



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO, ANÁLISIS Y FABRICACIÓN DE BUJES DELANTEROS Y TRASEROS PARA UN PROTOTIPO DE FORMULA STUDENT

Autor: Pablo Borreguero Aláez

Director: Alberto Carnicero López

Madrid

Agosto de 2019

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. PABLO BORREGUERO ALÁEZ

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: DISEÑO, ANÁLISIS Y FABRICACIÓN DE BUSES DELANTEROS Y TRASEROS PARA UN PROTOTIPO DE FORMULA STUDENT, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor CEDE a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e

intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.


6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a ...29... deAGOSTO..... de 2019..

ACEPTA

Fdo..........

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

... DISEÑO, ANÁLISIS Y FABRICACIÓN DE BOTES DELANTEROS Y

TRAJEROS PARA UN PROTOTIPO DE FORMULA STUDENT

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2018/19..... es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada

de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Fecha: 29... / 08... / 19...



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Fecha: / /



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO, ANÁLISIS Y FABRICACIÓN DE BUJES DELANTEROS Y TRASEROS PARA UN PROTOTIPO DE FORMULA STUDENT

Autor: Pablo Borreguero Aláez

Director: Alberto Carnicero López

Madrid

Agosto de 2019

DISEÑO, ANÁLISIS Y FABRICACIÓN DE BUJES DELANTEROS Y TRASEROS PARA UN PROTOTIPO DE FORMULA STUDENT

Autor: Borreguero Aláez, Pablo

Director: Carnicero, López, Alberto

Entidad colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

1. Introducción

El presente documento tiene como objetivo el diseño de los bujes delanteros y traseros del prototipo de Formula Student de la Universidad Pontificia Comillas-ICAI.

Los bujes son los elementos que portan las ruedas y permiten el giro de las mismas sobre su propio eje. Constituyen, junto con las manguetas, el nexo de unión entre los elementos rodantes y no rodantes del conjunto de masa no suspendida del vehículo.

Los bujes son una parte clave en el diseño de cualquier automóvil, ya que son elementos fundamentales en la unión de los sistemas de suspensión, frenos, transmisión y dirección.

El documento incluye el diseño de unos prototipos básicos que cumplen geoméricamente los requisitos de estas piezas, el cálculo de las fuerzas que afectarán a los bujes, las simulaciones de las situaciones más desfavorables que se pueden dar durante la competición para los bujes, el diseño de los prototipos finales optimizados, las mismas simulaciones para los nuevos diseños, la selección de los materiales más adecuados, y la explicación de la fabricación y el montaje de los bujes.

2. Metodología

Se recopilará la información necesaria para el entendimiento de las piezas que se van a diseñar.

Se diseñarán los bujes delanteros y traseros, utilizando un software CAD.

Se considerarán las fuerzas que más influyan en el comportamiento tanto de los bujes delanteros como de los traseros, prestando especial atención a los casos más desfavorables que puedan tener lugar durante la competición, y se realizará el cálculo de dichas fuerzas.

Se llevará a cabo un análisis de los bujes, mediante un software CAE, que facilitará la determinación de una configuración geométrica óptima, ya que teniendo en cuenta los estados tensionales a los que estarán sometidos en los casos más desfavorables y los límites elásticos de los materiales, se podrá saber en qué zonas de las piezas es realmente importante el material, minimizando así el peso, y por tanto el coste de los bujes, ambos aspectos fundamentales en el diseño y fabricación de un prototipo Formula SAE.

También se comprobarán distintas opciones de material, apoyándose en el software CES Edupack, y teniendo en cuenta aspectos como las propiedades mecánicas de los materiales, sus precios, etc., se seleccionará uno adecuado para la fabricación de los bujes delanteros y traseros, teniendo como objetivo que sean ligeros, económicos y viables.

Se explicará el proceso de fabricación y del montaje de los bujes delanteros y traseros. Se realizará un presupuesto final de la fabricación (tanto materia prima necesaria como el proceso de fabricación).

Los modelos serán finalmente incorporados al prototipo Formula Student IFS-02.

3. Resultados

Los resultados del cálculo de fuerzas fueron los siguientes:

Aceleración	Fuerza vertical rueda trasera [N]	885,89
	Fuerza de tracción [N]	2000
Frenada	Fuerza vertical rueda delantera [N]	1126,5
	Fuerza de frenado [N]	1783,43
Paso por curva	Fuerza vertical rueda delantera exterior [N]	1400,23
	Fuerza vertical rueda trasera exterior [N]	1334,37
	Fuerza lateral rueda exterior [N]	654,25
	Fuerza lateral rueda interior [N]	120,1

Las simulaciones se realizaron a partir de estos valores de fuerzas, con valores algo superiores para añadir factor de seguridad.

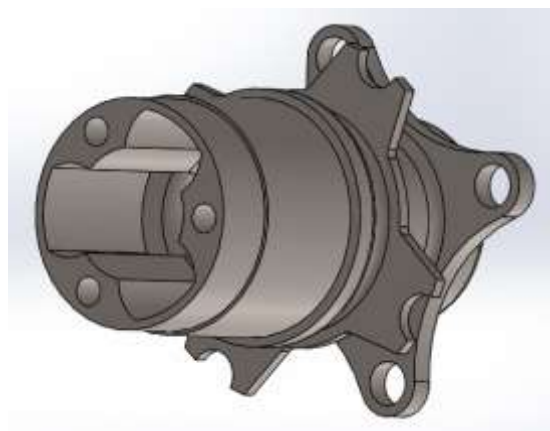
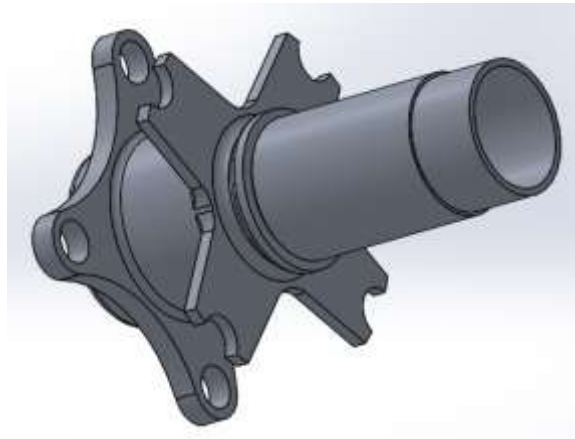
Los resultados de la selección de materiales fueron los siguientes: Los bujes delanteros se fabricaron de Aluminium, 7075, T6, y los bujes traseros se fabricaron de Acero al carbono.

Los resultados de las simulaciones fueron los siguientes:

Buje delantero			
	Tensión promediada [MPa]	Tensión no promediada [MPa]	Deformación total [mm]
Máxima	146,69	159,68	0,17136
Aplicada en	Unión con la llanta	Unión con la llanta	Extremo interior

Buje trasero			
	Tensión promediada [MPa]	Tensión no promediada [MPa]	Deformación total [mm]
Máxima	198,48	218,83	0,065527
Aplicada en	Unión con la llanta	Unión con la llanta	Extremo interior

Los prototipos finales fueron los siguientes:



4. Conclusiones

Analizando los resultados de las simulaciones, se puede confirmar que los bujes se han diseñado correctamente.

Los prototipos finales que se han diseñado son lo más óptimos posible para el presupuesto y el resto de condicionantes que se han descrito en este documento.

De cara a próximos diseños, contando con algo más de presupuesto, se puede realizar una optimización topológica de las piezas, reduciendo aún más su peso. Se necesitará más presupuesto para mecanizar el resultado de la optimización. Además, contando con más información del coche en competición, se puede comprobar si los bujes traseros pueden ser también de aluminio, reduciendo bastante su peso.

DESIGN, ANALYSIS AND MANUFACTURING OF THE FRONT AND REAR HUBS OF A FORMULA STUDENT PROTOTYPE

Author: Borreguero Aláez, Pablo

Director: Carnicero López, Alberto

Collaborating entity: ICAI – Univeridad Pontificia Comillas

1. Introduction

This document aims to design the front and rear hubs of the Formula Student prototype of Universidad Pontificia Comillas.

The hubs are the elements that carry the wheels and allow them to be rotate on their own axle. They constitute, together with the sleeves, the link between the rolling and non-rolling elements of the unsuspended mass assembly of the vehicle.

Hubs are a key part on the design of any car, as they are fundamental elements in the union of suspension, brake, transmission and steering systems.

The document includes the design of basic prototypes that geometrically meet the requirements of these parts, the calculation of the forces that will affect the hubs, the simulations of the most unfavourable situations that can occur during the competition to the hubs, the design of the optimized final prototypes, the same simulations for the new designs, the selection of the most suitable materials, and the explanation of the manufacture and assembly of the hubs.

2. Methodology

The information that is necessary for understanding the parts to be designed will be collected.

The front and rear hubs will be designed, using CAD software.

The forces that have the greatest influence on the behaviour of both the front and rear hubs will be considered, paying particular attention to the most unfavourable cases that may take place during the competition, and the calculation of those forces will be carried out.

An analysis of the hubs will be carried out, using CAE software, which will facilitate the determination of an optimal geometric configuration, since taking into account the tension states to which they will be subjected in the most unfavourable cases and the elastic limit of the materials, it will be possible to know in which areas of the parts, the material is really important, thus minimizing the weight, and therefore the cost of the hubs, both fundamental aspects in the design and manufacture of a prototype Formula SAE.

Different material options will also be checked, based on CES Edupack software, and taking into account aspects such as the mechanical properties of the materials, their prices, etc., one suitable material for the manufacture of the front and rear hubs will be selected, with the aim of making them light, economical and viable.

The manufacturing and assembly process of the front and rear hubs will be explained. A final production budget (both raw material and manufacturing process) will be made.

The models will eventually be incorporated into the Formula Student IFS-02 prototype.

3. Results

The results of the force calculation were as follows:

Acceleration	Rear wheel vertical force[N]	885,89
	Traction force [N]	2000
Braking	Front wheel vertical force [N]	1126,5
	Braking force [N]	1783,43
Turning in a curve	Front outer wheel vertical force [N]	1400,23
	Rear outer wheel vertical force [N]	1334,37
	Outer wheel lateral force [N]	654,25
	Inner wheel lateral force [N]	120,1

The simulations were performed from these force values, with slightly higher values to add security factor.

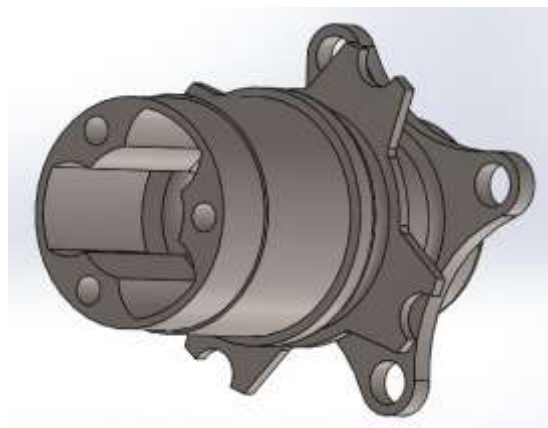
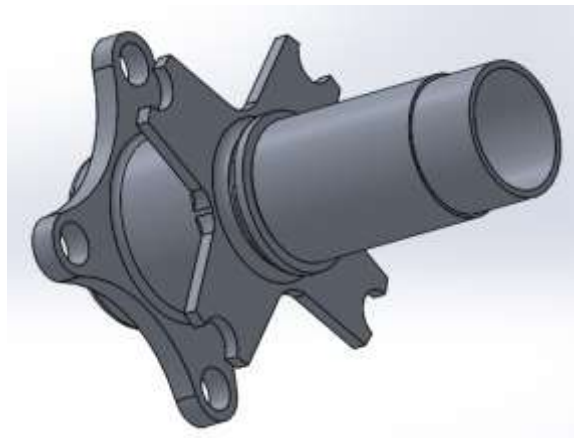
The results of the material selection were as follows: The front hubs were made of Aluminium,7075, T6, and the rear hubs were made of Steel Carbon.

The results of the simulations were as follows:

Front Hub			
	Averaged tension [MPa]	Unaveraged tension [MPa]	Total deformation [mm]
Maximum	146,69	159,68	0,17136
Applied in	Union with the tire	Union with the tire	Inner end

Buje trasero			
	Averaged tension [MPa]	Unaveraged tension [MPa]	Total deformation [mm]
Maximum	198,48	218,83	0,065527
Applied in	Union with the tire	Union with the tire	Inner end

The final prototypes were as follows:



4. Conclusions

Analysing the results of the simulations, it's confirmed that the hubs are properly designed.

The final prototypes that have been designed are as optimal as possible for the budget and the other conditions described in this document.

In the face of upcoming designs, with a little more budget, it will be possible to perform a topological optimization of the parts, further reducing their weight. It will take a little more budget to machine the optimization result. In addition, with more information about the car in competition, it can be checked if the rear hubs can also be aluminium, reducing their weight quite a bit.

Índice

Capítulo 1: Introducción.....	7
1.1. ICAI Speed Club	9
1.2. Formula Student.....	9
Capítulo 2: Sistema de suspensión.....	17
2.1. Introducción	19
2.2. Tipos de suspensión	19
2.3. Sistema de competición	22
2.4. Parámetros de diseño de la suspensión.....	24
2.5. Elementos del sistema de suspensión	29
2.6. Normativa.....	36
Capítulo 3: Diseño 3D.....	37
3.1. Introducción	39
3.2. Primeros prototipos	39
3.3. Prototipos finales	40
Capítulo 4: Cálculo de fuerzas	43
4.1. Introducción	45
4.2. Situaciones a analizar	45
4.3. Resultados	51
Capítulo 5: Selección de materiales	53
5.1. Introducción	55
5.2. Bujes delanteros.....	56
5.3. Bujes traseros.....	66
Capítulo 6: Análisis y optimización.....	67
6.1. Introducción	69
6.2. Mallado	69
6.3. Primeros prototipos	71
6.4. Prototipos finales	88
6.5. Conclusiones.....	105
Capítulo 7: Fabricación y montaje.....	107
7.1. Fabricación	109
7.2. Montaje	110

Bibliografía	113
ANEXOS	115
ANEXO A: PLANOS.....	117
ANEXO B: ALUMINIUM, 7075, T6.....	123
ANEXO C: COST REPORT	131
ANEXO D: PROCESO DE FABRICACIÓN	137

Índice de Tablas

Tabla 1.1 Pruebas d la competición	11
Tabla 4.1 Variables de cálculo, Distribución de masas.....	47
Tabla 4.2 Variables de cálculo, Aceleración	48
Tabla 4.3 Variables de cálculo, Frenada.....	49
Tabla 4.4 Variables de cálculo, Paso por curva, Transferencia lateral de masas	50
Tabla 4.5 Variables de cálculo, Paso por curva, Fuerza centrífuga	50
Tabla 4.6 Resultados, Cálculo de fuerzas	51
Tabla 5.1 Propiedades Aluminium, 7075, T6	66
Tabla 6.1 Parámetros de malla.....	69
Tabla 6.2 Calidad de malla	69
Tabla 6.3 Fuerzas aplicadas en simulaciones, Primeros prototipos, Bujes delanteros.....	71
Tabla 6.4 Fuerzas aplicadas en simulaciones, Primeros prototipos, Bujes traseros.....	78
Tabla 6.5 Fuerzas aplicadas en simulaciones, Prototipos finales, Bujes delanteros.....	88
Tabla 6.6 Fuerzas aplicadas en simulaciones, Prototipos finales, Bujes traseros.....	95
Tabla 6.7 Resultados simulaciones, Bujes delanteros.....	105
Tabla 6.8 Resultados simulaciones, Bujes traseros.....	105

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1.1 Logo ISC Formula Student	9
Ilustración 1.2 Prototipo IFS-02.....	9
Ilustración 1.3 Competiciones.....	10
Ilustración 1.4 Tilt Test	12
Ilustración 1.5 Rain Test	13
Ilustración 1.6 Skid Pad	14
Ilustración 1.7 Autocross.....	14
Ilustración 1.8 Endurance.....	15
Ilustración 2.1 Suspensión rígida.....	20
Ilustración 2.2 Suspensión independiente	21
Ilustración 2.3 Paralelogramo deformable	22
Ilustración 2.4 Sistema Pull-Rod.....	23
Ilustración 2.5 Sistema Push-Rod	23
Ilustración 2.6 Batalla.....	24
Ilustración 2.7 Ancho de vía	25
Ilustración 2.8 Centro de gravedad, instantáneo y de balanceo	26
Ilustración 2.9 Ángulo de caída	28
Ilustración 2.10 Convergencia y divergencia.....	29
Ilustración 2.11 Masa suspendida y no suspendida.....	29
Ilustración 2.12 Conjunto de masa no suspendida, delantero	30
Ilustración 2.13 Conjunto de masa no suspendida, trasero.....	30
Ilustración 2.14 Offset de una llanta	31
Ilustración 2.15 Neumático y llanta	31
Ilustración 2.16 Rodamiento de bolas de una hilera	31
Ilustración 2.17 Mangueta	32
Ilustración 2.18 Buje delantero	32
Ilustración 2.19 Buje trasero	32
Ilustración 2.20 Triángulos	33
Ilustración 2.21 Barra de reglaje	33
Ilustración 2.22 Sistema de actuación	34
Ilustración 2.23 Sistema de frenos.....	34
Ilustración 2.24 Sistema de dirección	35
Ilustración 2.25 Sistema de transmisión	35
Ilustración 2.26 Plano teórico (vista trasera)	36
Ilustración 2.27 Plano teórico (vista lateral)	36
Ilustración 3.1 Diseño 3D, Primer prototipo, Buje delantero	39
Ilustración 3.2 Vista sección, Primer prototipo, Buje delantero	39
Ilustración 3.3 Diseño 3D, Primer prototipo, Buje trasero.....	39
Ilustración 3.4 Vista sección, Primer prototipo, Buje trasero	39
Ilustración 3.5 Polaris, Temporada pasada	40
Ilustración 3.6 Mecanizado Polaris en buje trasero	40
Ilustración 3.7 Diseño 3D, Prototipo final, Buje delantero	41
Ilustración 3.8 Vista sección, Prototipo final, Buje delantero	41
Ilustración 3.9 Diseño 3D, Prototipo final, Buje trasero	41

Ilustración 3.10 Vista sección, Prototipo final, Buje trasero	41
Ilustración 4.1 Transferencia de masas longitudinal.....	46
Ilustración 4.2 Transferencia de masas lateral.....	46
Ilustración 4.3 Distribución de masas	47
Ilustración 5.1 Límite elástico-Precio	55
Ilustración 5.2 Límite elástico-Densidad	55
Ilustración 5.3 Filtro, Metales y aleaciones.....	56
Ilustración 5.4 Filtro, Densidad	57
Ilustración 5.5 Filtro, Precio	58
Ilustración 5.6 Filtro, Límite elástico	59
Ilustración 5.7 Límite elástico-Precio	60
Ilustración 5.8 Límite elástico-Densidad	61
Ilustración 5.9 Densidad-Precio	61
Ilustración 5.10 Coef. exp. term-Precio.....	62
Ilustración 5.11 Dureza-Precio	63
Ilustración 5.12 Rigidez-Precio	64
Ilustración 5.13 Resistencia a fractura-Precio.....	64
Ilustración 5.14 Huella CO2-Precio	65
Ilustración 6.1 Malla, Primer prototipo, Buje delantero.....	70
Ilustración 6.2 Malla, Primer prototipo, Buje trasero	70
Ilustración 6.3 Malla, Prototipo final, Buje delantero.....	70
Ilustración 6.4 Malla, Prototipo final, Buje trasero.....	70
Ilustración 6.5 Tensión promediada, Frenada, Primer prototipo, Buje delantero	72
Ilustración 6.6 Detalle Max. Tensión.....	72
Ilustración 6.7 Detalle, Min. Tensión	72
Ilustración 6.8 Tensión no promediada, Frenada, Primer prototipo, Buje delantero	73
Ilustración 6.9 Detalle, Max. Tensión.....	73
Ilustración 6.10 Detalle, Min. Tensión	73
Ilustración 6.11 Deformación total, Frenada, Primer prototipo, Buje delantero	74
Ilustración 6.12 Detalle, Max. Deformación	74
Ilustración 6.13 Detalle, Min. Deformación	74
Ilustración 6.14 Tensión promediada, Paso por curva, Primer prototipo, Buje delantero.....	75
Ilustración 6.15 Detalle, Max. Tensión.....	75
Ilustración 6.16 Detalle, Min. Tensión	75
Ilustración 6.17 Tensión no promediada, Paso por curva, Primer prototipo, Buje delantero....	76
Ilustración 6.18 Detalle, Max. Tensión.....	76
Ilustración 6.19 Detalle, Min. Tensión	76
Ilustración 6.20 Deformación total, Paso por curva, Primer prototipo, Buje delantero.....	77
Ilustración 6.21 Detalle, Max. Deformación	77
Ilustración 6.22 Detalle, Min. Deformación	77
Ilustración 6.23 Tensión promediada, Frenada, Primer prototipo, Buje trasero.....	79
Ilustración 6.24 Detalle Max. Tensión.....	79
Ilustración 6.25 Detalle, Min. Tensión	79
Ilustración 6.26 Tensión no promediada, Frenada, Primer prototipo, Buje trasero.....	80
Ilustración 6.27 Detalle, Max. Tensión.....	80
Ilustración 6.28 Detalle, Min. Tensión	80
Ilustración 6.29 Deformación total, Frenada, Primer prototipo, Buje trasero	81

Ilustración 6.30 Detalle, Max. Deformación	81
Ilustración 6.31 Detalle, Min. Tensión	81
Ilustración 6.32 Tensión promediada, Paso por curva, Primer prototipo, Buje trasero	82
Ilustración 6.33 Detalle, Max. Tensión	82
Ilustración 6.34 Detalle, Min. Tensión	82
Ilustración 6.35 Tensión no promediada, Paso por curva, Primer prototipo, Buje trasero	83
Ilustración 6.36 Detalle, Max. Tensión	83
Ilustración 6.37 Detalle, Min. Tensión	83
Ilustración 6.38 Deformación total, Paso por curva, Primer prototipo, Buje trasero	84
Ilustración 6.39 Detalle, Max. Deformación	84
Ilustración 6.40 Detalle, Min. Deformación	84
Ilustración 6.41 Tensión promediada, Aceleración, Primer prototipo, Buje trasero	85
Ilustración 6.42 Detalle, Max. Tensión	85
Ilustración 6.43 Detalle, Min. Tensión	85
Ilustración 6.44 Tensión no promediada, Aceleración, Primer prototipo, Buje trasero	86
Ilustración 6.45 Detalle, Max. Tensión	86
Ilustración 6.46 Detalle, Min. Tensión	86
Ilustración 6.47 Deformación total, Aceleración, Primer prototipo, Buje trasero	87
Ilustración 6.48 Detalle, Max. Deformación	87
Ilustración 6.49 Detalle, Min. Deformación	87
Ilustración 6.50 Tensión promediada, Frenada, Prototipo final, Buje delantero	89
Ilustración 6.51 Detalle, Max. Tensión	89
Ilustración 6.52 Detalle, Max. Tensión	89
Ilustración 6.53 Tensión no promediada, Frenada, Prototipo final, Buje delantero	90
Ilustración 6.54 Detalle, Max. Tensión	90
Ilustración 6.55 Detalle, Min. Tensión	90
Ilustración 6.56 Deformación total, Frenada, Prototipo final, Buje delantero	91
Ilustración 6.57 Detalle, Max. Deformación	91
Ilustración 6.58 Detalle, Max. Deformación	91
Ilustración 6.59 Tensión promediada, Paso por curva, Prototipo final, Buje delantero	92
Ilustración 6.60 Detalle, Max. Tensión	92
Ilustración 6.61 Detalle, Min. Tensión	92
Ilustración 6.62 Tensión no promediada, Paso por curva, Prototipo final, Buje delantero	93
Ilustración 6.63 Detalle, Max. Tensión	93
Ilustración 6.64 Detalle, Min. Tensión	93
Ilustración 6.65 Deformación total, Paso por curva, Prototipo final, Buje delantero	94
Ilustración 6.66 Detalle, Max. Tensión	94
Ilustración 6.67 Detalle, Min. Tensión	94
Ilustración 6.68 Tensión promediada, Frenada, Prototipo final, Buje trasero	96
Ilustración 6.69 Detalle, Max. Tensión	96
Ilustración 6.70 Detalle, Min. Tensión	96
Ilustración 6.71 Tensión no promediada, Frenada, Prototipo final, Buje trasero	97
Ilustración 6.72 Detalle, Max. Tensión	97
Ilustración 6.73 Detalle, Max. Tensión	97
Ilustración 6.74 Deformación total, Frenada, Prototipo final, Buje trasero	98
Ilustración 6.75 Detalle, Max. Tensión	98
Ilustración 6.76 Detalle, Min. Tensión	98

Ilustración 6.77 Tensión promediada, Paso por curva, Prototipo final, Buje trasero.....	99
Ilustración 6.78 Detalle, Max. Tensión.....	99
Ilustración 6.79 Detalle, Min. Tensión	99
Ilustración 6.80 Tensión no promediada, Paso por curva, Prototipo final, Buje trasero.....	100
Ilustración 6.81 Detalle, Max. Tensión.....	100
Ilustración 6.82 Detalle, Min. Tensión	100
Ilustración 6.83 Deformación total, Paso por curva, Prototipo final, Buje trasero.....	101
Ilustración 6.84 Detalle, Max. Deformación	101
Ilustración 6.85 Detalle, Min. Deformación	101
Ilustración 6.86 Tensión promediada, Aceleración, Prototipo final, Buje trasero.....	102
Ilustración 6.87 Detalle, Max. Tensión.....	102
Ilustración 6.88 Detalle, Min. Tensión	102
Ilustración 6.89 Tensión no promediada, Aceleración, Prototipo final, Paso por curva.....	103
Ilustración 6.90 Detalle, Max. Tensión.....	103
Ilustración 6.91 Detalle, Min. Tensión	103
Ilustración 6.92 Deformación total, Aceleración, Prototipo final, Buje trasero.....	104
Ilustración 6.93 Detalle, Max. Deformación	104
Ilustración 6.94 Detalle, Min. Deformación	104
Ilustración 7.1 Fabricación, Buje delantero.....	109
Ilustración 7.2 Fabricación, Buje trasero.....	109
Ilustración 7.3 Bobbans.....	110
Ilustración 7.4 Circlips	110
Ilustración 7.5 Unión Buje-Llanta	111
Ilustración 7.6 Rodamientos, Hub-Retainer, Buje delantero	111
Ilustración 7.7 Rodamientos, Hub-Retainer, Buje trasero	111

Capítulo 1: Introducción

1.1. ICAI Speed Club

Un grupo de alumnos de la Universidad Pontificia Comillas (ICAI) fundó en 2015 la asociación ICAI Speed Club (ISC). Esta asociación permite a todos sus integrantes reforzar y ampliar los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera, y tomar un primer contacto con un proyecto real de ingeniería, potenciando y desarrollando su carrera profesional.

Actualmente en ISC se están llevando a cabo varios proyectos. Uno de los proyectos más ambiciosos de la asociación es el proyecto ISC Formula Student.



Ilustración 1.1 Logo ISC Formula Student



Ilustración 1.2 Prototipo IFS-02

1.2. Formula Student

1.2.1. Concepto

La Formula Student (Formula SAE) es una competición entre estudiantes de universidades de todo el mundo que promueve la excelencia en ingeniería a través de una competición donde los miembros del equipo diseñan, construyen, desarrollan y compiten un vehículo monoplaza, llevando a los estudiantes más allá de la teoría de los libros de texto, permitiéndoles poner en práctica los conocimientos adquiridos durante la carrera y demostrar su capacidad de trabajar en equipo.

La Formula SAE sirve como transición del ámbito académico al ámbito profesional.

1.2.2. Historia

El origen de la Formula SAE tiene lugar en 1979, con la creación de la BAJA SAE, competición en la cual los estudiantes de ingeniería tenían la tarea de diseñar y construir un vehículo deportivo todo terreno de un solo asiento. El principal inconveniente de esta competición era que limitaba mucho la libertad de diseño por parte de los estudiantes, ya que, entre otras cosas, proporcionaban a todos los equipos el mismo motor, sin posibilidad de modificarlo.

En 1981 la Society of Automotive Engineers (SAE) organiza en Austin, Texas (EEUU) la primera edición de Formula SAE. En esta primera edición participaron muy pocos equipos. Se presentaron cuatro escuelas: Instituto Stevens (NJ), Universidad de Tulsa (OK), Universidad de Cincinnati (OH) y Universidad de Austin (TX).

La competición fue creciendo rápidamente, y es en 1998 cuando esta competición llega a Europa con el nombre de Formula Student. El evento tuvo lugar en Reino Unido, asistieron más de 400 personas de la industria automovilística y los medios de comunicación.

Actualmente esta competición se celebra en numerosos países, utilizando todos ellos normativas muy similares.

En 2010 España pasó a formar parte de la Formula SAE. Se celebra en el circuito de Montmeló, Barcelona.

1.2.3. Formula SAE Electric

Introducida en 2013, la Formula SAE Electric permite el desarrollo de vehículos totalmente eléctricos dentro del marco FSAE. Los equipos utilizan vehículos propulsados únicamente por motores eléctricos y compiten en eventos estáticos y dinámicos.

El monoplaza eléctrico de la Universidad Pontificia Comillas recibe el nombre de IFS-02.



Ilustración 1.3 Competiciones

1.2.4. Pruebas de la competición

Pruebas estáticas	Puntuación
<i>Presentation</i>	75 puntos
<i>Engineering design</i>	150 puntos
<i>Cost and manufacturing Analysis</i>	100 puntos
TOTAL	325 puntos
Inspecciones técnicas	Puntuación
<i>Scrutineering</i>	No puntua
<i>Tilt Test</i>	No puntua
<i>Noise Test</i>	No puntua
<i>Brake Test</i>	No puntua
<i>Rain Test</i>	No puntua
Pruebas dinámicas	Puntuación
<i>Acceleration</i>	75 puntos
<i>SkipPad</i>	50 puntos
<i>Autocross</i>	150 puntos
<i>Endurance</i>	300 puntos
<i>Efficiency</i>	100 puntos
TOTAL	675 puntos
TOTAL	1000 puntos

Tabla 1.1 Pruebas d la competición

1.2.4.1. Pruebas estáticas

- *Presentation*
Exposición por parte de uno o varios miembros del equipo de un “*Business Plan*” a modo de presentación a los jueces de la competición. Se trata de argumentar y defender por qué a la empresa le interesa apostar por la fabricación en serie del monoplaza del equipo. Para ello, se podrán utilizar todo tipo de argumentos comerciales y técnicos.
- *Engineering design*
Evaluación por parte de un equipo de jueces expertos en diversos campos de la automoción del diseño general del monoplaza, los criterios que se han seguido para tomar las decisiones y los conocimientos de los responsables. Al terminar la prueba, el jefe de los jueces se dirige al equipo para trasladarle sus impresiones, sobre todo de cara a futuras ediciones.

- *Cost and Manufacturing Analysis*
Presentación por parte del equipo de un documento muy completo que contabilice los costes de fabricación de todas y cada una de las piezas del monoplaza. Para ello, la organización pone a disposición de los equipos de estudiantes unas tablas de costes estándar en las que se detallan los costes de los materiales, procesos, moldes, herramientas, tornillería y elementos comerciales estándar. Un equipo de jueces procederá a evaluar la corrección del documento comparándolo con el monoplaza real.

1.2.4.2. Inspecciones técnicas

- *Scrutineering*
Evaluación por parte de un equipo de expertos en el mundo de la automoción del cumplimiento de todos los requisitos técnicos necesarios especificados en la normativa de la competición. Se revisan detalladamente distancias, geometrías, posición del piloto, arcos de seguridad del chasis, peso del vehículo, materiales, soluciones utilizadas, etc. Finalmente se realiza una prueba en la que el piloto tiene que ser capaz de salir del vehículo en menos de cinco segundos.
- *Tilt Test*
Se posiciona el monoplaza con el piloto en su interior sobre una plataforma horizontal. Dicha plataforma se inclina inicialmente 45 grados para ver que no hay ninguna pérdida de líquidos, y posteriormente se inclina hasta 60 grados para comprobar que el monoplaza no vuelca, demostrando así su estabilidad frente a las fuerzas laterales.



Ilustración 1.4 Tilt Test

- *Noise Test*
Los monoplazas con motor de combustión deben revolucionar el motor hasta una velocidad específica en la normativa, dependiendo del tipo de motor. Se mide el nivel de sonoridad a una distancia concreta del tubo de escape, y no debe superar los 110 dBA.
- *Brake Test*
El piloto debe acelerar durante un tramo determinado y ser capaz de frenar bloqueando las cuatro ruedas al mismo tiempo, sin que se desvíe de su trayectoria, demostrando así que el vehículo tiene suficiente capacidad de frenada y el nivel de estabilidad necesario cuando lo hace.
- *Rain Test*
Los monoplazas eléctricos deben pasar una prueba en la que son rociados con agua para verificar el correcto aislamiento de todos los componentes eléctricos del vehículo.



Ilustración 1.5 Rain Test

1.2.4.3. Pruebas dinámicas

- *Acceleration*
Se cronometra el tiempo que el monoplaza necesita para recorrer 75 metros acelerando desde la situación de parado. Se realizan dos intentos por piloto, es decir, cuatro intentos.

- SkidPad**

En un circuito con forma de “ocho”, delimitado por conos, se cronometra el tiempo que tarda el monoplaza en completar los dos círculos del “ocho” en un sentido y los mismos círculos en sentido contrario, a la máxima velocidad posible, sin tocar los conos. De esta manera, se evalúa la estabilidad y el paso por curva de los monoplazas. Se realizan dos intentos por piloto, es decir, cuatro intentos.

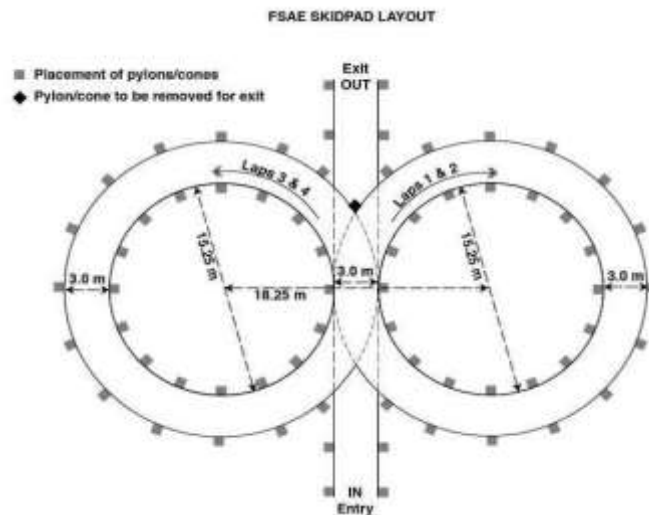


Ilustración 1.6 Skid Pad

- Autocross**

En un circuito muy revirado, de aproximadamente 800 metros, se realizan dos vueltas seguidas a máxima velocidad. Se realizan dos intentos por piloto, es decir, cuatro intentos.

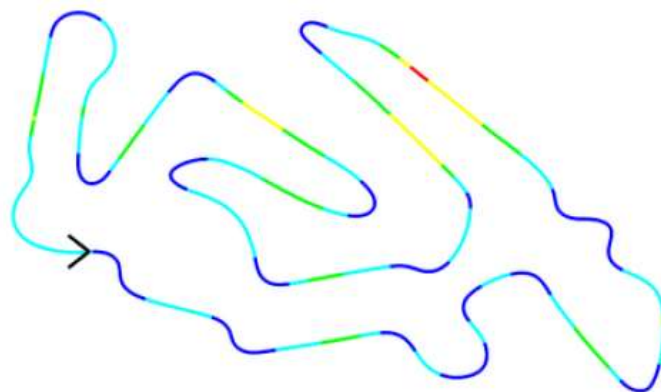


Ilustración 1.7 Autocross

- *Endurance*
Se realiza una prueba de resistencia en un circuito mayor que el de la prueba de *Autocross*, dando vueltas hasta recorrer un total de aproximadamente 22 kilómetros. Se realiza una parada obligatoria a mitad de recorrido para cambiar de piloto, apagando el motor y volviéndolo a arrancar, poniendo a prueba la fiabilidad del monoplaza.
Se trata de la prueba que suele determinar el equipo vencedor de la competición, pues es la prueba que más puntúa. Además, es la única prueba en la que hay más de un monoplaza en la pista simultáneamente, llegándose a producir adelantamientos en determinadas zonas delimitadas para ello mediante banderas azules.



Ilustración 1.8 Endurance

- *Efficiency*
Se mide la energía que ha necesitado el monoplaza para completar los 22 kilómetros de la prueba de *Endurance*. Para poder puntuar en esta prueba es necesario haber completado al menos la primera mitad del recorrido, y que el tiempo del equipo no supere en un determinado porcentaje al del más rápido, con el objetivo de evitar una conducción muy lenta.
La puntuación de esta prueba se calcula como un factor combinado entre el tiempo y el consumo energético.

Capítulo 2: Sistema de suspensión

2.1. Introducción

El sistema de suspensión es uno de los más importantes del vehículo, sobre todo, en términos de seguridad.

La suspensión puede entenderse como el conjunto de componentes que suponen la unión entre las ruedas y el resto del vehículo. Permite que las ruedas se desplacen con respecto a la carrocería mediante movimientos de expansión y compresión de los amortiguadores.

El principio básico de funcionamiento es el de interponer elementos elásticos y de amortiguación entre la masa suspendida y la masa no suspendida.

En vehículos de competición se busca obtener la máxima tracción posible que puedan ofrecer los neumáticos, tratando de no descuidar la comodidad del piloto.

Los neumáticos son el único punto de contacto del vehículo con el suelo, es decir, son los elementos que reciben todas las fuerzas que se generan durante la conducción, y las transmiten al asfalto.

El conjunto de la suspensión tiene tanta importancia porque, entre otras cosas, es el encargado de transmitir dichas fuerzas de la manera más eficiente posible, controlando su posición relativa. Por ello, el sistema de suspensión tiene como función principal asegurar el contacto de las ruedas con el suelo, vital para evitar inestabilidad direccional en superficies irregulares durante la aplicación de un esfuerzo. Además, otra de sus funciones principales es absorber las vibraciones y relajar las fuerzas verticales que se pueden producir durante la circulación, debido a obstáculos, aceleración, frenado, giros, etc.

En definitiva, la suspensión es el nexo de unión entre la masa suspendida y la masa no suspendida, que absorbe las fuerzas externas y ayuda a transmitir las internas al asfalto, para conseguir la máxima eficiencia del vehículo.

2.2. Tipos de suspensión

Existen diferentes tipos y clasificaciones de los sistemas de suspensión.

El comportamiento de la suspensión de un vehículo depende de cómo se dispongan los elementos que la componen. Por tanto, los sistemas de suspensión se pueden clasificar según su geometría, de la siguiente manera: Suspensión rígida, Suspensión semirrígida/semindependiente y Suspensión independiente.

2.2.1. Suspensión rígida

Se trata de uno de los sistemas de suspensión más antiguos y básicos que se utilizan. Su origen es incluso anterior a los automóviles, puesto que ya se empleaba en carruajes.

Destaca por su sencillez. Debido al reducido número de elementos que lo componen, es una suspensión fácil de fabricar y ensamblar.

Las ruedas están unidas mediante un eje rígido, y oscilan simultáneamente. Cuando el vehículo atraviesa un obstáculo, el eje entero se inclina según una única dirección.

Ofrece una robustez considerable. Además, permite una gran elevación del chasis y mantiene invariable la orientación de las ruedas con respecto al terreno. Por ello, se utiliza sobre todo en vehículos pesados, que deben soportar cargas elevadas, y todoterrenos.

Como desventaja, cabe destacar que las fuerzas que actúan sobre una rueda, actúan también sobre la contraria, lo cual reduce la estabilidad del vehículo y produce vibraciones, especialmente si se utiliza en el eje delantero. Además, tiene un peso elevado y requiere un gran espacio en la parte inferior del chasis para albergar el eje rígido.

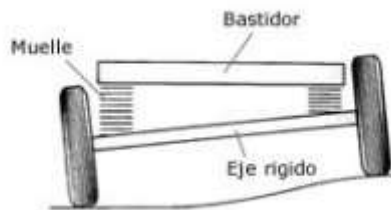


Ilustración 2.1 Suspensión rígida

2.2.2. Suspensión semirrígida/semindependiente

Se trata de una suspensión con una configuración similar a la de eje rígido, pero lleva un brazo adicional, por lo que. Es decir, no es rígida, pero tampoco es independiente.

A diferencia del sistema anterior, el puente de unión entre ambas ruedas no es rígido, sino que trabaja a torsión, de manera similar a una barra estabilizadora.

Este sistema supone una reducción considerable del peso no suspendido con respecto al de eje rígido. Además, las oscilaciones se transmiten de forma parcial, por lo que se consigue un confort ligeramente superior.

Algunas de sus ventajas más notables son el bajo peso, el reducido coste y el poco espacio que necesita.

Entre los sistemas de suspensión de este tipo, destacan los siguientes: Eje torsional y Suspensión "De Dion".

2.2.3. Suspensión independiente

Se trata del sistema de suspensión más empleado actualmente, y el que, desde el punto de vista del confort y la estabilidad, ofrece mejores resultados.

La suspensión independiente es la más adecuada para los vehículos de competición, ya que ofrece una mayor estabilidad al absorber de forma independiente las vibraciones y oscilaciones de las dos ruedas de un mismo eje. Además, se trata del diseño que mayor confort ofrece, y el que posee un menor peso no suspendido. Ambos, aspectos fundamentales desde el punto de vista de la dinámica de vehículos.

Su geometría es mucho más compleja, por lo que, su diseño se convierte en un aspecto clave para garantizar que el recorrido de la rueda sea el adecuado, y sacar el máximo rendimiento posible al vehículo.

La universalización de las suspensiones independientes en el tren delantero no tardó en llegar, por su positiva influencia en el comportamiento del sistema de dirección. La elevada masa no suspendida de los ejes rígidos, los hace muy sensibles a cualquier desequilibrio en las ruedas, pudiendo provocar una pérdida de capacidad direccional, debido a los rebotes a los que se ve sometido el eje.

Las primeras suspensiones independientes se popularizaron en el tren trasero debido a la aparición de vehículos con motor trasero, ya que el conjunto trasero fijado al chasis obliga a utilizar semiejes articulados para permitir el movimiento de las ruedas.

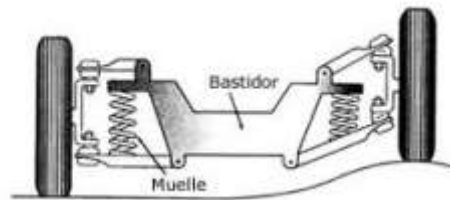


Ilustración 2.2 Suspensión independiente

El desarrollo de este tipo de suspensión ha dado lugar a diversas configuraciones. Cada una de ellas con sus ventajas e inconvenientes. Se pueden destacar los siguientes sistemas de suspensión independiente:

- 2.2.3.1. Eje oscilante
- 2.2.3.2. Brazos tirados
- 2.2.3.3. McPherson
- 2.2.3.4. Paralelogramo deformable (Double Wishbone)
- 2.2.3.5. Multibrazo (Multilink)

Paralelogramo deformable

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

Es el sistema de suspensión elegido en la gran mayoría de vehículos de competición.

Este sistema consta de dos brazos, y el sistema muelle-amortiguador apoya sobre el brazo inferior.

Se trata de uno de los sistemas más avanzados, además de ser el precursor de los sistemas más modernos que se utilizan actualmente en competición.

Presenta una gran precisión en cuanto al guiado de las ruedas. Además, minimiza los efectos negativos debidos a las oscilaciones del terreno.

La configuración más empleada es la que presenta dos triángulos/trapezios superpuestos, anclados cada uno a la mangueta en un punto y al chasis en dos puntos.



Ilustración 2.3 Paralelogramo deformable

2.3. Sistema de competición

Con el objetivo de mejorar la aerodinámica del monoplaza y reducir el peso del mismo al máximo, se desarrolla en el mundo de la competición una variante del sistema de triángulos superpuestos, con mayor esbeltez y ligereza.

Esta variante consiste en colocar el conjunto muelle-amortiguador dentro de la carrocería. Además, se construyen los triángulos con tubo de mínima sección. Existen dos sistemas básicos: Push-Rod y Pull-Rod.

El conjunto muelle-amortiguador se diseña de manera que sea accionado a través de una pieza, llamada balancín o bieleta, que se encarga de transmitir al conjunto la fuerza procedente de la barra actuadora, que se encuentra anclada a la mangueta.

Según como se haya configurado dicha barra actuadora, puede ser solicitada a tracción o a compresión durante el acercamiento de la rueda a la carrocería.

En el caso de que esté solicitada a compresión, el sistema será Push-Rod. Por el contrario, si está solicitada a tracción, el sistema será Pull-Rod.

La barra adicional, situada junto al triángulo inferior, actúa en las ruedas delanteras como barra de anclaje de la dirección, y en las ruedas traseras como barra de reglaje de la convergencia, unida al chasis.

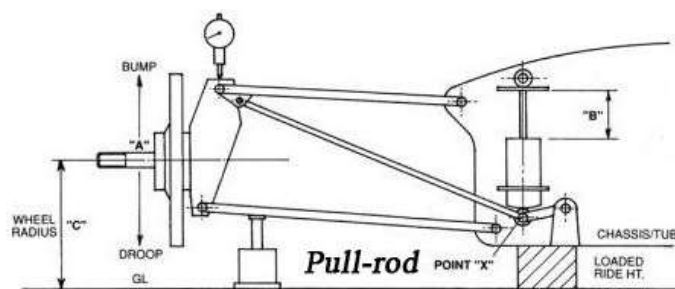


Ilustración 2.4 Sistema Pull-Rod

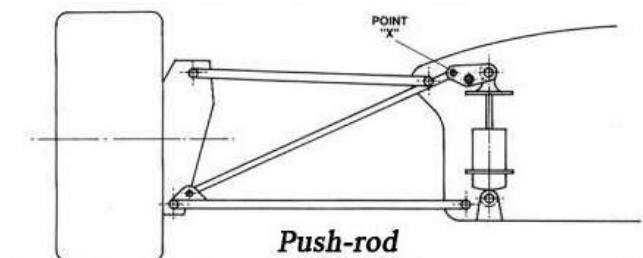


Ilustración 2.5 Sistema Push-Rod

El sistema Pull-Rod, al funcionar la barra actuadora a tracción, no tiene que soportar esfuerzos a pandeo, por lo que, la barra puede ser más delgada y ligera, presentando una menor resistencia aerodinámica. Además, el conjunto muelle-amortiguador puede situarse más abajo, reduciendo así la altura del centro de gravedad, e influyendo favorablemente en la dinámica del vehículo. Sin embargo, el sistema a tracción sufre esfuerzos muy grandes en ciertos puntos, siendo muy delicado.

El sistema Push-Rod es mucho más robusto.

El IFS-02 está equipado con un sistema de suspensión de paralelogramo deformable, Push-Rod. Debido a que se trata del primer prototipo funcional de monoplaza eléctrico en la historia de la universidad, se ha optado por este sistema, debido a su robustez.

2.4. Parámetros de diseño de la suspensión

2.4.1. Batalla (Wheelbase)

La batalla se define como la distancia, en sentido longitudinal, que existe entre los puntos de apoyo de las ruedas del eje delantero y del eje trasero. En la Formula Student, la batalla se mide respecto del centro de la huella de contacto de las ruedas. La forma más cómoda de medir la batalla es a través de la distancia entre los centros de las ruedas, ya que no existirá una diferencia apreciable entre ambas longitudes.

La batalla influye en la estabilidad longitudinal y en el comportamiento del automóvil, ya que repercute en la transferencia de carga en dirección de la circulación. Cuanto mayor sea la batalla, menor transferencia de carga entre los ejes debida a la inercia del vehículo.

En competición se debe diseñar la batalla del monoplaza lo más corta posible. Siempre respetando la distancia mínima exigida por normativa.

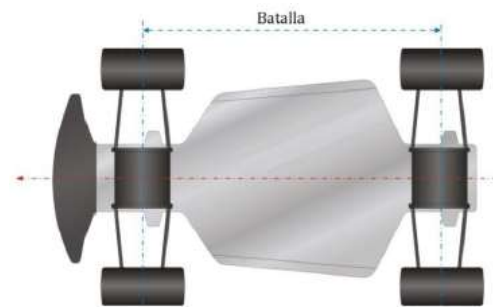


Ilustración 2.6 Batalla

2.4.2. Ancho de vía (Track)

El ancho de vía se define como la distancia, en vista frontal, que existe entre los puntos de apoyo de las ruedas que comparten mismo eje. Dicha medida suele ser diferente en cada uno de los ejes, por lo que, a la hora de definir las dimensiones de monoplaza, lo adecuado es obtener las longitudes en ambos ejes.

En la Formula Student, el ancho de vía se mide respecto del centro de la huella de contacto de las ruedas. La forma más cómoda de medir el ancho de vía es a través de la distancia entre los centros de las ruedas, pero teniendo en cuenta que la calidad de esta aproximación dependerá del ángulo de caída de las ruedas.

El ancho de vía tiene mucha importancia en un vehículo de competición, sobre todo, debido a su gran impacto en el balanceo y comportamiento del monoplaza en un paso por curva.

Cuanto más ancha sea la vía, mayor estabilidad tendrá el vehículo, ya que la transferencia de pesos en el paso por curva será menor. Además, al bajar el centro de gravedad, el paso por curva se hará más seguro.

Sin embargo, al ensanchar la vía, aumentan los esfuerzos que debe soportar el monoplaza. A su vez, se produce una disminución en la aerodinámica del vehículo, lo cual no interesa en competición, ya que se traduce en pérdida de velocidad y aceleración.

El ancho de vías requiere, por tanto, una serie de cálculos, que deben respetar la normativa correspondiente.

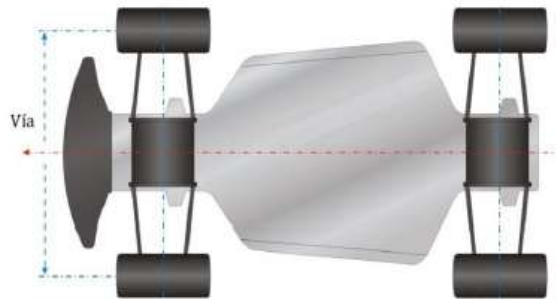


Ilustración 2.7 Ancho de vía

2.4.3. Centro de gravedad

Se denomina centro de gravedad al punto en el que se concentran todas las fuerzas que actúan sobre la totalidad de la masa del vehículo. Se puede entender como si toda la masa del vehículo se encontrara concentrada en dicho punto.

La estabilidad y el comportamiento del monoplaza dependen de la ubicación del centro de gravedad, tanto en el eje longitudinal como en altura.

En los vehículos de competición se trata de situar el centro de gravedad centrado y a baja altura, para conseguir la mayor velocidad posible en el paso por curva.

2.4.4. Centro instantáneo

Se denomina centro instantáneo al punto en el que intersecan las prolongaciones de las rectas que forman los trapecios de suspensión. Además, es el punto sobre el que la rueda pivota. Recibe el nombre de instantáneo debido a que su ubicación se modifica constantemente con el movimiento de la suspensión. Su posición dependerá del ángulo de caída de las ruedas.

2.4.5. Centro de balanceo

Se denomina centro de balanceo al punto respecto al cual el eje tiende a rotar cuando el vehículo experimenta fuerzas centrífugas, por ejemplo, en el paso por curva.

Existe, por tanto, un centro de balanceo por cada eje, es decir, un eje de balanceo delantero y otro trasero. Son aquellos puntos a los que van a parar las fuerzas laterales generadas por las ruedas.

Los puntos de balanceo están localizados en un plano transversal a los ejes. Para conocer su localización, se prolongan las rectas que forman los trapecios de suspensión hasta el punto en que intersecan. Se obtienen entonces los centros instantáneos de cada una de las ruedas que comparten mismo eje. A partir de aquí, desde el punto medio de la banda de rodadura de una rueda, es decir, desde el punto de contacto de la rueda con el terreno, se traza una recta hasta el centro instantáneo de la otra rueda, y el punto en el que dicha recta corte con el plano medio vertical del automóvil, es el centro de balanceo.

La opción más válida sería situar el centro de balanceo lo más bajo posible, alejado del centro de gravedad, para que no varíe excesivamente la geometría de la suspensión. Para compensar el balanceo que provocaría esta opción, existe la posibilidad de añadir la barra estabilizadora.

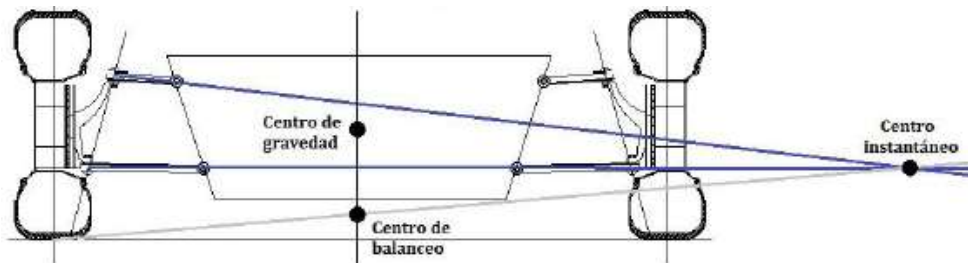


Ilustración 2.8 Centro de gravedad, instantáneo y de balanceo

2.4.6. Características “Anti” (Anti-features)

Las características “anti” relacionan la transferencia de fuerzas longitudinales y verticales entre la masa suspendida y la no suspendida. Quedan definidas a través de la geometría de la suspensión en vista lateral, concretamente por la posición del centro instantáneo y el centro de gravedad.

Estas características cuantifican la cantidad de carga que se transfiere a través de los elementos elásticos, es decir, los muelles. Se suelen medir de forma porcentual.

El sistema de suspensión, además de poder presentar valores porcentuales “anti” entre 0 y 100, puede presentar valores que se encuentren fuera de este rango. Es decir, pueden tomar valores negativos o superiores a 100.

Un valor del 100% de “anti” supone que los muelles de la suspensión no se deforman nada debido a la transferencia de carga en aceleración y frenada. Por el contrario, un valor del 0% de “anti” implica que toda la transferencia de carga ha sido transmitida a través de los muelles.

Según los esfuerzos de aceleración o frenado a los que esté sometido el monoplaza, los ejes pueden presentar los siguientes efectos “anti”: Anti-squat, Anti-dive y Anti-lift.

2.4.6.1. Anti-squat

Su objetivo es reducir el cabeceo del monoplaza debido a la compresión de los muelles del eje trasero al acelerar.

2.4.6.2. Anti-dive

Su objetivo es reducir el hundimiento del morro del monoplaza al frenar.

2.4.6.3. Anti-lift

Su objetivo es reducir la elevación de la parte trasera del monoplaza al frenar.

2.4.7. Ángulo de caída (Camber)

El Camber de una rueda se define como el ángulo, en vista frontal, que forman el plano transversal al eje de rodadura, y el plano vertical del vehículo.

Se trata de uno de los parámetros más importantes de la suspensión, ya que influye en propiedades como el agarre de los neumáticos.

El valor del Camber repercute en la capacidad de generación de fuerzas laterales por parte del neumático. Una rueda con un Camber que no sea nulo genera una fuerza lateral en su dirección de inclinación. Dicha fuerza recibe el nombre de Camber Thrust.

Por convenio, el Camber positivo se corresponde con el de una rueda cuya inclinación sea de tal manera que la parte superior de la misma se encuentre más alejada del vehículo que la parte inferior. Por tanto, el Camber negativo se corresponde con el de una rueda cuya inclinación sea de tal manera que la parte inferior de la misma se encuentre más alejada del vehículo que la parte superior. Camber neutral será aquel en el que la rueda se mantenga completamente recta.

La configuración ideal en vehículos de competición es la siguiente: Camber neutral en recta, asegurando una superficie plana de contacto, para lograr la máxima aceleración y el máximo frenado. Camber ligeramente negativo en el paso por curva, ya que supone un mejor agarre en dicha situación, y para que la fuerza lateral aumente. El Camber positivo se reserva para aplicaciones concretas, por ejemplo, los circuitos ovales.

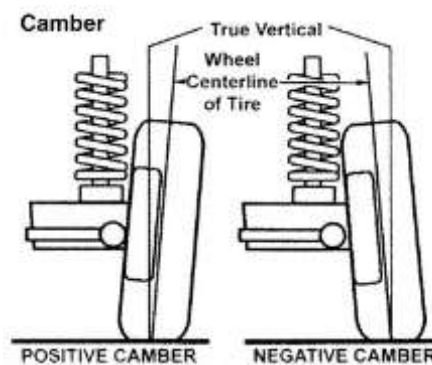


Ilustración 2.9 Ángulo de caída

2.4.8. Convergencia y divergencia (Toe angle)

Se trata de un parámetro de alineación, que describe la manera en la que las ruedas están orientadas entre sí.

La convergencia/divergencia influye en aspectos como el desgaste de los neumáticos y la estabilidad del monoplaza.

El ángulo de convergencia (Toe angle) es el ángulo, visto desde arriba, que forman el plano transversal al eje de la rueda, y el eje longitudinal del vehículo.

Por convenio, se considera que, si los planos medios de las ruedas que comparten mismo eje intersecan delante de dicho eje, la convergencia es positiva, es decir, se da una situación de convergencia (Toe in). Por el contrario, se considera que, si los planos medios de las ruedas que comparten mismo eje intersecan detrás de dicho eje, la convergencia es negativa, es decir, se da una situación de divergencia (Toe out).

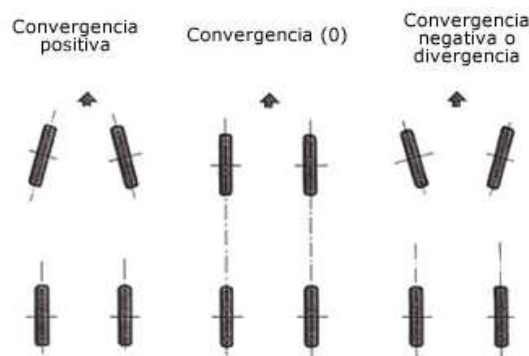


Ilustración 2.10 Convergencia y divergencia

2.5. Elementos del sistema de suspensión

2.5.1. Conjunto de masa no suspendida

La masa no suspendida hace referencia al conjunto de elementos del vehículo que se encuentra directamente apoyado sobre el suelo. Este conjunto, al ser el único en contacto con el asfalto, se encarga de mantener las ruedas conectadas con el resto del vehículo, y de transmitir al monoplaza las fuerzas que se generan en el contacto con el suelo.

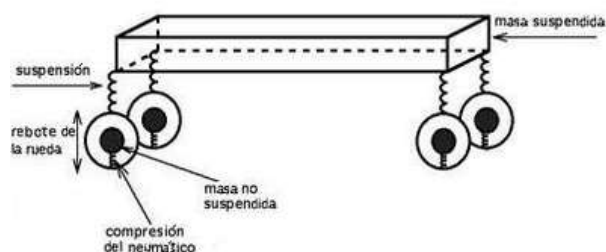


Ilustración 2.11 Masa suspendida y no suspendida



Ilustración 2.12 Conjunto de masa no suspendida, delantero



Ilustración 2.13 Conjunto de masa no suspendida, trasero

El conjunto de masa no suspendida está compuesto por los siguientes elementos:

2.5.1.1. Neumáticos

Los neumáticos tienen una gran importancia en el monoplaza. Es el único elemento que tiene contacto directo con el suelo.

Algunas de las funciones principales de los neumáticos son: Soportar y transmitir al terreno las transferencias de peso; amortiguar las acciones dinámicas que se originan debido a las irregularidades del terreno, al paso por curva y al frenado; y transmitir al asfalto las fuerzas longitudinales debidas a la aceleración.

Para las pruebas de Formula Student, cada equipo debe disponer de neumáticos de seco y de lluvia, es decir, de neumáticos slic y wet.

El equipo se ha decantado por unos neumáticos AVON 7.0/16.0-10.

2.5.1.2. Llantas

Las llantas son los elementos que unen los bujes a los neumáticos.

Normalmente se fabrican en materiales metálicos.

Algunas de las funciones principales de las llantas son: aportar rigidez estructural al conjunto de masa no suspendida; cerrar la cámara de aire del neumático; y permitir una fácil extracción de la rueda, importante en competición, ya que ahorra tiempo en el cambio de neumático.

En Formula Student existen tres tipos básicos de llanta: mono-tuerca, llanta de pernos y llanta tipo aro.

Las llantas de pernos reciben este nombre debido a que la unión entre la llanta y el buje se produce por medio de varios pernos, con sus respectivas tuercas.

Este tipo de llanta se caracteriza por su simplicidad.

El equipo ha decantado por unas llantas de pernos BRAID STURACE.

El offset de una llanta es uno de sus parámetros más críticos. Se trata de la distancia existente entre la pared vertical de la llanta y su plano central. Las llantas del IFS-02 tienen un offset de +28.

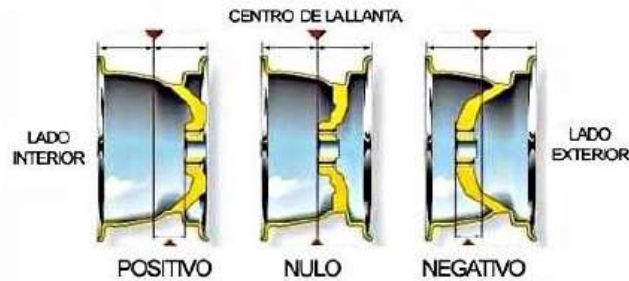


Ilustración 2.14 Offset de una llanta



Ilustración 2.15 Neumático y llanta

2.5.1.3. Rodamientos

Los rodamientos permiten la rotación relativa entre los elementos que separa. Además, guían y apoyan dichos elementos.

Los rodamientos suponen el nexo de unión entre los elementos rodantes y no rodantes del monoplaça. El buje será el elemento rodante, mientras que la mangueta será el elemento no rodante.

El equipo se ha decantado por unos rodamientos de bolas de una hilera.

Cada buje estará soportado por dos rodamientos separados una cierta distancia para aportar más rigidez al conjunto.



Ilustración 2.16 Rodamiento de bolas de una hilera

2.5.1.4. Manguetas

Las manguetas, junto con los bujes, constituyen el nexo de unión entre los elementos rodantes y no rodantes del conjunto de masa no suspendida del vehículo. Las manguetas interactúan con los sistemas de suspensión, dirección, transmisión y frenos.

Las manguetas han sido diseñadas por otros dos miembros del equipo, por lo que no se entrará en detalle a su diseño. Simplemente, cabe destacar que su diseño estará muy ligado al de los bujes.



Ilustración 2.17 Mangueta

2.5.1.5. Bujes

Los bujes son los elementos que portan las ruedas y permiten el giro de las mismas sobre su propio eje. Constituyen, junto con las manguetas, el nexo de unión entre los elementos rodantes y no rodantes del conjunto de masa no suspendida del vehículo.

Los bujes son una parte clave en el diseño de cualquier automóvil, ya que son elementos fundamentales en la unión de los sistemas de suspensión, frenos, transmisión y dirección.

El objetivo de este proyecto es el diseño de los bujes delanteros y traseros del IFS-02.



Ilustración 2.18 Buje delantero



Ilustración 2.19 Buje trasero

2.5.2. Triángulos/Trapeacios

Los triángulos de la suspensión tienen como objetivo unir el conjunto de masa no suspendida al chasis. Además, se encargan de transmitir las fuerzas longitudinales y transversales entre ellos.

Por cada rueda se disponen dos triángulos, uno encima del otro.

Los triángulos, compuestos por tubos de acero inoxidable, constan de dos puntos de anclaje al chasis y uno a la mangueta.



Ilustración 2.20 Triángulos

2.5.3. Barra de reglaje

La barra de reglaje es una barra situada junto al triángulo inferior en la suspensión trasera, que está anclada a la mangueta por uno de sus extremos, y al chasis por el otro. Su principal función es conseguir que la mangueta quede únicamente con un grado de libertad. Además, permite ajustar la convergencia/divergencia de las ruedas.



Ilustración 2.21 Barra de reglaje

2.5.4. Sistema de actuación

El sistema de actuación es el encargado de transmitir las cargas verticales desde el conjunto de masa no suspendida hasta el conjunto muelle-amortiguador, disipándolas. Además, se encarga de estabilizar el monoplaza.

El sistema de actuación lo componen la barra Push-Rod, el Rocker, el conjunto muelle-amortiguador y la barra anti-balanceo.

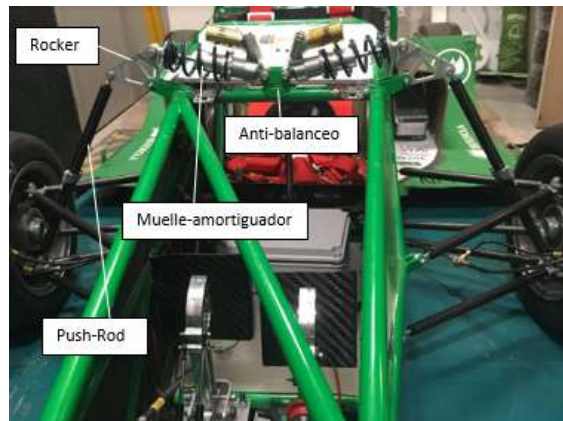


Ilustración 2.22 Sistema de actuación

2.5.5. Sistema de frenos

El sistema de frenos es el que se encarga de decelerar el monoplaza.

El IFS-02 lleva incorporado un sistema de frenos de disco flotante, con disco deformable, de la marca AP Racing.

Dentro del conjunto de la rueda se encuentra la pinza de freno, soportada por la mangueta, y el disco de freno flotante y deformable, enganchado al buje a través de unos Bobbens.

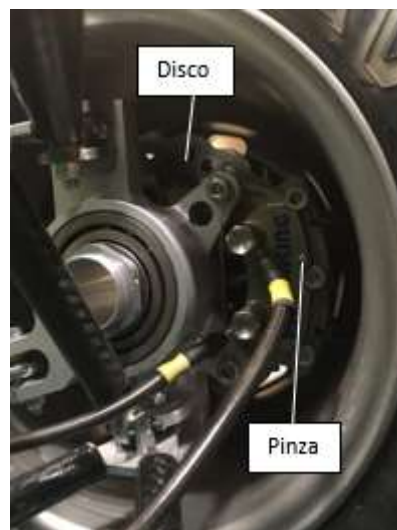


Ilustración 2.23 Sistema de frenos

2.5.6. Sistema de dirección

El sistema de dirección es el que se encarga de guiar el monoplaza. Este sistema lo componen la columna de dirección, la cremallera de dirección y los brazos actuadores de la dirección. La dirección une el volante con la cremallera, que transforma el giro del volante en un movimiento longitudinal. Los brazos actuadores de la dirección transmiten el movimiento de la cremallera al conjunto de masa no suspendida, haciendo posible el giro de las ruedas.



Ilustración 2.24 Sistema de dirección

2.5.7. Sistema de transmisión

El sistema de transmisión es el que se encarga de transmitir desde el motor hasta las ruedas motrices la potencia y el movimiento necesarios para funcionar.

El IFS-02 es un monoplaza de tracción trasera.

Los elementos a tener en cuenta de este sistema son: Polaris, Palier, junta homocinética.

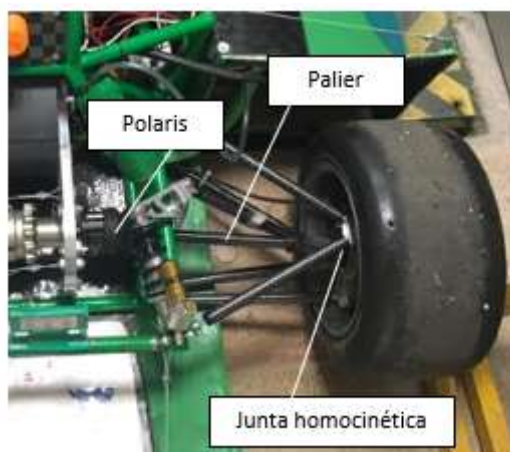


Ilustración 2.25 Sistema de transmisión

2.6. Normativa

La normativa de la Formula Student recoge todos los requisitos que debe cumplir el vehículo para la competición.

Para el diseño de los bujes se han tenido que respetar los siguientes requisitos:

2.6.1. Batalla (T.1.2.1)

La mínima batalla que puede tener el vehículo es de 1525 mm.

2.6.2. Ancho de vía (T.1.3.2)

El mínimo ancho de vía del vehículo no puede ser menor que el 75% del máximo.

2.6.3. Llantas (T.1.7.1)

Las llantas deben tener un diámetro mínimo de 203,2 mm.

2.6.4. Puntos de la suspensión (T.1.5.3)

Todos los puntos de montaje de la suspensión deben ser visibles en la inspección técnica. Ya sea de forma directa o quitando alguna protección.

2.6.5. Neumáticos (T.1.8)

Los equipos deben llevar dos tipos de neumáticos: secos y de lluvia.

2.6.6. Otros

Los componentes del vehículo no pueden sobresalir los planos teóricos.

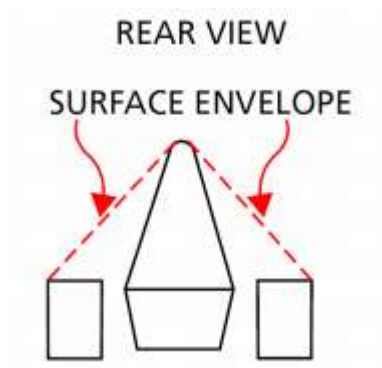


Ilustración 2.26 Plano teórico (vista trasera)

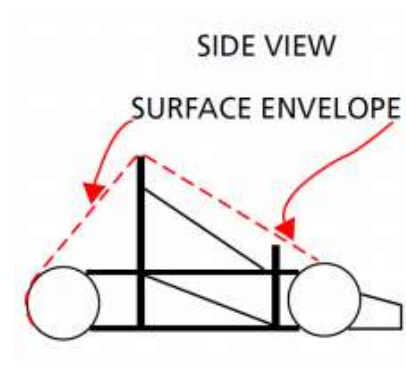


Ilustración 2.27 Plano teórico (vista lateral)

Capítulo 3: Diseño 3D

3.1. Introducción

El objetivo de este capítulo es conseguir el diseño más óptimo posible de los bujes delanteros y traseros del monoplaza de competición IFS-02, respetando el presupuesto del equipo. Para ello, se han diseñado primero unos prototipos básicos, que tras ser analizados y optimizados como se explica en el capítulo 6, han derivado en unos prototipos finales mucho más ligeros y que siguen siendo perfectamente funcionales.

Los bujes de la temporada pasada tenían como objetivo simplemente ser funcionales y robustos, por lo que eran muy pesados, aproximadamente 3 kg.

3.2. Primeros prototipos

Los primeros prototipos básicos están inspirados en los que se emplearon la temporada pasada.

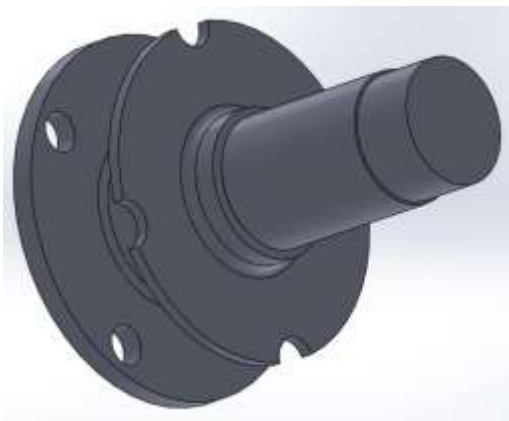


Ilustración 3.1 Diseño 3D, Primer prototipo, Bujes delantero

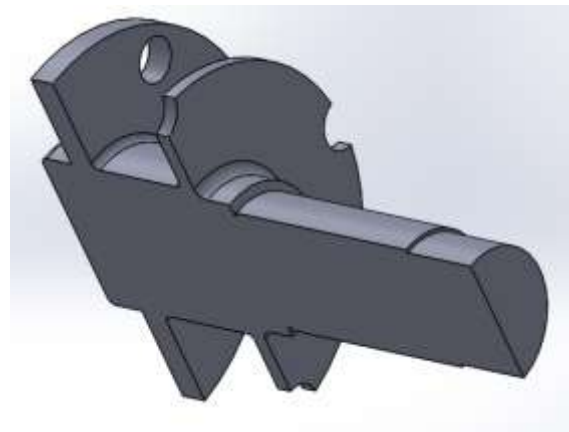


Ilustración 3.2 Vista sección, Primer prototipo, Bujes delantero

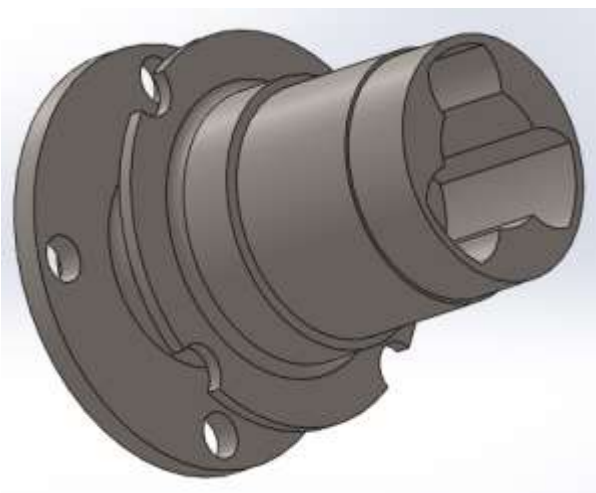


Ilustración 3.3 Diseño 3D, Primer prototipo, Bujes trasero

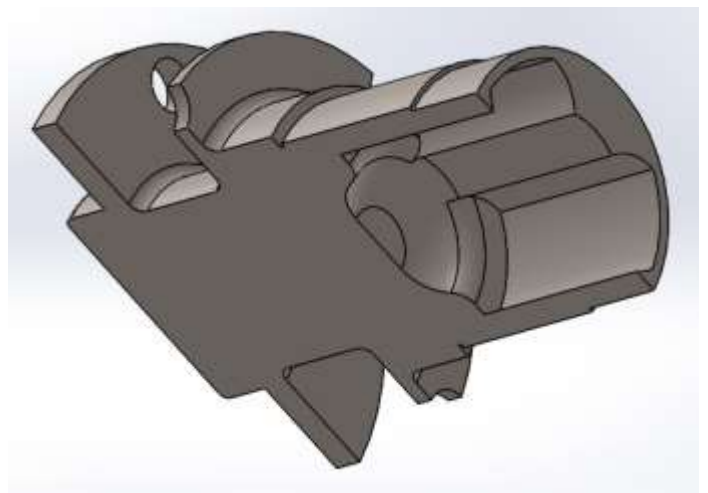


Ilustración 3.4 Vista sección, Primer prototipo, Bujes trasero

A partir de estos primeros prototipos, mediante un proceso de análisis y optimización, se logran los prototipos finales.

3.3. Prototipos finales

Los prototipos finales serán incorporados en el IFS-02. Por tanto, deberán respetar todos los parámetros de diseño descritos en el capítulo 2.

Lo primero que cabe destacar de los bujes de esta temporada es que se han conseguido diseñar bastante más pequeños que los de la anterior, ya que las ruedas del monoplaza de esta temporada son más pequeñas, con el objetivo de reducir peso y conseguir un mayor rendimiento en competición.

Como principal innovación en los bujes delanteros, cabe destacar el material. Esta temporada, en lugar de ser de acero como en la pasada, se han fabricado en Aluminium, 7075, T6. La información detallada sobre esta elección se encuentra en el capítulo 5.

Como principal innovación en los bujes traseros, cabe destacar el mecanizado de la Polaris en el propio buje. La temporada pasada, para conseguir que el buje girase solidariamente con el palier, se utilizó una pieza grande de acero, denominada Polaris, que contenía la junta homocinética e iba fijada al buje. Esta temporada se ha conseguido reducir mucho el peso, además de reduciendo el tamaño de los bujes y optimizándolos, eliminando dicha pieza del sistema. Para ello, ha sido necesario mecanizar su geometría en los bujes traseros.



Ilustración 3.5 Polaris, Temporada pasada



Ilustración 3.6 Mecanizado Polaris en buje trasero

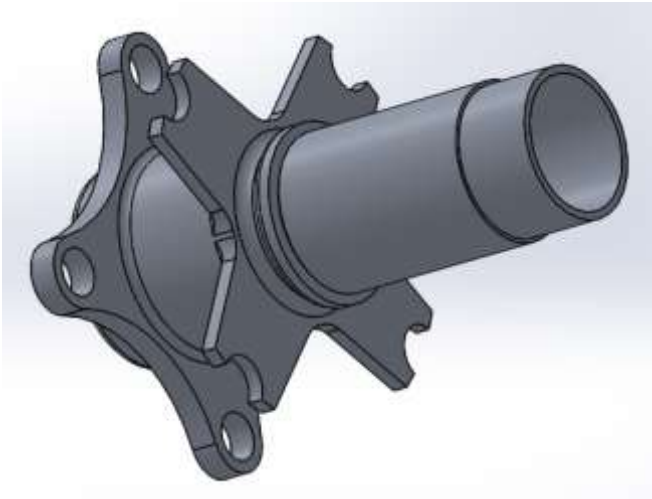


Ilustración 3.7 Diseño 3D, Prototipo final, Buje delantero

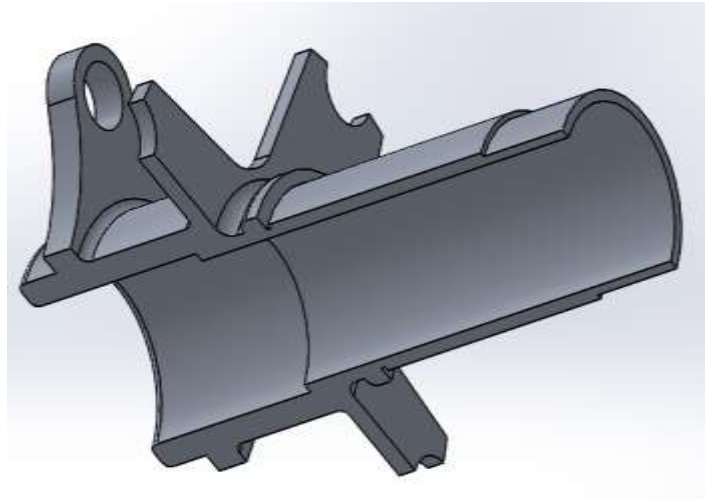


Ilustración 3.8 Vista sección, Prototipo final, Buje delantero

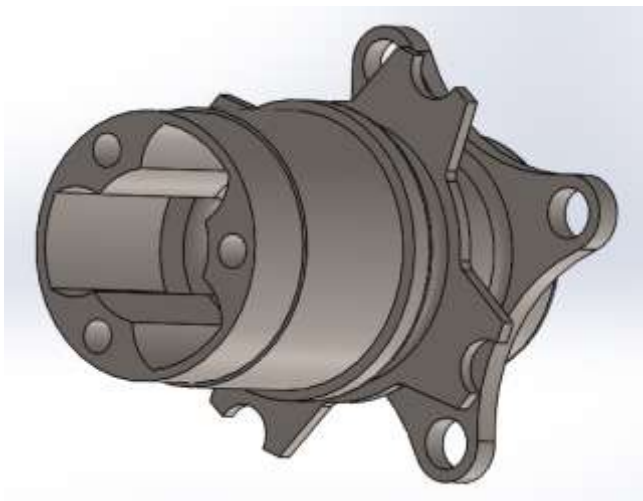


Ilustración 3.9 Diseño 3D, Prototipo final, Buje trasero

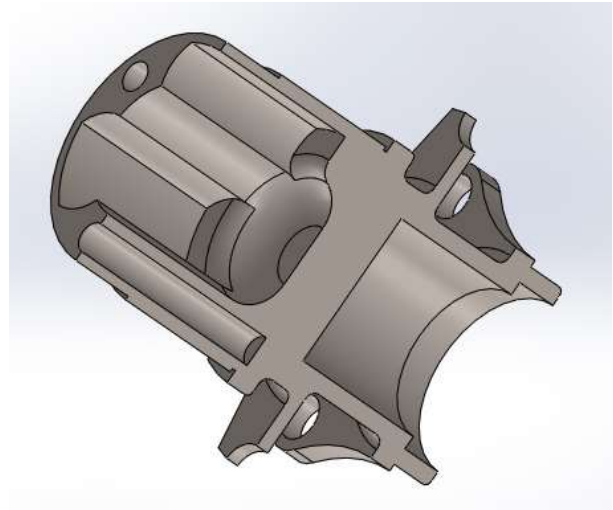


Ilustración 3.10 Vista sección, Prototipo final, Buje trasero

Los prototipos finales de bujes delanteros pesan 275 g, por lo que se ha conseguido reducir el peso aproximadamente un 90% respecto a la temporada pasada.

Los prototipos finales de bujes traseros pesan 1,6 kg, por lo que se ha conseguido reducir el peso aproximadamente un 50%. Además de la reducción de peso lograda al eliminar la Polaris.

Los planos que se han realizado de los bujes delanteros y traseros se pueden encontrar en el Anexo A.

Capítulo 4: Cálculo de fuerzas

4.1. Introducción

El objetivo de este capítulo es calcular las fuerzas que afectan a los bujes de un monoplaza de competición. Para dicho cálculo, se prestará especial atención a los casos más desfavorables que se pueden presentar durante la competición.

Es importante dejar claro que existe un sobredimensionamiento en el cálculo de las fuerzas, añadiendo cierto factor de seguridad al diseño.

Los bujes nunca tendrán que soportar valores tan elevados de fuerzas. El sistema de suspensión debería absorber la mayoría de estas fuerzas, afectando a los bujes únicamente una parte de estos esfuerzos. Sin embargo, en caso de que la suspensión fallara, se asegura que los bujes resistirían las pertinentes fuerzas gracias al sobredimensionamiento.

4.2. Situaciones a analizar

Las situaciones que se van a analizar son las siguientes: aceleración, frenada y paso por curva.

En los bujes delanteros se despreciarán las siguientes fuerzas: fuerza de tracción debida al par máximo de aceleración, ya que se trata de un vehículo de tracción trasera; fuerza transmitida por la barra de dirección, ya que dicha fuerza está aplicada directamente sobre la mangueta, y el buje, de sufrir algún esfuerzo, se trataría de uno bastante menor que el resto de los que serán aplicados en la simulación; y fuerza debida a un obstáculo, ya que se asume que, al realizarse la competición en un circuito profesional, el asfalto estará en perfectas condiciones.

En los bujes traseros se despreciarán las siguientes fuerzas: reglaje, ya que dicha fuerza será aplicada directamente sobre la mangueta, y el buje, de sufrir algún esfuerzo, se trataría de uno bastante menor que el resto de los que serán aplicados en la simulación; y fuerza debida a un obstáculo, ya que se asume que, al realizarse la competición en un circuito profesional, el asfalto estará en perfectas condiciones.

Además, gracias al dimensionamiento existente, la ausencia de estas fuerzas no repercutirá en los resultados de las simulaciones.

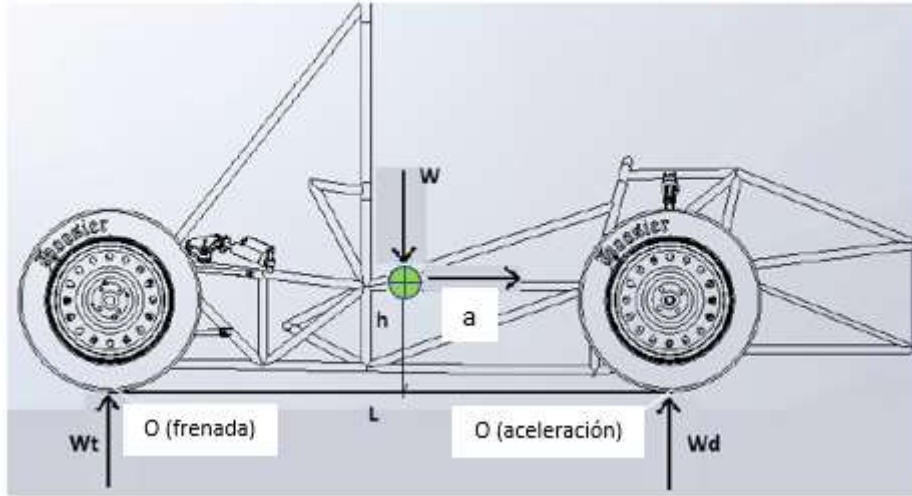


Ilustración 4.1 Transferencia de masas longitudinal

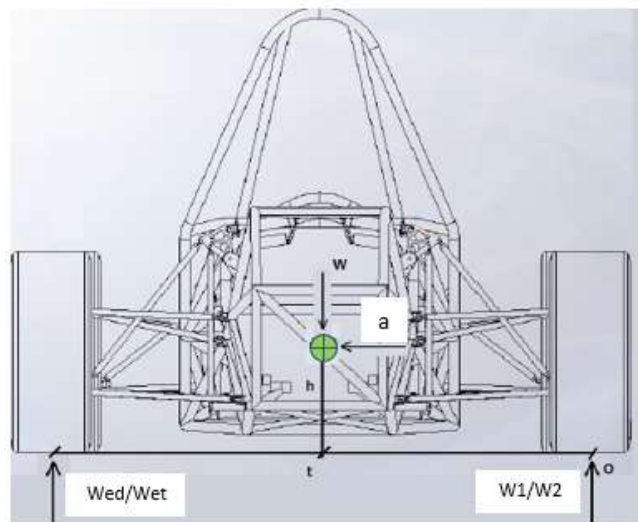


Ilustración 4.2 Transferencia de masas lateral

Para poder realizar los cálculos correspondientes a cada una de las situaciones, es necesario calcular la distribución de masas del monoplaza en estático, es decir, conocer cómo tiene repartido el peso el vehículo.

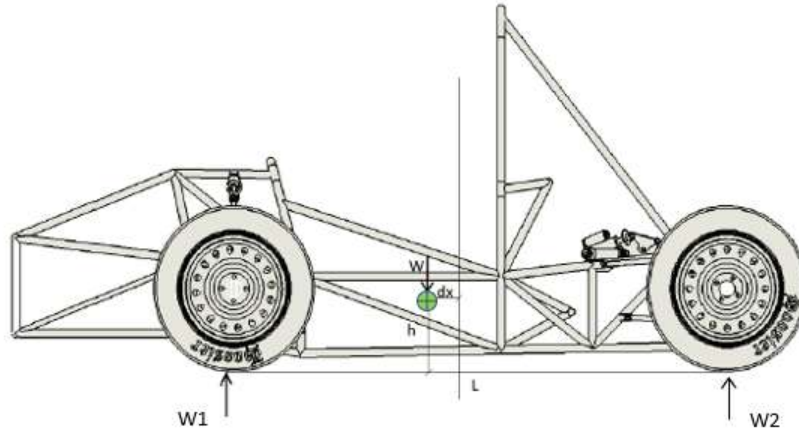


Ilustración 4.3 Distribución de masas

l	Batalla	160 mm
dx	Distancia CG eje neutro	64 mm
W	Masa total del vehículo	330 kg

W1	Distribución masas eje delantero
W2	Distribución masas eje trasero

Tabla 4.1 Variables de cálculo, Distribución de masas

$$\sum M_A = 0 \text{ (sentido antihorario)}$$

$$W_2 * l - W \left(\frac{l}{2} - dx \right) = 0$$

$$\sum M_B = 0 \text{ (sentido antihorario)}$$

$$-W_1 * l + W \left(\frac{l}{2} + dx \right) = 0$$

$$W_1 = \frac{W}{2} + \frac{W * dx}{l} = 172.2 \text{ kg (54\%)}$$

$$W_2 = \frac{W}{2} - \frac{W * dx}{l} = 151.8 \text{ kg (46\%)}$$

4.2.1. Aceleración

l	Batalla	160 mm
h	Altura CG	296mm
vf	Velocidad final	13,9 m/s
vo	Velocidad inicial	0 m/s
t	Tiempo	3 s
W	Masa total del vehículo	330 kg
W2	Distribución masas eje trasero	151,8 kg

Fr _t	Fuerza vertical rueda trasera
-----------------	-------------------------------

Tabla 4.2 Variables de cálculo, Aceleración

4.2.1.1. Transferencia longitudinal de masas (Transferencia de pesos hacia el tren trasero)

$$a = \frac{v_f - v_0}{t} = 4.63 \frac{m}{s^2} = 0.472g$$

$$\sum M_o = 0 \text{ (sentido antihorario)}$$

$$dW_t * l = W * a * h$$

$$dW_t = \frac{W * a * h}{l} = 28.81 \text{ kg}$$

$$F_t = (W_2 + dW_t) * g = 1771.78 \text{ N}$$

$$F_{rt} = \frac{F_t}{2} = 885.89 \text{ N}$$

4.2.1.2. Fuerza de tracción (Máximo par de aceleración)

El par máximo de aceleración que puede aportar el motor del vehículo ha sido proporcionado por el departamento de transmisión del equipo. Dicho par se traduce en una fuerza de tracción que deben soportar los bujes traseros. Se tomará un valor de 2000 N para las simulaciones, con un cierto sobredimensionamiento.

4.2.2. Frenada

l	Batalla	160 mm
h	Altura CG	296mm
vf	Velocidad final	0 m/s
vo	Velocidad inicial	27,7 m/s
t	Tiempo	3 s
W	Masa total del vehículo	330 kg
W1	Distribución masas eje delantero	172,2 kg
Frd	Fuerza vertical rueda delantera	

Tabla 4.3 Variables de cálculo, Frenada

4.2.2.1. Transferencia longitudinal de masas (Transferencia de pesos hacia el tren delantero).

$$-a = \frac{v_f - v_0}{t} = 9.23 \frac{m}{s^2} = 0.94g$$

$$\sum M_o = 0 \text{ (sentido antihorario)}$$

$$dW_d * l = W * a * h$$

$$dW_d = \frac{W * a * h}{l} = 57.387 \text{ kg}$$

$$F_d = (W_1 + dW_d) * g = 2252.25 \text{ N}$$

$$F_{rd} = \frac{F_d}{2} = 1126.12 \text{ N}$$

4.2.2.2. Fuerza de frenado (Máximo par de frenado)

El par máximo de frenado ha sido proporcionado por el departamento de frenos del equipo. Conociendo además el radio dinámico de los discos de freno, $r_{din}=0.18m$, se llega a la conclusión de que cada buje sufre en los enganches al disco de freno una fuerza de frenado de 1783.43 N.

4.2.3. Paso por curva

t	Ancho de vía	1350 mm
h	Altura del CG	296 mm
a	Aceleración lateral	1,5g m/s ²
W1	Distribución masas eje delantero	172,2 kg
W2	Distribución masas eje trasero	151,8 kg

Wed	Fuerza vertical rueda delantera exterior
Wet	Fuerza vertical rueda trasera exterior

Tabla 4.4 Variables de cálculo, Paso por curva, Transferencia lateral de masas

r	Radio de la curva	6,445 m
v	Velocidad	5,5 m/s
m	Masa total del vehículo	330 kg

Fler	Fuerza lateral rueda exterior
Flir	Fuerza lateral rueda interior

Tabla 4.5 Variables de cálculo, Paso por curva, Fuerza centrífuga

4.2.3.1. Transferencia lateral de masas (Transferencia de pesos hacia el exterior)

$$\sum M_o = 0 \text{ (sentido antihorario)}$$

$$W_{ed} * t = W_1 * \frac{t}{2} + W_1 * a * h$$

$$W_{ed} = \frac{W_1}{2} + \frac{W_1 * a * h}{t} = 142.735 \text{ kg}$$

$$F_{ed} = W_{ed} * g = 1400.23 \text{ N}$$

$$\sum M_o = 0 \text{ (sentido antihorario)}$$

$$W_{et} * t = W_2 * \frac{t}{2} + W_2 * a * h$$

$$W_{et} = \frac{W_2}{2} + \frac{W_2 * a * h}{t} = 136.051 \text{ kg}$$

$$F_{et} = W_{et} * g = 1334.37 \text{ N}$$

4.2.3.2. Fuerza centrífuga

$$a_c = \frac{v^2}{r}$$

$$m_e = W_{ed} + W_{et}$$

$$F_{le} = m_e * a_c = 1308.5 \text{ N}$$

$$F_{ler} = \frac{F_{le}}{2} = 654.25 \text{ N}$$

$$m_i = m - m_e$$

$$F_{li} = m_i * a_c = 240.19 \text{ N}$$

$$F_{lir} = \frac{F_{li}}{2} = 120.1 \text{ N}$$

4.3. Resultados

A partir de los resultados que se recogen en la siguiente tabla, se realizarán todas las simulaciones posteriormente. Es importante mencionar que se simularán fuerzas algo mayores, para conseguir aún más factor de seguridad.

Aceleración	Fuerza vertical rueda trasera [N]	885,89
	Fuerza de tracción [N]	2000
Frenada	Fuerza vertical rueda delantera [N]	1126,5
	Fuerza de frenado [N]	1783,43
Paso por curva	Fuerza vertical rueda delantera exterior [N]	1400,23
	Fuerza vertical rueda trasera exterior [N]	1334,37
	Fuerza lateral rueda exterior [N]	654,25
	Fuerza lateral rueda interior [N]	120,1

Tabla 4.6 Resultados, Cálculo de fuerzas

Capítulo 5: Selección de materiales

5.1. Introducción

El objetivo de este capítulo es comprobar distintas opciones de material y seleccionar el más adecuado para los bujes delanteros y traseros de un monoplace de competición.

Para la selección de material, se ha hecho uso del software CES Edupack.

Se trata de conseguir que; tanto los bujes delanteros como los traseros, sean lo más ligeros posible, respetando los presupuestos establecidos por el equipo, y que sean capaces de soportar los esfuerzos a los que estarán sometidos durante la competición. Es decir, los bujes deben ser ligeros, económicos y viables.

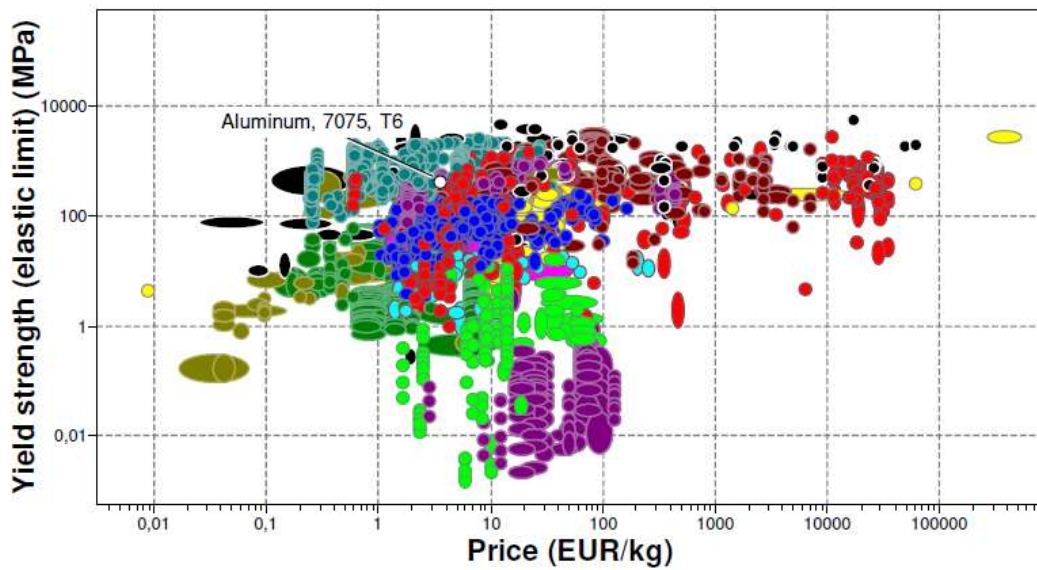


Ilustración 5.1 Límite elástico-Precio

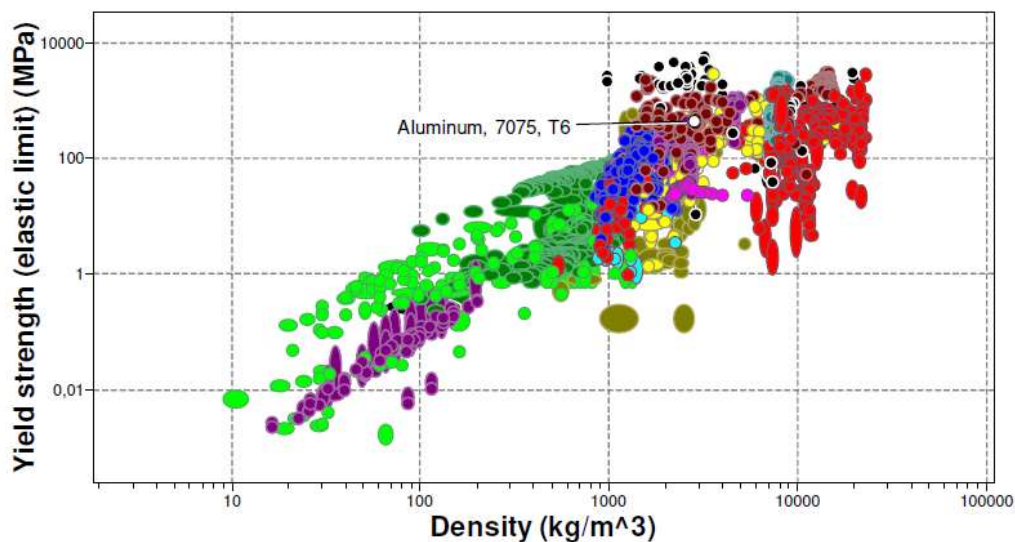


Ilustración 5.2 Límite elástico-Densidad

5.2. Bujes delanteros

5.2.1. Filtrado

Para la selección del material de los bujes delanteros se ha realizado un proceso de filtrado basado en los aspectos más importantes de cara a cumplir con los objetivos de diseño.

A continuación, se explica más en detalle cada uno de los filtros que ha sido aplicado a la búsqueda.

5.2.1.1. Metales y aleaciones

En primer lugar, como los elementos a diseñar serán incorporados en un monoplaza de competición, se ha limitado la búsqueda a metales y aleaciones, ya que son los materiales idóneos para este tipo de aplicaciones.

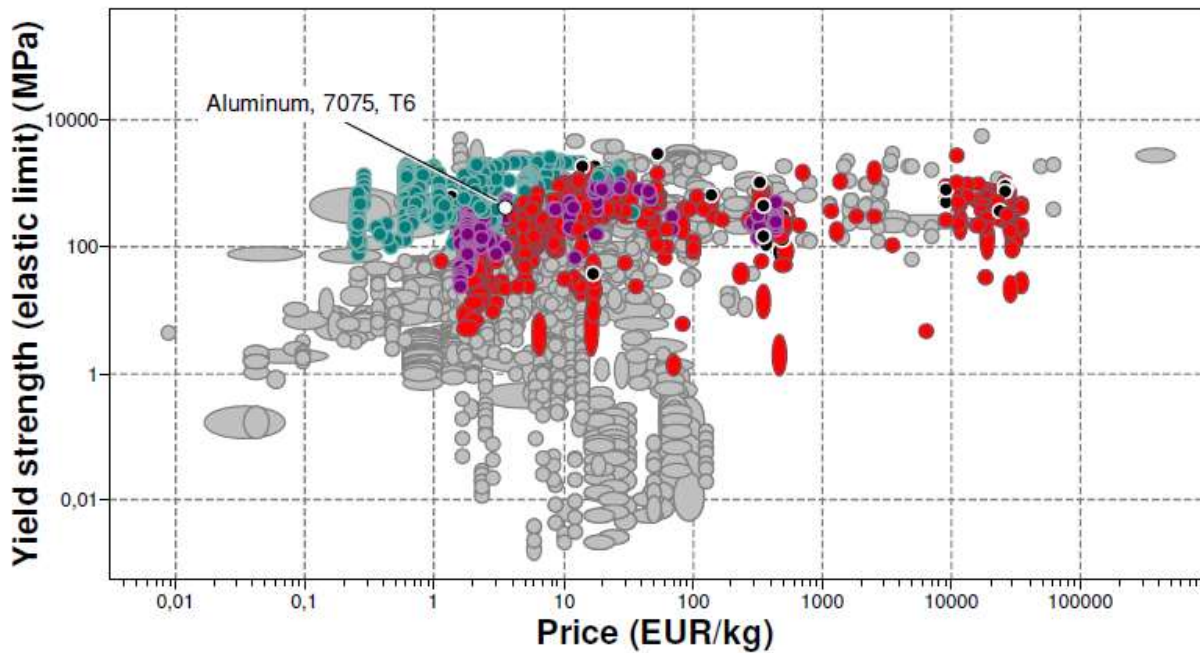


Ilustración 5.3 Filtro, Metales y aleaciones

5.2.1.2. Densidad

Se han filtrado los materiales por su densidad, de manera que todos aquellos materiales cuya densidad sea superior a 3065 kg/m^3 han sido descartados, ya que se pretende reducir el peso de los bujes delanteros un 85% con respecto a los de la temporada pasada.

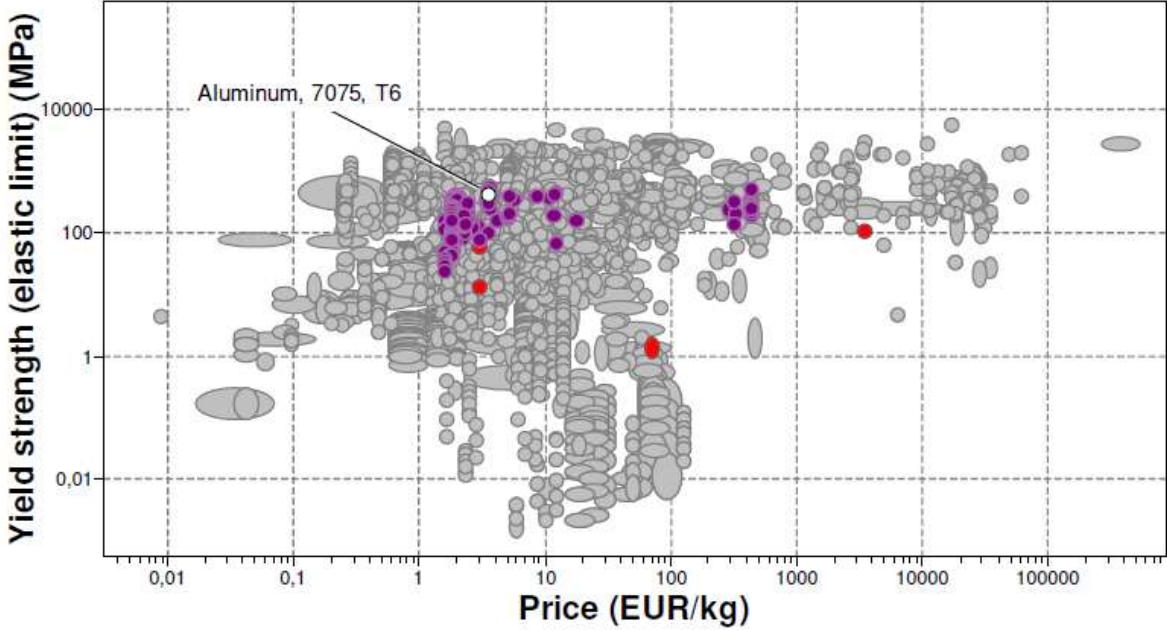


Ilustración 5.4 Filtro, Densidad

5.2.1.3. Precio

Se han filtrado los materiales por su precio, de manera que todos aquellos materiales cuyo precio sea superior a 20 EUR/kg han sido descartados, ya que, según los presupuestos del equipo, la fabricación de los dos bujes delanteros y los dos bujes traseros no debe superar los 500 EUR. Como se explica en la selección del material de los bujes traseros, éstos deberán ser de acero al carbono, y observando los cálculos del coste completo de fabricación realizados en el Anexo B, se deduce el límite de precio para los bujes delanteros.

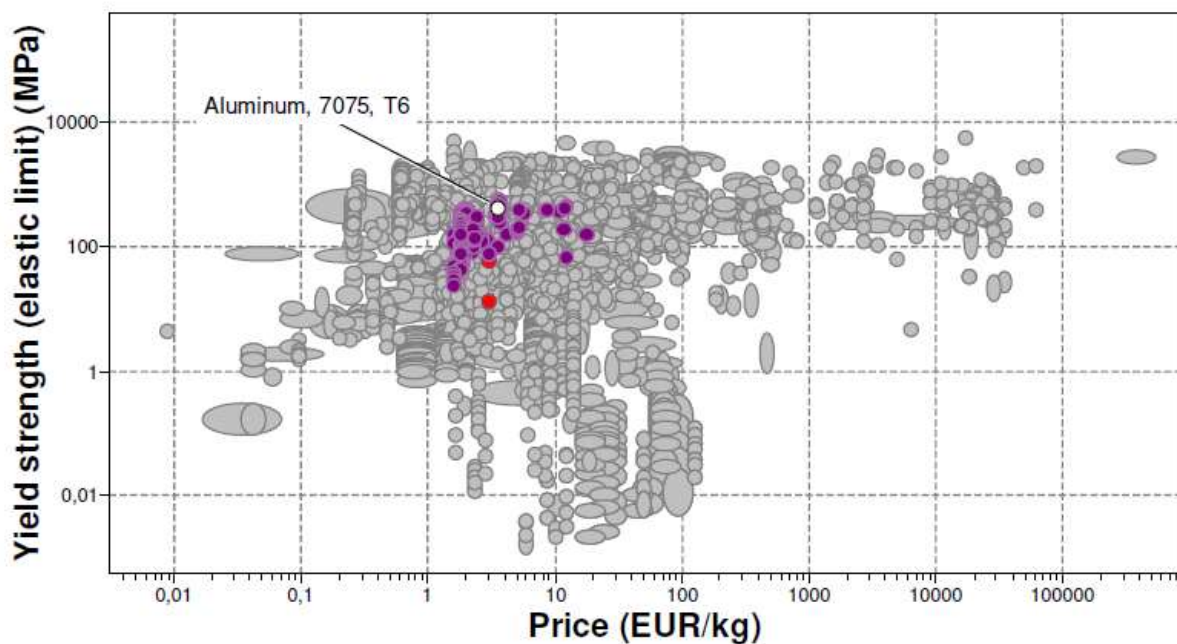


Ilustración 5.5 Filtro, Precio

Después de aplicar los filtros anteriormente descritos, han sobrevivido 144 materiales.

Como se puede observar en la ilustración anterior, la gran mayoría de materiales que han superado los filtros hasta el momento son de la familia de los aluminios, familia de materiales representada de color morado en la ilustración. Se decide, por tanto, que los bujes delanteros serán de aluminio, pero aún queda por determinar el tipo. Para ello, se continuará con el proceso de filtración de materiales.

5.2.1.4. Límite elástico

Se han filtrado los materiales por su límite elástico, de manera que, todos aquellos materiales cuyo límite elástico sea inferior a 450 MPa han sido descartados, ya que, como se puede comprobar en el capítulo 6, los bujes delanteros estarán sometidos a tensiones máximas de aproximadamente 160 MPa, y se trata de conseguir, como mínimo, un factor de seguridad de 2'5, que realmente será bastante mayor debido al sobredimensionamiento existente.

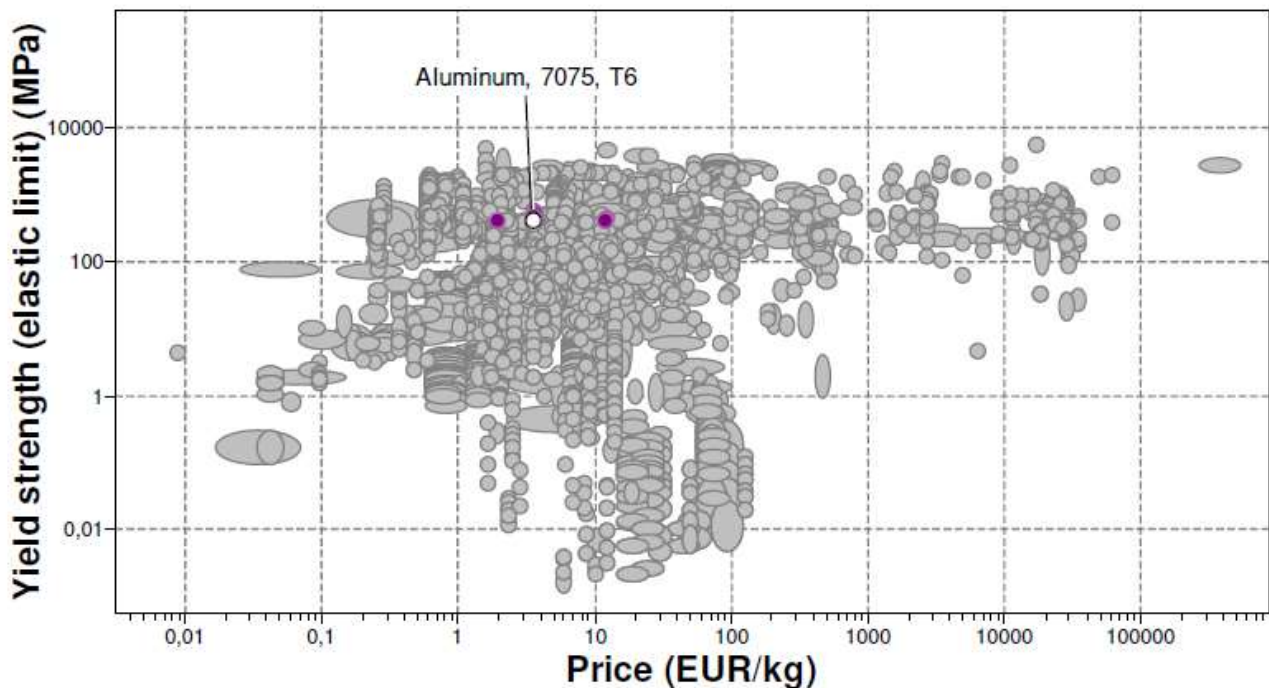


Ilustración 5.6 Filtro, Límite elástico

Después de aplicar el filtro del límite elástico, han sobrevivido únicamente 28 materiales. Además, los pocos materiales de familias distintas a la de los aluminios que aún se mantenían activos, han sido definitivamente descartados por este filtro, lo cual, termina de asegurar que el material de los bujes delanteros deberá ser algún tipo de aluminio.

5.2.2. Materiales candidatos

A continuación, se muestran diversas gráficas que relacionan algunos de las propiedades más importantes de cara al diseño de las piezas.

Analizando las diferentes gráficas, se podrá encontrar el material más completo, es decir, el más equilibrado en todos los aspectos tratados.

Aunque tampoco se apreciarán grandes diferencias entre los pocos materiales que han superado los filtros, el análisis también servirá para comprobar que dichos materiales cumplen otros aspectos importantes de cara al diseño, que no han sido necesarios como filtros.

Se han resaltado en las gráficas los materiales que destacan en alguna de las propiedades que han sido consideradas.

En la siguiente gráfica (Límite elástico-Precio), se observa que el material más barato es el Aluminium, 2024, T861. También se puede apreciar que el Aluminium, 7075, T6 es una de las opciones más baratas, con un precio aproximado de 3'5 EUR/kg.

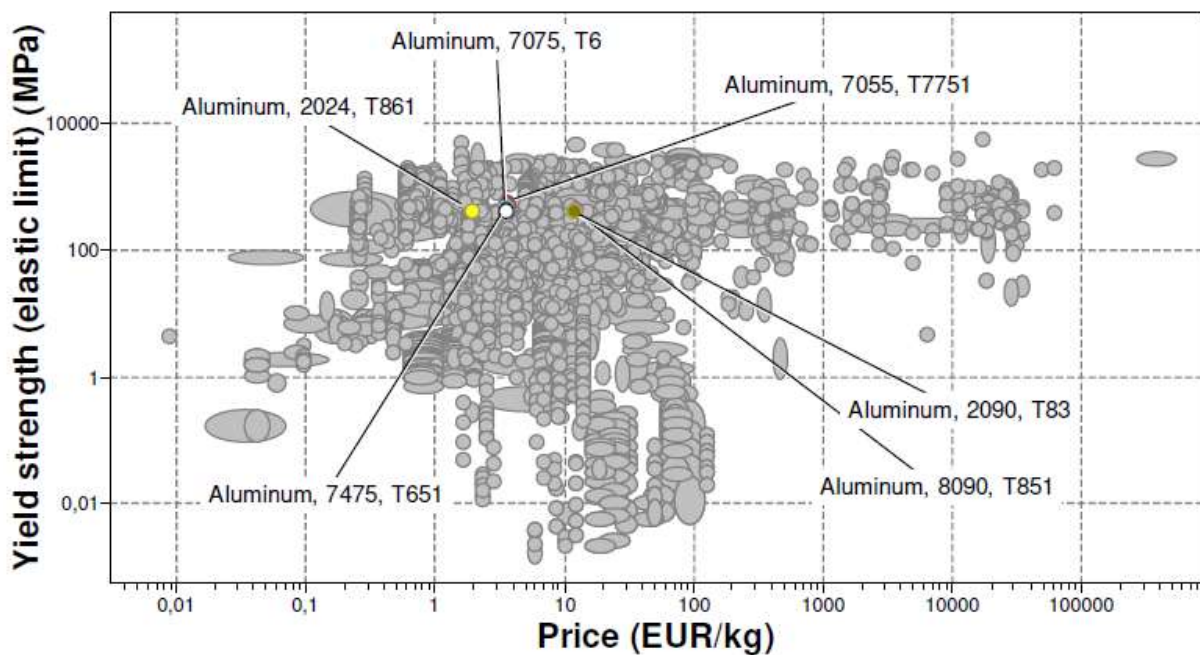


Ilustración 5.7 Límite elástico-Precio

En la siguiente gráfica (Límite elástico-Densidad), se observa que el material más ligero es el Aluminium 8090, T851. También se puede apreciar que el Aluminium, 7075, T6 es una de las opciones más ligeras, con una densidad aproximada de $3'8e3 \text{ kg/m}^3$.

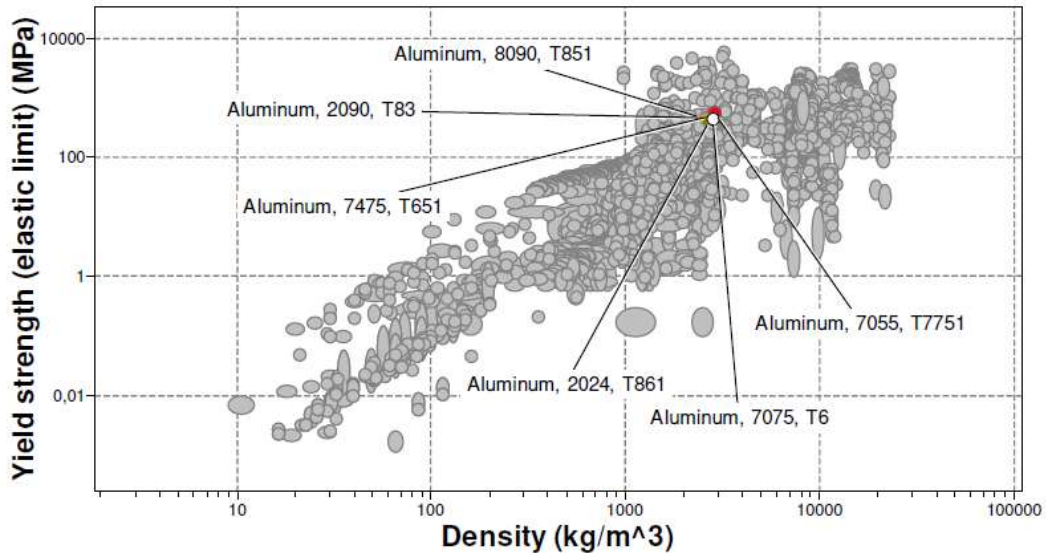


Ilustración 5.8 Límite elástico-Densidad

Además, en las dos gráficas anteriores se puede comprobar que el material con mayor límite elástico es el Aluminium, 7055, T7751.

La siguiente gráfica (Densidad-Precio) es simplemente para poder apreciar que el Aluminium, 7075, T6 es un material que, sin ser el más barato o ligero, presenta una buena relación entre ambos aspectos.

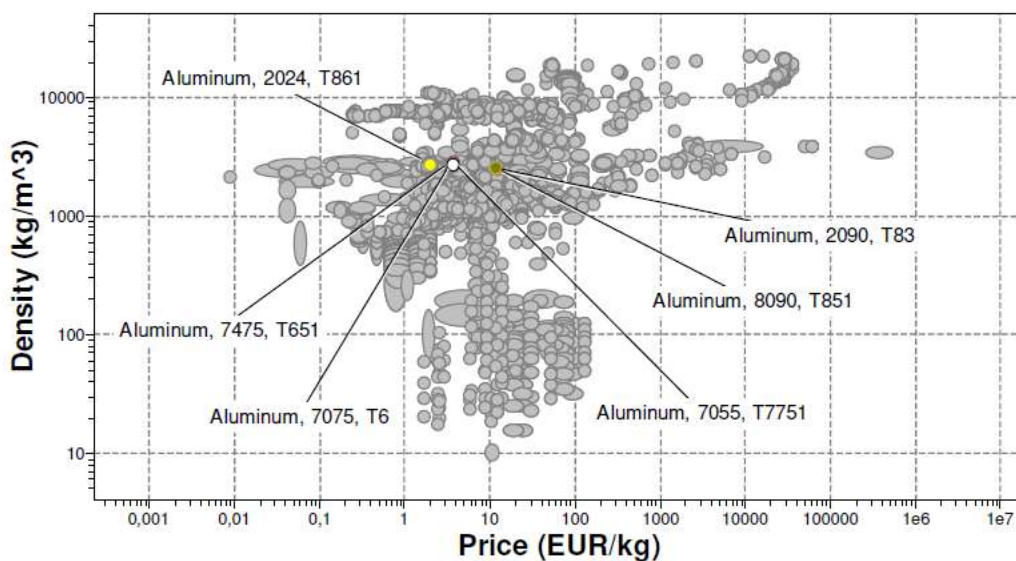


Ilustración 5.9 Densidad-Precio

En la siguiente gráfica (Coeficiente de expansión térmica-Precio), se observa que todos los materiales tienen prácticamente el mismo coeficiente de expansión térmica.

De cara al diseño, interesa que dicho coeficiente del material sea bajo, ya que, aunque las condiciones de temperatura del circuito en el que se va a competir son normales, si fueran muy elevadas, con un coeficiente muy elevado, la pieza podría sufrir deformaciones demasiado grandes, llegando incluso a suponer un incorrecto funcionamiento de la misma.

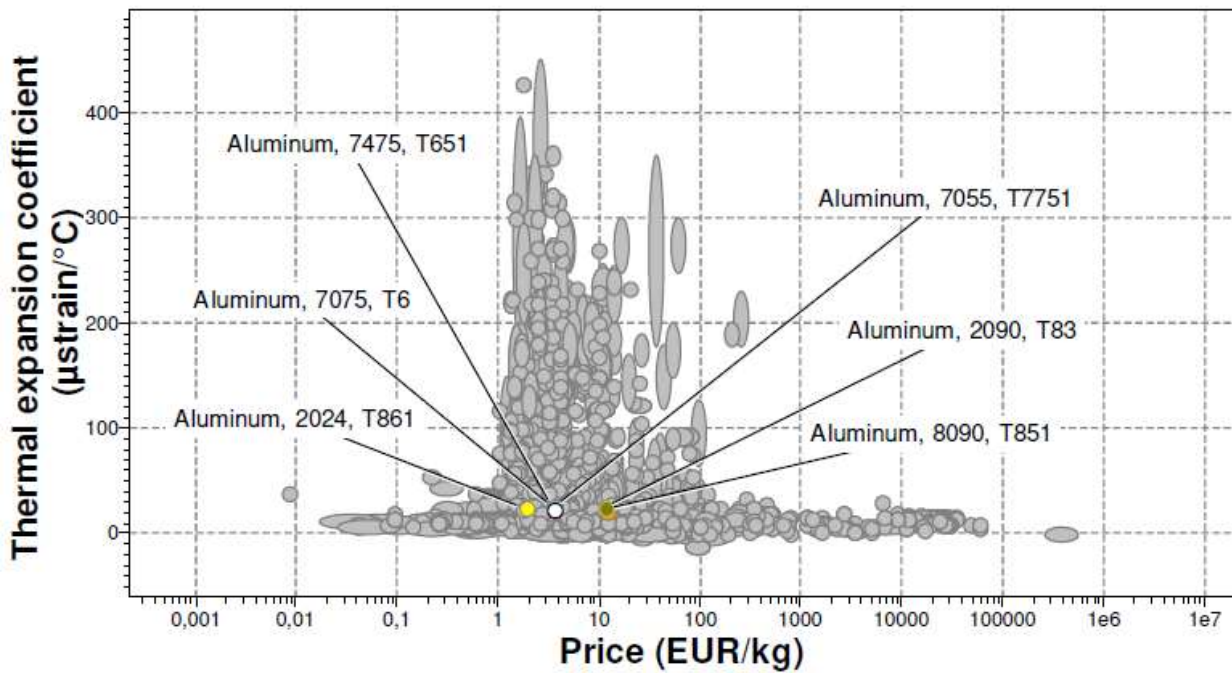


Ilustración 5.10 Coef. exp. term-Precio

En la siguiente gráfica (Dureza Vickers-Precio), se observa que el material con menor dureza HV es el Aluminium, 2090, T83.

De cara al diseño, interesa que la dureza HV no sea excesiva, ya que, para fabricar las piezas, interesará que se trate de un material de fácil mecanizado, entre otras cosas, para conseguir una reducción considerable en el precio. Hasta ahora, con el filtro del precio se tenía en cuenta el coste de la materia prima, pero otro coste muy importante es el del proceso de mecanizado, que dependerá sobre todo del tiempo que haya sido necesario para fabricar las piezas. De esta manera, a mejor mecanizado del material, más barata la pieza.

Tampoco interesa un material demasiado blando. De hecho, no es el caso de ninguno de los materiales que han superado los filtros.

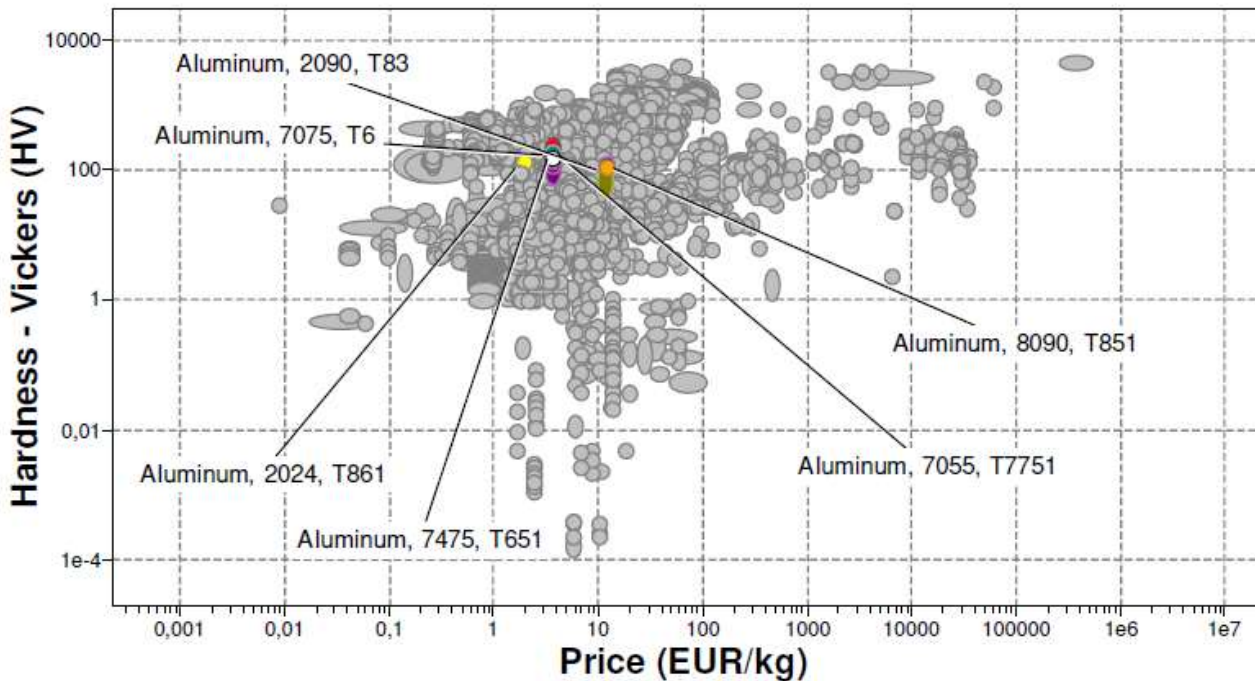


Ilustración 5.11 Dureza-Precio

En la siguiente gráfica (Rigidez-Precio), se observa que todos los materiales tienen prácticamente la misma rigidez.

De cara al diseño, interesa que el material tenga un valor elevado de rigidez, ya que cuanto menos se deforme la pieza, mejor desempeñará su función.

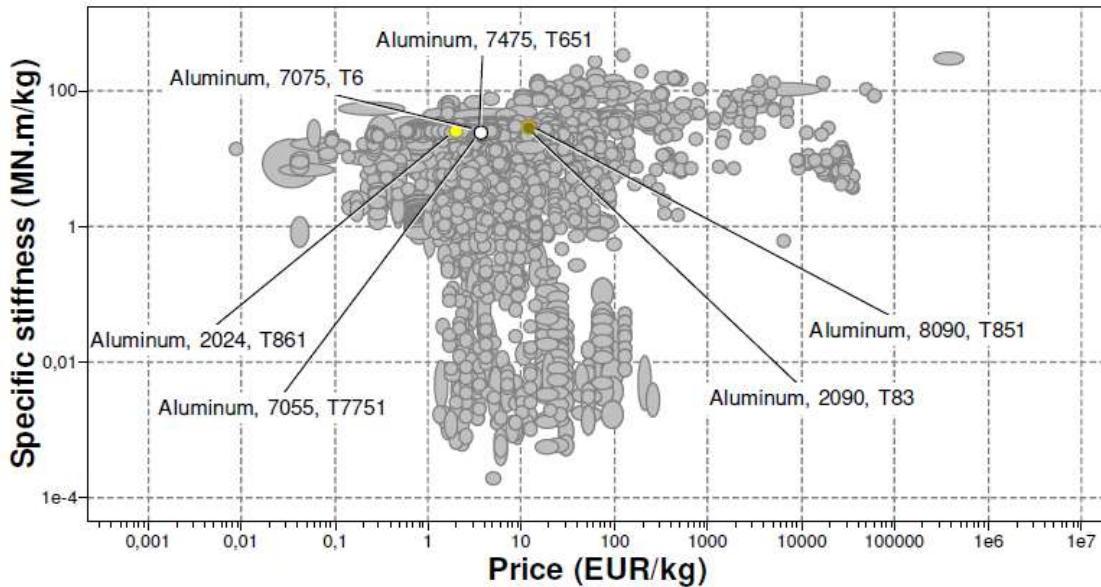


Ilustración 5.12 Rigidez-Precio

En la siguiente gráfica (Resistencia a fractura-Precio), se observa que el material más resistente a fractura es el Aluminium, 7475, T651.

De cara al diseño, interesa que el material tenga un valor elevado de resistencia a fractura, para que la pieza no se rompa al ser sometida a esfuerzos.

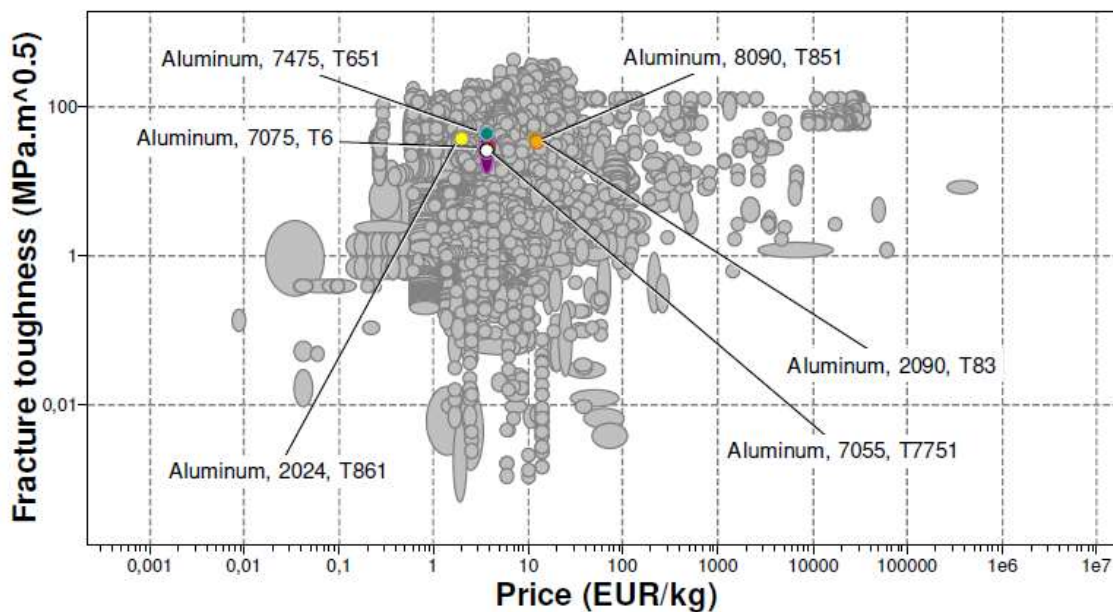


Ilustración 5.13 Resistencia a fractura-Precio

En la siguiente gráfica (Huella de CO₂-Precio), se observa que todos los materiales dejan prácticamente la misma huella de CO₂.

De cara al diseño, interesa que la huella de CO₂ que deje el material sea lo menor posible, para evitar contaminar. Es importante el compromiso con el medioambiente, más aún, teniendo en cuenta que nuestro principal patrocinador es IBERDROLA.

Para tener en consideración el aspecto de la contaminación, se ha representado gráficamente la suma de la huella de CO₂ que dejaría la producción de la materia prima, y la que dejaría el proceso de mecanizado. De esta manera, se tiene en cuenta la huella de CO₂ que deja el proceso completo de fabricación.

Es importante mencionar que realmente no se está teniendo en cuenta únicamente la emisión de CO₂. Existe una variedad de gases que afectan al calentamiento global, cuyo efecto puede variar significativamente. Por ello, es típico expresar todos estos efectos en términos de masa de dióxido de carbono equivalente, que es lo que en realidad se está representando en la gráfica.

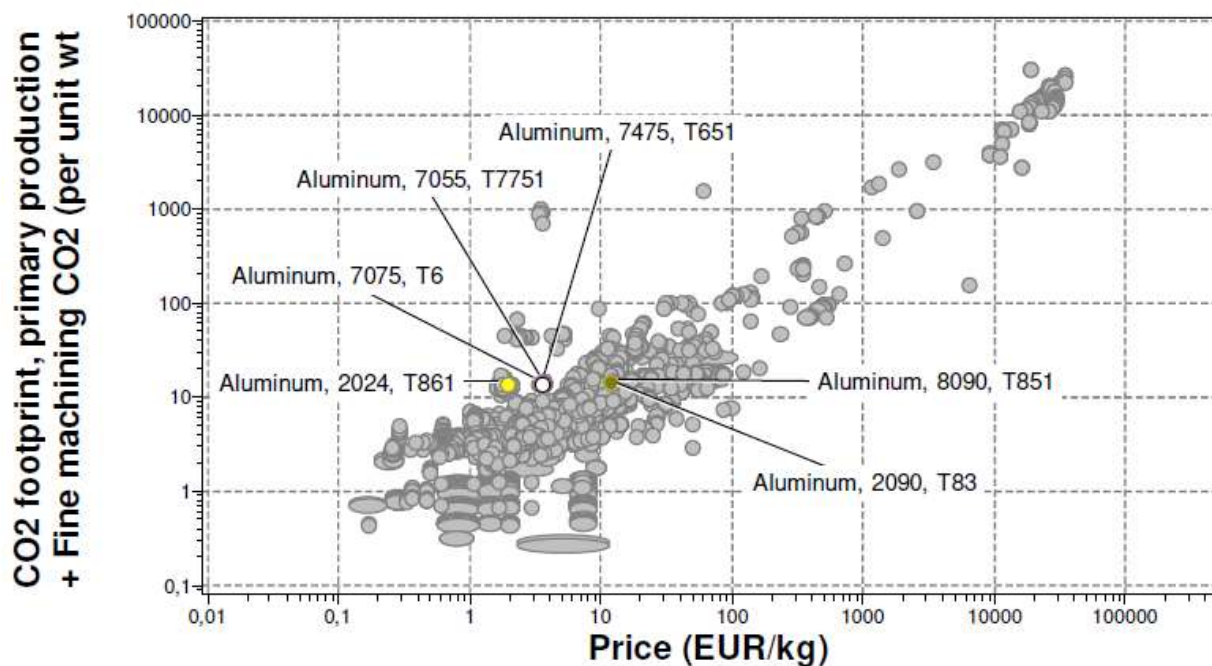


Ilustración 5.14 Huella CO₂-Precio

5.2.3. Conclusión

Tras el proceso de filtrado y el análisis de algunas de las propiedades más importantes de los materiales, se ha llegado a la conclusión de que los bujes delanteros serán de aluminio, concretamente, el Aluminium, 7075, T6. Se trata de un material muy completo, que cumple todas las propiedades necesarias para el correcto funcionamiento de la pieza.

El Aluminium, 7075, T6 es un material que presenta unas excelentes propiedades mecánicas, ofreciendo un gran rendimiento a muy buen precio.

En la siguiente tabla se recogen las propiedades del Aluminium, 7075, T6 analizadas en este capítulo.

Límite elástico [MPa]	359-530
Densidad [kg/m ³]	2,77e3-2,83e3
Precio [EUR/m ³]	3,37-3,7
Coef.exp.term. [μdef./°C]	22,9-24,1
Dureza HV	152-168
Rigidez [MN.m/kg]	24,6-27,2
Resistencia a fractura [Mpa.m ^{0,5}]	26,6-26,8
Huella de CO ₂ [kg/kg]	12,652-15,12

Tabla 5.1 Propiedades Aluminium, 7075, T6

Toda la información sobre el material Aluminium, 7075, T6 se puede encontrar en el Anexo C.

5.3. Bujes traseros

Para los bujes traseros, el planteamiento ha sido completamente diferente, debido a que el mecanizado de la Polaris en el interior del buje estará en contacto con la junta homocinética, que lo conecta con el palier.

Se ha considerado que la mejor opción para un correcto funcionamiento de la pieza es el Acero al carbono, ya que la mejor forma de asegurar que los elementos en contacto trabajan adecuadamente es siendo ambos del mismo material.

Capítulo 6: Análisis y optimización

6.1. Introducción

El objetivo de este capítulo es analizar y optimizar los bujes delanteros y traseros de un monoplaza de competición.

Para la simulación y optimización, se ha hecho uso del software ANSYS (software CAE).

En primer lugar, se han simulado unos prototipos básicos para comprobar que eran funcionales. Después, en base a los resultados de las simulaciones, se ha realizado una optimización de los bujes básicos, que ha permitido diseñar unos prototipos mucho más ligeros. Por último, se han simulado los prototipos finales para comprobar que seguían siendo perfectamente funcionales.

Las simulaciones se han llevado a cabo a partir de las fuerzas calculadas en el capítulo 4, con un cierto sobredimensionamiento.

Para cumplir el objetivo, se ha prestado atención a los resultados de tensiones y deformaciones.

En cuanto a tensiones, se han considerado los resultados de tensión ponderada y no ponderada (MPa). Si el ensayo es correcto, no deberían diferir en más de un 10%. Por otro lado, en cuanto a deformaciones, se han considerado los resultados de deformación total (mm).

6.2. Mallado

Para el análisis estructural, el programa es capaz de dividir el cuerpo a analizar en una gran cantidad de elementos finitos muy pequeños, de manera que pasa de un sistema de ecuaciones diferenciales a un sistema algebraico, donde las incógnitas se calculan en unos puntos llamados nodos. Este método de división del cuerpo a analizar recibe el nombre de mallado.

Los parámetros que se han modificado para el correcto mallado de la pieza se recogen en la siguiente tabla.

Element Size	1.0 mm
Transition	Slow
Span Angle Center	Medium
Smoothing	High

Tabla 6.1 Parámetros de malla

Se considera que los resultados son muy fiables cuando la calidad de la malla es superior a 0,8. A continuación, se muestra una gráfica con los resultados de calidad de las mallas empleadas en las simulaciones.

		Quality
Primer prototipo	Buje delantero	0,83096
	Buje trasero	0,83039
Prototipo final	Buje delantero	0,82406
	Buje trasero	0,8288

Tabla 6.2 Calidad de malla

6.2.1. Primeros prototipos

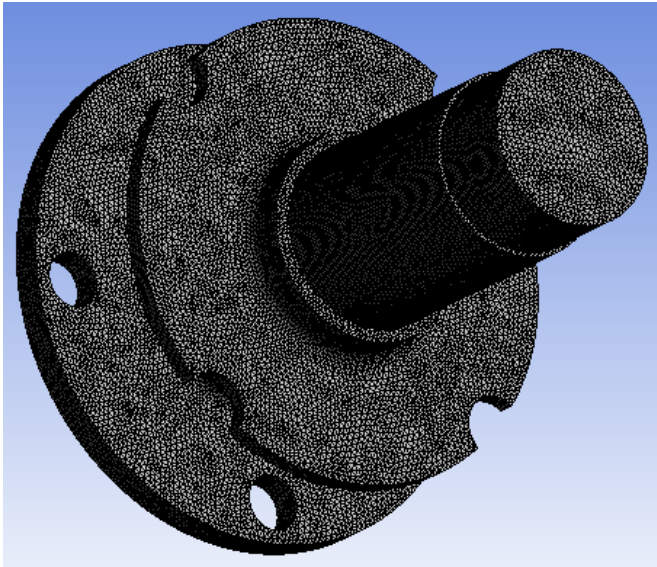


Ilustración 6.1 Malla, Primer prototipo, Buje delantero

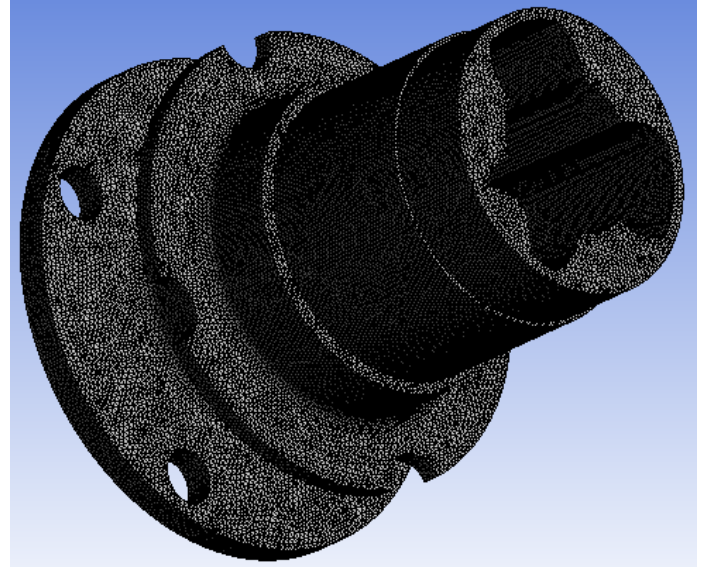


Ilustración 6.2 Malla, Primer prototipo, Buje trasero

6.2.2. Prototipos finales

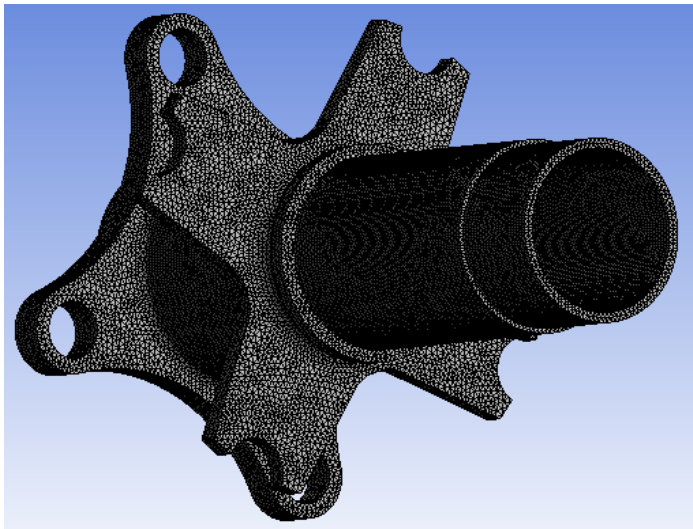


Ilustración 6.3 Malla, Prototipo final, Buje delantero

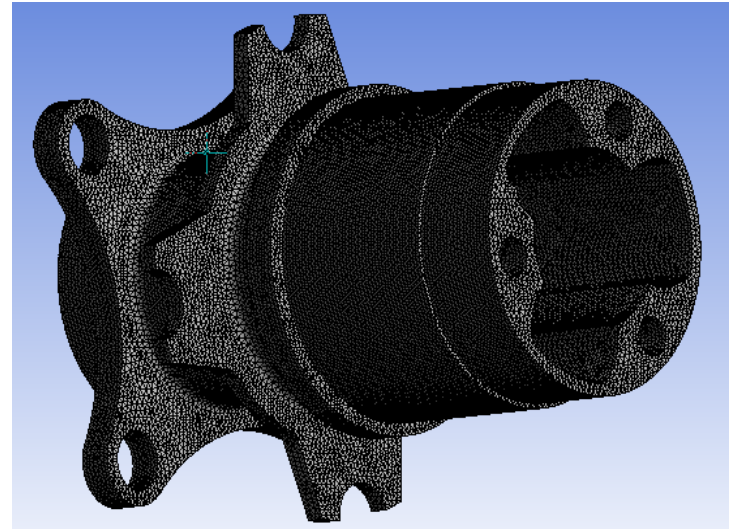


Ilustración 6.4 Malla, Prototipo final, Buje trasero

6.3. Primeros prototipos

6.3.1. Bujes delanteros

Las situaciones que se van a simular en los primeros prototipos de bujes delanteros son las siguientes: frenada y paso por curva. Las fuerzas que se simularán en cada uno de estos dos casos se recogen en la siguiente tabla.

		x	y	z (dirección longitudinal)	y* (dirección tangencial)
Frenada	Transf. Pesos	-	1250 N	-	-
	Fuerza frenado	-	-	-	2000 N
Paso por curva	Transf. Pesos	-	1500 N	-	-
	Fuerza centrífuga	750 N	-	-	-

Tabla 6.3 Fuerzas aplicadas en simulaciones, Primeros prototipos, Bujes delanteros

6.3.1.1. Frenada

La siguiente simulación corresponde a la situación de máximo frenado. En esta situación, la pinza de freno bloquea el disco de freno, generando un par de frenado que se traduce en una fuerza transmitida al buje a través de los enganches al disco de freno. Además, se tendrá en cuenta la transferencia de pesos longitudinal hacia delante.

- Tensión (promediada)
Los resultados de las tensiones promediadas se muestran a continuación.

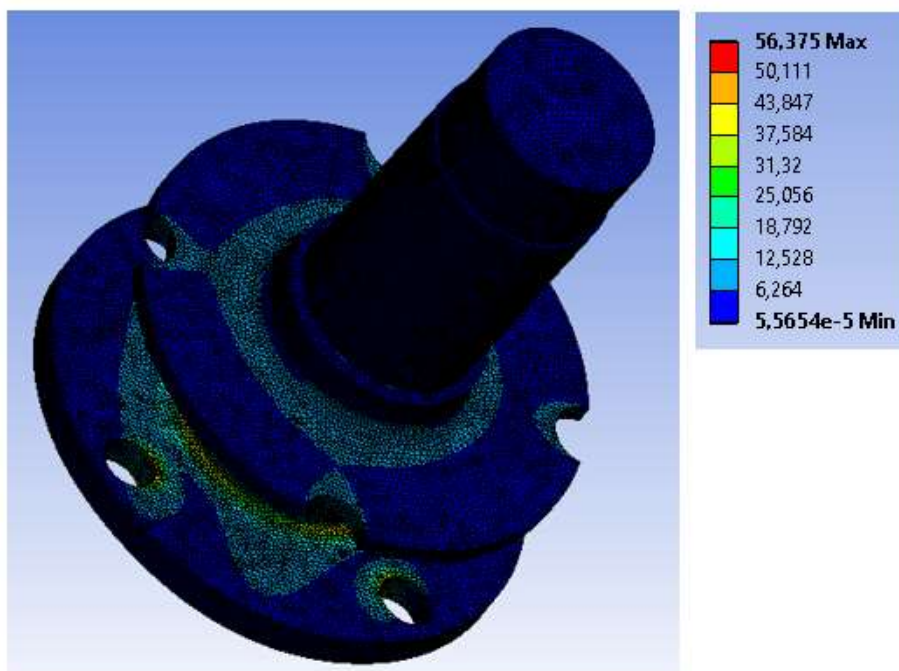


Ilustración 6.5 Tensión promediada, Frenada, Primer prototipo, Buje delantero

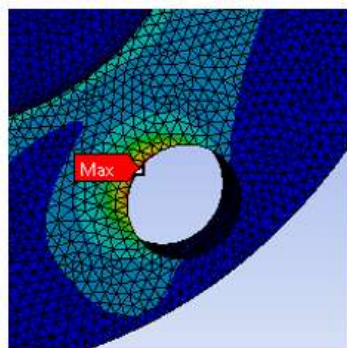


Ilustración 6.6 Detalle Max. Tensión

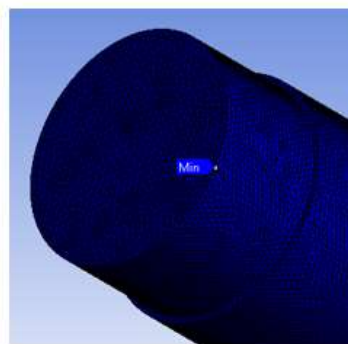


Ilustración 6.7 Detalle, Min. Tensión

- Tensión (no promediada)
Los resultados de las tensiones promediadas se muestran a continuación.

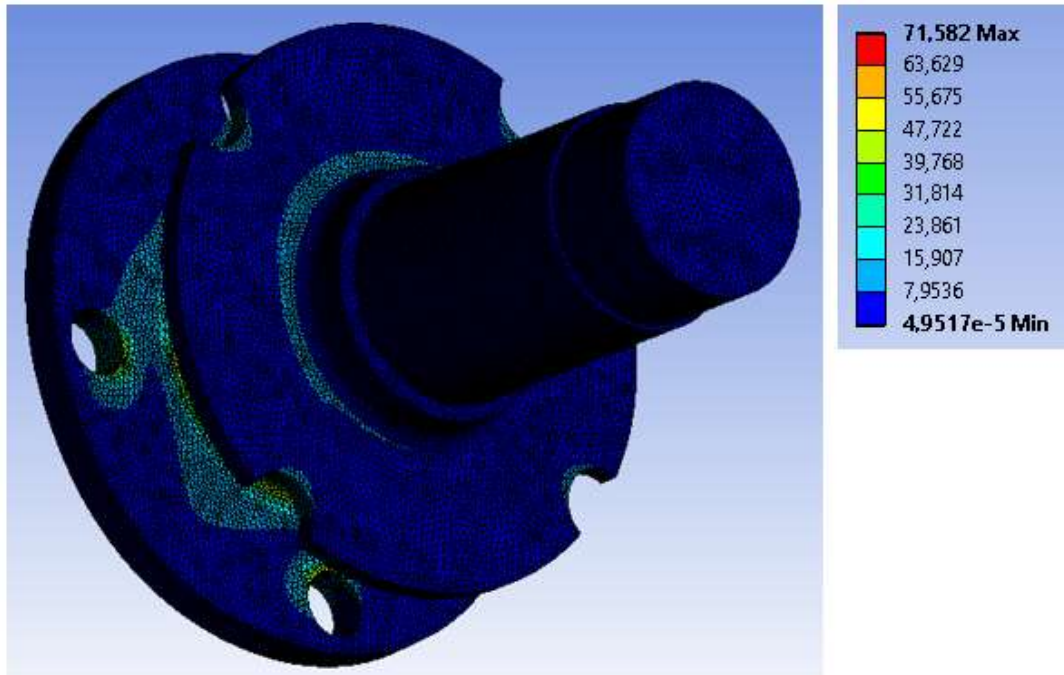


Ilustración 6.8 Tensión no promediada, Frenada, Primer prototipo, Buje delantero

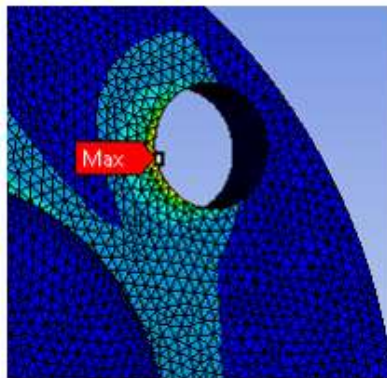


Ilustración 6.9 Detalle, Max. Tensión

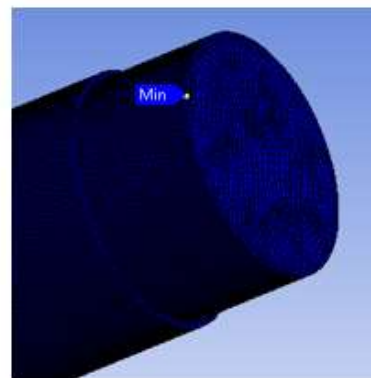


Ilustración 6.10 Detalle, Min. Tensión

Como se puede observar en las ilustraciones, los resultados de la simulación del caso de frenada son los siguientes: la tensión máxima promediada es de aproximadamente 56 MPa, y se da en una de las uniones del buje con la llanta; la tensión máxima no ponderada es de aproximadamente 72MPa, y también se da en una de las uniones del buje con la llanta. Estos resultados tienen sentido, ya que la pieza sufrirá mayores tensiones en aquellos puntos que se encuentren fijados, sin poderse deformar.

- Deformación total
Los resultados de las deformaciones totales se muestran a continuación.

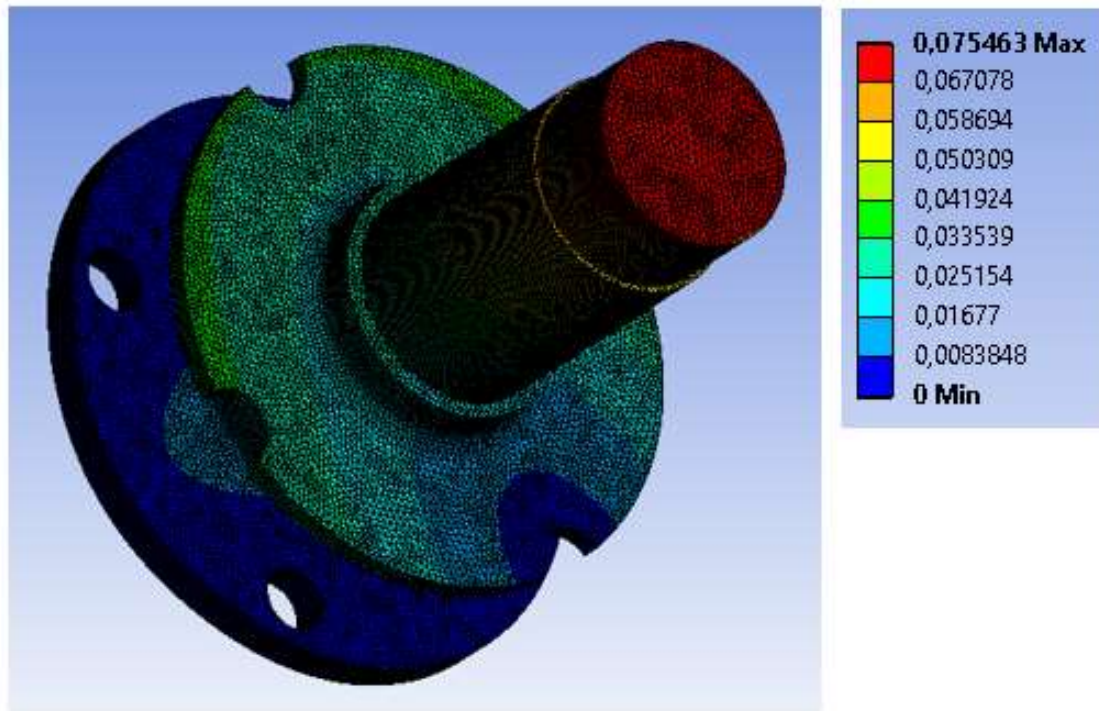


Ilustración 6.11 Deformación total, Frenada, Primer prototipo, Buje delantero

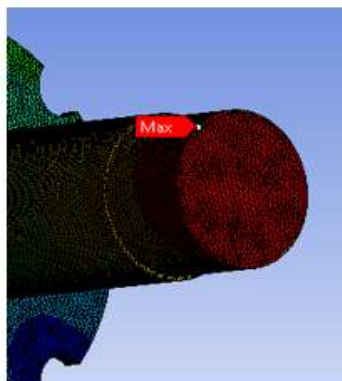


Ilustración 6.12 Detalle, Max. Deformación

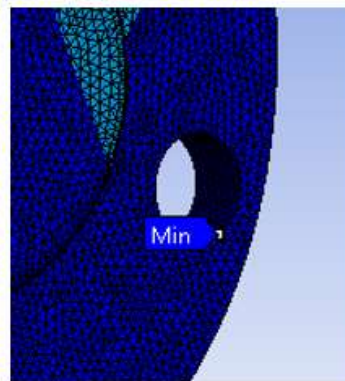


Ilustración 6.13 Detalle, Min. Deformación

Como se puede observar en las ilustraciones, el resultado de la simulación del caso de frenada es el siguiente: la deformación máxima es de aproximadamente 0,075 mm, y se da en el extremo interior del buje. Este resultado tiene sentido, ya que la pieza tenderá a deformarse más en aquellos lugares en los que nada se lo impida, que es el caso de un extremo libre.

6.3.1.2. Paso por curva

La siguiente simulación corresponde a la situación de paso por curva. En esta situación, el vehículo sufre una fuerza centrífuga, que lo intenta desplazar hacia el exterior de la curva. La mangueta, al estar fijada al chasis, sufrirá el efecto de dicha fuerza, tratando de desplazar el buje con ella, a través de su unión mediante rodamientos. Además, se tendrá en cuenta la transferencia de pesos transversal hacia el exterior de la curva.

- Tensión promediada
Los resultados de las tensiones promediadas se muestran a continuación.

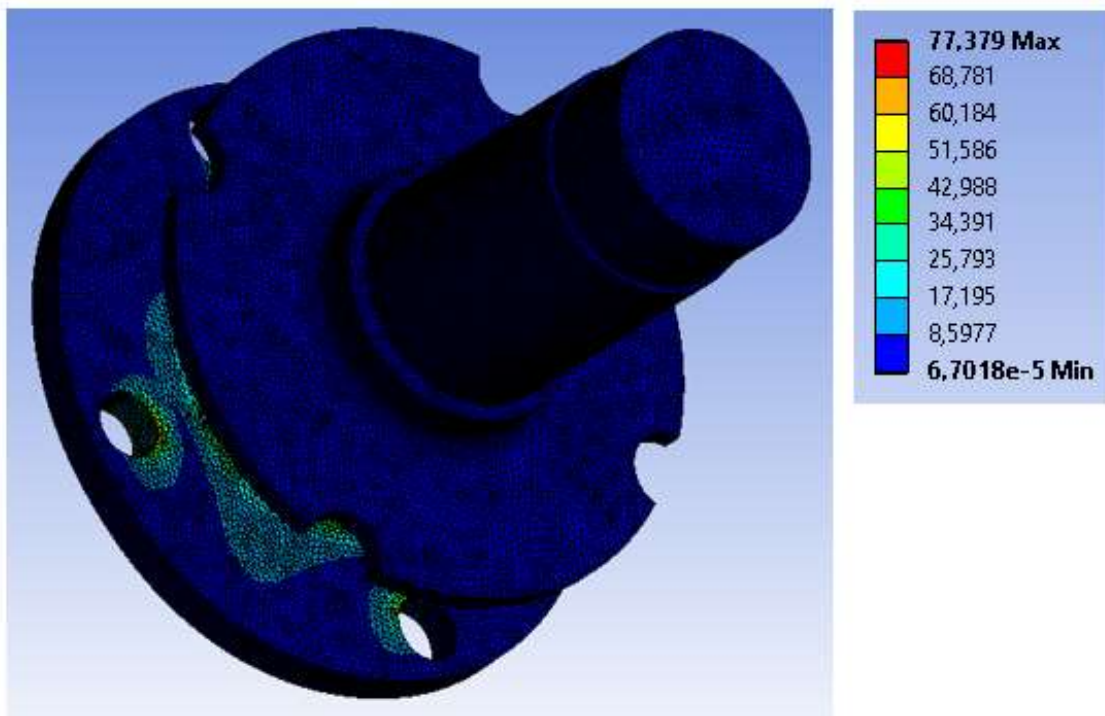


Ilustración 6.14 Tensión promediada, Paso por curva, Primer prototipo, Buje delantero

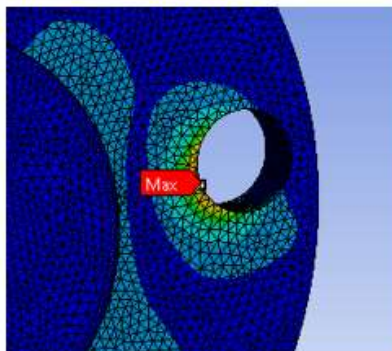


Ilustración 6.15 Detalle, Max. Tensión



Ilustración 6.16 Detalle, Min. Tensión

- Tensión (no promediada)
Los resultados de las tensiones no promediadas se muestran a continuación.

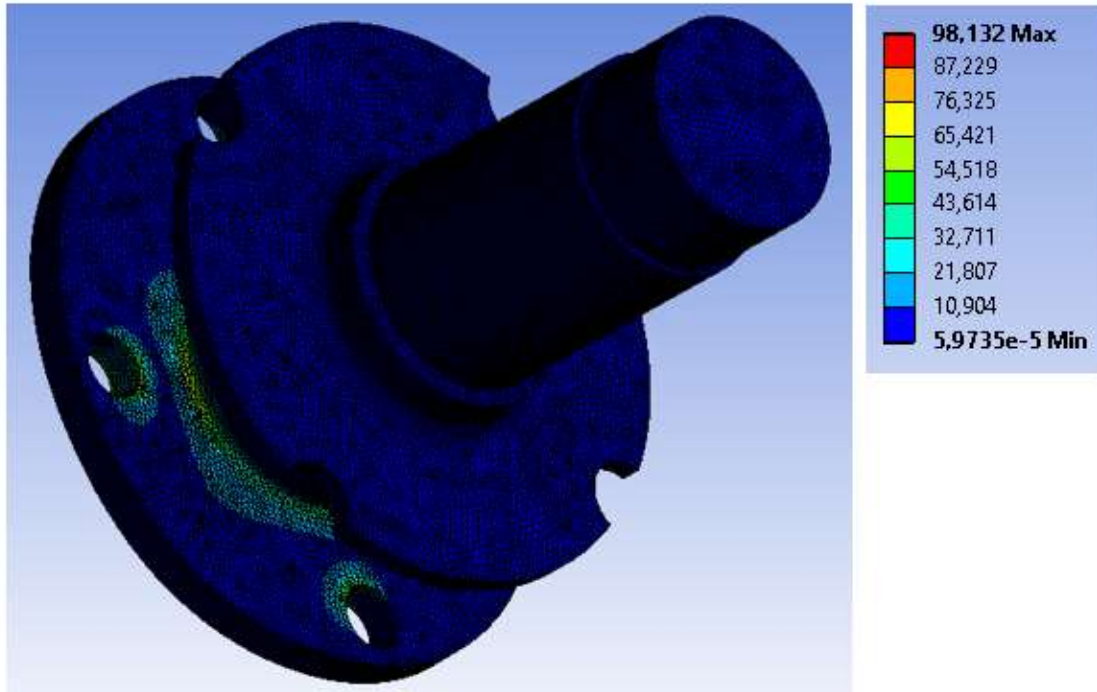


Ilustración 6.17 Tensión no promediada, Paso por curva, Primer prototipo, Buje delantero

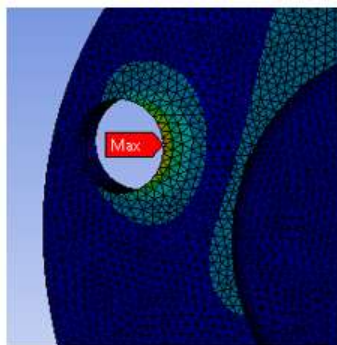


Ilustración 6.18 Detalle, Max. Tensión

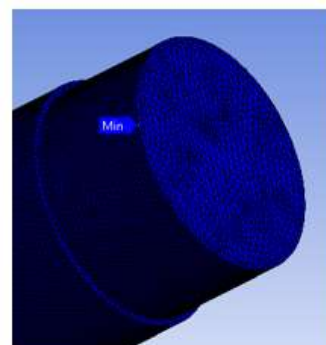


Ilustración 6.19 Detalle, Min. Tensión

Como se puede observar en las ilustraciones, los resultados de la simulación del caso de paso por curva son los siguientes: la tensión máxima promediada es de aproximadamente 77 MPa, y se da en una de las uniones del buje con la llanta; la tensión máxima no ponderada es de aproximadamente 98 MPa, y también se da en una de las uniones del buje con la llanta. Estos resultados tienen sentido, ya que la pieza sufrirá mayores tensiones en aquellos puntos que se encuentren fijados, sin poderse deformar.

- Deformación total
Los resultados de las deformaciones totales se muestran a continuación.

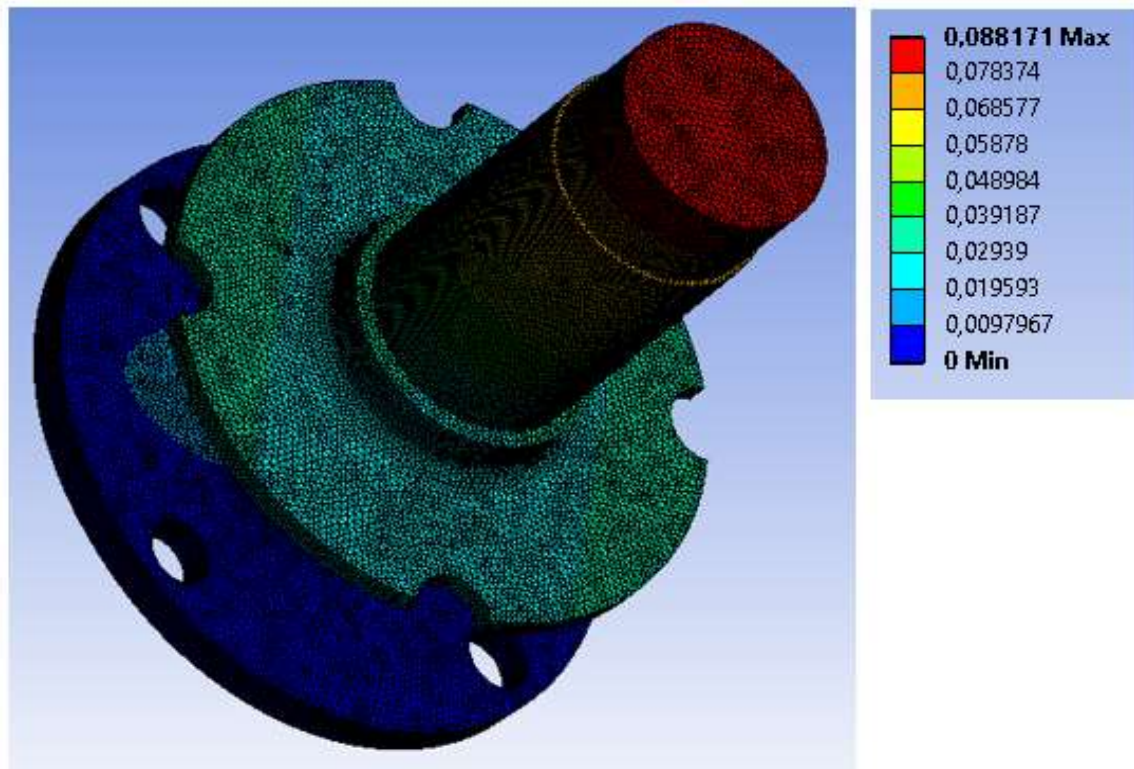


Ilustración 6.20 Deformación total, Paso por curva, Primer prototipo, Buje delantero

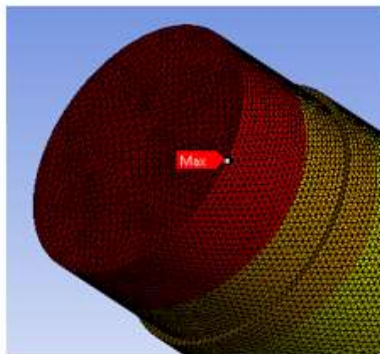


Ilustración 6.21 Detalle, Max. Deformación

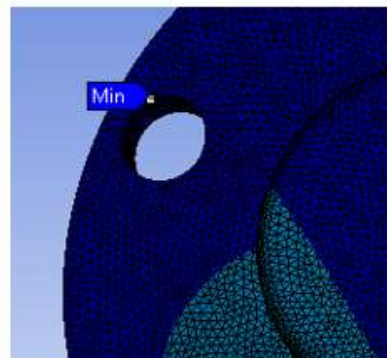


Ilustración 6.22 Detalle, Min. Deformación

Como se puede observar en las ilustraciones, el resultado de la simulación del caso de paso por curva es el siguiente: la deformación máxima es de aproximadamente 0,088mm, y se da en el extremo interior del buje. Este resultado tiene sentido, ya que la pieza tenderá a deformarse en aquellos lugares en los que nada se lo impida, que es el caso de un extremo libre.

6.3.2. Bujes traseros

Las situaciones que se van a simular en los primeros prototipos de bujes traseros son las siguientes: frenada, paso por curva y aceleración. Las fuerzas que se simularán en cada uno de estos tres casos se recogen en la siguiente tabla.

		x	y	z (dirección longitudinal)	y* (dirección tangencial)
Frenada	Transf. Pesos	-	1250 N	-	-
	Fuerza frenado	-	-	-	2000 N
Paso por curva	Transf. Pesos	-	1500 N	-	-
	Fuerza centrífuga	750 N	-	-	-
Aceleración	Transf. Pesos	-	-	1250 N	-
	Fuerza tracción	2000 N	-	-	-

Tabla 6.4 Fuerzas aplicadas en simulaciones, Primeros prototipos, Bujes traseros

6.3.2.1. Frenada

La siguiente simulación corresponde a la situación de máximo frenado. En esta situación, la pinza de freno bloquea el disco de freno, generando un par de frenado que se traduce en una fuerza transmitida al buje a través de los enganches al disco de freno. Además, se tendrá en cuenta la transferencia de pesos longitudinal hacia delante.

- Tensión (promediada)
Los resultados de las tensiones promediadas se muestran a continuación.

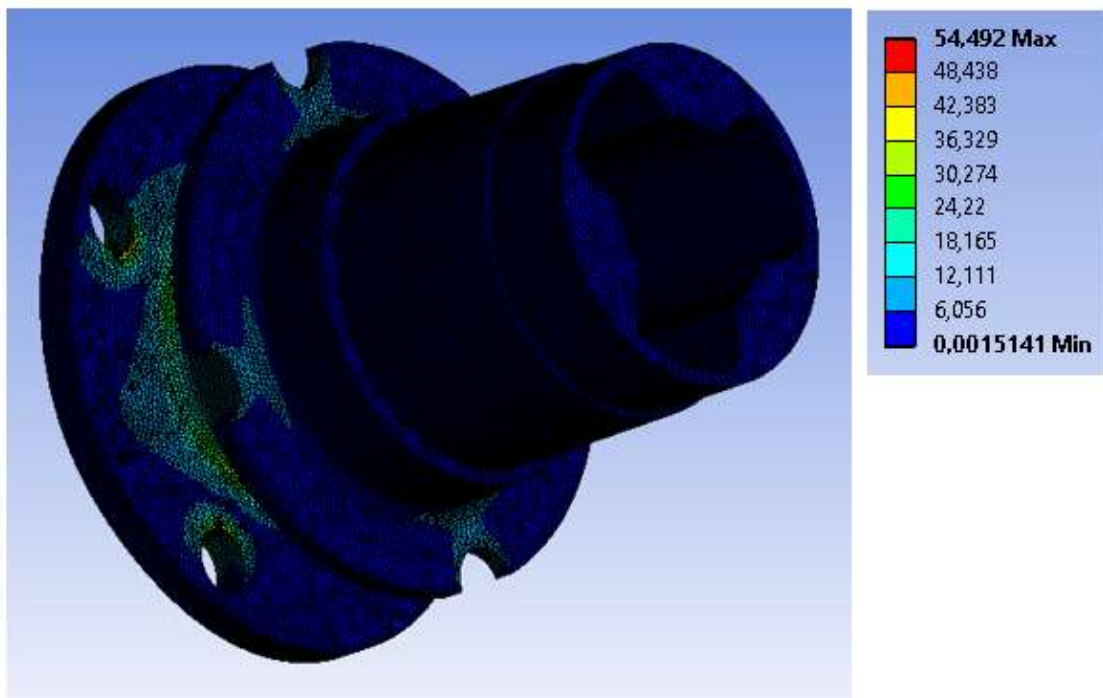


Ilustración 6.23 Tensión promediada, Frenada, Primer prototipo, Buje trasero

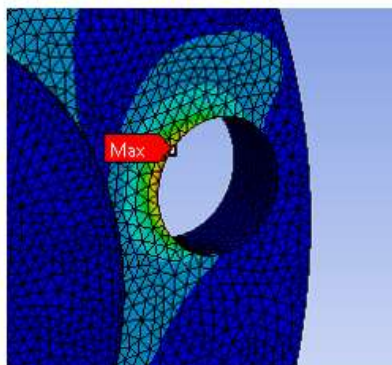


Ilustración 6.24 Detalle Max. Tensión

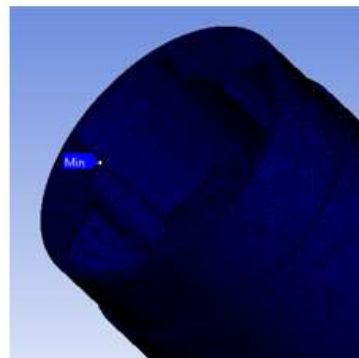


Ilustración 6.25 Detalle, Min. Tensión

- Tensión (no promediada)
Los resultados de las tensiones no promediadas se muestran a continuación.

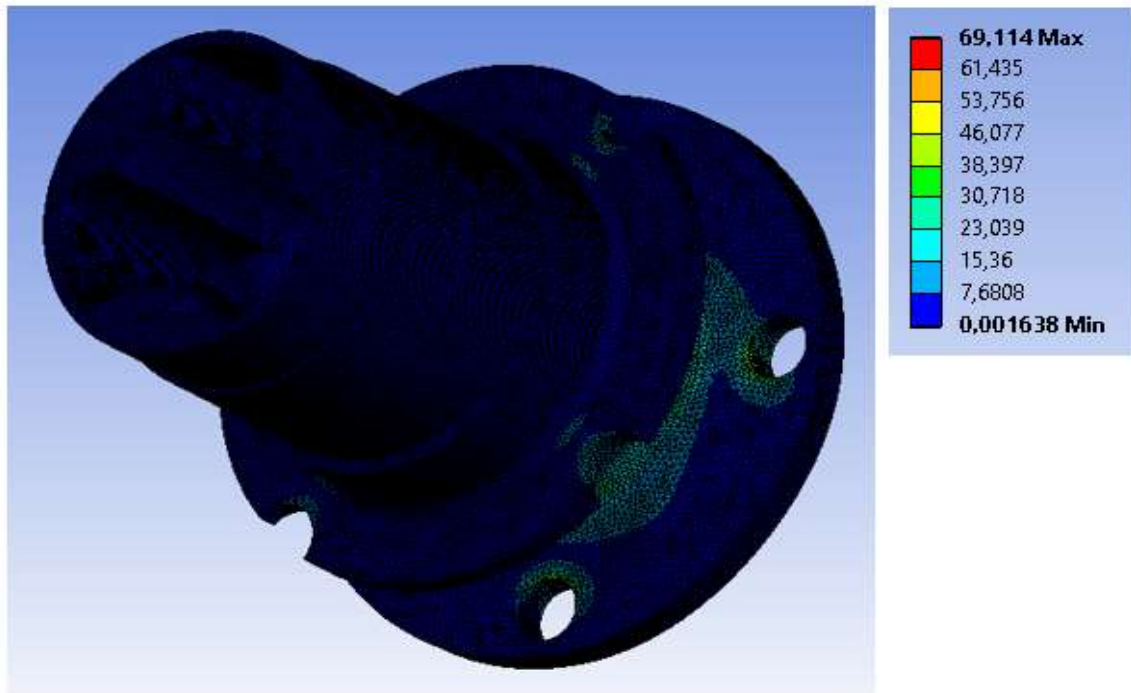


Ilustración 6.26 Tensión no promediada, Frenada, Primer prototipo, Buje trasero

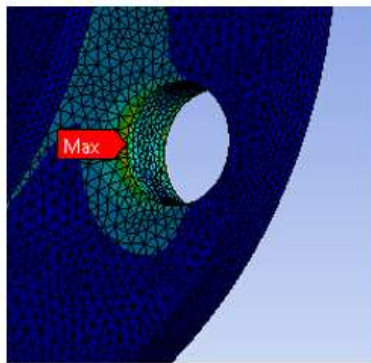


Ilustración 6.27 Detalle, Max. Tensión

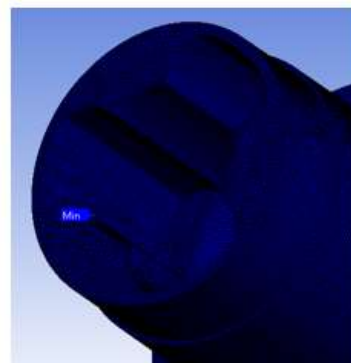


Ilustración 6.28 Detalle, Min. Tensión

Como se puede observar en las ilustraciones, los resultados de la simulación del caso de frenada son los siguientes: la tensión máxima promediada es de aproximadamente 54 MPa, y se da en una de las uniones del buje con la llanta; la tensión máxima no ponderada es de aproximadamente 69 MPa, y también se da en una de las uniones del buje con la llanta. Estos resultados tienen sentido, ya que la pieza sufrirá mayores tensiones en aquellos puntos que se encuentren fijados, sin poderse deformar.

- Deformación total
Los resultados de las deformaciones totales se muestran a continuación.

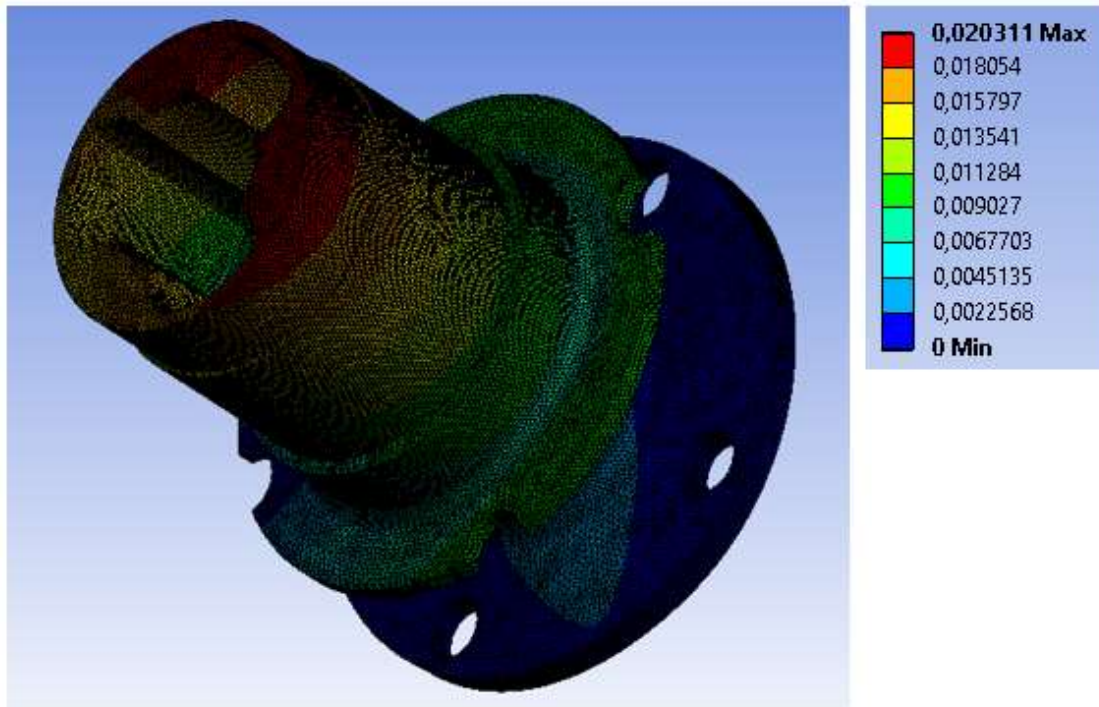


Ilustración 6.29 Deformación total, Frenada, Primer prototipo, Buje trasero

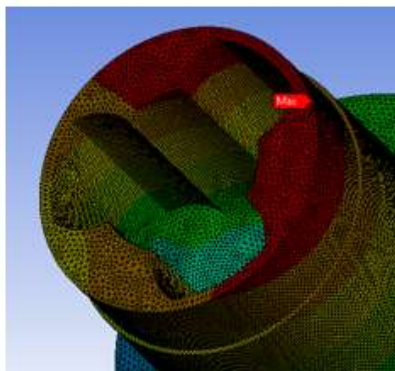


Ilustración 6.30 Detalle, Max. Deformación

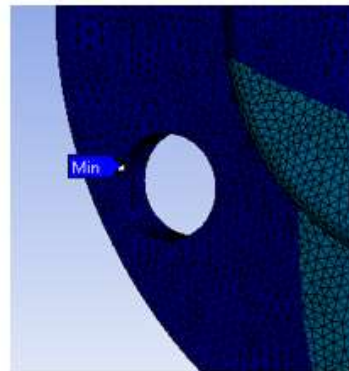


Ilustración 6.31 Detalle, Min. Tensión

Como se puede observar en las ilustraciones, el resultado de la simulación del caso de frenada es el siguiente: la deformación máxima es de aproximadamente 0,02mm, y se da en el extremo interior del buje. Este resultado tiene sentido, ya que la pieza tenderá a deformarse en aquellos lugares en los que nada se lo impida, que es el caso de un extremo libre.

6.3.2.2. Paso por curva

La siguiente simulación corresponde a la situación de paso por curva. En esta situación, el vehículo sufre una fuerza centrífuga, que lo intenta desplazar hacia el exterior de la curva. La mangueta, al estar fijada al chasis, sufrirá el efecto de dicha fuerza, tratando de desplazar el buje con ella, a través de su unión mediante rodamientos. Además, se tendrá en cuenta la transferencia de pesos transversal hacia el exterior de la curva.

- Tensión (promediada)
Los resultados de las tensiones promediadas se muestran a continuación.

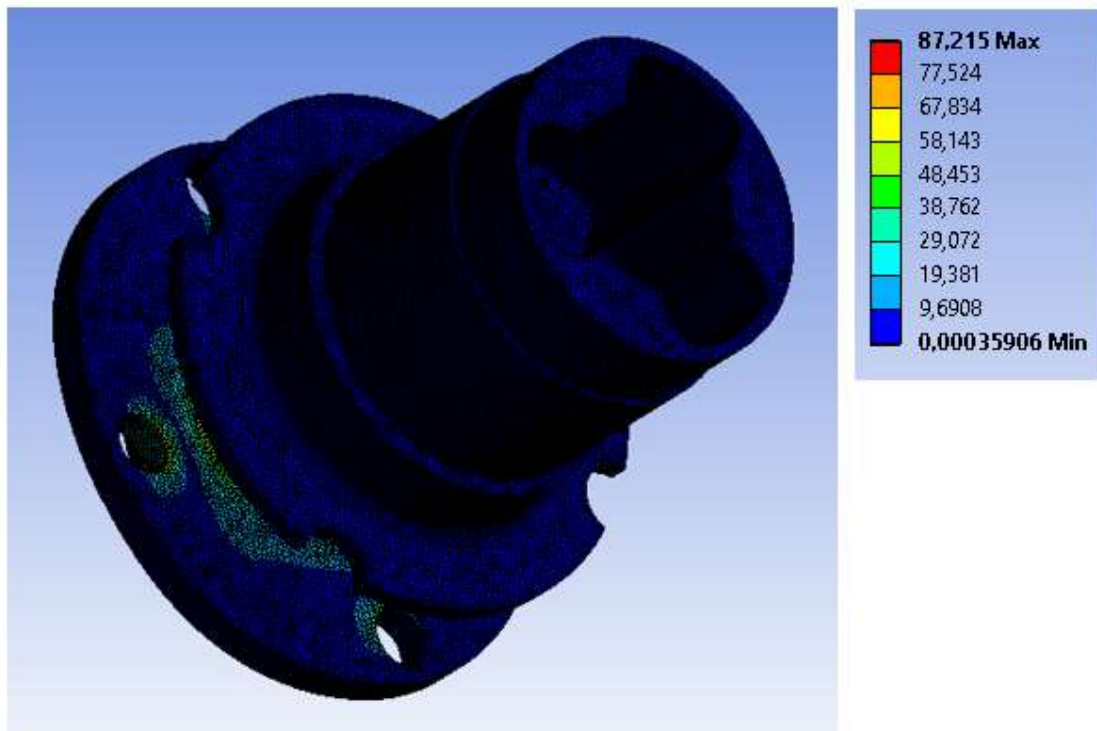


Ilustración 6.32 Tensión promediada, Paso por curva, Primer prototipo, Buje trasero

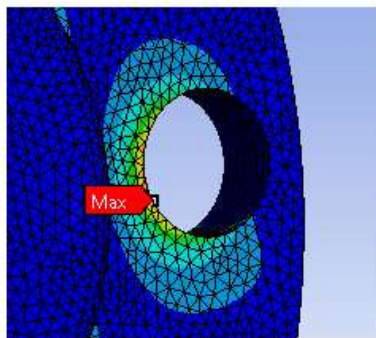


Ilustración 6.33 Detalle, Max. Tensión

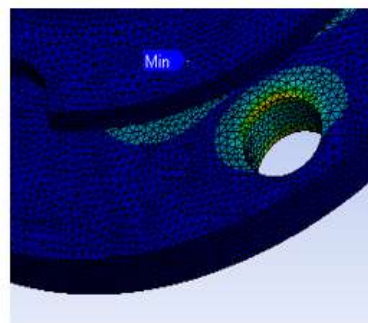


Ilustración 6.34 Detalle, Min. Tensión

- Tensión (no promediada)
Los resultados de las tensiones no promediadas se muestran a continuación.

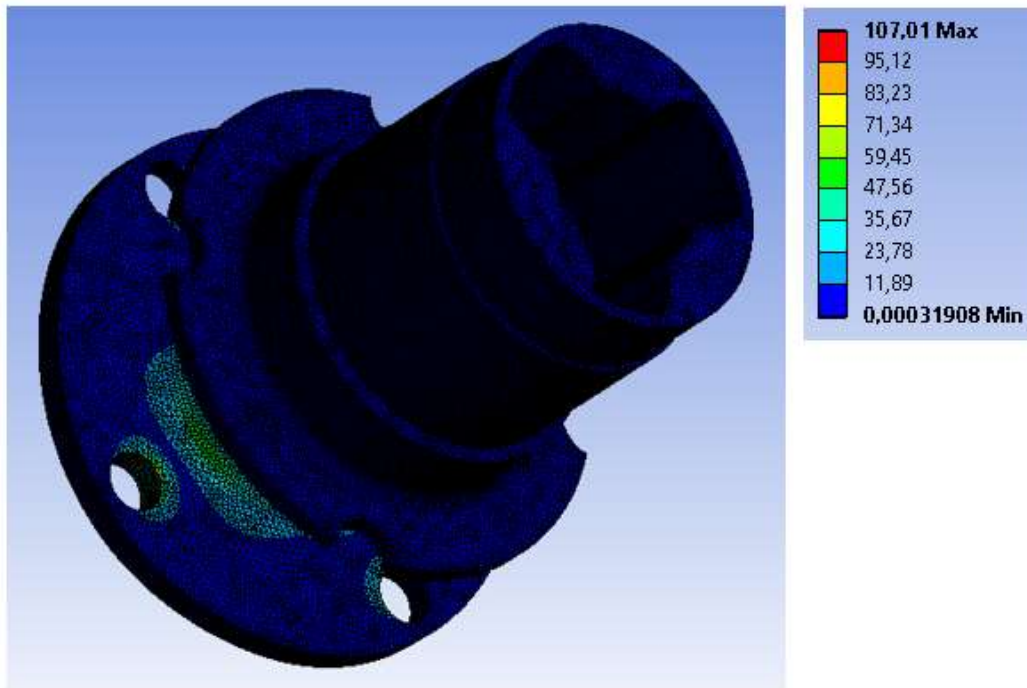


Ilustración 6.35 Tensión no promediada, Paso por curva, Primer prototipo, Buje trasero

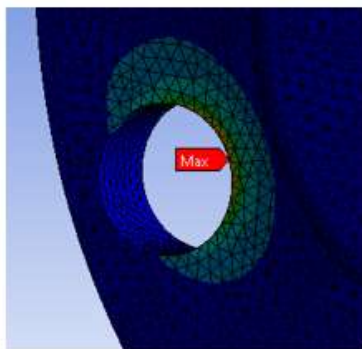


Ilustración 6.36 Detalle, Max. Tensión

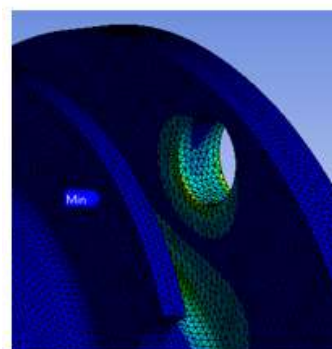


Ilustración 6.37 Detalle, Min. Tensión

Como se puede observar en las ilustraciones, los resultados de la simulación del caso de paso por curva son los siguientes: la tensión máxima promediada es de aproximadamente 87 MPa, y se da en una de las uniones del buje con la llanta; la tensión máxima no ponderada es de aproximadamente 107 MPa, y también se da en una de las uniones del buje con la llanta. Estos resultados tienen sentido, ya que la pieza sufrirá mayores tensiones en aquellos puntos que se encuentren fijados, sin poderse deformar.

- Deformación total
Los resultados de las deformaciones totales se muestran a continuación.

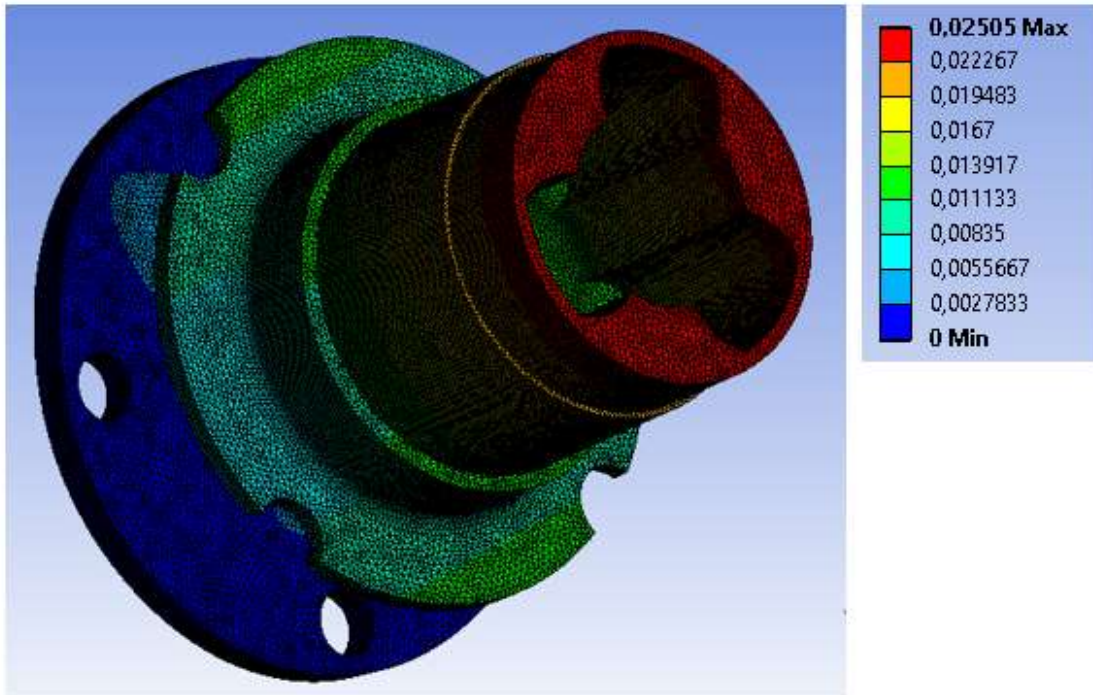


Ilustración 6.38 Deformación total, Paso por curva, Primer prototipo, Buje trasero

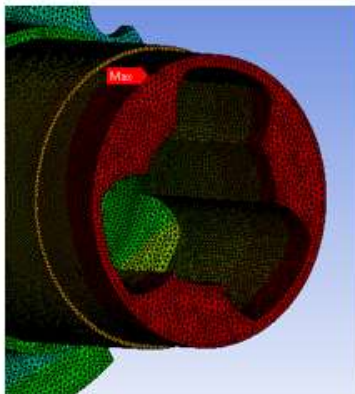


Ilustración 6.39 Detalle, Max. Deformación

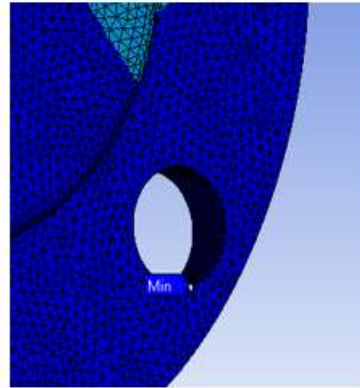


Ilustración 6.40 Detalle, Min. Deformación

Como se puede observar en las ilustraciones, el resultado de la simulación del caso de paso por curva es el siguiente: la deformación máxima es de aproximadamente 0,025mm, y se da en el extremo interior del buje. Este resultado tiene sentido, ya que la pieza tenderá a deformarse en aquellos lugares en los que nada se lo impida, que es el caso de un extremo libre.

6.3.2.3. Aceleración

La siguiente simulación corresponde a la situación de máxima aceleración. En esta situación, el buje comienza a girar solidariamente con el palier gracias a la junta homocinética, y como el buje está fijado a la llanta, comienza a hacer girar las ruedas, de manera que se genera una fuerza entre el buje, que está tratando de avanzar con la rueda, y la mangueta que está fija al chasis. Además, se tendrá en cuenta la transferencia de pesos longitudinal hacia detrás.

- Tensión (promediada)
Los resultados de las tensiones promediadas se muestran a continuación.

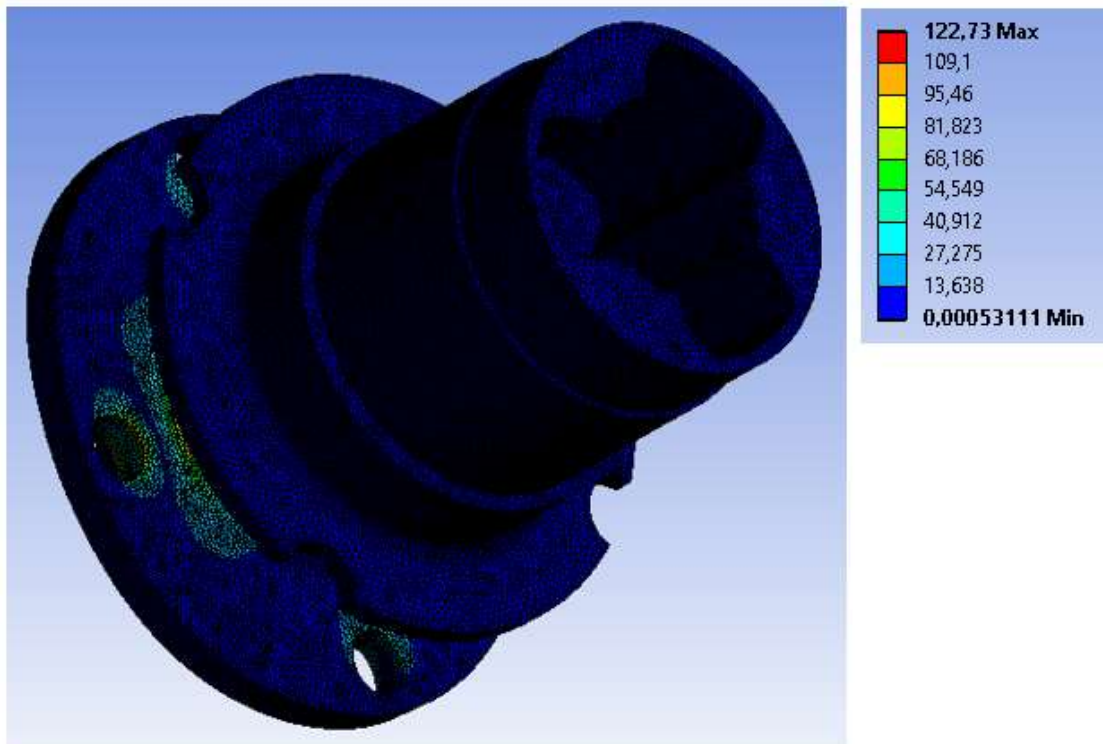


Ilustración 6.41 Tensión promediada, Aceleración, Primer prototipo, Buje trasero

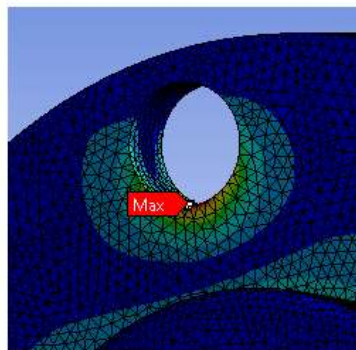


Ilustración 6.42 Detalle, Max. Tensión

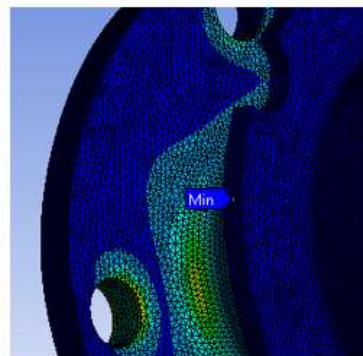


Ilustración 6.43 Detalle, Min. Tensión

- Tensión (no promediada)
Los resultados de las tensiones no promediadas se muestran a continuación.

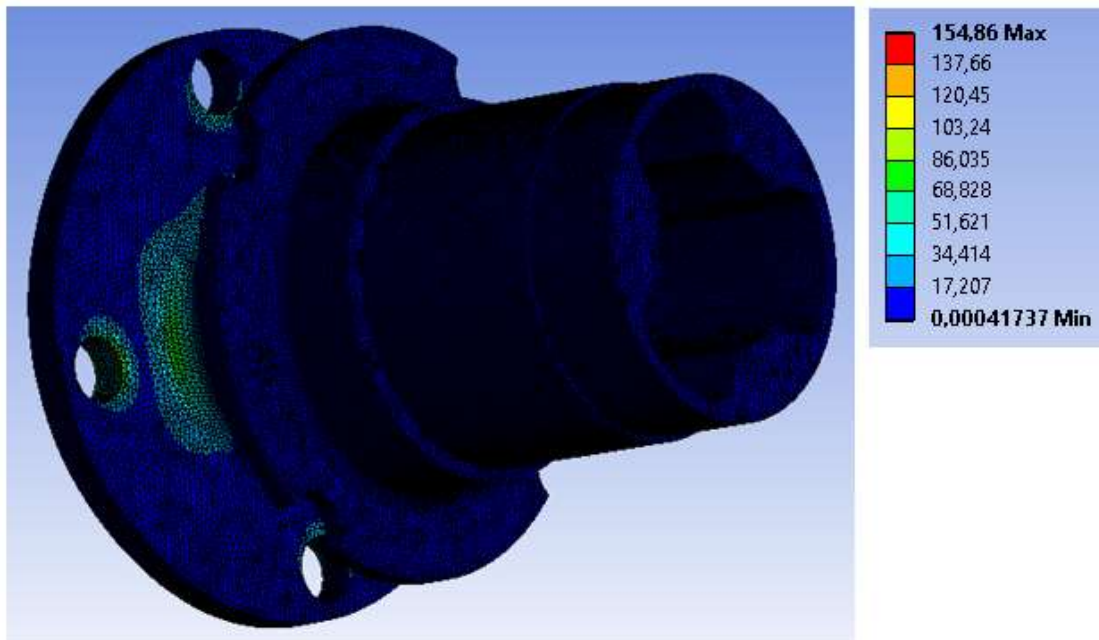


Ilustración 6.44 Tensión no promediada, Aceleración, Primer prototipo, Buje trasero

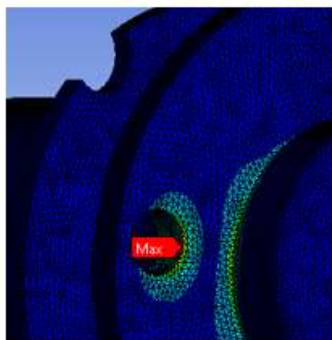


Ilustración 6.45 Detalle, Max. Tensión

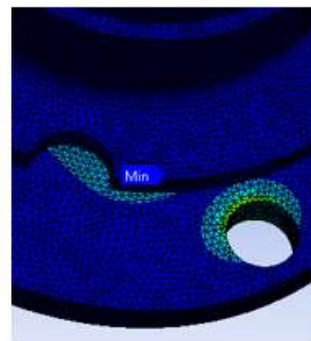


Ilustración 6.46 Detalle, Min. Tensión

Como se puede observar en las ilustraciones, los resultados de la simulación del caso de aceleración son los siguientes: la tensión máxima promediada es de aproximadamente 123 MPa, y se da en una de las uniones del buje con la llanta; la tensión máxima no ponderada es de aproximadamente 155 MPa, y también se da en una de las uniones del buje con la llanta. Estos resultados tienen sentido, ya que la pieza sufrirá mayores tensiones en aquellos puntos que se encuentren fijados, sin poderse deformar.

- Deformación total
Los resultados de las deformaciones totales se muestran a continuación.

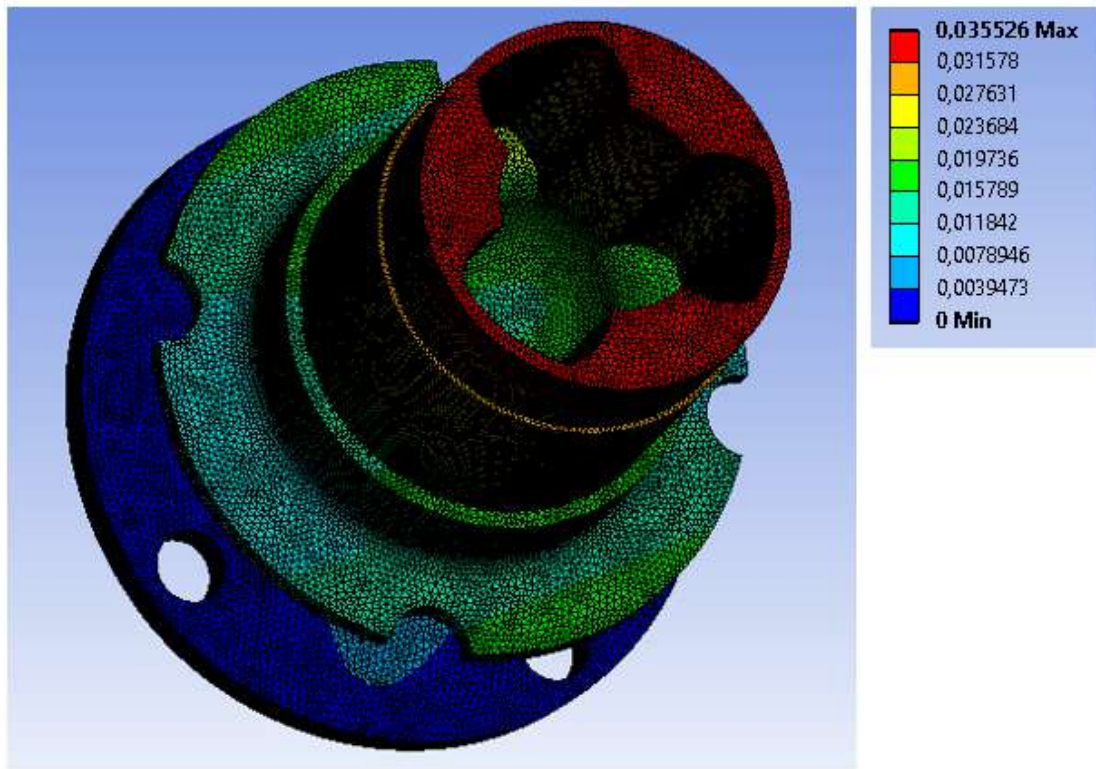


Ilustración 6.47 Deformación total, Aceleración, Primer prototipo, Buje trasero

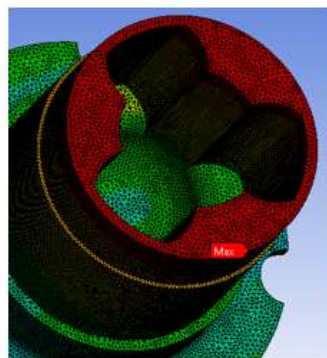


Ilustración 6.48 Detalle, Max. Deformación

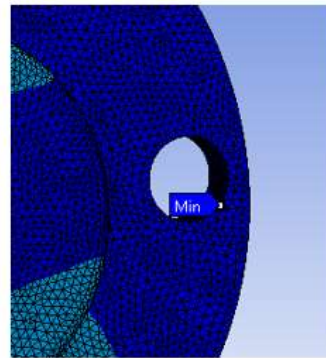


Ilustración 6.49 Detalle, Min. Deformación

Como se puede observar en las ilustraciones, el resultado de la simulación del caso de aceleración es el siguiente: la deformación máxima es de aproximadamente 0,036mm, y se da en el extremo interior del buje. Este resultado tiene sentido, ya que la pieza tenderá a deformarse en aquellos lugares en los que nada se lo impida, que es el caso de un extremo libre.

6.4. Prototipos finales

Los prototipos finales se han conseguido a partir de los resultados de las simulaciones de los primeros prototipos. Se ha observado que había determinadas partes de las piezas que estaban muy poco cargadas, y no cumplían ninguna función necesaria. Por ello, se ha podido reducir enormemente la masa de los primeros prototipos, y se ha llegado al diseño de los prototipos finales.

6.4.1. Bujes delanteros

Las situaciones que se van a simular en los bujes delanteros son las mismas que se simularon previamente en los primeros prototipos. Es decir, las siguientes situaciones: frenada y paso por curva. Las fuerzas que se simularán en cada uno de estos dos casos, que serán las mismas que en los primeros prototipos, se recogen en la siguiente tabla.

		x	y	z (dirección longitudinal)	y* (dirección tangencial)
Frenada	Transf. Pesos	-	1250 N	-	-
	Fuerza frenado	-	-	-	2000 N
Paso por curva	Transf. Pesos	-	1500 N	-	-
	Fuerza centrífuga	750 N	-	-	-

Tabla 6.5 Fuerzas aplicadas en simulaciones, Prototipos finales, Bujes delanteros

6.4.1.1. Frenada

La siguiente simulación corresponde a la situación de máximo frenado. Esta situación ha sido explicada detalladamente en los primeros prototipos.

- Tensión (promediada)
Los resultados de tensiones promediadas se muestran a continuación.

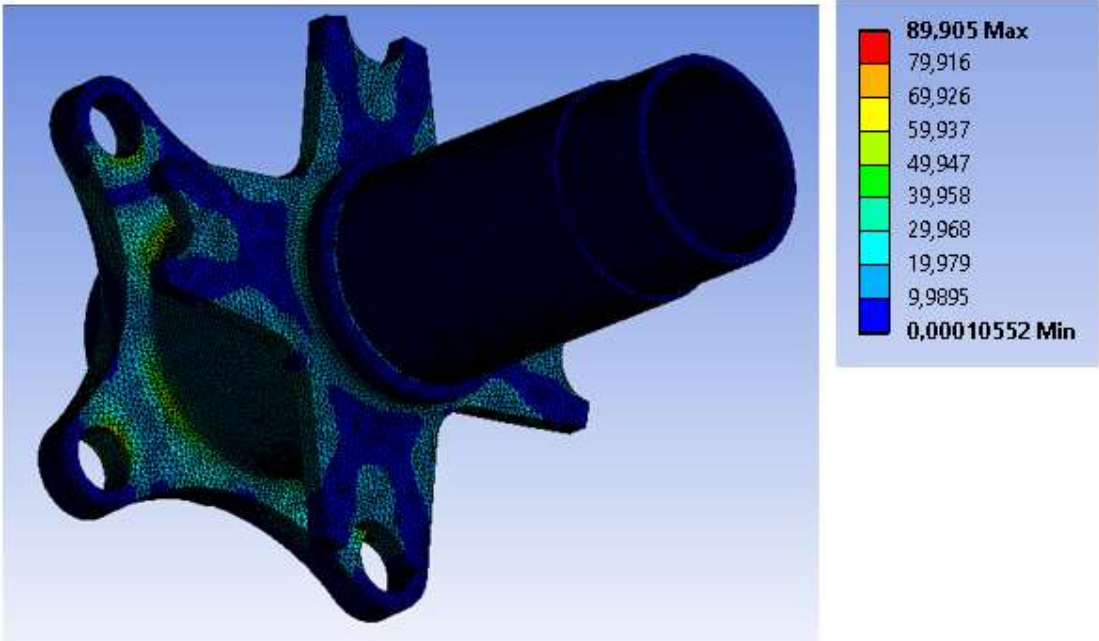


Ilustración 6.50 Tensión promediada, Frenada, Prototipo final, Buje delantero

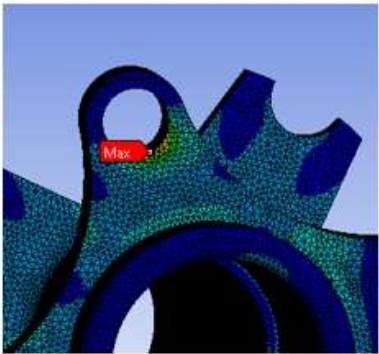


Ilustración 6.51 Detalle, Max. Tensión

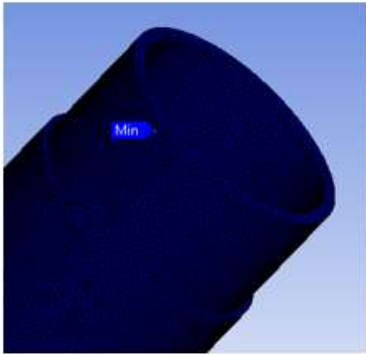


Ilustración 6.52 Detalle, Min. Tensión

- Tensión (no promediada)
Los resultados de las tensiones no promediadas se muestran a continuación.

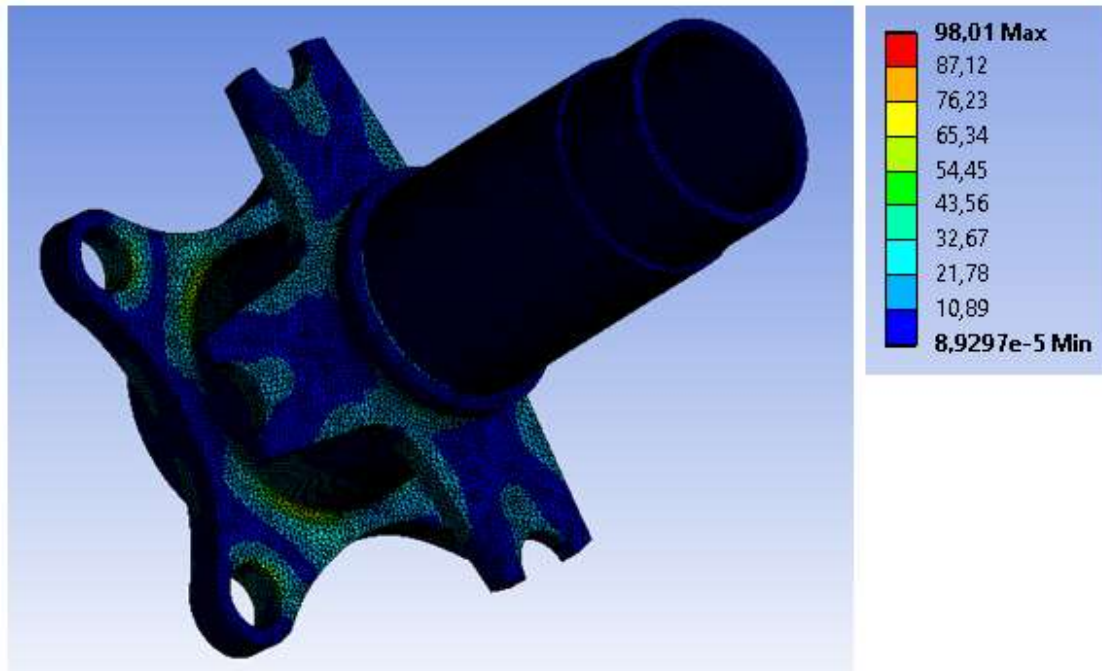


Ilustración 6.53 Tensión no promediada, Frenada, Prototipo final, Buje delantero

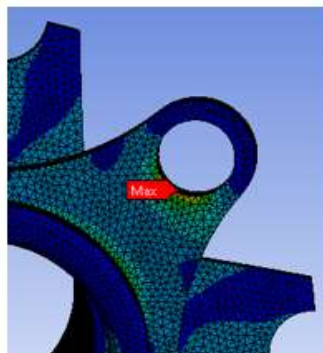


Ilustración 6.54 Detalle, Max. Tensión

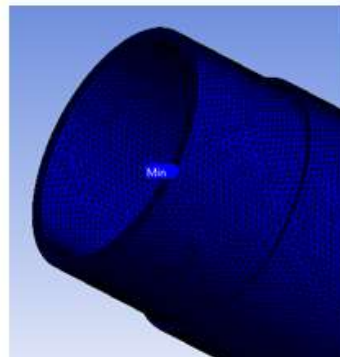


Ilustración 6.55 Detalle, Min. Tensión

Como se puede observar en las ilustraciones, los resultados de la simulación del caso de frenada son los siguientes: la tensión máxima promediada es de aproximadamente 90 MPa, y se da en una de las uniones del buje con la llanta; la tensión máxima no ponderada es de aproximadamente 98 MPa, y también se da en una de las uniones del buje con la llanta. Estos resultados tienen sentido, ya que la pieza sufrirá mayores tensiones en aquellos puntos que se encuentren fijados, sin poderse deformar.

- Deformación total
Los resultados de las deformaciones totales se muestran a continuación.

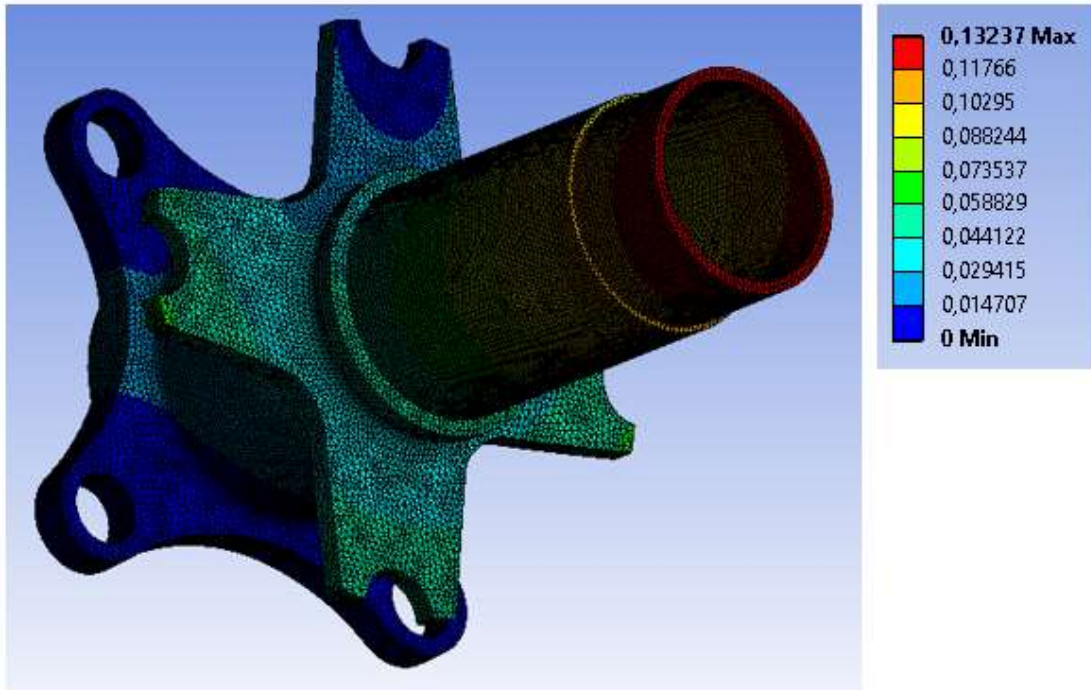


Ilustración 6.56 Deformación total, Frenada, Prototipo final, Buje delantero

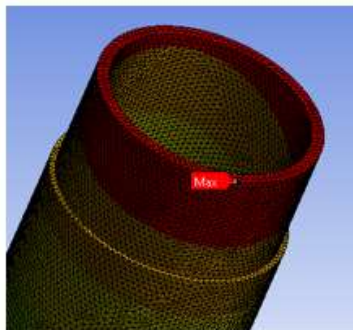


Ilustración 6.57 Detalle, Max. Deformación

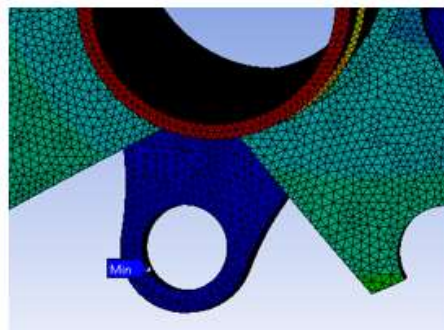


Ilustración 6.58 Detalle, Max. Deformación

Como se puede observar en las ilustraciones, el resultado de la simulación del caso de frenada es el siguiente: la deformación máxima es de aproximadamente 0,13mm, y se da en el extremo interior del buje. Este resultado tiene sentido, ya que la pieza tenderá a deformarse en aquellos lugares en los que nada se lo impida, que es el caso de un extremo libre.

6.4.1.2. Paso por curva

La siguiente simulación corresponde a la situación de paso por curva. Esta situación ha sido explicada detalladamente en los primeros prototipos.

- Tensión (promediada)
Los resultados de las tensiones promediadas se muestran a continuación.

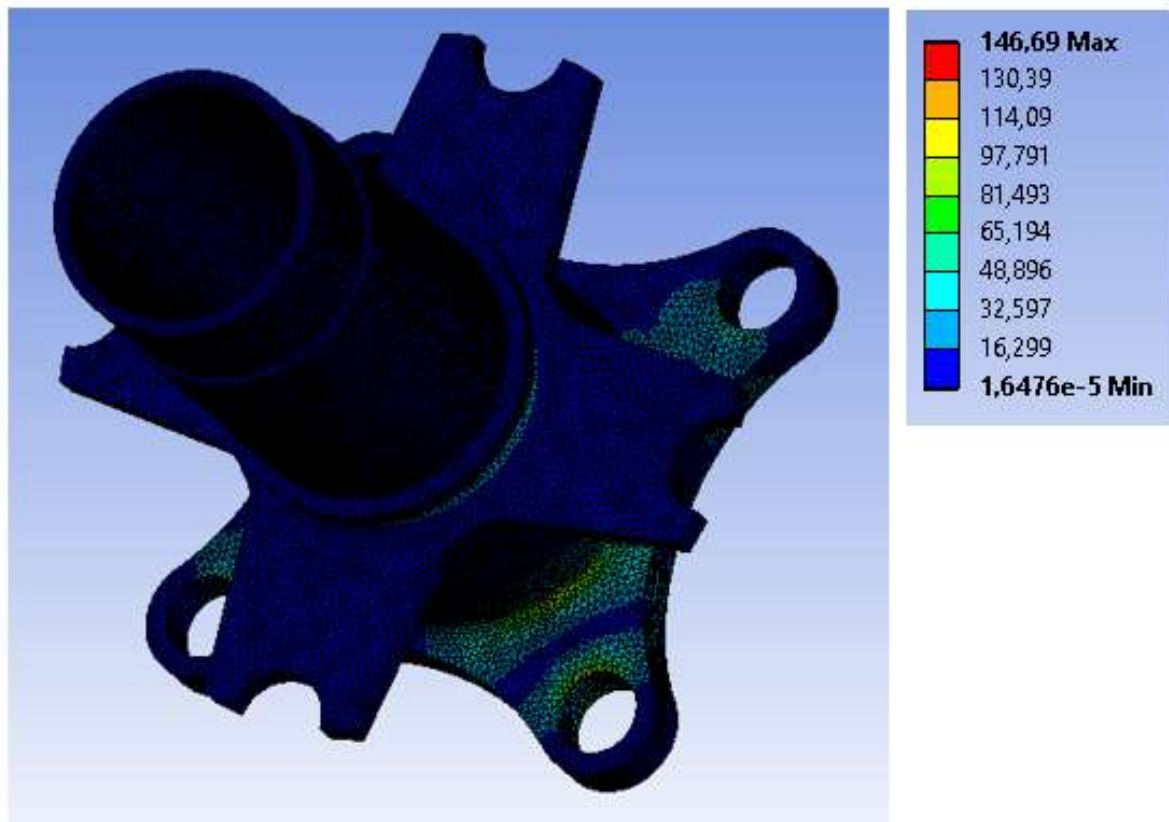


Ilustración 6.59 Tensión promediada, Paso por curva, Prototipo final, Buje delantero

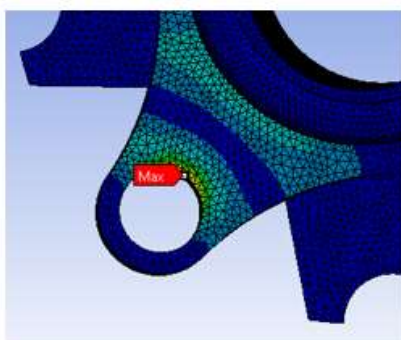


Ilustración 6.60 Detalle, Max. Tensión

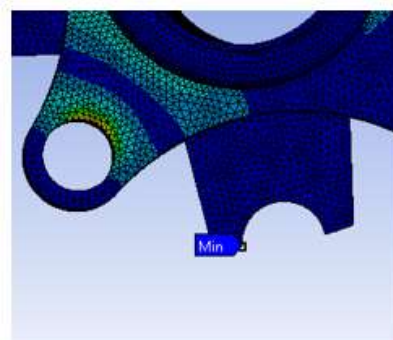


Ilustración 6.61 Detalle, Min. Tensión

- Tensión (no promediada)
Los resultados de las tensiones promediadas se muestran a continuación.

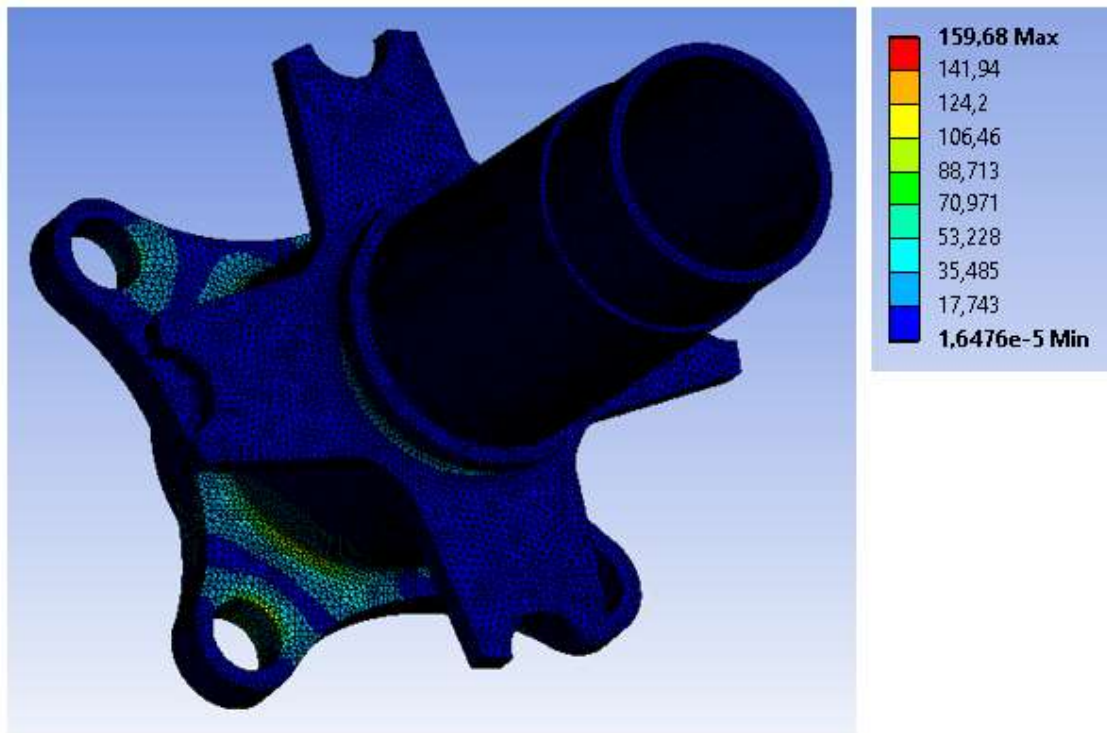


Ilustración 6.62 Tensión no promediada, Paso por curva, Prototipo final, Buje delantero

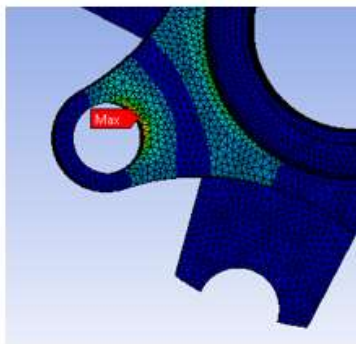


Ilustración 6.63 Detalle, Max. Tensión

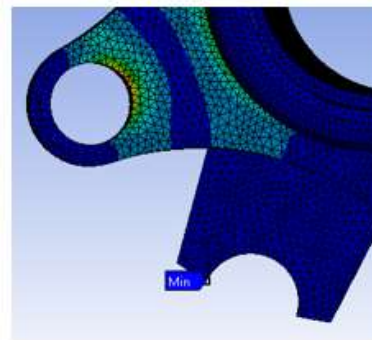


Ilustración 6.64 Detalle, Min. Tensión

Como se puede observar en las ilustraciones, los resultados de la simulación del caso de paso por curva son los siguientes: la tensión máxima promediada es de aproximadamente 147 MPa, y se da en una de las uniones del buje con la llanta; la tensión máxima no ponderada es de aproximadamente 160 MPa, y también se da en una de las uniones del buje con la llanta. Estos resultados tienen sentido, ya que la pieza sufrirá mayores tensiones en aquellos puntos que se encuentren fijados, sin poderse deformar.

- Deformación total
Los resultados de las deformaciones totales se muestran a continuación.

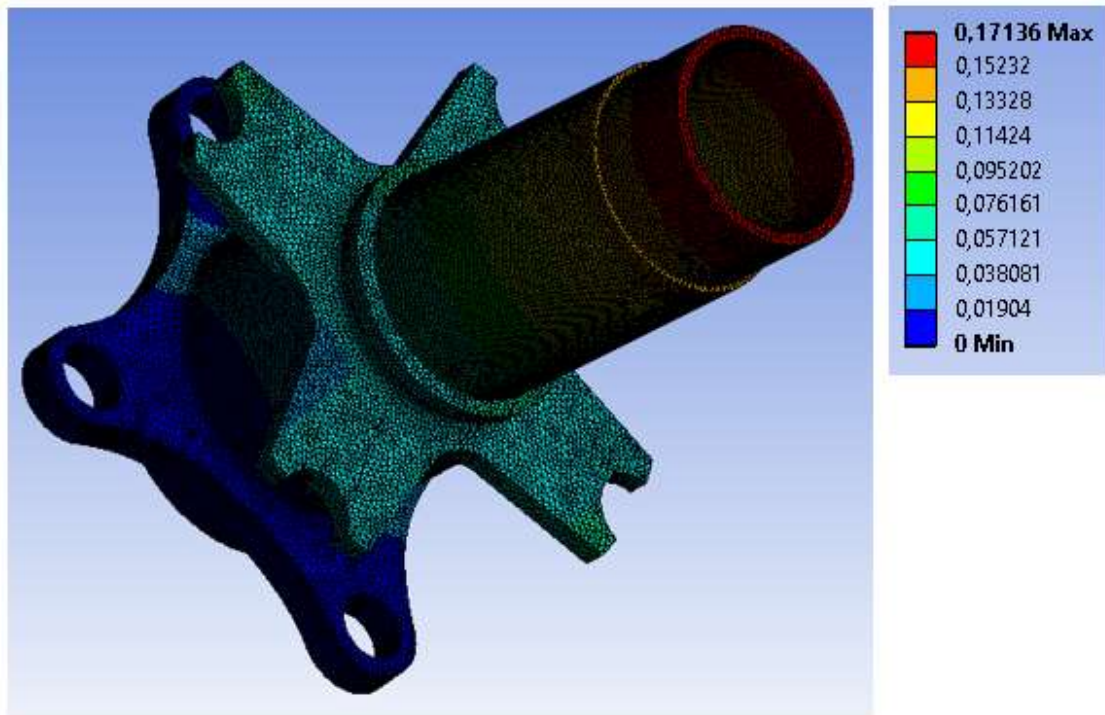


Ilustración 6.65 Deformación total, Paso por curva, Prototipo final, Buje delantero

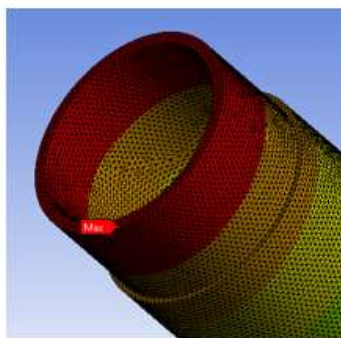


Ilustración 6.66 Detalle, Max. Tensión

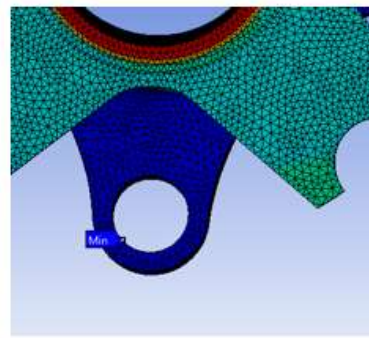


Ilustración 6.67 Detalle, Min. Tensión

Como se puede observar en las ilustraciones, el resultado de la simulación del caso de paso por curva es el siguiente: la deformación máxima es de aproximadamente 0,17mm, y se da en el extremo interior del buje. Este resultado tiene sentido, ya que la pieza tenderá a deformarse en aquellos lugares en los que nada se lo impida, que es el caso de un extremo libre.

6.4.2. Bujes traseros

Las situaciones que se van a simular en los bujes traseros son las mismas que se simularon previamente en los primeros prototipos. Es decir, las siguientes situaciones: frenada, paso por curva y aceleración. Las fuerzas que se simularán en cada uno de estos tres casos, que serán las mismas que en los primeros prototipos, se recogen en la siguiente tabla.

		x	y	z (dirección longitudinal)	y* (dirección tangencial)
Frenada	Transf. Pesos	-	1250 N	-	-
	Fuerza frenado	-	-	-	2000 N
Paso por curva	Transf. Pesos	-	1500 N	-	-
	Fuerza centrífuga	750 N	-	-	-
Aceleración	Transf. Pesos	-	-	1250 N	-
	Fuerza tracción	2000 N	-	-	-

Tabla 6.6 Fuerzas aplicadas en simulaciones, Prototipos finales, Bujes traseros

6.4.2.1. Frenada

La siguiente simulación corresponde a la situación de máximo frenado. Esta situación ha sido explicada detalladamente en los primeros prototipos.

- Tensión (promediada)
Los resultados de las tensiones promediadas se muestran a continuación.

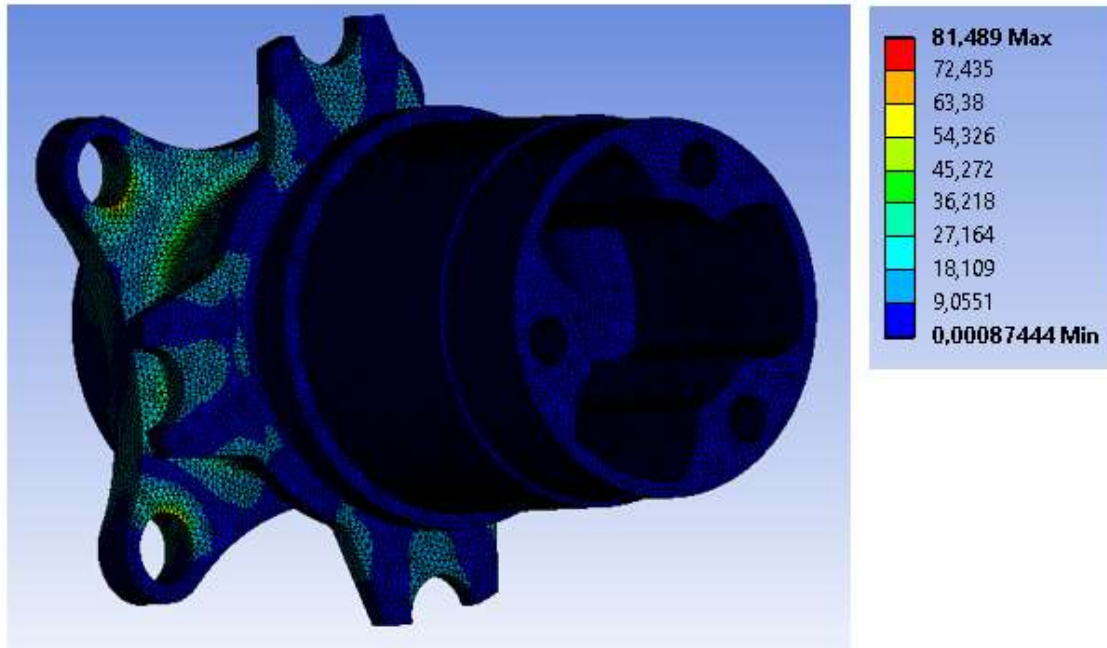


Ilustración 6.68 Tensión promediada, Frenada, Prototipo final, Buje trasero

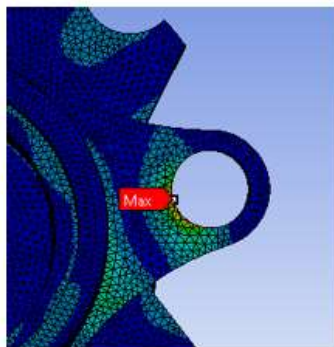


Ilustración 6.69 Detalle, Max. Tensión

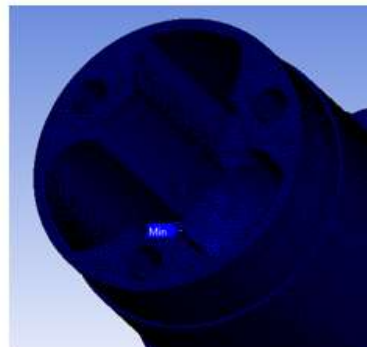


Ilustración 6.70 Detalle, Min. Tensión

- Tensión (no promediada)
Los resultados de las tensiones no promediadas se muestran a continuación.

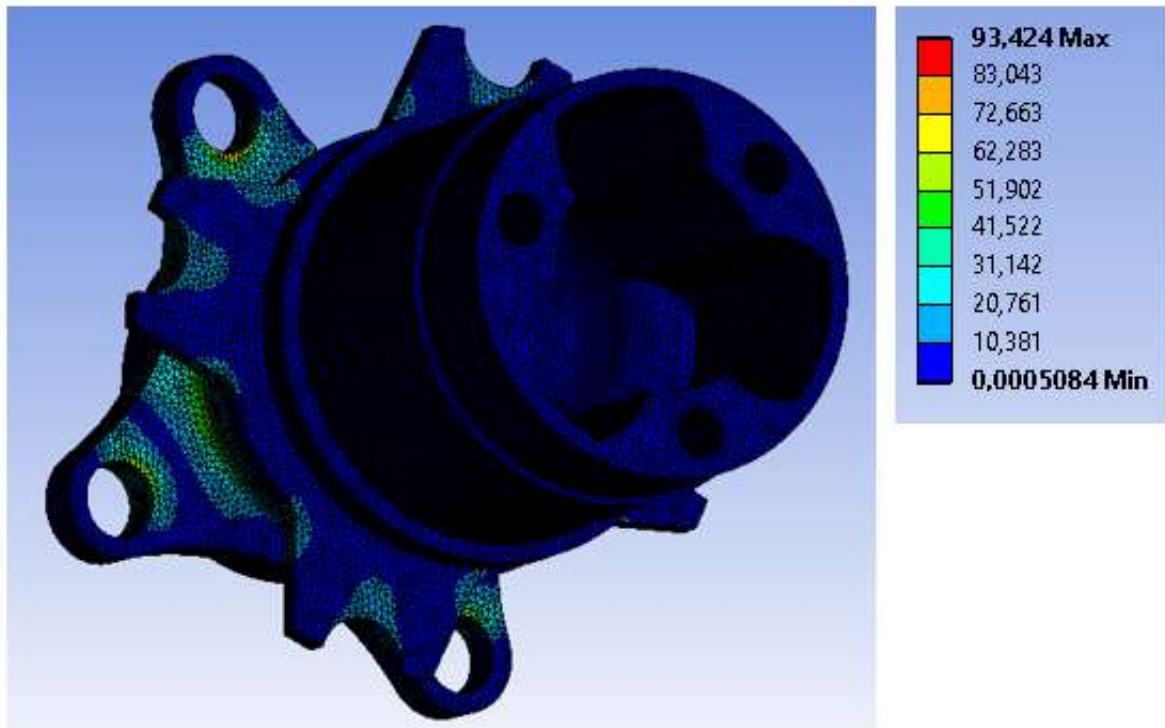


Ilustración 6.71 Tensión no promediada, Frenada, Prototipo final, Buje trasero

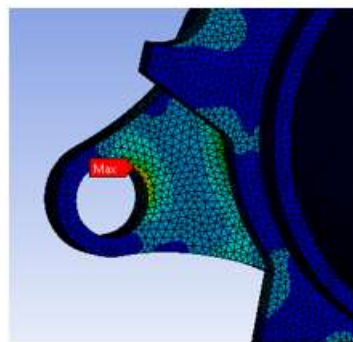


Ilustración 6.72 Detalle, Max. Tensión

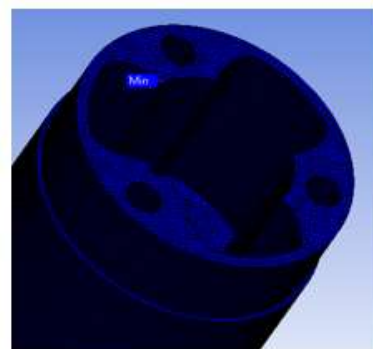


Ilustración 6.73 Detalle, Max. Tensión

Como se puede observar en las ilustraciones, los resultados de la simulación del caso de frenada son los siguientes: la tensión máxima promediada es de aproximadamente 81 MPa, y se da en una de las uniones del buje con la llanta; la tensión máxima no ponderada es de aproximadamente 93 MPa, y también se da en una de las uniones del buje con la llanta. Estos resultados tienen sentido, ya que la pieza sufrirá mayores tensiones en aquellos puntos que se encuentren fijados, sin poderse deformar.

- Deformación total
Los resultados de las deformaciones totales se muestran a continuación.

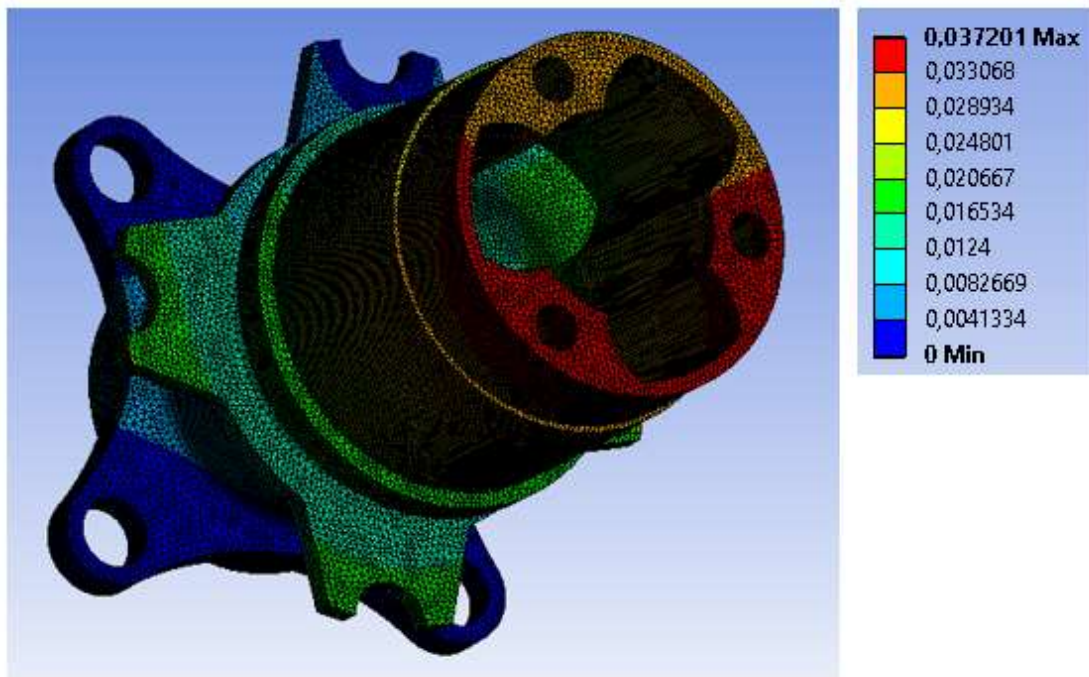


Ilustración 6.74 Deformación total, Frenada, Prototipo final, Buje trasero

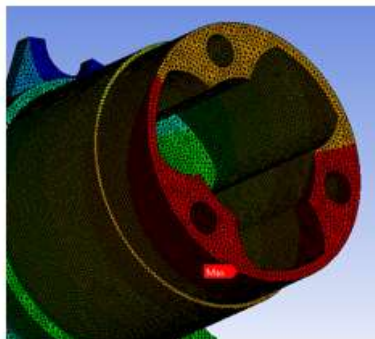


Ilustración 6.75 Detalle, Max. Tensión

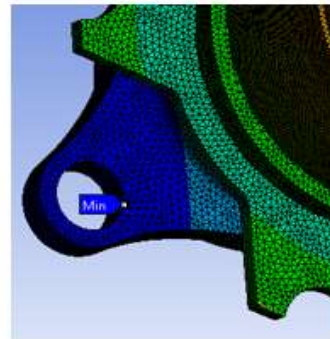


Ilustración 6.76 Detalle, Min. Tensión

Como se puede observar en las ilustraciones, el resultado de la simulación del caso de frenada es el siguiente: la deformación máxima es de aproximadamente 0,04mm, y se da en el extremo interior del buje. Este resultado tiene sentido, ya que la pieza tenderá a deformarse en aquellos lugares en los que nada se lo impida, que es el caso de un extremo libre.

6.4.2.2. Paso por curva

La siguiente simulación corresponde a la situación de paso por curva. Esta situación ha sido explicada detalladamente en los primeros prototipos.

- Tensión promediada
Los resultados de las tensiones promediadas se muestran a continuación.

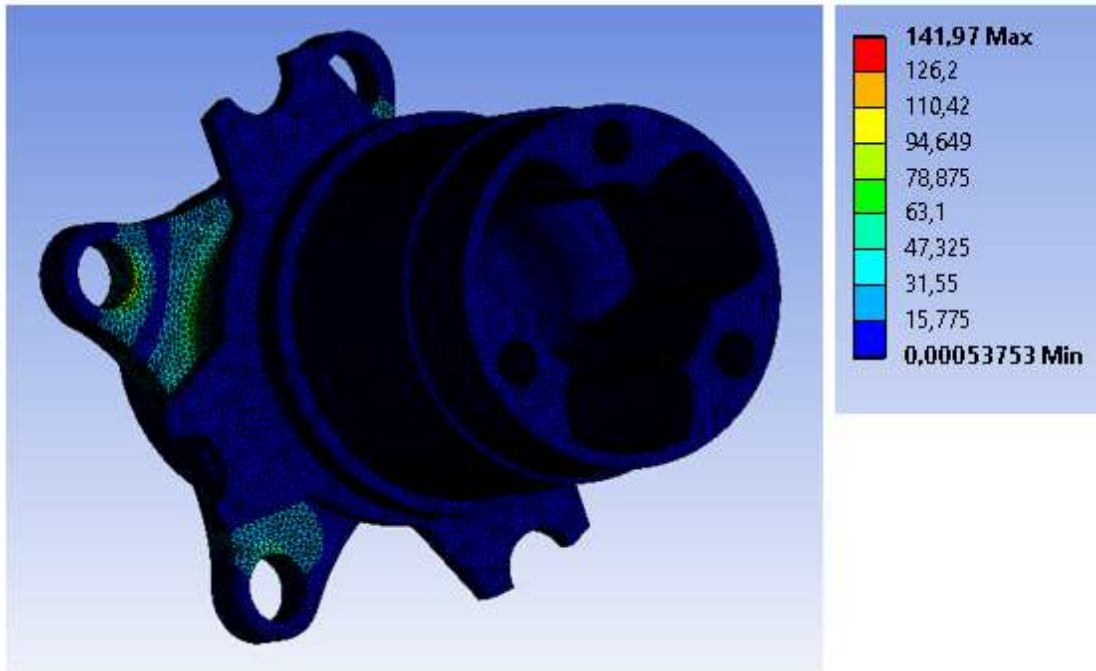


Ilustración 6.77 Tensión promediada, Paso por curva, Prototipo final, Buje trasero

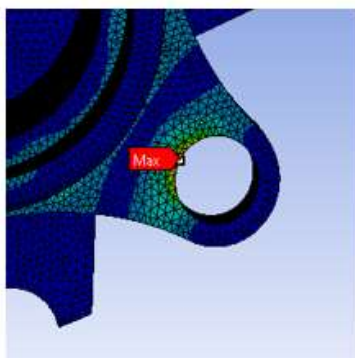


Ilustración 6.78 Detalle, Max. Tensión

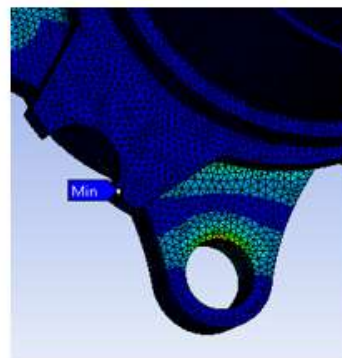


Ilustración 6.79 Detalle, Min. Tensión

- Tensión (no promediada)
Los resultados de las tensiones no promediadas se muestran a continuación.

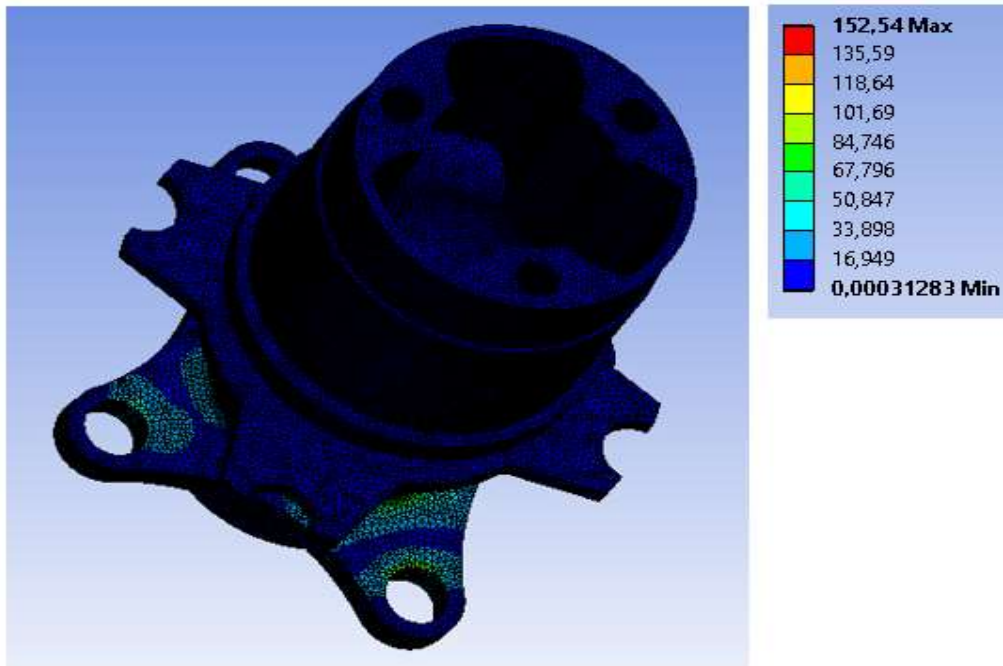


Ilustración 6.80 Tensión no promediada, Paso por curva, Prototipo final, Buje trasero

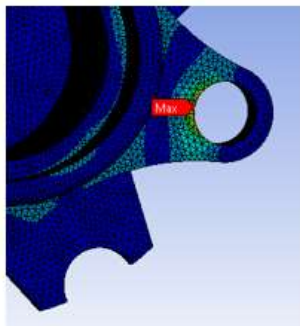


Ilustración 6.81 Detalle, Max. Tensión

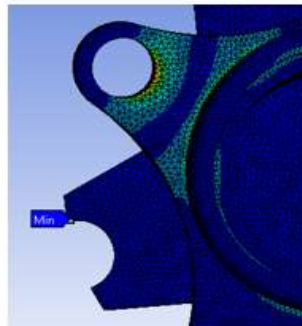


Ilustración 6.82 Detalle, Min. Tensión

Como se puede observar en las ilustraciones, los resultados de la simulación del caso de paso por curva son los siguientes: la tensión máxima promediada es de aproximadamente 142 MPa, y se da en una de las uniones del buje con la llanta; la tensión máxima no ponderada es de aproximadamente 153 MPa, y también se da en una de las uniones del buje con la llanta. Estos resultados tienen sentido, ya que la pieza sufrirá mayores tensiones en aquellos puntos que se encuentren fijados, sin poderse deformar.

- Deformación total
Los resultados de las deformaciones totales se muestran a continuación.

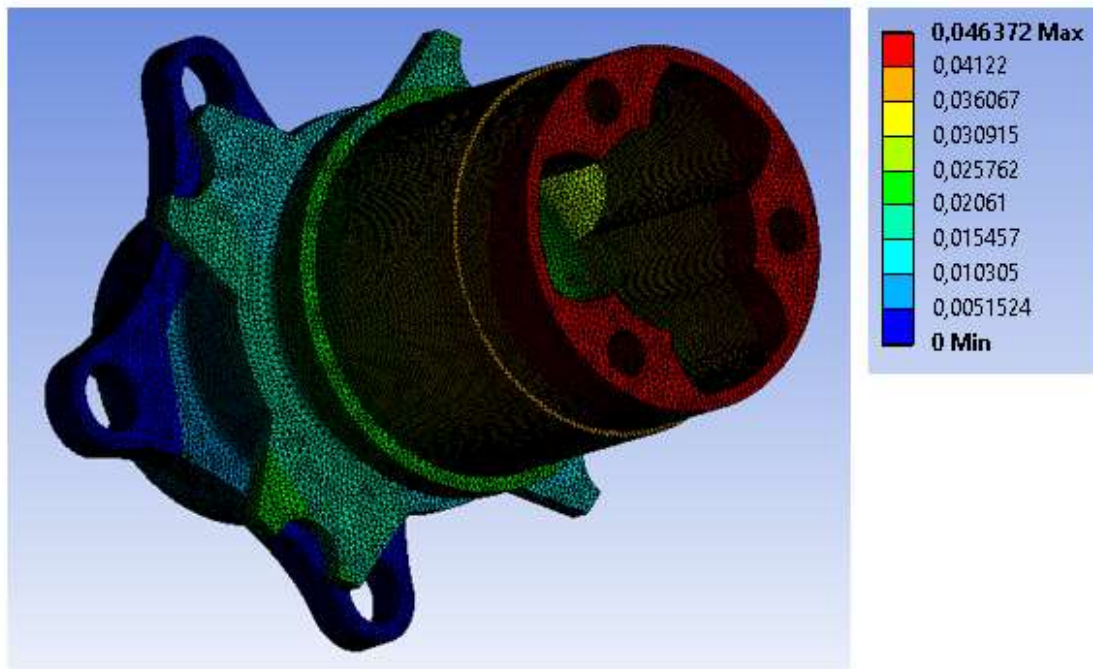


Ilustración 6.83 Deformación total, Paso por curva, Prototipo final, Buje trasero

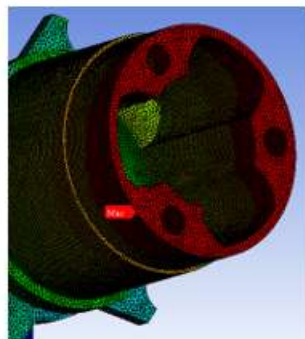


Ilustración 6.84 Detalle, Max. Deformación

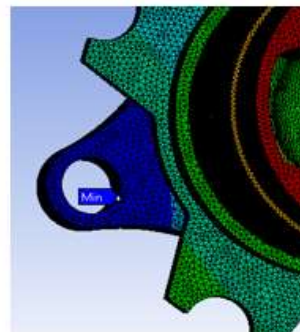


Ilustración 6.85 Detalle, Min. Deformación

Como se puede observar en las ilustraciones, el resultado de la simulación del caso de paso por curva es el siguiente: la deformación máxima es de aproximadamente 0,05mm, y se da en el extremo interior del buje. Este resultado tiene sentido, ya que la pieza tenderá a deformarse en aquellos lugares en los que nada se lo impida, que es el caso de un extremo libre.

6.4.2.3. Aceleración

La siguiente simulación corresponde a la situación de máxima aceleración. Esta situación ha sido explicada detalladamente en los primeros prototipos.

- Tensión (promediada)
Los resultados de las tensiones promediadas se muestran a continuación.

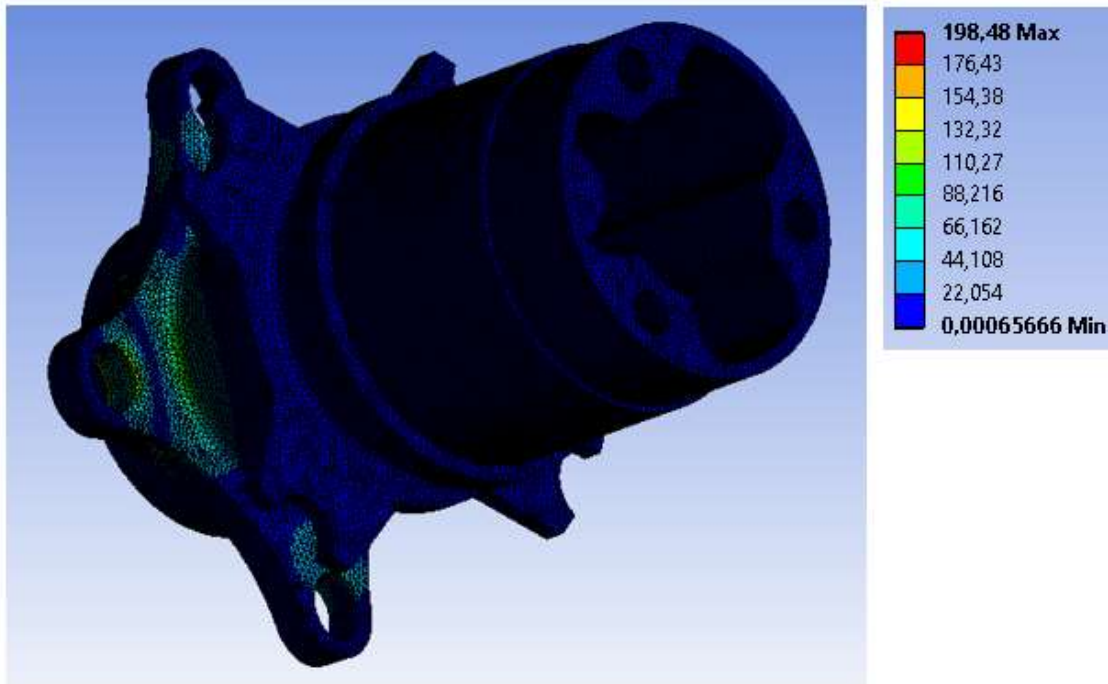


Ilustración 6.86 Tensión promediada, Aceleración, Prototipo final, Buje trasero

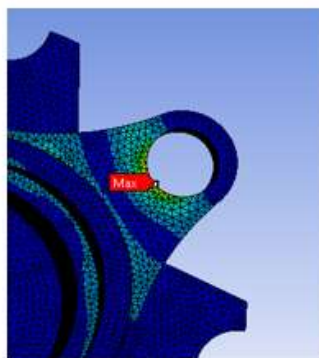


Ilustración 6.87 Detalle, Max. Tensión

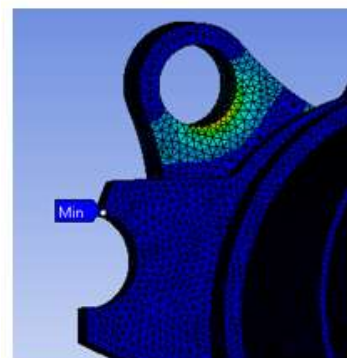


Ilustración 6.88 Detalle, Min. Tensión

- Tensión (no promediada)
Los resultados de las tensiones promediadas se muestran a continuación.

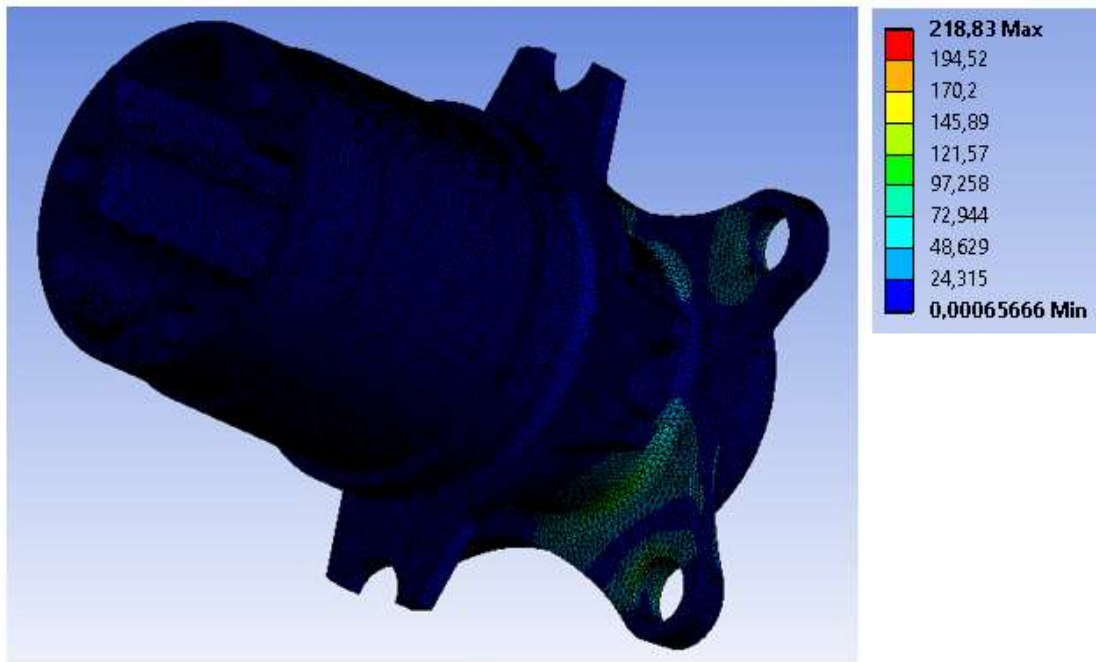


Ilustración 6.89 Tensión no promediada, Aceleración, Prototipo final, Paso por curva

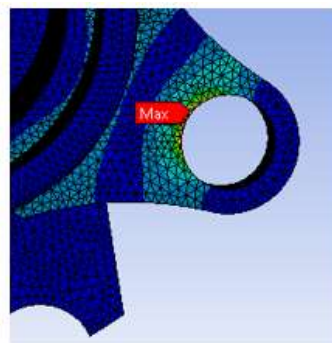


Ilustración 6.90 Detalle, Max. Tensión

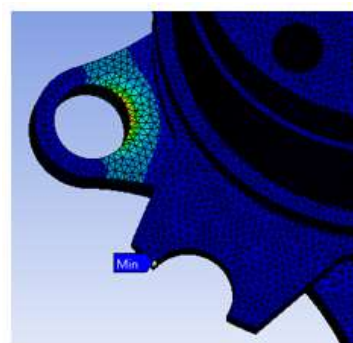


Ilustración 6.91 Detalle, Min. Tensión

Como se puede observar en las ilustraciones, los resultados de la simulación del caso de aceleración son los siguientes: la tensión máxima promediada es de aproximadamente 198 MPa, y se da en una de las uniones del buje con la llanta; la tensión máxima no ponderada es de aproximadamente 219 MPa, y también se da en una de las uniones del buje con la llanta. Estos resultados tienen sentido, ya que la pieza sufrirá mayores tensiones en aquellos puntos que se encuentren fijados, sin poderse deformar.

- Deformación total
Los resultados de las deformaciones totales se muestran a continuación.

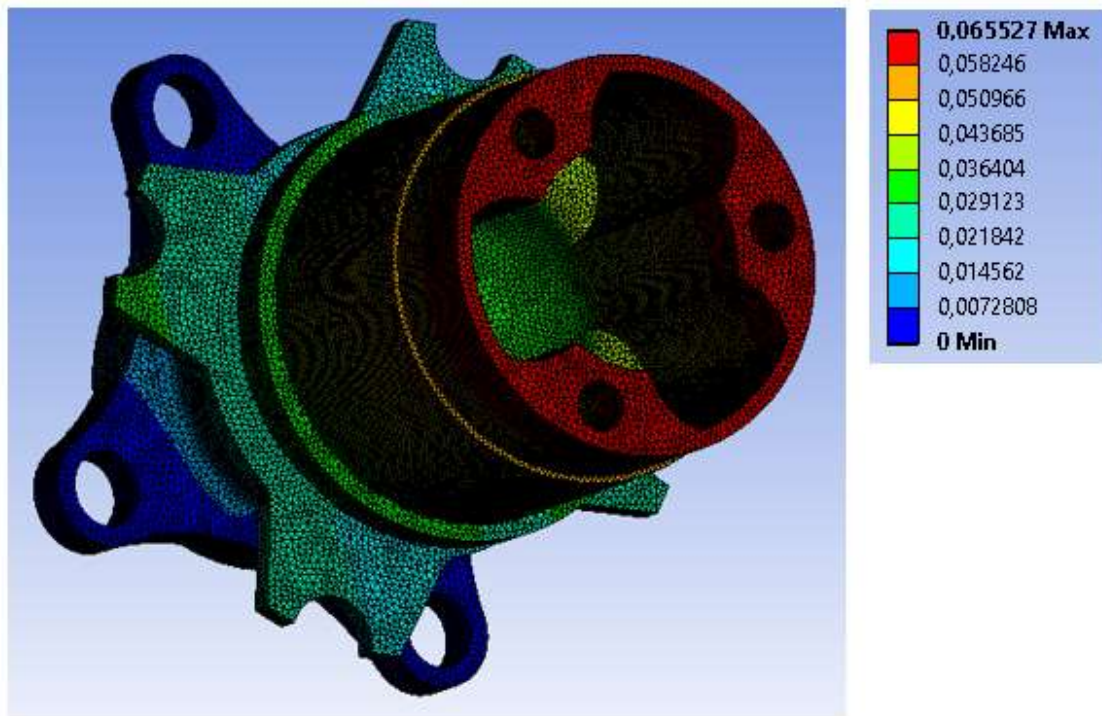


Ilustración 6.92 Deformación total, Aceleración, Prototipo final, Buje trasero

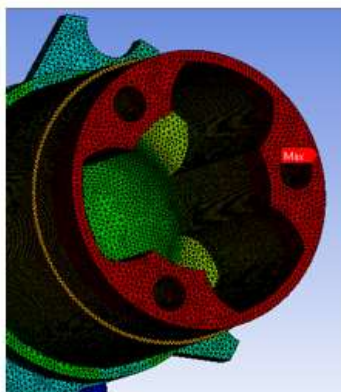


Ilustración 6.93 Detalle, Max. Deformación

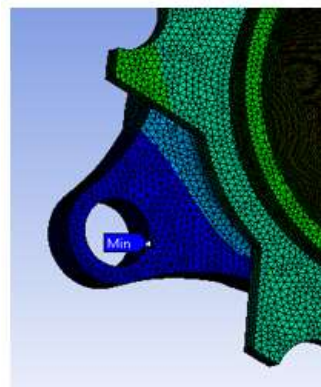


Ilustración 6.94 Detalle, Min. Deformación

Como se puede observar en las ilustraciones, el resultado de la simulación del caso de aceleración es el siguiente: la deformación máxima es de aproximadamente 0,07mm, y se da en el extremo interior del buje. Este resultado tiene sentido, ya que la pieza tenderá a deformarse en aquellos lugares en los que nada se lo impida, que es el caso de un extremo libre.

6.5. Conclusiones

Las tablas que se muestran a continuación, recogen las tensiones y deformaciones máximas que se han dado en las simulaciones.

Buje delantero			
	Tensión promediada [MPa]	Tensión no promediada [MPa]	Deformación total [mm]
Máxima	146,69	159,68	0,17136
Aplicada en	Unión con la llanta	Unión con la llanta	Extremo interior

Tabla 6.7 Resultados simulaciones, Bujes delanteros

Buje trasero			
	Tensión promediada [MPa]	Tensión no promediada [MPa]	Deformación total [mm]
Máxima	198,48	218,83	0,065527
Aplicada en	Unión con la llanta	Unión con la llanta	Extremo interior

Tabla 6.8 Resultados simulaciones, Bujes traseros

Como se puede apreciar en la primera gráfica, la máxima tensión que se genera en los bujes delanteros es de aproximadamente 160 MPa. Aunque es un valor elevado, se produce en una zona muy concreta, en la unión con la llanta. La gran mayoría de la pieza está sometida a tensiones mucho menores. Además, siendo el límite elástico del Aluminium, 7075, T6 aproximadamente 450 MPa, se seguiría teniendo un factor de seguridad prácticamente 3. Por otro lado, la máxima deformación que sufren los bujes delanteros es de aproximadamente 0,171 mm. Aunque es un valor elevado, se produce en una zona concreta, en el extremo interior, entendiéndose como interior el lado que más cerca está del coche. Se trata de una zona que no es conflictiva.

Como se puede apreciar en la segunda gráfica, la máxima tensión que se genera en los bujes traseros es de aproximadamente 220 MPa. Aunque es un valor elevado, se produce en una zona muy concreta, en la unión con la llanta. La gran mayoría de la pieza está sometida a tensiones mucho menores. Además, siendo el límite elástico del Acero al carbono aproximadamente 650 MPa, se seguiría teniendo un factor de seguridad prácticamente de 3. Por otro lado, la máxima deformación que sufren los bujes traseros es de aproximadamente 0,066 mm. Se produce en una zona concreta, en el extremo interior, entendiéndose como interior el lado que más cerca está del coche. No supondrá un problema para el mecanizado de la Polaris, ya que no se trata de un valor demasiado elevado.

Analizando los resultados de las simulaciones, se puede confirmar que se han diseñado correctamente los prototipos.

Capítulo 7: Fabricación y montaje

7.1. Fabricación

El proceso de fabricación elegido para los bujes ha sido el mecanizado.

Como se ha explicado detalladamente en el capítulo 5, los bujes delanteros se han fabricado en Aluminio, 7075, T6, y los bujes traseros se han fabricado en Acero al carbono.

Para la fabricación, las piezas han pasado por diferentes fases en las siguientes máquinas de CNC: torno y fresadora.

El control numérico computarizado (CNC) consiste en el uso de una computadora para controlar y monitorizar los movimientos de una máquina herramienta.

En la siguiente ilustración se muestra a partir de qué máquina se han conseguido las diferentes geometrías de las piezas. En verde las geometrías logradas a partir del torno, y en azul las geometrías logradas a partir de la fresadora.

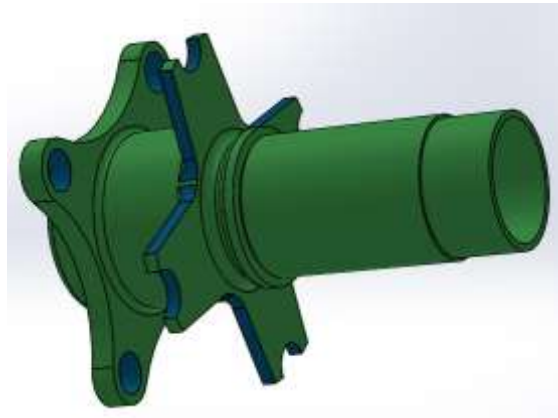


Ilustración 7.1 Fabricación, Buje delantero

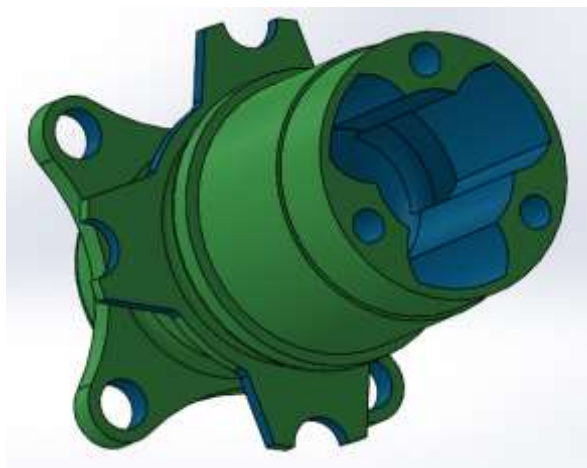


Ilustración 7.2 Fabricación, Buje trasero

El proceso de fabricación se encuentra detallado en el Anexo D.

7.2. Montaje

7.2.1. Unión con el disco de freno

Como se ha mencionado en el capítulo 2, los discos de freno son de tipo flotante y van soportados por unos elementos cilíndricos denominados Bobbens. Es decir, estos elementos suponen la unión entre el buje y el disco de freno. Se han utilizado cuatro para cada buje.

Los Bobbens no son simplemente cilindros, sino que constan de una pletina en uno de sus extremos y una ranura para insertar un circlip en el otro.

Un circlip, también conocido como anillo de seguridad, tiene como función principal sujetar o retener algún tipo de pieza. Consiste en un aro metálico semiflexible con extremos abiertos para poder ser encajados en una ranura mecanizada, de forma que permite la rotación de dicha pieza, pero evita su movimiento lateral.



Ilustración 7.3 Bobbens



Ilustración 7.4 Circlips

7.2.2. Unión con la llanta

La unión del buje con la llanta se ha realizado mediante cuatro tornillos M12x25 de cabeza hexagonal, con sus respectivas tuercas.



Ilustración 7.5 Unión Buje-Llanta

7.2.3. Rodamientos

Cada buje está montado sobre dos rodamientos separados una cierta distancia entre ellos para aportar mayor rigidez al conjunto.

Las pistas de los rodamientos fijan sus movimientos transversales. Para poder fijar también su movimiento longitudinal, además de la pared diseñada en el buje, hace falta un Hub Retainer.

El Hub Retainer consiste en una tuerca retenedora con una rosca interior. En este caso, se utilizará para fijar el rodamiento interior, entendiéndose como interior la parte más cercana al coche. Las tuercas retenedoras de los bujes delanteros, al ser más pequeños, serán M33, y las tuercas retenedoras de los bujes traseros, al ser más grandes, serán M63. Además, el Hub Retainer permite la correcta lubricación del conjunto.

Se aplicó nitrógeno líquido a los bujes para para su montaje sobre los rodamientos.



Ilustración 7.6 Rodamientos, Hub-Retainer, Buje delantero



Ilustración 7.7 Rodamientos, Hub-Retainer, Buje trasero

Bibliografía

- [1] William F. Miliken and Douglas L. Miliken – “Race Car Vehicle Dynamics”, SAE 1995
- [2] Manuel Alonso Alejos – Proyecto Fin de Grado, Tecnum Motorsport
- [3] Ignacio Granell Heredero -- Diseño de las manguetas de la suspensión para un prototipo de FSAE
- [4] Christian Andrés Caraguay Correa y Santiago Javier Caraguay Correa – Diseño y construcción del sistema de suspensión de un vehículo monoplace para la competencia Formula Student.
- [5] Carlos Martín Temprano – Diseño y fabricación de manguetas traseras para prototipo Formula Student
- [6] Elías Efler Herranz – Diseño de la suspensión trasera de un vehículo Formula Student
- [7] Daniel de Castro Graziano – Modelo de suspensión de vehículo monoplace mediante ADAMS/CAR. Propuesta de mejoras
- [8] Vicente Joaquín Castillo Garcés y Francisco Tomás Sánchez Marín – Sistema de dirección monoplace Formula Student
- [9] Rubén Magro Checa – Diseño y análisis de un elemento de suspensión por Finite Element Method (FEM)
- [10] Carlos Pulido Laparra – Diseño del sistema de suspensión para un vehículo de Formula Student
- [11] Antonio García Álvarez – Diseño de chasis para un vehículo FSAE
- [12] Antonio Álvarez González – Diseño del conjunto dirección-suspensión de un monoplace de Formula Student

<https://www.fsaeonline.com/>

<https://www.sae.org/attend/student-events/>

<http://www.icaispeedclub.com/la-asociacion/isc.html>

<https://www.pistonudos.com/reportajes/que-es-la-formula-student/>

<http://www.upmracing.es/9837/formula-student-spain-2016>

<http://www.multibody.net/teaching/dissertations/setup-optimization-for-the-fsae-car-mg07-12/>

<https://blog.daimler.com/en/2018/08/10/formula-student-racing-team-university-stuttgart/>

[FSAE Rules 2019 V1.pdf](#)

[Estudio%20y%20propuestas%20de%20mejora%20de%20la%20suspension%20de%20un%20vehiculo%20Formula%20Student.pdf](#)

<https://noticias.coches.com/consejos/tipos-de-suspensiones-ventajas-y-desventajas/154515>

<https://ingenierodesofa.wordpress.com/2016/04/10/aprendizaje-push-rod-y-pull-rod/>

<https://www.f1aldia.com/11219/suspensiones-push-rod-pull-rod/>

<http://www.innocar-parts.com/blog/2016/11/11/torsional-multilink-plataforma-mqb-vag/>

<https://especiales.autocosmos.com.ar/tecnologia/noticias/2013/08/27/cuales-son-las-suspensiones-mas-comunes>

<https://fsupv2017.webs.upv.es/es/formula-student-2/>

https://www.taringa.net/+autos_motos/alineacion-de-un-automovil-pasa-y-te-explico_un2j3

<http://www.aficionadosalamecanica.net/direccion-geometria.htm>

<https://rodamientos+6913+llu->

5k&rlz=1C1CHBF_esES859ES859&oq=r&aqs=chrome.1.69i59l2j35i39j69i60l2j69i61.3139j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8

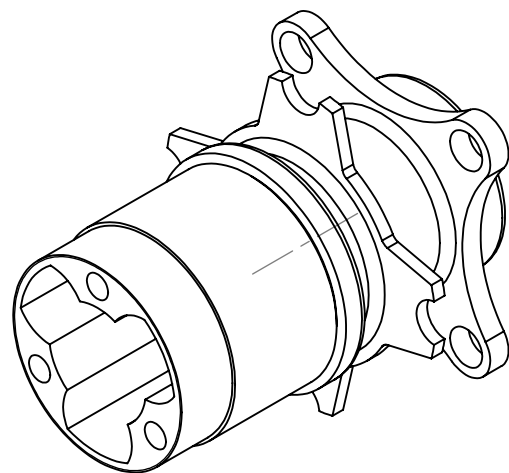
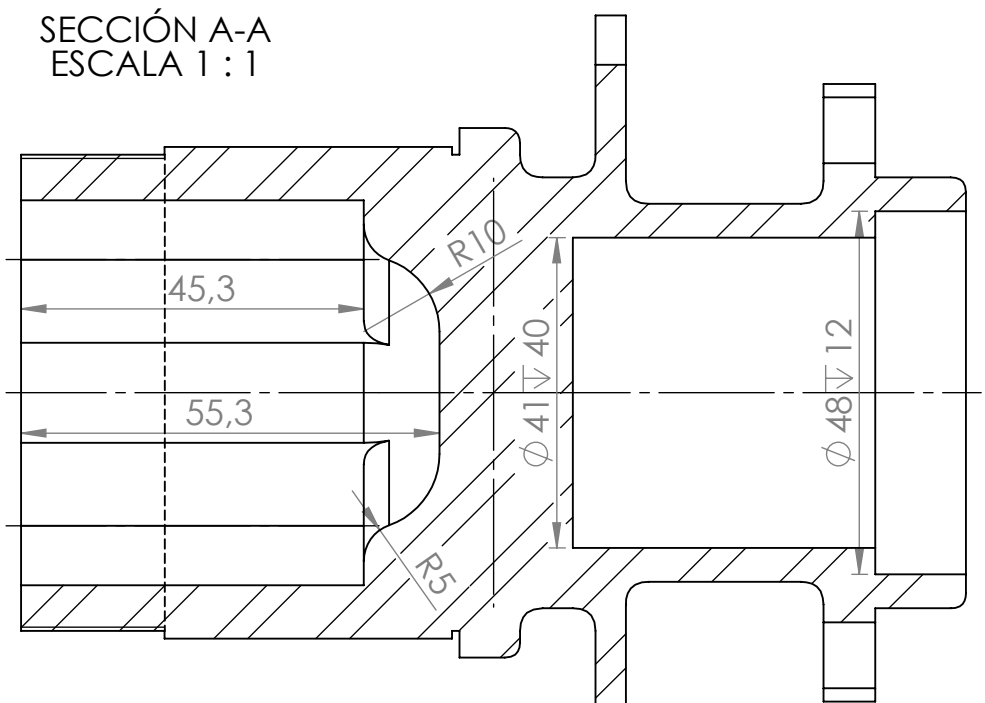
https://conergencia+y+divergencia+vehiculo&rlz=1C1CHBF_esES859ES859&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwi68qauuKjAhVK-

YUKHZucABQQ_AUIESgB&biw=1366&bih=625#imgrc=43h7t8Q4jOzRGM:

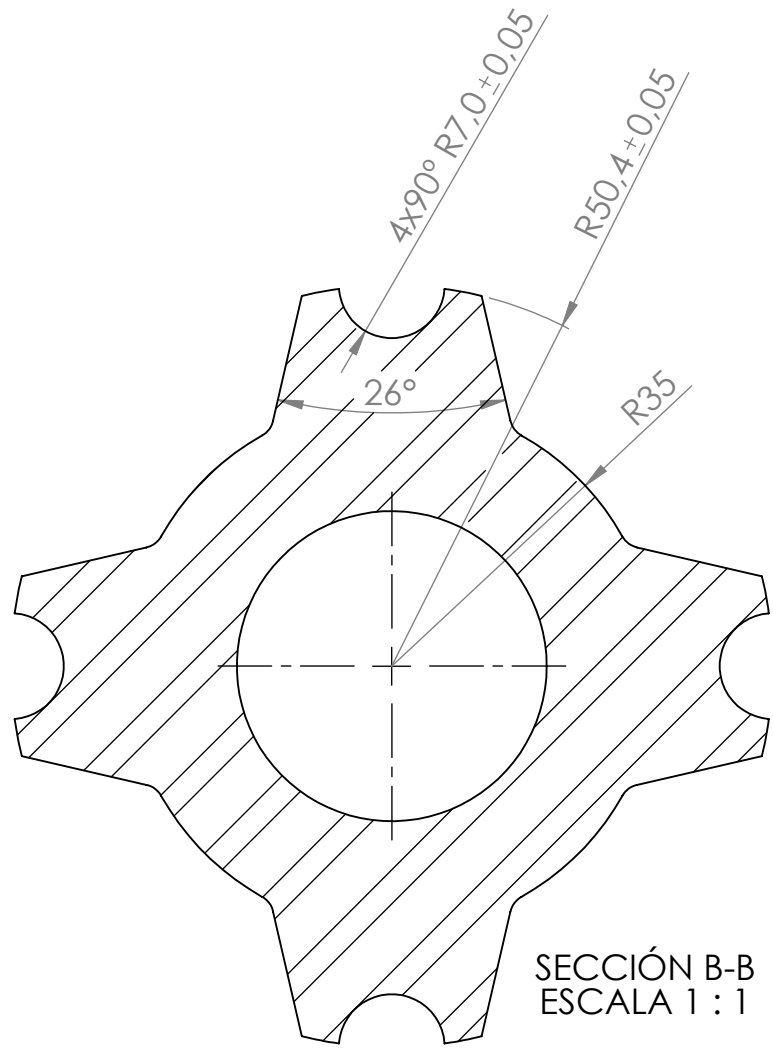
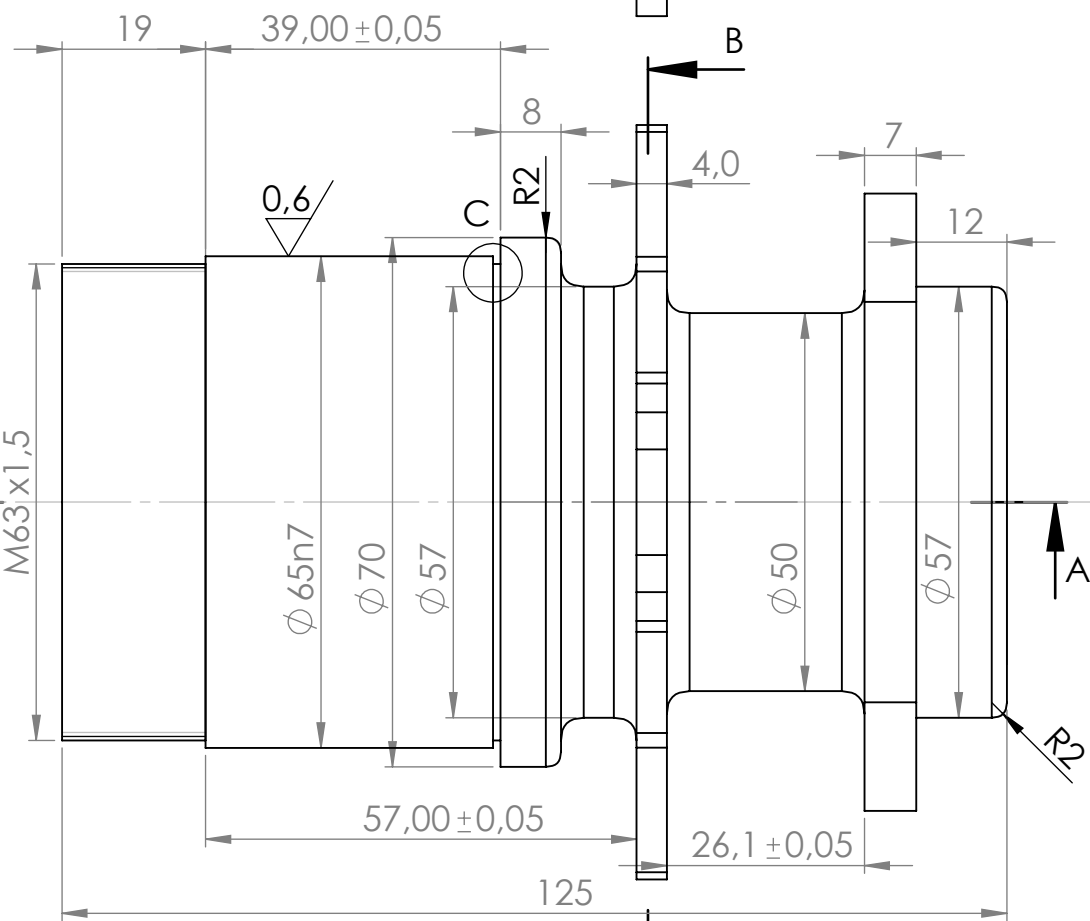
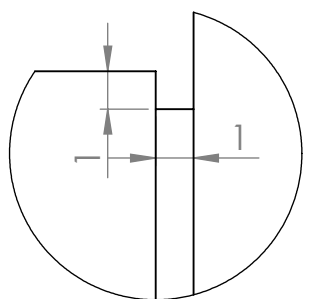
ANEXOS

ANEXO A: PLANOS

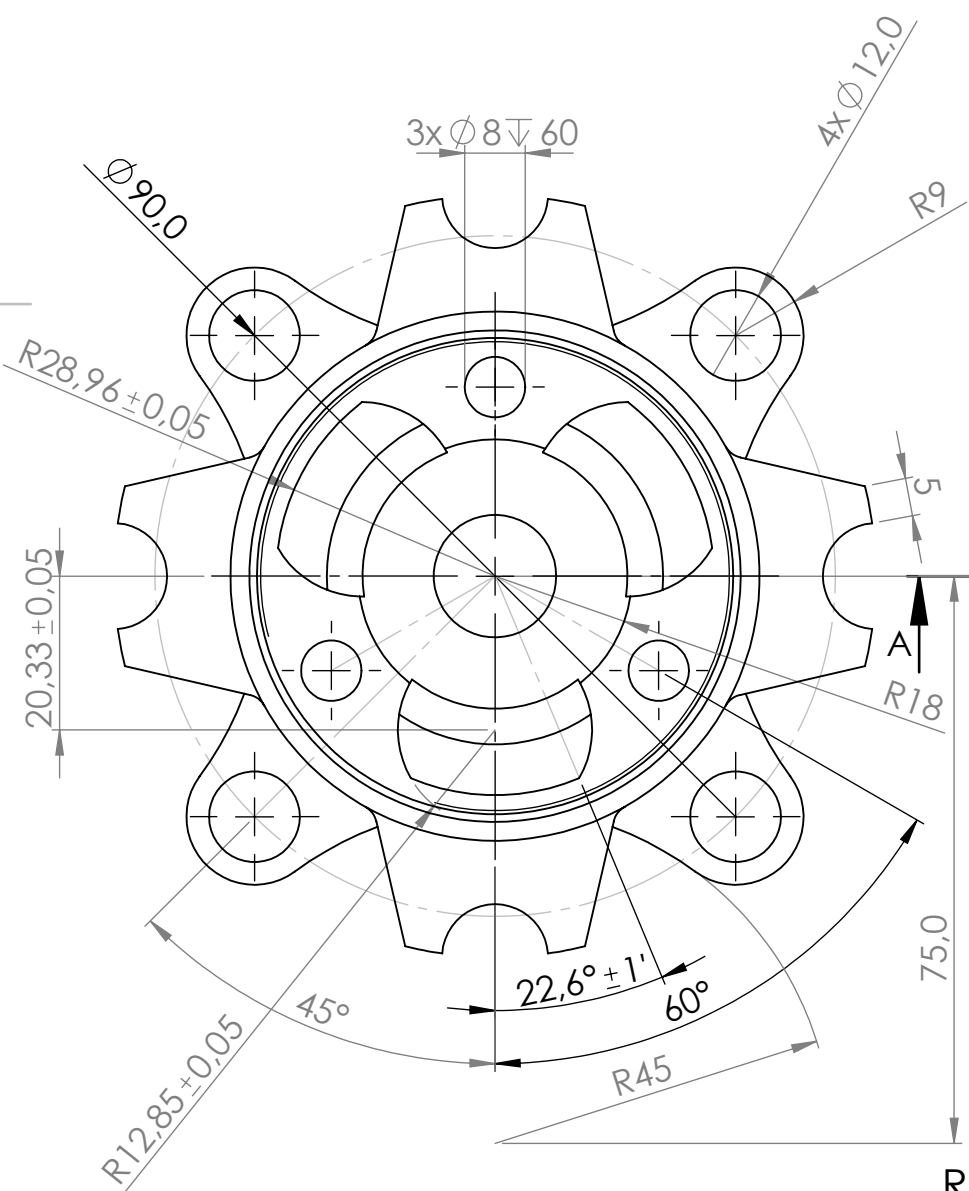
SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 1



DETALLE C
ESCALA 5 : 1



SECCIÓN B-B
ESCALA 1 : 1



Redondeos no acotados R3

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM			NORMA DE TOLERANCIA: UNE-EN 22768 m,k		DEPARTAMENTO: SUSPENSIONES	
DIBUJ. P.B.A			FIRMA		TÍTULO: Buje trasero	
VERIF. IAP			FECHA		REFERENCIA IFS: Z_03_412_K	
APROB.			13/02/19		MATERIAL - PESO (kg):	
ISO FORMULA STUDENT			ESCALA:		N.º DE DIBUJO	
					A3	

ANEXO B: ALUMINIUM, 7075, T6

General information

Designation

7075, wrought	
Condition	T6 (Solution heat-treated and artificially
UNS number	A97075
EN name	EN AW-7075 (EN AW-Al Zn5,5MgCu)
EN number	3.4365

Typical uses

Aircraft structures & other components, weapons, bolts, sporting

Composition overview

Compositional summary

Al87-91 / Zn5.1-6.1 / Mg2.1-2.9 / Cu1.2-2 / Cr0.18-0.28 (impurities: Fe<0.5, Si<0.4, Mn<0.3, Ti<0.2,

Material family	Metal
Base material	Al (Aluminum)

Composition detail (metals, ceramics and glasses)

Al (aluminum)	* 87,2	-	91,4	%
Cr (chromium)	0,18	-	0,28	%
Cu (copper)	1,2	-	2	%
Fe (iron)	0	-	0,5	%
Mg (magnesium)	2,1	-	2,9	%
Mn (manganese)	0	-	0,3	%
Si (silicon)	0	-	0,4	%
Ti (titanium)	0	-	0,2	%
Zn (zinc)	5,1	-	6,1	%
Other	0	-	0,15	%

Price

Price	* 3,37	-	3,7	EUR/kg
Price per unit volume	* 9,3e3	-	1,05e4	EUR/m ³

Physical properties

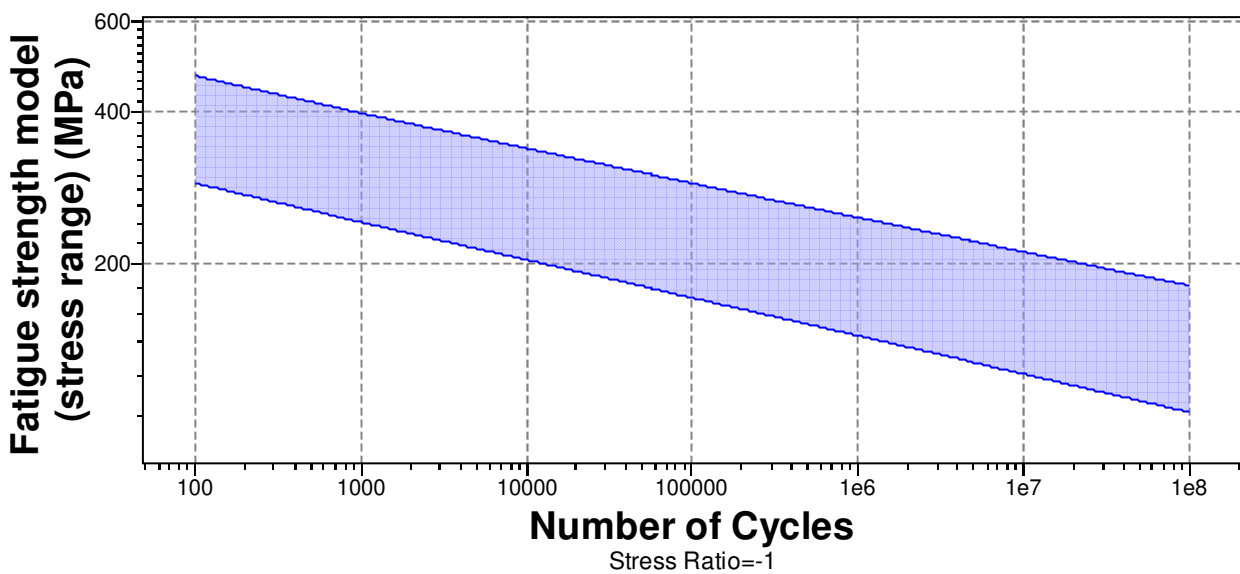
Density	2,77e3	-	2,83e3	kg/m ³
---------	--------	---	--------	-------------------

Mechanical properties

Young's modulus	69	-	76	GPa
Specific stiffness	24,6	-	27,2	MN.m/kg
Yield strength (elastic limit)	359	-	530	MPa
Tensile strength	434	-	580	MPa
Specific strength	128	-	189	kN.m/kg
Elongation	2	-	10	% strain
Compressive strength	* 393	-	530	MPa

Flexural modulus	* 69	- 76	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	359	- 530	MPa
Shear modulus	26	- 28	GPa
Bulk modulus	67	- 74	GPa
Poisson's ratio	0,325	- 0,335	
Shape factor	16		
Hardness - Vickers	152	- 168	HV
Hardness - Brinell	145	- 165	HB
Elastic stored energy (springs)	917	- 1,88e3	kJ/m ³
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	152	- 168	MPa
Fatigue strength model (stress range)	121	- 211	MPa

[Parameters:](#) Stress Ratio = -1, Number of Cycles = 1e7cycles



Impact & fracture properties

Fracture toughness	26,6	- 26,8	MPa.m ^{0.5}
Toughness (G)	9,38	- 10,3	kJ/m ²

Thermal properties

Melting point	475	- 635	°C
Maximum service temperature	80	- 100	°C
Minimum service temperature	-273		°C
Thermal conductivity	131	- 137	W/m.°C
Specific heat capacity	913	- 979	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	22,9	- 24,1	µstrain/°C
Thermal shock resistance	210	- 313	°C
Thermal distortion resistance	* 5,51	- 5,9	MW/m
Latent heat of fusion	384	- 393	kJ/kg

Electrical properties

Electrical resistivity	5,1	-	5,3	μohm.cm
Electrical conductivity	32,5	-	33,8	%IACS
Galvanic potential	* -0,78	-	-0,7	V

Magnetic properties

Magnetic type	Non-magnetic
---------------	--------------

Optical, aesthetic and acoustic properties

Transparency	Opaque
Acoustic velocity	4,96e3 - 5,21e3 m/s
Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 1e-4 - 0,002

Healthcare & food

Food contact	Yes
--------------	-----

Notes

Not valid for use in France and Italy, as material composition fails both French and Italian law on Aluminum for food contact applications.

Restricted substances risk indicators

RoHS (EU) compliant grades?	✓
REACH Candidate List indicator (0-1, 1 = high risk)	0
SIN List indicator (0-1, 1 = high risk)	0

Critical materials risk

Contains >5wt% critical elements?	No
-----------------------------------	----

Processing properties

Metal casting	Unsuitable
Metal cold forming	Acceptable
Metal hot forming	Excellent
Metal press forming	Acceptable
Metal deep drawing	Acceptable
Machining speed	76,2 m/min
Weldability	Unsuitable

Durability

Water (fresh)	Excellent
Water (salt)	Acceptable
Weak acids	Excellent
Strong acids	Excellent
Weak alkalis	Acceptable
Strong alkalis	Unacceptable
Organic solvents	Excellent
Oxidation at 500C	Unacceptable
UV radiation (sunlight)	Excellent
Galling resistance (adhesive wear)	Limited use

Notes

Aluminum alloys perform poorly when self-mated but can be processed without galling when mated with steels.

Flammability	Non-flammable
--------------	---------------

Corrosion resistance of metals

Stress corrosion cracking	Highly susceptible
Note	Rated in chloride; Other susceptible environments: Halide, water

Primary production energy, CO2 and water

Embodied energy, primary production	* 184	-	203	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	* 12,5	-	13,8	kg/kg
Water usage	* 1,08e3	-	1,19e3	l/kg

Processing energy, CO2 footprint & water

Roll forming, forging energy	* 10,6	-	11,7	MJ/kg
Roll forming, forging CO2	* 0,796	-	0,879	kg/kg
Roll forming, forging water	* 6,09	-	9,13	l/kg
Extrusion, foil rolling energy	* 20,9	-	23,1	MJ/kg
Extrusion, foil rolling CO2	* 1,57	-	1,74	kg/kg
Extrusion, foil rolling water	* 10,5	-	15,8	l/kg
Wire drawing energy	* 77,7	-	85,9	MJ/kg
Wire drawing CO2	* 5,83	-	6,44	kg/kg
Wire drawing water	* 29,3	-	43,9	l/kg
Metal powder forming energy	* 20,7	-	22,9	MJ/kg
Metal powder forming CO2	* 1,66	-	1,83	kg/kg
Metal powder forming water	* 22,6	-	33,9	l/kg
Vaporization energy	* 1,55e4	-	1,71e4	MJ/kg
Vaporization CO2	* 1,16e3	-	1,28e3	kg/kg
Vaporization water	* 6,46e3	-	9,69e3	l/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	* 2,02	-	2,24	MJ/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	* 0,152	-	0,168	kg/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	* 16	-	17,6	MJ/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	* 1,2	-	1,32	kg/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	* 31,4	-	34,8	MJ/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 2,36	-	2,61	kg/kg
Non-conventional machining energy (per unit wt removed)	* 155	-	171	MJ/kg
Non-conventional machining CO2 (per unit wt removed)	* 11,6	-	12,8	kg/kg

Recycling and end of life

Recycle	✓
Embodied energy, recycling	* 31,6 - 34,9 MJ/kg
CO2 footprint, recycling	* 2,48 - 2,74 kg/kg
Recycle fraction in current supply	40,5 - 44,7 %
Downcycle	✓
Combust for energy recovery	✗

Landfill	✓
Biodegrade	✗

Possible substitutes for principal component

Copper can replace aluminum in electrical applications; magnesium, titanium, and steel can substitute for aluminum in structural and ground transportation uses. Composites, wood, and steel can substitute for aluminum in construction. Glass, plastics, paper, and steel can substitute for aluminum in packaging.

Geo-economic data for principal component

Principal component	Aluminum			
Typical exploited ore grade	30,4	-	33,6	%
Minimum economic ore grade	25	-	39	%
Abundance in Earth's crust	8,23e4	-	8,41e4	ppm
Abundance in seawater	5e-4	-	0,005	ppm
Annual world production, principal component	4,73e7			tonne/yr
Reserves, principal component	2,8e10			tonne

Main mining areas (metric tonnes per year)

- Argentina, 460e3
- Australia, 1.75e6
- Bahrain, 900e3
- Brazil, 1.33e6
- Canada, 2.9e6
- China, 21.5e6
- Germany, 400e3
- Iceland, 825e3
- India, 1.7e6
- Mozambique, 560e3
- Norway, 1.2e6
- Qatar, 600e3
- Russia, 3.95e6
- South Africa, 820e3
- United Arab Emirates, 1.8e6
- United States, 1.95e6
- Other countries, 4.65e6

Notes

Other notes

Prices of Aluminum alloys fluctuate greatly and are dependent on batch size, unit size, forming methods, etc.

Standards with similar compositions

- Australia:
7075 to AS 1865, 7075 to AS 2848.1
- Austria:
AlZnMgCu1.5 to ONORM M3430
- Canada:
0.7075 to CSA HA.4, 0.7075 to CSA HA.5, 0.7075 to CSA HA.7, 0.7075 to CSA HA.8, 7075Alclad to CSA HA.4
- Europe:
EN AW-7075 to CEN EN 573-3
- France:
7075 to NF A50-411, 7075 to NF A50-451
- Germany:
3.4365/AlZnMgCu1.5 to DIN 1725-1
- India:
76528 to IS
- International:
AlZn5.5MgCu to ISO 209-1
- Japan:
A7075BD to JIS H4040, A7075BE to JIS H4040, A7075FD to JIS H4140, A7075FH to JIS H4140, A7075P to JIS H4000, A7075S to JIS H4100, A7075TD to JIS H4080, A7075TE to JIS H4080
- Norway:
17411 to NS 17411
- UK:
2L.88 to BS 2L.88
- USA:
7075, 7075 to ASTM B209M, 7075 to ASTM B210M, 7075 to ASTM B211M, 7075 to ASTM B221M, 7075 to ASTM B241M, 7075 to ASTM B247M, 7075 to ASTM B316/B316M, UNS A97075
- Venezuela:
7075 to COPANT 862
- Yugoslavia:
3.7553.00/AlZn5MgCu1.5 to JUS C.C2.100
- Tradenames:
7175, ALCOA 7075, BAW 7075, PERUNAL-215

Links

ProcessUniverse

Producers

Reference

Shape

ANEXO C: COST REPORT

University	Universidad Pontificia de Comillas, ICAI	
System	Wheels, Wheel Bearings and Tires - WT	FileLink1
Assembly	Front Hubs	FileLink2
Part	Front Hub	FileLink3
P/N Base	Z_03_501_A	
Suffix	AA	
Details	Main part of the assembly	

Car # E19

FileLink1
FileLink2
FileLink3

Part Cost	\$ 53,77
Qty	1
Extended Cost	\$ 53,77

ItemOrder	Material	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Area Name	Area	Length	Density	Quantity	Sub Total
10	Aluminium, Premium	Raw material	\$ 4,20	2,8346	kg			Round area, 100mm diameter	0,00780	0,134	2.712,00	1,00E+00	\$ 11,91
Sub Total													\$ 11,91

ItemOrder	Process	Use	UnitCost	Unit	Quantity	Multiplier	Mult. Val.	Sub Total
10	Machining Setup, Install and Remove		\$ 1,30	Unit	1	1	1	\$ 1,30
20	Machining	Turning	\$ 0,04	cm^3	715,9275	Material - Aluminium	1	\$ 28,64
30	Machining Setup, Change		\$ 0,65	Unit	1		1	\$ 0,65
40	Machining	Turning	\$ 0,04	cm^3	143,1855	Material - Aluminium	1	\$ 5,73
50	Machining Setup, Install and Remove		\$ 0,65	Unit	1		1	\$ 0,65
60	Machining	Milling	\$ 0,04	cm^3	94,9797	Material - Aluminium	1	\$ 3,80
70	Machining Setup, Change		\$ 0,65	Unit	1		1	\$ 0,65
80	Machining	Milling	\$ 0,04	cm^3	0,4773	Material - Aluminium	1	\$ 0,02
90	Threading, Internal (machining)	For wheel studs	\$ 0,10	cm	2,8	Material - Aluminium	1	\$ 0,28
100	Threading, External (machining)	For locknuts	\$ 0,10	cm	1,5	Material - Aluminium	1	\$ 0,15

Sub Total 41,86

University	Universidad Pontificia de Comillas, ICAI	
System	Wheels, Wheel Bearings and Tires - WT	FileLink1
Assembly	Rear Hubs	FileLink2
Part	Rear Hub	FileLink3
P/N Base	Z_03_502_A	
Suffix	AA	
Details	Main part of the assembly	

Car # E19

Part Cost \$ 139,63

Qty 1

FileLink1

Extended Cost \$ 139,63

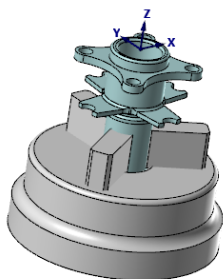
FileLink2

FileLink3

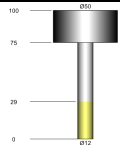
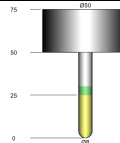
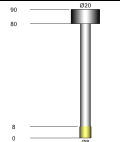
ItemOrder	Material	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Area Name	Area	Length	Density	Quantity	Sub Total
10	Steel, Mild	Raw material	\$ 2,25	8,4966	kg			Round Area, 105mm diameter	0,00866	0,125	7.850,00	1,00E+00	\$ 19,12
Sub Total													\$ 19,12

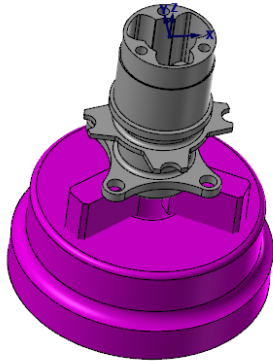
ItemOrder	Process	Use	UnitCost	Unit	Quantity	Multiplier	Mult. Val.	Sub Total
10	Machining Setup, Install and Remove		\$ 1,30	Unit	1		1	\$ 1,30
20	Machining	Turning	\$ 0,04	cm^3	646,9839	Material - Steel	3	\$ 77,64
30	Machining Setup, Change		\$ 0,65	Unit	1		1	\$ 0,65
40	Machining	Turning	\$ 0,04	cm^3	131,9925	Material - Steel	3	\$ 15,84
50	Machining Setup, Install and Remove		\$ 0,65	Unit	1		1	\$ 0,65
60	Machining	Milling	\$ 0,04	cm^3	43,5575	Material - Steel	3	\$ 5,23
70	Machining Setup, Change		\$ 0,65	Unit	1		1	\$ 0,65
80	Machining	Milling	\$ 0,04	cm^3	0,43997	Material - Steel	3	\$ 0,05
90	Threading, Internal (machining)	For wheel studs	\$ 0,10	cm	2,8	Material - Steel	3	\$ 0,84
100	Threading, External (machining)	For locknut	\$ 0,10	cm	1,9	Material - Steel	3	\$ 0,57
110	Mill-Form Cutter	For Polaris machining	\$ 0,10	cm^3	56,9759	Material - Steel	3	\$ 17,09
Sub Total								120,51

ANEXO D: PROCESO DE FABRICACIÓN

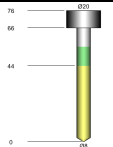
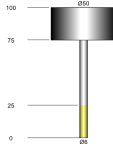
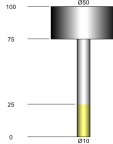
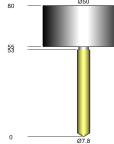


MC-Filename	Z_03_411_M.mcam
Full MC-Filename	E:\Talleres Berruezo\TEYDE\TEY-735 F1\DOCUMENTACION TEY-735-19 (1)\Partida 1 ISC Formula student 1\Z_03_411_M BUJE DELANTERO\Z_03_411_M.mcam

TI #	TI D#	TI name	TI BMP	Cycle time	TI diam.	Assembly name	Coolant	Feedrate XY	Feedrate Z-	Feedrate Z+	Holder (new)	Holder (old)	Holder length	Insert	Spindle speed	TI chuck	TI corner rad	TI Cutlength	TI flutes	TI L#	TI length	TI manufactor	TI shldr length	TI type	Z-Max	Z-Min
1	1	FRESA 12 KENCY ABDE1200A3AS		0:20:27	12.0		Taladrina externa	100.0	800.0	2000.0	Default Holder	Default Holder	25.0		4500		0.0	29.0	4	1	75.0		29.0	Fresa plana 1	5.0	-50.0
3	3	FRESA ESFERICA 8		0:10:56	8.0			3000.0	3000.0	3000.0	Imported Holder	Imported Holder	25.0		7000		4.0	25.0	4	3	50.0		30.0	Fresa esférica 2	5.0	-18.037
2	2	FRESA 8 AL MANGO REBAJADO		1:00:03	8.0		Taladrina externa	400.0	400.0	2000.0	Imported Holder	Imported Holder	10.0		5000		0.0	8.0	4	2	80.0		8.0	Fresa plana 1	5.0	-16.5



MC-Filename	Z_03_412_K.mcam
Full MC-Filename	E:\Talleres Berruezo\TEYDE\TEY-735 F1\DOCUMENTACION TEY-735-19 (1)\Partida 1 ISC Formula student 1\Z_03_412_K BUJE TRASERO\Z_03_412_K.mcam

TI #	TI D#	TI name	TI BMP	Cycle time	TI diam.	Assembly name	Coolant	Feedrate XY	Feedrate Z-	Feedrate Z+	Holder (new)	Holder (old)	Holder length	Insert	Spindle speed	TI chuck	TI corner rad	TI Cutlength	TI flutes	TI L#	TI length	TI manufacturer	TI shldr length	TI type	Z-Max	Z-Min
4	4	BROCA 8		0:03:04	8.0		Taladrina externa	60.0	0.001	0.001	Imported Holder	Imported Holder	10.0		1250		0.0	44.0	2	4	66.0		55.0	Taladrado	5.0	-60.0
2	2	FRESA 6 WNT 50965061		1:34:59	6.0		Taladrina externa	400.0	400.0	400.0	Default Holder	Default Holder	25.0		6000		0.0	25.0	4	2	75.0		25.0	Fresa plana 1	5.0	-45.3
1	1	PORTA 10 TURBO TUNGALOY		0:21:25	10.0			3060.0	3060.0	3060.0	Default Holder	Default Holder	25.0		3820		0.0	25.0	4	1	75.0		25.0	Fresa plana 1	5.0	-45.3
3	3	BROCA ESPECIAL KENCY 7.8 B0420078 HIERRO		0:00:56	7.8		Taladrina externa	149.0	149.0	149.0	Default Holder	Default Holder	25.0		1632		0.0	53.0	2	3	55.0		53.0	Taladrado	5.0	-45.0