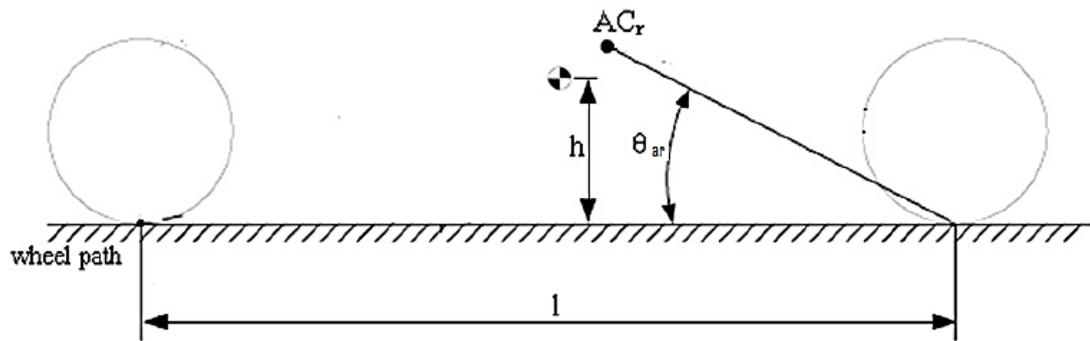


Ilustración 3.18: Definición anti-lift

En la figura,  $h$  y  $l$ , representan, respectivamente, altura del centro de gravedad y distancia entre ejes, siendo  $p$  la distribución de las fuerzas de frenado. El anti-lift se define de la siguiente manera:

$$\text{anti-lift} = \frac{\tan(\theta)}{h/(l(1-p))} \cdot 100\%$$

Ecuación 3.2: Fórmula anti-lift

El porcentaje de anti-lift se determina mediante el cálculo de la relación entre la tangente del ángulo formado por la intersección entre línea que se extiende desde el punto de contacto del neumático con la carretera en vista lateral, con otra línea vertical trazada desde el centro instantáneo de rotación de la rueda trasera, dividido entre la relación entre la altura del centro de gravedad y la distancia entre ejes multiplicada por  $(1-p)$ . Si la altura de este punto de intersección está a la misma altura del centro de gravedad, se dice que la suspensión tiene un 100% anti-lift. Cabe señalar también que el porcentaje anti-lift depende de la distribución de fuerza de frenado. Para las distribuciones más altas de fuerza de frenado, se aumenta la cantidad de anti-lift. Un ejemplo extremo correspondería a un valor superior al 100%. Esto se aplicaría, por ejemplo, al brazo basculante trasero de motocicletas para aumentar la tracción durante la aceleración.

El porcentaje de anti-lift está íntimamente relacionado con el de anti-squat, no siendo posible calcular uno de ellos de forma independiente del otro.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos del modelo cinemático en relación con este parámetro.

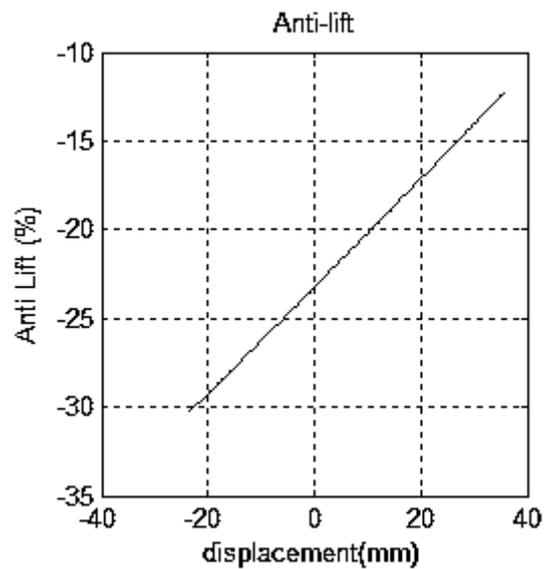


Ilustración 3.19: Gráfica variación anti-lift/desplazamiento

### 3.6 DESCRIPCIÓN COMPONENTES

En este apartado se definen los componentes que forman el sistema de suspensión diseñado para el vehículo, agrupados en los diferentes subsistemas que lo componen.

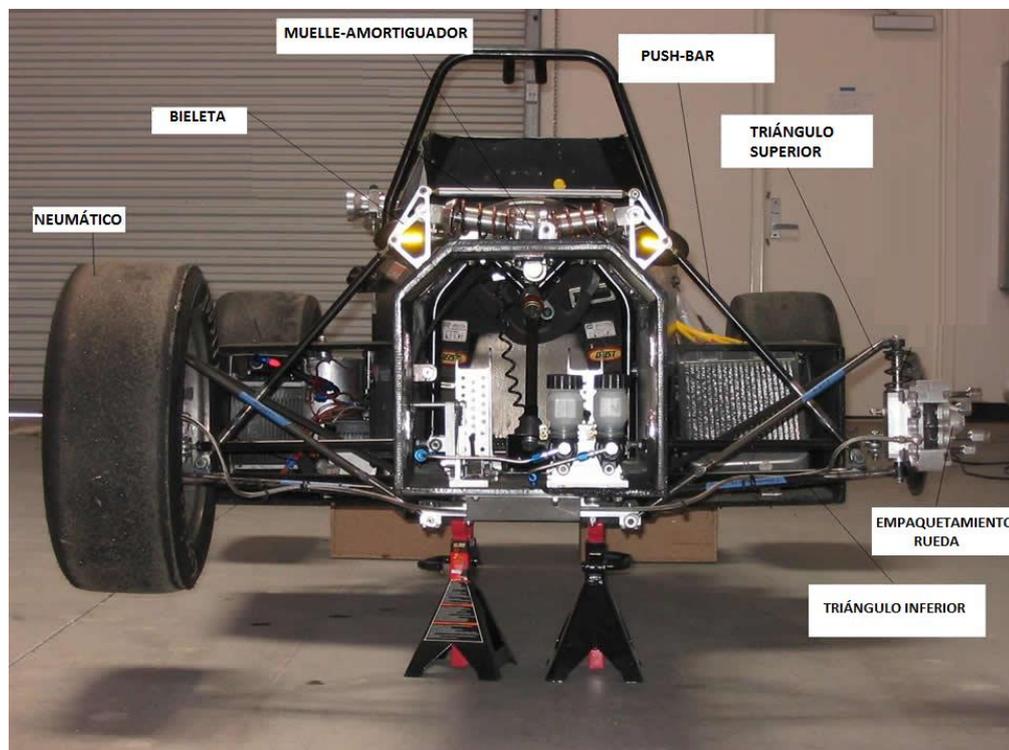


Ilustración 3.20: Sistema de suspensión de un Fórmula Student

### 3.6.1 GEOMETRÍA

Está formada por las diferentes barras que componen la suspensión. Como se comentó anteriormente, se trata de un sistema multibrazo tipo pushbar, formado por dos triángulos asimétricos, una barra de reglaje y la pushbar.

#### TRIÁNGULOS

Son el elemento principal de la geometría de la suspensión. Su función es sujetar la mangueta haciendo de unión de esta con el chasis, permitiéndole oscilar ante irregularidades del terreno. Cada una de las ruedas lleva dos triángulos, el superior y el inferior y cada triángulo consta de 3 puntos de anclaje, dos con el chasis y uno con la mangueta. Están compuestos por tubo de acero inoxidable, de 25mm de diámetro exterior.

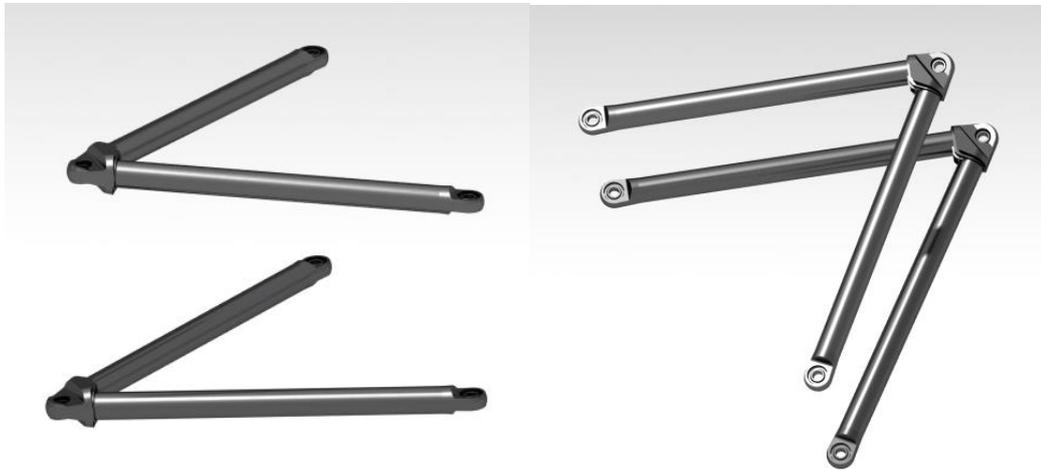


Ilustración 3.21: Triángulos suspensión

#### BARRA REGLAJE

Para que la mangueta quede con un solo grado de libertad hace falta otro anclaje más con el chasis, el cual se realiza por medio de esta barra. Además de esta función tiene la de poder ajustar la divergencia de las ruedas acortando o alargando su unión con el portarrotulas. Al igual que los triángulos se compone de un tubo de acero de 25mm.

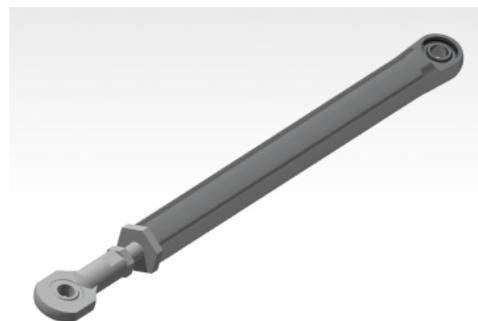


Ilustración 3.22: Barra de reglaje

En la suspensión delantera su función sería la de girar las ruedas movida por el sistema de dirección del vehículo.

## PUSHBAR

Su función es transmitir los desplazamientos verticales de la rueda para que puedan ser absorbidos por el sistema de suspensión, siendo una de las más importantes del sistema.

Se conecta por un extremo a la mangueta y por el otro a la bieleta, un balancín que se encarga de accionar el conjunto muelle-amortiguador.

Su construcción se realiza mediante un tubo de acero de 25mm al igual que el resto de componentes de la geometría de la suspensión.



Ilustración 3.23: Push-Bar

## PUNTOS DE UNIÓN

Los puntos de la suspensión se unirán mediante el uso de rodamientos esféricos o rótulas que permiten el giro alrededor de un punto central en dos direcciones ortogonales dentro de un límite angular especificado. Cada uno de los brazos de la suspensión llevará un elemento de este tipo en ambos extremos.



Ilustración 3.24: Rótulas

Para albergar las rótulas se necesita otro elemento que se denominará portarrotulas y que se unirá a las barras de la geometría de la suspensión. Se podrá optar entre elegir uno de los catálogos comerciales o fabricarlos. Este último es el caso de los triángulos, que debido a su geometría específica se decidió fabricar el componente mediante mecanizado de aluminio de alta resistencia.



Ilustración 3.25: Portarrótulas mecanizado

En el caso de otras barras como la de reglaje con una geometría más simple se optó por montar un portarrotulas comercial. Se trata de elementos normalizados muy utilizados en la industria automotriz. Poseen alta resistencia debida a tratamiento térmico y un vástago que permite su acople a las barras.



Ilustración 3.26: Portarrótulas comercial

### 3.6.2 EMPAQUETAMIENTO RUEDAS

Subconjunto formado por los componentes que hacen de unión entre la geometría de la suspensión y la rueda, conteniendo a esta última. Está formado por mangueta, buje, llanta y neumático.

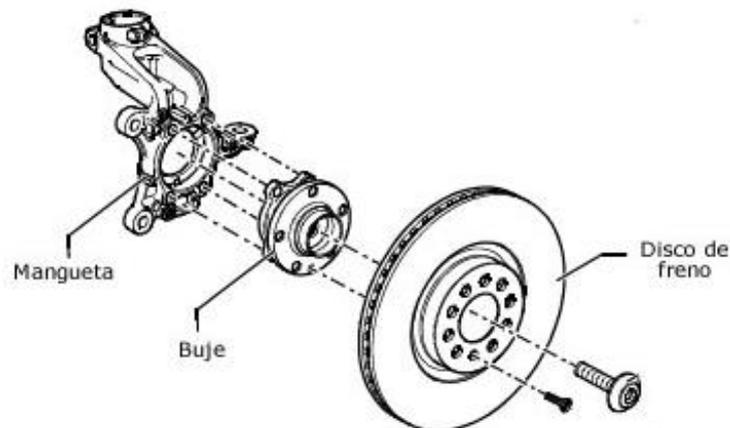


Ilustración 3.27: Esquema empaquetamiento

## BUJE

Es el elemento donde se apoya y gira el eje de la rueda, conectándola con el sistema de suspensión. Además, en el caso del buje trasero hace de conexión también con el sistema de transmisión.

Va unido a la junta homocinética por el lado interior y la llanta por el exterior. También va atornillado a él el disco de freno y giran de manera solidaria. Se compone de dos partes, un interior y otra exterior, las cuales se acoplan a través de un dentado. Su fabricación se llevará a cabo mediante mecanizado de acero.



Ilustración 3.28: Conjunto buje

La sujeción con la llanta se realiza utilizando una tuerca de seguridad y una arandela de retención. Este sistema garantiza que la unión entre ambas piezas no se pierda, cumpliendo con los requisitos de bloqueo positivo exigidos por las normas y facilitando el posterior montaje y desmontaje.

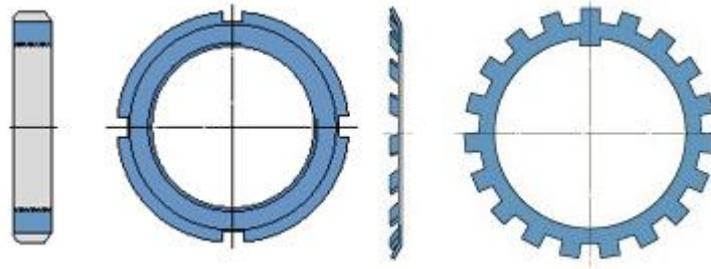


Ilustración 3.29: Tuerca de seguridad y arandela de retención

Para apoyar y guiar un eje se necesitan al menos dos rodamientos dispuestos a cierta distancia el uno del otro.

Debido a que las cargas sobre el eje se producen tanto en dirección axial como radial se elige una pareja de rodamientos de bolas de contacto angular que se montan en disposición en O debido a que proporciona más estabilidad ante el vuelco que la disposición en X.

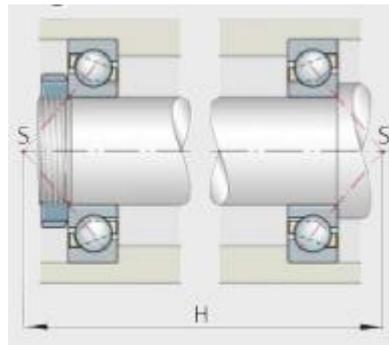


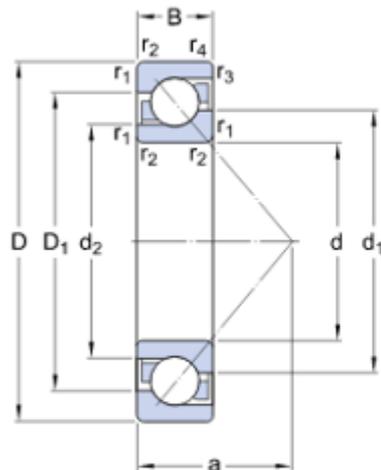
Ilustración 3.30: Eje apoyado sobre rodamientos de contacto angular

Los rodamientos guían y apoyan piezas con movimiento relativo entre ellas. Al hacer de apoyo absorben las fuerzas y las transmiten a las superficies sobre las que se apoyan, estableciendo una conexión entre los componentes estáticos y los que se encuentran en movimiento. La función de guiado radica en determinar la posición de las piezas con movimiento relativo con una precisión suficientemente alta.

A ambos lados se colocarán unos retenes pretensados cuya función será sellar la unión de una forma más efectiva, evitando la entrada de polvo y otros tipos de residuos que deterioren los rodamientos.

A continuación, se muestran las dimensiones de los rodamientos seleccionados para apoyar el eje, obtenidos del fabricante SKF.

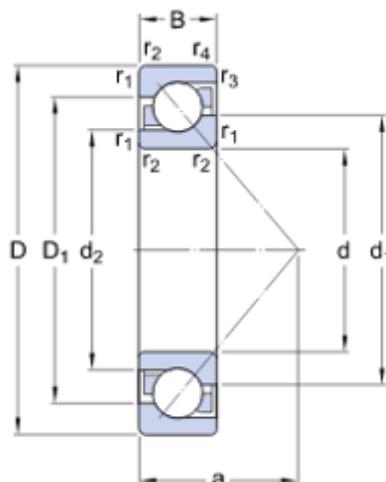
- Rodamiento interior (7208BEP):



d	40	mm
D	80	mm
B	18	mm
d <sub>1</sub>	≈ 56.25	mm
d <sub>2</sub>	≈ 48.08	mm
D <sub>1</sub>	≈ 65.55	mm
a	34	mm
r <sub>1,2</sub>	min. 1.1	mm
r <sub>3,4</sub>	min. 0.6	mm

Ilustración 3.31: Dimensiones rodamiento interior

- Rodamiento exterior (7209BEP):



d	45	mm
D	85	mm
B	19	mm
d <sub>1</sub>	≈ 60.85	mm
d <sub>2</sub>	≈ 52.68	mm
D <sub>1</sub>	≈ 70.15	mm
a	37	mm
r <sub>1,2</sub>	min. 1.1	mm
r <sub>3,4</sub>	min. 0.6	mm

Ilustración 3.32: Dimensiones rodamiento exterior

Las dimensiones de los retenes también se pueden encontrar en la página web de SKF bajo la denominación 47x90x10 HMS5 V para el interior y 52X85X10 HMS5 V para el exterior.

## LLANTAS

Las llantas son el componente donde se asienta el neumático, manteniéndolo unido al eje de la rueda. Normalmente se construyen en materiales metálicos,

aunque últimamente se están empezando a fabricar en materiales compuestos, como la fibra de carbono.

Las características más importantes de una llanta son:

- Diámetro efectivo (*Rim diameter*): diámetro medido entre los asientos del neumático y el centro del eje de rodadura. Este parámetro determina el diámetro del neumático.
- Ancho efectivo (*Rim width*): distancia medida entre los bordes opuestos de la llanta, denominados pestañas. Este parámetro determina el ancho de la banda de rodadura del neumático.
- ET (*Offset*): del alemán *Einpresstiefe*, indica la distancia desde la superficie de montaje de la llanta a la línea central de la rueda.

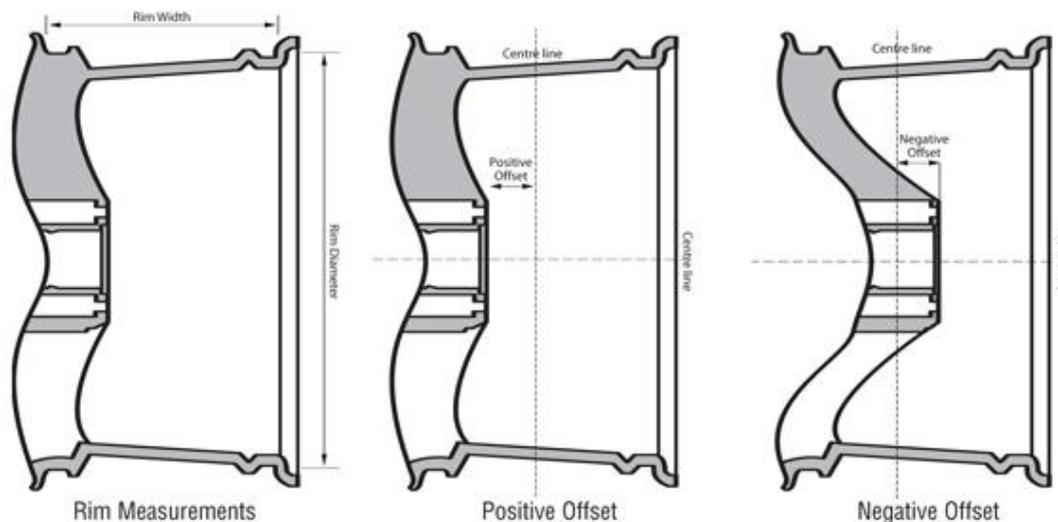


Ilustración 3.33: Parámetros llantas

El ET podrá ser positivo si la superficie de montaje está situada más hacia exterior que la línea central de la rueda, negativo si ocurre lo contrario o nulo si ambas coinciden.

En lo referente a las elegidas por el equipo, se decidió adquirir unas llantas del fabricante Braid, debido a su experiencia en la competición y su diseño específico para la Fórmula Student. En concreto el modelo Sturace, con un diámetro efectivo de 13", un ancho efectivo de 8", un peso de 2900g y un ET de 45mm positivo.



Ilustración 3.34: Llanta Braid

## NEUMÁTICOS

Debido a la cercanía de la factoría Michelin a Valladolid y su condición de sponsor del equipo, los neumáticos fueron seleccionados de su catálogo de neumáticos de competición.

Se optó por un modelo TB 16/53-13 con una rigidez a compresión de 138N/m, un diámetro de 13" y un ancho de 8", siendo compatible con el tipo de llantas elegidas.



Ilustración 3.35: Neumáticos Michelin

### 3.6.3 BIELETAS

La función de las bieletas consiste en transmitir el movimiento vertical de la rueda que llega desde la pushbar hacia el sistema de muelle-amortiguador. Por

lo tanto, deben ser coplanares tanto con el sistema de amortiguación como con los ejes de las pushbar.



Ilustración 3.36: Bieleta

La bieleta está compuesta principalmente por dos placas de acero Cr-Mo sujetas entre sí con tornillos. Contiene también un casquillo formado por cojinetes esféricos de doble hilera. En él se aloja un eje rígido que va soldado al chasis y alrededor del cual gira la pieza, transmitiendo los movimientos entre la rueda y los amortiguadores.

La conexión con los componentes que interactúa se realiza mediante una serie de pasadores que sirven para albergar una rótula. Uno de ellos es para la pushbar, otro para el sistema muelle-amortiguador y un tercero para la barra anti-roll, cuya función se explica en el siguiente apartado.

#### 3.6.4 ANTI-ROLL

Es una barra que permite solidarizar el desplazamiento vertical de las ruedas opuestas y así reducir la inclinación del vehículo cuando está sometido a la fuerza centrífuga, como es el caso de una curva cerrada. Conceptualmente su función es la misma que la de un sistema común de suspensión, aunque a diferencia de estos, no se trata de un solo tramo que va desde una rueda a la otra, sino que cada rueda consta de un tramo individual.



Ilustración 3.37: Funcionamiento Anti-roll

El extremo exterior va conectado a la bieleta a través de un brazo de acero Cr-Mo 1430 y es el que se encarga de transmitirle la torsión al sistema, cuyo elemento principal es un tubo de acero Cr-Ni EN 60 Si7.

Considerando que la barra estabilizadora trabaja bajo fuerza de torsión, se ha realizado un optimizado basado en límite elástico 1400MPa. Teniendo en cuenta el desplazamiento máximo de ambas barras y de los brazos, se definen las longitudes, así como la distancia entre el brazo, nudillo, soportes y diámetros de las barras. Como resultado, la barra estabilizadora trasera tiene un diámetro exterior nominal de 50 mm y diámetro interior de 44 mm. La longitud del brazo es de 100 mm y la de la barra de 373 mm de largo.

Por el otro extremo se fija al chasis mediante un dentado de perfil de evolvente, que tiene un módulo de 1.667 mm y 28 dientes.



Ilustración 3.38: Barra Anti-roll

### 3.6.5 CONJUNTO MUELLE AMORTIGUADOR

En función de los resultados obtenidos del modelado se elige el amortiguador más adecuado para el vehículo, optando por un diseño monotubo. En este tipo de amortiguadores el cilindro se divide en dos secciones separadas, una que contiene el fluido hidráulico, en la cual se mueven el pistón y émbolo y por encima de ésta una cámara de gas a alta presión. Se utiliza un solo pistón y una sola válvula, aunque el diámetro del cilindro de trabajo y de la válvula del pistón son de mayor tamaño en comparación con los de diseño bitubo.



*Ilustración 3.39: Conjunto muelle amortiguador*

Ambas cámaras están separadas por un pistón flotante de modo que, ante situaciones de trabajo exigentes comprime la cámara de gas y al aumentar la presión de este, se genera una fuerza de amortiguación adicional que contribuye a que la respuesta sea más rápida. También elimina por completo el fenómeno de aireación, en el que se crean burbujas en el aceite provocando una pérdida en la fuerza de amortiguación.

# CAPÍTULO 4: DISEÑO DE LAS MANGUETAS

## 4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe en profundidad el proceso de diseño seguido para desarrollar las manguetas traseras del monoplaza.

El término diseño tiene una amplia gama de significados. En ingeniería, podría definirse como “el proceso de aplicación de varias técnicas y principios científicos, con la finalidad de definir un dispositivo, un proceso o un sistema, con el detalle suficiente que permita su realización”.

En el desarrollo se tratará de seguir por orden cronológico cada una de las etapas seguidas para completar el proceso de diseño. Es importante recalcar que el proceso no tiene un carácter lineal, sino iterativo, lo cual significa regresar a una fase anterior y modificar ciertos aspectos hasta que el diseño se considere lo suficientemente bueno.

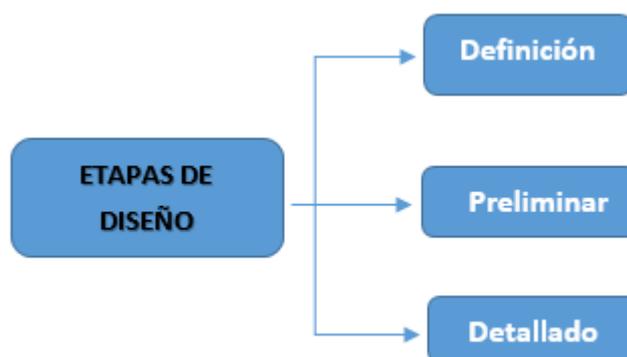


Ilustración 4.1: Etapas de diseño

Este proceso ha sido dividido en tres etapas para poder ser afrontado de manera más sencilla, cada una de ellas tiene un grado de detalle diferente que irá aumentando según avance el diseño.

El primer paso será hacer una definición del problema con enunciados claros que permitan comprender al diseñador las funciones que la pieza a diseñar debe desempeñar.

Una vez definidas estas restricciones generales, se deben tomar y documentar ciertas decisiones iniciales para continuar con el diseño y disminuir el número de tentativas inicial.

Por último, deben desarrollarse las opciones seleccionadas detalladamente mediante la creación de modelos que permitan analizar su comportamiento ante el estado de cargas al que estará sometido. También deben especificarse los detalles constructivos con el objetivo de facilitar la fabricación lo máximo posible.

El tiempo de desarrollo invertido en la realización de cada una de las fases debe ser inversamente proporcional al número de opciones y grado de detalle tenidas en cuenta en cada una.

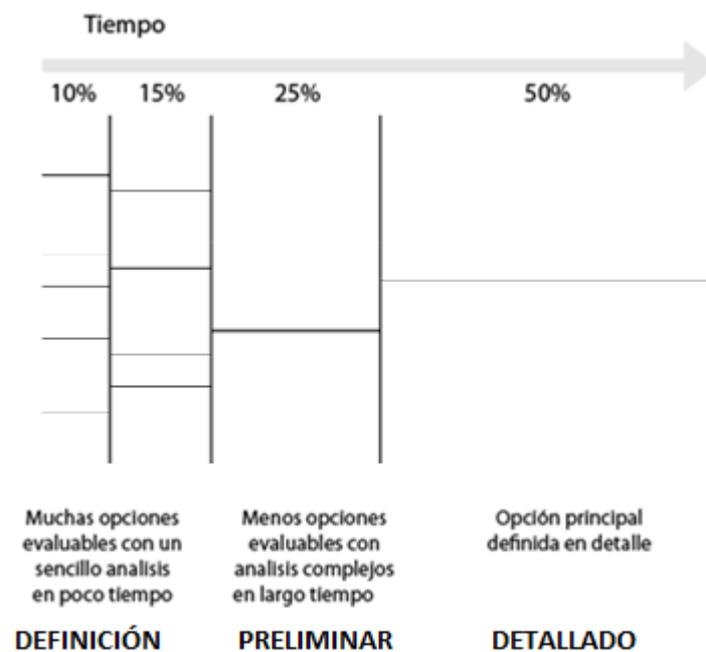


Ilustración 4.2: Tiempo de diseño

## 4.2 DEFINICIÓN

Este apartado describe la fase de definición del proyecto. Se debe tener especial cuidado al afrontarla, ya que la mayor parte de los defectos del diseño se generan en ella y si son detectados a tiempo se pueden corregir mucho más fácilmente que si el diseño está más avanzado.

Se empieza realizando una investigación previa que sirva para identificar las posibilidades de diseño existentes, mediante la definición de los diferentes sistemas con que ha de interactuar, requerimientos que ha de cumplir o posibilidades de fabricación.



Después, se realiza un análisis funcional en el que se identifican todos los requerimientos que debe cumplir el componente, estructurándolos en enunciados precisos.

Para finalizar, se definen una serie de objetivos y restricciones de diseño, que permitirán cumplir con los requerimientos del análisis funcional y marcarán la pauta de las siguientes fases del diseño.

#### 4.2.1 INVESTIGACIÓN PREVIA

Al estar diseñados los monoplazas de Fórmula Student bajo una normativa amplia, existen multitud de soluciones diferentes para cada componente. Gran variedad de tecnologías son utilizadas y la innovación llevada a cabo entre los equipos más avanzados constituye una de las bases de la competición. En aspectos relacionados con la seguridad, es donde se producen mayores restricciones que deben ser cumplidas por todos los diseños.

Las manguetas son un componente que interactúa con un gran número de sistemas, lo que las convierte en uno de los de mayores posibilidades en cuanto a su diseño. Las traseras en concreto, han de servir de conexión entre los sistemas de suspensión, transmisión y frenos, interactuando directamente con los triángulos, pushbar, barra de reglaje, buje y pinza de freno. Además, deben permitir ajustar ciertos parámetros de la suspensión como el *camber*, de forma sencilla y deben moverse dentro de un recorrido relativamente amplio sin interferencias.

En cuanto a las cargas a las que está sometida, han de considerarse las producidas por aceleraciones en recta y paso por curva, frenadas, baches y el peso del propio vehículo. No se considerarán los impactos ya que en las pruebas de la competición no se compite simultáneamente con otros coches. Este tipo de cargas pueden producirse de forma brusca o cíclica, por lo que hay que tener muy en cuenta la resistencia mecánica a la hora del diseño.

Las manguetas pueden estar formadas por una o varias piezas. Se componen de un cuerpo principal en cuya parte central se aloja el centro de rueda, siendo esta la zona de mayor importancia. El cuerpo de la mangueta también debe alojar las uniones con la geometría de la suspensión y la pinza de freno.

Su construcción puede realizarse mediante uno de los siguientes procesos de fabricación:

## PERFILES DE ACERO SOLDADOS

Los diseños basados en perfiles de acero soldados han sido los más utilizados históricamente por los equipos a lo largo de la competición. Las manguetas se fabrican con varias piezas de chapa que después son dobladas y soldadas juntas alrededor del centro de rueda.

Es un proceso de fabricación económico que además proporciona una buena rigidez y ligereza a la pieza. Aunque presenta la dificultad de tener que realizar todas las soldaduras sin ningún tipo de defectos o podría existir el riesgo de que la pieza falle en pleno uso.



Ilustración 4.3: Fabricación por perfiles de acero soldados

## MECANIZADO

La extensión en la utilización de máquinas CNC en los últimos tiempos ha convertido a este proceso en el más popular entre los diferentes equipos.

Permite simplificar los diseños evitando los pliegues y la fabricación al no ser necesarias las soldaduras. Sin embargo, en términos de ligereza y rigidez no superan a los perfiles de acero.

Una ventaja importante es que permite la utilización de aleaciones aluminio pudiéndose hacer piezas con una resistencia similar a la del acero con peso reducido.



Ilustración 4.4: Fabricación por mecanizado

## FUNDICIÓN

Otro método alternativo sería la fabricación por fundición y moldeo del metal.

Aunque minoritario en su utilización, podría resultar ventajoso si el equipo dispone de los recursos necesarios para realizarlo ya que permite gran diversidad de diseños.



Ilustración 4.5: Fabricación por moldeo

### 4.2.2 ANÁLISIS FUNCIONAL

El propósito de este apartado es recoger los requerimientos funcionales que las manguetas traseras deben cumplir como componentes para el correcto funcionamiento dentro del sistema de la suspensión trasera y del vehículo completo.

Al ser la mangueta un elemento que hace de nexo con los demás de la suspensión, posee gran cantidad de funciones. La mayoría de ellas se podrían clasificar en tres aspectos: interacción con otros componentes, ajuste de parámetros y resistencia de esfuerzos.

Las funciones requeridas son las siguientes:

- Garantizar los anclajes con los brazos de la suspensión (superior, inferior y barra de reglaje) y transmitirles las reacciones generadas.
- Permitir ajustar el *camber*.
- Garantizar el anclaje con el sistema muelle-amortiguador a través de la denominada *pushbar* y resistir los esfuerzos generados por este.
- Proporcionar una ubicación estable para el buje y los rodamientos alojados en el centro de rueda y resistir los esfuerzos transmitidos por estos.

- Sujetar la pinza de freno y resistir los esfuerzos generados durante el frenado.
- Resistir los esfuerzos generados desde la superficie de contacto del neumático debidos a la tracción y el paso por curva del vehículo
- Resistir esfuerzos eventuales generados en la dirección vertical debidos a baches o pequeños desniveles de la pista
- Encajar dentro de la llanta
- Cumplir la normativa de la FS

### 4.2.3 OBJETIVOS DE DISEÑO

Una vez realizada una investigación sobre el componente y definidas de forma clara y concisa las funciones que debe cumplir, se procede a definir unos objetivos de diseño para concluir la etapa de definición.

Esto permitirá abordar las primeras decisiones sobre el proceso de diseño y estrechar el abanico inicial de posibilidades en la siguiente fase.

Como primer objetivo de diseño se ha considerado que la pieza tenga una buena rigidez, ya que, al tener interacción con un gran número de componentes, un fallo en cualquiera de los anclajes tendría consecuencias fatales en el funcionamiento de la suspensión y del vehículo. Además, una excesiva deformación de la pieza durante su uso podría variar los parámetros geométricos con los que ha sido diseñado el sistema, por lo que se establecerá un límite máximo de 0,5 mm en cualquiera de sus puntos.

Otro objetivo al que se le dará importancia es que la pieza sea ligera, manteniendo un peso reducido de las masas no suspendidas que permita un mejor manejo del vehículo. Se deberá encontrar una solución que no comprometa la buena rigidez de la pieza, ya que se considera que aporta mayores beneficios al vehículo una mangueta rígida que una ligera y no al contrario. Por ello se decide fijar un peso máximo del componente de 1,75 Kg.

También se considera importante facilitar la fabricación lo máximo posible en el proceso de diseño, para que si fuera factible pudiera realizarse en el ámbito universitario.

Por último, se fija como objetivo minimizar el coste de fabricación, lo cual resulta evidente para un proyecto de estas características.

Como resumen, se recogen los objetivos de diseño marcados por orden de importancia en la siguiente tabla:

OBJETIVOS DISEÑO	RESTRICCIONES
RIGIDEZ	Desplazamientos $\leq 0,5\text{mm}$
LIGEREZA	Peso $\leq 1,75\text{Kg}$
FACILIDAD FABRICACIÓN	Ámbito universitario
BAJO COSTE	-

Tabla 4.1: Objetivos diseño

### 4.3 DISEÑO PRELIMINAR

En esta fase del diseño el objetivo es ir definiendo algunas de las características del producto. Para ello se han de tomar una serie de decisiones que restrinjan ciertos aspectos del diseño, disminuyendo el abanico de posibilidades inicial.

Partiendo de la información recopilada en la fase de definición, se busca indagar en el diseño para crear bocetos. De ellos los que resulten seleccionados serán desarrollados en la fase de detalle.

#### 4.3.1 MATERIAL Y PROCESO DE FABRICACIÓN

Una de las decisiones que más afectan al diseño de la pieza es la elección del proceso de fabricación y el material. No se puede elegir un diseño sin tener en cuenta la interrelación que tiene con ambos aspectos.

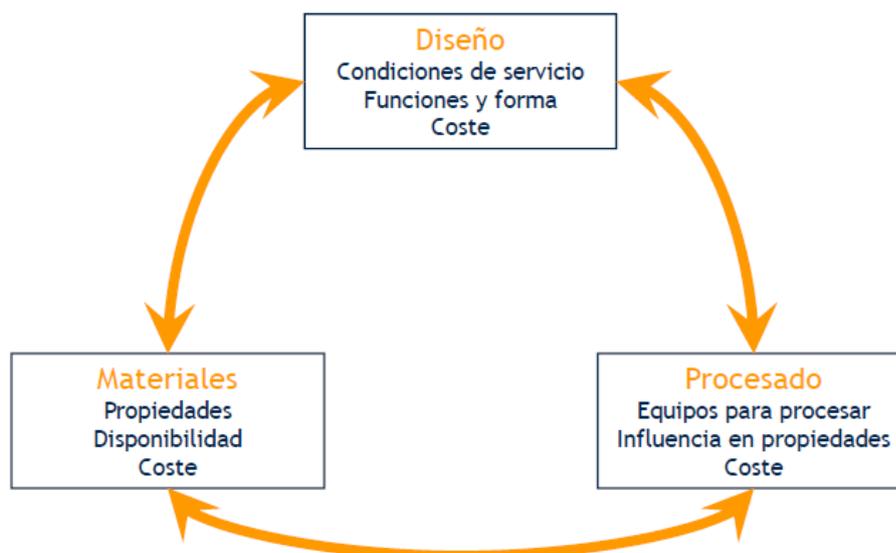


Ilustración 4.6: Interrelación Procesado-Material-Diseño

## PROCESO DE FABRICACIÓN

Finalmente se opta por que la pieza sea fabricada mediante mecanizado en una fresa de 3 ejes y Control Numérico Computerizado. Este proceso fue considerado el que más ventajas proporcionaba para la realización del proyecto.

Los criterios que más peso tuvieron en la toma de la decisión fueron los siguientes:

- Disponibilidad de tecnología en varios talleres dispuestos a colaborar con el proyecto.
- Conocimiento del proceso suficiente para realizar un diseño que resulte adecuado.
- Posibilidad de integración del modelado CAD de la pieza para realizar un programa CNC.



Ilustración 4.7: Mecanizado

## MATERIAL

En cuanto al material se opta por utilizar la aleación de aluminio 7075 T6.

Esta aleación de alta resistencia es utilizada frecuentemente en aplicaciones de transporte como la aeronáutica o el automovilismo, debido a su alta relación resistencia-densidad. Posee buena resistencia a fatiga y buenas propiedades de mecanizado.

Su composición es de 5,1-6,1% zinc, 2,1-2,9% magnesio, 1,2-2,0% cobre y pequeños porcentajes de silicio, hierro, manganeso, cromo, titanio y otros metales. Las siglas T6 corresponden a la designación del tratamiento térmico, y representan un tratamiento de solución y posterior envejecido artificial.

A continuación, se muestran las propiedades tanto físicas como tecnológicas de aluminio 7075 T6.

### PROPIEDADES FISICAS

PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES
Módulo elástico	72000	N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0.33	N/D
Módulo cortante	26900	N/mm <sup>2</sup>
Densidad de masa	2810	kg/m <sup>3</sup>
Límite de tracción	570	N/mm <sup>2</sup>
Límite elástico	505	N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de expansión térmica	2.36e-005	/K
Conductividad térmica	130	W/(m·K)
Calor específico	960	J/(kg·K)
Dureza Brinell	150	-

Tabla 4.2: Propiedades físicas material

### PROPIEDADES TECNOLÓGICAS

PROCESO	CLASIFICACIÓN
<b>SOLDABILIDAD</b>	
Electrón Beam	B
Gas Inerte	D
Por resistencia	B
Brazing	C
<b>MAQUINABILIDAD (T6)</b>	
Corte de viruta	B
Brillo de Sup. mecanizada	B

RESISTENCIA A LA CORROSIÓN	
Agentes atmosféricos	C
Ambiente marino	D
ANODIZADO	
Protección	B
Brillante	C
Duro	A

Tabla 4.3: Propiedades tecnológicas material

Clasificación: (A)Muy buena - (B)Buena - (C)Aceptable - (D)Pobre o No Recomendado.

### 4.3.2 ESQUEMA

El siguiente paso es generar un esquema en 3 dimensiones con los puntos de la tabla 3.2, los cuales representan las coordenadas de los vínculos de la geometría de la suspensión entre la mangueta y el chasis. Este esquema servirá de base para diseñar y ensamblar el modelado CAD. Solo se generará para el lado derecho, obteniéndose el izquierdo mediante simetría.

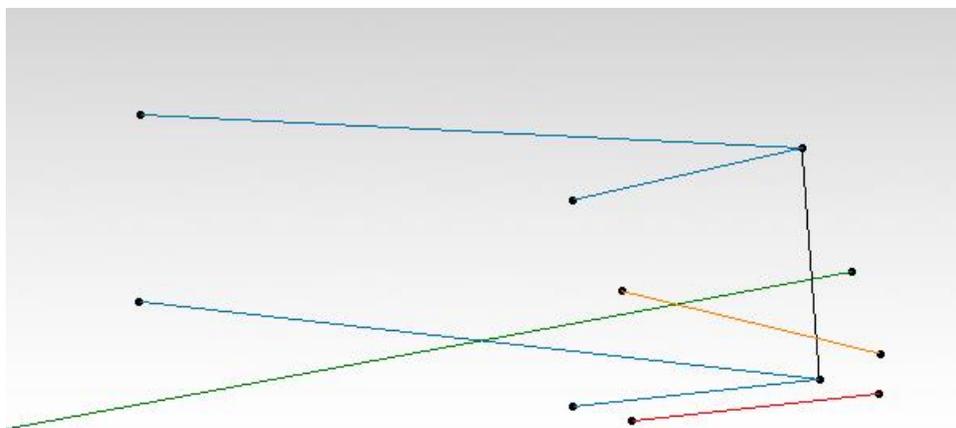


Ilustración 4.8: Esquema diseño

En la figura, el esquema corresponde a una vista desde la parte trasera del coche. Se han diferenciado las líneas del esquema por colores para su mejor comprensión. La línea negra representa esquemáticamente la conexión entre

ambos triángulos realizada por la mangueta. La correspondencia de los demás colores es la siguiente:

- Azul: triángulos
- Naranja: Pushbar
- Rojo: Barra de reglaje
- Verde: eje trasero

A partir de este esquema habrá que definir la manera en que se realizan los anclajes y las dimensiones y geometría del componente, lo cual se hará ya en la fase de diseño de detalle.

#### 4.4 DISEÑO DE DETALLE

En este apartado se presenta el diseño del componente realizado finalmente. Se describen las partes que lo componen, los detalles constructivos y el proceso de modelado CAD llevado a cabo. También se incluyen los resultados del análisis de elementos finitos al que se somete la pieza y la optimización realizada a partir de la interpretación de estos.

El diseño se compone de dos piezas de aluminio, el cuerpo principal y un soporte para el anclaje del triángulo superior.

En el cuerpo de la mangueta se han realizado una serie de vaciados de forma principalmente triangular. Estos permiten, aparte de reducir el peso, realizar los taladros que posibilitan los anclajes con las barras de la suspensión.

La siguiente figura muestra el ensamblaje de la mangueta diseñada.

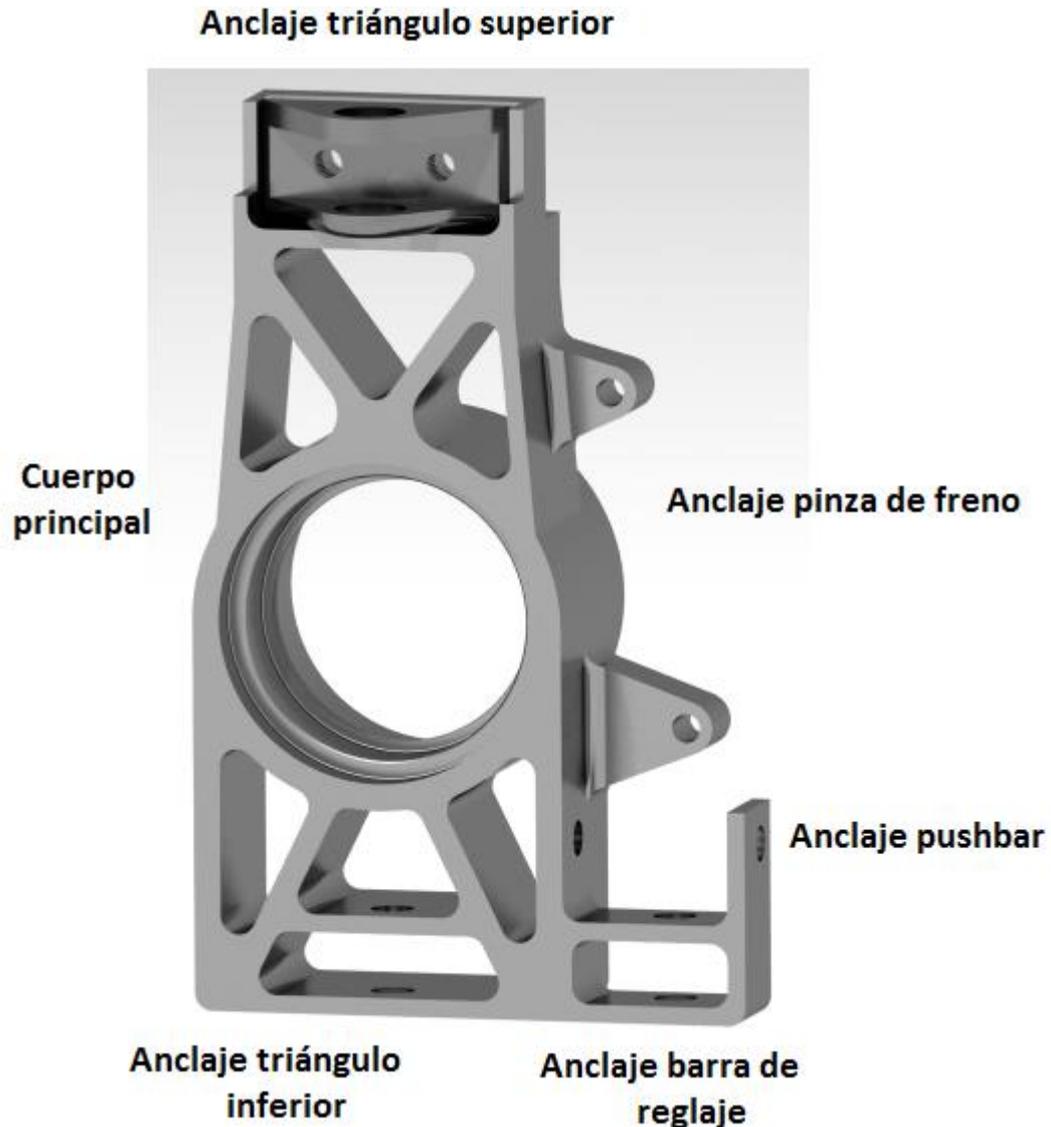


Ilustración 4.9: Mangueta

#### 4.4.1 SUPERFICIE INTERACCIÓN BUJE

La mangueta alojará el buje en el centro de rueda. Este se apoyará sobre una pareja de rodamientos angulares y retenes.

Esta solución requiere la generación de una superficie específica en la mangueta que permita el correcto asiento de los rodamientos y retenes.

Es una de las partes claves de la pieza, ya que el buje transmite toda la potencia del motor hacia las ruedas llegando a girar a altas revoluciones, por lo que es necesario que el sistema funcione con precisión para evitar que se produzcan vibraciones u otro tipo de fallos.

A partir de las dimensiones del buje, los rodamientos y retenes seleccionados se diseña la superficie final de la mangueta, la cual se puede ver resaltada en azul en la vista de corte de la figura siguiente.

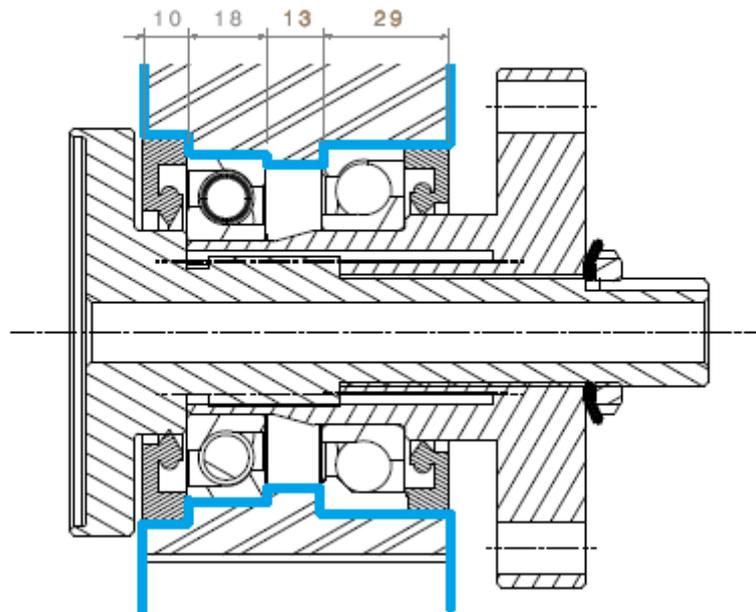


Ilustración 4.10: Sección centro de rueda

#### 4.4.2 ANCLAJES GEOMETRÍA SUSPENSIÓN

Como se ha remarcado anteriormente, todas las barras de la geometría de la suspensión deben ir ancladas a la mangueta en los puntos definidos.

Los anclajes se realizarán mediante pernos de cabeza hexagonal y grado 8.8 y diámetro 10 mm, que capturarán el rodamiento esférico que las barras llevan en su extremo. Los pernos se introducirán a través de los taladros realizados en el cuerpo de la mangueta, en nervios contiguos a los puntos de anclaje especificados. Estos taladros se han diseñado pasantes, dejando el suficiente espacio para apoyar la cabeza del perno en un extremo y una tuerca en el otro, evitando así la realización de roscados en el cuerpo de la mangueta.

En el caso del triángulo superior se hace de distinta manera al ser la rótula capturada por un soporte, en vez de directamente a la mangueta. Esto es debido al sistema de variación del camber que se explica en el siguiente apartado.

### 4.4.3 SISTEMA DE VARIACIÓN DEL CAMBER

Para poder variar este parámetro se diseña un sistema de calas en el punto de anclaje con el triángulo superior.

El sistema funciona mediante la colocación de calas, unas finas láminas de aluminio, entre la mangueta y su unión con los brazos del triángulo superior. Al cambiar el espesor de dichas calas, se puede variar el ángulo de caída de la rueda de forma rápida y sin alterar otros parámetros.

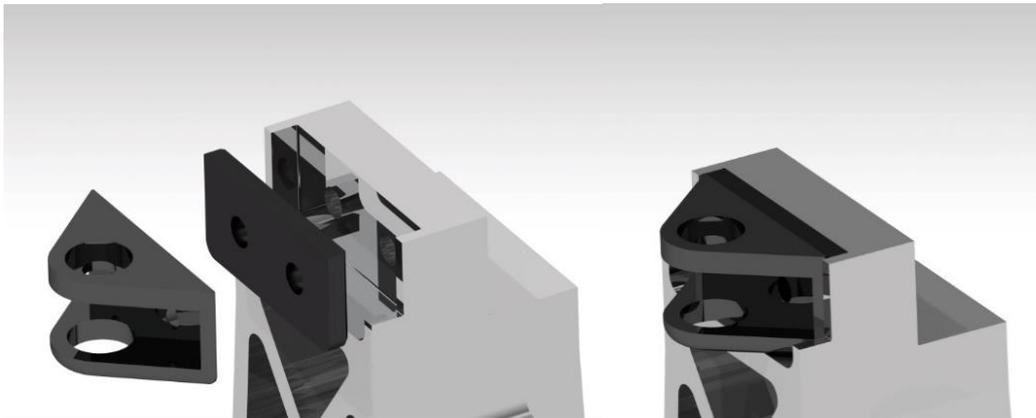


Ilustración 4.11: Sistema de ajuste del camber

El conjunto cuenta con un soporte para el anclaje del triángulo, en el cual se realizará capturando la rótula de la manera descrita en el apartado anterior.

El soporte y las calas se atornillarán usando dos pernos a la parte superior del cuerpo de la mangueta, a través de dos taladros pasantes realizados en cada una de las piezas.

### 4.4.4 ANCLAJE PINZA DE FRENO

La pinza de freno se situará anclada a un lateral del cuerpo de la mangueta mediante dos soportes. Estos dispondrán de sendos taladros pasantes que permitirán atornillar la pinza del freno.

Los soportes han sido diseñados teniendo en cuenta las dimensiones de la pinza y el disco de freno, así como el plano en que este se sitúa.

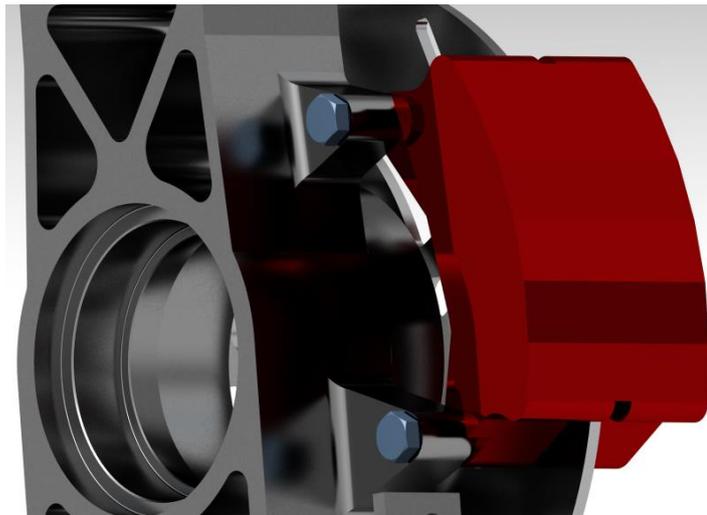


Ilustración 4.12: Anclaje pinza de freno

A diferencia de los demás anclajes, los soportes de la pinza de freno solo la sujetan por un único lado, es decir, a cortante simple. Esto es debido a que de este modo además de reducir el peso, se aumenta el espacio disponible para colocar el perno y la tuerca entre la pinza y el disco de freno. Tiene el inconveniente de ser menos resistente mecánicamente, por lo que se deberá comprobar que aguanta los esfuerzos de frenado mediante el análisis por elementos finitos.

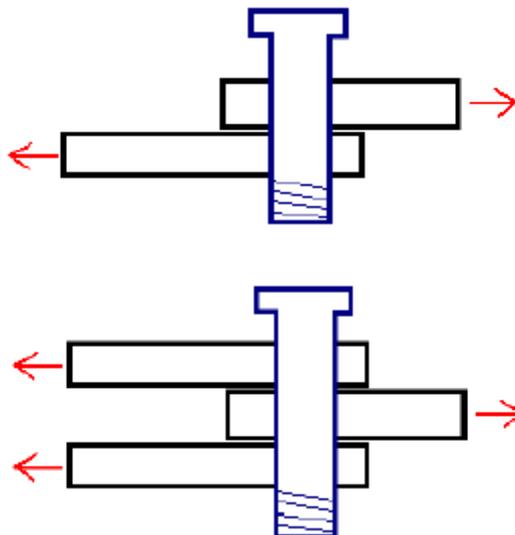


Ilustración 4.13: Cortante simple vs cortante doble

#### 4.4.5 DETALLES CONSTRUCTIVOS

Se han de considerar cuidadosamente los detalles de fabricación, con el fin de hacer el proceso lo más sencillo posible. En este apartado, se describen las medidas implementadas con este fin.

- Para evitar tener que mecanizar una de las caras del cuerpo de la mangueta, se trasladaron las variaciones de espesor a la contraria, dejando la mayoría de la cara frontal sin necesidad de mecanizado lo que simplifica el proceso.
- Los radios de redondeo laterales mínimos han sido diseñados de 5 mm, para evitar la necesidad de tener que utilizar herramientas de pequeño diámetro para el acabado de la pieza.
- Todas las aristas internas fueron modeladas con radios de redondeo mínimos. Esto es debido a que en el proceso de fresado se generarán inevitablemente redondeos coincidentes con el radio de punta de la herramienta. También debe ser tenido en cuenta que ese radio mínimo sea inferior al de los bordes de rodamiento u otros componentes que se apoyen sobre superficies perpendiculares, con el fin de que no se impida su correcto apoyo.

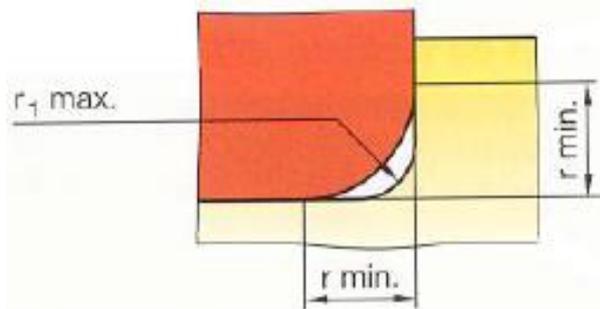


Ilustración 4.14: Radios de redondeo mínimos

- Para facilitar el montaje de los rodamientos, se realizarán chaflanes en las aristas vivas de la superficie de asiento.

#### 4.4.6 MODELADO CAD

A continuación, se describe con detalle el proceso de modelado CAD del cuerpo de la mangueta y del soporte del triángulo superior.

El modelado CAD de la pieza es de utilidad por varios motivos. El primero sería contener toda la información geométrica de la pieza, permitiendo su modificación y su ensamblaje con otras, creando conjuntos. Además posibilita

realizar gran variedad de análisis sobre el modelo, aplicando técnicas de Ingeniería Asistida por Ordenador, como por ejemplo, de elementos finitos, que permiten optimizar el diseño. Por último, es de gran utilidad en la fase de fabricación pudiéndosele aplicar técnicas CAM descritas en el siguiente capítulo.



Ilustración 4.15: Procesos de diseño y fabricación integrados

Todo el proceso se lleva a cabo utilizando el módulo *Part Design* de CATIA V5, del que se describirán los pasos seguidos y las operaciones utilizadas. Todas las operaciones y esquemas podrán ser consultadas en el árbol de operaciones del archivo CAD.

Para empezar a modelar el sistema, se crea un esquema de 2 dimensiones utilizando como base el esquema del diseño preliminar (ilustración 4.8). Este esquema representa la vista seccionada del empaquetamiento de la rueda, incluyendo las secciones de mangueta buje, rodamientos, retenes, tuerca de sujeción, arandela de bloqueo y llanta.

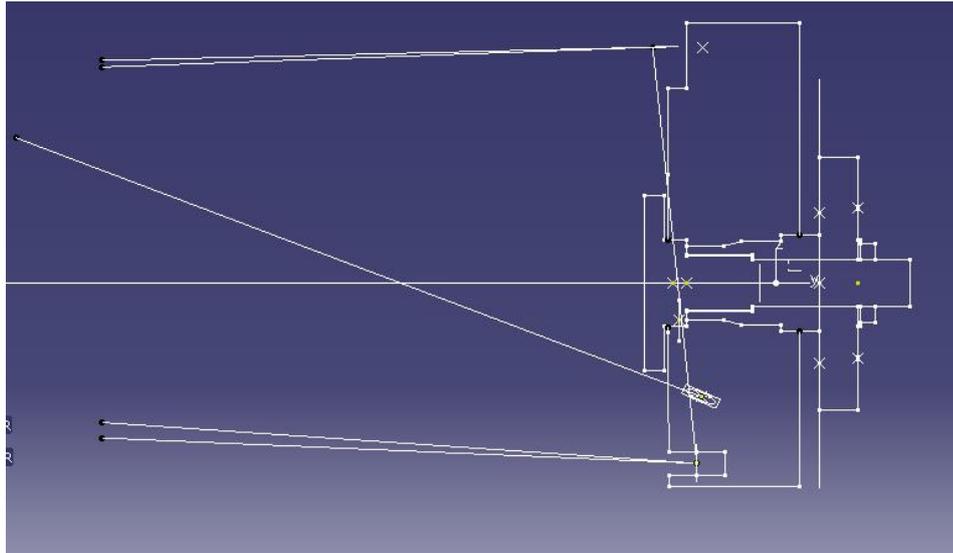


Ilustración 4.16: Esquema sección

### CUERPO DE LA MANGUETA

A partir del esquema anterior, se crea la otra vista en un plano perpendicular del cuerpo de la mangueta que coincida con la vista de la sección.

En este paso se dimensiona la geometría frontal de la mangueta, por lo que es importante comprobar que esta se ajuste al espacio disponible de la llanta y contenga todos los puntos de anclaje necesarios.

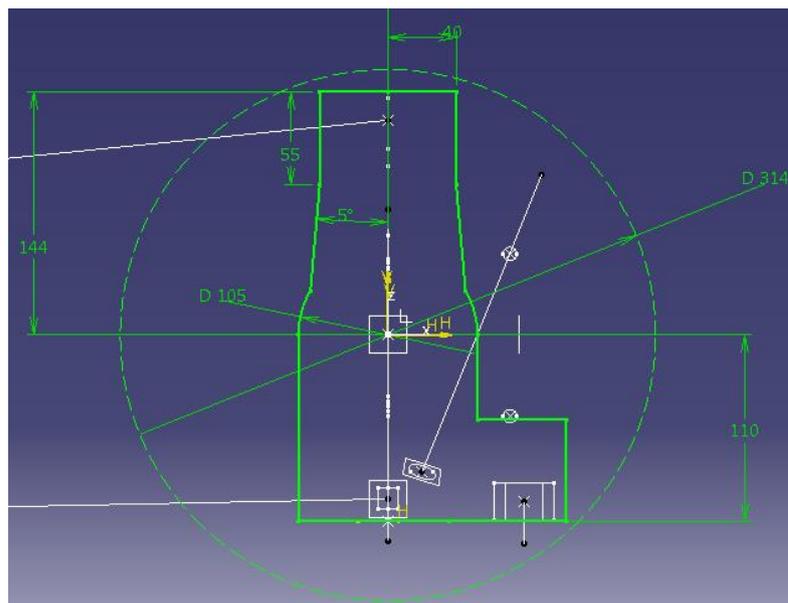


Ilustración 4.17: Esquema frontal

Combinando ambos esquemas de 2 dimensiones en planos perpendiculares, se obtiene el primer sólido mediante la operación *Combine*. A este se le irán haciendo operaciones para modelar su geometría hasta obtener la requerida.

Las operaciones por orden de realización son:

- Generación del centro de rueda a través de un vaciado de revolución, operación denominada *Shaft*.
- Creación de los vaciados, utilizando la operación *Pocket*.
- Generación de las superficies de apoyo y anclaje de la geometría de la suspensión, utilizando de nuevo la operación *Pocket*.
- Reducción del espesor del cuerpo de la mangueta modificando el esquema de la sección.
- Redondeado y chaflanado de aristas, utilizando las operaciones *Edge Fillet* y *Chamfler*, respectivamente.
- Realización de los taladros con la herramienta *Hole*.

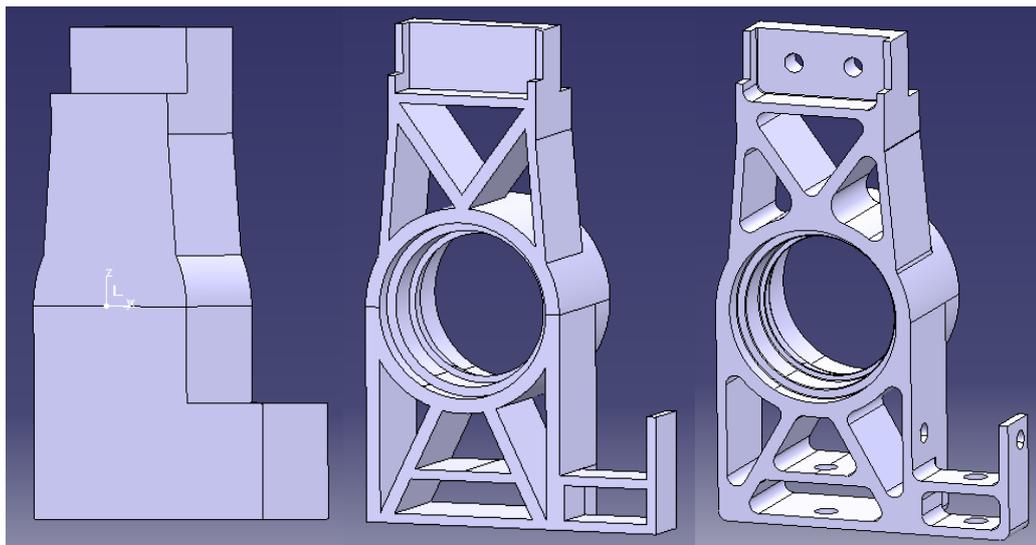


Ilustración 4.18: Secuencia modelado cuerpo mangueta

El último paso es generar los anclajes de la pinza de freno. Hay que poner especial atención en introducir de forma correcta las dimensiones referentes a la pinza que se va a montar y a las distancias al plano donde se sitúa el disco de freno. Hay que dejar el esquema perfectamente definido por si hubiera que hacer modificaciones posteriores. Los ángulos no deben ser rectos en las uniones con el cuerpo de la mangueta para evitar concentración de tensiones.

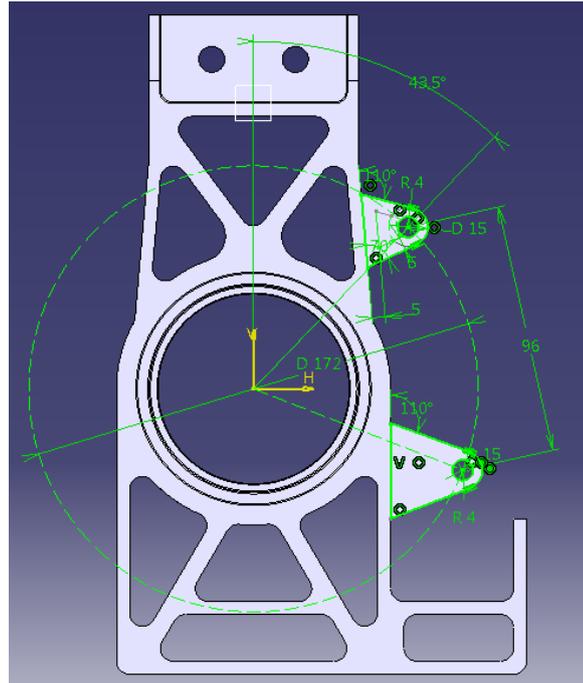


Ilustración 4.19: Modelado anclaje pinza de freno

## SOPORTE TRIÁNGULO SUPERIOR

Se modela de manera similar al cuerpo de la mangueta, pero mucho más sencilla.

Se comienza creando los esquemas de sus vistas en sección lateral y alzado y formando un sólido con la operación *combine*. Después, se realizan los taladros necesarios para atornillarlo al cuerpo de la mangueta y para sostener el triángulo superior con la operación *Hole* y por último, los redondeados de aristas con la operación *Edge Fillet*.

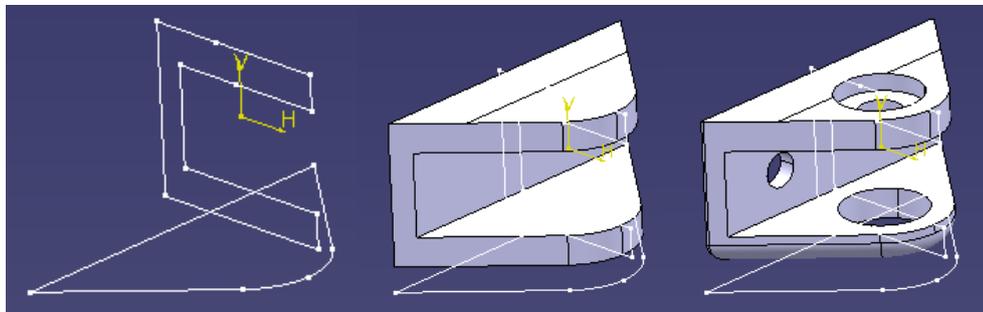


Ilustración 4.20: Secuencia modelado soporte triángulo superior

## 4.5 ENSAMBLAJE

Después del modelado CAD de las piezas, se procede a su ensamblado con otros componentes del sistema para crear conjuntos de piezas. Para ello se utilizará el módulo *Assembly* y se establecerán restricciones entre unas piezas y otras para posicionarlas.

Dentro de este proceso también se incluyen las comprobaciones de montaje. Este tipo de comprobaciones servirá para ver si la pieza tiene algún tipo de interferencias con los componentes de los demás sistemas del coche.

### 4.5.1 CONJUNTOS

En este apartado se presentan los ensamblajes de la mangueta en distintos sistemas de los que forma parte, sin introducir pernos ni elementos de unión.

Esto servirá para comprobar las dimensiones de las piezas y si encajan entre ellas o no, pudiendo existir interferencias.

### EMPAQUETAMIENTO RUEDA

Primeramente, se realiza el ensamblaje entre los componentes del primer conjunto de piezas del que forma parte la mangueta, el empaquetamiento de la rueda. Se comprueba que la unión se produce de forma adecuada, encajando todas las piezas sin que haya interferencias de ningún tipo, encajando todo ello dentro del espacio interior de la llanta.

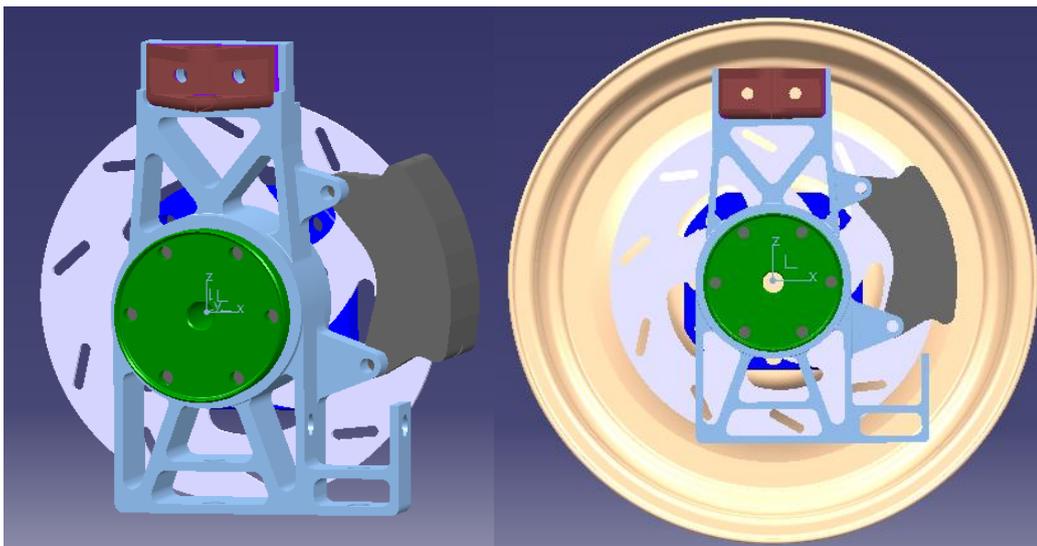


Ilustración 4.21: Ensamblaje empaquetamiento rueda

## SUSPENSIÓN TRASERA

A continuación, se realiza el ensamblaje del sistema completo de la suspensión trasera, pudiendo comprobar que todas las barras se acoplan perfectamente al espacio fijado para su anclaje sin interferencias.

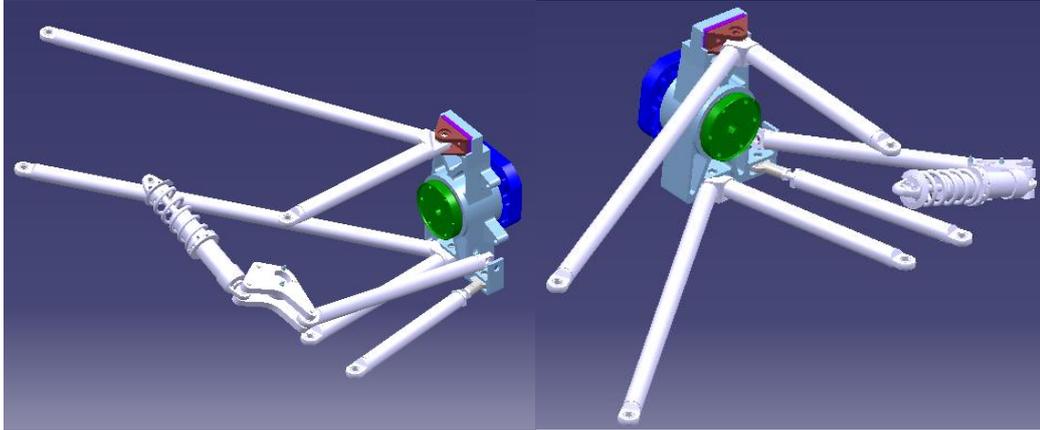


Ilustración 4.22: Ensamblaje suspensión trasera

## VEHÍCULO COMPLETO

Por último, se ensambla el conjunto de la suspensión trasera dentro del vehículo completo. Una vez más se comprueba que no haya interferencias entre los componentes y que los elementos de nuevos sistemas, como los palieres, tienen espacio suficiente.

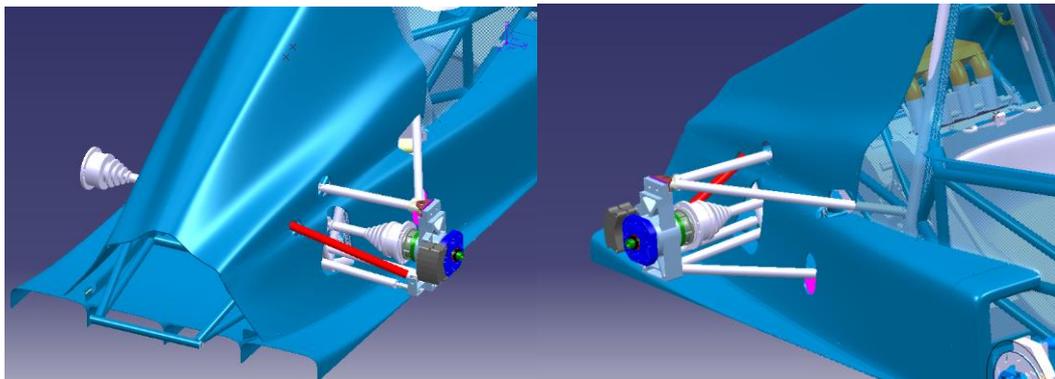


Ilustración 4.23: Ensamblaje vehículo completo

### 4.5.2 COMPROBACIONES DE MONTAJE

Se deberá comprobar que hay espacio suficiente para que sean ensamblados todos los componentes. Es necesario tener especial cuidado con las uniones

de las barras de la geometría de la suspensión, comprobando que haya espacio tanto para colocar los tornillos como para que quepan llaves con las que han de ser apretados. También se debe comprobar que haya espacio para las tuercas y para que sobresalgan al menos dos filos de la rosca, tal como indica la normativa de la competición.

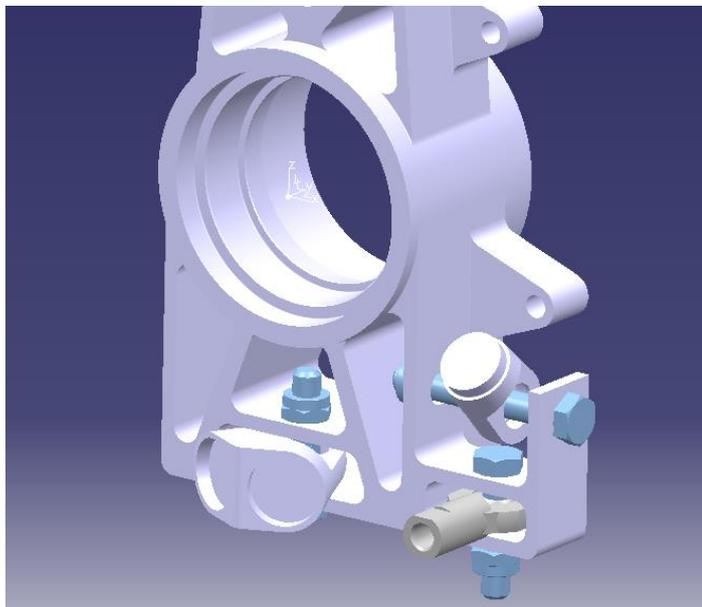


Ilustración 4.24: Comprobación anclajes

Otro tipo de comprobaciones que debe llevarse a cabo es si hay algún tipo de interferencias de unas piezas con otras una vez montado el conjunto. No se trata solo de que no haya interferencias en posición estática, sino que se ha de comprobar que estas no se producen a lo largo de todo el recorrido que tienen cada una de ellas. Para este cometido se ha utilizado la siguiente técnica.

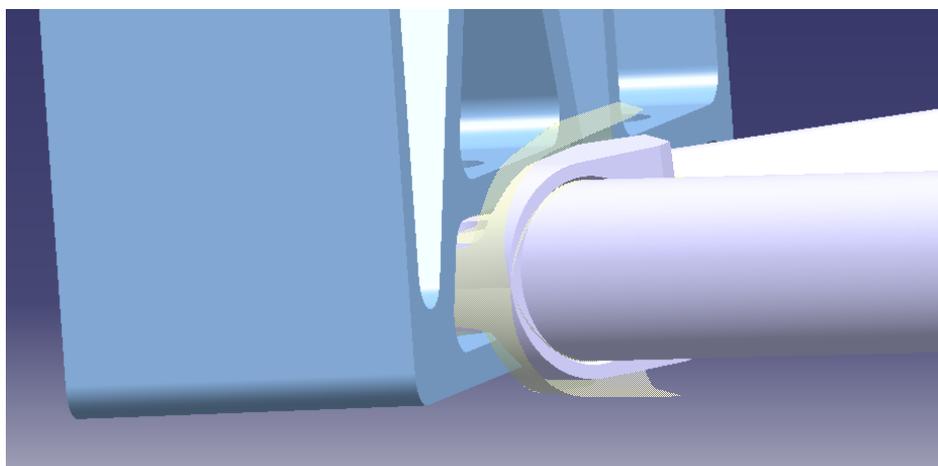


Ilustración 4.25: Comprobación montaje portarrótulas

Se captura la superficie del componente en cuestión y los grados que varía de una posición extrema a la otra. Después se hace girar ese número de grados a la superficie capturada y se comprueba si hay interferencias con los alojamientos o componentes contiguos.

## 4.6 ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN

Siguiendo el proceso de diseño, se procede a analizar la pieza mediante elementos finitos. El análisis fue realizado por los miembros del sistema de cálculo del equipo, centrándose este apartado en la interpretación de los resultados.

El objetivo es determinar los valores de tensión y desplazamiento que sufre cada punto de la pieza ante los esfuerzos a los que va a estar sometida. Los resultados revelarán la eficiencia de la geometría diseñada y si es necesario aumentar la cantidad de material en algún punto debido a valores altos de tensión en los que se acerque o incluso supere el límite elástico.

Cabe recordar que el primer objetivo de diseño es tener una pieza con una buena rigidez, aunque buscando por otra parte que su peso sea reducido.

### 4.6.1 CARGAS

Para el análisis se dispone de los siguientes datos de cargas, determinados en los casos de bache, curva y frenada para las ruedas interior y exterior de la suspensión trasera. Están aplicadas en el punto de contacto entre el neumático y la pista y medidas en Newtons.

	Rueda interior			Rueda exterior		
	Fx	Fy	Fz	Fx	Fy	Fz
<b>Bache</b>	-	-	6800	-	-	6800
<b>Curva</b>	-	1785	592,5	-	6286,5	3820,5
<b>Frenada</b>	3982,5	-	1896,75	3982,5		1896,75

Tabla 4.4: Cargas

El tipo de análisis que se realizará será de tipo estático, aplicando las cargas anteriores combinadas en los tres casos de carga siguientes:

- Frenada y bache
- Aceleración y bache
- Curva y bache

## 4.6.2 RESULTADOS

### TENSIONES

En los resultados que arroja el análisis se observa que la pieza soporta bastante bien los esfuerzos en todos los casos de carga salvo en las dos siguientes excepciones:

En el caso de frenada con bache, se produce una concentración de tensiones debido a la entalla del soporte de la pinza de freno.

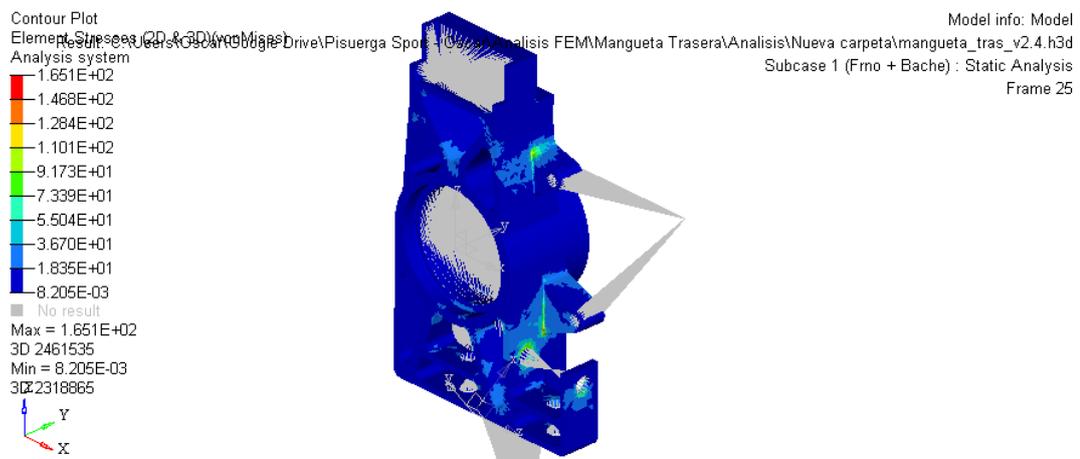


Ilustración 4.26: Tensiones caso frenada y bache

En el caso de curva y bache tiene lugar una concentración de tensiones alrededor de uno de los taladros de la pushbar.

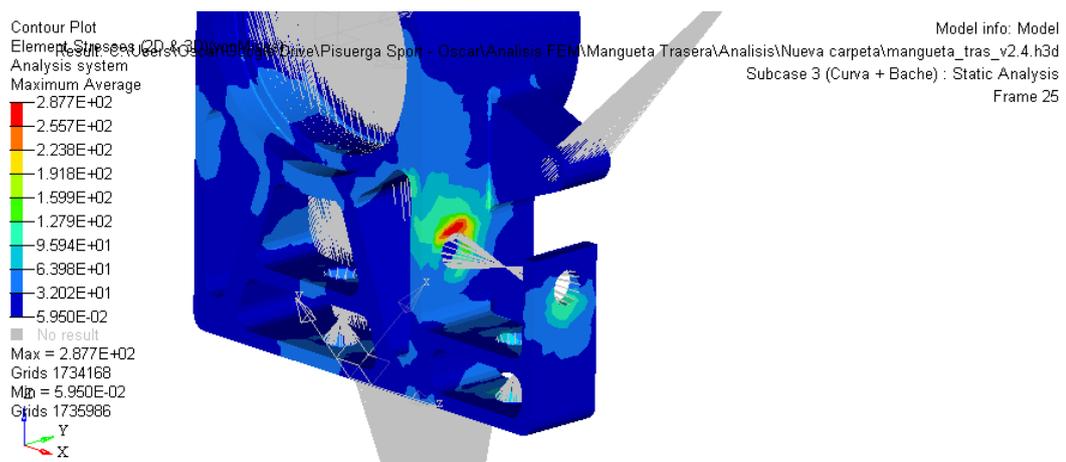


Ilustración 4.27: Tensiones caso curva y bache

Sin embargo, el valor máximo de la tensión no llega a los 288 MPa, siendo el límite elástico del material 505 MPa, siendo el factor de seguridad de 1.76.

## DESPLAZAMIENTOS

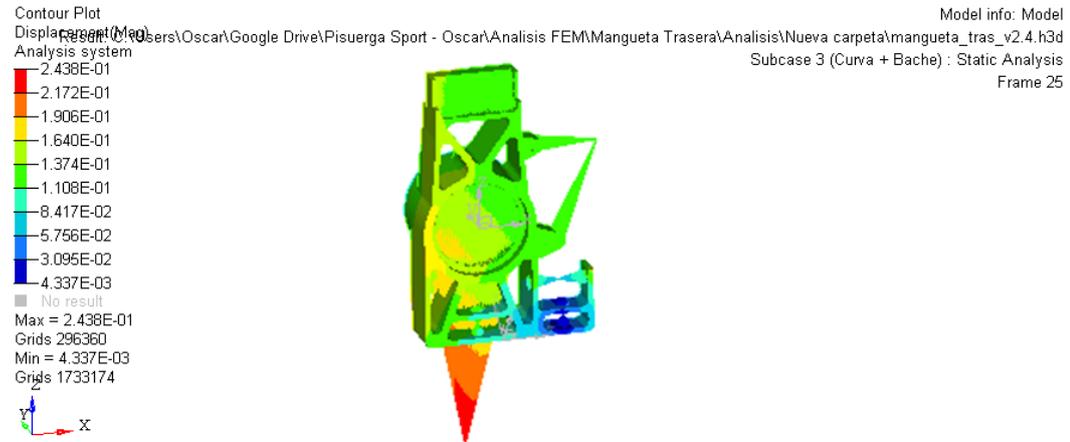


Ilustración 4.28: Desplazamientos

En cuanto a los desplazamientos, el mayor valor que entrega el análisis corresponde al caso de carga de curva y bache en el que se llegan a registrar 0.244 mm, valor que se considera pequeño y aceptable.

### 4.6.3 MODIFICACIONES

A pesar de que la pieza soporta bien los esfuerzos a los que está sometida, se decide reforzar los puntos con mayor concentración de tensiones para mejorar su eficiencia. Un pequeño aumento de material resulta suficiente para eliminar esa concentración de tensiones, en el cual se podría producir una rotura ante una carga mayor que la prevista, como un impacto.

- Aumentar el espesor del nervio donde se encuentra el taladro de la pushbar de 5 mm a 7 mm.

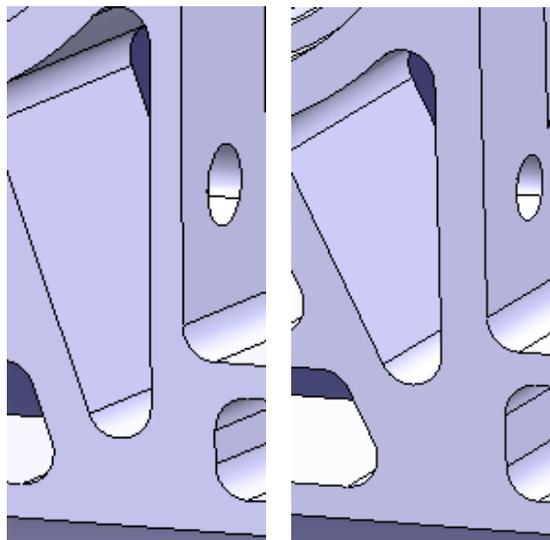


Ilustración 4.29: Modificaciones espesor

- Reforzar el anclaje de la pinza dotándolo de un radio de acuerdo con el cuerpo de la mangueta mayor. Este radio será determinado por el mayor radio de punta de las herramientas utilizadas. También se decide hacer lo mismo con la entalla producida en la parte posterior de los anclajes de la pushbar y barra de reglaje, donde, aunque no tan pronunciada, también se producía concentración de tensiones.

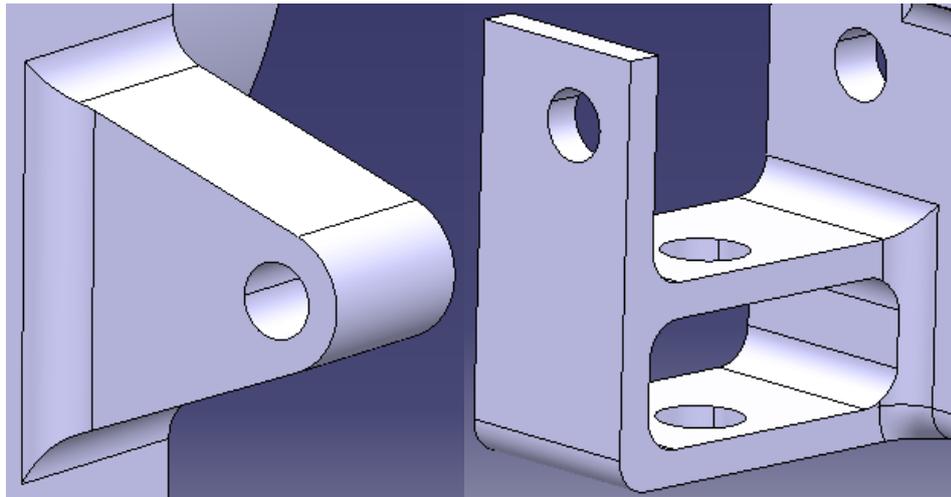


Ilustración 4.30: Modificaciones radios de acuerdo





# CAPÍTULO 5: FABRICACIÓN

## 5.1 INTRODUCCIÓN AL CAM

El CAM (*Computer Aided Manufacturing*), o fabricación asistida por ordenador, es el proceso en el cual se utilizan ordenadores para controlar los equipos de manufactura.

El concepto del Control Numérico Computerizado (CNC) fue desarrollado por el ingeniero estadounidense John T. Parsons en 1949, en principio para ser aplicado a la industria aeronáutica militar. Con ello se empezaron a realizar una serie de estudios y proyectos por el Instituto Tecnológico de Massachusetts.

Esta tecnología ofrece multitud de ventajas frente a la fabricación tradicional, como una mayor rapidez, precisión, la eliminación de los errores humanos y la posibilidad de realizar formas complejas. Todo ello constituye una reducción en los costes de fabricación y un aumento de la productividad. Como inconveniente se podría citar que requiere altos costes de inversión y mantenimiento y la necesidad de disponer de personal cualificado para su manejo.

Se basa en sucesiones de códigos alfanuméricos, que se almacenan en programas informáticos y contienen las posiciones relativas entre el cabezal de trabajo y la pieza, permitiendo a la máquina realizar las operaciones necesarias para fabricarla. Estos códigos CNC, se crean a partir de la geometría del componente a fabricar y se almacenan en programas de pieza.

La integración con los sistemas de CAD, denominada CAD/CAM, se encuentra en plena expansión, utilizándose cada vez más para la generación de este tipo de programas. Ofrece multitud de posibilidades que pueden ser aprovechadas en los procesos de diseño y fabricación, permitiendo adaptarlos mejor a unas necesidades determinadas. Puede ser utilizada tanto para analizar la viabilidad de un sistema mediante la realización de un prototipado rápido o como única vía de fabricar con precisión cierto componente complejo. También para la optimización del material a partir de un modelo CAD.

La CIM (*Computer Integrated Manufacturing*), o Fabricación Integrada por Computadora, es un concepto que propone aprovechar al máximo el potencial de integración de este tipo de tecnologías para coordinar la mayor parte de procesos de una fábrica, dotándola de una mayor flexibilidad. Incluiría desde el empleo de varias máquinas CNC combinadas para la fabricación de productos hasta el cálculo de costes o el control de existencias.

Como algunos de los principales procesos y máquinas más utilizados actualmente con ésta tecnología se podrían citar los siguientes:

- Medición de coordenadas mediante el uso de palpadores.
- Prototipado rápido de objetos con impresoras 3D.
- Corte de multitud de materiales mediante distintas herramientas como el agua a presión, laser, plasma o cuchillas.
- Mecanizado con tornos y fresas
- Prensado



Ilustración 5.1: Distintas aplicaciones CAM

## 5.2 PROTOTIPADO RÁPIDO

Es uno de los procesos CNC que mayor evolución ha sufrido en la última década, con un importante descenso en los precios de las impresoras que han permitido pasar de estar relegado a las grandes empresas a ser una tecnología mucho más barata y accesible.

Existen cada vez más tipos de materiales compatibles con esta tecnología. En general, la mayoría son materiales de base plástica, que se puedan bobinar y cuya temperatura de fusión sea inferior a 400 grados, siendo los más utilizados PLA y ABS.

### 5.2.1 PASOS DEL PROCESO

En este apartado se describirán los pasos para aplicar la técnica de prototipado rápido a un modelo CAD como el diseñado en el capítulo anterior.

Se ha de guardar la pieza en STL, un formato de CAD que describe la superficie de la pieza mediante una estructura triangular, excluyendo otros atributos del archivo como el color o la textura. El formato fue desarrollado por *Dassault Systemes* y es compatible con otros muchos paquetes de software, siendo ampliamente utilizado para la impresión 3D.

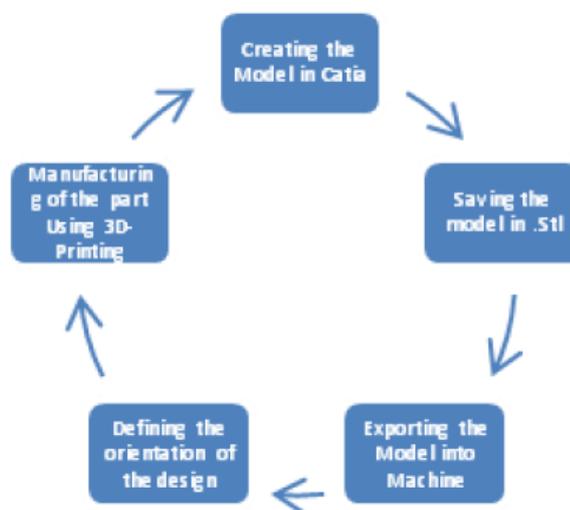


Ilustración 5.2: Ciclo del prototipado rápido

A continuación, se exporta el modelo al software de impresión 3D, que será el encargado de comunicarse con la máquina proporcionándole toda la información necesaria.

Una vez cargado el objeto se definirá la orientación con respecto a los ejes de la base y se configurarán las velocidades y parámetros de la impresora.

El siguiente paso será realizar el *laminado*, operación por la cual el software generará las trayectorias en cada una de las capas que deberá seguir el cabezal de la máquina para completar el prototipado, es decir, para generar el programa CNC de la pieza. Este programa se adjunta en la copia digital del trabajo.

Por último, sólo quedaría realizar la impresión, configurando adecuadamente los parámetros de temperatura del extrusor y de la base según el material utilizado.

### 5.2.2 APLICACIÓN A LA MANGUETA

En este apartado se procede a la aplicación de lo anteriormente explicado, al modelo CAD del cuerpo de la mangueta. Se utilizará para ello el software *RepetierHost*.

Se coloca la pieza procurando que quede la mayor superficie plana apoyada sobre la base, lo que facilitará la adhesión del plástico.

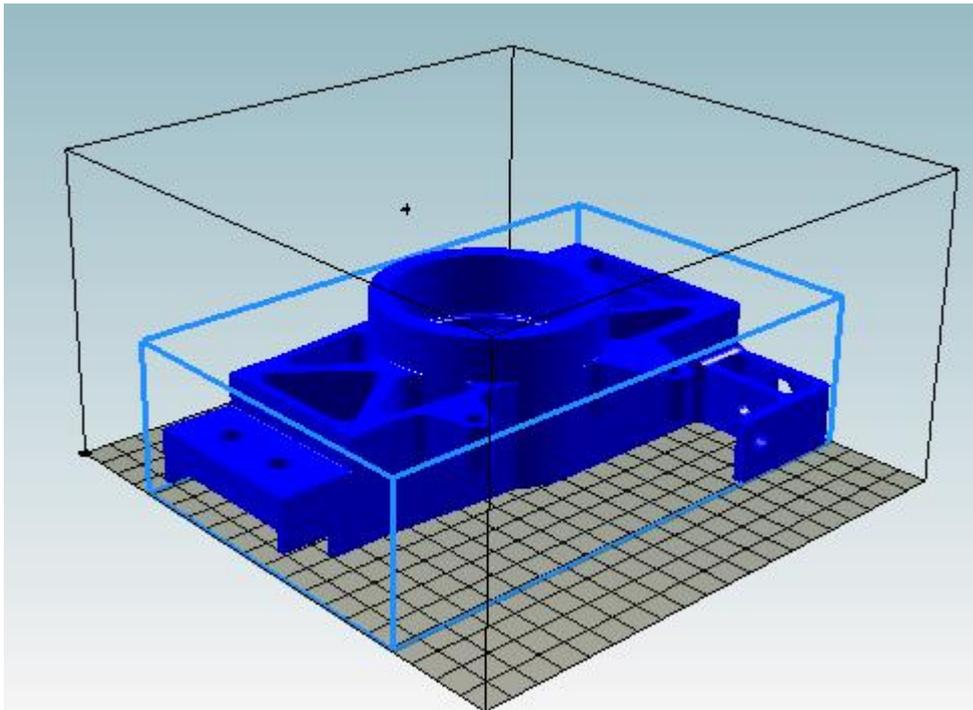


Ilustración 5.3: Orientación modelo

A continuación, se configuran una serie de parámetros de impresión. Se tratará de hacer para consumir la menor cantidad de material y de tiempo. Los parámetros son los siguientes:

- **Resolución.**  
Se define por la altura entre capas y toma valores entre 0,1 mm y 0,3 mm. En este caso, al tratarse de superficies planas que no necesitan una alta resolución se configura a 0,3 mm.
- **Número de perímetros.**  
Veces que la máquina recorre el perímetro exterior de la pieza. Se fija en 3.
- **Relleno.**  
Se define por el patrón de forma que puede ser lineal, concéntrico o hexagonal entre otros y el porcentaje de relleno.

Se elige el mínimo porcentaje de relleno, 5%, y patrón lineal, que es la configuración que menor cantidad de material consume.

- **Material de soporte.**

En casos como este, en el que la pieza tiene partes en voladizo, es necesario aportar un material que soporte dichas partes y que permita realizar la impresión sobre él. El software permite elegir su forma entre lineal, hexagonal o pilares y también si se quiere imprimir la pieza sobre una base de material de aporte que evite su desprendimiento.

Finalmente se selecciona material de aporte en forma de pilares.

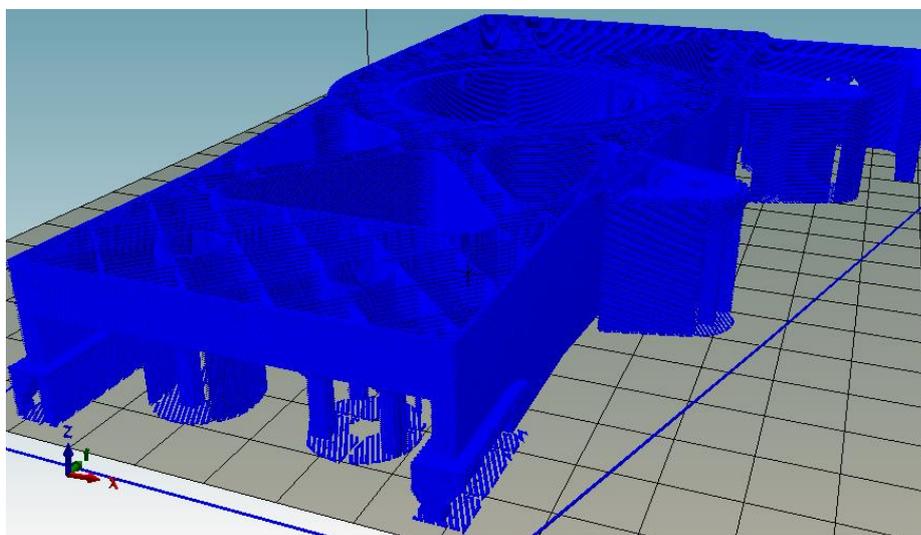


Ilustración 5.4: Laminado del relleno y material de soporte

En la imagen se puede apreciar el patrón lineal del relleno y el material de soporte en forma de pilares.

Los consumos de material y tiempo para realizar la impresión completa bajo esta configuración son los siguientes:

<b>Printing Statistics</b>	
Estimated Printing Time:	8h:4m:49s
Layer Count:	233
Total de Lineas:	528364
Filament needed:	69055 mm

Tabla 5.1: Tiempo y material consumidos

## 5.3 MECANIZADO

En este apartado se realiza una descripción del proceso de mecanizado de la pieza en una fresa CNC vertical.

Se realiza el cálculo de las condiciones de corte para unas herramientas seleccionadas del catálogo de un fabricante y una máquina genérica, por lo que podrían ser modificadas si finalmente la fabricación es realizada con herramientas que no posean las mismas características. También se incluye la descripción del modelado del proceso de mecanizado y de las operaciones del corte, recogiendo toda la información en una tabla. Por último, se hace una estimación de costes del proceso.

El proceso de mecanizado ha sido modelado utilizando el módulo *Prismatic Machining* de CATIA V5, lo que permite obtener el programa pieza que posibilita su realización en una fresadora CNC. También proporciona los tiempos de mecanizado y su simulación en vídeo.

### 5.3.1 SELECCIÓN DE HERAMIENTAS

Se acude al catálogo de un determinado fabricante para seleccionar las herramientas para el fresado de aluminio. Se seleccionan de tipo fresado en escuadra, que permiten realizar el mecanizado en direcciones tanto axial como radial.

Se opta una con un diámetro de 20 mm para realizar un primer desbaste y otra con un diámetro de 10 mm para realizar las operaciones de acabado y semiacabado de la pieza. El número de dientes es 3.

Se denominará a la herramienta con diámetro 20 mm herramienta 1 y herramienta 2 a la de diámetro 10 mm.



Ilustración 5.5: Fresa aluminio

### 5.3.2 TOLERANCIAS

La pieza ha de fabricarse con unas tolerancias que garanticen el correcto encaje entre los componentes.

Solo se considerarán necesarias en los asientos de los rodamientos, ya que los demás anclajes que tienen lugar en la pieza son de ajuste o llevan juntas elásticas para acoplar las piezas.

### TOLERANCIAS DIMENSIONALES

Las tolerancias para el eje y agujero de los rodamientos se encuentran reguladas internacionalmente, teniendo que seleccionar las adecuadas dentro de un número limitado de grados de tolerancia ISO según se quiera un apriete o ajuste.

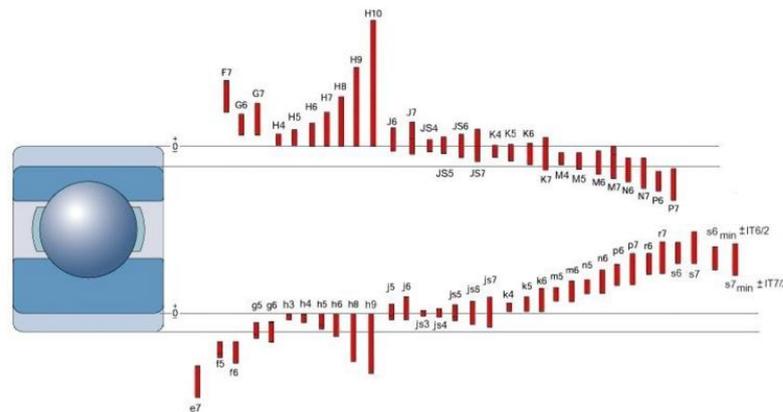


Ilustración 5.6: Posiciones recomendadas de ajuste para los rodamientos

Para determinar las tolerancias de los agujeros de la mangueta donde van apoyados los rodamientos, se siguen las indicaciones del fabricante. Este recomienda que el grado de tolerancias dimensionales para asientos cilíndricos deben ser, por como mínimo IT7. Además, para rodamientos radiales con cargas rotativa altas sobre el aro exterior, tales como los de cubos de rueda, indican que la posición de la tolerancia ha de ser N7 para evitar que tengan movimiento.

Los valores numéricos de los grados de tolerancia de IT estándar de acuerdo con la norma ISO 286-1: 2010 se enumeran en la tabla siguiente.

Nominal dimension		Tolerance grades											
over	incl.	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12
		max.											
mm		$\mu\text{m}$											
1	3	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	100
3	6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	120
6	10	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	150
10	18	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	180
18	30	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	210
30	50	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	250
50	80	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	300
80	120	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	350
120	180	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	400

Tabla 5.2: Intervalos de tolerancia

Se trata, por tanto, de un apriete que hará que los rodamientos deban ser montados con una prensa hidráulica. La rugosidad superficial de las superficies de los asientos también ha de ser controlada para poder efectuar el montaje y debe ser inferior a  $1,6 \mu\text{m}$ .

Las referencias ISO quedan de la siguiente manera:

**RODAMIENTO INTERIOR**

Diámetro nominal: 80 mm.

Tolerancia máxima:  $30 \mu\text{m}$ .

La denominación ISO de la cota de ajuste queda: 80N7.

**RODAMIENTO EXTERIOR**

Diámetro nominal: 85 mm.

Tolerancia máxima:  $35 \mu\text{m}$ .

La denominación ISO de la cota de ajuste queda: 85N7.

## TOLERANCIAS GEOMÉTRICAS

Para poder obtener los ajustes necesarios, las superficies de ajuste han de cumplir ciertas tolerancias.

Los asientos de los rodamientos deben tener unas tolerancias de forma en cuanto a cilindridad, perpendicularidad y variación radial máxima según se define en la norma ISO 1101:2012. El IT de estas tolerancias deberá ser uno o dos grados superior a la tolerancia dimensional dada, es decir deberán tener como mínimo IT6.

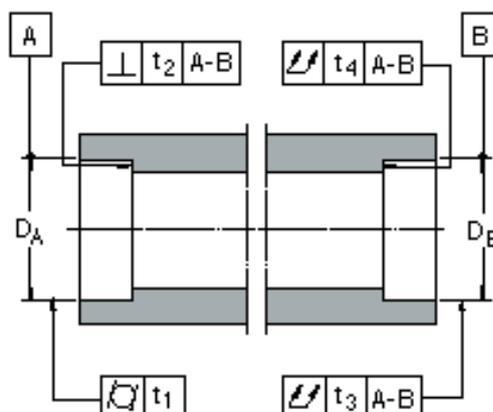


Ilustración 5.7: Tolerancias geométricas asiento rodamientos

Hay que tener en cuenta que las tolerancias  $t_1$  y  $t_3$  corresponden a un radio, por lo tanto, su valor tendrá que ser la mitad del intervalo de tolerancia.

$$t_1 = \frac{IT6}{2} = \frac{19}{2} = 9.5 \mu m$$

Ecuación 5.1: Cálculo tolerancia geométrica  $t_1$

$$t_2 = IT6 = 19 \mu m$$

Ecuación 5.2: Cálculo tolerancia geométrica  $t_2$

$$t_3 = \frac{IT6}{2} = \frac{22}{2} = 11 \mu m$$

Ecuación 5.3: Cálculo tolerancia geométrica  $t_3$

$$t_4 = IT6 = 22 \mu m$$

Ecuación 5.4: Cálculo tolerancia geométrica  $t_4$

Esos son los valores de tolerancias recomendados por el fabricante, los cuales, se podrán ajustar en función de la disponibilidad de equipos y presupuesto.

Los costes de fabricación aumentan cuanto mayores son las tolerancias requeridas, como se puede apreciar en la siguiente gráfica. El incremento es mucho mayor al bajar de  $20\mu\text{m}$ , valor alrededor del cual se sitúan las tolerancias necesarias para la pieza correspondientes al grado IT6. Por ello se puede decir que no será necesario para la fabricación un taller con máquinas de alta precisión. En caso contrario, ya que las tolerancias se precisan en una zona concreta, sería factible realizar sólo el mecanizado de esa parte en un taller de mayor precisión.

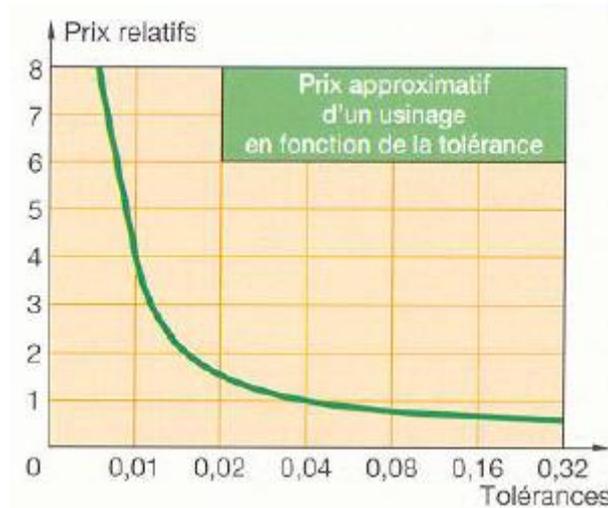


Ilustración 5.8: Relación tolerancia/coste

### 5.3.3 CÁLCULO CONDICIONES DE CORTE

En este apartado se describirán los parámetros necesarios para poder llevar a cabo el mecanizado y la forma de calcularlos.

**$V_c$ :** velocidad de corte. Valores recomendados de hasta 600 m/min para el material. Es una velocidad de corte alta, ya que está considerado aluminio de viruta rápida.

Una velocidad de corte excesivamente elevada podría producir defectos en el mecanizado, además de un aumento de la potencia necesaria y desgaste de la herramienta.

Finalmente se fijará en 450 m/min, pudiendo variarse en función de la máquina o la herramienta con que se lleve a cabo.

**$n$ :** Velocidad de giro (rpm), se calcula con la siguiente fórmula:

$$n = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot D}$$

*Ecuación 5.5: Velocidad de giro*

Siendo **D** el diámetro de la herramienta en mm.

**f**: Avance por filo. Valores recomendados para las herramientas según fabricante 0.05~0,3 (mm/rev). Mientras menor sea, mejor acabado superficial y mayor desgaste de la herramienta y tiempo de mecanizado, y mientras más alto, menor el tiempo de corte y mayor el riesgo de rotura de la herramienta. Se deberá elegir en función de si la operación es de desbaste o acabado.

**V<sub>f</sub>**: Velocidad de avance (mm/min), se calcula a partir del avance por filo:

$$V_f = n \cdot f \cdot z$$

*Ecuación 5.6: Velocidad de avance*

Siendo **z** el número de dientes de la herramienta.

Parámetros de la sección de corte:

**A<sub>e</sub>**: Anchura (mm). Se fijará a la mitad del diámetro de la herramienta.

**p**: Profundidad (mm). Variará entre desbaste y acabado.

**C**: Coeficiente de Corte del material = 55 (cm<sup>3</sup>/(Kw·min)) para el aluminio.

**S**: Volumen de viruta (cm<sup>3</sup>/min). Se calcula con la siguiente fórmula:

$$S = \frac{A_e \cdot p \cdot V_f}{1000}$$

*Ecuación 5.7: Volumen de viruta*

**P**: Potencia necesaria para el mecanizado (kW):

$$P = \frac{S}{C}$$

*Ecuación 5.8: Potencia de corte*

**R<sub>a</sub>**: Rugosidad superficial media (μm).

$$R_a = \frac{f^2}{32 \cdot r}$$

*Ecuación 5.9: Rugosidad superficial*

Siendo **r** el radio de punta de la herramienta

Se requiere un valor de la rugosidad superficial inferior a  $1,6 \mu\text{m}$  para la zona de montaje de los rodamientos que ha de ser en apriete, por lo que se calcula un valor para el avance por diente, despejando de la fórmula, inferior a  $0,124 \text{ mm/rev}$ .

### 5.3.4 MODELADO

El proceso de mecanizado se modela utilizando herramientas CAM, lo cual sirve para obtener el programa CNC de la pieza, el tiempo de mecanizado o la simulación del proceso entre otras cosas.

Para realizar el proceso se ha utilizado el módulo *Prismatic Machining*, de CATIA V5. La información se estructura en un árbol que contiene de forma separada procesos, productos y recursos. Los pasos seguidos se explican a continuación.

Lo primero que ha de definirse es el tipo de máquina, la orientación de los ejes, la pieza a fabricar y el tocho de partida. Para la generación de este último se crea otro sólido superpuesto a la pieza.

Una vez definidos estos aspectos, el siguiente paso es modelar las herramientas que se van a utilizar en el proceso. Las herramientas son modeladas con sus dimensiones reales proporcionadas por el fabricante, las cuales se pueden ver en la siguiente imagen.

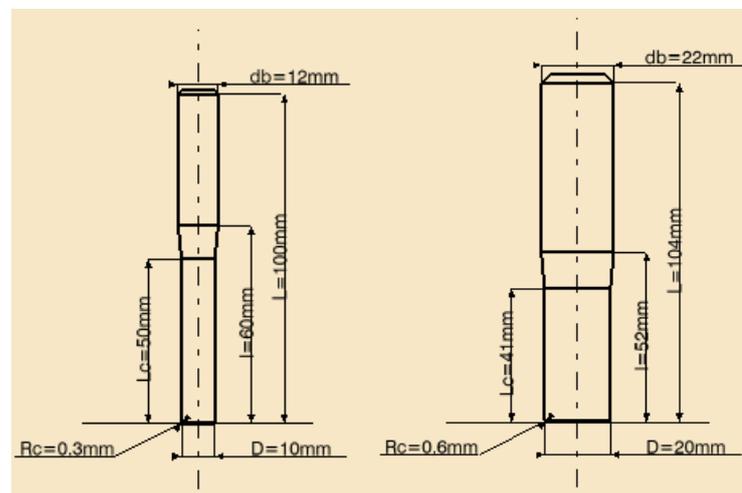


Ilustración 5.9: Modelado herramientas

A continuación, se pasan a generar las distintas operaciones de corte. Será necesario introducir previamente los cambios de herramientas y las condiciones de corte previamente calculadas. El programa permite definir distintos tipos de trayectorias de las herramientas, así como los planos de

seguridad, entrada y salida. Es posible realizar también una simulación en video de las operaciones de mecanizado.

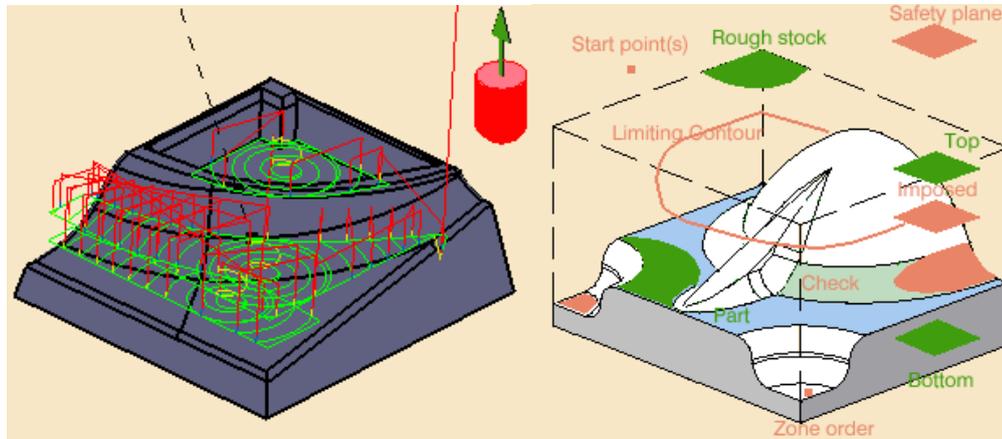


Ilustración 5.10: Modelado operaciones de corte

Por último, se genera el código CNC que se exporta a la máquina. El programa ha de ser optimizado para la fresadora y herramientas utilizadas finalmente, para evitar que se produzcan errores durante la fabricación. El programa obtenido se incluye adjunto en la copia digital.

### 5.3.5 TABLA DE OPERACIONES

En este apartado se realiza una descripción de las operaciones para completar el mecanizado en fresa de la pieza. Al final se recogen las distintas posiciones y los datos de corte en una tabla.

No se han tenido en cuenta en el proceso las operaciones de taladrado ya que se considera que se realizan en una taladradora vertical. Tampoco el chaflanado de los asientos de los rodamientos, que se realizará de forma manual después del mecanizado.

La pieza se mecanizará en dirección perpendicular al centro de rueda. El proceso no se puede realizar en una sola posición por lo que habrá que hacerlo en dos. Primero por una cara (posición 1) y luego por la opuesta (posición 2).

El amarre de la pieza se realizará mediante el uso de una mordaza que sujetará la pieza por sus extremos.

La primera operación de mecanizado por cada cara se realizará con la herramienta 1 y será de desbaste. Se buscará eliminar el máximo material posible en el menor tiempo, por lo que se selecciona un avance y una profundidad de corte elevadas.

Después se llevará a cabo un cambio de herramienta a la herramienta 2 y se realizarán dos operaciones de mecanizado más. La primera de semiacabado con el objetivo de seguir quitando material con un avance alto, y por último una operación de acabado reduciendo el avance y la profundidad de corte para conseguir un buen acabado superficial.

El total del tiempo de mecanizado calculado es de 4 horas, 22 minutos y 54 segundos.

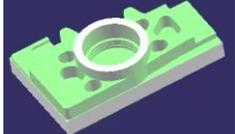
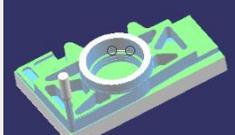
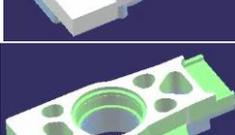
OP.	Tocho partida	Pos.	Herr.	Vc (m/min)	n (rpm)	f (mm/rev)	p (mm)	Vf (m/min)	P (kW)	Tiempo (h:min:s)
1		1	1	450	7162	0,25	5	5371	4,88	48:03
2		1	2	450	14324	0,2	5	8594	3,91	24:13
3		1	2	450	14324	0,12	2,5	5157	1,17	1:03:41
4		2	1	450	7162	0,25	5	5371	4,88	23:34
5		2	2	450	14324	0,2	5	8594	3,91	22:29
6		2	2	450	14324	0,12	2,5	5157	1,17	1:20:54

Tabla 5.3: Tabla de operaciones mecanizado

### 5.3.4 ESTIMACIÓN DE COSTES

En este apartado se realiza una estimación de los costes de fabricación de la pieza relacionados con el mecanizado para que pueda servir como referencia.

La estimación se ha basado en dos conceptos: la cantidad de material necesario y el tiempo de mecanizado.

## MATERIAL

La masa del tocho introducido en el programa es de 6.6 kg, mientras que el precio por kg de aluminio 7075 T6 se ha estimado en 8 €.

kg TOCHO	6,6
PRECIO kg	8,00 €
TOTAL	52,80 €

Tabla 5.4: Estimación costes material

## TIEMPO MECANIZADO

El tiempo que obtenemos al realizar el proceso de modelado hace referencia al empleado en el proceso de corte. Para realizar la estimación del tiempo total de pieza en máquina, mayor que el de mecanizado debido al tiempo empleado en la colocación de la pieza o al cambio de herramientas, este se considera un 25% superior al empleado en el corte. El precio por hora de taller se ha estimado en 50 €.

HORAS MECANIZADO	4,38
HORAS MÁQUINA	5,475
PRECIO HORA	50 €
TOTAL	274 €

Tabla 5.5: Estimación costes mecanizado

A continuación, se muestra una tabla con la estimación del coste total de la fabricación de las dos manguetas traseras.

MATERIAL	105,60 €
TIEMPO	548 €
TOTAL	653,10 €

Tabla 5.6: Estimación costes totales

Esta cantidad es meramente orientativa, pues no se han incluidos los costes de diseño de la pieza entre otros. Además, los costes de mecanizado podrían reducirse en gran medida si en vez de en un taller, la fabricación finalmente es realizada por medios pertenecientes a la universidad o a otras instituciones educativas.





## CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

Se puede considerar que el trabajo cumple con el objetivo principal planteado, que era el de diseñar las manguetas para el monoplaza de Fórmula Student, alcanzando el suficiente grado de detalle para permitir su fabricación.

La realización de trabajo también ha servido para el cumplimiento del resto de objetivos generales planteados, obteniéndose al respecto las siguientes conclusiones:

-Se ha obtenido experiencia real en el campo del diseño de componentes automovilísticos, tanto en el proceso de diseño de productos como en el de diseño asistido por ordenador (CAD).

-Se han explorado con éxito las posibilidades de integración entre los modelos CAD y las técnicas de fabricación asistida por ordenador (CAM), obteniéndose experiencia real en los procesos de prototipado rápido y mecanizado.

-Se han aumentado y reforzado los conocimientos acerca de los sistemas de suspensión de automóviles.

-La participación en una competición universitaria internacional ha servido para ensanchar la visión acerca de las posibilidades en el mundo del diseño en la ingeniería mecánica.

-Se ha documentado por primera vez el diseño de un componente como las manguetas, lo cual servirá como medio para la transferencia de conocimientos a futuros estudiantes.

En cuanto a los objetivos de diseño establecidos, los resultados también se consideran satisfactorios:

-Del análisis de la pieza mediante elementos finitos se advierte que se han alcanzado unos buenos valores para la rigidez, quedándose tanto el valor de desplazamiento máximo por debajo del valor fijado, como el valor de tensión máximo por debajo del límite de elástico del material.

-El valor máximo fijado para el peso no ha sido sobrepasado, concluyéndose por ello que la pieza consta con una ligereza aceptable.

-Acerca de la factibilidad de fabricación en un taller común al alcance del entorno de la universidad, se puede decir también que se ha logrado el objetivo, no incluyendo el componente diseñado aspectos que requieran de máquinas de precisión avanzada. Esto significaría también una reducción en el coste muy



importante, en referencia al precio que supondría realizar el mecanizado en un taller privado.

#### POSIBLES MEJORAS

-La inclusión del anclaje de la pushbar en el triángulo inferior y no en el cuerpo de la mangueta habría permitido reducir la complejidad de ésta y abaratado su fabricación.

-También se podrían haber ubicado los anclajes inferiores de la geometría de la suspensión en un soporte atornillado a la mangueta, lo cual habría dotado a la pieza de mayor modularidad y sencillez en el diseño.

-La realización de una optimización geométrica habría permitido mejorar la relación entre rigidez y ligereza, minimizando la masa.



# BIBLIOGRAFÍA

---

- ARIAS-PAZ, Manual de automóviles, Cie Dossat, 2004
- BUDYNAS, NISBETT, Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley 8ª Edición, McGraw Hill, 2008.
- CHEVALIER ANDRÉ, Guía del diseñador industrial, Hachette Technique, 2004.
- FORMULA SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERINGS, FSAE Rules, 2015.
- FORMULA STUDENT GERMANY, Formula Student Combustion Rules, 2015.
- LUQUE P., ÁLVAREZ, D., VERA C., Ingeniería del Automóvil, Sistemas y Comportamiento Dinámico, Paraninfo, 2008.
- ROBERT L. NORTON, Diseño de máquinas 4ª edición, Pearson, 2011.

## PÁGINAS WEB

- <http://formulastudent.es>
- <http://formulastudent.de>
- <http://imche/formulastudent>
- [http://medias.schaeffler.com/medias/es!hp.tg.cat/tg\\_hr\\*ST4\\_16521\\_55275](http://medias.schaeffler.com/medias/es!hp.tg.cat/tg_hr*ST4_16521_55275)
- <http://www.aficionadosalamecanica.net/suspension3.htm>
- <http://www.auladeprogramacioncnc.blogspot.com.es>
- <https://www.hoffmann-group.com/ES/es/hoef/service/360tooling>
- <http://www.sandvik.coromant.com/es-es/products/Pages/shoulder-milling-edging-tools.aspx>
- <http://www.skf.com/es/products/bearings-units-housings>

## TESIS Y TRABAJOS

- AGUSTÍ FUSTÉ J., BEJARANO PLAZA N., Disseny del sistema de suspensió d'un monoplaça de Fórmula Student, 2015.
- ALLEN T., Suspension Uprights ME495, 2010.
- AVILA H., JORGE A., Diseño y construcción de un sistema de sujeción única y central para las ruedas el prototipo FSAE-UCV 2009, 2008.
- BECKLEY S., GYGRYNUK K., HILFERTY J., TERI M., Team FSAE Suspension, 2010.
- BHARGAV PRAJWAL P., Design Optimization of Formula Student Upright using HyperMesh, 2012.
- BHARGAV PRAJWAL P., Manufacturing of Formula one Student Sports Car Upright Using Rapid Prototyping, 2012.
- BUITRAGO BETANCOURT E. Y., Diseño del sistema de suspensión de un vehículo monoplaça tipo Fórmula Sena, 2011.
- CARAGUAY CORREA C. A., CARAGUAY CORREA S. J., Diseño y construcción del sistema de suspensión de un vehículo monoplaça para la competencia Fórmula Student, 2015.
- CORDOBA BREÑA J., Método de diseño del sistema de suspensión de un vehículo de competencia Fórmula SAE, 2012.
- CRUZ CASTRO G. A., MESÍAS IZURIETA D. F., Diseño, construcción e implementación de sistemas de suspensión, dirección y frenos del vehículo de competencia Fórmula SAE 2012, 2013.
- FENOLLOSA ARTÉS F., Diseño y construcción de una llanta para un monoplaça de la Formula Student, 2013.
- JEN WONG A., Design and Optimization of Upright Assemblies for Formula SAE Racecar, 2007.
- LAMERS W., Development and analysis of a multi-link suspension for racing applications, 2008.
- MCCUNE M., NUNES D., PATTON M., RICHARDSON C., SPARER E., Formula SAE Interchangeable Independent Rear Suspension Design, 2009.



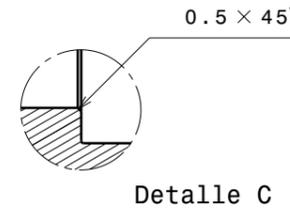
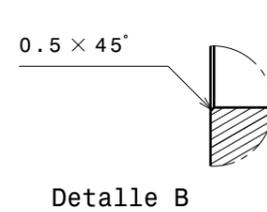
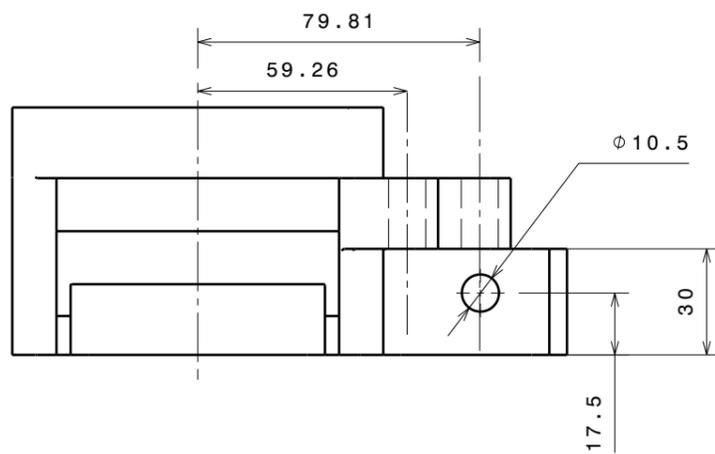
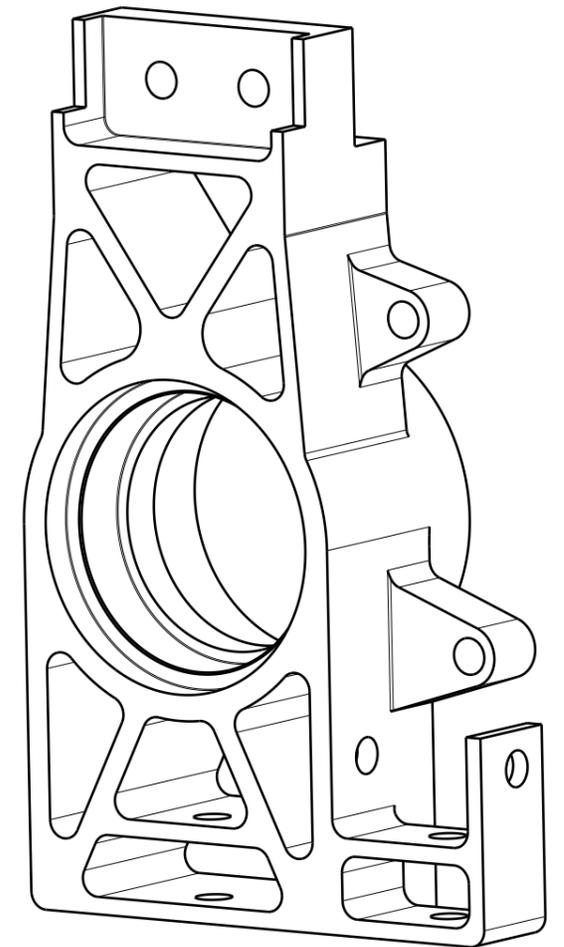
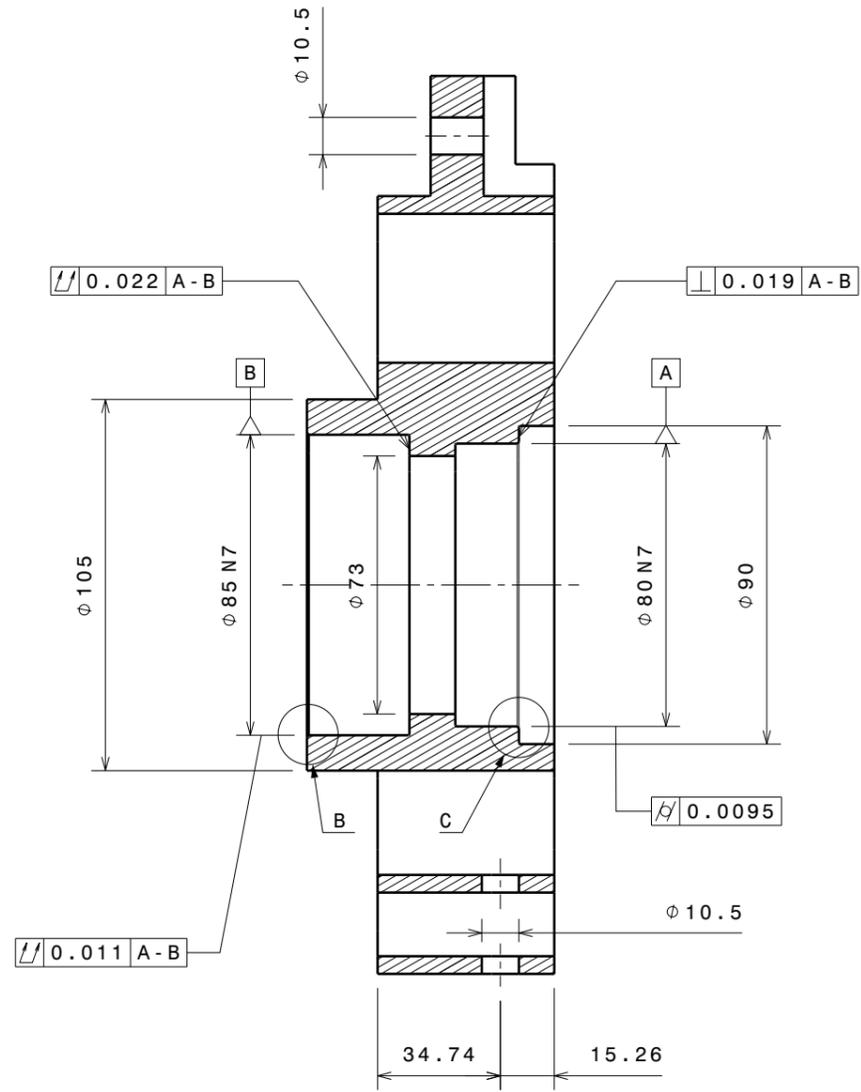
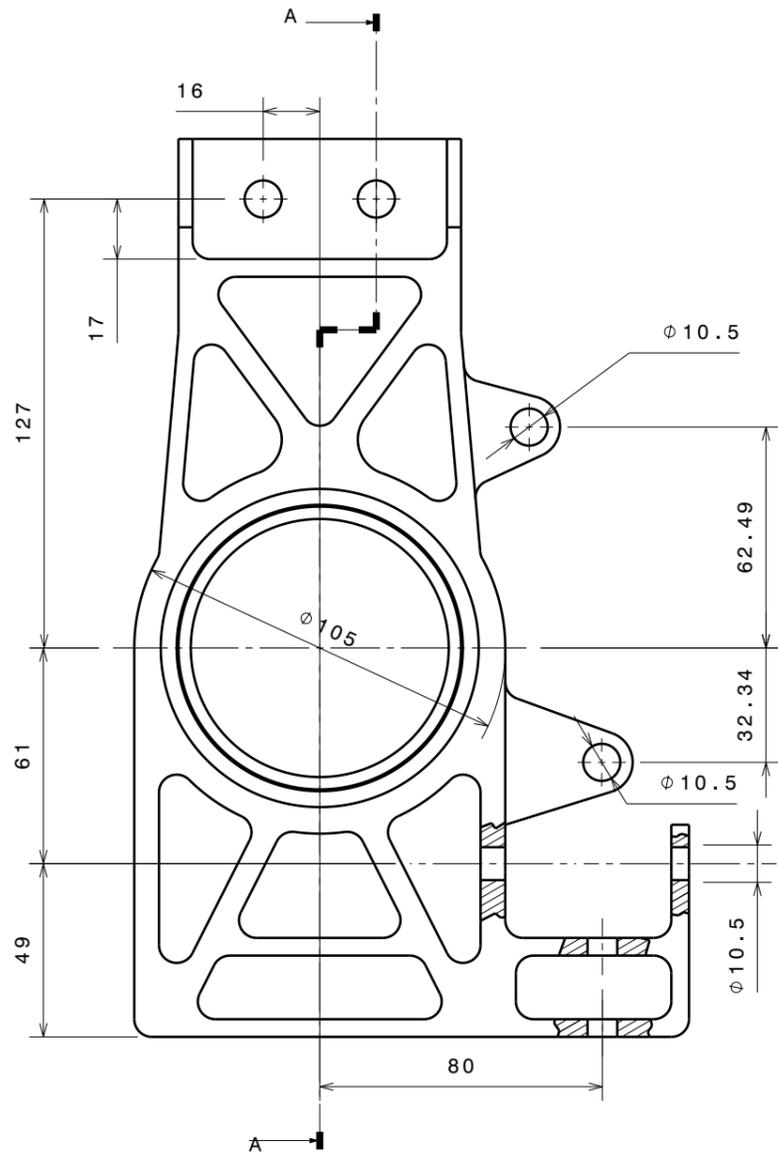
- MEJÍA GONZALEZ D., Diseño de manguetas delanteras y posteriores de un vehículo monoplaza para la competición en la Fórmula SAE, 2015.
- PISUERGA SPORT, Desing Report 2014, 2014.
- VILLAR LÓPEZ C., Diseño conceptual y dinámica vehicular de un Fórmula SAE, 2006.



# ANEXO: PLANOS

---





<b>Universidad de Valladolid</b>			
Fecha 05/04/2016	Designación MANGUETA TRASERA DERECHA	Ra 3.2 ✓	
Nombre Carlos Martín Temprano	Escala 1:2	A3	ISO 2768-mK