



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis, diseño y fabricación de componentes para aplicaciones de transporte usando optimización topológica

Autor: **Valeria Ortiz Delgado**

Director: **Mariano Jiménez Calzado**

Madrid

Julio de 2025

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

Análisis, diseño y fabricación de componentes para aplicaciones de transporte usando optimización topológica

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico **2024-2025** 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.: **Valeria Ortiz Delgado**

Fecha: 23/ 06/ 2025

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: **Mariano Jiménez Calzado**

Fecha: 23/ 06/ 2025



ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis, diseño y fabricación de componentes para aplicaciones de transporte usando optimización topológica

Autor: **Valeria Ortiz Delgado**

Director: **Mariano Jiménez Calzado**

Madrid

Julio de 2025

Agradecimientos:

A mi director de proyecto, Mariano Jiménez Calzado, por haberme asistido y guiado en el proyecto, por su disposición para facilitarme la información que he necesitado para el desarrollo del trabajo, y por su implicación e interés en mis progresos.

A la profesora Silvia Fernández Villamarín, por haberme ayudado con los *Softwares* Solid Edge y VX de Creaform, por haber ofrecido nuevas líneas de pensamiento y replanteamiento para algunas etapas del trabajo, y por haber atendido a mis dudas y preguntas durante el desarrollo del proyecto.

A mi familia, por haberme apoyado durante toda la carrera y por haber creído siempre que podía lograr mis objetivos.

Análisis, diseño y fabricación de componentes para aplicaciones de transporte usando optimización topológica

Autor: Ortiz Delgado, Valeria

Director: Jiménez Calzado, Mariano

Entidad colaboradora: Universidad Pontificia Comillas ICAI

RESUMEN DEL PROYECTO:

En este Trabajo Fin de Grado se han analizado los comportamientos de un componente de un vehículo turismo frente a casos de cargas límites, y se han realizado reducciones de masa en la misma de acuerdo a los resultados de los análisis con el fin de obtener piezas mucho más ligeras, seguras e igualmente funcionales en la vida útil del vehículo.

Este proceso, llamado optimización topológica, busca lograr los objetivos que la industria del automóvil necesita cumplir para aumentar la eficiencia de sus vehículos: menos peso, menos energía para mover el coche y menos gastos en combustible para el conductor; y para aumentar la eficiencia del proceso de fabricación: menos material y menos gastos de producción.

Las complejas geometrías que la optimización topológica plantea llevan a la industria a desarrollar y utilizar tecnologías de fabricación aditiva para poder llevar a cabo la elaboración de las piezas; ya que, de otra forma más tradicional, no pueden realizarse las propuestas del diseño de los componentes.

Palabras clave: optimización topológica, diseño, diseño generativo, fabricación aditiva, suspensión, cargas, reducción de masa.

1. Introducción:

Ante la creciente concienciación sobre la importancia del medio ambiente, los recursos y materiales cada vez más escasos, y la necesidad de la industria de buscar procesos más económicos para la fabricación de componentes, se han requerido nuevos métodos para el desarrollo de las piezas.

A todo esto, se le suma otra problemática común en la industria: reemplazar piezas muy concretas que, por separado, no pueden adquirirse.

Para poder cubrir todas estas necesidades, tecnologías como las de impresión 3D, implementada en la fabricación de componentes optimizados topológicamente, han sido desarrolladas e integradas en los sectores industriales más importantes de nuestra época.

Actualmente, la impresión 3D de piezas específicas ha sido de gran ayuda en el sector automovilístico; razón por la cual en este Trabajo de Fin de Grado (en adelante llamado “TFG”) se ha decidido realizar el diseño, análisis y fabricación de una pieza de un vehículo turismo, imprimiéndolas con las impresoras 3D proporcionadas por la Universidad Pontificia Comillas ICAI.

No obstante, para aprovechar al máximo el potencial, las propiedades y las ventajas que la impresión 3D (también llamada “fabricación generativa”) puede aportar al proceso de fabricación, se desarrollará la pieza utilizando la optimización topológica. La optimización topológica, técnica cuya aplicación ha sido posible en entornos de producción industrial gracias a las tecnologías de fabricación generativa, es un concepto muy reciente en el área de la ingeniería, que permite la fabricación de componentes perfectamente funcionales, con un uso menor de material del que tradicionalmente se empleaba para la fabricación de una pieza con la misma función. Con la combinación de la optimización topológica y las tecnologías de impresión 3D, se consiguen los objetivos que la ingeniería de la fabricación desea para la producción de piezas de cara al futuro: piezas más ligeras, producidas en grandes cantidades a un menor coste.

2. Estado de la técnica:

La ingeniería inversa es un método de diseño industrial ampliamente empleada en el sector de la automoción. Su eficacia se ha incrementado los últimos años gracias a avances tecnológicos como la optimización topológica, una técnica ya incorporada en varios softwares de diseño 3D. Esta integración permite abordar tareas de rediseño y ajuste geométrico sin necesidad de recurrir a prototipos físicos o ensayos experimentales físicos, reduciéndose, así, los costes asociados.

Mediante el análisis virtual de los esfuerzos a los que una pieza estará sometida durante su vida útil, es posible identificar las zonas con mayores concentraciones de tensiones mecánicas sobre el modelo. A partir de esa información, el software es capaz de determinar regiones estructuralmente prescindibles de la pieza y eliminarlas de forma automática del modelo. Una vez hecho esto, se vuelve a analizar y valorar el nuevo diseño bajo el mismo caso de cargas. Cuando ya se ha conseguido una geometría funcional, se importa la información para imprimir la pieza en 3D.

Esta preparación de los modelos para poder imprimirse en las máquinas 3D se realiza en los *slicers*. Tras haber realizado los ajustes necesarios, puede realizarse la fabricación aditiva de las piezas.

Este tipo de fabricación es un proceso de manufactura que permite la creación de complejas geometrías antes imposibles de ejecutar por métodos tradicionales consistente en la adición de intrincadas capas de cualquier tipo de material, que van conformando el producto final desarrollado.

Actualmente, se puede imprimir cualquier tipo de material, desde comestibles hasta metales de gran dureza.

3. Metodología:

Primeramente, se obtuvieron los modelos de las piezas originales, escaneándolas con VXscan. Para poder llevarlas a Solid Edge, el *software* que se usa para la optimización, se limpiaron y cerraron las mallas obtenidas en el escáner con VXmodel.

Una vez estaban bien cerradas las mallas de los modelos, se importaron a Solid Edge, guardándolas en formato .step. Tras haber realizado esto, comenzó la metodología de trabajo de optimización:

Se tomaron los casos de cargas más desfavorables, en este caso, cuatro casos, para la pieza a optimizar. Después, con la función *Simulación* del *software* Solid Edge, se analizó la pieza sometida a los esfuerzos:

Lo primero que se hace para analizar, es seleccionar el material del que se hará la pieza, en este caso, se realizaron los ensayos en dos materiales diferentes: aluminio y fundición dúctil de hierro nodular.

Se realizó la simulación de casos de carga. Si ningún esfuerzo sobre la pieza superaba el límite elástico del material, se pasaba a la optimización en el modo *Diseño generativo* del *software*. Tras obtener la optimización, se analizaba la nueva pieza bajo el mismo caso de cargas. Si no resistía las cargas la nueva geometría, se volvía a realizar la optimización del modelo original con una menor reducción de masa. Si sí aguantaba las cargas, se seguía reduciendo la masa hasta llegar a un óptimo en el que la pieza alcanzara un equilibrio adecuado entre la reducción de masa y el mantenimiento de la funcionalidad estructural.

Esto se realizó con los cuatro casos de carga. Una vez se obtuvieron los cuatro modelos optimizados en ambos materiales, se compararon para comprobar cuál de las ocho piezas cumplía mejor el equilibrio mencionado, aguantando los casos de carga del resto de escenarios. El mejor modelo fue seleccionado para el siguiente paso.

La pieza optimizada obtenida no seguía los criterios de diseño ni de fabricación: las zonas de aplicación de cargas no deben variar su masa con respecto a las originales. Por ello, se rediseñó el modelo escogido. Cuando cumplió con los criterios mencionados, fue refinado en Altair Inspire 2023 con el fin de hacer su geometría adecuada para su producción.

Tras esto, se realizaron presupuestos con los costes de imprimir la pieza según diferentes tecnologías y materiales. Para hallar el tiempo de impresión y el material depositado, se hizo uso de la simulación de impresión 3D con los *slicers*.

Finalmente, se imprimió el prototipo final del brazo de suspensión en escala real, usando PLA, y en escala reducida, usando PA12, con dos tecnologías distintas. La impresión se realizó en el laboratorio de la universidad.

4. Resultados:

Peso inicial de la pieza:

- De aluminio: 5.283 kg.
- De fundición: 13.514 kg.

Ante el primer caso de carga: frenado brusco cuando el vehículo iba a máxima velocidad hacia delante, ascendiendo por una cuesta de pendiente de 1° :

- $W_{f_delantera} = 5702.5421\text{N}$. Aun siendo de tracción delantera y, por ende, tener allí mayores fuerzas, usamos la suspensión trasera; ya que la pieza original cumplía esa función.
- $F_{roz_delantera} = 4562.0337\text{N}$.

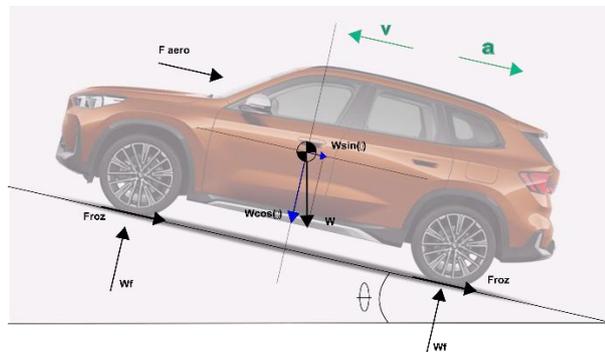


Figura 01. Fuerzas sobre el coche en Caso 1. (Elaboración propia).

Se ha determinado que la mejor optimización, con un buen balance entre la reducción de masa y el mantenimiento de la funcionalidad estructural, es:

- Para la fundición dúctil de hierro nodular: la reducción al 59%:

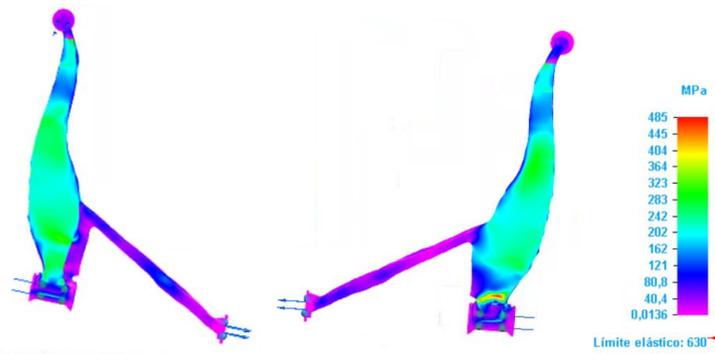


Figura 02. Optimización final para el primer caso de carga en fundición. (Elaboración propia)

Con un coeficiente de seguridad de 1.3 y una masa final de 5.541kg, no supera el límite elástico.

- Para el aluminio: la reducción al 56%:

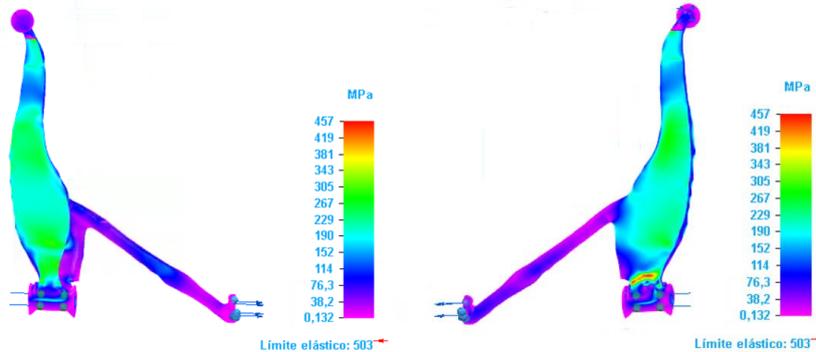


Figura 03. Optimización final para el segundo caso de carga en aluminio. (Elaboración propia)

Con un coeficiente de seguridad de 1.1 y una masa final de 2.234 kg, no supera el límite elástico.

Ante el segundo caso de carga: frenado brusco cuando el vehículo iba a máxima velocidad posible hacia atrás y en cuesta de pendiente 1°:

- $W_{f_delantera} = 3974.998 \text{ N}$. Aun siendo de tracción delantera y, por ende, tener allí mayores fuerzas, usamos la suspensión trasera; ya que la pieza original cumplía esa función.
- $F_{roz_delantera} = 3179.998 \text{ N}$.

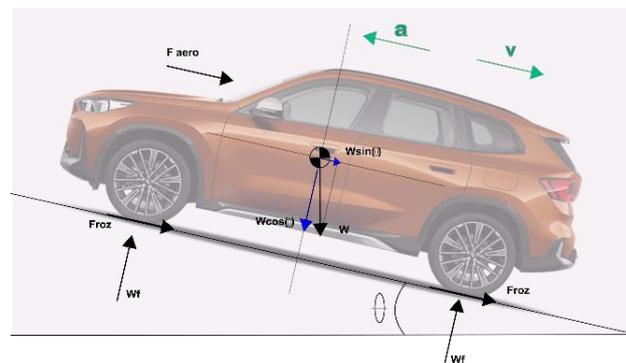


Figura 04. Fuerzas sobre el coche en Caso 2. (Elaboración propia).

Se ha determinado que la mejor optimización, con un buen balance entre funcionalidad y reducción de masa, es:

- Para la fundición dúctil de hierro nodular: la reducción al 62%:

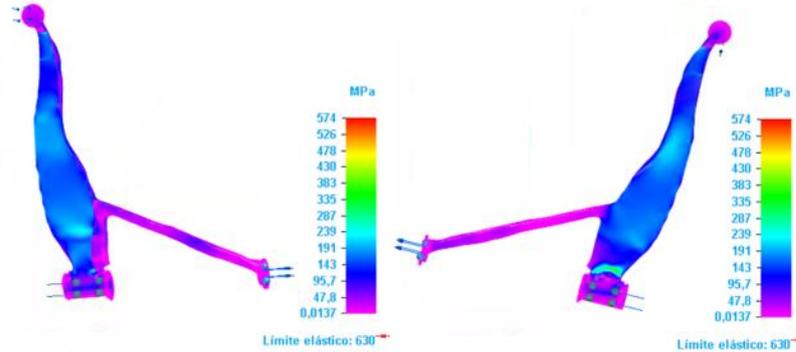


Figura 05. Optimización final para el segundo caso de carga en fundición. (Elaboración propia)

Con un coeficiente de seguridad de 1.1 y una masa final de 5.135kg, no supera el límite elástico.

Esta pieza con la reducción al 62% de masa, no puede aguantar las cargas y esfuerzos del caso 1. De momento, la mejor reducción de la pieza en fundición de hierro dúctil nodular es al 59%.

- Para el aluminio: la reducción al 58%:

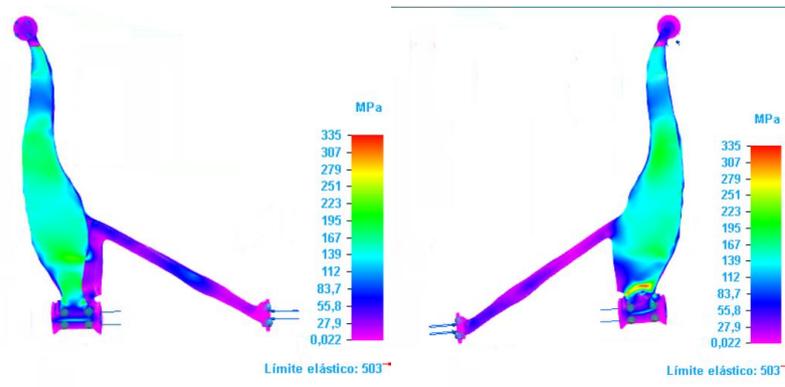


Figura 06. Optimización final para el segundo caso de carga en aluminio. (Elaboración propia)

Con un coeficiente de seguridad de 1.501 y una masa final de 2.219kg, no supera el límite elástico.

Esta pieza con la reducción al 58% de masa, no puede aguantar las cargas y esfuerzos del caso 1. De momento, la mejor reducción de la pieza en aluminio es al 56%.

Ante el tercer caso de carga: el vehículo toma una curva cerrada a máxima velocidad. En el tercer caso, se estudia la rueda exterior a la curva.

- $W_{f_delantera}=9150.4225$ N. Usamos la suspensión trasera, aun siendo de tracción delantera.
- $F_{roz_lateral_delantera}=3004.1675$ N.

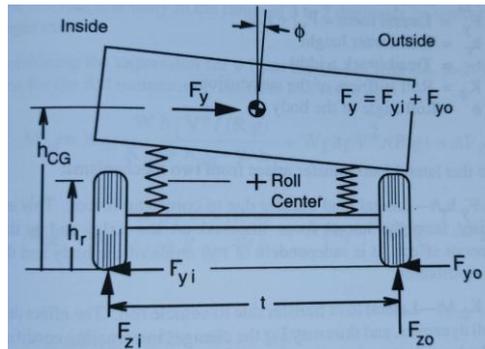


Figura 07. Distribución de fuerzas en la suspensión en una curva. (Gillespie, s. f.)

Se ha determinado que la mejor optimización, con un buen balance entre la reducción de masa y el mantenimiento de la funcionalidad estructural, es:

- Para la fundición dúctil de hierro nodular: una reducción de material del 35%.

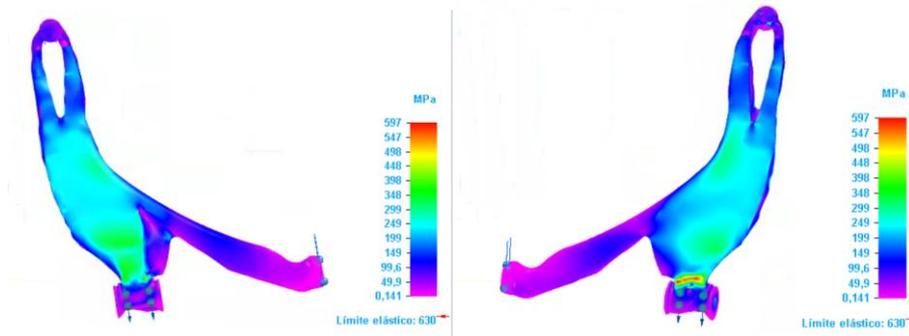


Figura 08. Optimización final para el tercer caso de carga en fundición. (Elaboración propia)

Con un coeficiente de seguridad de 1.055 y una masa final de 8.784kg, no supera el límite elástico.

- Para el aluminio: una reducción de material del 3%.

Para este caso de cargas, la pieza de aluminio inicial presentaba los siguientes esfuerzos:

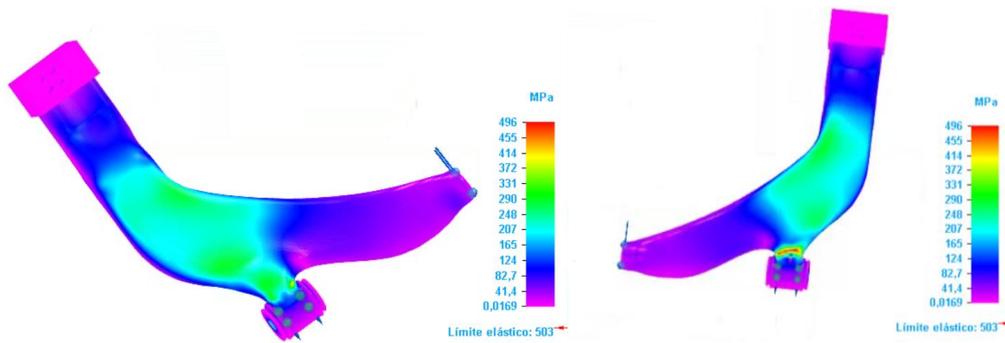


Figura 09. Análisis inicial para el cuarto caso de carga en aluminio. (Elaboración propia)

Habiendo sido necesario añadir la masa de forma cúbica que se aprecia en la imagen para poder realizar el análisis.

La reducción al 3% es el equivalente a suprimir el volumen auxiliar con geometría cúbica que simula el elemento de acoplamiento entre la rueda y el brazo. En otras palabras, no es posible realizar una optimización topológica en la pieza de aluminio que consiga resistir el caso de carga 3.

Para el aluminio, la reducción de masa ideal es del 0%, con un coeficiente de seguridad de 1.01 y una masa final de 5.283kg. Este coeficiente de seguridad resulta insuficiente para garantizar la integridad estructural de la pieza y prevenir su fallo en condiciones operativas.

Ante el cuarto caso de carga: el vehículo toma una curva cerrada a máxima velocidad. En el tercer caso, se estudia la rueda interior a la curva.

- $W_{f_delantera}=3004.1675$ N. Usamos la suspensión trasera, aun siendo de tracción delantera, porque la pieza original cumplía esa función.
- $F_{roz_lateral_delantera}=2553.5424$ N.

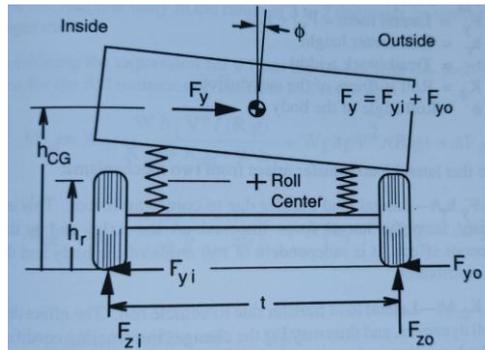


Figura 10. Distribución de fuerzas en la suspensión en una curva. (Gillespie, s. f.)

Se ha determinado que la mejor optimización, con un buen balance entre funcionalidad y reducción de masa, es:

- Para la fundición dúctil de hierro: una reducción de material del 60%.

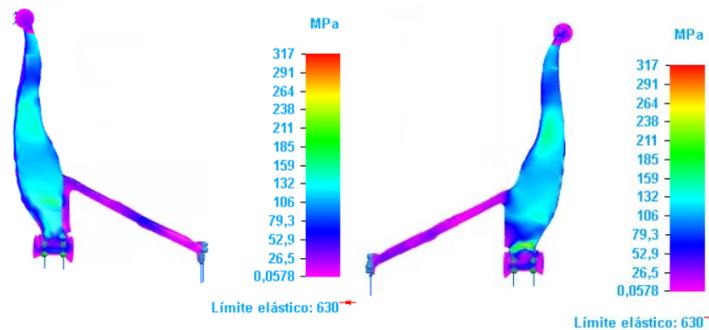


Figura 11. Optimización final para el cuarto caso de carga en fundición. (Elaboración propia)

Con un coeficiente de seguridad de 1.99 y una masa final de 5.406 kg, no supera el límite elástico.

- Para el aluminio: una reducción de material del 57%.

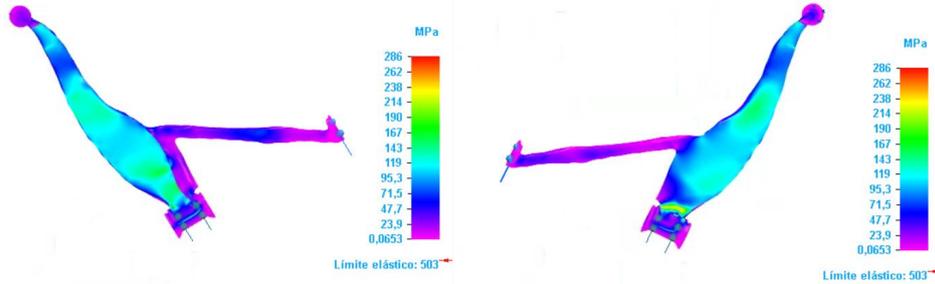


Figura 12. Optimización final para el cuarto caso de carga en aluminio. (Elaboración propia)

Con un coeficiente de seguridad de 1.76 y una masa final de 2.272kg, no supera el límite elástico.

Esta pieza con la reducción al 57% de masa, no puede aguantar las cargas y esfuerzos del caso 3.

5. Conclusiones:

Al comparar todos los resultados de un material en una misma tabla, se determina cuál es la mejor optimización:

- Para la pieza hecha con fundición de hierro dúctil nodular:

FUNDICIÓN	MASA INICIAL	MEJOR OPTIMIZACIÓN	MASA FINAL	LÍM. ELÁSTICO	COEF. SEGURIDAD
CASO 1	13.514 kg	59%	5.541 kg	485 MPa	1.299
CASO 2	13.514 kg	62%	5.135 kg	574 MPa	1.098
CASO 3	13.514 kg	35%	8.784 kg	597 MPa	1.055
CASO 4	13.514 kg	60%	5.406 kg	317 MPa	1.99

Tabla 01. Resultados finales para la pieza de fundición. (Elaboración propia)

La mejor optimización topológica en la pieza de fundición de hierro dúctil nodular se logra con una reducción de material del 35%, la cual asegura que la pieza soportará todos los esfuerzos a los que se le someta durante su vida útil sin romperse.

- Para la pieza hecha con aluminio:

ALUMINIO	MASA INICIAL	MEJOR OPTIMIZACIÓN	MASA FINAL	LÍM. ELÁSTICO	COEF. SEGURIDAD
CASO 1	5.283 kg	56 %	2.234 kg	457 MPa	1.100
CASO 2	5.283 kg	58 %	2.219 kg	335 MPa	1.501
CASO 3	5.283 kg	0 %	5.283 kg	503 MPa	1.000
CASO 4	5.283 kg	57 %	2.272 kg	335 MPa	1.760

Tabla 02. Resultados finales para la pieza de aluminio. (Elaboración propia)

La pieza fabricada en aluminio sólo podrá soportar los esfuerzos a los que se la someta durante su vida útil si y sólo si no se reduce la masa del brazo de suspensión original.

Tras comparar todos los casos de ambos materiales, se determinó que la pieza que se usaría para continuar el proceso sería el modelo del caso 3 de fundición, por ser el más restrictivo; además, se usaría un material comúnmente usado para fabricar brazos de suspensión por métodos tradicionales, de mayor límite elástico que la fundición analizada; siendo el material el acero AISI 4130.

El diseño, aunque inspirado en la optimización de la fundición del caso 3, hubo que rediseñarse, siguiendo los criterios de fabricación. Quedó de la siguiente forma:



Figura 13. Modificación geométrica del Brazo de Suspensión según criterios de diseño. (Elaboración propia)

Seguidamente, para poder hacerlo imprimible en 3D, se refinó con Altair Inspire 2023, quedando:



Figura 14. Modelo refinado del Brazo de Suspensión. (Elaboración propia)

Para estimar qué proceso de impresión sería más rentable, se estimaron los presupuestos de las tecnologías disponibles en el laboratorio 3D de ICAI:

TECNOLOGÍA	MATERIAL	PRECIO
FDM	ABS	245,96 €/ud
SLA	Resina RIGID	616,92 €/ud
MJF	poliamida	14.921,74 €/ud

Tabla 03. Presupuestos según tecnologías y material. (Elaboración propia)

Los presupuestos estimados fueron comparados con otras cotizaciones solicitadas a distintos proveedores. Se comprobó que la fabricación de la pieza en el laboratorio resultaba considerablemente más económica que su encargo a fabricantes externos.

Finalmente, se obtuvieron dos prototipos:

- Usando la tecnología FDM, se fabricó un modelo en escala real de PLA, con un coste de fabricación unitario de 378,05€:



Figura 15. Prototipo impreso por tecnología FDM, comparado con la pieza original. (Elaboración propia)

- Usando la tecnología MJF, se fabricó un modelo en escala real de PA12, con un coste de fabricación unitario de 115,52€:



Figura 16. Prototipo impreso por tecnología MJF. (Cortesía de Mariano Jiménez Calzado)

Estos prototipos demuestran que este proceso de diseño y fabricación puede aplicarse a la industria automotriz.

6. Referencias:

Todas las referencias se encuentran en la sección de Bibliografía, al final de este documento.

Analysis, design y fabrication of components for transport applications using topological optimization

Author: Ortiz Delgado, Valeria

Supervisor: Jiménez Calzado, Mariano

Collaborating Entity: Universidad Pontificia Comillas ICAI

ABSTRACT:

This Bachelor´s thesis presents a comprehensive analysis of all the extreme possible load case scenarios applied to various components of passenger vehicles.

Based on the findings of these simulations, successive mass reductions have been applied to the initial component models in order to develop lighter alternatives that can withstand the same mechanical demands as the originals.

This iterative process, known as Topological Optimization, plays a key role in helping the automotive industry reach two of its current strategic goals: increasing vehicles efficiency through weight reduction, and improving manufacturing productivity by minimizing material consumption and resource usage.

The complexity of the geometries produced through topological optimization can only be manufactured using generative manufacturing, an emerging technique under active research and development within the automotive sector. This method enables the production of intricate designs that would be unfeasible through traditional manufacturing technologies.

Keywords: topological optimization, design, generative manufacturing, additive manufacturing, suspension, loads, mass reduction.

1. Introduction:

In light of growing awareness regarding environmental sustainability, the increasing scarcity of resources and raw materials, and the industry´s ongoing pursuit of more cost-effective manufacturing methods, the development of alternative approaches to component design and production has become essential.

Adding to this challenge is a common issue faced across the industrial sector: the replacement of highly specific parts that are not available for individual purchase. To address all these demands, technologies such as 3D printing, when combined with topological optimized component design, have been developed and adopted by the most advanced and influential industrial sectors of our time.

Currently, 3D printing of specialized components has proven to be particularly valuable in the automotive industry. For this reason, this Bachelor's thesis focuses on the design, analysis and production of a component of a passenger vehicle, manufactured using the 3D printers available at Universidad Pontificia Comillas ICAI. However, to fully leverage the advantages, such as enhanced material efficiency and increased design freedom, offered by additive manufacturing, the components will be developed using topological optimization techniques.

This method, only feasible through additive manufacturing, is a recent innovation in engineering that allows the creation of fully functional components with significantly less material than traditionally required for parts serving the same purpose.

By combining topological optimization with 3D printing technologies, it is possible to achieve the key objectives of modern manufacturing engineering: the production of lighter components, manufactured at lower cost and at industrial scale.

2. State of art:

Reverse engineering is a widely industrial design method in the automotive sector. Its effectiveness has significantly increased in recent years thanks to technological advancements such as topological optimization, an advanced manufacturing technique, integrated into several modern 3D design software tools. This technology enables the redesign and refinement of models without the need for physical prototypes or expensive real-world testing:

By performing a virtual analysis of the loads to which a component is subjected to during its lifespan, it becomes possible to identify areas with high concentrations of mechanical stress within the model. Based in this data, the software can determine structurally redundant regions of the part and automatically remove them from the design. Once this has been done, the new geometry is re-evaluated to ensure it performs reliably under the same operating conditions of the original model. When a functional geometry has been achieved, the design is exported for 3D printing.

The preparation of model for additive manufacturing is carried out using slicer software. Slicers configure the model for 3D printing by generating the toolpaths and setting parameters such as layer height, infill and material properties. After performing the necessary adjustments, additive manufacturing of the parts can proceed.

This type of manufacturing is a cutting-edge process that enables the production of highly complex geometries that could not be created using conventional manufacturing methods. It consists in adding overlapping layers of different lengths and forms, of any kind of material, to gradually build up the final product.

Today, 3D printing supports an impressive range of materials: from edible compounds to hardened industrial metals.

3. Methodology:

Initially, the original component's models were obtained by scanning them using VXscan. In order to import them to Solid Edge, the software used for optimization, the scanned meshes are refined and closed in VXmodel to ensure they are watertight and suitable for further processing. To enable compatibility with Solid Edge, the cleaned meshes were exported as .step files. After this step, the optimization workflows began: The worst-case loads scenarios were considered for the component to be optimized, In this case, four different scenarios. Then, using the *Simulation* feature in Solid Edge, the part was analysed under the defined loads.

First, the material of which the component will be made is selected. In this study, all the simulations were carried out using two different materials: aluminium and nodular ductile cast iron.

The methodology started by simulating the identified load case scenarios on the original component. If none of the resulting stresses exceeded the elastic limit of the chosen material, the optimization phase was initiated using Solid Edge's *Generative Design* module.

After the optimization was complete, a new stress analysis of the optimized model under the same loading conditions was conducted. If the new model failed to withstand said loads, a revised optimization with a lower mass reduction was carried out. Conversely, if the optimized model proved structurally sound, a new optimization with further mass reduction was attempted to enhance efficiency. This iterative procedure continued until an optimal balance between mass reduction and structural integrity is achieved.

The same procedure was applied to each of the four predefined load case scenarios. Once an optimized model was obtained for each case, cross-validation was carried out by subjecting each model to all the other load conditions. The model that successfully withstood all scenarios was selected as the final design to be 3D printed. However, the optimised geometry did not comply with the initial design and manufacturing constraints: load application areas must retain their original mass and geometry. For this reason, the selected model was redesigned to meet these requirements. Once compliance was achieved, the model was further refined using Altair Inspire 2023, with the objective of making its geometry suitable for production. Subsequently, cost estimates were prepared for printing the component using various technologies and materials. To determine the printing time and materials consumption, 3D printing simulations were carried out using slicer software.

Finally, the final prototype of the suspension arm was printed at full scale using PLA, and at a reduced scale using PA12, employing two different technologies. The printing was carried out in the university's laboratory.

4. Results:

Initial weight of the suspension arm:

- Made of the aluminium: 5.283 kg
- Made of steel: 13.514 kg.

Under the first load scenario: sudden braking when the vehicle was moving at maximum speed uphill on a slope with gradient 1° :

- $W_{f_front} = 5702.5421\text{N}$. Although the vehicle is front-wheel drive, and thus subject to greater forces at the front, the rear suspension was selected, since the original part was designed for that function.
- $F_{friction_front} (F_{roz}) = 4562.0337\text{N}$.

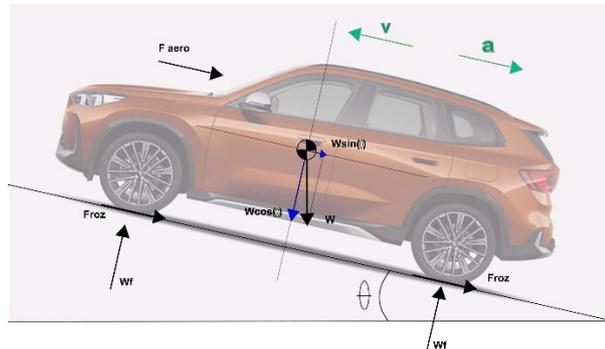


Figure 01. Loads on the car in the first case scenario. (Author's own work).

It has been determined that the optimal solution, striking a good balance between functionality and weight reduction is:

- For the nodular ductile iron component: a mass reduction of the 59%:

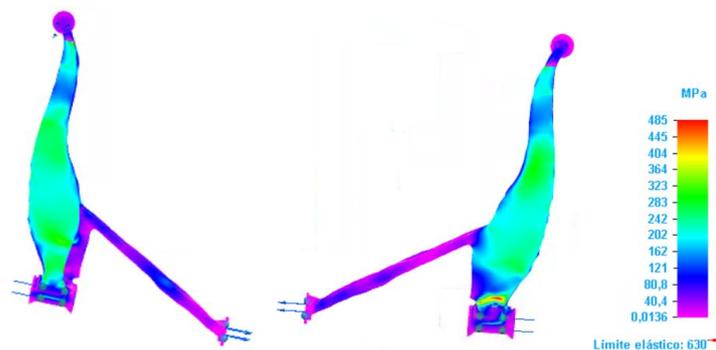


Figure 02. Final optimization for the first load scenario for nodular ductile iron. (Author's own work)

With a safety factor of 1.3 and a final mass of 5.541kg, the component does not exceed the yield strength of the material.

- For the aluminium component: a mass reduction of the 56%:

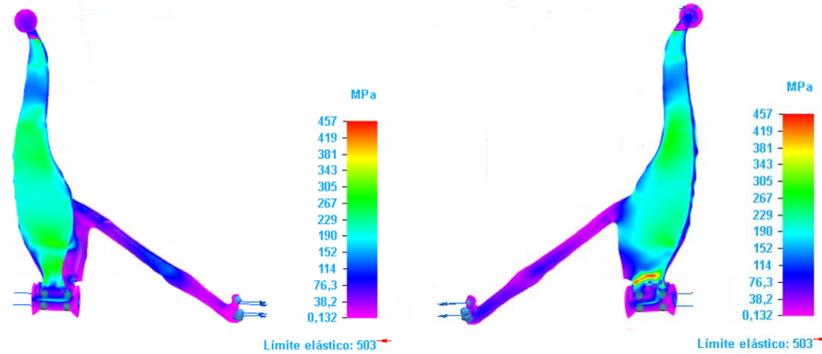


Figure 03. Final optimization for the first load scenario for aluminium. (Author's own work)

With a safety factor of 1.1 and a final mass of 2.234kg, the component does not exceed the yield strength of the material.

Under the second load scenario: sudden braking while the vehicle was reversing at maximum possible speed uphill on a slope with gradient 1°:

- $W_{f_front} = 3974.998\text{N}$. The rear suspension is used, although the vehicle is front-wheel drive, since the original part was designed for that function.
- $F_{friction_front} (F_{roz}) = 3179.998\text{N}$.

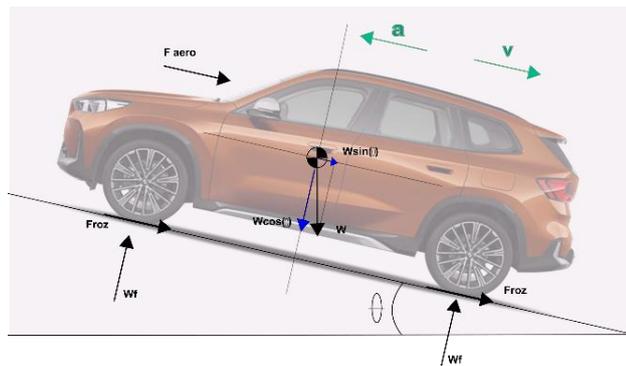


Figure 04. Loads on the car in the first case scenario. (Author's own work).

It has been determined that the optimal solution, striking a good balance between functionality and weight reduction, is:

- For the nodular ductile iron component: a mass reduction of the 62%:

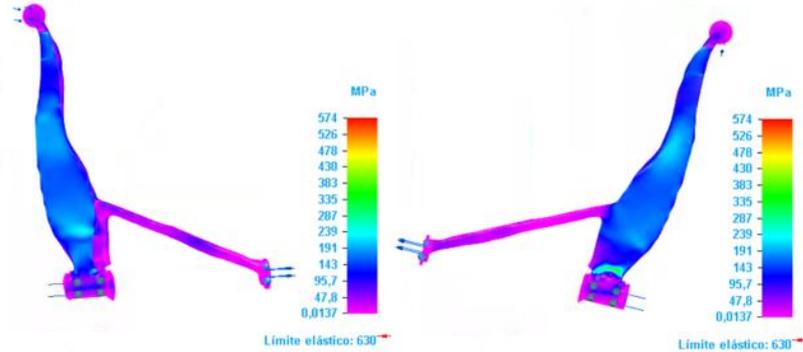


Figure 05. Final optimization for the second load scenario for nodular ductile iron. (Author´s own work)

With a safety factor of 1.1 and a final mass of 5.135kg, the component does not exceed the yield strength of the material.

The component with the mass reduction of 62% does not withstand the loads and stresses of the first load scenario. At the moment, the best mass reduction for the component made by nodular ductile iron is of 59%.

- For the aluminium component: a mass reduction of the 58%:

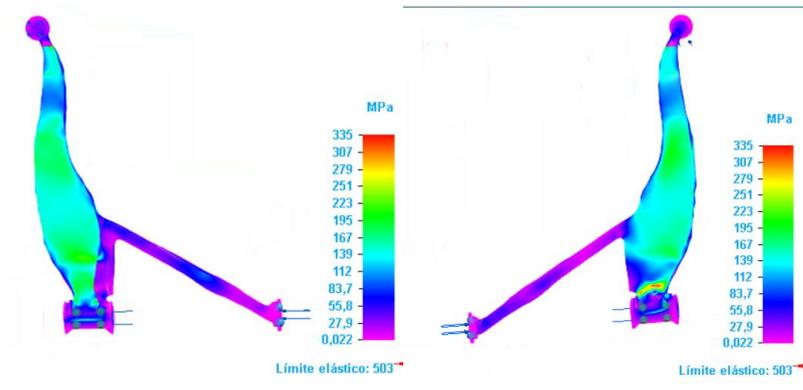


Figure 06. Final optimization for the second load scenario for aluminium. (Author´s own work)

Under the third load scenario: the vehicle takes a sharp turn at maximum speed. This case analyses the outer wheel with respect to the curve:

- $W_{f_front}=9150.4225$ N. Although the vehicle is front-wheel drive, and thus subject to greater forces at the front, the rear suspension was selected, since the original part was designed for that function.
- $F_{front_lateral_friction}=3004.1675$ N.

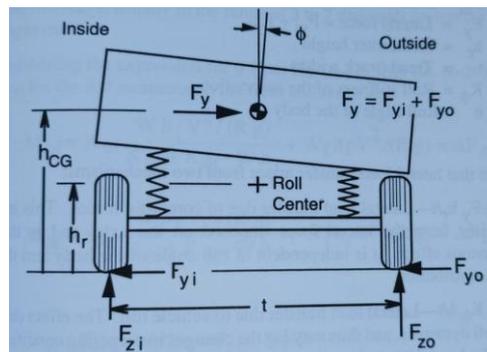


Figure 07. Load distribution in the car suspension during a sharp turn. (Gillespie, s. f.)

It has been determined that the optimal solution, striking a good balance between functionality and weight reduction, is:

- For the nodular ductile iron component: a mass reduction of the 35%:

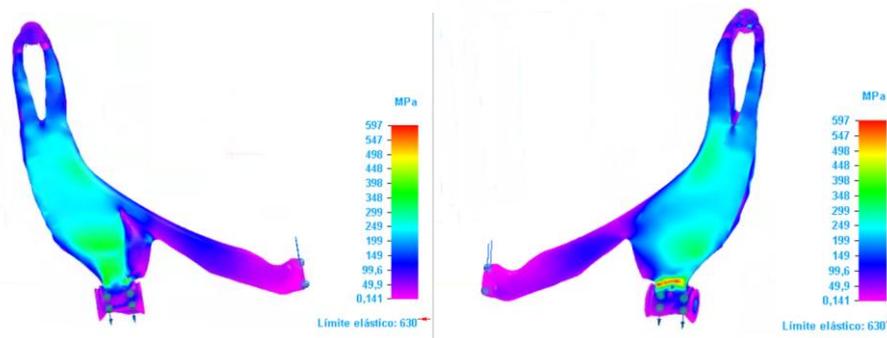


Figure 08. Final optimization for the third load scenario for nodular ductile iron. (Author's own work)

With a safety factor of 1.055 and a final mass of 8.784kg, the component does not exceed the yield strength of the material.

- For the aluminium component: a mass reduction of the 3%:

For this load scenario, the initial aluminium component was subjected to the following stresses:

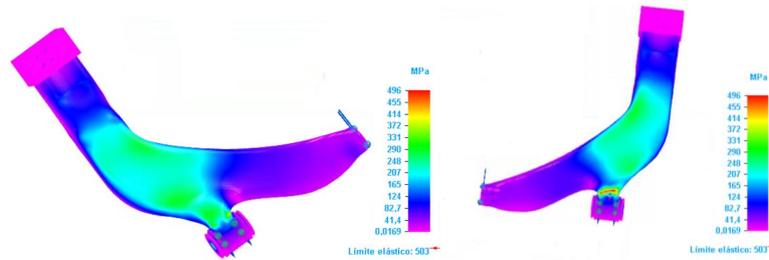


Figure 09. Initial analysis of the aluminium component. (Author's own work)

In order to analyse the component, it was necessary to add the cubic mass that is shown in the Figure XX.

The 3% mass reduction is achieved by removing the previously added cubic mass used for analysis purposes. Therefore, no feasible mass reduction of the original component made of aluminium can ensure that the suspension arm will withstand all load scenarios.

In this case, for the aluminium component, a 0% mass reduction is the only viable option to resist the applied stresses. The safety factor is 1 and the final mass is 5.283kg.

Under the fourth load scenario: the vehicle takes a sharp turn at maximum speed. This case analyses the inner wheel with respect to the curve:

- $W_{f_front}=3004.1675$ N. Although the vehicle is front-wheel drive, the rear suspension was selected, since the original part was designed for that function.
- $F_{front_lateral_friction}=2553.5424$ N.

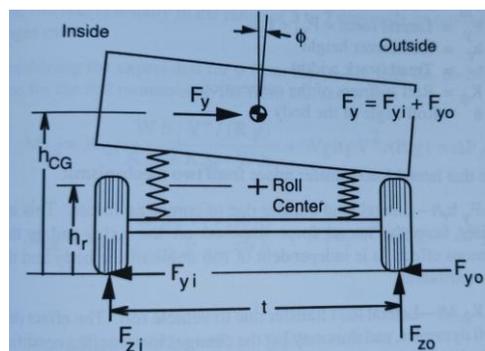


Figure 10. Load distribution in the car suspension during a sharp turn. (Gillespie, s. f.)

It has been determined that the optimal solution, striking a good balance between functionality and weight reduction, is:

- For the nodular ductile iron component: a mass reduction of the 60%:

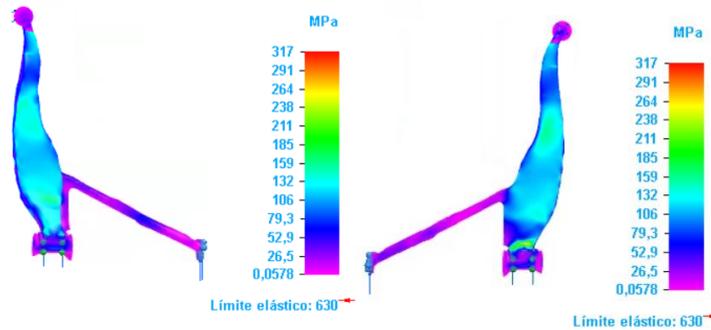


Figure 11. Final optimization for the fourth load scenario for nodular ductile iron. (Author's own work)

With a safety factor of 1.99 and a final mass of 5.406kg, the component does not exceed the yield strength of the material.

- For the aluminium component: a mass reduction of the 57%:

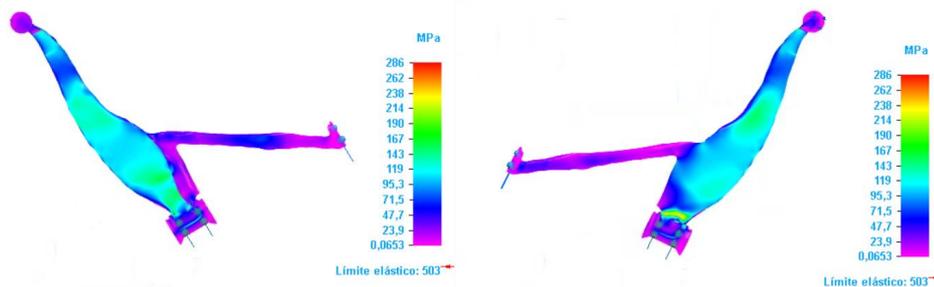


Figure 12. Final optimization for the fourth load scenario for aluminium. (Author's own work)

With a safety factor of 1.76 and a final mass of 2.272kg, the component does not exceed the yield strength of the material.

This component with the 57% mass reduction does not withstand the stresses it is subjected in the third load scenario.

5. Conclusions:

The best optimization is determined after comparing all the results in the same table:

- For the component made of nodular ductile iron:

IRON	INITIAL MASS	BEST OPTIMIZATION	FINAL MASS	YIELD STRENGTH	SAFETY FACTOR
CASE 1	13.514 kg	59%	5.541 kg	485 MPa	1.299
CASE 2	13.514 kg	62%	5.135 kg	574 MPa	1.098
CASE 3	13.514 kg	35%	8.784 kg	597 MPa	1.055
CASE 4	13.514 kg	60%	5.406 kg	317 MPa	1.99

Table 01. Final results for the nodular ductile iron component. (Author´s own work)

The best topological optimization of the nodular ductile iron suspension arm is achieved with a 35% mass reduction, which ensures that the component will withstand all the stresses it will be subjected to in its lifespan without breaking.

- Para la pieza hecha con aluminio:

ALUMINIUM	INITIAL MASS	BEST OPTIMIZATION	FINAL MASS	YIELD STRENGTH	SAFETY FACTOR
CASE 1	5.283 kg	56 %	2.234 kg	457 MPa	1.100
CASE 2	5.283 kg	58 %	2.219 kg	335 MPa	1.501
CASE 3	5.283 kg	0 %	5.283 kg	503 MPa	1.000
CASE 4	5.283 kg	57 %	2.272 kg	335 MPa	1.760

Table 02. Final results for the aluminium component. (Author´s own work)

The aluminium suspension arm will only be able to endure the stresses it is subjected to throughout its service life if, and only if, the mass of the original component remains unchanged.

After comparing all cases across both materials, it was determined that the component selected to proceed with the process would be the cast iron model from Case 3, as it represented the most restrictive scenario. Moreover, a material commonly used in the traditional manufacturing of suspension arms, with a higher yield strength than the analysed cast iron, was chosen: AISI 4130 steel.

Although the final design was inspired by the optimization results of the Case 3 cast model, it had to be redesigned in accordance with manufacturing criteria. The final design is as follows:



Figura 13. Geometric modification of the Suspension Arm according to manufacturing criteria. (Author's own work)

Subsequently, in order to make it suitable for 3D printing, the design was refined using *Altair Inspire 2023*, resulting in the following geometry:



Figura 14. Refined model of the Suspension Arm. (Author's own work)

To estimate which printing process would be most cost-effective, quotations were obtained for the technologies available at ICAI's 3D printing lab:

TECNOLOGÍA	MATERIAL	Quotation
FDM	ABS	245,96 €/unit
SLA	Resina RIGID	616,92 €/unit
MJF	poliamida	14.921,74 €/unit

Tabla 03. Quotations in terms of technology and material. (Author's own work)

The estimated budgets were compared with other quotes requested from suppliers. Manufacturing the part in the university's laboratory was significantly more cost-effective than outsourcing it to external manufacturers.

Ultimately, two prototypes of the suspension arm were obtained:

- Using the FDM technology, a full-scale PLA model was manufactured, with a unit cost of 378,05€:



Figure 15. Printed prototype using FDM technology, compared to the original component. (Author's own work)

- Using the MJF technology, a scaled-down PA12 model was manufactured, with a unit cost of 115,52€:



Figure 16. Printed prototype using MJF technology. (Courtesy of Mariano Jiménez Calzado)

These prototypes demonstrate that this design and manufacturing process is suitable for implementation in the automotive industry.

6. References:

The complete list of references can be found in the Bibliography section at the conclusion of this document.

ÍNDICE DE LA MEMORIA:

1.	INTRODUCCIÓN:.....	1
1.1.	Motivación del proyecto:	1
1.2.	Objetivos:	2
1.3.	Alineación con los objetivos de desarrollo sostenible	3
1.3.1.	8.- Trabajo decente y crecimiento económico:.....	3
1.3.2.	9.- Industria, innovación e infraestructura:	3
1.3.3.	12.- Producción y consumo responsables:	3
2.	ESTADO DEL ARTE/TÉCNICA:.....	4
2.1.	Optimización topológica:.....	4
2.2.	Fabricación aditiva:	5
2.2.1.	Slicers:.....	6
2.3.	Ingeniería inversa:	9
2.3.1.	VXelements:.....	9
3.	METODOLOGÍA:	16
3.1.	Selección y búsqueda de información de las piezas:	17
3.1.1.	Soportes de motor:	17
3.1.2.	Brazos de suspensión:	21
3.2.	Obtención de las piezas:	27
3.3.	Preparación de piezas:	28
3.3.1.	Soporte de brazo de suspensión:	29
3.3.2.	Brazo de suspensión:.....	30
3.4.	Escaneado:.....	31
3.4.1.	Soporte de brazo de suspensión:	31
3.4.2.	Brazo de Suspensión:	32
3.5.	Limpieza y transferencia de mallas:	33

3.5.1.	Limpieza:	33
3.5.2.	Transferencia STEP:	35
3.6.	Optimización y diseño generativo:.....	38
3.6.1.	Cálculo de casos:	38
3.6.2.	Selección de material:	44
3.6.3.	Análisis del cuerpo de diseño:.....	48
3.6.4.	Optimización por reducción de masa:	49
3.6.5.	Obtener cuerpo de diseño único:	56
3.6.6.	Análisis y verificación del cuerpo optimizado:.....	58
3.7.	Adaptación por criterio de diseño y fabricación:	73
3.7.1.	Adaptación geométrica del resultado:	73
3.7.2.	Refinamiento por Altair:	75
3.7.3.	Análisis final del modelo refinado:.....	77
3.8.	Preparación y presupuesto de la impresión:	79
3.8.1.	Análisis de propiedades de las tecnologías disponibles:	79
3.8.2.	Análisis de propiedades de los materiales disponibles:.....	82
3.8.3.	Presupuestos de proveedores y fabricantes:	83
3.8.4.	Cálculo de costes:.....	90
3.8.5.	Preparación por <i>Slicers</i> :.....	112
3.9.	Impresión y post-procesado:	115
3.9.1.	Impresión de la pieza con la tecnología FDM:	115
3.9.2.	Impresión de la pieza con la tecnología MJF:.....	118
4.	RESULTADOS:	120
4.1.	Optimización usando fundición nodular dúctil de acero:	120
4.1.1.	Caso de cargas 1:	120
4.1.2.	Caso de Cargas 2:.....	121

4.1.3.	Caso de Cargas 3:.....	122
4.1.4.	Caso de cargas 4:	123
4.2.	Optimización usando aluminio:	125
4.2.1.	Caso de cargas 1:	125
4.2.2.	Caso de Cargas 2:.....	126
4.2.3.	Caso de Cargas 3:.....	127
4.2.4.	Caso de cargas 4:	128
4.3.	Adaptación a los criterios de diseño y fabricación:	130
4.4.	Refinamiento de la pieza para su fabricación:.....	131
4.5.	Presupuestos estimados de la impresión:	132
4.5.1.	Presupuesto para tecnología FDM, material PLA:.....	133
4.5.2.	Presupuesto para tecnología FDM, material ABS:	134
4.5.3.	Presupuesto para tecnología SLA:	135
4.5.4.	Presupuesto para tecnología MJF:	136
4.6.	Presupuesto de la impresión realizada:	138
4.6.1.	Presupuesto para la impresora FDM DT-600:	138
4.6.2.	Presupuesto para la impresora HP 580C:	139
4.7.	Impresión y análisis del prototipo de la pieza:.....	141
4.7.1.	Prototipo por tecnologías FDM:	141
4.7.2.	Prototipo por tecnologías MJF:	141
5.	CONCLUSIONES:	144
5.1.	Trabajos futuros de investigación del proyecto:	145
6.	BIBLIOGRAFÍA:	147

ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 01. Ejemplo de optimización topológica. (optimizacion-topologica/formlabs.com, s. f.).....	4
Figura 02. Ejemplo de impresión 3D. (additive-manufacturing/brainporteindhoven.com, s. f.).....	5
Figura 03. Soportes y consecuencias de no usarlos correctamente. (orca-slicer, s. f.).....	6
Figura 04. Slicer de Orca y Prusa para impresión 3D. (free-slicers, s. f.).....	8
Figura 05. Slicer de Cura y PreForm para impresión 3D. (free-slicers, s. f.)	8
Figura 06. Escáner AEMETEK de CREAFORM. (Elaboración propia)	10
Figura 07. Preparación previa de la pieza para escanear. (Elaboración propia)	10
Figura 08. Movimientos circulares y en bóveda para escanear. (Elaboración propia)	11
Figura 09. Barrido de la pieza con escáner. (Elaboración propia).....	11
Figura 10. Malla resultante de un escáner. (Elaboración propia)	12
Figura 11. Fusión de las dos mallas de la pieza. (Elaboración propia).....	13
Figura 12. Eliminación de marcas superficiales con Defeature. (Elaboración propia).....	13
Figura 13. Corte en pieza en VXmodel. (Elaboración propia)	13
Figura 14. Comandos para crear superficies de mallas transferibles. (Elaboración propia)	14
Figura 15. Transferir a Solid Edge. (Elaboración propia)	15
Figura 16. Otra forma de exportar modelo a Solid Edge. (Elaboración propia)	15
Figura 17. Diagrama de trabajo. (MIRO/TFG/VOD/OT, s. f.)	16
Figura 18. Soporte de motor hidráulico. (Hydraulic-engine-mounts, s. f.)	19
Figura 19. Brazo de suspensión tipo MacPherson. (MacPherson-vs-double-suspension, s. f.).....	24
Figura 20. Brazo de suspensión tipo Double Wishbone. (MacPherson-vs-double-suspension, s. f.)	24
Figura 21. Brazo de suspensión tipo Multilink. (Multilink-suspension, s. f.).....	25
Figura 22. Brazo de suspensión de tipo eje rígido comparado con uno independiente de brazo transversal. (Brazo-eje-rigido-vs-independiente, s. f.)	25
Figura 23. Brazos de Suspensión de BMW X1 SDRIV A, 110kW. (Elaboración propia)	27
Figura 24. Soporte de Motor de un KIA Carnival. (Elaboración propia)	27
Figura 25. Soporte de brazos de suspensión de BMW X1 SDRIV A, 100kW. (Elaboración propia)	28
Figura 26. Disposición de la pieza y las referencias. (Elaboración propia).....	29
Figura 27. Brazo de suspensión previo a su preparación. (Elaboración propia)	30
Figura 28. Disposición del brazo de suspensión y las referencias. (Elaboración propia) ..	30

Figura 29. Escáner AMETEK de Creaform. (CREAFORM, s. f.)	31
Figura 30. Escaneado del soporte de brazo. (Elaboración propia)	31
Figura 31. Proceso de escaneado del soporte. (Elaboración propia)	31
Figura 32. Malla final, resultado del escaneado. (Elaboración propia)	32
Figura 33. Resultado del escáner del brazo de suspensión. (Elaboración propia)	32
Figura 34. Fusionado de las mallas del soporte. (Elaboración propia)	33
Figura 35. Resultado de malla completa sin limpiar. (Elaboración propia)	34
Figura 36. Limpieza de la superficie del soporte del brazo. (Elaboración propia)	34
Figura 37. Mallas fusionadas del brazo de suspensión. (Elaboración propia)	35
Figura 38. Apertura en el ámbito Pieza de Solid Edge. (Elaboración propia)	35
Figura 39. Pieza detectada como superficie. (Cortesía de Silvia Fernández Villamarín) ...	36
Figura 40. Comando Unida de Solid Edge. (Elaboración propia)	36
Figura 41. Comando Limitada de Solid Edge. (Cortesía de Silvia Fernández Villamarín) ..	36
Figura 42. Aviso de conversión de superficie a pieza de Solid Edge. (Elaboración propia)	37
Figura 43. Modelos 3D CAD de ambas piezas. (Elaboración propia)	37
Figura 44. Fuerzas en caso 1 sobre el vehículo BMW SDRIV X1 A, 110 kW. (Elaboración propia)	39
Figura 45. Coeficientes de fricción máximos. (Maninas, 2024)	40
Figura 46. Fuerzas en caso 2 sobre el vehículo BMW SDRIV X1 A, 110 kW. (Elaboración propia)	41
Figura 47. Distribución de fuerzas en la suspensión en una curva. (Gillespie, s. f.)	42
Figura 48. Distribución de fuerzas en la suspensión en una curva. (Gillespie, s. f.)	43
Figura 49. Aluminio 7075-T6 de la biblioteca de Solid Edge. (Elaboración propia)	44
Figura 50. Acero por defecto de Solid Edge. (Elaboración propia)	45
Figura 51. Buscador de Granta EduPack. (Granta-EduPack, s. f.)	45
Figura 52. Fundición dúctil de hierro nodular. (Granta-EduPack, s. f.)	46
Figura 53. Propiedades de la fundición dúctil de hierro nodular. (Granta-EduPack, s. f.) .	47
Figura 54. Errores debidos a los pliegues pequeños de la pieza. (Elaboración propia)	48
Figura 55. Pieza rediseñada para su correcta optimización. (Elaboración propia)	48
Figura 56. Restricciones y fuerzas sobre la pieza. (Elaboración propia)	49
Figura 57. Conversión a malla del sólido optimizado. (Elaboración propia)	56
Figura 58. Tolerancias de mallado y pieza final. (Elaboración propia)	57
Figura 59. Conversión de malla a sólido de la pieza optimizada. (Elaboración propia)	57
Figura 60. Conversión de la pieza inicial a sólido de construcción. (Elaboración propia) .	58
Figura 61. Pieza optimizada modificada. (Elaboración propia)	73
Figura 62. Análisis para el caso 3 de pieza optimizada modificada. (Elaboración propia)	73

Figura 63. Pieza optimizada manualmente. (Elaboración propia)	74
Figura 64: PolyNURB con 700 caras y suavizada al 70%. (Elaboración propia)	75
Figura 65: Pieza refinada con 700 caras y suavizada al 70%. (Elaboración propia)	75
Figura 66. PolyNURB sin refinar con 500 caras y suavizada al 70%. (Elaboración propia)	76
Figura 67. Error de mallado en el modelo. (Elaboración propia)	77
Figura 68. Análisis de la pieza final. (Elaboración propia)	78
Figura 69. Parámetros de guardado en formato .stl. (Elaboración propia).....	78
Figura 70. Pieza fabricada por mecanizado. (Xometry, s. f.)	84
Figura 71. Presupuesto para tecnología FDM del brazo de suspensión. (Xometry, s. f.)...	85
Figura 72. Curvas de coste de las tecnologías de fabricación. (Cortesía de Mariano Jiménez Calzado).....	85
Figura 73. Solicitud de presupuesto manual para MJF de la pieza. (Protolabs/presupuestos, s. f.).....	86
Figura 74. Presupuesto para tecnología FDM del brazo de suspensión. (l.materialise, s. f.)	88
Figura 75. Presupuesto de la pieza escalada para tecnologías MJF. (Xometry, s. f.)	88
Figura 76. Presupuesto de la pieza escalada para tecnologías FDM. (Xometry, s. f.)	89
Figura 77. Presupuesto de la pieza escalada para tecnologías SLA. (l.materialise, s. f.) ..	89
Figura 78. Estado inicial y corte de pieza en Orca Slicer. (Elaboración propia)	91
Figura 79. Pieza seccionada para su slicing. (Elaboración propia)	91
Figura 80. Parámetros de impresión PLA. (Elaboración propia)	92
Figura 81. Velocidad de impresión. (Elaboración propia)	92
Figura 82. Soportes de árbol automáticos. (Elaboración propia)	93
Figura 83. Slicing de todas las partes de la pieza con PLA. (Elaboración propia)	93
Figura 84. Slicing de todas las partes de la pieza con ABS. (Elaboración propia)	94
Figura 85. Impresora 3D SLA Form 4. (Formlabs-printer-Form-4, s. f.)	95
Figura 86. Selección de material SLA. (propiedades-RIGID-10K, s. f.).....	96
Figura 87. Pieza final preparada para impresión. (Elaboración propia)	96
Figura 88. Impresora 3D Fuse 1+ 30W. (Fuse 1 + 30W, s. f.).....	97
Figura 89. Material seleccionado para MJF. (Elaboración propia)	97
Figura 90. Tamaño de la pieza escalada. (Elaboración propia)	97
Figura 91. Parámetros resultantes de la simulación de impresión MJF. (Elaboración propia)	98
Figura 92. Orientación inicial del modelo. (Elaboración propia)	99
Figura 93. Impresora K1 MAX. (Características-K1-MAX, s. f.)	100
Figura 94. Impresora Prusa CORE one. (Características-Prusa-CORE-one, s. f.).....	100

Figura 95. Impresora FFF. (Características-FFF, s. f.).....	100
Figura 96. Impresora 3D Tiertime UP600. (características-Tiertime-UP600, s. f.)	101
Figura 97. Impresora Method XL. (Características-Method-XL-3D, s. f.).....	101
Figura 98. Modelo en impresora Method XL. (Elaboración propia)	101
Figura 99. Dimensiones alteradas de la impresora. (Elaboración propia)	102
Figura 100. Impresora Modix BIG-60. (Modix-BIG-60, s. f.)	102
Figura 101. Parámetros de impresión para Modix BIG-60. (Elaboración propia)	103
Figura 102. Simulación de impresión para el material PLA. (Elaboración propia)	103
Figura 103. Simulación de impresión para el material ABS. (Elaboración propia)	104
Figura 104. Impresora SLA. (Formlabs-printer-Form-4, s. f.)	106
Figura 105. Precios de la máquina real y equivalente. (Elaboración propia)	106
Figura 106. Valores de impresión para la pieza escalada en SLA. (Elaboración propia) .	107
Figura 107. Volumen de material para el modelo real y escalado. (Elaboración propia)	107
Figura 108. Tiempo de impresión del modelo real y escalado. (Elaboración propia).....	107
Figura 109. Impresora Fuse 1 + 30W. (Fuse 1 + 30W, s. f.).....	108
Figura 110. Precio de la pieza real y la escalada. (Elaboración propia).....	108
Figura 111. Precio en €/kg del material de impresión. (Elaboración propia)	109
Figura 112. Presupuesto para conseguir un 20% de densidad empaquetado. (Elaboración propia)	109
Figura 113. Polvo utilizado para la pieza real y la escalada. (Elaboración propia)	110
Figura 114. Máquina Modix V3 BIG-60 para FDM. (Modix-BIG-60, s. f.).....	111
Figura 115. Precio de máquina y materiales de FDM. (Elaboración propia)	111
Figura 116. Slicer propio de la DT-600. (Simplify3D-Slicer-DT600, s. f.)	112
Figura 117. Preparación de la pieza en tamaño real usando el slicer Simplify 3D. (Cortesía de Mariano Jiménez Calzado)	112
Figura 118. Resumen de la simulación de impresión de la pieza. (Cortesía de Mariano Jiménez Calzado).....	113
Figura 119. Bandeja de impresión de la HP 580C. (Cortesía de Mariano Jiménez Calzado)	114
Figura 120. Parámetros de la simulación de impresión MJF. (Cortesía de Mariano Jiménez Calzado).....	114
Figura 121. Impresión de la pieza en impresora FDM DT-600. (Cortesía de Mariano Jiménez Calzado).....	115
Figura 122. Pieza impresa por FDM sin post-procesar. (Elaboración propia).....	116
Figura 123. Eliminación de los soportes de la pieza. (Elaboración propia)	116
Figura 124. Espátula para eliminar imperfecciones superficiales. (Elaboración propia)	117

Figura 125. Lijadora Dremel para eliminar rugosidades superficiales. (Elaboración propia)	117
Figura 126. Preparación de la pieza en impresora HP 580C. (Cortesía de Mariano Jiménez Calzado)	118
Figura 127. Máquina NORBLAST para post-procesado de piezas impresas con la HP 580C. (Elaboración propia)	119
Figura 128. Esfuerzos sobre el brazo de suspensión en el caso de cargas 1. (Elaboración propia)	120
Figura 129. Optimización final para el primer caso de carga en fundición. (Elaboración propia)	121
Figura 130. Esfuerzos sobre el brazo de suspensión en el caso de cargas 2. (Elaboración propia)	121
Figura 131. Optimización final para el segundo caso de carga en fundición. (Elaboración propia)	122
Figura 132. Esfuerzos sobre el brazo de suspensión en el caso de cargas 3. (Elaboración propia)	122
Figura 133. Optimización final para el tercer caso de carga en fundición. (Elaboración propia)	123
Figura 134. Esfuerzos sobre el brazo de suspensión en el caso de cargas 4. (Elaboración propia)	123
Figura 135. Optimización final para el tercer caso de carga en fundición. (Elaboración propia)	124
Figura 136. Esfuerzos sobre el brazo de suspensión en el caso de cargas 1. (Elaboración propia)	125
Figura 137. Optimización final para el primer caso de carga en aluminio. (Elaboración propia)	125
Figura 138. Esfuerzos sobre el brazo de suspensión en el caso de cargas 2. (Elaboración propia)	126
Figura 139. Optimización final para el segundo caso de carga en aluminio. (Elaboración propia)	126
Figura 140. Esfuerzos sobre el brazo de suspensión en el caso de cargas 3. (Elaboración propia)	127
En un análisis inicial, se comprobó que el límite elástico era casi alcanzado sin efectuar ninguna reducción de masa:	127
Figura 141. Análisis inicial para el tercer caso de carga en aluminio. (Elaboración propia)	127
Figura 142. Esfuerzos sobre el brazo de suspensión en el caso de cargas 4. (Elaboración propia)	128
Figura 143. Optimización final para el cuarto caso de carga en aluminio. (Elaboración propia)	128

Figura 144. Pieza optimizada adaptada a los criterios de diseño y fabricación. (Elaboración propia)	130
Figura 145. Brazo de suspensión refinado para fabricación. (Elaboración propia).....	131
Figura 146. Presupuesto para FDM, material PLA. (Elaboración propia)	133
Figura 147. Presupuesto para FDM, material ABS. (Elaboración propia)	134
Figura 148. Presupuesto para SLA. (Elaboración propia).....	135
Figura 149. Presupuesto para MJF, densidad del 100%. (Elaboración propia)	136
Figura 150. Presupuesto para MJF, densidad del 20%. (Elaboración propia)	137
Figura 151. Presupuesto para impresora FDM DT-600. (Elaboración propia)	138
Figura 152. Datos de la simulación de impresión en la HP 580C. (Cortesía de Mariano Jiménez Calzado).....	139
Figura 153. Parámetros de impresión en la HP 580C. (Cortesía de Mariano Jiménez Calzado).....	139
Figura 154. Presupuesto para impresora HP 580C. (Elaboración propia)	140
Figura 155. Brazo de suspensión impreso por FDM. (Elaboración propia).....	141
Figura 156. Pieza impresa por MJF en escala reducida. (Cortesía de Mariano Jiménez Calzado).....	141
Figura 157. Comparación de los modelos impresos. (Elaboración propia)	142
Figura 158. Comparación entre la pieza original y la desarrollada en el proyecto. (Elaboración propia)	142

Índice de tablas:

Tabla 01. Datos del BMW SDRIV X1 A, 110kW. (Elaboración propia)	38
Tabla 02. Código de MATLAB para el Caso de Cargas 1. (Elaboración propia)	40
Tabla 03. Código de MATLAB para el Caso de Cargas 2. (Elaboración propia)	41
Tabla 04. Todos los casos de carga a analizar. (Elaboración propia).....	49
Tabla 05. Análisis iniciales de cada caso de cargas para la pieza de fundición dúctil nodular de acero. (Elaboración propia)	2
Tabla 06. Análisis iniciales de cada caso de cargas para la pieza de aluminio. (Elaboración propia)	4
Tabla 07. Todas las optimizaciones realizadas con aluminio en el Caso 1. (Elaboración propia)	50
Tabla 08. Todas las optimizaciones realizadas con fundición en el Caso 1. (Elaboración propia)	51
Tabla 09. Todas las optimizaciones realizadas con aluminio en el Caso 2. (Elaboración propia)	51
Tabla 10. Todas las optimizaciones realizadas con fundición en el Caso 2. (Elaboración propia)	52
Tabla 11. Todas las optimizaciones realizadas con aluminio en el Caso 3. (Elaboración propia)	53
Tabla 12. Todas las optimizaciones realizadas con fundición en el Caso 3. (Elaboración propia)	53
Tabla 13. Todas las optimizaciones realizadas con aluminio en el Caso 4. (Elaboración propia)	54
Tabla 14. Todas las optimizaciones realizadas con fundición en el Caso 4. (Elaboración propia)	54
Tabla 15. Análisis de optimizaciones del Caso 1 en aluminio. (Elaboración propia)	60
Tabla 16. Análisis de optimizaciones del Caso 1 en fundición. (Elaboración propia)	62
Tabla 17. Análisis de optimizaciones del Caso 2 en aluminio. (Elaboración propia)	63
Tabla 18. Análisis de optimizaciones del Caso 2 en fundición. (Elaboración propia)	65
Tabla 19. Análisis de optimizaciones del Caso 3 en aluminio. (Elaboración propia)	67
Tabla 20. Análisis de optimizaciones del Caso 3 en fundición. (Elaboración propia)	69
Tabla 21. Análisis de optimizaciones del Caso 4 en aluminio. (Elaboración propia)	70
Tabla 22. Análisis de optimizaciones del Caso 4 en fundición. (Elaboración propia)	71
Tabla 23. Características de cada tecnología de impresión 3D. (ChatGPT, s. f.).....	80
Tabla 24. Dimensiones máximas de cada tecnología 3D. (l.materialise, s. f.).....	87
Tabla 25. Comparación de parámetros de impresión. (Elaboración propia).....	94
Tabla 26. Máquina y características de impresión para cada tecnología. (Elaboración propia)	138

Tabla 27. Comparaciones de la geometría del modelo y la pieza original. (Elaboración propia) 143

1. INTRODUCCIÓN:

1.1. Motivación del proyecto:

La principal motivación para la realización de este Trabajo Fin de Grado (en adelante, llamado TFG) radica en la adquisición de conocimientos orientados al diseño y optimización de componentes mecánicos, mediante el uso de herramientas avanzadas de ingeniería y tecnologías de fabricación aditiva. Este proceso permite obtener geometrías funcionales no disponibles en el mercado, capaces de cumplir los requisitos estructurales buscados con un uso significativamente menor de material.

El aprendizaje del uso de tecnologías 3D y la comprensión de este proceso son grandes ventajas competitivas en el ámbito de la ingeniería industrial mecánica. Además, esta forma de fabricación permite crear piezas mucho más ligeras, mejorando la eficiencia de los equipos que conforman, sin comprometer su funcionalidad estructural.

Asimismo, el presente TFG persigue el aprendizaje de metodologías de ingeniería inversa aplicadas al diseño industrial, implicando el uso de diversos nuevos programas, herramientas y softwares. En este sentido, se destaca la posibilidad de entender y usar todo el potencial del software Solid Edge, con la posibilidad de realizar simulaciones FEM y optimizar topológicamente. Estos conocimientos técnicos son otras grandes motivaciones para realizar este TFG.

Otra razón para realizar este trabajo está basada en la posibilidad de fabricar piezas de recambio muy concretas que, en muchos casos, no se comercializan de forma individual en el mercado industrial. La capacidad de reproducir estos componentes sin tener que adquirir conjuntos completos con otros componentes innecesarios, supone un gran ahorro de dinero en el mantenimiento de maquinaria y sistemas mecánicos, electrónicos o eléctricos.

En definitiva, este proyecto representa una primera toma de contacto con las tecnologías industriales de análisis, diseño y fabricación industrial que están adquiriendo un papel cada vez más relevante en el entorno profesional y que, con toda probabilidad, se consolidarán como estándares en el futuro próximo.

1.2. Objetivos:

El objetivo principal de este TFG es analizar, diseñar y fabricar un componente de responsabilidad mecánica de un vehículo turismo sometido a esfuerzos mecánicos.

El diseño de la pieza ha de mejorar el funcionamiento del conjunto durante su vida útil. Para esto, se le realizará a una pieza diseñada y fabricada de forma convencional una optimización topológica que permita reducir la masa y, por ende, el peso del componente, aumentando la eficiencia del conjunto sin comprometer el correcto funcionamiento de éste.

En un principio, se pensó realizar la optimización de dos piezas simples de un vehículo turismo:

- **Brazo de suspensión del vehículo turismo:** soportan cargas dinámicas importantes, pues gestionan las fuerzas generadas por las ruedas y las debidas al impacto con el suelo. La optimización de esta pieza ha de aligerar su peso sin que se pierda la capacidad de absorber impactos y de mantener la estabilidad del vehículo.
- **Soportes de motor del vehículo turismo:** ha de soportar grandes cargas debidas al motor y a la transmisión, a vibraciones y torsiones elevadas. Su optimización ha de conseguir mejorar el rendimiento de la estructura sin que se pierda la capacidad de absorción de vibraciones ni la de fijación del motor.

No obstante, la carga de trabajo para realizar el proceso completo de análisis, diseño y fabricación de una sola pieza hizo que el proyecto se replanteara para un único elemento: el brazo de suspensión. Los objetivos necesarios para realizar este proyecto fueron:

- Estudio de la técnica de diseño de ingeniería inversa con el uso de escáneres de Creafom y programas como VXelements para el paso de las mallas escaneadas a sólidos manipulables en CAD.
- Aprendizaje de la técnica de optimización topológica, usando el software 3D de Solid Edge v2024 para el modelado de las piezas, la reducción de su masa y su posterior análisis.
- Adquisición del conocimiento necesario para diseñar y desarrollar piezas con geometrías complejas y funcionales, capaces de sustituir a componentes convencionales que, aun cumpliendo la misma función, presentan geometrías más toscas y requieren mayor volumen de material.
- Uso de las tecnologías de impresión 3D y otros recursos de fabricación que la universidad Pontificia Comillas proporciona al alumno.
- Fabricación de una pieza optimizada con una favorable reducción de material con respecto a las piezas originales y con buenas propiedades de resistencia a los esfuerzos a los que serán sometidas, que sigan los criterios de diseño y fabricación, y puedan ser elaboradas de forma económica por generación aditiva.

1.3. Alineación con los objetivos de desarrollo sostenible

Este proyecto se alinea con los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS):

1.3.1. 8.- Trabajo decente y crecimiento económico:

Concretamente, en los apartados 8.2, 8.3 (*Instituto Nacional de Estadística, s. f.*), en la parte centrada en alcanzar niveles elevados de productividad económica; ya que este proyecto busca la creación de piezas usando la mínima cantidad necesaria de material y el uso de tecnologías 3D, las cuales son de las más baratas a nivel de producción industrial.

Y en el apartado 8.4 (*Instituto Nacional de Estadística, s. f.*), centrado en el uso y consumo eficientes de los recursos mundiales; puesto que se usará menos material para realizar las piezas en este TFG.

1.3.2. 9.- Industria, innovación e infraestructura:

Este TFG cumple con el apartado 9.4 (*Instituto Nacional de Estadística, s. f.*) de este objetivo de desarrollo sostenible: con este método de fabricación, se aspira llegar a convertir la fabricación industrial en un proceso más sostenible y eficiente, debido a la menor cantidad de material a emplear y a los pocos recursos, energía e instalaciones a utilizar para conseguir la producción de nuevos elementos.

1.3.3. 12.- Producción y consumo responsables:

Siguiendo con lo mencionado en el objetivo 9: este TFG pretende demostrar que es posible la realización de piezas de distintas y complejas geometrías con el mínimo indispensable de material y, por consiguiente, con el mínimo presupuesto y uso de recursos mundiales.

Además, los residuos generados usando la fabricación con tecnologías 3D son casi despreciables; pudiéndose, asimismo, usar materiales poco nocivos para el medioambiente con estas tecnologías (*Naciones Unidas, objetivo 12, s. f.*). En adición a esto, mucha maquinaria se desecha porque no se encuentran recambios específicos de piezas difíciles de localizar en el mercado. Con la impresión 3D y la posibilidad de crear recambios hechos a medida, este problema desaparece por completo; por lo que las máquinas desechadas serán cada vez menos.

2. ESTADO DEL ARTE/TÉCNICA:

2.1. Optimización topológica:

La optimización topológica es una técnica incorporada en varios softwares de diseño 3D. Esta integración ha significado un gran avance en la producción y análisis de componentes y elementos mecánicos; ya que ha facilitado el rediseño y ajuste de los mismos sin la necesidad de la generación de prototipos y análisis físicos caros.

Además, es un método muy útil en el proceso de diseño por ingeniería inversa.

Consiste en el análisis virtual de los esfuerzos a los que una pieza estará sometida durante su tiempo de vida útil: la visualización de las mayores concentraciones de fuerzas, y el análisis y valoración sobre el mismo modelo diseñado en el software acerca de si hay zonas prescindibles de la pieza.

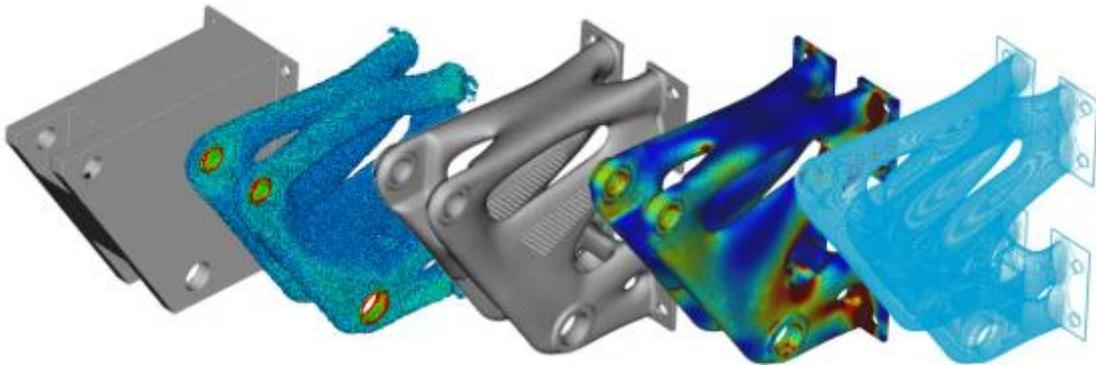


Figura 01. Ejemplo de optimización topológica. (optimizacion-topologica/formlabs.com, s. f.)

En la Figura 01, puede apreciarse el proceso completo de la optimización topológica de un soporte guía de doble apoyo.

A partir de una pieza diseñada y modelada de la forma tradicional, se realiza un análisis topológico de los esfuerzos a los que será sometida. Una vez detectadas las zonas críticas (con mayores fuerzas aplicadas) y las zonas en las que no hay peligro de rotura por la casi nulidad de fuerzas, se procede a la eliminación de material de las zonas no críticas y se vuelve a someter a un análisis de esfuerzos a la pieza (la cual se supone que debe aguantar los esfuerzos si se ha realizado correctamente la eliminación de material). Si es favorable el análisis, teóricamente, si se fabrica la pieza con la nueva geometría por el método de fabricación aditiva, ésta aguantará favorablemente los esfuerzos a los que estará sometida, con una menor cantidad de material usada.

Antes de que la fabricación aditiva fuese una realidad, los procesos de fabricación tradicionales sólo permitían fabricar geometrías poco complejas; derivando eso en un uso de material que no era necesario. Esto suponía un mayor gasto.

Gracias a la impresión de la pieza en 3D, o fabricación aditiva, la optimización topológica puede ser directamente aplicable a procesos industriales de producción, sin necesidad de adaptar ni restringir los diseños obtenidos a procesos de manufactura convencionales.

2.2. Fabricación aditiva:

La idea en que se basa el proceso de fabricación por impresión 3D surgió en el año 1981, en Japón, con una técnica de laminación con resinas polimerizadas fotosensibles que se endurecían con luz ultravioleta, asegurando un proceso de producción rápido.

A partir de este concepto, se ha ido desarrollando hasta nuestros días lo que hoy conocemos como “fabricación aditiva”, algo que ha causado una gran evolución en el área de desarrollo y diseño industrial.

Consiste en la adición de intrincadas capas de material, que van conformando un producto final desarrollado y modelado en softwares de diseño 3D.

Tras el modelado en dichos softwares, la información de éstos se envía a una máquina de impresión 3D con las formas de cada una de las capas a realizar. Ahora, para que los datos puedan ser procesables e imprimibles en 3D, se ha introducir un paso intermedio entre el modelado y la impresión: el uso de los *slicers*.

Este método aditivo de fabricación permite la creación de complejas geometrías antes imposibles de ejecutar por métodos tradicionales tales como el mecanizado, forjado, fresado o la sinterización. Además, esta forma de fabricación es muy versátil: en estos últimos años, se ha ido adaptando este proceso para poder imprimir objetos con materiales de muy diversa naturaleza: desde metales, hasta polímeros; siendo los materiales más utilizados los termoplásticos como el ABS, PLA, PC y PVA.



Figura 02. Ejemplo de impresión 3D. (additive-manufacturing/brainporteindhoven.com, s. f.)

Existen muchas tecnologías asociadas a la fabricación aditiva, cada una con características particulares; por lo que no todos los materiales ni todas las dimensiones de las piezas son compatibles con cualquier tipo de impresora 3D. Cada máquina tiene unas prestaciones y volúmenes de trabajo concretos que se han de tener en cuenta antes de imprimir.

2.2.1. Slicers:

Los *slicers* son softwares que convierten un modelo 3D, guardado normalmente en formato STL, en instrucciones que una impresora 3D pueda entender. Esto se consigue pasando la información a código G:

Básicamente, divide el modelo 3D en capas horizontales (*slices*), generando el recorrido que la boquilla de la impresora ha de realizar para cada capa para poder conformar la pieza querida.

Hay múltiples variables a tener en cuenta:

- **Infill:**
Los perímetros y el relleno de cada capa.
- **Soportes:**
Necesarios para que no haya problemas de “derrumbamientos” al imprimir la pieza y para conseguir la inclinación adecuada para evitar que se adhieran las capas a la base, provocando desgarramientos como se muestran en la Figura 03.

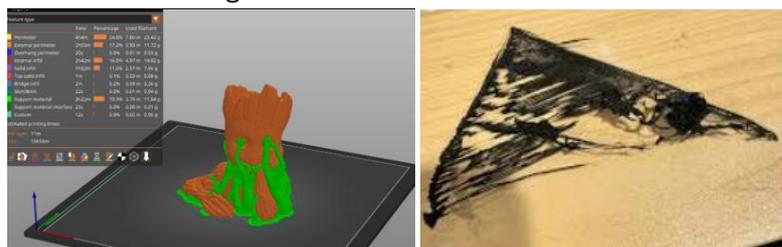


Figura 03. Soportes y consecuencias de no usarlos correctamente. (orca-slicer, s. f.)

- **Temperatura de extrusor y cama:**
La temperatura del extrusor ha de ser lo suficientemente alta para fundir correctamente el filamento usado (si se usan tecnologías de filamento), y, así, que fluya de forma apropiada; pero lo suficientemente baja para que no se degrade.
Por otra parte, la temperatura de la cama ha de ser ligeramente elevada para mejorar la adhesión de la primera capa sin producirse una deformación por contracción.

- **Velocidad de impresión:**
Afecta a la calidad y tiempo de impresión de la pieza:
 - Velocidades altas causan una pérdida de detalle o mala adherencia entre capas.
 - Velocidades bajas mejoran la precisión y el acabado, pero aumentan el tiempo de impresión y, por tanto, el coste de la pieza.
- **Retracciones y movimientos:**
Las retracciones retiran ligeramente el filamento de la boquilla (*nozzle*) durante los movimientos de impresión. Así, se evitan goteos o hilos innecesarios entre las capas de la pieza.
En cuanto a los movimientos, cuanto mejor planificadas estén las trayectorias, menor cantidad de errores habrá, mejorándose la eficiencia de la impresión.

En este TFG, se usaron los *slicers*: Orca, Prusa, PreForm, Ultimaker Cura y Chitubox, ya que son interfaces modernas e intuitivas.

De las tecnologías disponibles en el laboratorio de la Universidad Pontificia Comillas ICAI, se consideraron en el proyecto las: SLA, FDM y MJF.

- Para FDM: Orca, Chitubox, Prusa y Ultimaker Cura son *slicers* compatibles con esta tecnología.
- Para SLA: Preform, Chitubox y Prusa son *slicers* compatibles con esta tecnología.
- Para MJF: Preform es el único *slicer* gratuito y compatible para esta tecnología.

De los mencionados, el único *slicer* capaz de trabajar directamente con piezas de grandes dimensiones como el brazo de suspensión es Ultimaker Cura, ya que tiene una amplia gama de impresoras disponibles (*Ultimaker-Cura-3D-Printers*, s. f.).

Se pueden realizar las simulaciones de impresión en *Orca* para piezas grandes seccionándolas y realizando la impresión de cada parte por separado; para los otros *slicers*, sólo se puede simular la impresión con piezas de pequeño tamaño.

Los mejores *slicers* compatibles con las impresoras de ICAI son: Ultimate Cura, para la simulación de impresión de la pieza para la tecnología FDM; y PreForm para las tecnologías de impresión SLA y MJF.



Figura 04. Slicer de Orca y Prusa para impresión 3D. (free-slicers, s. f.)



Figura 05. Slicer de Cura y PreForm para impresión 3D. (free-slicers, s. f.)

2.3. Ingeniería inversa:

La ingeniería inversa forma parte de las etapas iniciales en el desarrollo de una pieza, más específicamente, en la fase del diseño de la misma.

Tras un primer análisis de mercado y de las necesidades para las que se va a desarrollar un producto, se pasa a su diseño. Éste se puede realizar directamente mediante un croquizado o analizando productos ya existentes que tienen la misma finalidad que el que se quiere desarrollar.

La ingeniería inversa se basa en esto último: analizar un producto existente, similar al que se quiere desarrollar; y, a partir de su estudio, determinar cómo mejorarlo para lograr un diseño competitivo en el mercado industrial actual.

En el caso de este TFG, la mejora vendrá dada por una reducción considerable de la masa y el peso de un componente de un vehículo a motor; fabricándose, así, una pieza que asegurará una mayor eficacia en el funcionamiento del conjunto. La ingeniería inversa que se utiliza consiste en el escáner de una pieza ya fabricada, en su análisis frente a unos casos de cargas que se le impone al modelo obtenido tras escanear, y en la posterior eliminación de masa allí donde menos esfuerzos se concentren.

De esta forma, a partir de una pieza ya fabricada de forma convencional, se obtendrá otra mucho más ligera e igualmente funcional con una geometría diferente a la del componente original escaneado.

El escaneado de la pieza, al igual que la limpieza de la malla que se obtiene, se realizan con unos módulos relativamente nuevos (se presentaron oficialmente en 2011) llamados VXscan y VXmodel, dentro del software VXelements, que pertenecen a la empresa Creiform.

2.3.1. VXelements:

VXelements es un *software* que surgió en 2011 como una plataforma integrada para operar los escáneres 3D de la empresa Creiform. Este programa ofrece una interfaz unificada que permite la adquisición de mallas escaneadas, y la visualización, procesamiento y análisis de datos 3D.

Además, permite la transferencia de esos datos del escáner a softwares de modelado 3D CAD, que es donde se realiza la optimización topológica.

El objetivo de este TFG es, mediante la ingeniería inversa, pasar las piezas escaneadas a Solid Edge para poder iniciar el análisis y la optimización topológica de éstas.

Los módulos que conforman el programa VXelements son: VXscan, VXmodel, VXinspect y VXtrack; de los cuales, sólo se usarán en este proyecto los dos primeros.

2.3.1.1 VXscan:

Para poder usar esta función, se necesita un escáner compatible con el software. En este caso, se usó un escáner AEMETEK de Creaform.



Figura 06. Escáner AEMETEK de CREAFORM. (Elaboración propia)

La preparación previa al escaneado consiste en la creación de referencias: mediante el uso de dianas (los dodecaedros que se muestran en la Figura 07) o bien con pegatinas circulares de 6 mm de diámetro, ya que este tipo de escáner está diseñado para detectar sólo ese diámetro.



Figura 07. Preparación previa de la pieza para escanear. (Elaboración propia)

Es muy importante que las dianas no se muevan en ningún momento, ni tampoco la pieza a analizar con respecto a dichas dianas; si no, se perderá la posición del objeto, y sus dimensiones y geometrías no podrán captarse con el escáner.

Durante el escaneado, se han de tener varias consideraciones:

- Realizar movimientos circulares, siguiendo una trayectoria abovedada alrededor de la pieza:

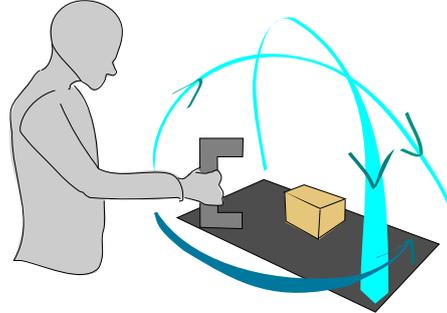


Figura 08. Movimientos circulares y en bóveda para escanear. (Elaboración propia)

- Mantener el escáner a una distancia adecuada de la pieza. Para saber si la distancia es buena o no, el escáner emite luces de diferentes colores:
 - Azul: el escáner está muy lejos de la pieza.
 - Verde: la distancia es adecuada.
 - Amarilla: el escáner se está acercando demasiado a la pieza.
 - Roja: indica que el escáner está demasiado cerca de la pieza. Adicionalmente, el escáner emite un sonido de aviso.

Según se hacen sucesivos barridos de la pieza, irá apareciendo la malla en la pantalla del ordenador al que esté conectado el escáner. Con esta ayuda visual, se completará el escaneado de la pieza, como se indica en la Figura 09.



Figura 09. Barrido de la pieza con escáner. (Elaboración propia)

Antes de cerrar el apartado del escáner, se pueden eliminar todas aquellas zonas que no formen parte de la pieza pero que se han escaneado por proximidad. También, pueden ocultarse las referencias y dianas.

Debido a que la pieza está apoyada en una superficie, no podrá escanearse por completo, como se ve en la malla de la Figura 10.



Figura 10. Malla resultante de un escáner. (Elaboración propia)

Para asegurar que la pieza se escanea por completo, se pueden realizar dos mallas en dos escaneos diferentes y, en el VXmodel, se fusionan.

2.3.1.2 VXmodel:

El VXmodel tiene múltiples funciones disponibles para lograr crear mallas completas, limpias y cerradas que puedan ser transferidas fácilmente a los softwares CAD.

Algunas de las funciones son:

- **Fusión/Merge:**
 - Primero, se abren ambas mallas escaneadas. Se impone cuál es la malla fija y cuál la móvil (la que se ajustará a la posición de la fija).
 - La colocación de ambas mallas para que coincidan posicionalmente puede hacerse de forma automática, usando el botón BestFit e imponiendo una distancia de unión (una tolerancia) adecuada; o de forma manual, seleccionando las mismas zonas en ambas mallas para que se unan.



Figura 11. Fusión de las dos mallas de la pieza. (Elaboración propia)

- **Defeature:**
Muy útil para eliminar marcas superficiales.

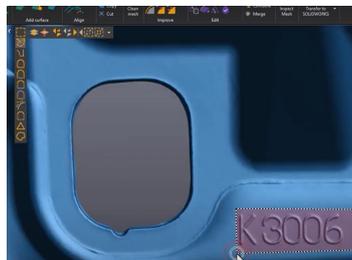


Figura 12. Eliminación de marcas superficiales con Defeature. (Elaboración propia)

- **Lija:**
Sólo recomendable para zonas muy puntuales.

Pero, el proceso más efectivo para conseguir limpiar la malla rápidamente es:

- Se corta poco a poco en zonas con superficies irregulares o que se quieran cambiar.



+ Suprimir zona seleccionada.

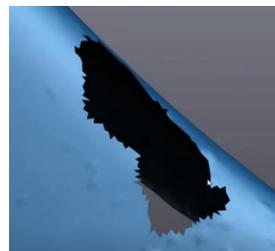


Figura 13. Corte en pieza en VXmodel. (Elaboración propia)

- Se comprueba si hay triángulos sueltos (las mallas están conformadas por triángulos) que puedan imposibilitar el cerrado de la malla usando el comando “parcelas aisladas”.

- Se rellena el vacío que queda tras el corte. Previamente, se puede suavizar el contorno para que, al rellenar el agujero, no quede una superficie muy abombada.



Para terminar de limpiar la malla, se recomienda usar el *Clean Mesh* .

En toda figura se han de añadir ejes de referencia para que pueda trabajarse la pieza fácilmente en Solid Edge una vez transferida. Además, es esencial imponer este sistema de referencia para añadir las fuerzas en los módulos de *Diseño Generativo* y de *Simulación* del software.

Hay 3 formas de pasar la malla modificada de VXmodel a CAD. La primera, es generar y exportar una superficie de malla automática que recubra toda la pieza; la segunda, crear e importar a Solid Edge sólo formas y geometrías que sirvan de guía en el programa para poder recrear esa figura, lo cual tiene ventajas, como no tener que limpiar o cerrar a la perfección toda la malla escaneada; o, la tercera, crear y exportar tanto una malla de todo el cuerpo como objetos que sirvan de referencia y ayuda en el Solid Edge.

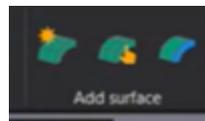


Figura 14. Comandos para crear superficies de mallas transferibles. (Elaboración propia)

Para transferirlos a Solid Edge, hay dos formas:

- La primera, es usando *Transfer to Solid Edge*; aunque este comando no suele funcionar. Es más efectivo para transferir a *Solid Works*.

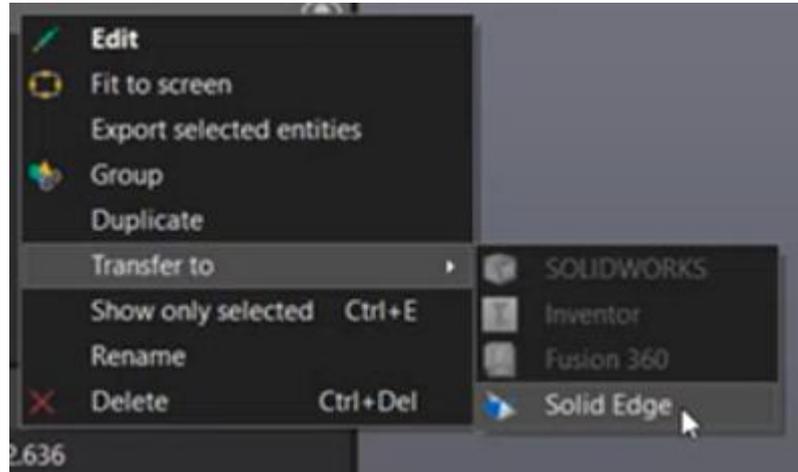


Figura 15. Transferir a Solid Edge. (Elaboración propia)

- El método que siempre funciona es el de *Export Selected Entities*. Se pueden exportar como .iges o .step. El .step suele funcionar mejor.

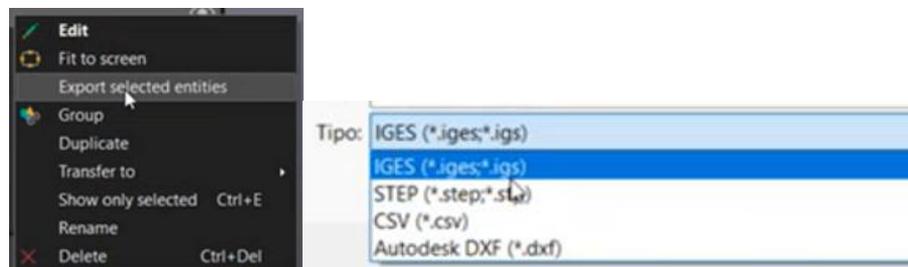


Figura 16. Otra forma de exportar modelo a Solid Edge. (Elaboración propia)

2.3.1.3 VXinspect:

Se usa para inspección dimensional. No es necesario su uso para este TFG.

2.3.1.4 VXtrack:

Sirve para realizar un seguimiento en tiempo real de objetos o marcadores. No es necesario su uso para este TFG.

3. METODOLOGÍA:

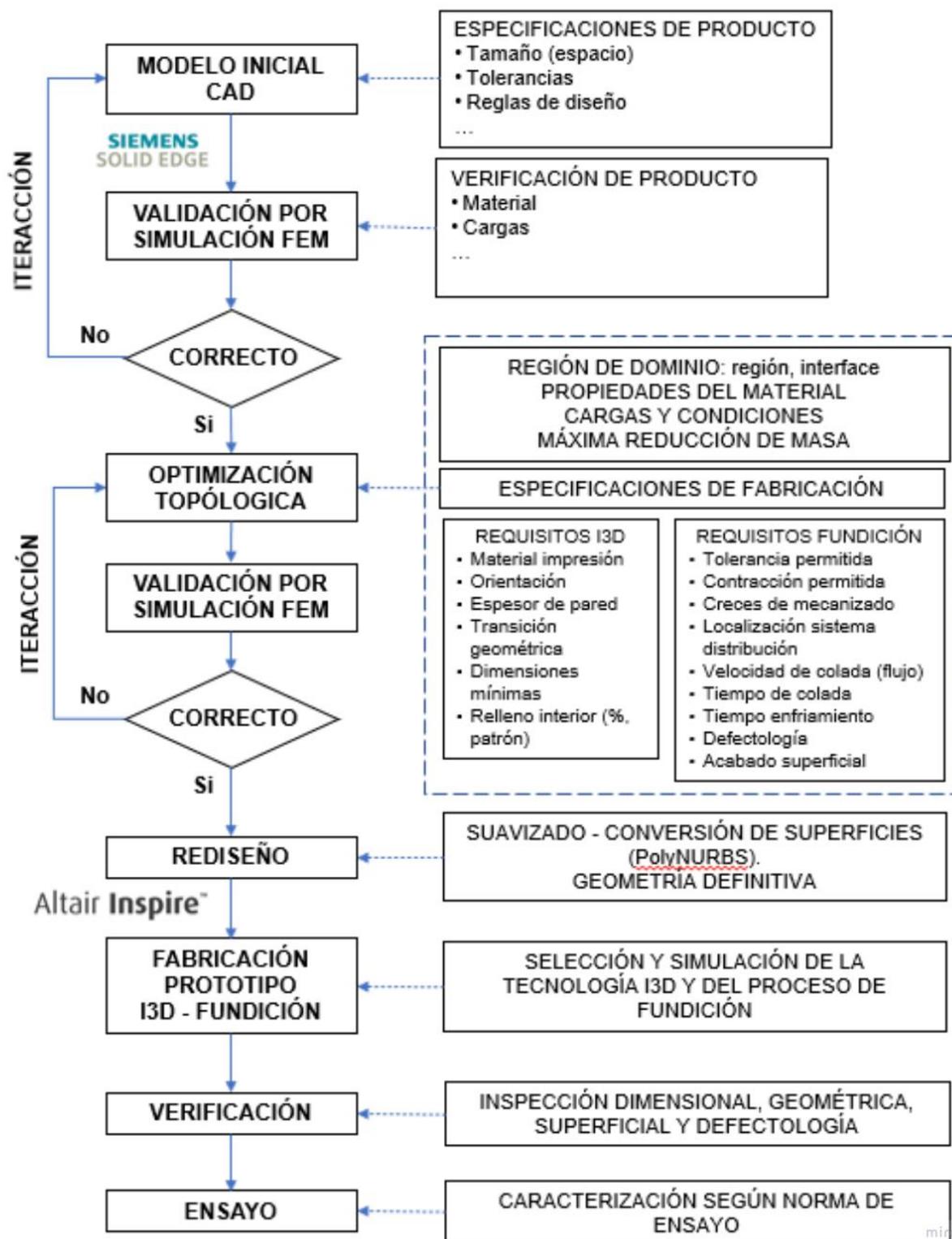


Figura 17. Diagrama de trabajo. (MIRO/TFG/VOD/OT, s. f.)

3.1. Selección y búsqueda de información de las piezas:

Se realizó un exhaustivo estudio de posibles componentes de un vehículo a motor, en este caso, un turismo, que tuvieran responsabilidad mecánica y cuya optimización topológica pudiera beneficiar y mejorar de alguna forma la eficiencia en el funcionamiento de dicho vehículo.

Se llegaron a dos posibilidades: los soportes de motor (*motor mounts*) y los brazos de suspensión.

Tras tener claro con qué se iba a trabajar, se pasó a buscar toda la información referente al: funcionamiento, materiales, esfuerzos, avances tecnológicos posibles y tipos que existen de cada pieza:

3.1.1. Soportes de motor:

3.1.1.1 Funcionamiento:

El **soporte de motor** tiene como función principal fijar el motor al chasis del vehículo y aislar las vibraciones generadas por el motor. Esto contribuye tanto al confort del conductor y los pasajeros como a la protección de otros componentes del vehículo (*Engine-Mount-How-does-it-work*, s.f.). Los soportes de motor deben ser capaces de:

- **Sostener el peso del motor** y soportar las cargas dinámicas.
- **Reducir las vibraciones** y ruidos que se transmiten desde el motor hacia la estructura del vehículo.
- **Absorber movimientos** del motor en respuesta a las fuerzas generadas durante la aceleración, desaceleración, y maniobras.

El motor, la transmisión y el diferencial no están unidos al resto del vehículo (*engine-mounts*, s. f.). Lo único que los une al chasis es el soporte del motor, el cual se encarga de resistir: el torque del motor, las vibraciones internas del motor y el “*bouncing*” (fenómeno aerodinámico consistente en la oscilación repetitiva y no deseada de la carrocería en el eje vertical a alta velocidad, debido a la interacción entre el flujo de aire bajo el vehículo y la suspensión) externo.

3.1.1.2 Materiales:

En el diseño de los soportes de motor, los materiales empleados son clave para garantizar un rendimiento adecuado. Entre los materiales comúnmente utilizados, se incluyen (*ChatGPT*, s. f.):

- **Acero:** Tradicionalmente usado debido a su alta resistencia y durabilidad. Sin embargo, presenta limitaciones en términos de aislamiento acústico y absorción de vibraciones.
- **Caucho:** Se emplea debido a sus propiedades de amortiguación de vibraciones, aunque su desempeño puede verse afectado por factores como temperatura, desgaste o envejecimiento.
- **Materiales Compuestos:** como el **polímero reforzado con fibra de vidrio**, están siendo cada vez más utilizados por su bajo peso y capacidad de reducir las vibraciones.
- **Elastómeros:** Combinaciones de caucho con otros materiales como resinas, que permiten optimizar las propiedades de absorción de vibraciones sin sacrificar resistencia mecánica.

Los soportes físicos (los tradicionales, con goma), tienen normalmente las chapas de acero recubiertas de un material elástico que permite la mejor absorción de las vibraciones y el efecto “*bouncing*” del coche en marcha. Las chapas de acero son las que ofrecen resistencia al movimiento torsor que el motor intenta realizar.

3.1.1.3 Tipos:

De forma más general, se pueden agrupar todos los soportes en dos tipos:

- Los que son más rígidos: sujetan mejor, pero transmiten mucha más vibración.
- Los que son más goma: absorben muy bien la vibración, pero sujetan peor el motor.

Existen varios tipos de soportes de motor, cada uno con características particulares para adaptarse a diferentes tipos de motores y configuraciones de vehículos (*ChatGPT*, s. f.):

- **Soportes de motor hidráulicos:** Utilizan un fluido hidráulico para mejorar la amortiguación de las vibraciones. Estos ofrecen un mejor rendimiento en la absorción de vibraciones en comparación con los tradicionales soportes de goma.

No obstante, son mucho más caros y se desgastan mucho antes que los tradicionales (los pasivos).

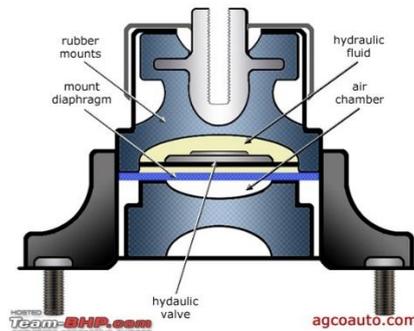


Figura 18. Soporte de motor hidráulico. (Hydraulic-engine-mounts, s. f.)

- **Soportes de motor pasivos:** Están formados por componentes de goma o elastómero que absorben las vibraciones a través de su elasticidad y deformación.
- **Soportes activos:** Estos incorporan sensores y actuadores para modificar la rigidez en función de las condiciones de conducción y las necesidades de amortiguación. Son más complejos y costosos, pero permiten un mejor control en la reducción de vibraciones y ruidos.

3.1.1.4 Avances tecnológicos posibles:

En los últimos años, se han introducido avances tecnológicos en el diseño y fabricación de los soportes de motor (*ChatGPT, s. f.*):

- **Tecnología de control activo de vibraciones:** Algunos sistemas avanzados utilizan **actuadores electrónicos** y **sensores** para ajustar dinámicamente la rigidez del soporte, proporcionando un mejor control de las vibraciones del motor en tiempo real.
- **Integración con sistemas de suspensión:** En algunos casos, los soportes de motor se integran con los sistemas de suspensión del vehículo, lo que permite un enfoque más holístico para el control de vibraciones y comodidad.
- **Simulación y modelado 3D:** El uso de técnicas avanzadas de simulación, como la dinámica de fluidos computacional (CFD) y el análisis de elementos finitos (FEA), permite la optimización de los diseños de los soportes de motor, mejorando su rendimiento y reduciendo costos de desarrollo.
- **Materiales inteligentes:** Investigaciones recientes se han centrado en el desarrollo de materiales con propiedades cambiantes según el entorno (por

ejemplo, el uso de **materiales piezoeléctricos** o **memorias de forma**), que podrían ofrecer nuevas posibilidades para la mejora de los soportes de motor.

3.1.1.5 Desafío en el diseño:

A pesar de los avances, el diseño de soportes de motor enfrenta varios desafíos:

- **Optimización de la vida útil:** Los soportes de motor deben ser capaces de resistir las cargas y vibraciones durante la vida útil del vehículo, lo que requiere materiales de alta durabilidad y diseños que eviten fallos prematuros.
- **Compromiso entre confort y rendimiento:** Se busca un diseño de soportes que permita la maximización de la absorción de vibraciones para un mayor confort y que favorezca una respuesta más rígida para mejorar el rendimiento y la estabilidad del vehículo.
- **Reducción de peso:** La industria automotriz está constantemente buscando formas de reducir el peso de los vehículos para mejorar la eficiencia del combustible y las emisiones. Esto incluye la optimización de los soportes de motor utilizando materiales más ligeros sin sacrificar la resistencia o la capacidad de aislamiento de vibraciones.

La impresión 3D y otras tecnologías de fabricación aditiva podrían permitir la creación de diseños más complejos y eficientes, mejorando la personalización y la optimización de los soportes.

3.1.2. Brazos de suspensión:

3.1.2.1 Funcionamiento:

Los brazos de suspensión son piezas articuladas que unen el subchasis del vehículo con el conjunto del buje de la rueda. Es un componente clave del sistema de suspensión de los vehículos; ya que es el único elemento que conecta el chasis con las ruedas y permite el movimiento controlado de éstas en respuesta a irregularidades del terreno (*Suspension-Arm-basics*, s. f.).

Son el elemento responsable de que el vehículo durante el viaje mantenga la estabilidad y en el habitáculo de pasajeros haya máximo confort.

Normalmente, van acompañados de rótulas o bujes de goma para absorber mejor las vibraciones.

3.1.2.2 Materiales:

La evolución de los materiales ha tenido un impacto importante en el diseño y rendimiento de los brazos de suspensión. Comúnmente, se utilizan en los brazos de suspensión:

- **Acero al carbono y acero inoxidable:** Tradicionalmente, los brazos de suspensión se fabricaban con acero debido a su resistencia y facilidad de fabricación. Sin embargo, los avances en la ingeniería de materiales han permitido la incorporación de otros compuestos.
- **Aleaciones ligeras (Aluminio):** El uso de aleaciones de aluminio se ha incrementado debido a su bajo peso y buena resistencia a la corrosión. Los brazos de suspensión fabricados en aluminio contribuyen a reducir el peso total del vehículo, lo que mejora la eficiencia de combustible y el rendimiento general del vehículo.
- **Materiales compuestos:** En vehículos de alto rendimiento y deportivos, se ha comenzado a utilizar materiales compuestos como la fibra de carbono, que ofrecen una alta resistencia con un peso muy bajo, lo cual es crucial en la optimización de la suspensión.

Los materiales con los que se hacen los brazos de suspensión suelen estar condicionados muchas veces al proceso de fabricación de éstos. Para fabricar la pieza por conformado de chapa o mediante mecanizado, el aluminio y otras aleaciones ligeras son una excelente opción por su bajo peso y buena mecanizabilidad.

Para forja y fundición, también se emplean aleaciones de aluminio o aceros al carbono.

En numerosas ocasiones, se aplican **recubrimientos** resistentes a la corrosión y **tratamientos térmicos** para mejorar la durabilidad y el rendimiento de los brazos de suspensión, especialmente en vehículos que operan en condiciones extremas.

3.1.2.3 Tratamientos térmicos aplicables:

- **Temple y Revenido:**

Es buena idea aplicarlo para brazos de suspensión fabricados con acero al carbono o aceros aleados.

- Temple a 800-900°C, luego enfriar en agua o aceite.
- Revenido entre 150-650°C, se enfría lentamente.

- **Nitruración:**

A temperaturas de entre 500-580°C. Mejora la dureza superficial y resistencia al desgaste.

Se utiliza principalmente en componentes de acero de alta resistencia, como en algunos modelos de brazos de suspensión. La nitruración es especialmente útil en áreas de contacto donde se espera un desgaste elevado, como los puntos de pivote y los pernos.

- **Carburación:**

El acero se somete a un ambiente rico en carbono a altas temperaturas (850-950°C). Posteriormente, se enfría rápidamente en agua o aceite.

Útil en áreas de contacto entre el brazo de suspensión y otros componentes, donde se requiere una alta resistencia al desgaste, pero también cierta flexibilidad en el núcleo.

- **Templado en aceite:**

Las aleaciones de aluminio se someten a un proceso de solubilización (o envejecimiento) y temple en aceite.

- Solubilización entre 450-550°C
- Templado a 150-200°C

Este proceso es crucial para brazos de suspensión hechos de aleaciones de aluminio de alta resistencia, que se utilizan principalmente en vehículos de alto rendimiento y deportivos, donde se requiere un equilibrio entre ligereza y resistencia.

- **Anodizado para las aleaciones de aluminio:**

Aunque no es un tratamiento térmico en sí mismo, el anodizado es un proceso electroquímico que se utiliza comúnmente en aleaciones de aluminio.

Consiste en crear una capa de óxido de aluminio en la superficie del material, lo que mejora la resistencia a la corrosión y el desgaste superficial sin alterar las propiedades mecánicas del material de forma significativa.

Suele realizarse en vehículos de alto rendimiento y deportivos, donde se utilizan aleaciones de aluminio para reducir el peso, el anodizado es un proceso adicional que prolonga la vida útil de los brazos de suspensión y mejora su resistencia en condiciones exigentes.

- **Templado por inducción en áreas localizadas:**

El templado por inducción es un proceso de calentamiento localizado mediante corrientes de alta frecuencia.

Se utiliza para enderezar o aumentar la dureza en zonas específicas de un componente, como los puntos de contacto y de mayor tensión del brazo de suspensión.

Es especialmente útil en componentes de suspensión donde se requieren propiedades específicas en ciertas zonas, como en los puntos de anclaje o de contacto con los bujes o pernos.

3.1.2.4 Tipos:

Existen cuatro tipos básicos de brazos de suspensión:

- **MacPherson:** Este es uno de los sistemas más comunes en vehículos modernos. Aunque no se utilizan brazos de suspensión independientes en el mismo sentido que el Double Wishbone, la geometría de la suspensión McPherson incluye un brazo de control inferior para permitir la orientación de las ruedas.



Figura 19. Brazo de suspensión tipo MacPherson. (MacPherson-vs-double-suspension, s. f.)

- **Double Wishbone (brazo de suspensión independiente):** Este sistema utiliza dos brazos (superior e inferior) que permiten un control preciso del ángulo de la rueda, ofreciendo un mejor rendimiento en términos de manejo y confort.

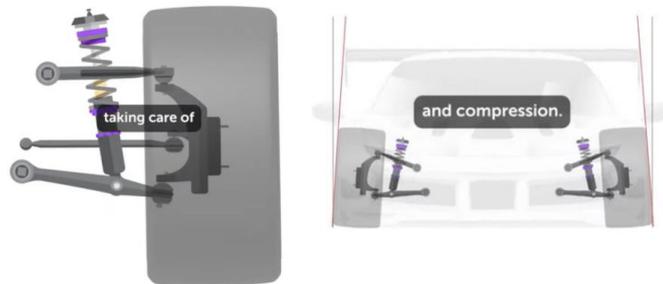


Figura 20. Brazo de suspensión tipo Double Wishbone. (MacPherson-vs-double-suspension, s. f.)

- **Multilink:** Es una suspensión más avanzada que utiliza varios brazos de suspensión, generalmente tres o más, que permiten un control más preciso sobre la alineación de las ruedas durante el movimiento. Este tipo de suspensión es más común en vehículos de gama alta y deportivos.

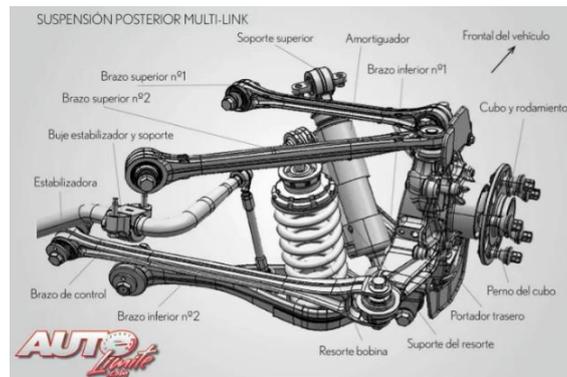


Figura 21. Brazo de suspensión tipo Multilink. (Multilink-suspension, s. f.)

- **Suspensión de eje rígido:** En algunos vehículos todoterreno o vehículos comerciales, se emplea un sistema de suspensión con un eje rígido que conecta ambas ruedas mediante un solo brazo de suspensión, lo que simplifica el diseño y mejora la durabilidad en terrenos irregulares.

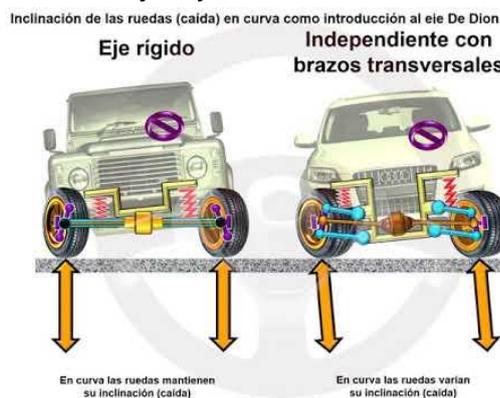


Figura 22. Brazo de suspensión de tipo eje rígido comparado con uno independiente de brazo transversal. (Brazo-eje-rígido-vs-independiente, s. f.)

3.1.2.5 Avances tecnológicos posibles:

Los avances en simulación por computadora y análisis de elementos finitos (FEA) han revolucionado el diseño de los brazos de suspensión. Estas herramientas permiten realizar pruebas virtuales para optimizar la geometría y el comportamiento del brazo de suspensión sin la necesidad de construir prototipos físicos.

- **Suspensiones adaptativas:** Con el desarrollo de suspensiones activas o semi-activas, se puede modificar la dureza de los amortiguadores en tiempo real, lo que mejora aún más el rendimiento y la estabilidad en diferentes condiciones de conducción.

De cara al futuro, los investigadores siguen trabajando en mejorar la eficiencia y la seguridad de los brazos de suspensión mediante la integración de nuevas tecnologías. Algunas de las tendencias futuras incluyen:

- **Suspensiones activas inteligentes:** Equipar a los vehículos con sistemas de suspensión que puedan ajustar automáticamente las características de la suspensión (como la rigidez) en función del estilo de conducción, la velocidad, y las condiciones de la carretera.
- **Materiales de alto rendimiento:** La investigación continúa en materiales como aleaciones avanzadas y compuestos para mejorar la relación resistencia-peso de los componentes de suspensión. Se están investigando aleaciones de acero, como los AISI 304 o 316; y aleaciones de aluminio como los 7075 o los 6061.

De la misma manera, también se está valorando la fabricación de brazos de suspensión con aleaciones de magnesio como el AZ91D por ser un metal estructural muy ligero.

- **Integración con sistemas autónomos:** En los vehículos autónomos, se están desarrollando suspensiones que puedan optimizarse para mejorar el confort y la seguridad en ausencia de intervención humana.

3.1.2.6 Desafíos en el diseño:

El diseño del brazo de suspensión debe ser optimizado para cumplir con varias funciones, como:

- **Control de la alineación de las ruedas:** Los brazos de suspensión deben mantener el ángulo correcto de las ruedas en todo momento, lo que se traduce en un manejo más estable y predecible.
- **Absorción de impactos:** La capacidad de absorber impactos y fuerzas durante el movimiento del vehículo es esencial para mantener la comodidad del conductor y los pasajeros, y para proteger otros componentes del vehículo.
- **Rigidez y flexibilidad:** Los brazos de suspensión deben ser lo suficientemente rígidos para soportar cargas, pero también deben permitir una flexibilidad controlada para adaptarse a las irregularidades del terreno y proporcionar una conducción suave.
- **Reducción de material:** necesario para una mayor eficiencia del vehículo. Esta reducción ha de poder conseguirse sin comprometer la resistencia a los esfuerzos que el brazo ha de soportar.

3.2. Obtención de las piezas:

En la planificación original, se iba a realizar la optimización de dos piezas: un brazo de suspensión y un soporte de motor.

Para conseguirlas, se conversó con diversos concesionarios y talleres. Finalmente, se contactó con el concesionario de BMW en Guadalajara, el cual proporcionó dos brazos de suspensión y un soporte de motor para la realización del proyecto.



Figura 23. Brazos de Suspensión de BMW X1 SDRIVA, 110kW. (Elaboración propia)

También, el taller Óscar Auto cedió un soporte de motor de un coche KIA Carnival para realizar el TFG.



Figura 24. Soporte de Motor de un KIA Carnival. (Elaboración propia)

No obstante, dado que ya existían varios estudios centrados en los soportes de motor, se decidió descartar la optimización del soporte en el presente TFG, con el fin de evitar redundancias.

Ajustado a los brazos de suspensión, había otra pieza que merecía un análisis en profundidad, la cual unía el chasis al brazo de suspensión:



Figura 25. Soporte de brazos de suspensión de BMW X1 SDRIVA, 100kW. (Elaboración propia)

Después de conseguir separar el soporte del brazo, serrando el primero y volviéndolo a unir con epoxy, se cambió la planificación y se valoró realizar la optimización de 2 piezas diferentes: los brazos de suspensión y los soportes de los brazos.

3.3. Preparación de piezas:

Para realizar la ingeniería inversa de las piezas a optimizar, se ha de obtener un modelo 3D de los componentes.

Esto podía hacerse de dos formas:

- Modelando las geometrías directamente en Solid Edge tras tomar todas las medidas pertinentes. Este método se descartó debido a la compleja geometría de ambas piezas, cuyas proporciones, además, no eran fácilmente replicables de forma directa.
- Escaneando las piezas para, posteriormente, pasarlas a Solid Edge. Se procedió de esta manera.

Para poder escanear una pieza, es importante y esencial una preparación previa, consistente en la disposición de referencias para hacer posible el posicionamiento espacial y la correcta proporcionalidad de los componentes a escanear.

Las piezas han de intentar simplificarse lo máximo posible antes de escanearlas: limpiándolas y tapando agujeros o posibles grietas que pudieran ser detectadas por el escáner, dando varios problemas en fases posteriores.

3.3.1. Soporte de brazo de suspensión:

Primero, se añadieron las referencias. Tras la lectura de los parámetros de calibración y características del escáner que se iban a utilizar, se estimó el número de referencias necesarias.

En el caso del escáner AMETEK de Creaform y de una pieza del tamaño del soporte, 6 dianas con círculos de 6 mm de diámetro eran suficientes para asegurar una buena malla final, resultado del escáner.

Se dispusieron las 6 dianas alrededor de la pieza, sobre una plataforma giratoria que favorece el movimiento circular de escaneado.

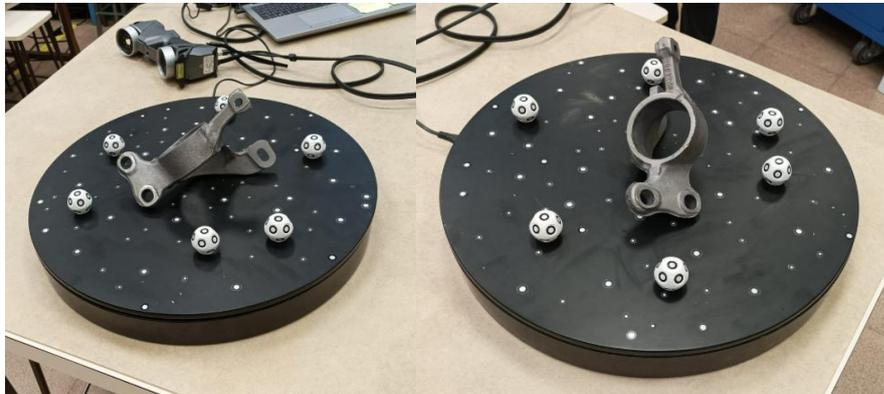


Figura 26. Disposición de la pieza y las referencias. (Elaboración propia)

La zona inferior de la pieza no pudo escanearse debido a que se encontraba apoyada en la plataforma. Por esto, se requirieron dos escaneados del componente para poder completar la malla.

Las dianas no debían moverse en ningún momento, ni siquiera cuando se movía la pieza para escanearla por segunda vez. Si no, se imposibilitaría o dificultaría la posterior fusión de mallas de la pieza.

3.3.2. Brazo de suspensión:

En el caso de los brazos de suspensión, se tuvo que hacer una preparación previa aún más exhaustiva, debido a que estaban huecos por dentro. La presencia de agujeros y estructuras huecas dificulta enormemente el escaneado; y aún más el posterior cerrado de la malla.



Figura 27. Brazo de suspensión previo a su preparación. (Elaboración propia)

Por esta razón, se tuvieron que tapar los agujeros antes del escáner. Además, debido a sus grandes dimensiones, se requirió de una superficie no móvil para el escáner. Se llenó la superficie de pegatinas circulares de 6 mm de diámetro para ayudar en el posicionamiento espacial de la pieza; y se usaron 6 dianas como referencias adicionales.



Figura 28. Disposición del brazo de suspensión y las referencias. (Elaboración propia)

De nuevo, debido a que se encontraba apoyado en su parte inferior, se requirió la obtención de dos mallas y, por ende, dos escaneados, para poder obtener la pieza completa. Las dianas no debían moverse hasta finalizar ambos escaneados. Si se cambiaba su posición lo más mínimo, la posterior fusión de ambas mallas se vería comprometida.

3.4. Escaneado:

Para el escaneado, se utilizó un escáner AMETEK, conectado a un ordenador con el programa de VXelements, de Creaform. Se usó el módulo VXscan del programa.



Figura 29. Escáner AMETEK de Creaform. (CREAFORM, s. f.)

Para realizar correctamente los escaneados, se debían seguir unas normas de distancia (guiándose por los colores de la luz que el escáner emite, se sabe si la distancia del escáner al objeto es o no adecuada) y realizar movimientos con el escáner alrededor del objeto siguiendo una trayectoria abovedada.

3.4.1. Soporte de brazo de suspensión:

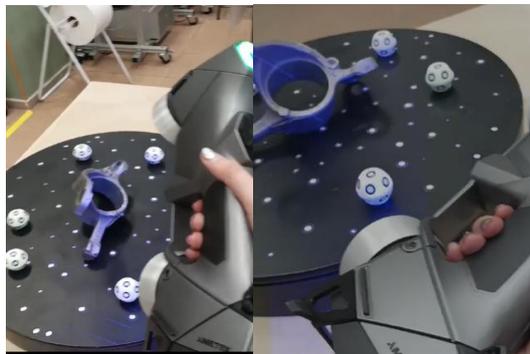


Figura 30. Escaneado del soporte de brazo. (Elaboración propia)

Una vez obtenida la malla escaneada, se eliminaron todas las dianas y elementos sobrantes que no se encontraban unidos a la pieza que se quería trabajar.

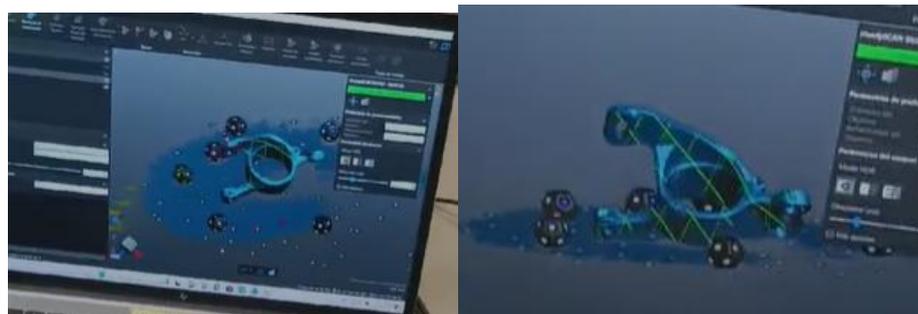


Figura 31. Proceso de escaneado del soporte. (Elaboración propia)

El resultado final quedó:

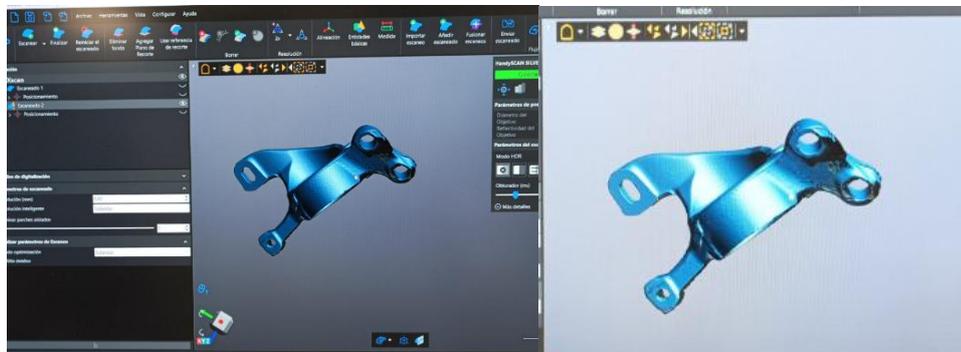


Figura 32. Malla final, resultado del escaneado. (Elaboración propia)

Puede verse en la Figura 32 que no está bien cerrada la malla.

En el siguiente paso, se fusionó con la malla de la otra orientación y se cerró para poder transferirse a los programas CAD.

3.4.2. Brazo de Suspensión:

Se realizó lo mismo que en el apartado 3.4.1 para el soporte del brazo, obteniéndose la siguiente malla del escáner:

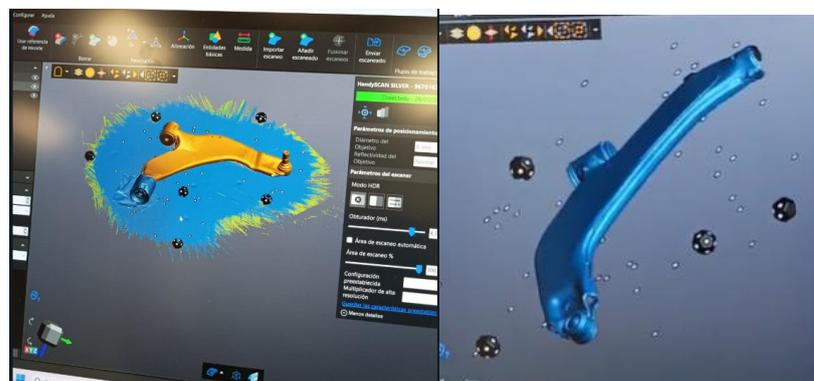


Figura 33. Resultado del escáner del brazo de suspensión. (Elaboración propia)

Con el comando , se seleccionó todo aquello que no estuviera unido a la pieza original escaneada con la que se quería trabajar. Tras eso, se ocultaron las dianas y referencias; se escaneó el brazo en otra orientación; y se obtuvieron dos mallas abiertas que, posteriormente, se fusionarían.

3.5. Limpieza y transferencia de mallas:

Para la limpieza, se utilizó el módulo VXmodel del programa VXelements de Creaform.

3.5.1. Limpieza:

3.5.1.1 Soporte de brazo de suspensión:

Se empezó por la fusión, usando el *Best Fit* para realizar la mejor unión de forma automática, y seleccionando qué malla sería la fija (azul) y cuál la móvil, la que se ajusta a la azul (rosa):

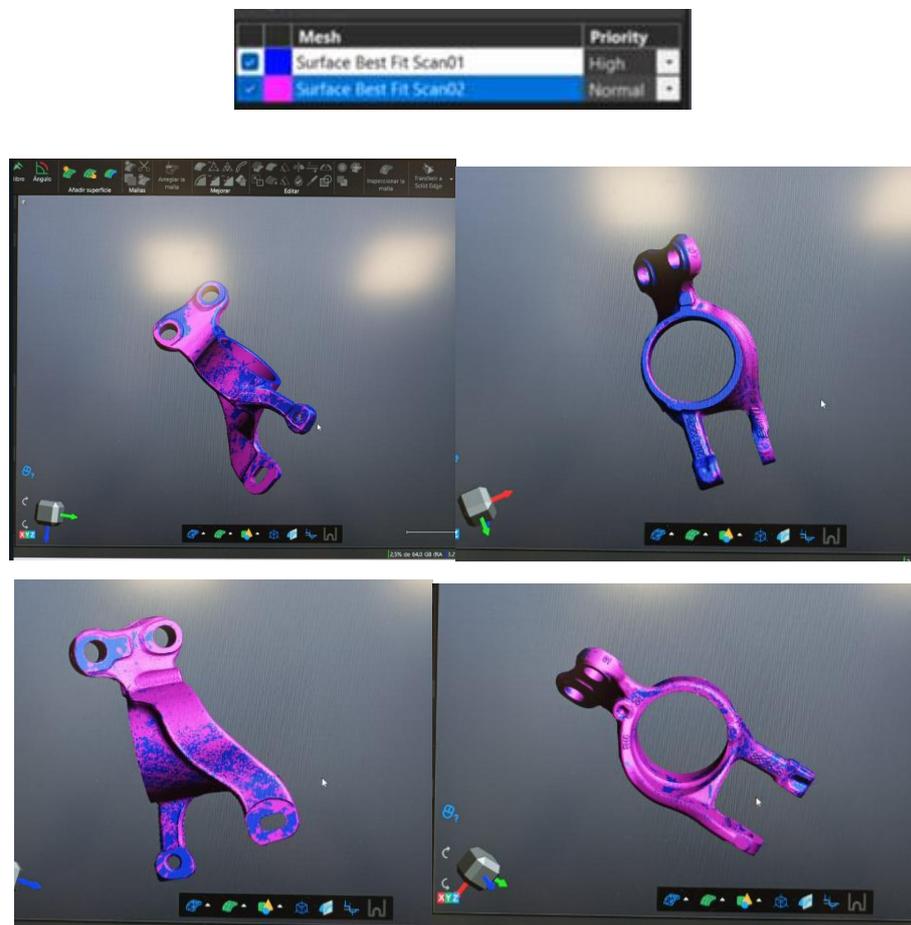


Figura 34. Fusión de las mallas del soporte. (Elaboración propia)

Quedando:

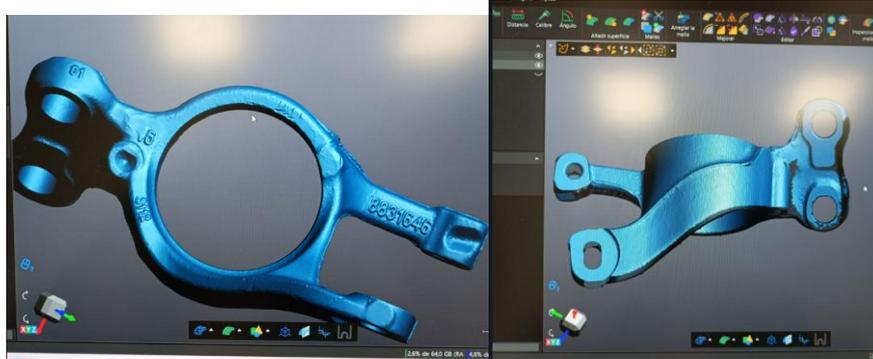


Figura 35. Resultado de malla completa sin limpiar. (Elaboración propia)

Debido a la compleja geometría de la pieza, se va a transferir la malla en forma de única superficie, transfiriendo también algunos planos de referencia. Para poder transferir la información de esta forma, la superficie ha de quedar perfectamente limpia, sin triángulos muy pequeños o ángulos muy agudos. Además, la malla ha de estar bien cerrada antes de aplicar el comando de superficie automática.

Se limpió la superficie con la herramienta *Defeature*, la lija y la técnica de cortado y rellenado, explicada en el apartado 2.3.1.2. También, para evitar problemas de mallado, se cerraron todos los agujeros de la pieza, marcando su forma previamente con planos circulares que se usarán en Solid Edge para realizar los agujeros.



Figura 36. Limpieza de la superficie del soporte del brazo. (Elaboración propia)

Una vez se limpió toda la pieza, se añadió un sistema de referencia en la parte superior del componente, para facilitar su manejo tanto en el VXmodel como en el Solid Edge.

3.5.1.2 Brazo de suspensión:

Para el brazo de suspensión, se aplicó el *Best Fit* también para la fusión, quedando:



Figura 37. Mallas fusionadas del brazo de suspensión. (Elaboración propia)

Para su transferencia a Solid Edge, se usó el método de superficie de malla automática, para lo cual se tuvo que limpiar y cerrar al completo la malla de la pieza.

Finalmente, se añadieron los ejes de referencia a la pieza para ser fácilmente manipulada en VXmodel y en Solid Edge, y se exportaron los datos a CAD transformando el archivo a .step.

3.5.2. Transferencia STEP:

Una vez se exportaron los datos de VXmodel convirtiendo las piezas a archivos .step, se abre en Solid Edge como pieza



Figura 38. Apertura en el ámbito Pieza de Solid Edge. (Elaboración propia)

Si la superficie exportada tenía algún error o no estaba perfectamente cerrada, nada más la abras en Solid Edge, aparecerá la pieza como una superficie (color morado).

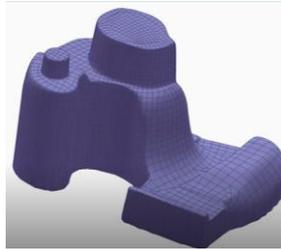


Figura 39. Pieza detectada como superficie. (Cortesía de Silvia Fernández Villamarín)

Esto ocurrió sólo con el brazo de suspensión; el soporte se abrió directamente como sólido (color gris).

Para que el programa tome los datos como pieza, en el módulo de *Superficies*, hay una herramienta llamada *Unida*; la cual te muestra si hay zonas incompletas que generen que el programa vea a la pieza como una superficie.

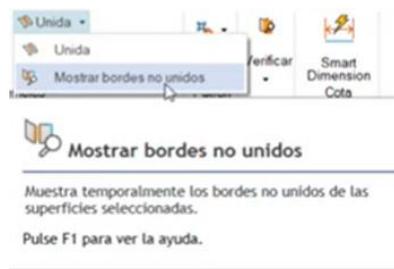


Figura 40. Comando *Unida* de Solid Edge. (Elaboración propia)

Una vez detectados los agujeros, con la herramienta del mismo módulo, llamada *Limitada*, se seleccionan los agujeros o zonas no cerradas, y *Limitada* los rellena.

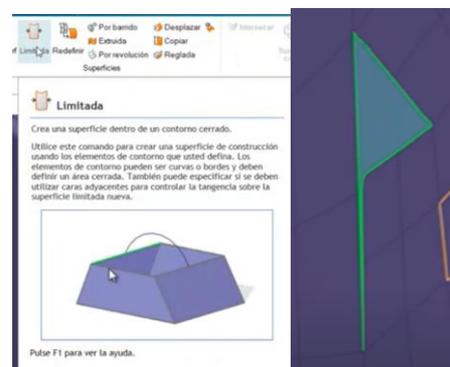


Figura 41. Comando *Limitada* de Solid Edge. (Cortesía de Silvia Fernández Villamarín)

Finalmente, con *Unida*, unes la superficie transferida con las nuevas zonas creadas por limitada. Tras esto, el programa ya detecta un sólido, y puede modelarlo como tal. La pieza se volverá de color gris cuando esto ocurra.

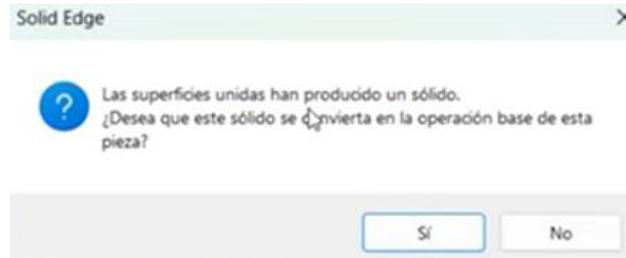


Figura 42. Aviso de conversión de superficie a pieza de Solid Edge. (Elaboración propia)

El resultado final de la transferencia de las piezas a Solid Edge quedó así:

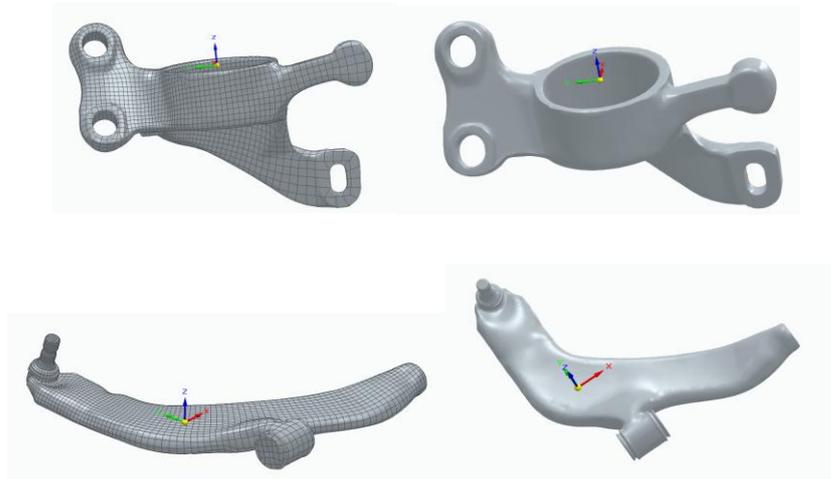


Figura 43. Modelos 3D CAD de ambas piezas. (Elaboración propia)

3.6. Optimización y diseño generativo:

Debido a múltiples contratiempos, al esfuerzo autodidacta por aprender a manejar VXelements que llevó un mes entero y a la complejidad de la geometría de los componentes, para poder cumplir con los plazos, sólo se optimizará una de las dos piezas seleccionadas. En adelante, sólo se trabajará con el **brazo de suspensión**.

3.6.1. Cálculo de casos:

Teniendo en cuenta los datos del BMW SDRIV X1 A, 110 kW que el concesionario facilitó, y que CHATGPT completó:

Distancia entre eje delantero y trasero = $L = 2.65 \text{ m}$	Aceleración máxima del vehículo = $Acc = (2500/873) \text{ m/s}^2$
Ancho del eje = Track width = $t = 1.821 \text{ m}$	Coefficiente de resistencia aerodinámica = $Cd=0.26$
Masa en vacío = Unladen weight = $Mc = 1516 \text{ kg}$	$h_{aero} = 0.95 \text{ m}$
Masa Máxima = $Mmax = 2065 \text{ kg}$	Distancia entre centro de gravedad y eje trasero = $L_f = V$
Altura centro de masas = $h = 0.65 \text{ m}$	$h_r = XX$
Velocidad máxima del vehículo = $Vmax = 205*(1000/3600) = 56.94 \text{ m/s}$	$K_{\theta} = vv$

Tabla 01. Datos del BMW SDRIV X1 A, 110kW. (Elaboración propia)

Se estudiaron cuáles son los casos en los que los coches sufren los esfuerzos más extremos, teniendo en cuenta que el brazo de suspensión del coche es trasero. A partir de estudios similares a brazos de suspensión (Maninas, 2024), se llegó a la conclusión de que son los siguientes cuatro:

- Caso de cargas 1: frenazo brusco cuando el coche iba a máxima velocidad hacia delante cuesta arriba (por ser el brazo trasero) en una pendiente de inclinación mínima.
- Caso de cargas 2: frenazo brusco cuando el coche iba a la máxima velocidad posible hacia atrás en una cuesta de inclinación a determinar.
- Caso de cargas 3: toma de una curva cerrada (radio a determinar) a máxima velocidad, estudiando la rueda exterior a la curva.

- Caso de cargas 4: toma de una curva cerrada (radio a determinar) a máxima velocidad, estudiando la rueda interior a la curva.

3.6.1.1 Caso de cargas 1:

Este vehículo es de tracción delantera; no obstante, se consideró que la distribución de peso sería del 50% delante y 50% detrás durante el frenado del vehículo. Como datos a tener en cuenta: el brazo de suspensión que se trabaja en este TFG es trasero y la pendiente se consideró mínima (1°) para asegurar la mayor velocidad del vehículo y, por ende, el mayor frenado posible.

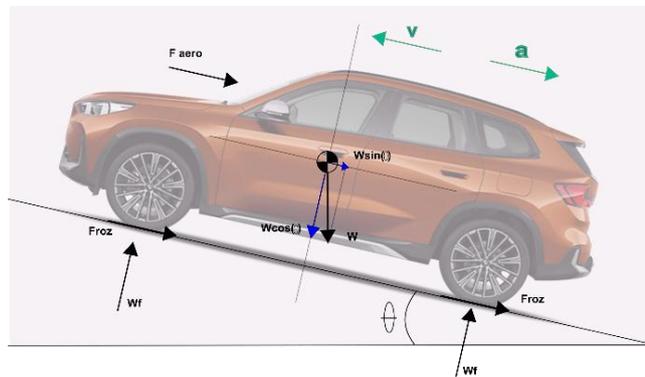


Figura 44. Fuerzas en caso 1 sobre el vehículo BMW SDRIV X1 A, 110 kW. (Elaboración propia)

Se usaron las siguientes fórmulas del libro de *Fundamentals of the vehicle dynamics*, de Gillespie (Gillespie, s. f.):

$$A_f = 1.6 + 0.00056 * (M_c - 765) \tag{1}$$

$$F_{aero} = \frac{1}{2} * \rho_{aire} * C_d * A_f * V_{max}^2 \tag{2}$$

$$W_f * L + F_{aero} * h_{aero} - M_{max} * d_x * h + W * \sin(\theta) * h - W * \cos(\theta) * l_t = 0 \tag{3}$$

La ecuación 3 se realiza tomando el momento desde el eje trasero del coche.

Para obtener mayores fuerzas, usamos el mayor coeficiente de rozamiento posible:

Surface Condition	Friction Coefficient (μ)
Wet Asphalt	0.5
Dry Asphalt	0.8
Gravel	0.4
Ice	0.1

Figura 45. Coeficientes de fricción máximos. (Maninas, 2024)

A continuación, se presenta el código completo usado para la obtención de las fuerzas:

```

dx=Acc+Acc*0.2

lt=1.335; %[m]

theta=1*(pi/180);

densidad_aire=1.2; %[kg/m^3]

W=9.81*Mmax; %peso del vehículo en CDG.

Af=1.6+0.00056*(Mc-765); %Fórmula sacada de Libro

Faero=(1/2)*densidad_aire*Cd*Af*(Vmax)^2

%Calculamos para máxima masa, para máximos resultados trabajar.

syms Wf

Ec1=Wf*L+Faero*haero-Mmax*dx*h+W*sin(theta)*h-W*cos(theta)*lt==0;

Sol=vpa(solve(Ec1,Wf));

Wf_delantera_Caso1=Sol/2 %[N]; %por ser distribución del 50% delante

%Tenemos ya la fuerza vertical sobre las ruedas. Pasamos a calcular la fuerza en
horizontal: la de fricción con el suelo:

Coeficiente_friccion_asfalto_mas_alto=0.8;

F_fricc_suelo_Caso1=Wf_delantera_Caso1*Coeficiente_friccion_asfalto_mas_alto

```

Tabla 02. Código de MATLAB para el Caso de Cargas 1. (Elaboración propia)

Se obtuvieron las siguientes magnitudes en valor absoluto:

$$W_f = 5702.5471 \text{ N}$$

$$F_{roz} = 4562.0337 \text{ N}$$

3.6.1.2 Caso de cargas 2:

Este vehículo es de tracción delantera; por ello, tendría fundamento considerar que la distribución de peso sería del 60% delante y 40% detrás durante el frenado del vehículo. No obstante, se usó una distribución del 50% delante y 50% detrás.

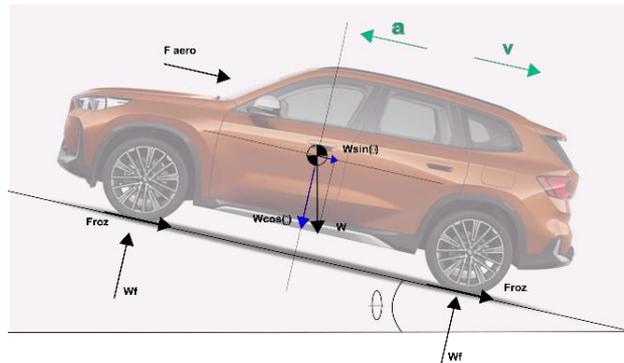


Figura 46. Fuerzas en caso 2 sobre el vehículo BMW SDRIV X1 A, 110 kW. (Elaboración propia)

Se estudió el eje trasero, aplicando la misma fórmula que en el Caso de Cargas 1, pero tomando el momento desde el eje delantero:

En la Tabla 03, se presenta el código de MATLAB usado para calcular la fuerza.

```
dx=-dx
W*sin(theta)*h+W*cos(theta)*lt==0;
Ec2=-Wf*L-Faero*haero+Mmax*dx*h-W*sin(theta)*h+W*cos(theta)*lt==0;
Sol=vpa(solve(Ec2, Wf));
Wf_delantera_Caso2=Sol/2
F_fricc_suelo_Caso2=Wf_delantera_Caso2*Coeficiente_friccion_asfalto_mas_alto
```

Tabla 03. Código de MATLAB para el Caso de Cargas 2. (Elaboración propia)

Se obtuvieron las siguientes magnitudes en valor absoluto:

$$W_f = 3974.998 \text{ N}$$

$$F_{roz} = 3179.998 \text{ N}$$

3.6.1.3 Caso de cargas 3:

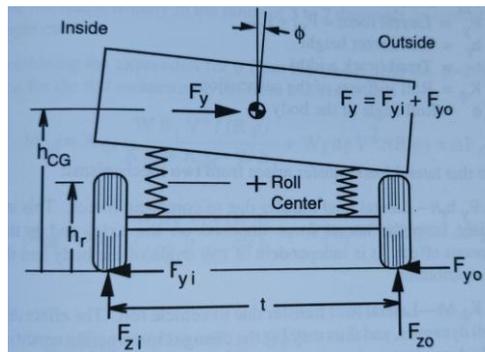


Figura 47. Distribución de fuerzas en la suspensión en una curva. (Gillespie, s. f.)

Por ser tracción delantera, la distribución de cargas debería ser de 60% para el eje delantero y 40% para el trasero; no obstante, para asegurar el caso más desfavorable posible, para los casos 3 y 4, se usó una distribución de cargas de 60% al eje trasero y 40% al eje delantero. Se utilizaron las siguientes fórmulas:

$$\Delta W_{lat} = \frac{M_{max} * a_y * h}{t} \quad (4)$$

$$a_y = \frac{v_{max}^2}{R_{curva}} \quad (5)$$

$$R_{curva} = \frac{v_{max}^2}{g * \mu_{lat}} \quad (6)$$

El radio de curvatura mínimo para que la rueda interna no se despegue del suelo es de 388.88m.

Si fuese una situación ideal, la fuerza vertical sobre cada rueda delantera sería:

$$W = g * M_{max} \quad (7)$$

Por estar teniendo en cuenta una distribución del 60% al eje trasero, el cual se estudia:

$$W_f = W * 0.6 \quad (8)$$

$$W_{f_cada_rueda_ideal} = \frac{W_f}{2} \quad (9)$$

Pero este no es un caso ideal; por ende:

$$W_{f_rueda_exterior} = W_{f_cada_rueda_ideal} + \frac{\Delta W_{lat}}{2} \quad (10)$$

Se aplica un coeficiente de rozamiento lateral del 85%:

$$F_{lat_rueda_exterior} = W_{f_rueda_exterior} * \mu_{lat_suelo} \quad (11)$$

Se obtienen las magnitudes de fuerzas en valor absoluto siguientes:

$$W_{f_rueda_exterior} = 9150.4225 \text{ N}$$

$$F_{lat_rueda_exterior} = 3004.1675 \text{ N}$$

3.6.1.4 Caso de cargas 4:

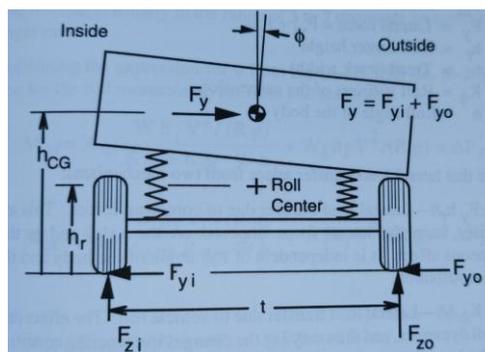


Figura 48. Distribución de fuerzas en la suspensión en una curva. (Gillespie, s. f.)

Con las mismas fórmulas del caso 3, desde la 4 hasta la 9, se continúa el cálculo de la siguiente manera:

$$W_{f_rueda_interior} = W_{f_rueda_ideal} - \frac{\Delta W_{lat}}{2} \quad (12)$$

$$F_{lat_rueda_interior} = W_{f_rueda_interior} * \mu_{lat_suelo} \quad (13)$$

Obtenemos las siguientes magnitudes de las fuerzas en valor absoluto:

$$W_{f_rueda_exterior} = 3004.1675 \text{ N}$$

$$F_{lat_rueda_exterior} = 2553.5424 \text{ N}$$

3.6.2. Selección de material:

Teniendo en cuenta la información recopilada sobre los brazos de suspensión, los materiales más comunes de los que suelen hacerse, sobre todo en BMW, son: el aluminio (el más usado, el 7075-T6), el acero y las aleaciones férreas.

Al realizar un análisis inicial de los cuatro casos antes descritos usando el aluminio como material, se apreciaba cómo la pieza aguantaba sin problemas los esfuerzos. Ahora, a la hora de realizar los mismos análisis en el acero que viene por defecto en la biblioteca de materiales de Solid Edge, se comprobó que el brazo de suspensión no aguantaría los esfuerzos en ninguno de los casos. Se empezó, así, a buscar aleaciones que pudieran servir para el componente.

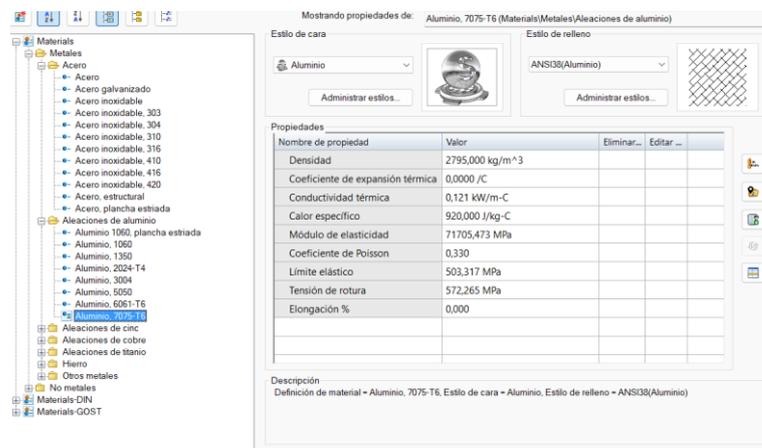


Figura 49. Aluminio 7075-T6 de la biblioteca de Solid Edge. (Elaboración propia)

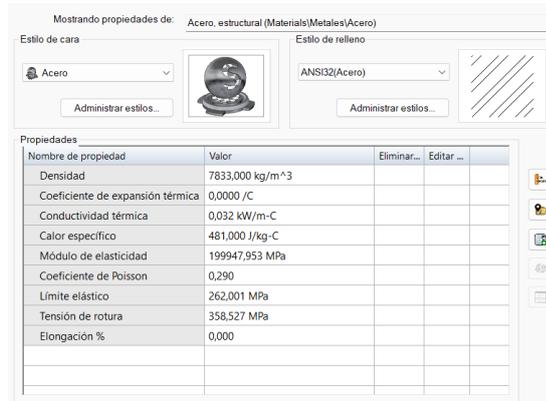


Figura 50. Acero por defecto de Solid Edge. (Elaboración propia)

Para encontrar una aleación de acero que cumpliera con las especificaciones necesarias para aguantar los esfuerzos y las magnitudes de las fuerzas calculadas que sufrirá el brazo de suspensión en su funcionamiento, se usó *Granta EduPack*.

Utilizando como principal requisito a cumplir por el material que tuviera un límite elástico superior a 500MPa, pues en los análisis de los casos, el límite máximo era de 496MPa, y que fueran aleaciones férricas, se añadieron las siguientes restricciones en el buscador del programa:

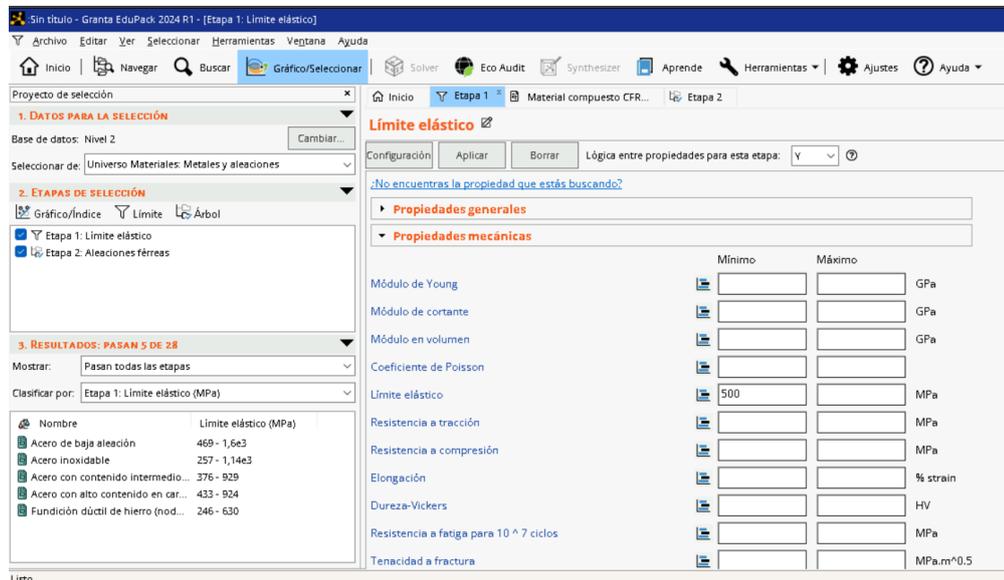


Figura 51. Buscador de Granta EduPack. (Granta-EduPack, s. f.)

Finalmente, se escogió de todas las posibilidades aquél que menos densidad tuviera; de esta forma, el peso sería menor, que es lo que se busca para mejorar la eficiencia del vehículo.

Fundición dúctil de hierro (nodular)

Ver hoja de datos: Todas las propiedades Mostrar/ocultar | Encontrar similar

[Metales y aleaciones](#) > [Férreas](#) >

Descripción

Figura



Leyenda

1. Piza de automóvil hecha con fundición de hierro dúctil (o maleable), se utiliza para piezas que soportan grandes esfuerzos como engranajes y componentes de la suspensión del automóvil © Georg Fischer Automotive AG (CC BY-SA 3.0); 2. Engranajes de diferentes tamaños © ANSYS, Inc.

Figura 52. Fundición dúctil de hierro nodular. (Granta-EduPack, s. f.)

Propiedades generales

Densidad	①	7,05e3	-	7,15e3	kg/m ³
Precio	①	* 0,364	-	0,528	EUR/kg

Propiedades mecánicas

Módulo de Young	①	170	-	180	GPa
Módulo de cortante	①	64	-	71	GPa
Módulo en volumen	①	120	-	140	GPa
Coefficiente de Poisson	①	0,27	-	0,28	
Límite elástico	①	246	-	630	MPa
Resistencia a tracción	①	400	-	900	MPa
Resistencia a compresión	①	* 273	-	639	MPa
Elongación	①	2	-	26	% strain
Dureza-Vickers	①	135	-	290	HV
Resistencia a fatiga para 10 ⁷ ciclos	①	195	-	317	MPa

Resistencia a tracción	(i)	400	-	900	MPa
Resistencia a compresión	(i)	* 273	-	639	MPa
Elongación	(i)	2	-	26	% strain
Dureza-Vickers	(i)	135	-	290	HV
Resistencia a fatiga para 10^7 ciclos	(i)	195	-	317	MPa
Tenacidad a fractura	(i)	23,3	-	51,6	MPa.m ^{0,5}
Coefficiente de pérdida mecánica (tan delta)	(i)	* 6e-4	-	0,0018	
Propiedades térmicas					
Punto de fusión	(i)	1,13e3	-	1,25e3	°C
Máxima temperatura en servicio	(i)	350	-	450	°C
Mínima temperatura en servicio	(i)	* -69,2	-	-0,15	°C
¿Conductor térmico o aislante?	(i)	Buen conductor			
Conductividad térmica	(i)	* 31	-	42	W/m.°C
Calor específico	(i)	460	-	495	J/kg.°C
Coefficiente de expansión térmica	(i)	10	-	12,5	μstrain/°C
Propiedades eléctricas					
¿Conductor eléctrico o aislante?	(i)	Buen conductor			
Resistividad eléctrica	(i)	49	-	56	μohm.cm
Propiedades ópticas					
Transparencia	(i)	Opaco			

Figura 53. Propiedades de la fundición dúctil de hierro nodular. (Granta-EduPack, s. f.)

3.6.3. Análisis del cuerpo de diseño:

Al realizar los análisis y optimizaciones con la pieza original, surgieron varios problemas debido a los ángulos cerrados que había entre los pliegues de la zona que conectaba con la rueda:

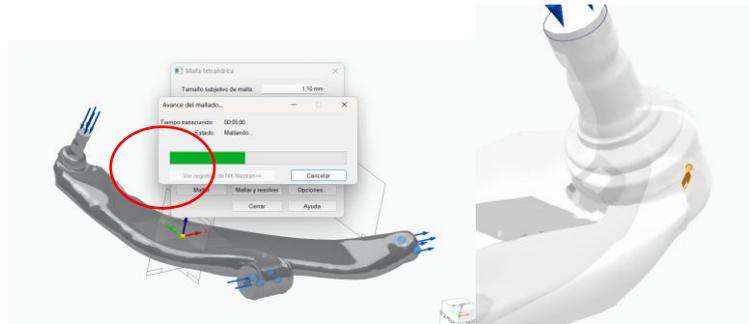


Figura 54. Errores debidos a los pliegues pequeños de la pieza. (Elaboración propia)

Para solucionar esto, se sustituyó la forma cilíndrica con la que se conectaba el brazo a la rueda por un bloque cúbico. El problema de los ángulos desapareció.

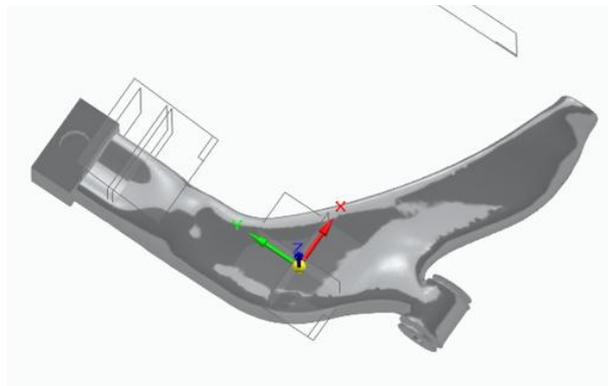


Figura 55. Pieza rediseñada para su correcta optimización. (Elaboración propia)

El haber añadido esta geometría, sustituyendo la otra, sólo supuso 1kg más en la fundición y 0.3kg más en el aluminio respecto a la figura original.

En simulación, es necesario: definir el cuerpo a analizar, añadir las fuerzas a las que está sometido en su tiempo de vida útil, imponer las restricciones sobre el componente y, finalmente, mallarlo. Una vez todo esto se haya hecho, la simulación puede dar comienzo. Hay que tener en cuenta que, si hay cuerpos muy pequeños, el mallado puede no realizarse.

Las restricciones del brazo de suspensión son articuladas como se muestra en la figura:

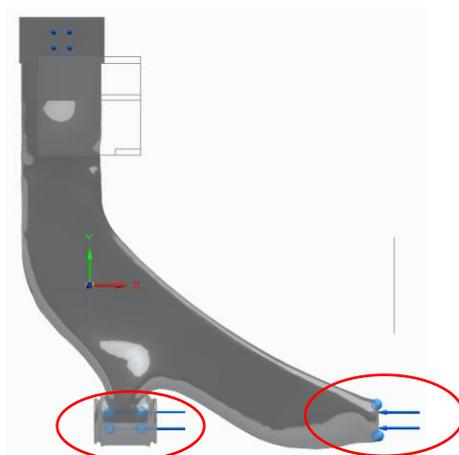


Figura 56. Restricciones y fuerzas sobre la pieza. (Elaboración propia)

En la zona de arriba, en la Figura 55, es donde va conectado el brazo a la rueda; las dos zonas marcadas, son donde se conecta el brazo al chasis.

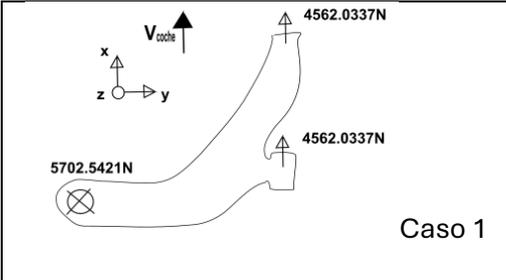
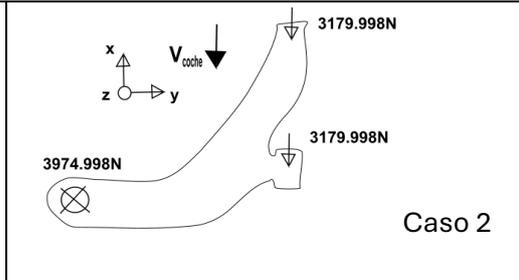
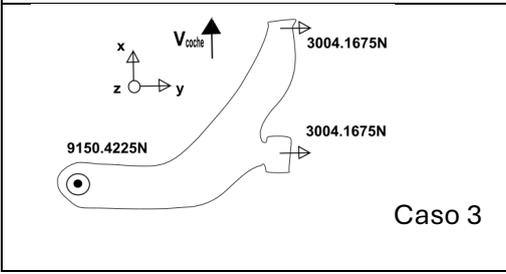
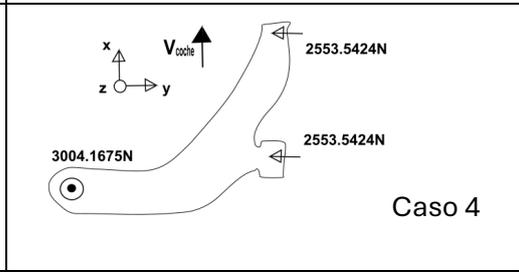
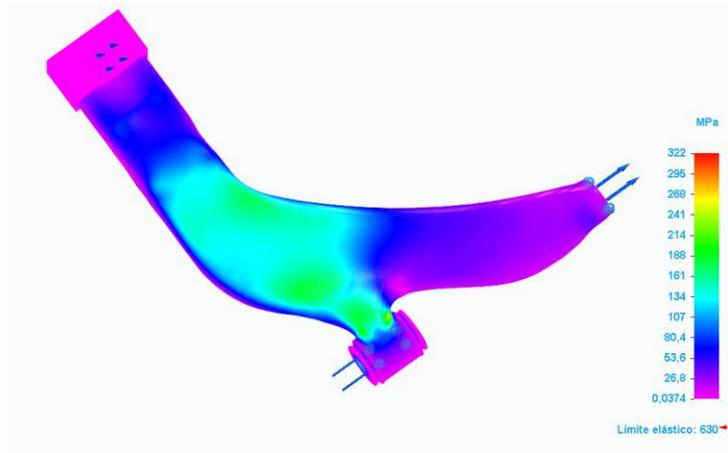
 <p>Caso 1</p>	 <p>Caso 2</p>
 <p>Caso 3</p>	 <p>Caso 4</p>

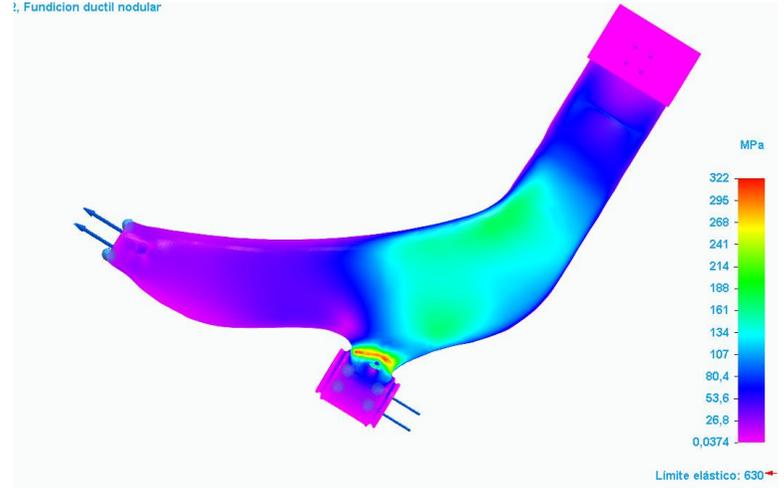
Tabla 04. Todos los casos de carga a analizar. (Elaboración propia)

ANÁLISIS INICIAL PARA FUNDICIÓN DÚCTIL NODULAR DE ACERO

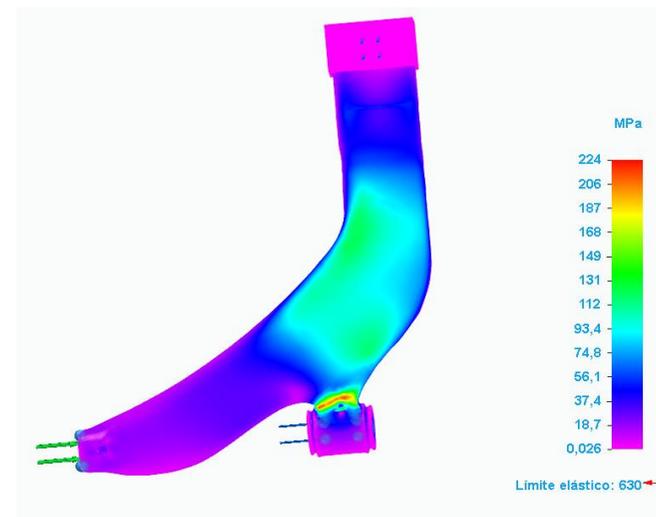
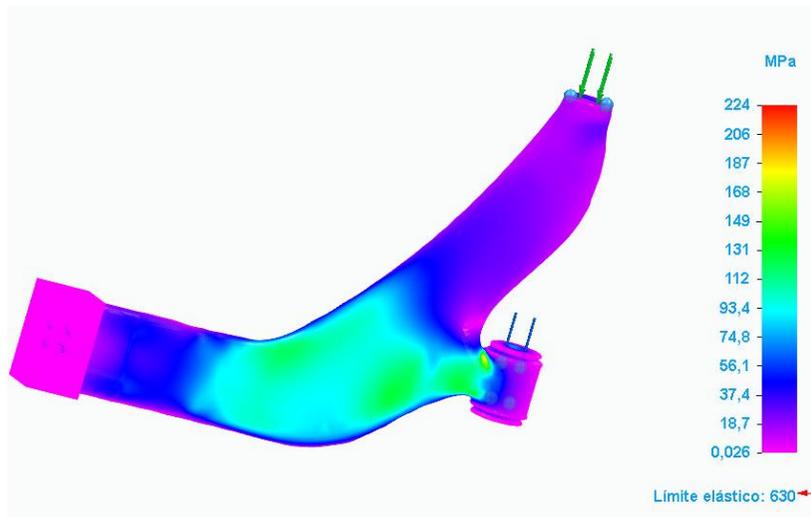
CASO
1



!, Fundicion ductil nodular



CASO
2



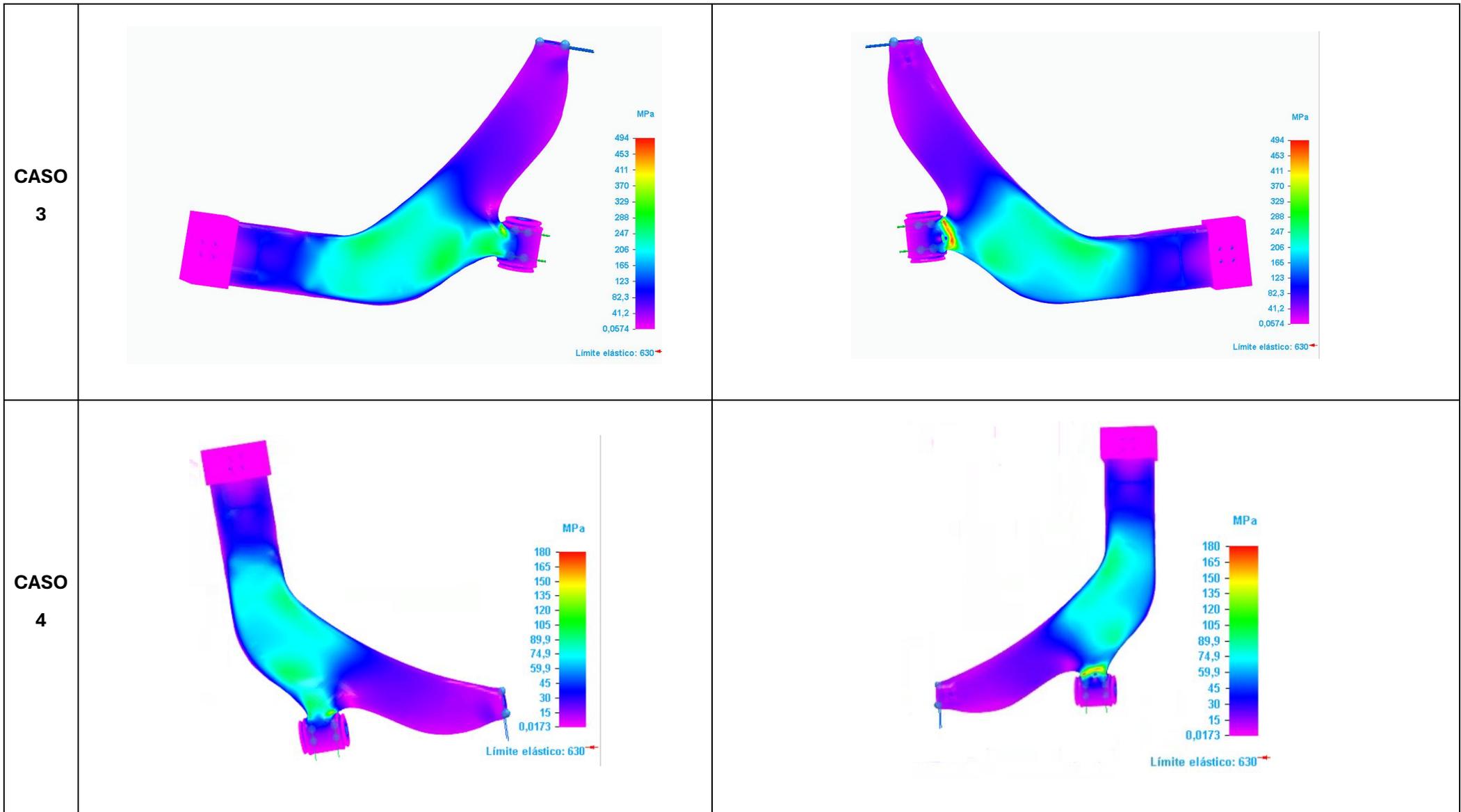
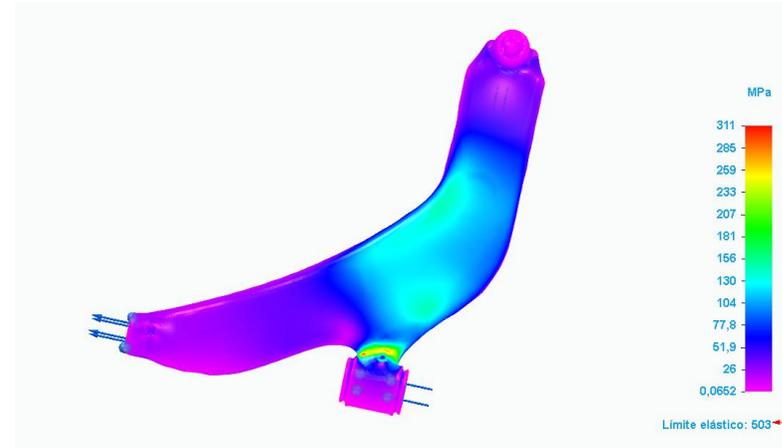
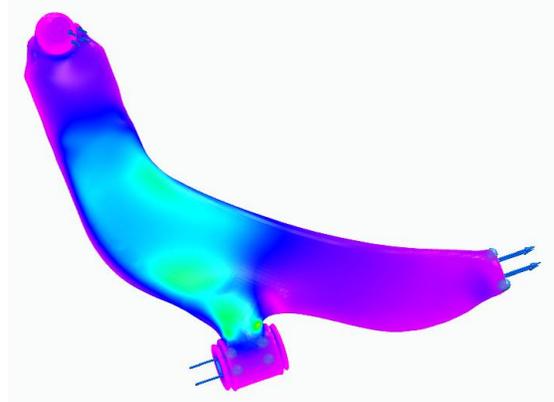


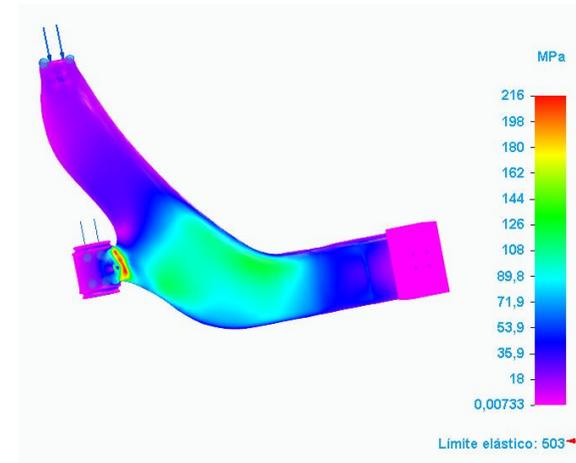
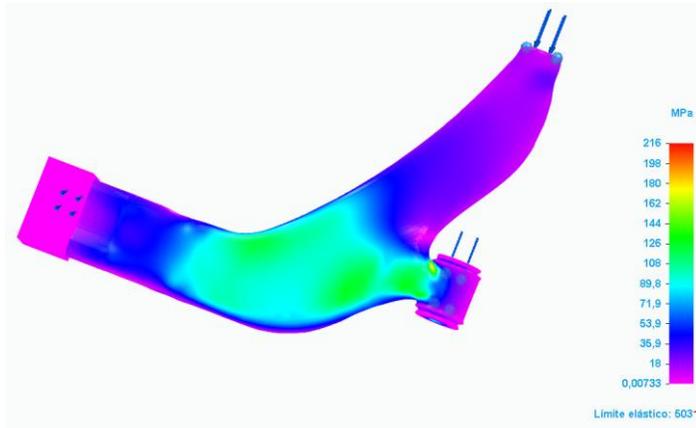
Tabla 05. Análisis iniciales de cada caso de cargas para la pieza de fundición dúctil nodular de acero. (Elaboración propia)

ANÁLISIS INICIAL PARA ALUMINIO

CASO 1



CASO 2



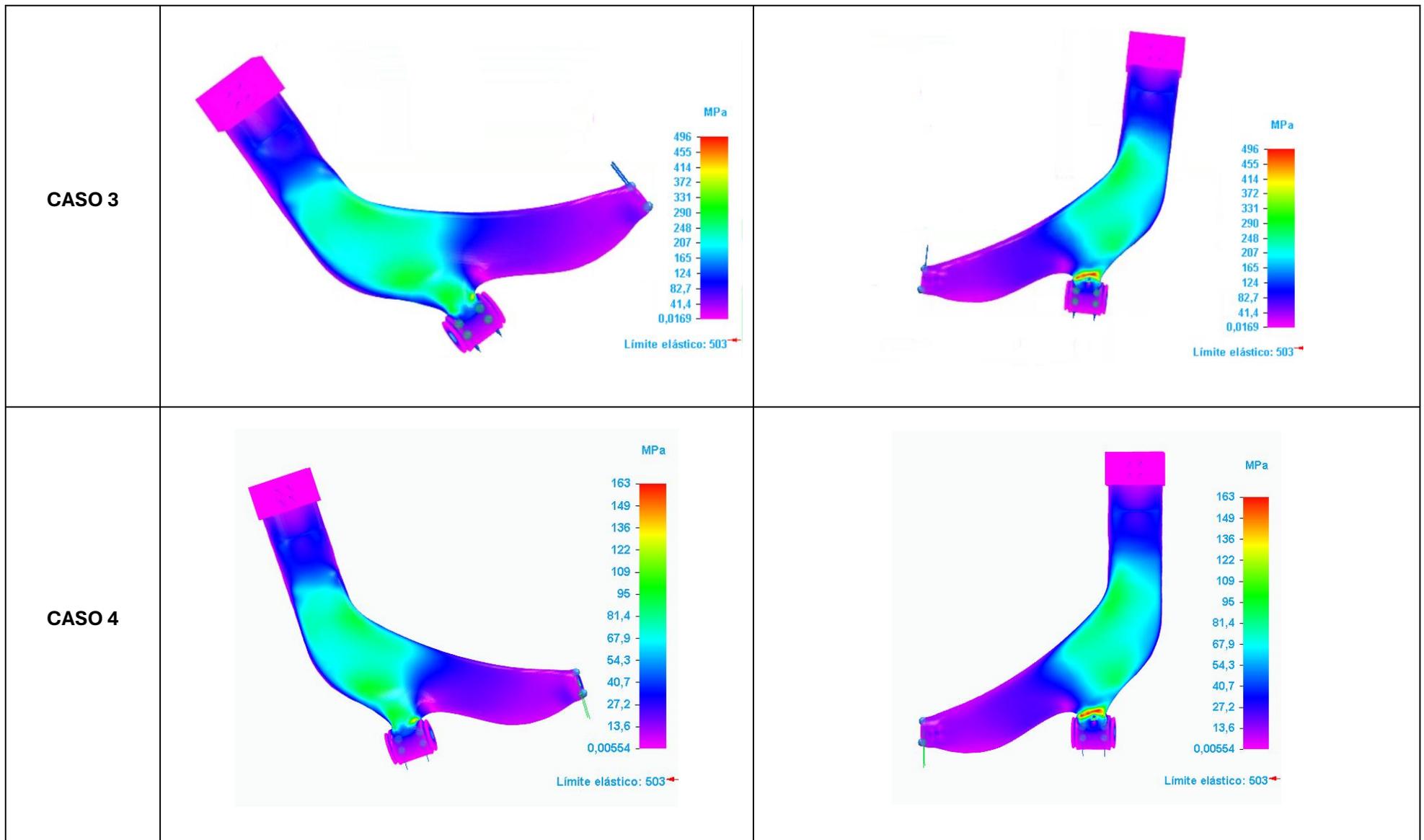


Tabla 06. Análisis iniciales de cada caso de cargas para la pieza de aluminio. (Elaboración propia)

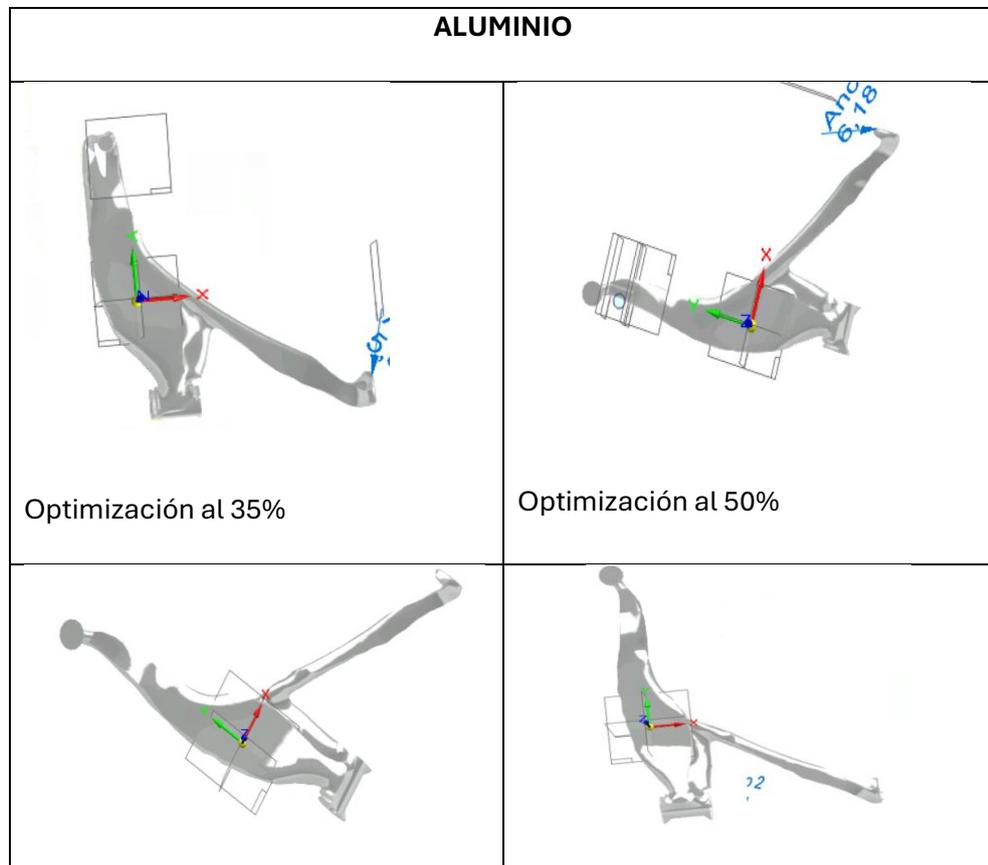
3.6.4. Optimización por reducción de masa:

Tras el análisis preliminar de la pieza original, el procedimiento seguido se estructuró en varias etapas. En primer lugar, se llevó a cabo la optimización mediante una reducción de masa en el módulo de *Diseño Generativo*. A continuación, en el módulo de *Simulación*, la geometría resultante fue evaluada, con el fin de verificar su comportamiento estructural. Si los resultados obtenidos en el análisis eran satisfactorios, se procedía a realizar nuevas iteraciones de optimización con reducciones adicionales de masa. En caso contrario, es decir, si el análisis indicaba que la pieza no soportaría los esfuerzos, se optaba por una optimización menos agresiva partiendo nuevamente de la geometría original.

Las piezas iniciales en ambos materiales han de conservarse en copia en todo momento; ya que, la masa eliminada, no puede recuperarse.

Según qué esfuerzos se muestren en el análisis inicial, se decide realizar la optimización a distintos niveles de reducción de masa. Normalmente, se empezaba con una optimización al 50% para tener noción de cuánto más o cuánto menos se podía seguir reduciendo en peso.

3.6.4.1 Caso 1:



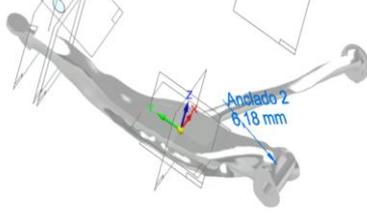
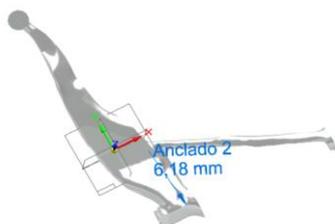
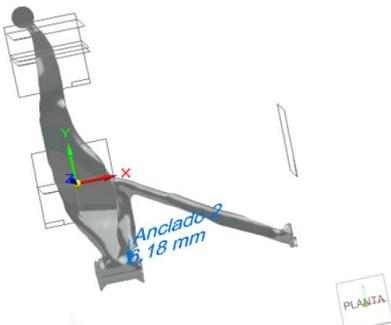
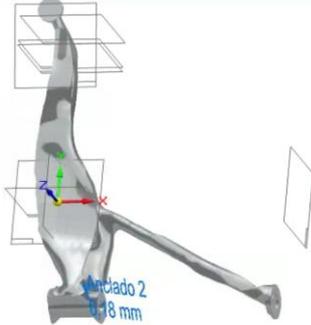
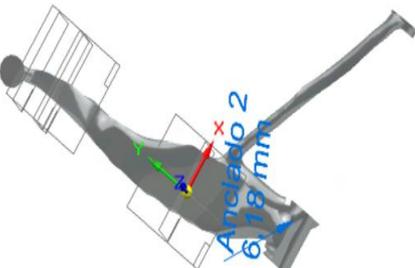
Optimización al 57%	Optimización al 56%
	
Optimización al 58%	Optimización al 61%

Tabla 07. Todas las optimizaciones realizadas con aluminio en el Caso 1. (Elaboración propia)

FUNDICIÓN DÚCTIL DE HIERRO NODULAR	
	
Optimización al 58%	Optimización al 59%
	
Optimización al 64%	Optimización al 63%

 <p>Optimización 62%</p>	
---	--

Tabla 08. Todas las optimizaciones realizadas con fundición en el Caso 1. (Elaboración propia)

Se descubrió la reducción de masa límite de la pieza: 64% de reducción de masa; a partir de ahí, una de las zonas de unión al chasis desaparece, dejando de ser adecuada según los criterios de diseño.

3.6.4.2 Caso 2:

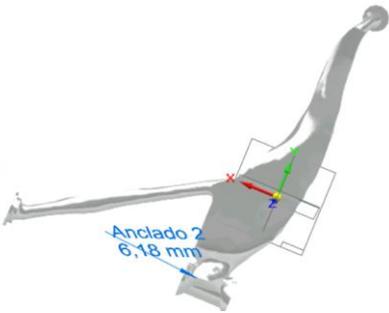
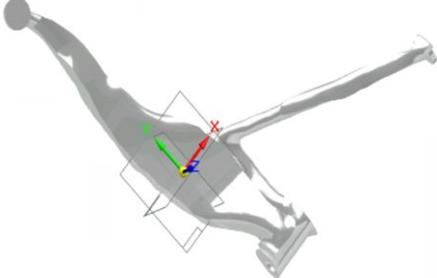
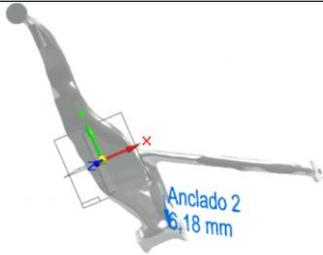
ALUMINIO	
 <p>Optimización al 58%</p>	 <p>Optimización al 59%</p>
 <p>Optimización al 60%</p>	

Tabla 09. Todas las optimizaciones realizadas con aluminio en el Caso 2. (Elaboración propia)

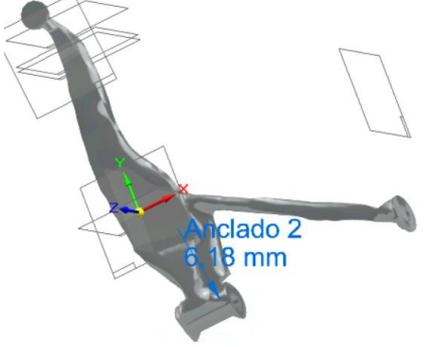
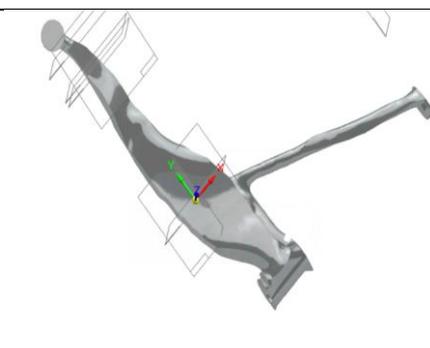
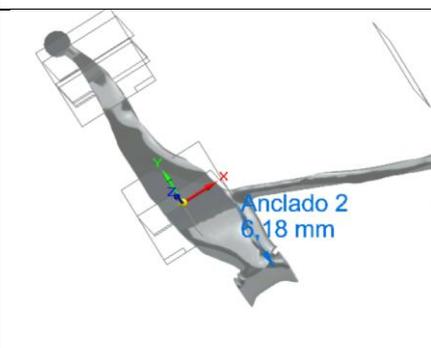
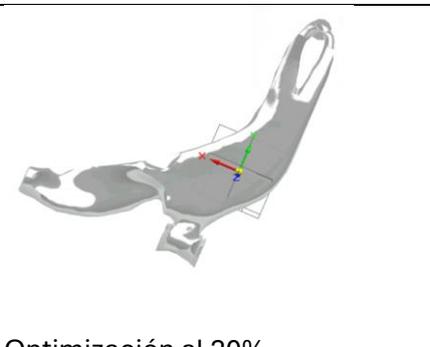
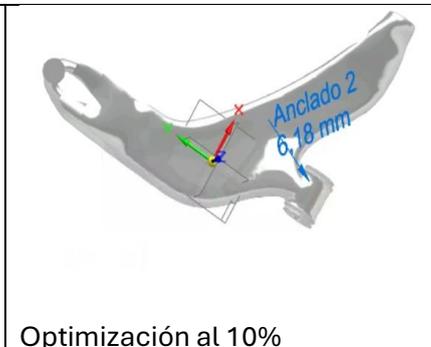
FUNDICIÓN DÚCTIL DE HIERRO NODULAR	
 <p>Optimización 59%</p>	 <p>Optimización al 63%</p>
 <p>Optimización 62%</p>	 <p>Optimización 61%</p>

Tabla 10. Todas las optimizaciones realizadas con fundición en el Caso 2. (Elaboración propia)

3.6.4.3 Caso 3:

ALUMINIO	
 <p>Optimización al 20%</p>	 <p>Optimización al 10%</p>

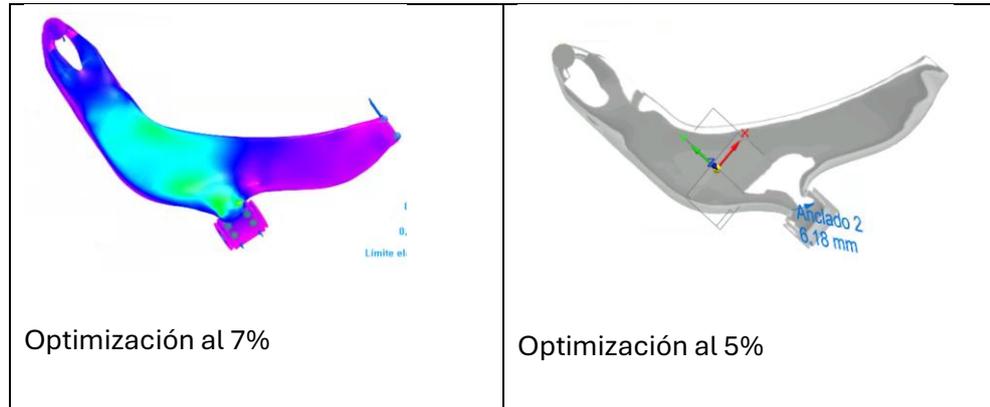


Tabla 11. Todas las optimizaciones realizadas con aluminio en el Caso 3. (Elaboración propia)

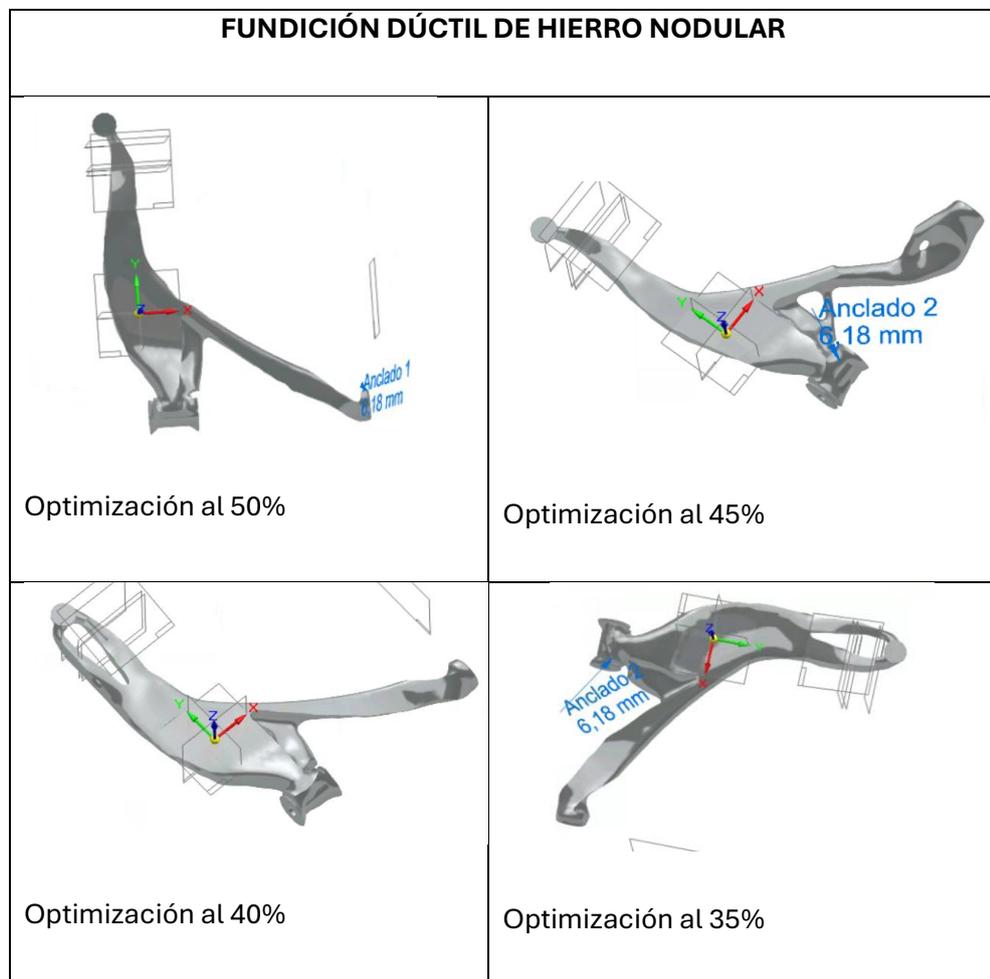


Tabla 12. Todas las optimizaciones realizadas con fundición en el Caso 3. (Elaboración propia)

3.6.4.4 Caso 4:

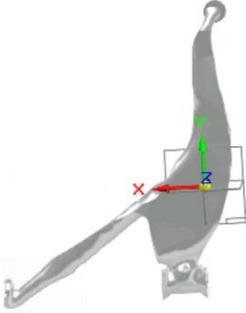
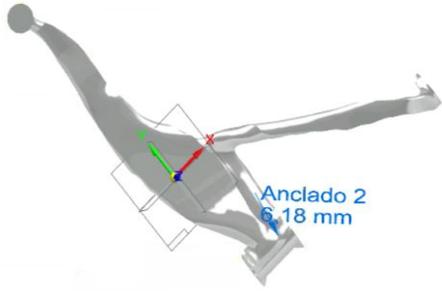
ALUMINIO	
 <p>Optimización al 50%</p>	 <p>Optimización al 57%</p>

Tabla 13. Todas las optimizaciones realizadas con aluminio en el Caso 4. (Elaboración propia)

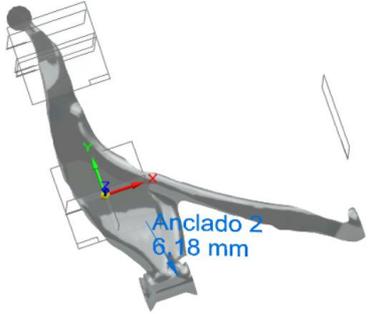
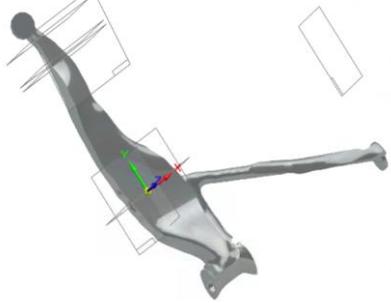
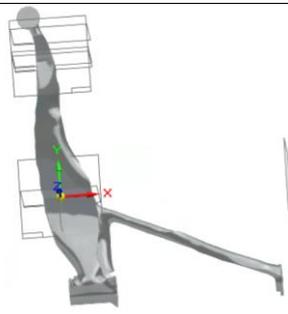
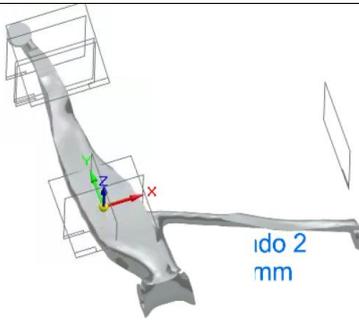
FUNDICIÓN DÚCTIL DE HIERRO NODULAR	
 <p>Optimización al 50%</p>	 <p>Optimización al 60%</p>
 <p>Optimización al 63%</p>	 <p>Optimización al 62%</p>

Tabla 14. Todas las optimizaciones realizadas con fundición en el Caso 4. (Elaboración propia)

Después de cada optimización, se realizó un análisis para ver si había que seguir optimizando más o si, por el contrario, había que reducir la masa en menor proporción.

En el apartado 3.6.6, se presentan todos los análisis realizados a cada sólido optimizado.

3.6.5. Obtener cuerpo de diseño único:

En más de una ocasión, puede ocurrir que el programa no deje analizar una estructura optimizada debido a las tolerancias dimensionales que se estén teniendo en cuenta.

Normalmente, hay unas tolerancias predeterminadas que siempre tienen los sólidos tras ser optimizados. El problema es que esas tolerancias son demasiado grandes muchas veces y, además, existen dos cuerpos: el inicial y el optimizado.

Si directamente se hace el análisis en Simulación de ese objeto optimizado, es muy probable que dé error al iniciar el mallado del objeto por esta misma razón. Por ello, el proceso correcto a seguir es:

Se ha de convertir a la pieza original en un cuerpo de construcción (no simulable) y a la optimizada hay que convertirla en el único cuerpo de diseño (sí simulable) con unas tolerancias menores para poder analizarla.

Para conseguir reducir las tolerancias, se debe convertir el cuerpo de diseño de la pieza optimizada en una malla:

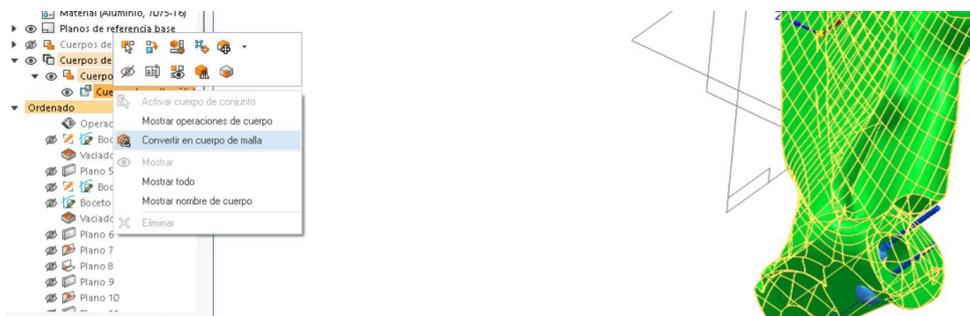


Figura 57. Conversión a malla del sólido optimizado. (Elaboración propia)

Quando se convierta en malla, se pondrá de color morado:

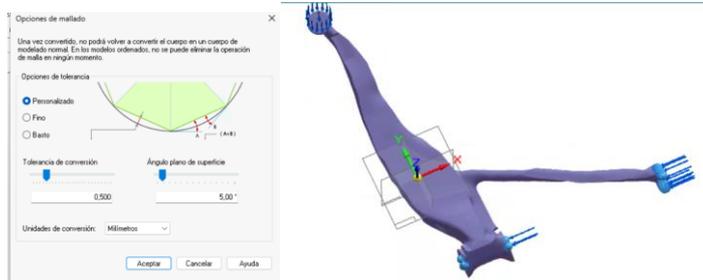


Figura 58. Tolerancias de mallaado y pieza final. (Elaboración propia)

Se vuelve a convertir en un sólido de diseño, pero con tolerancias menores:

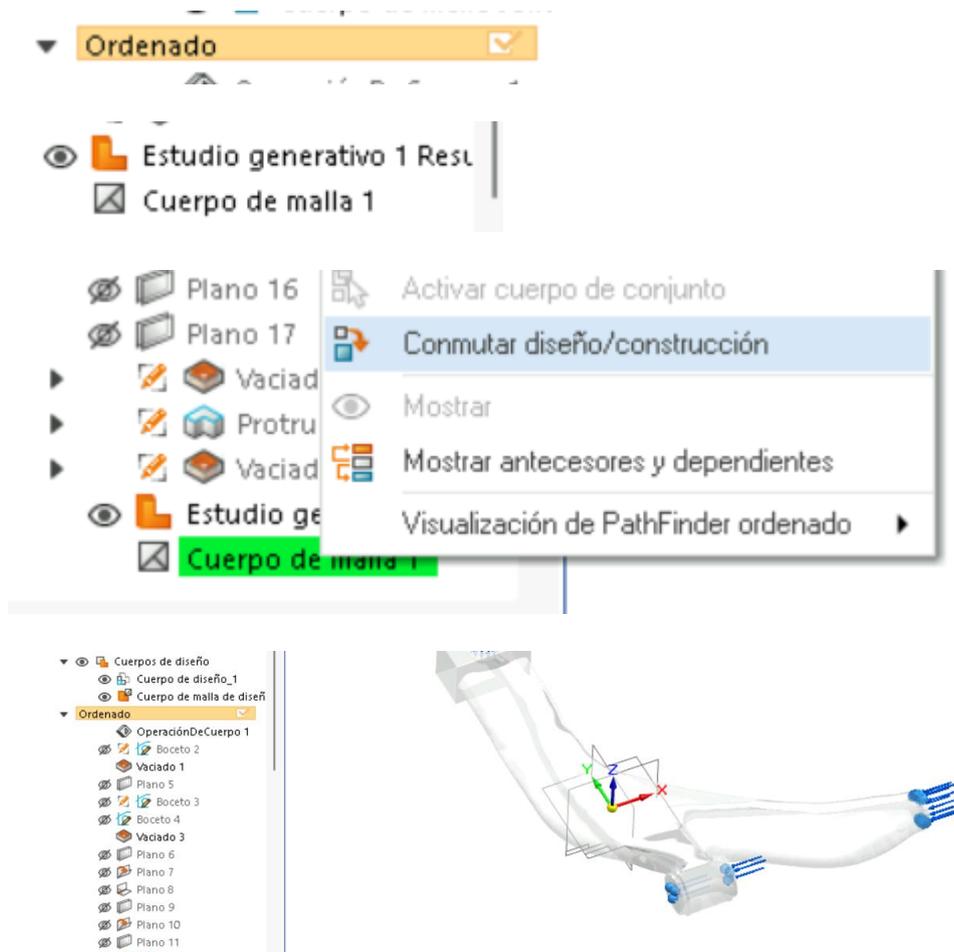


Figura 59. Conversión de malla a sólido de la pieza optimizada. (Elaboración propia)

Ahora, hay dos cuerpos de diseño: la pieza original y la optimizada con menores tolerancias.

Finalmente, se convierte el sólido inicial en un cuerpo de construcción

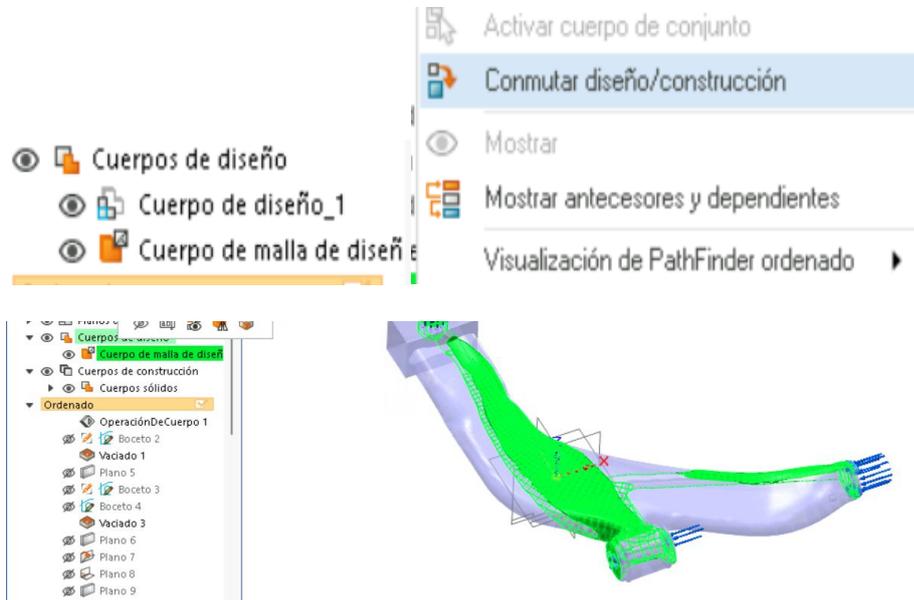
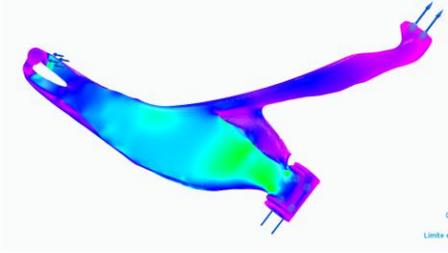
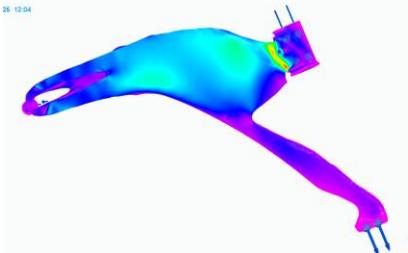
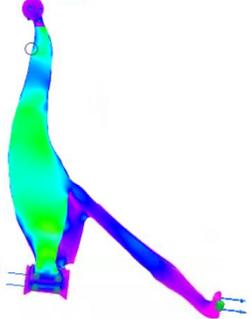
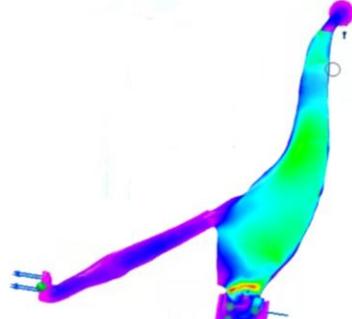


Figura 60. Conversión de la pieza inicial a sólido de construcción. (Elaboración propia)

3.6.6. Análisis y verificación del cuerpo optimizado:

En las siguientes páginas, se presentan los análisis de todos los cuerpos optimizados para diferentes reducciones de masa, para ambos materiales.

3.6.6.1 Caso de cargas 1:

ALUMINIO			
Al 35%			<p>MPa</p> <p>161 131 101 71 41 11 181 150 120 0,3 0,2 0,1 222</p> <p>stfco: 503</p>
Al 50%			<p>MPa</p> <p>397 364 331 298 265 232 199 166 133 99,6 66,5 33,5 0,431</p> <p>elástico: 503</p>

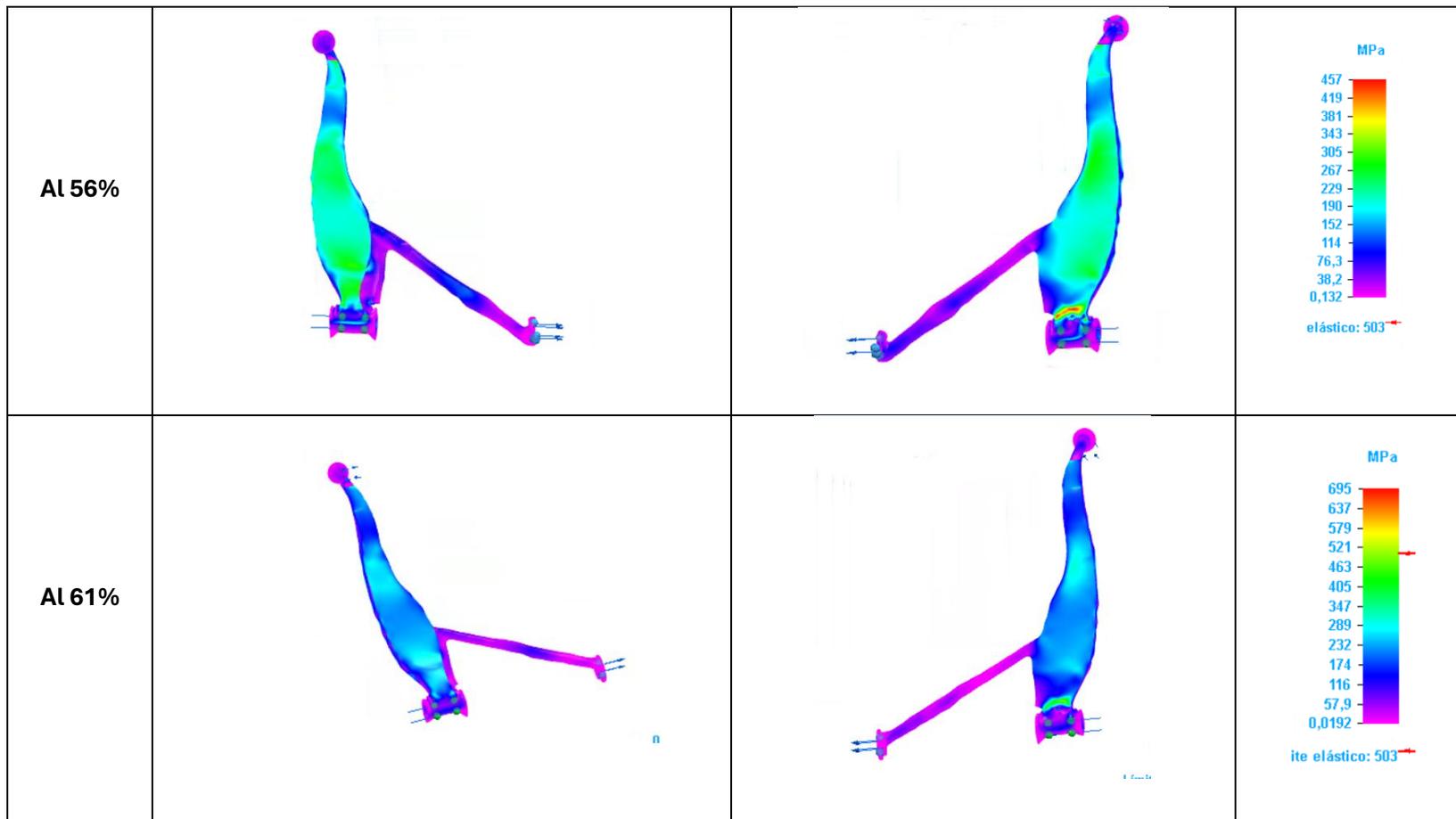
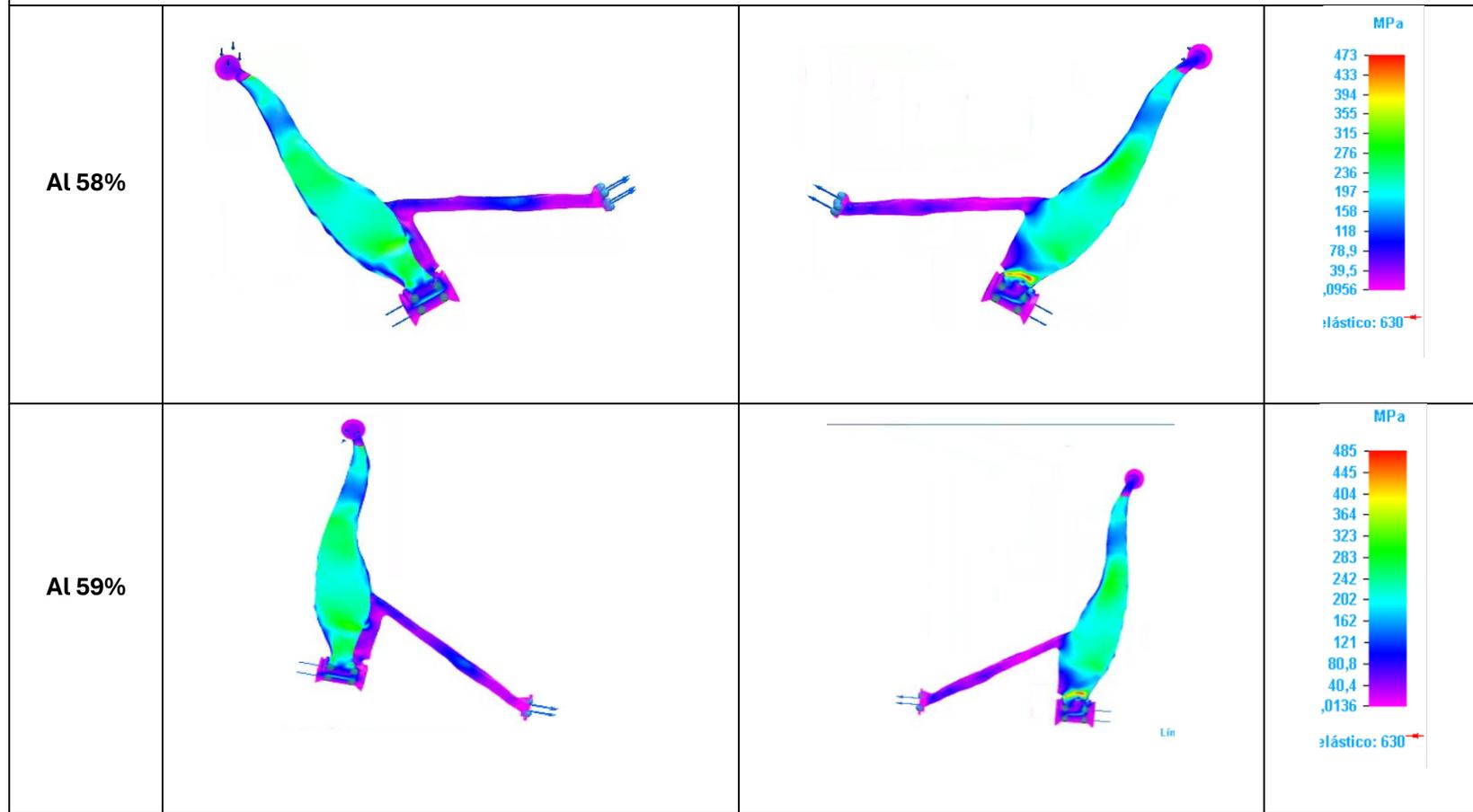


Tabla 15. Análisis de optimizaciones del Caso 1 en aluminio. (Elaboración propia)

FUNDICIÓN NODULAR DE HIERRO DÚCTIL



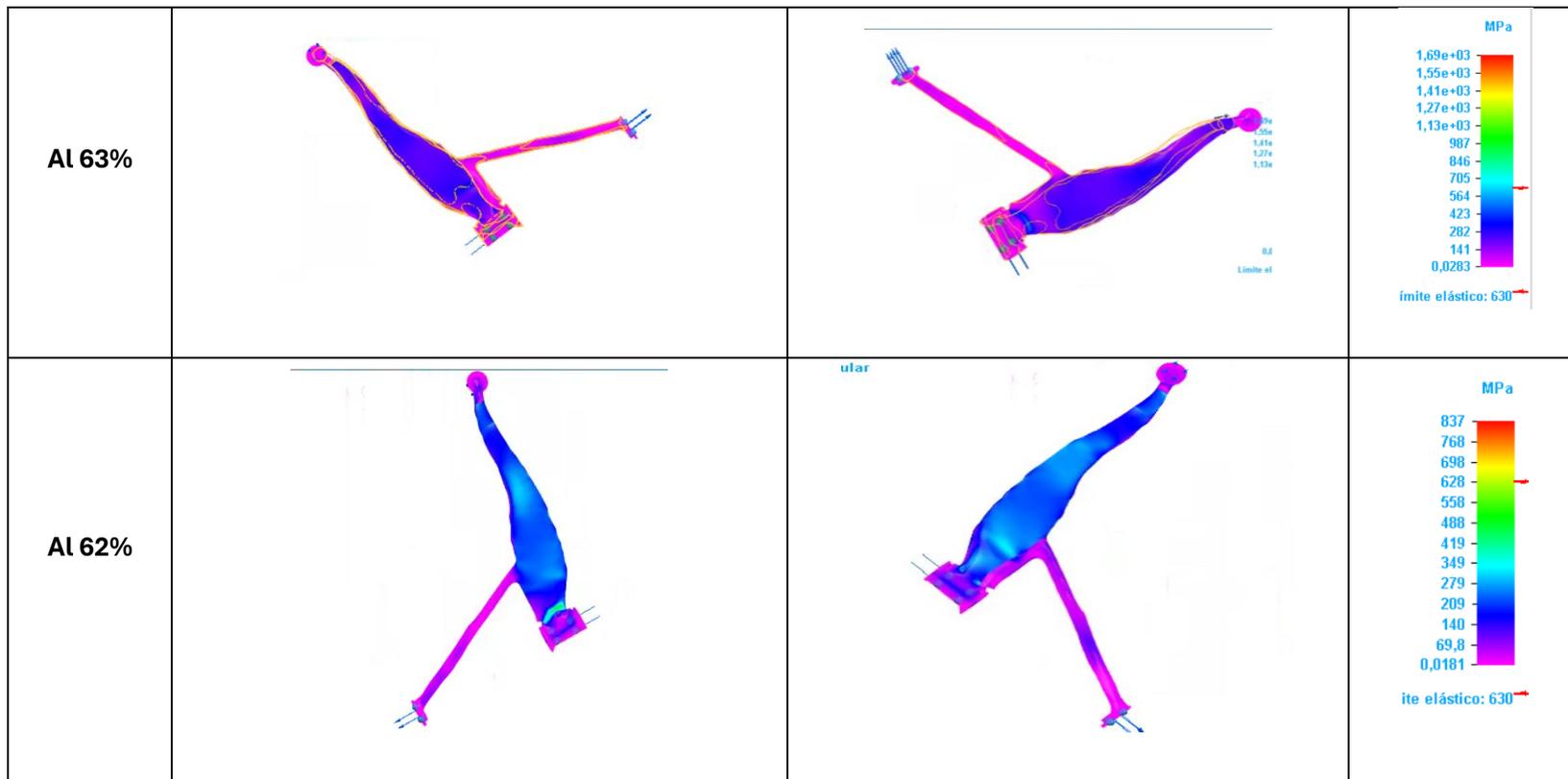


Tabla 16. Análisis de optimizaciones del Caso 1 en fundición. (Elaboración propia)

3.6.6.2 Caso de cargas 2:

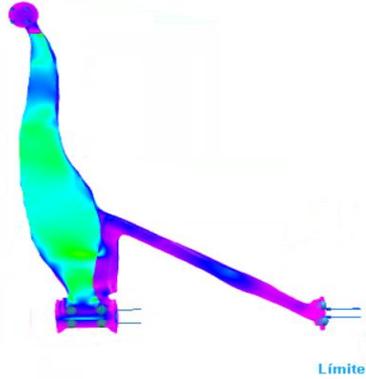
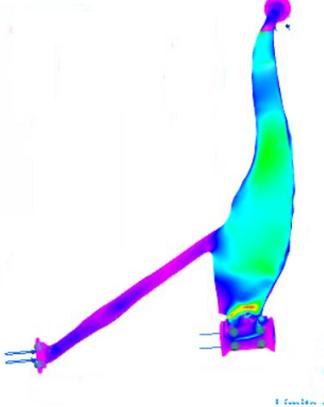
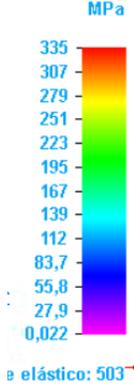
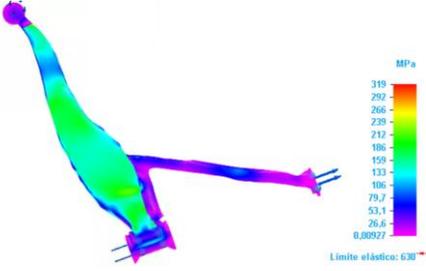
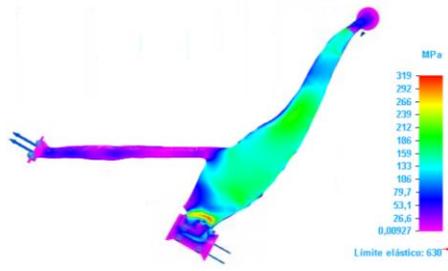
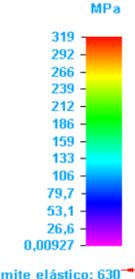
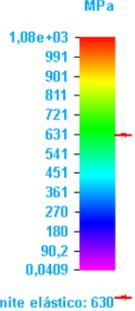
ALUMINIO		
Al 58%		
		
Al 59%	<p>Los análisis realizados a los modelos con una reducción de masa igual o superior al 59% no podían ejecutarse en el programa. Por esto, sólo pudo obtenerse información referente al análisis de la pieza de aluminio con una reducción de masa del 58% en el caso 2.</p>	

Tabla 17. Análisis de optimizaciones del Caso 2 en aluminio. (Elaboración propia)

FUNDICIÓN

<p style="text-align: center;">Al 59%</p>			
<p style="text-align: center;">Al 63%</p>			

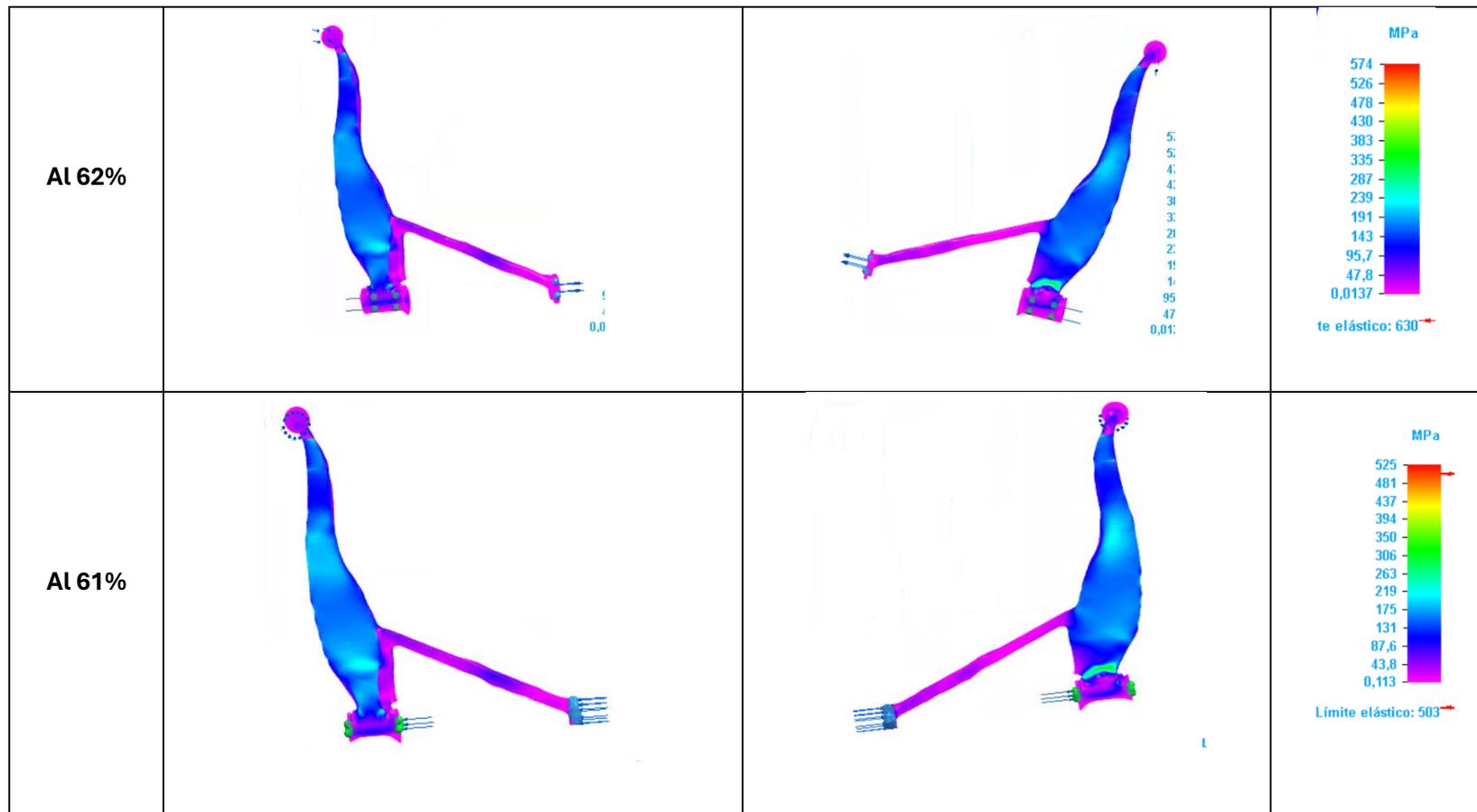
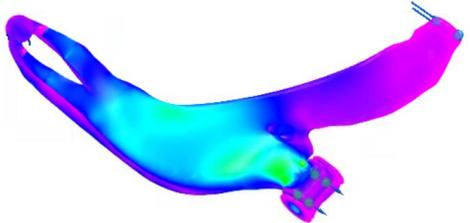
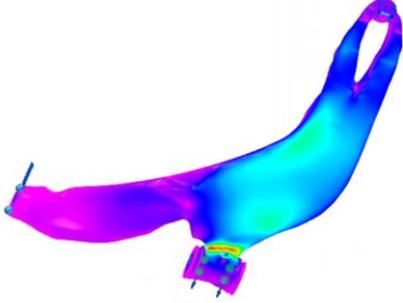
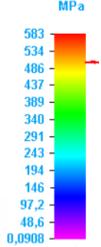
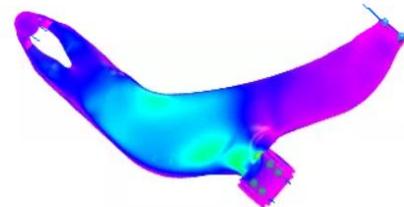
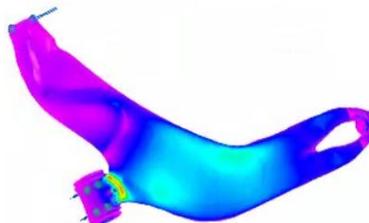
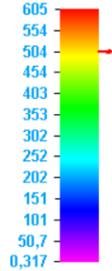


Tabla 18. Análisis de optimizaciones del Caso 2 en fundición. (Elaboración propia)

3.6.6.3 Caso de cargas 3:

ALUMINIO			
<p>Al 20%</p>			<p>MPa</p>  <p>583 534 486 437 389 340 291 243 194 146 97,2 48,6 0,0908</p> <p>Límite elástico: 503</p>
<p>Al 10%</p>			<p>MPa</p>  <p>605 554 504 454 403 353 302 252 202 151 101 50,7 0,317</p> <p>límite elástico: 503</p>

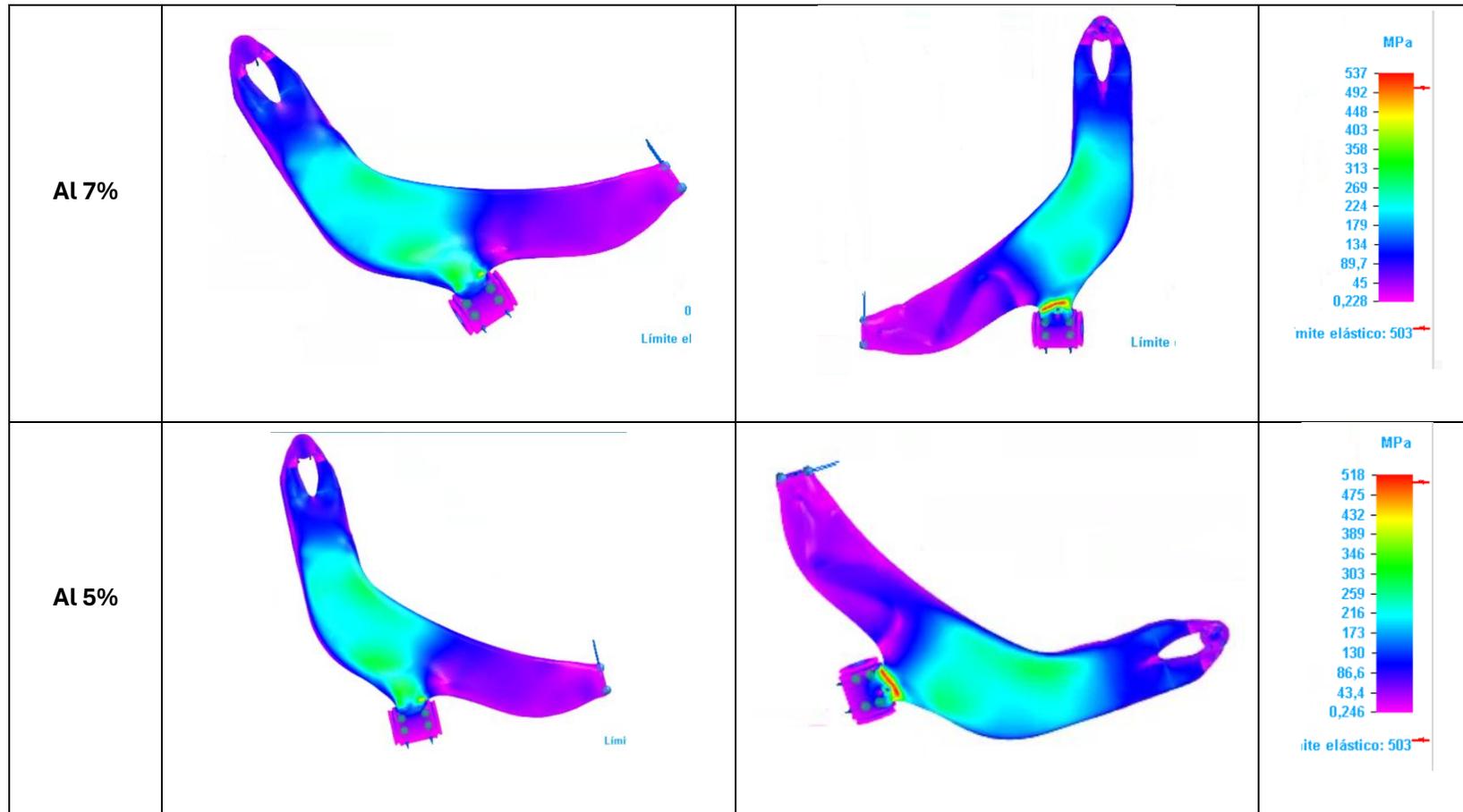
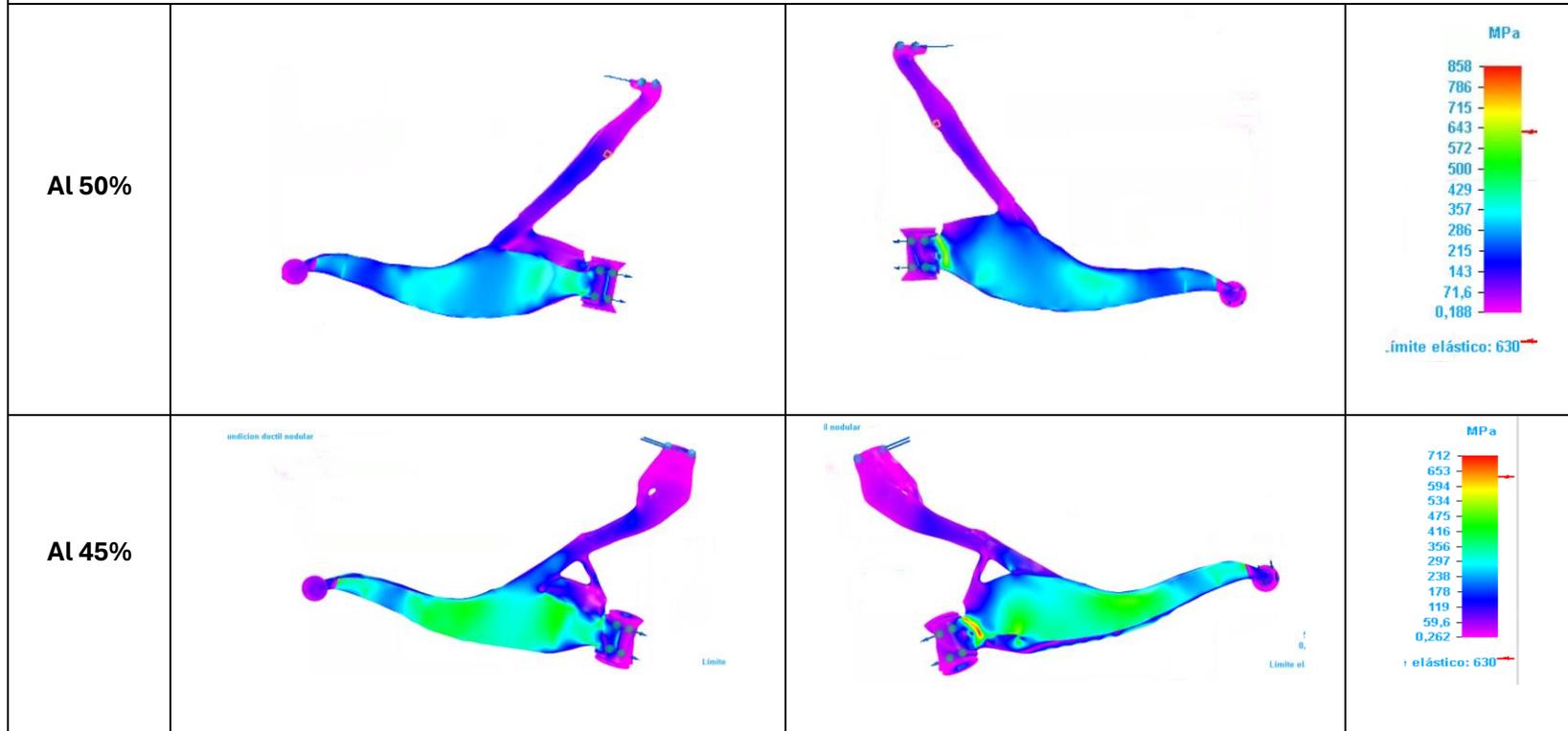


Tabla 19. Análisis de optimizaciones del Caso 3 en aluminio. (Elaboración propia)

FUNDICIÓN



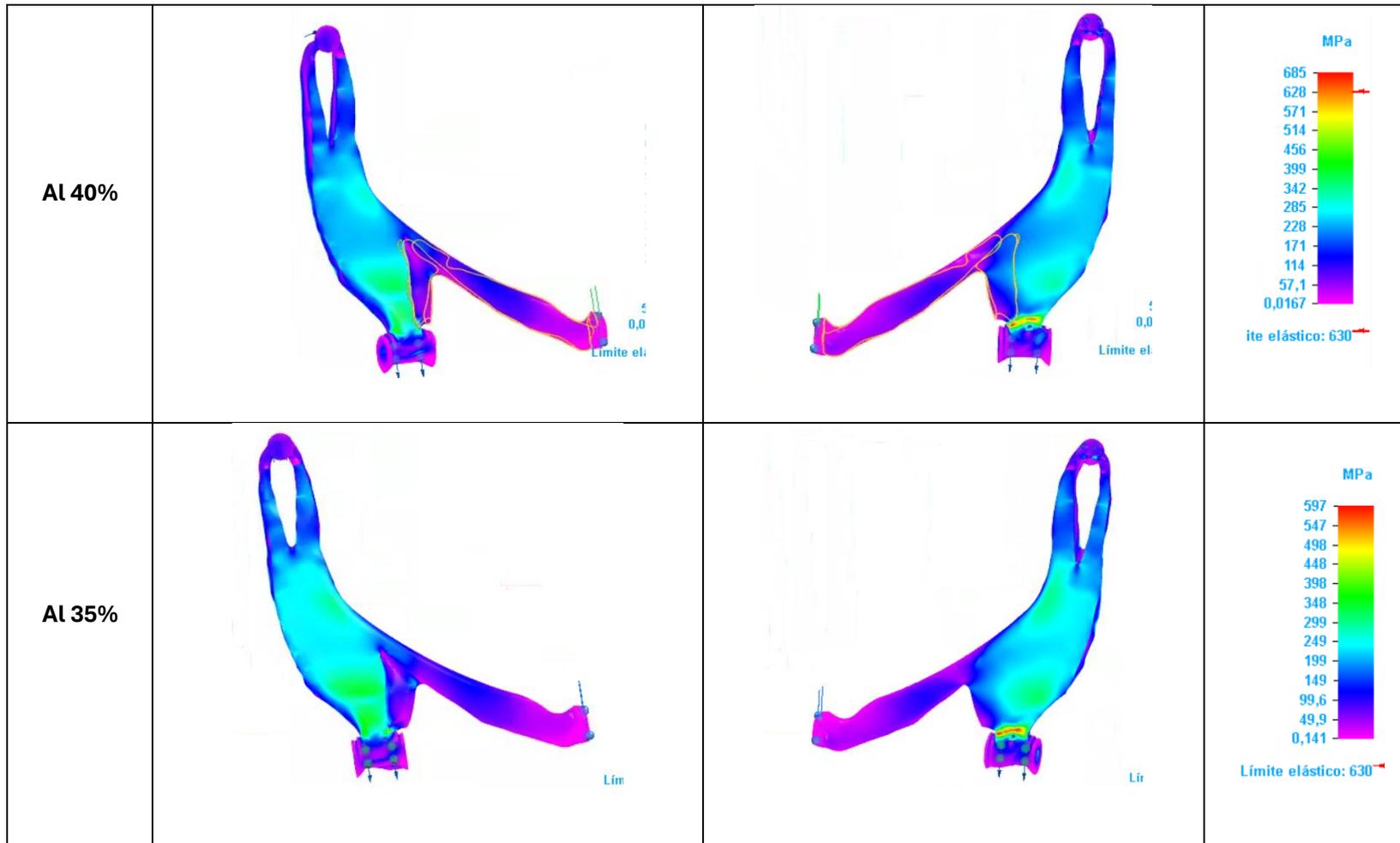


Tabla 20. Análisis de optimizaciones del Caso 3 en fundición. (Elaboración propia)

3.6.6.4 Caso de cargas 4:

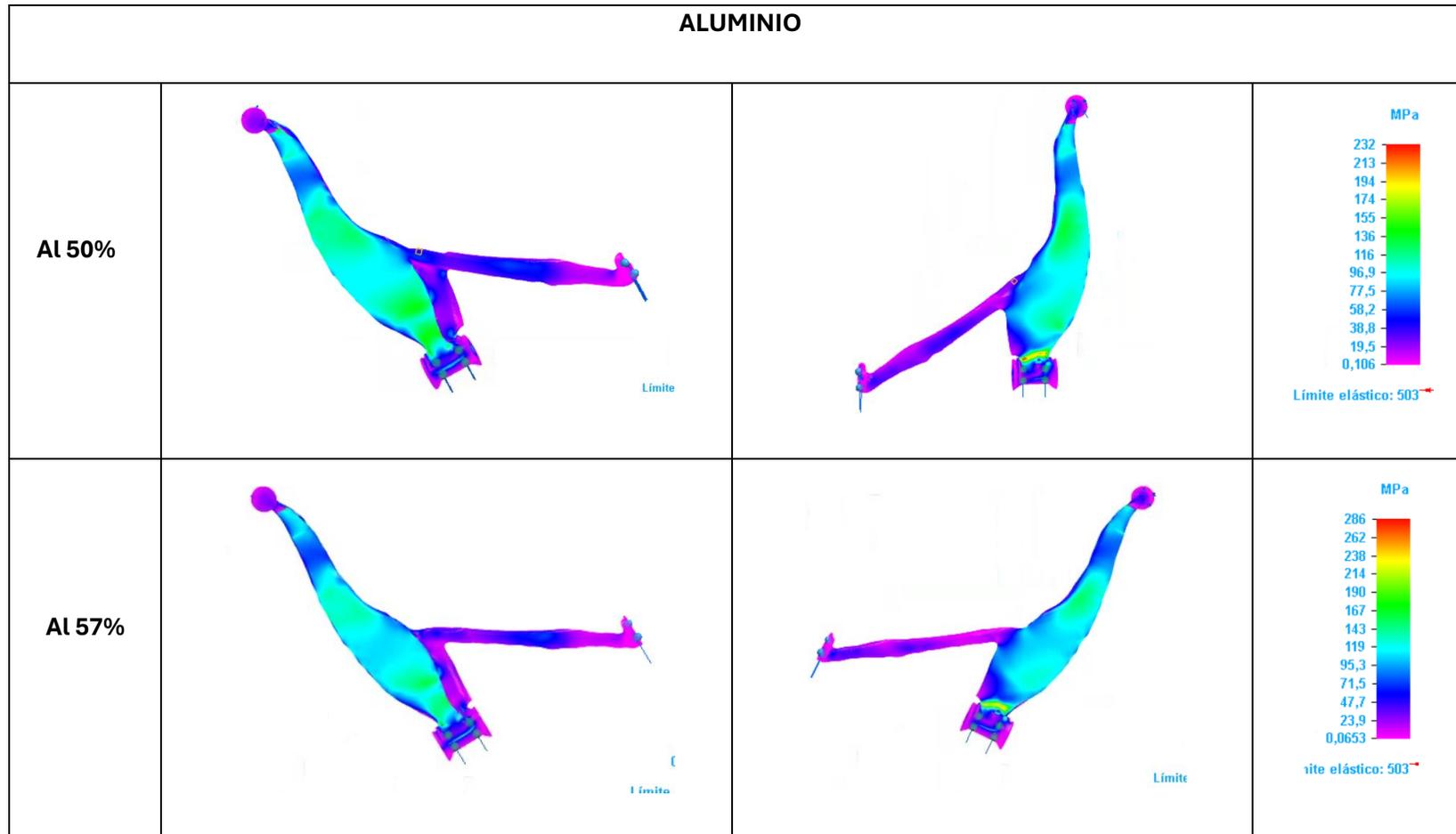


Tabla 21. Análisis de optimizaciones del Caso 4 en aluminio. (Elaboración propia)

FUNDICIÓN			
<p>Al 60%</p>			<p>MPa</p> <p>317 291 264 238 211 185 159 132 106 79,3 52,9 26,5 0,0578</p> <p>límite elástico: 630</p>
<p>Al 63%</p>			<p>MPa</p> <p>1,09e+03 999 908 817 727 636 545 454 363 272 182 90,8 0,0129</p> <p>límite elástico: 630</p>

Tabla 22. Análisis de optimizaciones del Caso 4 en fundición. (Elaboración propia)

Tras realizar el análisis de todos los casos de carga para ambos materiales, se llegó a una conclusión inicial: la mejor optimización parece ser aquella para una reducción del 35% para el material de fundición dúctil de acero nodular.

No obstante, este resultado no era final ni concluyente, ya que la estructura de la pieza final no era fiable según el criterio de diseño y fabricación. Las zonas donde las cargas se aplican y concentran no pueden reducirse en material con respecto a la original, ya que eso comprometería el correcto funcionamiento de la pieza; además, había zonas demasiado estrechas en el modelo como para poder ser fabricadas con la certeza de que no colapsarían.

Por ende, estos previos análisis sólo sirvieron de guía para realizar el diseño final de la pieza.

En el 3.7, se presenta el rediseño de la pieza, guiado por los resultados de la optimización topológica final analizada del modelo, y adaptado a los criterios de diseño y fabricación aplicables a componentes de alta responsabilidad mecánica, como es un brazo de suspensión.

3.7. Adaptación por criterio de diseño y fabricación:

3.7.1. Adaptación geométrica del resultado:

A partir del diseño de la pieza optimizada exitosamente al 35% de masa, se realizaron unas modificaciones en las zonas donde se aplica la carga, teniendo en cuenta que no debe haber zonas de cambios bruscos de espesor para evitar áreas de concentraciones excesivas de carga que puedan derivar en el colapso de la pieza. Se ejecutaron las siguientes modificaciones para emular las geometrías originales de la pieza en las zonas de carga:

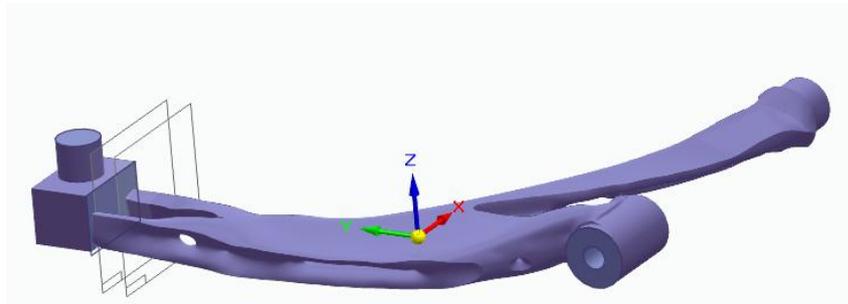


Figura 61. Pieza optimizada modificada. (Elaboración propia)

Tras ello, se sometió a la nueva pieza a un análisis para comprobar que el cambio no había comprometido su resistencia estructural:

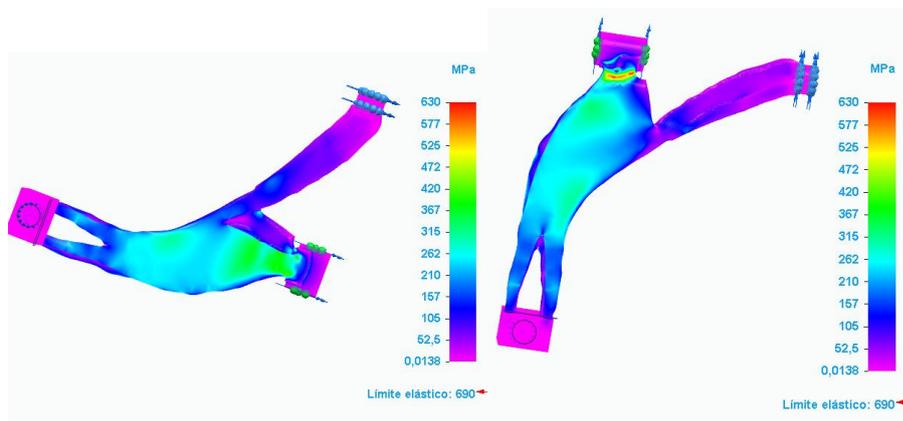


Figura 62. Análisis para el caso 3 de pieza optimizada modificada. (Elaboración propia)

Se realizó el análisis para el caso de cargas más extremo, el 3; siendo un éxito. Sin embargo, para asegurar su funcionalidad en cualquier situación posible, también se realizó el análisis para los otros casos de carga. Como era de esperar, aguantaba.

Con un coeficiente de seguridad de 1.1, la pieza no se rompería durante su vida útil. La pieza cumplía el criterio de fabricación.

No obstante, el diseño quedaba demasiado basto para el criterio de diseño. Había que refinar el brazo de suspensión.

Para ello, se usó el programa Altair Inspire 2023.

También, se intentó realizar una reducción de masa de forma manual, basándose en los resultados del análisis de la Figura 61:

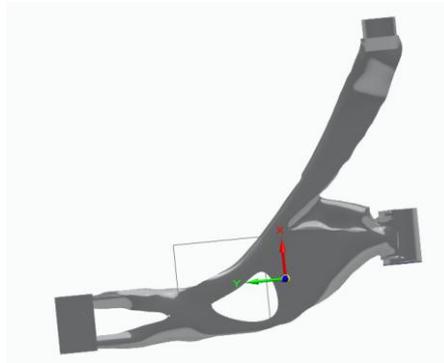


Figura 63. Pieza optimizada manualmente. (Elaboración propia)

Sin embargo, esa reducción derivaba en la fractura de la pieza.

Por ello, se siguió trabajando con la pieza sin la reducción manual.

3.7.2. Refinamiento por Altair:

Se pasó el modelo en formato .stl a Altair desde CAD. Allí, se convirtió la pieza a *PolyNURB* para poder simplificarla y, así, hacerla menos basta para hacerla fabricable; probándose varias simplificaciones diferentes:

3.7.2.1 700 caras *PolyNURBS* al 70% suavizado:

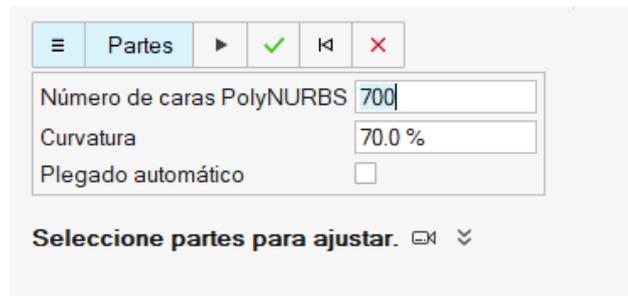


Figura 64: *PolyNURB* con 700 caras y suavizada al 70%. (Elaboración propia)

Hubo que refinar la *PolyNURB* mediante la eliminación de curvas de la malla para obtener una estructura fabricable. Una vez refinada, se pasó a sólido.

Finalmente, quedó la pieza como se muestra en la Figura 64. Se guardó como .stl y .step para el siguiente paso.

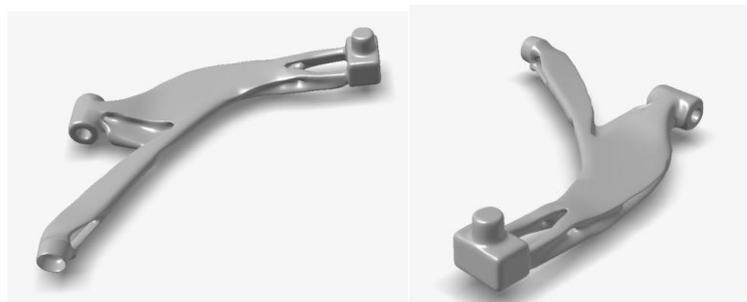


Figura 65: Pieza refinada con 700 caras y suavizada al 70%. (Elaboración propia)

3.7.2.2 500 caras *PolyNURBS* al 70% suavizado:

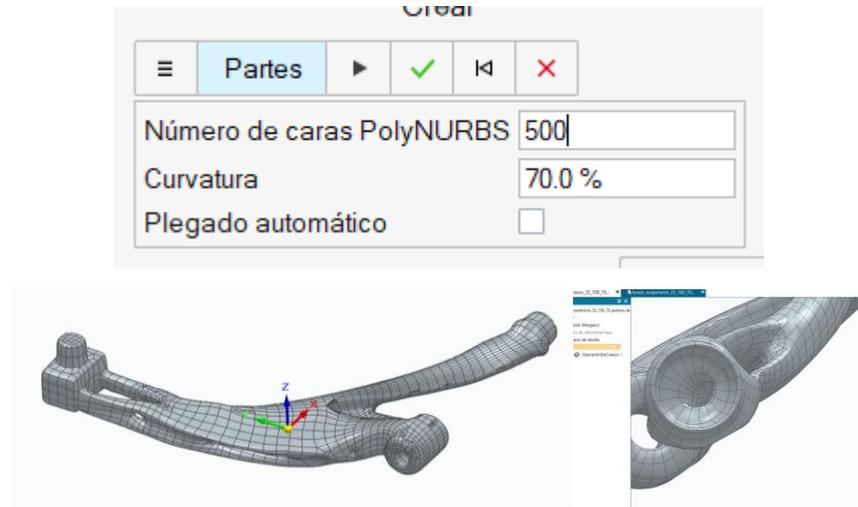


Figura 66. *PolyNURB* sin refinar con 500 caras y suavizada al 70%. (Elaboración propia)

El proceso de refinamiento de la *PolyNURB* era altamente complejo; el programa se cerró porque no conseguía ejecutar las simplificaciones.

Tras probar con otros suavizados, se comprobó que el único que funcionaba satisfactoriamente era el modelo al que se le hizo una *PolyNURB* de 500 caras y suavizado al 50%; y el de la *PolyNURB* de 700 caras y suavizado al 70%.

Con estos dos modelos, se pasaron a Solid Edge por .igs y .step para un análisis final para comprobar si, verdaderamente, el modelo aguantaría los casos de carga tras ser refinado.

Normalmente, es recomendable guardar los modelos de las piezas en ambos formatos (.igs y .step), puesto que Solid Edge no siempre detecta como sólidos los modelos guardados como uno u otro formato.

3.7.3. Análisis final del modelo refinado:

Con los modelos de Altair Inspire 2023, se aseguraba que el brazo de suspensión tuviera una buena geometría fabricable; no obstante, había de comprobarse si esa nueva geometría aún podía aguantar los casos de carga extremos a los que se somete a la pieza durante su vida útil. Así, en Solid Edge, se le aplicaron al componente las fuerzas del caso 3, puesto que era el caso más extremo. Asimismo, se cambió el material: se usó un material con mejores propiedades que la fundición dúctil nodular de hierro, el AISI 4130, ya que es un tipo de material que se usa comúnmente en la fabricación de brazos de suspensión por métodos tradicionales.

3.7.3.1 Con el modelo obtenido de la PolyNURB de 500 caras y suavizado al 50%:

Cuando se intentó ejecutar el análisis, el modelo daba problemas para efectuar el mallado de la pieza:

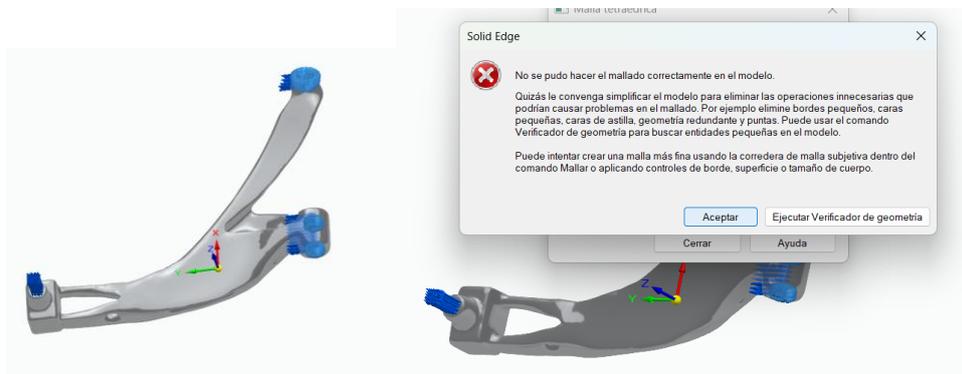


Figura 67. Error de mallado en el modelo. (Elaboración propia)

No se pudo solucionar el problema, ni aun abriéndolo de forma diferente a .step (en algunos casos, se abre mejor en formato .igs que en .step).

3.7.3.2 Con el modelo obtenido de la *PolyNURB* de 700 caras y suavizado al 70%:

No pudo abrirse correctamente en formato .igs; se abrió como .step. Se sometió a la pieza al análisis de fuerzas del caso 3, el más extremo:

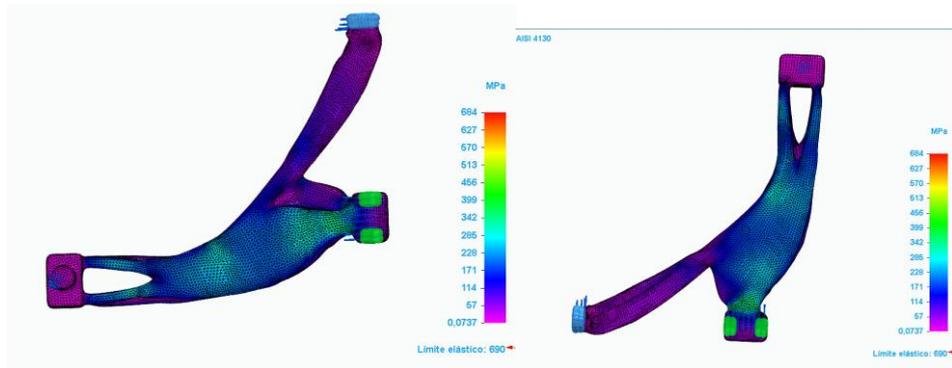


Figura 68. Análisis de la pieza final. (Elaboración propia)

Después, se comprobó el análisis en el brazo en los otros tres casos; aguantando en todos ellos los esfuerzos a los que era sometido.

Las dimensiones finales del brazo de suspensión son: 441.28 mm x 533.76 mm x 91.98 mm.

Finalmente, se guardó la pieza definitiva en formato .stl de la siguiente forma para evitar problemas dimensionales:

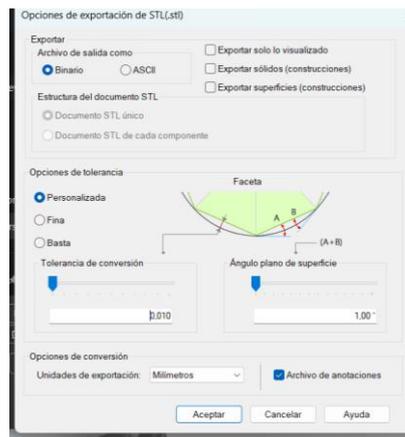


Figura 69. Parámetros de guardado en formato .stl. (Elaboración propia)

Se obtuvo un modelo que aguanta los casos de carga más extremos a los que se somete a la pieza original en su vida útil. Este modelo sí sigue los criterios de diseño y fabricación; por lo que se pudo pasar a la siguiente fase del proyecto: los presupuestos de fabricación aditiva, teniendo en cuenta los recursos disponibles en la universidad.

3.8. Preparación y presupuesto de la impresión:

Una vez finalizado el diseño del modelo definitivo, la siguiente etapa del proyecto consistió en la estimación de los costes de fabricación asociados a la impresión de la pieza, tal como es habitual en los procesos de producción.

El objetivo primario es la impresión de un prototipo de un brazo de suspensión optimizado. Para ello, hay que investigar qué tecnologías permiten imprimir las dimensiones de la pieza, qué máquinas están disponibles en el mercado que puedan imprimir grandes volúmenes, qué materiales son idóneos para la pieza y sus aplicaciones, y el precio que todo ello costaría.

En primer lugar, se analizaron las tecnologías de impresión 3D disponibles en la universidad, así como los materiales que podrían usarse con cada una de las impresoras. A continuación, se evaluó la viabilidad económica de fabricar la pieza en el laboratorio de ICAI frente a externalizar la producción mediante un proveedor especializado. Para ello, primero se solicitaron presupuestos a distintos fabricantes dedicados a la impresión 3D y, posteriormente, se estimó el coste asociado a la fabricación interna en las instalaciones de la universidad.

Tras comparar los precios, se llegó a una conclusión.

3.8.1. Análisis de propiedades de las tecnologías disponibles:

En los laboratorios de ICAI, hay, principalmente, 3 tipos de impresoras: SLA (*Stereolithography*), FDM (*Fused Deposition Modeling*) y MJF (*Multi Jet Fusion*).

Debido al gran tamaño de la pieza a trabajar y a las impresoras disponibles en la universidad, no podrán imprimirse los prototipos en metal, sino en plástico y, para SLA y MJF, en escala reducida; pudiéndose imprimir en escala real la pieza con la impresora FDM DT-600. No obstante, en el mercado sí pueden encontrarse impresoras tanto para SLA como para FDM que puedan albergar las dimensiones de la pieza. Para las tecnologías MJF, por el contrario, aún no existen máquinas con suficiente volumen.

Cada tecnología de impresión 3D tiene diferentes propiedades que a continuación se enumeran en la Tabla 23:

Propiedad / Tecnología	FDM	SLA	MJF
Resolución	Baja a media (dependiente del diámetro de boquilla)	Alta (capaz de detalles muy finos)	Alta (detalle fino en capas finas)
Precisión	Moderada ($\sim\pm 0.2$ mm)	Alta ($\sim\pm 0.05$ mm)	Alta ($\sim\pm 0.1$ mm)
Multi-material	Limitado (requiere extrusores dobles o materiales híbridos)	Muy limitado	No disponible directamente, pero admite color/textura
Propiedades mecánicas	Moderadas; anisotrópicas (más débiles entre capas)	Frágiles; resinas son quebradizas	Buenas; propiedades isotrópicas y resistentes
Acabado superficial	Rugoso (requiere post-procesado para suavizar)	Muy liso (acabado casi pulido)	Ligeramente rugoso pero uniforme
Tiempo de ejecución	Lento para piezas grandes	Lento a moderado (requiere curado UV)	Rápido (impresión por capas enteras simultáneamente)
Coste	Muy bajo (equipos y materiales económicos)	Medio-alto (resinas y equipos más caros)	Alto (equipos industriales y polvo especializado)

Tabla 23. Características de cada tecnología de impresión 3D. (ChatGPT, s. f.)

Teniendo en consideración que la tecnología MJF aún no tiene impresoras capaces de imprimir piezas grandes como la que se trabaja en este TFG; la segunda opción más lógica para elaborar un prototipo es la tecnología FDM: hay impresoras disponibles para tamaños tan grandes como los de los brazos de suspensión.

Además, las FDM son más baratas que las MJF y pueden llegar a imprimir objetos de muy buenas propiedades mecánicas. Mientras que, las SLA, aun siendo las más baratas, no pueden imprimir piezas de mucha responsabilidad. Esta última tecnología no fue descartada, dado que el objetivo era desarrollar un primer prototipo; para el cual no se requerían propiedades mecánicas exigentes.

Teniendo en cuenta todos estos aspectos, se procedió a la estimación de presupuestos para las tres tecnologías de impresión consideradas.

Aunque actualmente no existe en el mercado la posibilidad de impresión mediante tecnología MJF para piezas de grandes dimensiones, se elaboró una estimación presupuestaria orientativa con el fin de evaluar su viabilidad en un escenario futuro en el que dicha opción pudiera estar disponible. Asimismo, se contempló la posibilidad de realizar y solicitar presupuestos para piezas a escala, lo que permitió obtener una referencia comparativa sobre la idoneidad de cada tecnología.

Previo a la solicitud de presupuestos, se llevó a cabo un análisis de los materiales potencialmente compatibles con cada tecnología, considerando también su adecuación con las impresoras disponibles en las instalaciones de la universidad, y se seleccionaron aquellos que permitieran garantizar un prototipo con la rigidez y resistencia mecánica requeridas.

3.8.2. Análisis de propiedades de los materiales disponibles:

No todas las tecnologías de impresión 3D permiten el uso de materiales metálicos cuando se trata de fabricar piezas de gran tamaño, como es el caso de FDM, SLA y MJF. No obstante, dado que el objetivo de este TFG es desarrollar un diseño para un brazo de suspensión, el proyecto se enfocará en fabricar un prototipo de éste; por lo que no resulta imprescindible recurrir a materiales metálicos.

Asimismo, las limitaciones del equipamiento disponible en el laboratorio sólo hicieron posible la impresión a escala real de la pieza usando la tecnología FDM. Si quisiera plantearse la impresión para las otras tecnologías, sería necesario imprimir la pieza a escala reducida. De igual forma, se estimaron los costes para los tres tipos de impresora.

Por estos motivos, se llevó a cabo una búsqueda de materiales alternativos al metal que presentaran una elevada resistencia mecánica, fuesen aptos para aplicaciones de ingeniería y capaces de soportar esfuerzos significativos.

3.8.2.1 Material para el FDM:

Dos buenas opciones, disponibles también en el laboratorio de ICAI, eran el **ABS** y el **PLA**. Sin embargo, el PLA sólo se plantearía como opción para un prototipo, no para un brazo de suspensión real, ya que no es un material técnico.

El ABS, por otra parte, es un material resistente, puede usarse tanto para el prototipo como para la pieza real.

3.8.2.2 Material para el SLA:

De los materiales disponibles en el laboratorio, las resinas CLEAR y RIGID son las más aptas para el prototipo:

- Las RIGID tienen una elevada rigidez y resistencia mecánica (75 MPa), su HDT (*Heat Deflection Temperature*) es la temperatura a la cual un material se deforma bajo una carga mecánica específica) es de, aproximadamente 85°C y son opacas (*Comparador-de-resinas*, s. f.). El único inconveniente que tienen es que son muy frágiles (*ChatGPT*, s. f.).

- Las CLEAR tienen peores propiedades en general que las RIGID, siendo su única ventaja sobre ellas que no son tan quebradizas. Otra característica interesante es que son resinas de alta transparencia. Esto para un prototipo puede ser útil a la hora de detectar fallos o grietas en los ensayos (*Comparador-de-resinas*, s. f.).

3.8.2.3 Material para el MJF:

La poliamida (o el Nylon) es un material que presenta unas buenas prestaciones mecánicas, ideales para prototipos como el de un brazo de suspensión. Tiene una alta resistencia mecánica y térmica, una buena flexibilidad y es resistente al desgaste y a la fricción. Los únicos inconvenientes que podría presentar son su alta absorción de la humedad, lo que condiciona dónde almacenarlo, y que no es transparente ni pulible (*Aceromafe-Poliamida*, s. f.). Además, el Nylon tiene muchas variantes, estando la mayoría registradas en los *slicers* que se usaron en el proyecto.

3.8.3. Presupuestos de proveedores y fabricantes:

Antes de proceder al cálculo del coste de fabricación de la pieza en las instalaciones de la universidad, se consideró oportuno obtener referencias de precios a partir de diversos proveedores y fabricantes especializados. El objetivo de esta comparación era determinar si resultaba más eficiente realizar la impresión en el laboratorio de ICAI o, por el contrario, externalizar la fabricación del brazo de suspensión.

Tal y como se indicó en el apartado 3.8.1, la pieza a fabricar presenta un área aproximada de 531mm x 415mm, lo cual excede las capacidades de la mayoría de las impresoras disponibles en el laboratorio de la universidad; siendo necesario, por tanto, escalar el modelo para su fabricación interna por SLA y MJF.

No obstante, en la práctica, existen impresoras comerciales con mayores volúmenes de trabajo para las tecnologías SLA y FDM, alcanzando dimensiones de hasta 600mm x 600mm x 600mm. Sin embargo, en el caso de la tecnología MJF, todavía no se dispone de modelos que permitan la fabricación de piezas de tamaños equivalentes.

Por esta razón, se solicitaron presupuestos del modelo en tamaño real para las tecnologías SLA y FDM, y en escala reducida para la tecnología MJF.

Adicionalmente, para poder tener una noción de qué proceso era más económico, se solicitó el presupuesto de impresión de una única unidad del modelo en escala reducida también para FDM y SLA; y se compararon los tres presupuestos para el brazo en escala reducida.

De forma complementaria, se comparó el precio de fabricar una única unidad del modelo real por un método tradicional (como fundición o mecanizado) con el precio de fabricarlo por el método de manufactura aditiva.

Se solicitaron los presupuestos a diversos proveedores y fabricantes de piezas especializados en impresión 3D: *Xometry*, *Protolabs* e *i.materialise*:

3.8.3.1 Xometry:

En primer lugar, se pidió presupuesto para la pieza original del brazo de suspensión, mediante métodos de fabricación estándar.

Aunque lo más adecuado habría sido la fundición, forja o deformación de chapa, el único presupuesto automático que ofrecía la aplicación para las dimensiones de la pieza era el de mecanizado; para obtener los costes de fabricación por los otros métodos convencionales, había que pagar 150€ para realizar un informe completo. Es por esto que se hizo sólo el presupuesto para mecanizado.

Este presupuesto se obtuvo de forma únicamente ilustrativa, para ver la diferencia de precios entre la fabricación aditiva y la fabricación tradicional cuando el tamaño de lote es muy pequeño.

Mecanizado CNC

<input type="checkbox"/>	<p>10. brazo_MODELO_PARA_IN... 🔗</p> <p>Proceso: Mecanizado CNC Dimensiones: 483.3mm × 400.2mm × 56... Material: Aluminio 6082 / 3.2315 / Al-Si1... Acabado: Standard Roscas y taladros roscados: 0 lugares Requisitos de rugosidad superficial: Sta... Tolerancia: ISO 2768 - media, parte entera</p>	<p>Cant.: <input type="text" value="1"/> 🔗</p>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 5px;">Estándar</td> <td style="text-align: right; padding: 5px;">1.804,80 €</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">13 días laborables</td> <td style="text-align: right; padding: 5px;">por unidad 1.804,80 €</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Exprés 🚀 ⓘ</td> <td style="text-align: right; padding: 5px;">2.887,68 €</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">9 días laborables</td> <td style="text-align: right; padding: 5px;">por unidad 2.887,68 €</td> </tr> </table>	Estándar	1.804,80 €	13 días laborables	por unidad 1.804,80 €	Exprés 🚀 ⓘ	2.887,68 €	9 días laborables	por unidad 2.887,68 €
Estándar	1.804,80 €										
13 días laborables	por unidad 1.804,80 €										
Exprés 🚀 ⓘ	2.887,68 €										
9 días laborables	por unidad 2.887,68 €										

Figura 70. Pieza fabricada por mecanizado. (Xometry, s. f.)

También, se realizó el presupuesto para las tecnologías FDM de impresión 3D, usando el material PLA:



Impresión 3D

10. brazo_suspension_VOD.stp [🔗](#) Cant.: 1 [📄](#)

Proceso: Impresión 3D FDM ...eposición f...
Dimensiones: 533.8mm × 441.3mm × 92....
Material: PLA
Espesor de capa, µm: 200
Acabado: Standard
Roscas y taladros roscados: 0 lugares
Color: Black
Relleno: Light (20% - 50%)

Estándar **312,96 €**
8 días laborables por unidad 312,96 €

Exprés 🚀
Opción no está disponible

[🔍 Duplicar](#) [🗑️ Borrar](#) [⚙️ Editar especificaciones](#)

Figura 71. Presupuesto para tecnología FDM del brazo de suspensión. (Xometry, s. f.)

Las geometrías resultantes de procesos de optimización topológica presentan una complejidad que, en muchos casos, impide su fabricación mediante métodos tradicionales como el mecanizado. Por este motivo, para el presupuesto de mecanizado, se subió a la plataforma del fabricante el modelo de la pieza original; mientras que, en el caso de la fabricación aditiva, se cargó el modelo de la pieza optimizada.

Aunque ambas piezas no son idénticas, la comparación de la *Figura 69* con la *Figura 70*, verifican que el comportamiento representado en el diagrama de la *Figura 71* se cumple:

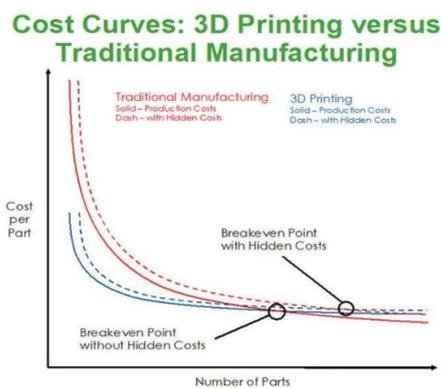


Figura 72. Curvas de coste de las tecnologías de fabricación. (Cortesía de Mariano Jiménez Calzado)

Para pedidos de pocas unidades, lo más económico suele ser fabricar por impresión 3D; mientras que, para tamaños de lote más grandes, los métodos de fabricación convencionales suelen presentar mayor rentabilidad.

3.8.3.2 Protolabs:

La empresa Protolabs ofrece las tecnologías de impresión 3D SLA y MJF (*Protolabs/presupuestos*, s. f.). No obstante, no dispone de impresoras con volúmenes de trabajo suficientes para imprimir una pieza con las dimensiones del brazo de suspensión.



Figura 73. Solicitud de presupuesto manual para MJF de la pieza. (*Protolabs/presupuestos*, s. f.)

Dado el gran tamaño de la pieza, fue necesario que los ingenieros de Protolabs revisaran manualmente el diseño para poder emitir una estimación del coste.

Tal y como se preveía, en el caso de piezas de grandes dimensiones, no se dispone inicialmente de impresoras compatibles con las tecnologías SLA y MJF que permitan su fabricación directa. Esto implica la necesidad de equipamiento específico, motivo por el cual la plataforma solicitó realizar la petición de presupuesto de forma manual.

3.8.3.3 i.materialise:

Este proveedor muestra todas sus tecnologías y materiales disponibles, con las dimensiones máximas disponibles para cada modelo. Se buscó en el catálogo de sus FDM y MJF:

Technology	Material	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
Multi Jet Fusion	PA12	370	274	375
	Ultrasint TPU 90A-01	370	274	375
Stereolithography	Any resin, Protogen White, Poly1500, TuskXC2700T, Tusk Somos SolidGrey 3000	1100	690	590
	Poly1500 Fast Lane	250	250	100
	TuskXC2700W	350	350	350
	TuskXC2700W Fast Lane	350	350	100
	Xtreme	480	480	560
	Taurus	480	480	560

Tabla 24. Dimensiones máximas de cada tecnología 3D. (i.materialise, s. f.)

Con esta información, se obtuvo un presupuesto sólo para la tecnología FDM, ya que no hay impresoras de MJF en el mercado lo suficientemente grandes para albergar una pieza de dimensiones superiores a 370x274x375mm.



brazo_suspension_VOD.stp
1513-6372-001

2376,81 €
Cantidad 1

Opciones ▾

Equivalente a ABS Transparente/Translúcido
 Resolución normal
 Estándar
 Estereolitografía
 X: 441.28mm Y: 533.76mm Z: 91.98mm

Por pieza
2376,81 €

Figura 74. Presupuesto para tecnología FDM del brazo de suspensión. (l.materialise, s. f.)

Tiene sentido que para el ABS salga un presupuesto tan elevado, ya que es un material técnico de responsabilidad mecánica.

3.8.3.4 Estimación de la pieza escalada:

La única forma de poder realizar una comparación entre las tres tecnologías, para ver cuáles serían más caras a la hora de imprimir, era escalar la pieza a un volumen de 21 mm x 17.4 mm x 3.6 mm.

Para las tecnologías de impresión 3D de MJF, se escogió la poliamida Nylon 12 por ser la más resistente de todos los materiales seleccionables:

Proceso de fabricación / Material Cant.: 1

Tecnología: [Guía de selección de tecnología](#)
 HP Multi Jet Fusion

Material: 6 opciones disponibles [Guía de selección de materiales](#)
 Nylon 12 / PA 12

Más información sobre [este material](#)

Color:
Any available colour (Gray or Whitish)

⚠ Opción de color blanquecino
Recomendación: Tenga en cuenta que esta opción de color tiene un tono blanquecino con un ligero matiz amarillento. Si busca un color blanco puro, considere seleccionar SLS PA12 o explorar opciones de posprocesamiento.

Estándar 7 días laborables **35,88 €**
por unidad 35,88 €

Expres 5 días laborables **100,00 €**
por unidad 100,00 €

[Abrir 3D](#)



Figura 75. Presupuesto de la pieza escalada para tecnologías MJF. (Xometry, s. f.)

Para las tecnologías de impresión 3D de FDM, se usó ABS de material, pues también se usó para el presupuesto de la pieza original:

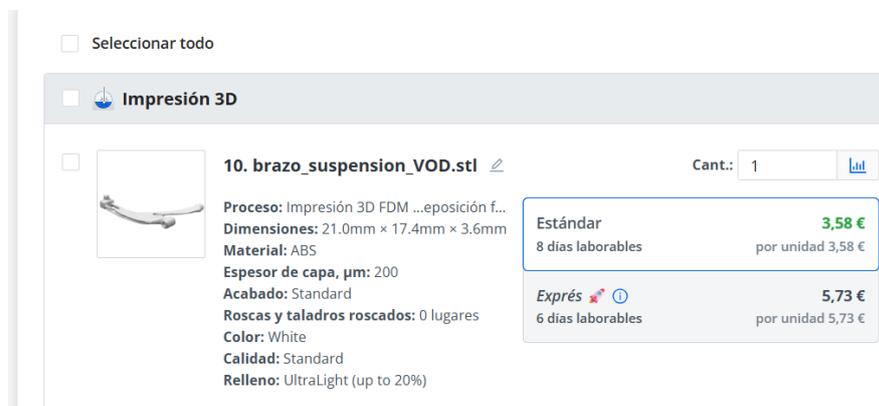


Figura 76. Presupuesto de la pieza escalada para tecnologías FDM. (Xometry, s. f.)

El presupuesto para FDM usando PLA sería más barato y menos resistente; por ello, no se añadió en la comparación.

Para las tecnologías de impresión 3D de SLA, se usó el material equivalente a PC translúcido, por ser el que mejores propiedades presentaba de la selección:



Figura 77. Presupuesto de la pieza escalada para tecnologías SLA. (l.materialise, s. f.)

La tecnología de SLA resultó ser la más cara de las tres. Sabiendo que los materiales de SLA son los que menor resistencia a los esfuerzos tienen, se previó descartarla. La tecnología FDM parecía, por el momento, la mejor opción; no sólo por ser la más barata, sino porque es posible imprimir piezas de grandes dimensiones con ella, y el ABS tiene buenas propiedades mecánicas.

3.8.4. Cálculo de costes:

A continuación, se calcularon los costes que supondría imprimir la pieza en el laboratorio 3D de ICAI, usándose un Excel para realizar las cuentas pertinentes.

En el laboratorio de la universidad sólo existe una impresora con un volumen de trabajo suficientemente grande para albergar e imprimir el brazo de suspensión en escala real. Ésta es la impresora DT-600, de tecnología FDM, la cual no está registrada en ninguno de los *slicers* disponibles que se mencionaron en el apartado 2.2.1. Para el resto de tecnologías, aún no hay impresoras en la universidad con capacidad para imprimir la pieza real.

Aun así, se estimaron los presupuestos para las tecnologías SLA y MJF para el hipotético caso de que sí hubiera impresoras en ICAI para grandes dimensiones, y se usó UltiMaker Cura con una impresora de prestaciones similares a la DT-600; de esta forma, sería posible comparar los costes calculados con los presupuestos pedidos y, así, concluir si sería más económico fabricar la pieza en las instalaciones de ICAI o, si, por el contrario, sería más rentable solicitar la fabricación a terceros.

Para realizar el cálculo de costes, era necesario disponer de información relativa al volumen total de material depositado y al tiempo estimado de fabricación. Estos parámetros sólo se podían obtener mediante la simulación del proceso de impresión; es decir, a través del uso de los programas de laminado (*slicers*). Dichas herramientas, además, se emplearon para preparar la geometría de la pieza con el fin de proceder a su posterior impresión.

3.8.4.1 Uso de *slicers*:

Para poder realizar los presupuestos manualmente, se necesitaron: los datos de la máquina, el precio del material a usar, la cantidad de material usado en la fabricación aditiva, y el tiempo de impresión. Estas dos últimas cuestiones sólo pueden obtenerse con la simulación que ofrecen los *slicers*.

Por esto, se buscó qué *slicers* eran compatibles para qué tecnología, obteniéndose los siguientes resultados:

- Para las tecnologías SLA (*SLA-slicers*, s. f.), funcionan los *slicers* gratuitos: Chitubox, Preform y Prusa (*mejores-slicers-SLA*, s. f.).
- Para las tecnologías FDM, funcionan los *slicers* gratuitos: Orca y UltiMaker Cura (*mejores-slicers-FDM*, s. f.).
- Para las tecnologías MJF, sirve el *slicer* de Preform, con piezas de dimensiones no muy grandes.

Después de analizar qué *slicer* funciona mejor para cada tecnología, teniendo en cuenta que se ha de trabajar con una pieza de grandes dimensiones, se llegó a una primera conclusión: para las tecnologías FDM de piezas de grandes dimensiones, el Orca Slicer, con su función de seccionar, funciona bastante bien. Por esto, se decidió usarlo para realizar la laminación (*slicing*) y la simulación de impresión con PLA y ABS.

3.8.4.1.1 ORCA SLICER:

Orca Slicer tiene un defecto: no se pueden alterar las dimensiones de la bandeja de impresión. La única forma de conseguir realizar la simulación de impresión de una pieza grande es partiendo dicha pieza en varios trozos:

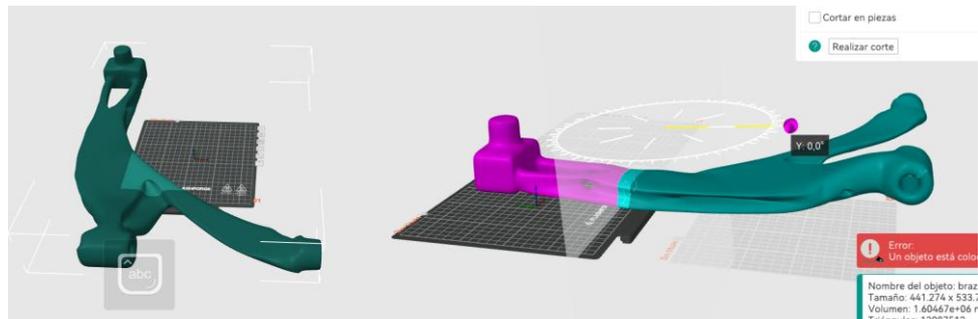


Figura 78. Estado inicial y corte de pieza en Orca Slicer. (Elaboración propia)

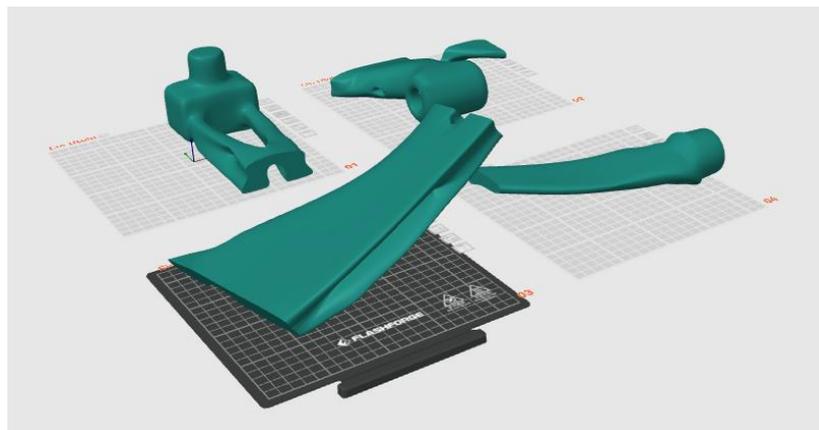
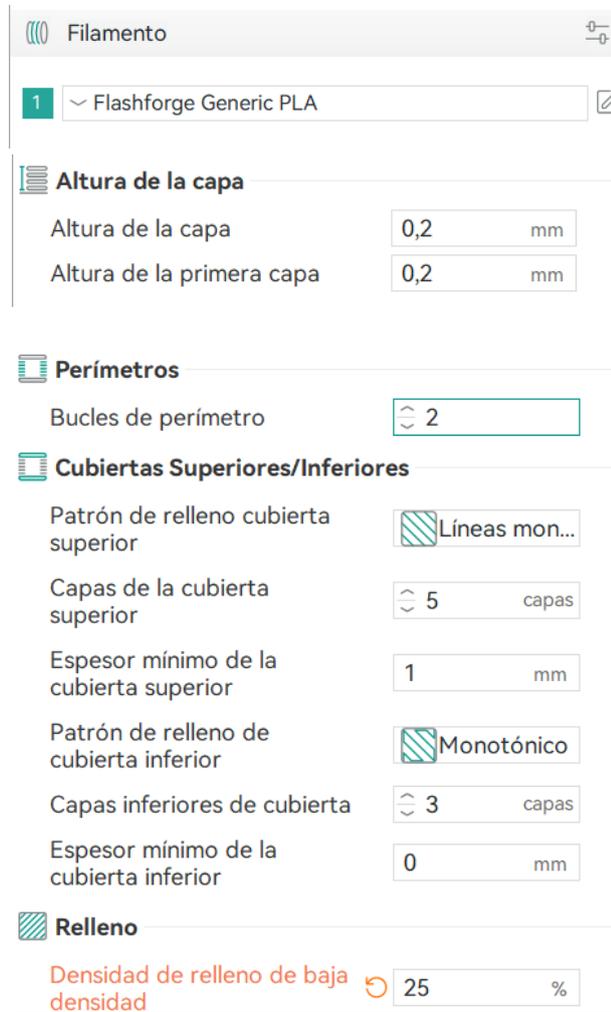


Figura 79. Pieza seccionada para su slicing. (Elaboración propia)

Se seleccionaron los parámetros de impresión y se empezó con el material PLA:



Filamento

1 Flashforge Generic PLA

Altura de la capa

Altura de la capa: 0,2 mm

Altura de la primera capa: 0,2 mm

Perímetros

Bucles de perímetro: 2

Cubiertas Superiores/Inferiores

Patrón de relleno cubierta superior: Líneas mon...

Capas de la cubierta superior: 5 capas

Espesor mínimo de la cubierta superior: 1 mm

Patrón de relleno de cubierta inferior: Monotónico

Capas inferiores de cubierta: 3 capas

Espesor mínimo de la cubierta inferior: 0 mm

Relleno

Densidad de relleno de baja densidad: 25 %

Figura 80. Parámetros de impresión PLA. (Elaboración propia)



* 0.20mm Standard @Flashforge AD5M Pro...

Figura 81. Velocidad de impresión. (Elaboración propia)

Seguidamente, se añadieron soportes de árbol automáticos.

Habilitar los soportes

Tipo



Árbol (auto)

Estilo

Por defecto ...

Pendiente máxima

30 °

Densidad de la primera capa

90 %

Expansión de la primera capa

2 mm

Figura 82. Soportes de árbol automáticos. (Elaboración propia)

Así, en cada pieza por separado se obtuvo el tiempo de impresión y el material:

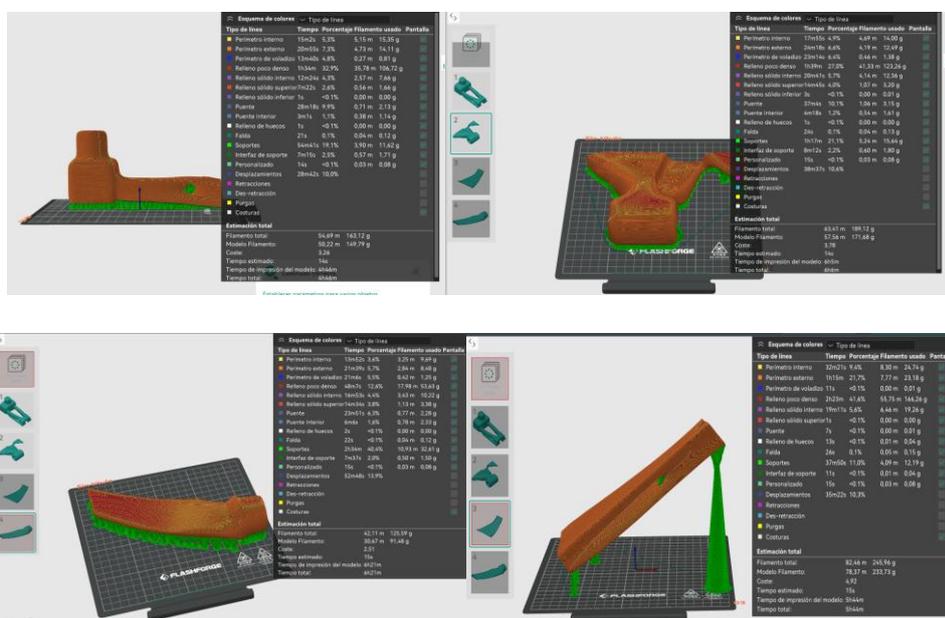


Figura 83. Slicing de todas las partes de la pieza con PLA. (Elaboración propia)

Luego, se realizó la laminación (*slicing*) para el material ABS, obteniéndose os resultados de la simulación de impresión de cada parte:

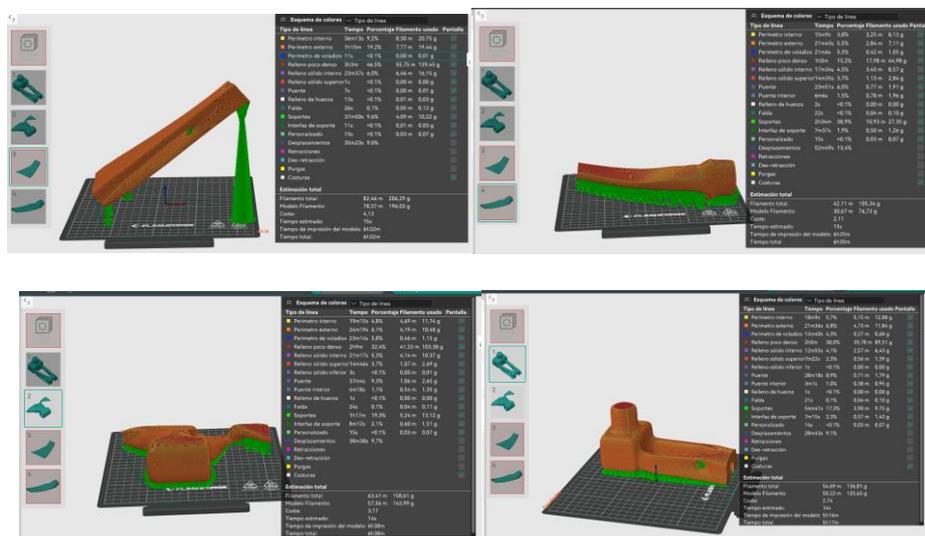


Figura 84. Slicing de todas las partes de la pieza con ABS. (Elaboración propia)

Y se obtuvieron los siguientes resultados totales:

	PLA	ABS
Tiempo de impresión	1377mins = 22h 57mins	1502 mins = 25h 2 mins
Material para pieza	639.5 g	546.61 g
Material para soportes	72.06 g	60.44 g
Material total	711.56 g	607.05 g

Tabla 25. Comparación de parámetros de impresión. (Elaboración propia)

No obstante, **este método no es adecuado** para la estimación precisa de un presupuesto; ya que, lo más conveniente, es considerar la impresión del modelo en una sola pieza. Esto permitiría evaluar la viabilidad de una futura producción en serie de brazos de suspensión.

Por esto, hubo que buscar alternativas: se investigó qué *slicer* podía albergar volúmenes tan grandes como el de la pieza estudiada. Finalmente, se llegó a las siguientes soluciones:

- Usar PreForm para las tecnologías SLA y MJF.
Si bien PreForm tiene una limitada variedad de impresoras, no teniendo ninguna con volúmenes iguales o superiores al del brazo de suspensión, es un *slicer* intuitivo y eficaz, con varios materiales disponibles para ambas tecnologías.
Para trabajar en este *slicer*, se realizará un modelo a escala reducida y se sacarán los parámetros de precio de máquina, tiempo de impresión y material usado. Luego, se estimarán esos parámetros para la pieza original, usando la relación de escala aplicada en el modelo del *slicer*.
- Usar UltiMaker Cura para las tecnologías FDM.
En UltiMaker Cura se pueden modificar y añadir impresoras de una gran variedad de proveedores y marcas diferentes. Para FDM, existen varias impresoras en el mercado con un volumen superior o igual al de la pieza trabajada. Se puede trabajar con la pieza a escala real en este *slicer*. Aunque no esté registrada la DT-600 del laboratorio de la universidad, en la selección hay impresoras de características similares.

3.8.4.1.2 PREFORM PARA SLA:

Lo primero que se hizo fue escoger la impresora disponible más grande que hubiera en el programa. Su precio de mercado son 3.026,46€ (*Formlabs-printer-Form-4*, s. f.).



Figura 85. Impresora 3D SLA Form 4. (*Formlabs-printer-Form-4*, s. f.)

Se seleccionó la resina RIGID que mejores propiedades mecánicas tenía de la selección: RIDIG 10K. Precio: 0.36€/cc (*Resinas-RIGID-SLA-coste, s. f.*).



Figura 86. Selección de material SLA. (propiedades-RIGID-10K, s. f.)

Para que la pieza cupiera dentro del área de la bandeja, se escaló la pieza a un tamaño de 0.3 veces el original. Se orientó para evitar la aparición de huecos durante la impresión y se activaron los soportes de árbol automáticos. Finalmente, se activó la simulación de impresión, obteniéndose:

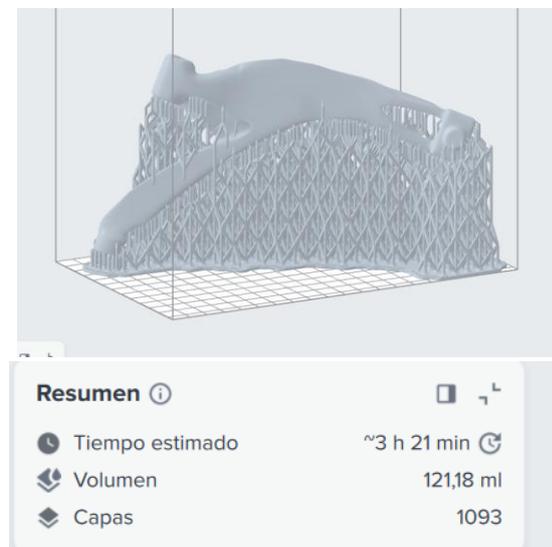


Figura 87. Pieza final preparada para impresión. (Elaboración propia)

El único inconveniente de este *slicer* es que no te dice qué proporción del volumen de material usado es de los soportes y qué proporción para la pieza; no obstante, como el material para ambos elementos es el mismo, puede agruparse todo en la misma casilla sin problema.

3.8.4.1.3 PREFORM PARA MJF:

Se escogió la impresora de polvo más grande disponible: Fuse 1 +30W.



Figura 88. Impresora 3D Fuse 1+ 30W. (Fuse 1 + 30W, s. f.)

El material seleccionado fue Nylon 11 CF V1, por ser el ligero, el más resistente al impacto, temperatura y fatiga, y el más rígido de todos los disponibles (Material-MJF, s. f.):

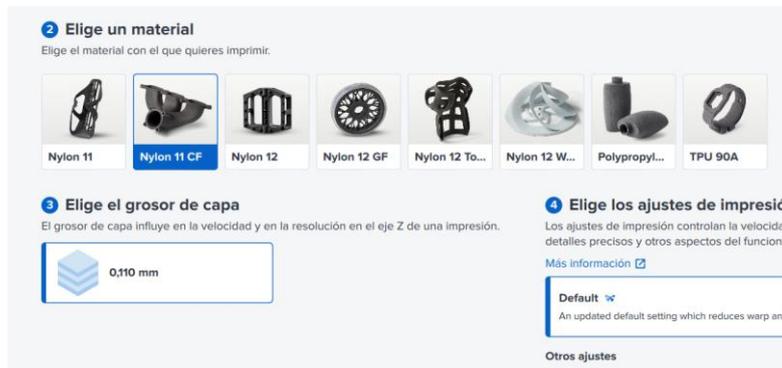


Figura 89. Material seleccionado para MJF. (Elaboración propia)

Usamos una pieza escalada con factor de 0.3 con respecto a la original para que cupiera en la bandeja de impresión:

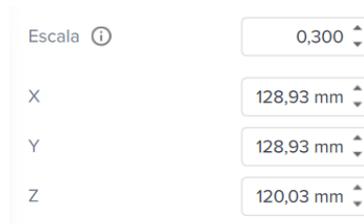


Figura 90. Tamaño de la pieza escalada. (Elaboración propia)

Todo quedó:

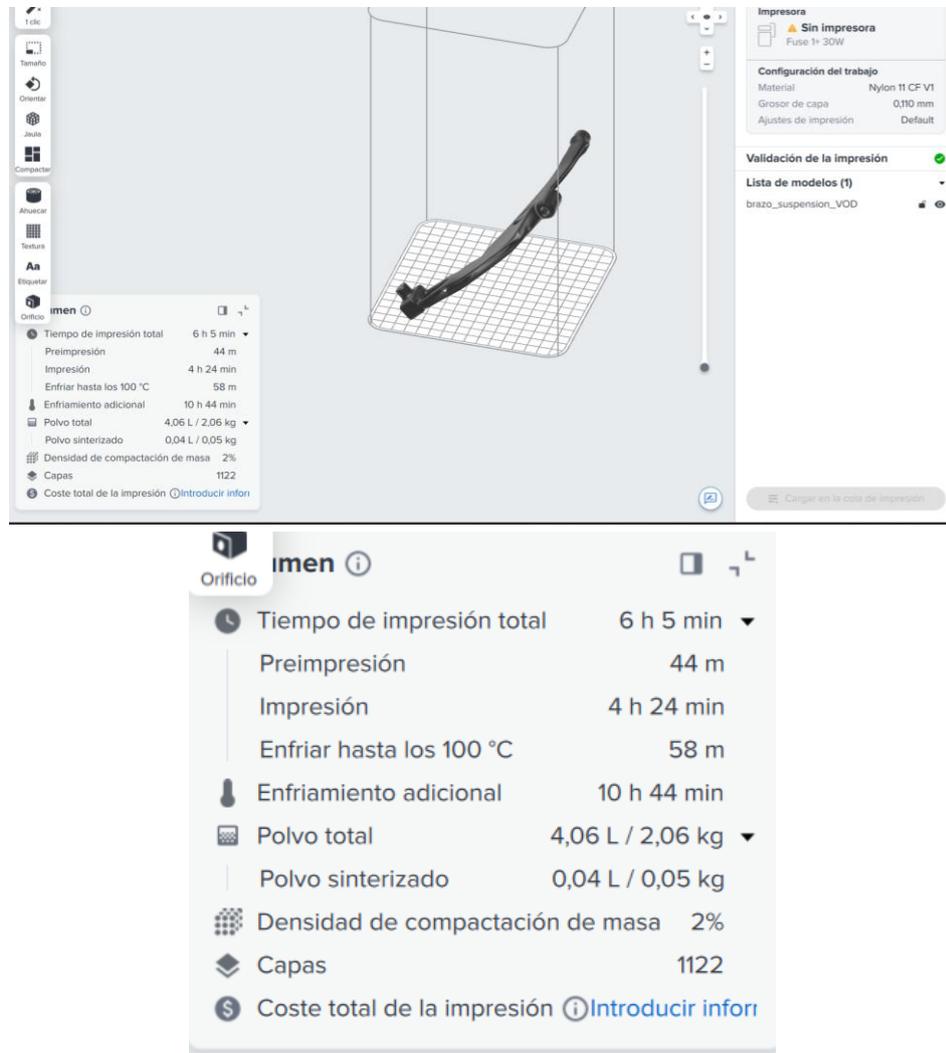


Figura 91. Parámetros resultantes de la simulación de impresión MJF. (Elaboración propia)

3.8.4.1.4 ULTIMAKER CURA PARA FDM:

Como se mencionó al inicio del apartado 3.8.4.1, en el *licer* UltiMaker Cura hay muchas más impresoras disponibles; además, las tecnologías FDM tienen en el mercado impresoras de volúmenes de impresión superiores a 600mm x 600mm x 600mm. Mismamente, en los laboratorios de impresión 3D de la Universidad Pontificia Comillas ICAI, hay una de dichas impresoras: Dynamical Tools DT-600+. Este modelo concreto no está registrado en el *licer*. No obstante, hay otras muchas máquinas con prestaciones y volúmenes de trabajo similares.

Por esto, no fue necesario escalar el modelo y realizar luego cálculos adicionales sobre el material y tiempo de impresión para la pieza de dimensiones originales.

El programa orientó la pieza de la siguiente forma:

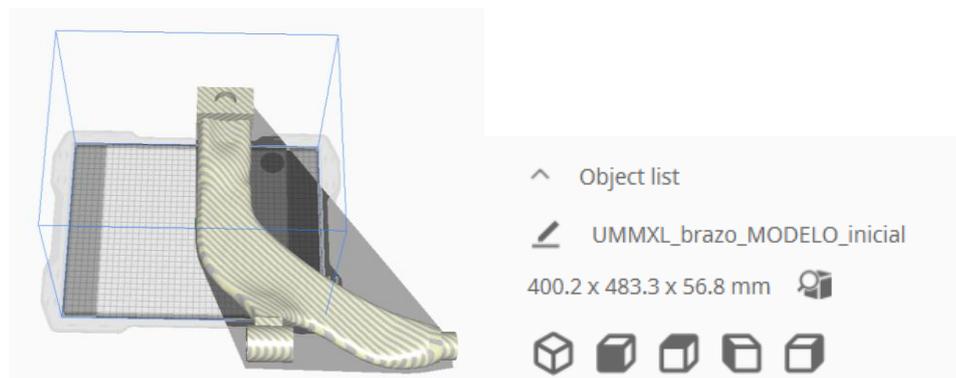


Figura 92. Orientación inicial del modelo. (Elaboración propia)

Hubo que encontrar una impresora de volumen de trabajo superior a 10986.066 cc y cercano a los 216000 cc del modelo DT-600, y que estuviera disponible en el catálogo de UltiMaker Cura.

De las disponibles en el mercado, que permitieran la impresión con los materiales ABS y PLA, estaban los modelos (*Impresoras-FDM-con-ABS-PLA*, s. f.):

- K1 MAX: 27000 cc



Figura 93. Impresora K1 MAX. (Características-K1-MAX, s. f.)

- Prusa CORE one: 14850 cc

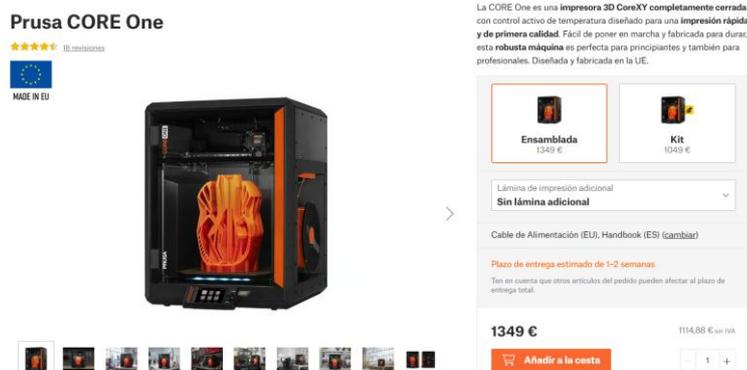


Figura 94. Impresora Prusa CORE one. (Características-Prusa-CORE-one, s. f.)

- FFF: 11880 cc



Figura 95. Impresora FFF. (Características-FFF, s. f.)

- Tiertime UP600: 120000 cc

Impresora 3D Tiertime UP600



En Stock

Complemento de gran formato de la serie UP

- ✓ Alta precisión
- ✓ Altura de capa adaptable
- ✓ Volumen de construcción industrial
- ✓ Fácil de manejar

Al comprar con nosotros obtenes:

- Entrega GRATUITA
- 1 año de garantía
- Asistencia local
- Hasta un 20% de descuento en filamento

Esta impresora 3D viene con:

- Piezas esenciales necesarias para el funcionamiento de la impresora
- Todas las herramientas necesarias
- Tarjeta de calibración
- Manual de usuario

SOLICITE UN PRESUPUESTO

HABLE CON UN EXPERTO

Enviado desde CA. El plazo de entrega estimado es de 5-10 días laborables

Figura 96. Impresora 3D Tiertime UP600. (características-Tiertime-UP600, s. f.)

- Method XL: 29768 cc

Method XL 3D Printer

USD \$9,999.00 ~~USD \$13,999.00~~

0% APR or as low as \$347/mo with **affirm**. See if you qualify

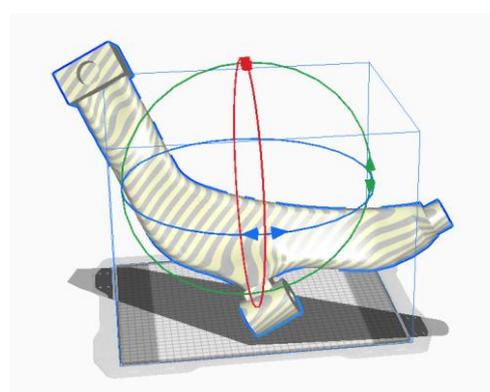
Quantity:

Request a Quote



Figura 97. Impresora Method XL. (Características-Method-XL-3D, s. f.)

De todas las mencionadas, sólo la Method XL estaba disponible en el repertorio de impresoras de UltiMaker Cura. No obstante, aunque su volumen de trabajo era superior al de la pieza, el área de impresión no era suficiente y no se podía conseguir una posición adecuada para la impresión de la pieza:



UltiMaker Method XL

Printer	Extru	
Printer Settings		
X (Width)	410.0	mm
Y (Depth)	320.0	mm
Z (Height)	319.9	mm
Build plate shape	Rectangular	▼
Origin at center	<input checked="" type="checkbox"/>	

Figura 98. Modelo en impresora Method XL. (Elaboración propia)

Se alteraron los parámetros de la impresora de forma manual, manteniendo en todo momento el volumen total, pero distribuyendo las dimensiones:

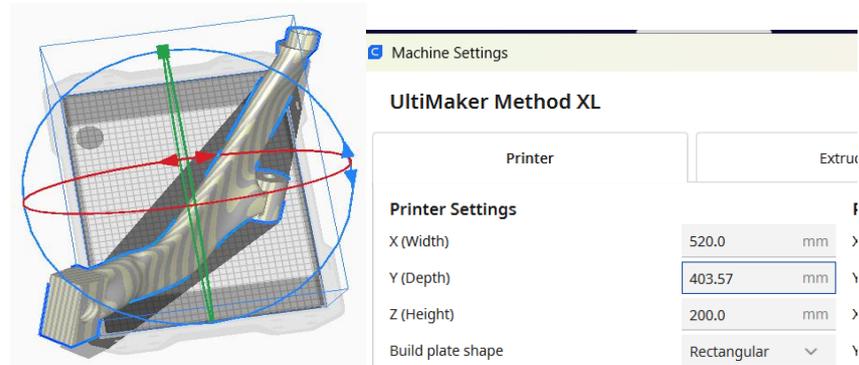


Figura 99. Dimensiones alteradas de la impresora. (Elaboración propia)

Al hacer esto, se consiguió que el programa no permitiera la ejecución de la simulación de impresión. Se tuvo que buscar una nueva impresora de gran volumen de trabajo y disponible en el programa. Se encontró la Modix BIG-60, con un volumen de trabajo de 237600 cc, cercano a 216000 cc:



Especificaciones BIG-60:

Modix Big-60 comparte especificaciones similares con todas las demás impresoras Modix ([revise aquí](#)).

Estas son las especificaciones únicas:

- Entrega: kit de autoensamblaje
- Volumen de impresión: 600 X 600 X 660 mm (XYZ).
- Tamaño de la máquina (WxDxH): 906x1060x1,506 mm
- Peso de envío: 120 KG (depende de la selección de complementos)
- Recinto: opcional
- IDEX – Cabezal de impresión secundario – opcional
- Guías del eje Z: varillas lisas, rieles Hiwin - opcional

Figura 100. Impresora Modix BIG-60. (Modix-BIG-60, s. f.)

Se escogieron los parámetros de impresión:

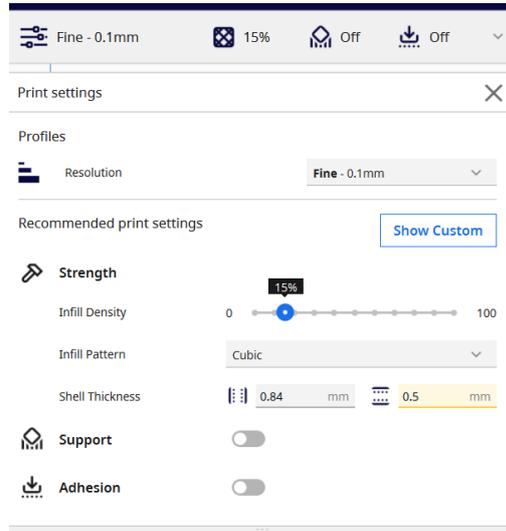


Figura 101. Parámetros de impresión para Modix BIG-60. (Elaboración propia)

Finalmente, se obtuvieron las siguientes simulaciones de impresión con PLA y ABS de material:

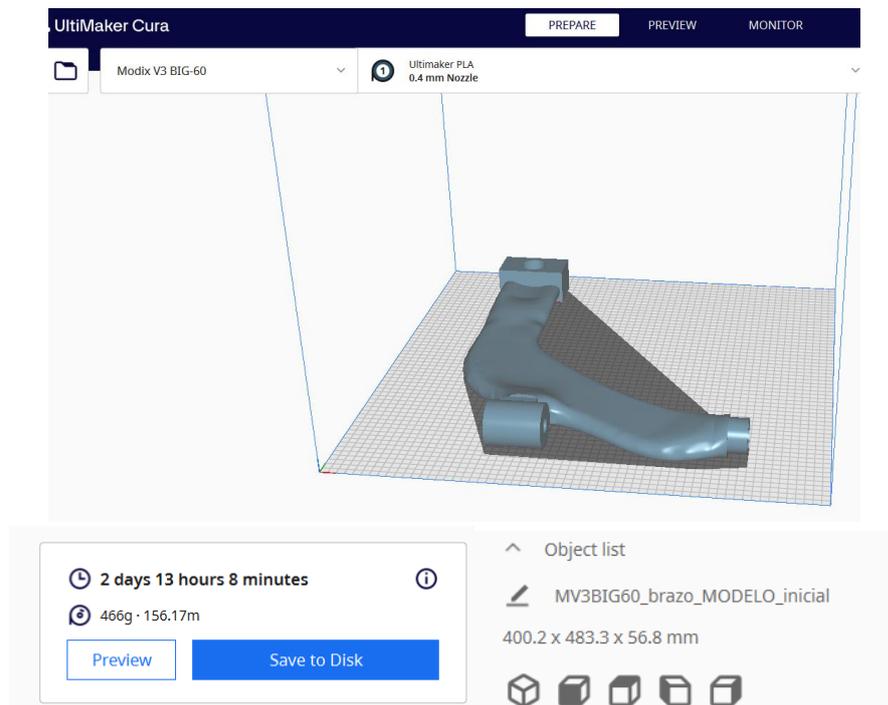


Figura 102. Simulación de impresión para el material PLA. (Elaboración propia)

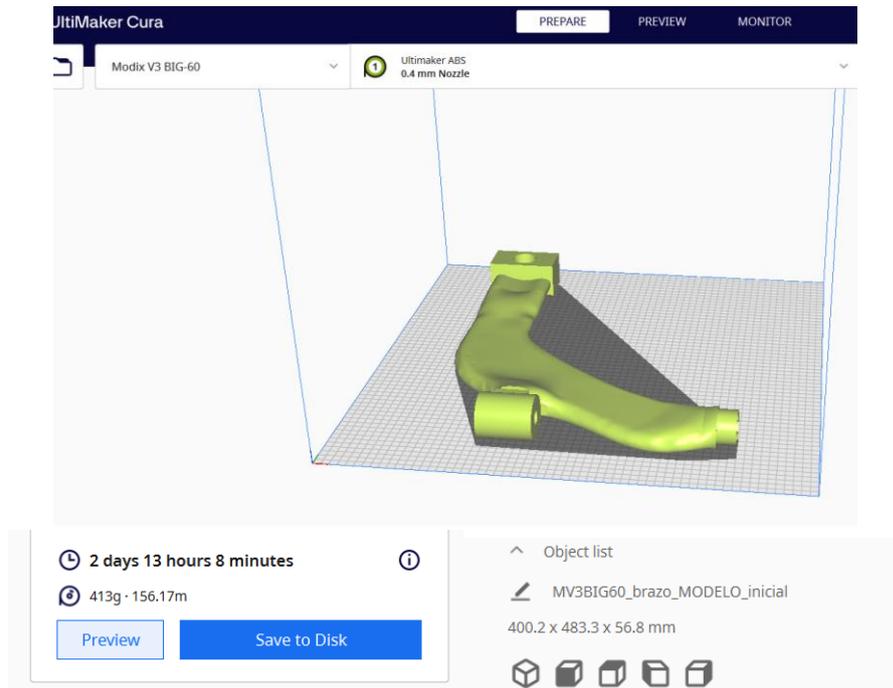


Figura 103. Simulación de impresión para el material ABS. (Elaboración propia)

3.8.4.2 Cálculo con Excel:

Hay varias posibles formas de calcular un presupuesto para la fabricación aditiva. El más usado es el método *BITFAB*; no obstante, se usó el método que utiliza la Universidad Pontificia Comillas ICAI para calcular presupuestos:

Lo primero que se ha de hacer, es determinar el precio de adquisición de la **impresora** utilizada, su coste de mantenimiento y el período estimado de amortización. Asimismo, es necesario estimar el número de horas anuales de uso previsto, considerando tanto los días laborales como la jornada diaria de funcionamiento. Con estos datos, es posible calcular el coste horario de la máquina en términos de amortización (€/h), así como el precio de venta por hora al cliente, lo que permite establecer un margen de beneficio.

Para obtener un beneficio de venta, en este caso se ha considerado un incremento del 10% sobre el coste horario de la máquina calculado en términos de amortización. Aunque este porcentaje pueda resultar bajo en el contexto de un proyecto comercial, se considera suficiente dado que la fabricación de la pieza se realiza en el entorno universitario.

El período de amortización varía en función del tipo de impresora; aunque, dado el rápido desarrollo actual de la fabricación aditiva, se estima comúnmente un período medio de amortización de, aproximadamente, dos años.

En cuanto a la disponibilidad operativa, si bien algunas impresoras pueden funcionar hasta 12 horas diarias, se considera razonable una media de 8 horas de trabajo al día durante 223 días al año, descontando festivos y fines de semana del calendario anual.

Una vez se completan los datos referentes a la máquina, se busca información sobre el precio del **material** a usar tanto para los soportes como para la fabricación de la pieza en €/kg. Para algunas tecnologías, como la MJF, puede ser necesario buscar información adicional sobre el material utilizado.

Luego, los datos sobre el **uso de técnicos analistas** de la máquina, encargados de abrir el .stl, orientarlo y mandarlo a imprimir, realizando también el post-procesado de la pieza impresa. El coste de un técnico analista suele rondar entre los 20 y 30€, estando frecuentemente más cerca de los 30€.

Finalmente, se añaden los **datos de la simulación de impresión** de la pieza, sólo obtenibles tras haber usado un *slicer* en el modelo a imprimir. Estos datos comprenden: la cantidad de material del modelo y del soporte usado en gramos, el tiempo de impresión del modelo en horas, el tiempo que ha

trabajado el técnico analista sobre la pieza (normalmente, suelen ser 2 horas), y la cantidad de piezas a imprimir (en este caso, 1 ud.).

Usando el Excel con todos estos datos descritos en los párrafos anteriores, se sacaron los presupuestos estimados de fabricación del brazo de suspensión. En el apartado 4, se muestran los presupuestos finales obtenidos.

3.8.4.2.1 Cálculos para el presupuesto de SLA:

Para la impresión de la pieza en escala reducida por SLA, se usó la impresora Form 4, la cual no tiene volumen de trabajo suficiente para imprimir el brazo de suspensión original.



Figura 104. Impresora SLA. (Formlabs-printer-Form-4, s. f.)

Nuestro objetivo es estimar un presupuesto para la pieza original, por lo que tuvieron que realizarse varias modificaciones:

Primero, se modificaron **los parámetros de la impresora**; siendo el volumen de la máquina:

$$\frac{200 \cdot 125 \cdot 210 \text{ mm}^3}{1000} = 5.250,00 \text{ cc} \quad (14)$$

Máquina equivalente:		
Si por una máquina de 5250,00 cc son	3026,46 €	
Una máquina de 27543.07433 cc son	15877,7167 €	

Figura 105. Precios de la máquina real y equivalente. (Elaboración propia)

Aplicando la proporción, se calculó un precio equivalente para una máquina de volumen igual al de la pieza: 15.877,72€.

No se tuvo que realizar ningún cambio en el apartado del precio en €/kg del material, ni en la sección del coste de los operarios.

Los cambios en el apartado de la pieza impresa se modificaron de la siguiente forma:

Para la pieza escalada:			
tiempo de impresión:	2h 50mins =	2,83	h
Material total usado:		65,06	ml
Volumen modelo:		1995,2521	cm ³

Figura 106. Valores de impresión para la pieza escalada en SLA. (Elaboración propia)

Para la pieza con las dimensiones reales:

- Se calcula el volumen del modelo escalado:

$$\frac{132,38 \cdot 160,14 \cdot 27,60 \text{ mm}^3}{1.000} = 1.995,2521 \text{ cc} \quad (15)$$

- Se calcula el volumen de la pieza original:

$$\frac{115,27 \cdot 531,27 \cdot 449,76 \text{ mm}^3}{1.000} = 27.543,0743 \text{ cc} \quad (16)$$

- Se estima el material que se usaría al imprimir el original:

$$\frac{65,06 \cdot 27.543,0743}{1.995,2521} = 898,1083 \text{ ml} \quad (17)$$

	volumen mat	vol modelo
escalado:	65,06	1995,2521
original:	898,108272	27543,0743

Figura 107. Volumen de material para el modelo real y escalado. (Elaboración propia)

- Se halla el tiempo de impresión de la pieza original:

$$\frac{2,83 \cdot 27.543,0743}{1.995,2521} = 39,0661914 \text{ h} \quad (18)$$

Para pieza real:			
tiempo impresión:		39,0661914	h
Volumen del modelo:		27543,0743	cc

Figura 108. Tiempo de impresión del modelo real y escalado. (Elaboración propia)

Aclaración: según la orientación en que estuviera la pieza, las dimensiones cambiaban. Es por esto que en las ecuaciones 15 y 16 no coinciden los valores.

3.8.4.2.2 Cálculos de presupuesto para MJF:

La mayoría de los cálculos son iguales que cuando se estimó el presupuesto para la tecnología SLA, ya que se realizó la simulación de impresión con la pieza reducida en la misma escala.

Los únicos cambios son: la máquina, cuyo precio es de 96.703€; los materiales con especificaciones adicionales; y los parámetros de impresión de la simulación.

Cabe destacar que la impresora empleada para la estimación de presupuesto mediante simulación con tecnología de polvo no corresponde a una máquina MJF, sino a una basada en la tecnología SLS, debido a la falta de equipos MJF compatibles. No obstante, la impresora Fuse 1+30W se utilizó como referencia orientativa para obtener una estimación aproximada del coste de impresión de la pieza mediante tecnologías de fabricación aditiva en polvo.



Figura 109. Impresora Fuse 1 + 30W. (Fuse 1 + 30W, s. f.)

- **El precio de la máquina:**

El precio de su mantenimiento suele ser el 10% del valor inicial de la compra.

La amortización de este tipo de máquinas suele ser de 2 años, debido al rápido ritmo de innovación en la impresión 3D, particularmente en tecnologías como SLS y MJF, que afectan tanto al rendimiento como a la viabilidad económica de los equipos existentes.

Con un período de amortización de dos años, se puede mantener una competitividad tecnológica y justificar renovaciones periódicas del equipo (ChatGPT, s. f.).

Precio máquina	volumen (cc)	precio (€)
Escalada	8167,5	28675,79
Real	27543,07433	96702,7139

Figura 110. Precio de la pieza real y la escalada. (Elaboración propia)

○ **El material usado y sus parámetros:**

Suelen vender el Nylon en lotes de 6kg (*Material-MJF*, s. f.).

Precio unitario del Material usado: Nylon 11 CF V1	
6 kg	1208,79 €
1 kg	201,465

Figura 111. Precio en €/kg del material de impresión. (Elaboración propia)

En la impresión de polvo se han de añadir dos parámetros para el material: la densidad del empaquetado del material y el nuevo material:

- La densidad del empaquetado es el volumen total de la máquina ocupado por la pieza a imprimir. Cuanto mayor sea, más se aprovecha el volumen de impresión y menores serán las pérdidas de material sin uso efectivo, reduciéndose el coste. Ahora, hay que tener cuidado; si la densidad es muy grande, puede haber problemas de refrigeración.

Lo normal, sería una densidad entre el 10 y 20%. Como se escaló el volumen de la máquina hasta llegar al volumen exacto de la pieza, nuestra densidad sería del 100%, un valor no realista.

No obstante, esto es un coste estimado, puesto que con tecnologías MJF aún no se pueden imprimir volúmenes tan grandes como los del brazo de suspensión.

Si se quisiese conseguir una densidad del 20% (valor estándar), se obtendría un coste unitario de pieza de 51.372,69€/ud, lo cual es un precio demasiado caro, debido a que la máquina tendría que tener unas dimensiones mucho mayores para que ese valor fuera posible:

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -MJF		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)		483.514
Coste mantenimiento anual (€)		48.351
Años de amortización		4
Días impresión/año		48
Impresiones/día		1
Precio impresión (€)		3525,62
Precio Impresión venta-público (€)		3878,18
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material: (€/kg)		201,47
Coste material: (€/cc)		0,21
Volumen Total (cc)		27543,07
Densidad de Empaquetado		20,00%
Material Nuevo		20,00%
Material Nuevo Añadido (cc)		1101,722973
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. limpieza (€/h)		30
PIEZA VOD - BRAZO DE SUSPENSIÓN		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS		
	Opción Sólido	Costes parciales
Material modelo (cc)	56045,49	11885,48 €/ud
Impresión	-	39457,21 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,50	15,00 €/ud
Tiempo Limpieza (h)	0,50	15,00 €/ud
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	51372,69 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	51372,69 €	

Figura 112. Presupuesto para conseguir un 20% de densidad empaquetado. (Elaboración propia)

Finalmente, se decidió una densidad del 20%, manteniendo las dimensiones mínimas de la máquina para poder imprimir la pieza.

- El nuevo material es la proporción de polvo virgen que ha de añadirse a la mezcla total de polvo para que la impresión tenga una calidad adecuada. Normalmente, el porcentaje de polvo nuevo suele ser desde 20 al 50% del material usado. Cuanto mayor sea el polvo virgen necesario, más cara será la impresión. En este caso, sería del 20%.
- **Los resultados de la simulación de impresión:**
El tiempo de impresión no es relevante en la estimación de este presupuesto; sólo se tiene en cuenta la cantidad de kilogramos de material usado durante la impresión.

Polvo usado		modelo		
4060	cc	1995,25208	cc	escalado
56045,4907	cc	27543,0743	cc	real

Figura 113. Polvo utilizado para la pieza real y la escalada. (Elaboración propia)

El tiempo de limpieza para este tipo de tecnología suele ser de unos 30 minutos; y el tiempo de trabajo necesario del técnico-analista para programar la impresión también suele ser de media hora.

3.8.4.2.3 Cálculos de presupuesto para FDM:

En este caso, se realizó la simulación de impresión con la pieza de dimensiones reales; no es necesario “escalar” los resultados obtenidos en el *slicer*.

La máquina usada, fue la Modix V3 BIG-60, la cual se amortiza en 2 años, puesto que las tecnologías FDM evolucionan muy rápido, y el precio de amortización suele ser el 10% del precio inicial:

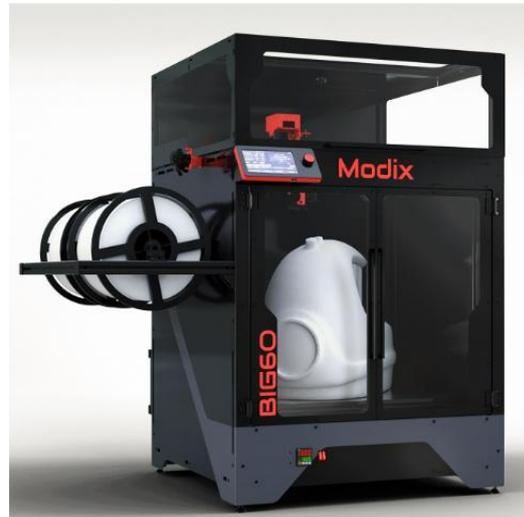


Figura 114. Máquina Modix V3 BIG-60 para FDM. (Modix-BIG-60, s. f.)

Precio máquina:		
6.710,00 €		
Precio material:		
PLA	33,93 € por	750 g
	45,24 € por	1000 g
ABS	39,1413 € por	750 g
	52,1884 € por	1000 g

Figura 115. Precio de máquina y materiales de FDM. (Elaboración propia)

Para el material PLA (*Filament-PLA-S-Series-prize*, s. f.), se usaron 466g en la impresión y se tardó 61.13 horas en terminarlo.

Para el material ABS (*Filament-ABS-S-Series-prize*, s. f.), se usaron 413g en la impresión y se tardó 61.13 horas en terminarlo.

3.8.5. Preparación por *Slicers*:

Una vez se compararon los presupuestos pedidos a los proveedores con los calculados para producción interna, se decidió fabricar la pieza a escala real en el laboratorio de la universidad, usando la tecnología **FDM**, puesto que era la tecnología que aportaba el mejor equilibrio de precio y funcionalidad estructural para el brazo de suspensión.

Se usó la impresora FDM Dynamical Tools DT-600+ para fabricar el prototipo, con el material PLA. Para preparar la pieza para la impresión, se usó el *slicer* propio de la máquina:



Figura 116. Slicer propio de la DT-600. (*Simplify3D-Slicer-DT600, s. f.*)

Se imprimió un prototipo de la pieza a escala en el laboratorio de ICAI. Para ello, se tuvo que hacer un previo *slicing* de la pieza para poder pasarla a *G-code* y, así, convertir al modelo a un idioma que la impresora pudiese entender e imprimir.

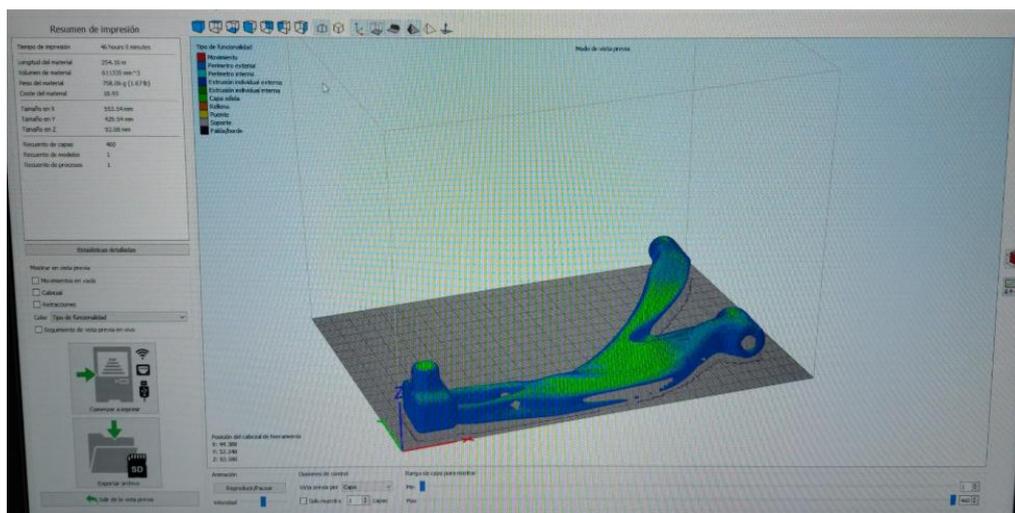


Figura 117. Preparación de la pieza en tamaño real usando el slicer Simplify 3D. (Cortesía de Mariano Jiménez Calzado)

El resumen de la simulación de impresión de la pieza en la DT-600, fue:

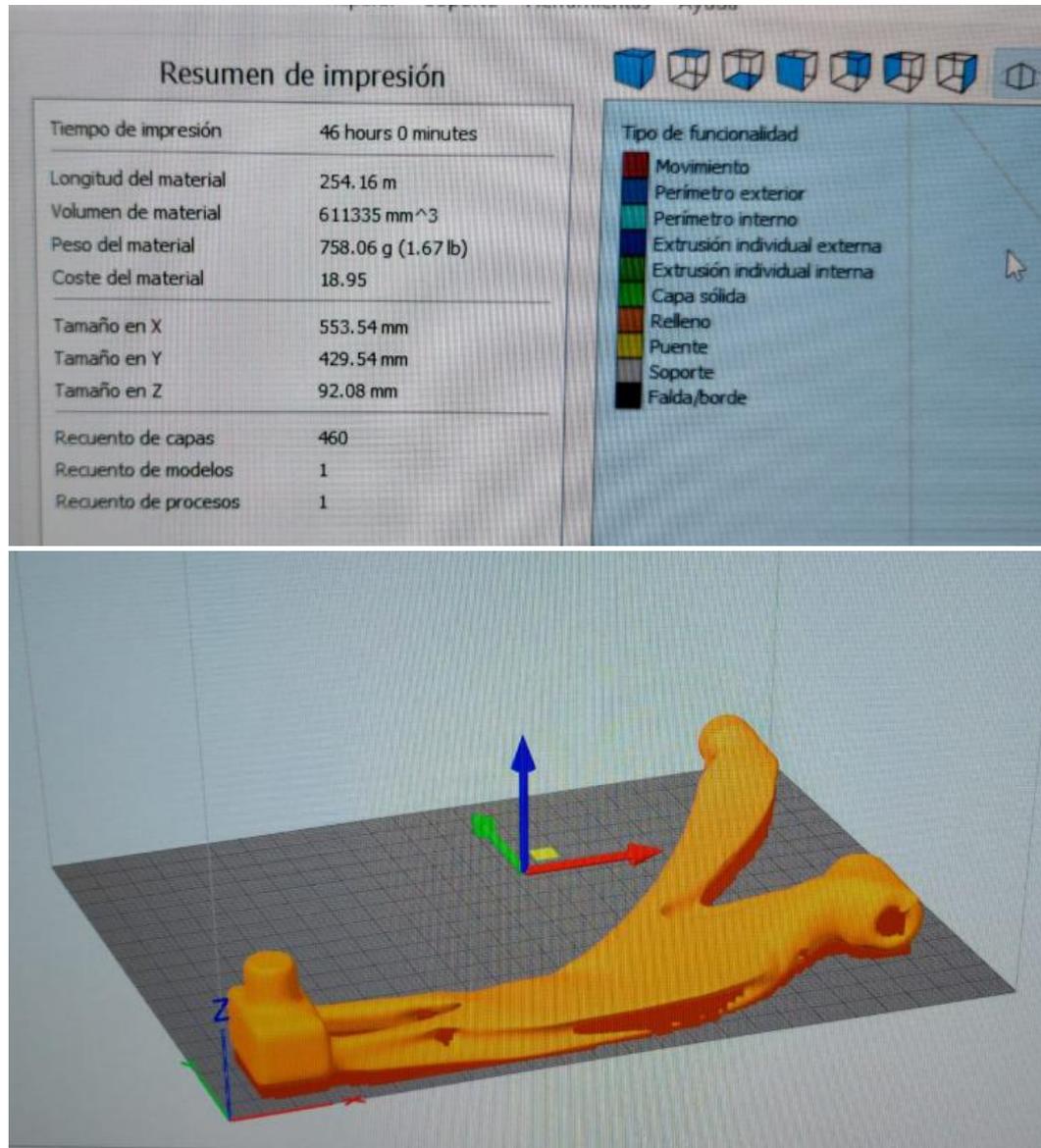


Figura 118. Resumen de la simulación de impresión de la pieza. (Cortesía de Mariano Jiménez Calzado)

También, se imprimió la pieza en escala 1/2 con la tecnología **MJF** usando como material la poliamida 12; puesto que las MJF proporcionan las mejores propiedades mecánicas de las tres tecnologías disponibles en el laboratorio.

Se mandó a imprimir la pieza junto con otros elementos guardados en la cola de impresión de la máquina HP 580C, usándose el *slicer* integrado en el programa de la misma impresora:

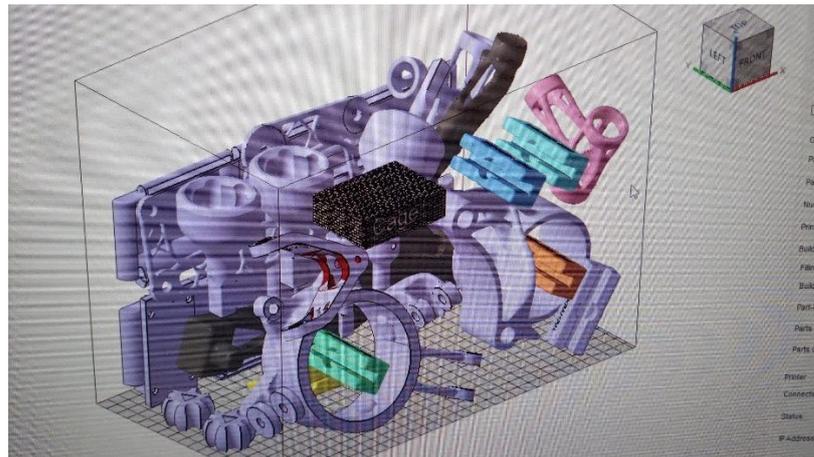


Figura 119. Bandeja de impresión de la HP 580C. (Cortesía de Mariano Jiménez Calzado)

Para completar la impresión del brazo de suspensión, se estimó un tiempo de, aproximadamente, 11 horas:

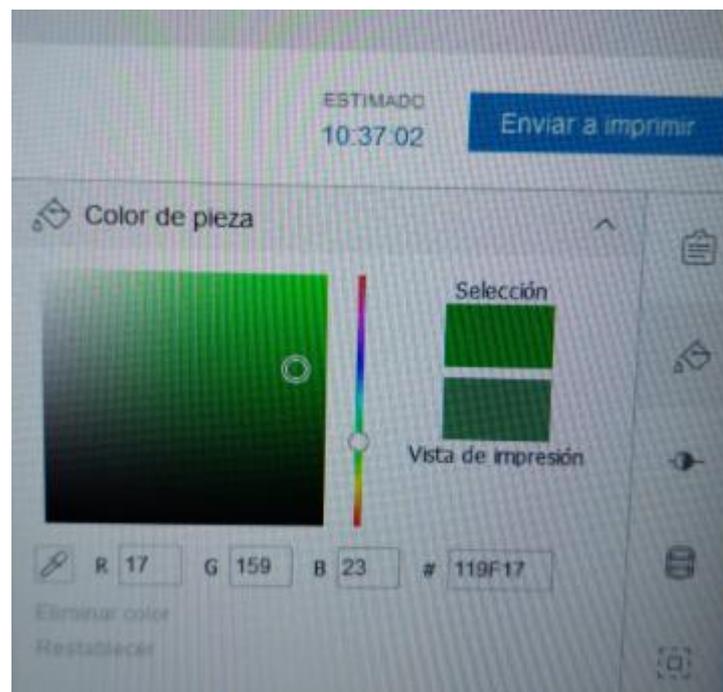


Figura 120. Parámetros de la simulación de impresión MJF. (Cortesía de Mariano Jiménez Calzado)

3.9. Impresión y post-procesado:

Como se mencionó en el apartado 3.8.5, se imprimió la pieza con las tecnologías FDM en escala real y con la MJF en escala reducida a 1/2.

3.9.1. Impresión de la pieza con la tecnología FDM:

Se realizó con la impresora Dynamical Tools DT-600+:

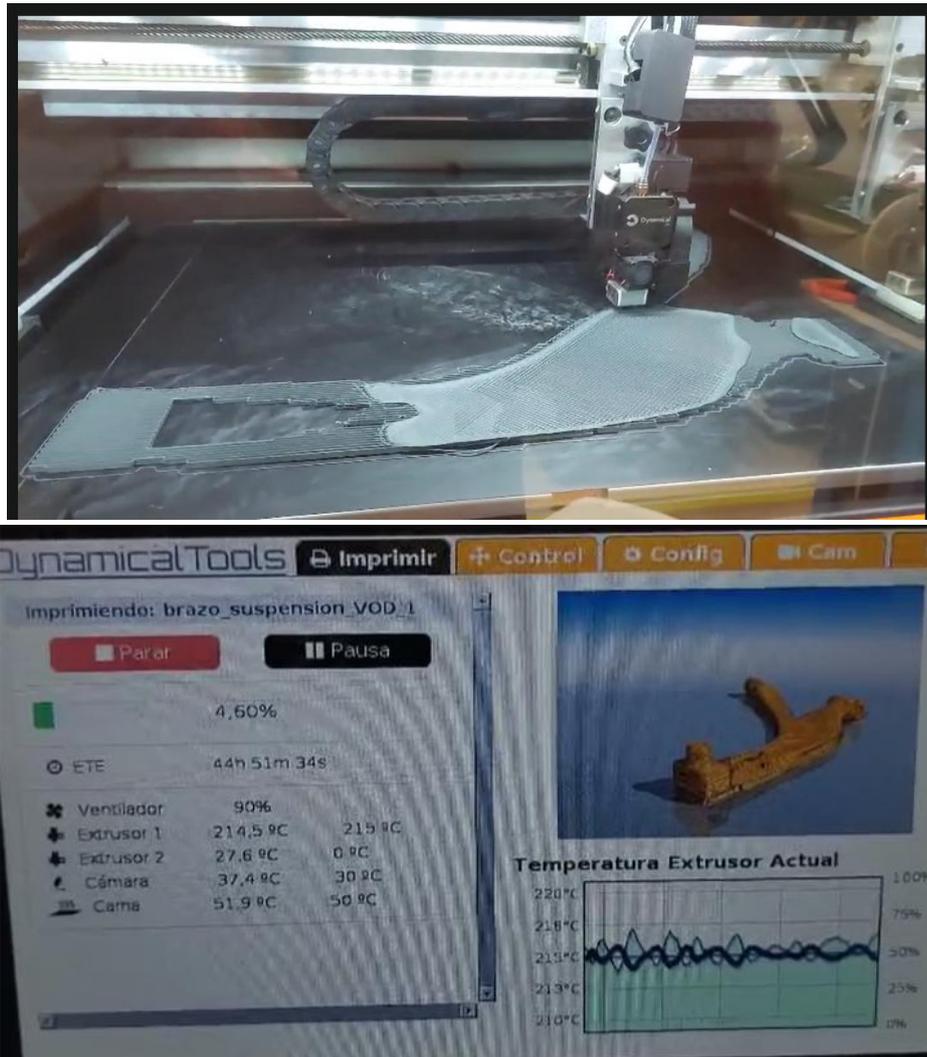


Figura 121. Impresión de la pieza en impresora FDM DT-600. (Cortesía de Mariano Jiménez Calzado)

La impresión se completó en 44 horas y 51 minutos, quedando la siguiente pieza que hubo que post-procesar:



Figura 122. Pieza impresa por FDM sin post-procesar. (Elaboración propia)

3.9.1.1 Post-procesado de la pieza impresa por FDM:

El post-procesado de la pieza se hizo de forma manual.

La primera fase consistió en, con unos alicates, eliminar los soportes de la pieza:



Figura 123. Eliminación de los soportes de la pieza. (Elaboración propia)

Seguidamente, se utilizó una espátula y una lijadora Dremel para lijar la rugosidad de la superficie, dejada por los soportes.



Figura 124. Espátula para eliminar imperfecciones superficiales. (Elaboración propia)



Figura 125. Lijadora Dremel para eliminar rugosidades superficiales. (Elaboración propia)

Finalmente, se suavizó y terminó de nivelar la superficie con una lija manual. Tras esto, el post-procesado de la pieza ya estaba listo.

3.9.2. Impresión de la pieza con la tecnología MJF:

Se realizó con la impresora HP 580C:



	X	Y	Z	
Minimum:	9.82	77.63	18.53	
Maximum:	322.29	144.94	200.72	
Size:	312.47	67.32	182.19	
Volume:	200.7015 cm ³		Area: 495.8210 cm ²	
Points:	924357		Edges: 2722563	
Triangles:	1815042		Shells: 1	
Holes:	0		Bad edges: 0	
Boundary edges:	0		Boundary length: 0.00 mm	
Flipped triangles:	0			
Surface is closed:	Yes			
Surface is orientable:	Yes			
	Min:	Max:	Ø:	Dev:
Edges/Point	0.00	191.00	5.89	1.24
Triangles/Edge	2.00	2.00	2.00	0.00
Triangle quality	0.00	1.00	0.54	0.29
Edge length	0.00	11.83	0.25	0.38

Figura 126. Preparación de la pieza en impresora HP 580C. (Cortesía de Mariano Jiménez Calzado)

La impresión se completó en, aproximadamente, 11 horas.

El post-procesado de la pieza en escala reducida se completó en 20 minutos; y no se realizó de forma manual, sino que se utilizó la siguiente máquina NORBLAST para limpiar el modelo impreso:



*Figura 127. Máquina NORBLAST para post-procesado de piezas impresas con la HP 580C.
(Elaboración propia)*

4. RESULTADOS:

4.1. Optimización usando fundición nodular dúctil de acero:

4.1.1. Caso de cargas 1:

El primer caso límite de carga al que se le puede someter a la pieza corresponde a una situación de frenado brusco cuando el vehículo circula a máxima velocidad en línea recta, ascendiendo por una cuesta de pendiente mínima. En este caso, la pendiente escogida fue de 1° , con el objetivo de representar una condición que permita alcanzar la máxima velocidad posible y, en consecuencia, generar el escenario de frenado más exigente para la pieza.

Sabiendo que, para el caso de carga 1, los esfuerzos sobre el brazo de suspensión son:

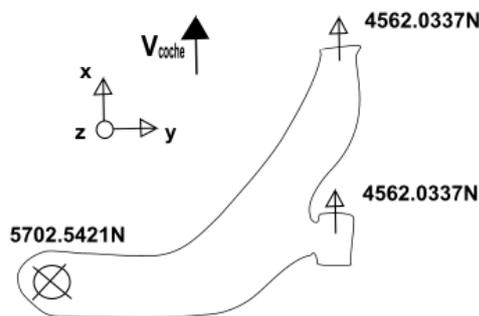


Figura 128. Esfuerzos sobre el brazo de suspensión en el caso de cargas 1. (Elaboración propia)

Tras un proceso iterativo basado en sucesivas fases de prueba y ajuste, se obtuvo un modelo optimizado que presenta un equilibrio adecuado entre la reducción de masa y el mantenimiento de la funcionalidad estructural. Dicho equilibrio se alcanzó al lograr una reducción de masa al 59% respecto del modelo original:

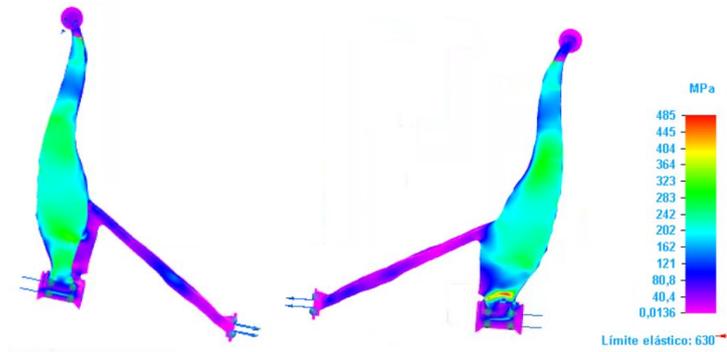


Figura 129. Optimización final para el primer caso de carga en fundición. (Elaboración propia)

El modelo resultante tenía una masa final de 5.541 kg, y soporta los esfuerzos con un coeficiente de seguridad de 1.3. No se romperá ante las fuerzas a las que será sometido durante su vida útil.

4.1.2. Caso de Cargas 2:

El segundo caso límite de carga al que se le puede someter a la pieza corresponde a una situación de frenado brusco cuando el vehículo iba a la máxima velocidad posible hacia atrás, descendiendo en una cuesta de pendiente mínima. Por el mismo motivo que en el Caso 1, la pendiente escogida fue de 1°.

Sabiendo que las fuerzas sobre el brazo eran de la siguiente forma:

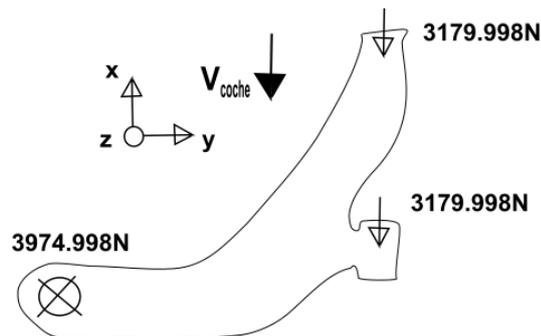


Figura 130. Esfuerzos sobre el brazo de suspensión en el caso de cargas 2. (Elaboración propia)

Tras un proceso iterativo basado en sucesivas fases de prueba y ajuste, se obtuvo un modelo optimizado que presenta un equilibrio adecuado entre la reducción de masa y el mantenimiento de la funcionalidad estructural. Dicho equilibrio se alcanza al reducir la masa al 62% respecto al original (Pachapuri et al., 2021):

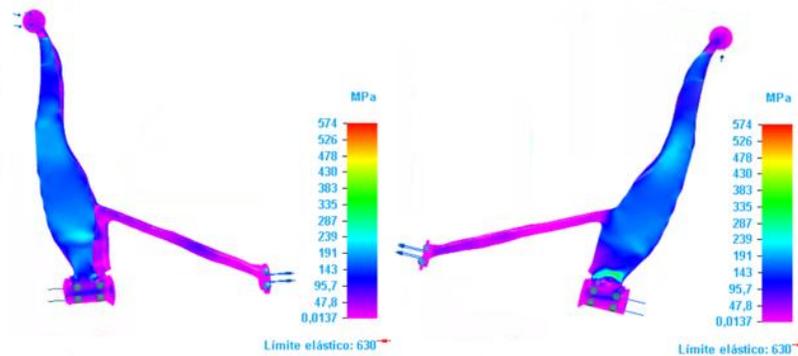


Figura 131. Optimización final para el segundo caso de carga en fundición. (Elaboración propia)

El modelo resultante tiene una masa final de 5.135 kg, y soporta los esfuerzos con un coeficiente de seguridad de 1.1. No se romperá ante las fuerzas a las que será sometido durante su vida útil.

4.1.3. Caso de Cargas 3:

El tercer caso límite de carga al que se le puede someter a la pieza es cuando el vehículo toma una curva cerrada a máxima velocidad. En este caso, analizamos la rueda exterior a la curva:

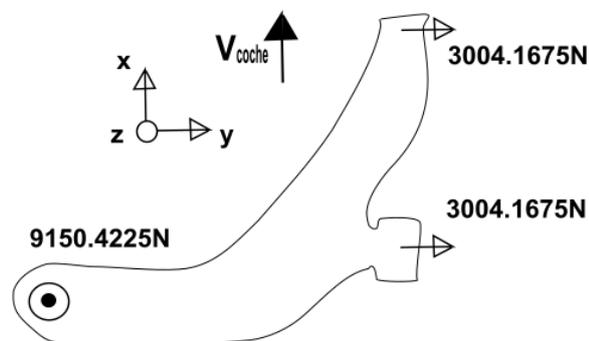


Figura 132. Esfuerzos sobre el brazo de suspensión en el caso de cargas 3. (Elaboración propia)

Tras un proceso iterativo basado en sucesivas fases de prueba y ajuste, se obtuvo un modelo optimizado que presenta un equilibrio adecuado entre la reducción de masa y el mantenimiento de la funcionalidad estructural. Dicho equilibrio se alcanza al reducir la masa al 35%:

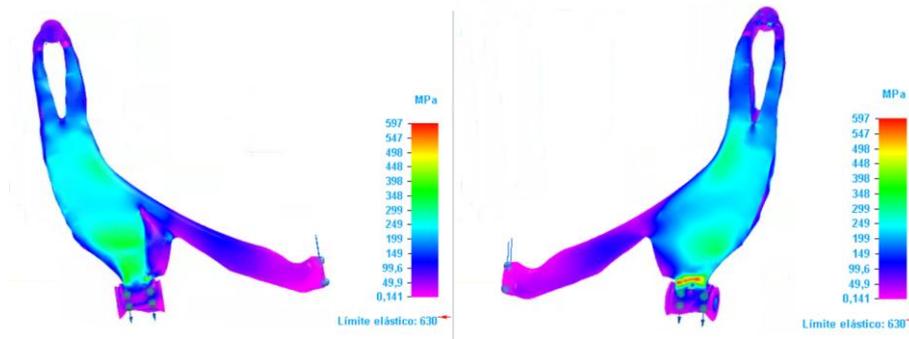


Figura 133. Optimización final para el tercer caso de carga en fundición. (Elaboración propia)

El modelo resultante tiene una masa final de 8.784 kg, y soporta los esfuerzos con un coeficiente de seguridad de 1.055. No se romperá ante las fuerzas a las que será sometido durante su vida útil.

4.1.4. Caso de cargas 4:

El cuarto caso extremo de carga al que se le puede someter a la pieza es cuando el vehículo toma una curva cerrada a máxima velocidad. En este caso, analizamos la rueda interior a la curva:

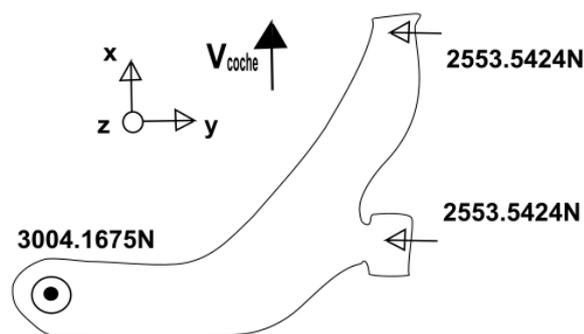


Figura 134. Esfuerzos sobre el brazo de suspensión en el caso de cargas 4. (Elaboración propia)

Tras un proceso iterativo basado en sucesivas fases de prueba y ajuste, se obtuvo un modelo optimizado que presenta un equilibrio adecuado entre la reducción de masa y el mantenimiento de la funcionalidad estructural. Dicho equilibrio se alcanza al reducir la masa al 60% respecto al modelo original:

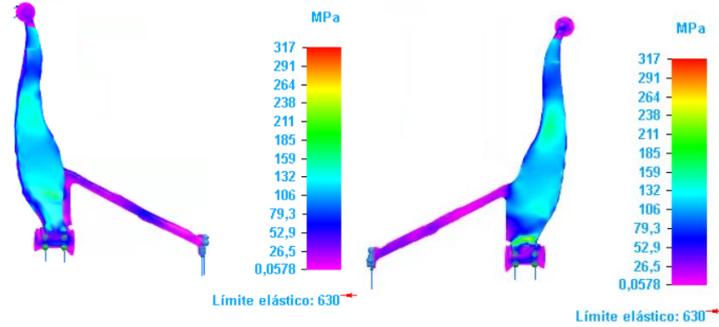


Figura 135. Optimización final para el tercer caso de carga en fundición. (Elaboración propia)

El modelo resultante tiene una masa final de 5.406 kg, y soporta los esfuerzos con un coeficiente de seguridad de 1.99. No se romperá ante las fuerzas a las que será sometido durante su vida útil.

4.2. Optimización usando aluminio:

4.2.1. Caso de cargas 1:

De nuevo, el primer caso límite de carga al que se le puede someter a la pieza corresponde a una situación de frenado brusco cuando el vehículo circula a máxima velocidad en línea recta, ascendiendo por una cuesta de pendiente mínima. Como ya se explicó en el apartado 4.1.1, la pendiente escogida fue de 1° , con el objetivo de representar una condición que permita alcanzar la máxima velocidad posible y, en consecuencia, generar el escenario de frenado más exigente para la pieza.

Sabiendo que, para el caso de carga 1, los esfuerzos sobre el brazo de suspensión son:

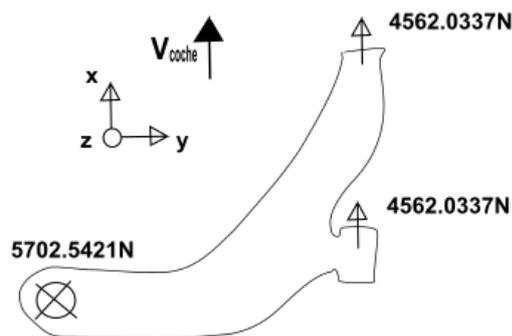


Figura 136. Esfuerzos sobre el brazo de suspensión en el caso de cargas 1. (Elaboración propia)

Tras un proceso iterativo basado en sucesivas fases de prueba y ajuste, se obtuvo un modelo optimizado que presenta un equilibrio adecuado entre la reducción de masa y el mantenimiento de la funcionalidad estructural. Dicho equilibrio se alcanza al reducir la masa al 56% respecto del modelo original:

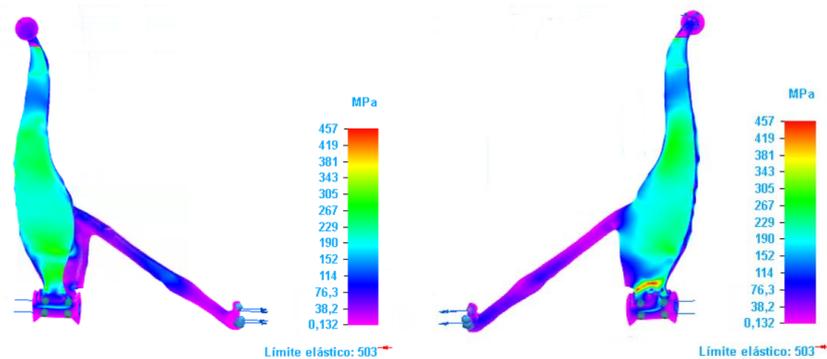


Figura 137. Optimización final para el primer caso de carga en aluminio. (Elaboración propia)

El modelo resultante tiene una masa final de 2.234 kg, y soporta los esfuerzos con un coeficiente de seguridad de 1.1. No se romperá ante las fuerzas a las que será sometido durante su vida útil.

4.2.2. Caso de Cargas 2:

El segundo caso límite de carga al que se le puede someter a la pieza corresponde a una situación de frenado brusco cuando el vehículo iba a la máxima velocidad posible hacia atrás, descendiendo en una cuesta de pendiente mínima. Por el mismo motivo que en el caso 1, la pendiente escogida fue de 1º.

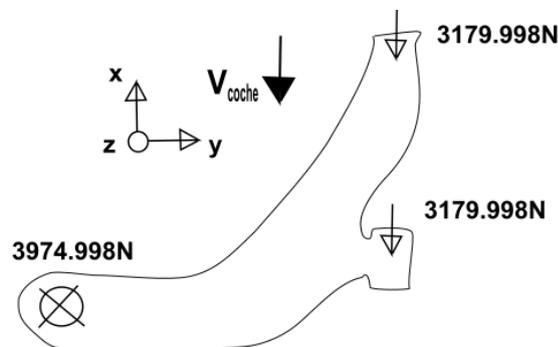


Figura 138. Esfuerzos sobre el brazo de suspensión en el caso de cargas 2. (Elaboración propia)

Tras un proceso iterativo basado en sucesivas fases de prueba y ajuste, se obtuvo un modelo optimizado que presenta un equilibrio adecuado entre la reducción de masa y el mantenimiento de la funcionalidad estructural. Dicho equilibrio se alcanza al reducir la masa al 58% respecto al modelo original:

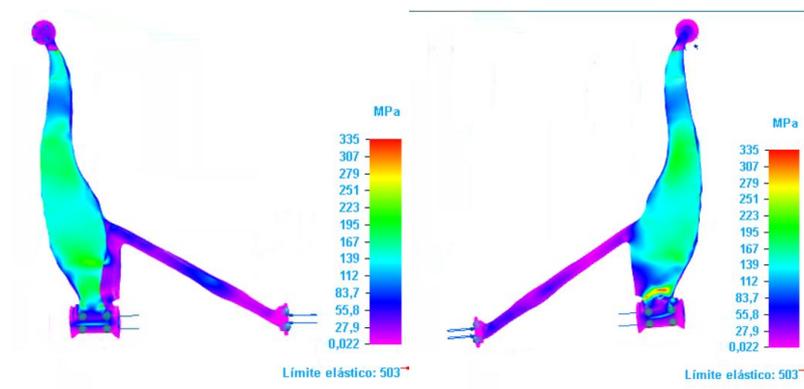


Figura 139. Optimización final para el segundo caso de carga en aluminio. (Elaboración propia)

El modelo resultante tiene una masa final de 2.219 kg, y soporta los esfuerzos con un coeficiente de seguridad de 1.501. No se romperá ante las fuerzas a las que será sometido durante su vida útil.

4.2.3. Caso de Cargas 3:

El tercer caso límite de carga al que se le puede someter a la pieza, como ya se dijo en el apartado 4.1.3, es cuando el vehículo toma una curva cerrada a máxima velocidad. En este caso, analizamos la rueda exterior a la curva:

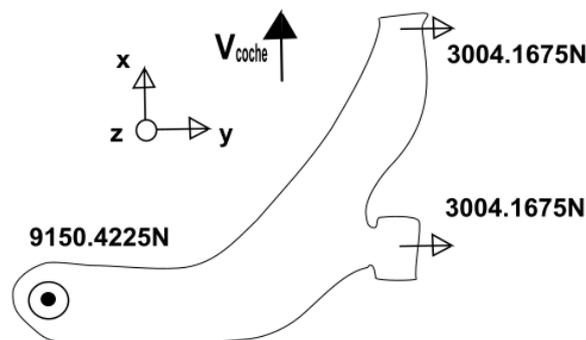


Figura 140. Esfuerzos sobre el brazo de suspensión en el caso de cargas 3. (Elaboración propia)

En un análisis inicial, se comprobó que el límite elástico era casi alcanzado sin efectuar ninguna reducción de masa:

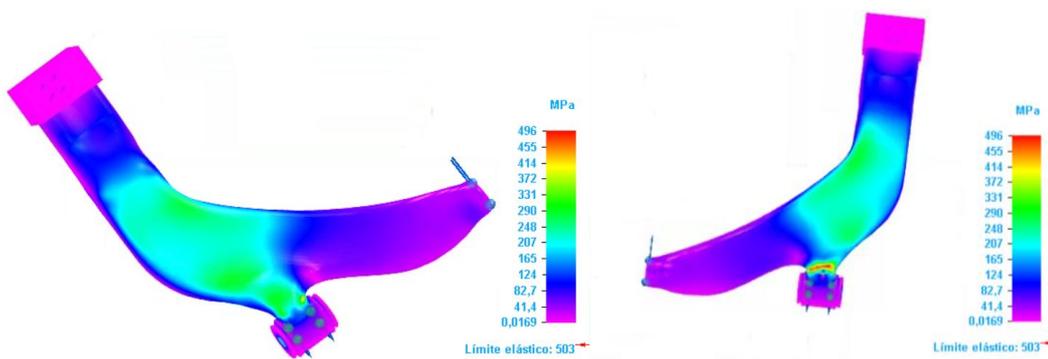


Figura 141. Análisis inicial para el tercer caso de carga en aluminio. (Elaboración propia)

Realizando varios análisis, se comprobó que, efectivamente, con reducciones del 5% o superiores, la pieza acabaría partiendo bajo las cargas a las que está sometida durante su vida útil.

Sólo sería viable una reducción de un 3%, que es el equivalente a eliminar la geometría cúbica que se añadió al modelo inicial, el cual emula el saliente que conecta con la rueda, necesaria para poder efectuar el análisis.

En otras palabras, la reducción de masa ideal de la pieza original sería de 0%, con un coeficiente de seguridad de 1.00 y una masa final de 5.283 kg.

4.2.4. Caso de cargas 4:

El cuarto caso límite de carga al que se le puede someter a la pieza es cuando el vehículo toma una curva cerrada a máxima velocidad. En este caso, analizamos la rueda interior a la curva:

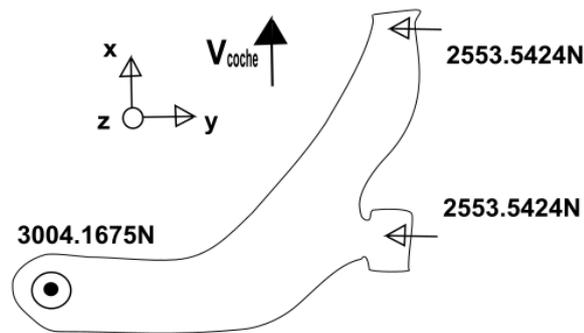


Figura 142. Esfuerzos sobre el brazo de suspensión en el caso de cargas 4. (Elaboración propia)

Después de varios análisis, se llegó a una optimización que cumplía con el equilibrio entre una buena reducción de masa y una buena resistencia a los esfuerzos a los que será sometido. Esto se logra con una optimización del 57% de masa:

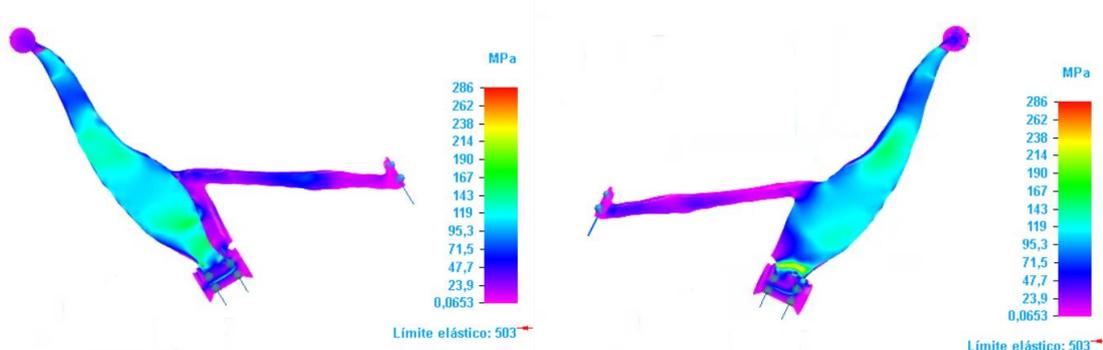


Figura 143. Optimización final para el cuarto caso de carga en aluminio. (Elaboración propia)

El modelo resultante tiene una masa final de 2.272 kg, y soporta los esfuerzos con un coeficiente de seguridad de 1.76. No se romperá ante las fuerzas a las que será sometido durante su vida útil.

Tras comparar todas las optimizaciones, se llegó a la conclusión de que el caso más restrictivo era el tercero. Así, se seleccionaron los modelos optimizados para el caso 3 de ambos materiales: aluminio con una reducción de masa del 0% y fundición nodular dúctil de acero con una reducción de masa del 35%.

Tras compararlos y comprobar cuál aguantaba mejor los esfuerzos, se determinó que la referencia para continuar el análisis sería la pieza optimizada al 35% con el material de fundición nodular dúctil de acero.

4.3. Adaptación a los criterios de diseño y fabricación:

Los resultados obtenidos en las optimizaciones poseían geometrías no reproducibles según los criterios de diseño y fabricación; ya que no se debe alterar la masa de las zonas donde las fuerzas exteriores se aplican para asegurar el buen funcionamiento y unión de la pieza a la estructura del coche.

Además, la fundición nodular dúctil de hierro es un material poco común en la fabricación de brazos de suspensión. Por esto, se buscaron materiales con propiedades y límites elásticos similares a la fundición que se usen frecuentemente para fabricar de forma convencional este tipo de piezas.

Finalmente, se escogió el acero AISI 4130 (25CrMo4) y se modificó la geometría de la forma en que se muestra a continuación:



Figura 144. Pieza optimizada adaptada a los criterios de diseño y fabricación. (Elaboración propia)

4.4. Refinamiento de la pieza para su fabricación:

Con Altair Inspire v2023, se refinó la pieza para conseguir una geometría final suave y fácilmente imprimible:



Figura 145. Brazo de suspensión refinado para fabricación. (Elaboración propia)

La Figura 145 muestra la pieza final que se imprimirá, la cual es fabricable, pues cumple los criterios de fabricación; no es una geometría tosca, pues fue refinada; y puede aguantar todavía los esfuerzos mecánicos a los que será sometida en su vida útil.

4.5. Presupuestos estimados de la impresión:

A la hora de elaborar un escandallo para el proceso de fabricación de un brazo de suspensión por un método tradicional de manufactura, como puede ser el caso de una fundición seguida de mecanizado, se han de tener en cuenta diversos factores clave como:

- El material de la pieza, que, en aplicaciones de este tipo, suele ser un acero perlítico.
- El molde de fundición, cuyo coste puede alcanzar los 35000€ si se fabrica en aluminio, lo cual representa una inversión inicial significativa.
- Las fases, subfases y operaciones asociadas al mecanizado, incluyendo procedimientos de taladrado o fresado que pudieran generar zonas de acumulación tensional.
- El utillaje necesario y su coste.
- La necesidad de elementos de fijación, por ejemplo, tornillos, y cuántos.
- El tiempo estimado de mecanizado, expresado en horas.
- El tamaño de lote de fabricación, que influye directamente en el coste unitario.

Por otro lado, en el caso de una fabricación mediante tecnología generativa (impresión 3D), el escandallo para un brazo de suspensión requiere considerar tanto las variables mencionadas anteriormente, como otro conjunto de parámetros específicos, tal y como se detalla en el apartado 3.8.4.2:

- El coste de adquisición de la impresora, su período de amortización y su amortización anual, que determina el coste horario de uso.
- El precio de venta por hora al cliente, calculado habitualmente aplicando un margen comercial superior al 110% del coste horario de la máquina, con el fin de obtener beneficios.
- El coste del material, incluyendo otros posibles parámetros asociados al mismo.
- Las horas de trabajo del técnico-analista responsable de preparar y supervisar el proceso de impresión.
- Los parámetros obtenidos en la simulación de impresión, tales como el tiempo total de fabricación y la cantidad de material empleada.

Es importante señalar que la estimación del presupuesto se ha realizado siguiendo la plantilla estándar que la Universidad Pontificia Comillas ICAI usa para la evaluación de costes en el laboratorio de fabricación aditiva. En esta metodología, el beneficio se define como la diferencia entre el precio de venta al público y el coste de producción, donde el precio de venta al público se calcula aplicando un margen del 10% sobre dicho coste.

Un margen de beneficio de un 10% resulta claramente insuficiente para un proceso de producción industrial rentable; de la misma forma que fabricar un lote de una única unidad de brazos de suspensión no resulta viable desde el punto de vista comercial. Sin embargo, se ha de tener en consideración que la fabricación se hará en los laboratorios de la universidad con fines puramente académicos. Por este motivo, el valor de venta al público sería despreciable; sin embargo, se mantiene dentro del escandallo aun en su mínimo valor con el fin de asegurar una estimación realista y un proceso de presupuestación completo.

4.5.1. Presupuesto para tecnología FDM, material PLA:

El presupuesto calculado para la fabricación de la pieza mediante impresión 3D FDM, utilizando filamento PLA, se presenta a continuación:

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FDM		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)		6.710
Coste mantenimiento anual (€)		671
Años de amortización		2
Amortización (h/año) - 223 días-año / 8 horas-día		1784
Precio Hora máquina-amortización (€/h)		2,44
Precio Hora venta-público (€/h)		2,69
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material PLA modelo: (€/kg)		45,24
Coste material PLA soporte: (€/kg)		45,24
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)		30
PIEZA VOD - BRAZO DE SUSPENSIÓN		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Sólido	Costes parciales
Material + soporte modelo (g)	466,00	21,08 €/ud
Soporte modelo (g)	0,00	0,00 €/ud
Tiempo modelo (h)	61,13	164,40 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	2,00	60,00 €
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	245,49 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	245,49 €	

Figura 146. Presupuesto para FDM, material PLA. (Elaboración propia)

Tal y como se expuso previamente en el apartado 3.8.2.1, el PLA no es un material técnico; por lo que su uso sólo resulta adecuado para fabricar un primer prototipo conceptual. En caso de requerirse una evaluación funcional de las prestaciones del brazo de suspensión, han de usarse materiales con mejores propiedades mecánicas, como el ABS.

4.5.2. Presupuesto para tecnología FDM, material ABS:

El filamento de ABS es idóneo para la fabricación de prototipos de piezas de responsabilidad; ya que ofrece una mayor resistencia mecánica y una mejor respuesta ante sollicitaciones funcionales. Por tanto, es coherente que el presupuesto asociado a la impresión FDM con el material ABS sea ligeramente superior al obtenido usando PLA, justificando así la elección del ABS para fases más avanzadas del proceso de validación del diseño.

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FDM		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)		6.710
Coste mantenimiento anual (€)		671
Años de amortización		2
Amortización (h/año) - 223 días-año / 8 horas-día		1784
Precio Hora máquina-amortización (€/h)		2,44
Precio Hora venta-público (€/h)		2,69
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material ABS modelo: (€/kg)		52,19
Coste material ABS soporte: (€/kg)		52,19
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)		30
PIEZA VOD - BRAZO DE SUSPENSIÓN		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (g)	413,00	21,55 €/ud
Soporte modelo (g)	0,00	0,00 €/ud
Tiempo modelo (h)	61,13	164,40 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	2,00	60,00 €
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	245,96 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	245,96 €	

Figura 147. Presupuesto para FDM, material ABS. (Elaboración propia)

4.5.3. Presupuesto para tecnología SLA:

Tras realizar la estimación del precio de la máquina, el material total utilizado en la impresión y el tiempo de impresión, para la pieza en sus dimensiones reales, siguiendo el factor de escala utilizado para el modelo laminado en el *slicer*, se obtuvo el siguiente presupuesto para las tecnologías SLA:

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -SLA		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)		15.878
Coste mantenimiento anual (€)		1.588
Años de amortización		2
Amortización (h/año) - 223 días-año / 8 horas-día		1784
Precio Hora máquina-amortización (€/h)		5,79
Precio Hora venta-público (€/h)		6,36
DATOS COSTE MATERIAL		
material modelo: filamento Resina RIGID 10K (€/cc) (150€-950 cc)		0,36
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)		30
DATOS TÉCNICOS DE DEPOSICIÓN		
<i>Tipo de modelo</i>	Malla	Sólido
Tasa de deposición (cc/h)		705,036
PIEZA VOD - BRAZO DE SUSPENSIÓN		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material + Soporte modelo (cc)	898,11	323,32 €/ud
	0,00	0,00 €/ud
Tiempo modelo (h)	39,07	248,60 €/ud
Piezas por bandeja (ud)	1,00	0,00 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	1,50	45,00 €
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	616,92 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	616,92 €	

Figura 148. Presupuesto para SLA. (Elaboración propia)

4.5.4. Presupuesto para tecnología MJF:

En un principio, se planteó calcular un presupuesto para una densidad de empaquetado del 100%, ya que el volumen de la pieza ocupaba todo el volumen de trabajo de la máquina escalada. No obstante, este porcentaje es inviable en la práctica; puesto que impediría la correcta refrigeración de la máquina durante la operación. Aun así, con fin puramente ilustrativo, se estimó el presupuesto para dicha densidad:

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -MJF		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)		96.703
Coste mantenimiento anual (€)		9.670
Años de amortización		6
Días impresión/año		48
Impresiones/día		2
Precio impresión (€)		268,62
Precio Impresión venta-público (€)		295,48
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material: (€/kg)		201,47
Coste material: (€/cc)		0,21
Volumen Total (cc)		27543,07
Densidad de Empaquetado		100,00%
Material Nuevo		20,00%
Material Nuevo Añadido (cc)		5508,614866
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. limpieza (€/h)		30
PIEZA VOD - BRAZO DE SUSPENSIÓN		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	56045,49	11885,48 €/ud
Impresión	-	601,25 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,50	15,00 €/ud
Tiempo Limpieza (h)	0,50	15,00 €/ud
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	12516,73 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	12516,73 €	

Figura 149. Presupuesto para MJF, densidad del 100%. (Elaboración propia)

Para una máquina de coste tan elevado, se ha estimado un período de amortización de seis años, realizándose 2 impresiones al día para garantizar la viabilidad de la inversión.

Finalmente, se optó por utilizar una densidad de empaquetado realista para la pieza del 20%, representativa de un caso factible para esta tecnología. Aunque no se aumentaron las dimensiones de la impresora MJF equivalente para cumplir dicha densidad, pues eso resultaba en un presupuesto irrealmente elevado, alejándose de los parámetros operativos comunes de esta tecnología y de las condiciones presupuestarias habituales para piezas de dimensiones similares:

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -MJF		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)		96.703
Coste mantenimiento anual (€)		9.670
Años de amortización		6
Días impresión/año		48
Impresiones/día		2
Precio impresión (€)		268,62
Precio Impresión venta-público (€)		295,48
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material: (€/kg)		201,47
Coste material: (€/cc)		0,21
Volumen Total (cc)		27543,07
Densidad de Empaquetado		20,00%
Material Nuevo		20,00%
Material Nuevo Añadido (cc)		1101,722973
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. limpieza (€/h)		30
PIEZA VOD - BRAZO DE SUSPENSIÓN		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	56045,49	11885,48 €/ud
Impresión	-	3006,26 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,50	15,00 €/ud
Tiempo Limpieza (h)	0,50	15,00 €/ud
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	14921,74 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	14921,74 €	

Figura 150. Presupuesto para MJF, densidad del 20%. (Elaboración propia)

Se optó por descartar la tecnología de impresión SLA, ya que presentaba un coste elevado en relación con las limitadas propiedades mecánicas que ofrecía. En su lugar, se emplearon las tecnologías: FDM, por ser la más económica y asegurar unas prestaciones mecánicas adecuadas; y las MJF, porque, a pesar de su mayor coste, es la que mejores propiedades estructurales proporciona de las tres.

4.6. Presupuesto de la impresión realizada:

Se escogieron las tecnologías FDM y MJF para realizar la impresión, ya que SLA no aseguraba buenas prestaciones mecánicas de las piezas. Tras la selección, se analizaron las máquinas para imprimir en el laboratorio y los materiales:

TECNOLOGÍA	MÁQUINA	MATERIAL	ESCALA
FDM	Dynamical Tools DT-600 +	PLA	1:1
MJF	HP 580C	PA12	1:2

Tabla 26. Máquina y características de impresión para cada tecnología. (Elaboración propia)

Se calcularon los presupuestos para estas impresiones, con los *slicers* integrados a cada impresora:

4.6.1. Presupuesto para la impresora FDM DT-600:

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FDM		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)		50.000
Coste mantenimiento anual (€)		2.500
Años de amortización		4
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día		2000
Precio Hora máquina-amortización (€/h)		7,19
Precio Hora venta-público (€/h)		7,91
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material modelo: (€/kg)		18,95
Coste material soporte: (€/kg)		18,95
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)		0
PIEZA monica-lucia4-maxilar - Orientación HORIZONTAL		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (g)	758,06	14,37 €/ud
Soporte modelo (g)	0,00	0,00 €/ud
Tiempo modelo (h)	46,00	363,69 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	2,00	0,00 €
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	378,05 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	378,05 €	

Figura 151. Presupuesto para impresora FDM DT-600. (Elaboración propia)

4.6.2. Presupuesto para la impresora HP 580C:

Se escogió la poliamida 12 para la impresión por ser un polímero termoplástica muy utilizado en aplicaciones donde se requiere resistencia, flexibilidad y durabilidad.

Se estimó un presupuesto para la pieza con los siguientes datos de la simulación de impresión:

	X	Y	Z
Minimum:	9.82	77.63	18.53
Maximum:	322.29	144.94	200.72
Size:	312.47	67.32	182.19
Volume:	200.7015 cm ³		Area: 495.8210 cm ²
Points:	924357	Edges:	2722563
Triangles:	1815042	Shells:	1
Holes:	0	Bad edges:	0
Boundary edges:	0	Boundary length:	0.00 mm
Flipped triangles:	0		
Surface is closed:	Yes		
Surface is orientable:	Yes		
	Min:	Max:	Ø:
Edges/Point	0.00	191.00	5.89
Triangles/Edge	2.00	2.00	2.00
Triangle quality	0.00	1.00	0.54
Edge length	0.00	11.83	0.25
	Dev:		
Edges/Point			1.24
Triangles/Edge			0.00
Triangle quality			0.29
Edge length			0.38

Figura 152. Datos de la simulación de impresión en la HP 580C. (Cortesía de Mariano Jiménez Calzado)

No se realizaron fotografías del proceso de impresión de la pieza; por ello, se usaron los siguientes parámetros para estimar el presupuesto del brazo impreso:

This view shows prices before discounts. Discounted prices are calculated at the end of the month.

Billing Cycle: Statement ending on Jun 1, 2025 [Export Data \(xlsx\)](#) Subscripción UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

COMPLETION DATE/TIME (PST)	JOB IDENTIFICATION	JOB NAME	PRINTER MODEL	PRINTER	MATERIAL TYPE	PARTS VOLUME TOTAL: 2,532.96 CM ³	BUILD HEIGHT AVERAGE: 73.18%	REUSED MATERIAL AVERAGE: 75%	PACKING DENSITY AVERAGE: 11.1%	PRINT PROFILE	CHARGEABLE	BILLED AM TOTAL: €1.4
2025-05-06 07:45 PM	35483a4e-fe...	92c9Vm4lltQ...	HP Jet Fusion 580 Color 3D Printer	580 5697MCA003	PA12Z	954 cm ³	54%	70%	11.21%	Color Cosmetic	Yes	€611.91
2025-05-28 09:15 PM	f30ea8a0-e8...	PHobx1EEem...	HP Jet Fusion 580 Color 3D Printer	580 5697MCA003	PA12Z	1,579 cm ³	92%	80%	10.99%	Color Cosmetic	Yes	€800.48

Figura 153. Parámetros de impresión en la HP 580C. (Cortesía de Mariano Jiménez Calzado)

Usando el modelo que usa la Universidad Pontificia Comillas ICAI para estimar presupuestos, se obtuvo el siguiente coste para la pieza impresa en escala 1:2; lo cual tiene sentido, teniendo en cuenta la densidad de empaquetado y la relación volumen-precio con respecto a las piezas mostradas en la Figura 153.

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -HP 580		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)	80.000	
Coste mantenimiento anual (€)	2.000	
Años de amortización	5	
Días impresión/año	48	
Impresiones/día	1	
Precio impresión (€)	375,00	
Precio Impresión venta-público (€)	412,50	
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material: (€/kg)	201,47	
Coste material: (€/cc)	0,21	
Volumen Total (cc)	15634,75	
Densidad de Empaquetado	10,00%	
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. limpieza (€/h)	20	
PIEZA VOD - BRAZO DE SUSPENSIÓN		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Sólido	Costes parciales
Material modelo (cc)	200,70	42,56 €/ud
Impresión	-	52,95 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,50	10,00 €/ud
Tiempo Limpieza (h)	0,50	10,00 €/ud
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	115,52 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	115,52 €	

Figura 154. Presupuesto para impresora HP 580C. (Elaboración propia)

4.7. Impresión y análisis del prototipo de la pieza:

4.7.1. Prototipo por tecnologías FDM:

Se imprimió en escala real 1:1, usando PLA:



Figura 155. Brazo de suspensión impreso por FDM. (Elaboración propia)

Se tardaron 46 horas en completar la impresión, y una hora y 20 minutos en terminar el post-procesado, consistente en la retirada de los soportes usados sobre la pieza.

4.7.2. Prototipo por tecnologías MJF:

Se imprimió en escala reducida 1:2, usando el material poliamida 12 (PA12):



Figura 156. Pieza impresa por MJF en escala reducida. (Cortesía de Mariano Jiménez Calzado)

Se tardaron, aproximadamente, 11 horas en completar la impresión, y 20 minutos para el post-procesado, consistente en la retirada de los soportes usados sobre la pieza.

Finalmente, las dos piezas quedaron de la siguiente forma:



Figura 157. Comparación de los modelos impresos. (Elaboración propia)

Comparando la pieza en escala real con la pieza original, se pudieron apreciar varios cambios en la geometría:



Figura 158. Comparación entre la pieza original y la desarrollada en el proyecto. (Elaboración propia)

Cabe destacar que el modelo creado es ligeramente más grande que el original. Esto puede haberse debido a los cambios de formato para la transferencia de datos entre programas; o a el uso incorrecto de las referencias posicionales y dimensionales cuando se escaneó la pieza original.

La pieza original ya había sido sometida a una optimización topológica diferente a la de este trabajo, mostrándose las múltiples posibles alternativas de diseño para la creación de nuevos modelos funcionales de brazo de suspensión.

La optimización realizada en el brazo de suspensión original estaba limitada a los procesos de mecanizado que se le aplicaron durante su fabricación. Por ello, se pudieron observar las siguientes diferencias geométricas:

ORIGINAL	DESARROLLADO EN EL TFG
	
	
	

Tabla 27. Comparaciones de la geometría del modelo y la pieza original. (Elaboración propia)

No hay agujeros en el centro de la pieza, como ocurre en el brazo de suspensión original; pero hay reducciones de nivel en el cuerpo y agujeros en los laterales del modelo.

5. CONCLUSIONES:

A lo largo de este Trabajo Fin de Grado se ha llevado a cabo un estudio detallado de un proceso de diseño y producción relativamente novedoso en el ámbito de la automoción: la aplicación de la optimización topológica a componentes estructurales de vehículos. Concretamente, se ha seleccionado un modelo real de brazo de suspensión, al cual se le ha aplicado ingeniería inversa para, posteriormente, rediseñarlo mediante técnicas de optimización topológica. El objetivo ha sido obtener una pieza con la misma funcionalidad estructural que la original, pero con una considerable reducción de material.

Para validar la viabilidad del diseño obtenido y su aplicabilidad a la producción industrial, se ha recurrido a la tecnología de impresión 3D, gracias a la cual las geometrías complejas que la optimización proporciona se han demostrado replicables y fabricables, al menos en fases prototípicas o en lotes de producción reducidos.

Este estudio responde a las actuales demandas del sector automovilístico de conseguir procesos de producción de piezas mucho más ligeras y económicas, sin comprometer sus propiedades mecánicas. Así, se optimizan los costes de producción y el rendimiento energético de los vehículos. En este sentido, el avance en las tecnologías de fabricación del sector se alinea con los actuales Objetivos de Desarrollo Sostenible, al promover un uso más eficiente de los recursos y una reducción de las emisiones asociadas al transporte.

Los resultados del presente proyecto han demostrado que este proceso de diseño y producción de componentes supone una alternativa técnica y económicamente viable para la fabricación de componentes en tamaños de lote pequeños y medianos; mientras que, para producciones a gran escala, siguen siendo mucho más rentables los procesos de fabricación convencional, tal y como se ha evidenciado en los escandallos.

Finalmente, se han obtenido dos prototipos con materiales no metálicos, pero de buenas propiedades mecánicas: un brazo de suspensión a escala real usando las tecnologías de impresión FDM, con unas prestaciones mecánicas aceptables; y un modelo en escala reducida usando la tecnología 3D MJF, con unas excelentes propiedades estructurales. Esto ha vuelto a probar que el proceso sí es viable y efectivo.

5.1. Trabajos futuros de investigación del proyecto:

No obstante, en condiciones reales de servicio, los brazos de suspensión suelen estar sometidos a esfuerzos considerablemente mayores de los que los materiales usados para los prototipos (PLA y Nylon 12) pueden soportar.

Las piezas que se han impreso en este TFG deben entenderse como demostradores funcionales que validan el proceso de fabricación basado en la optimización en el sector automovilístico, pero no como soluciones finales.

A futuro, sería necesario estudiar si es posible imprimir elementos de grandes dimensiones con materiales metálicos, como el AISI 4130, aleaciones de aluminio u otros materiales metálicos de los que suelen estar fabricados componentes de responsabilidad como los brazos de suspensión.

Existen pocas tecnologías de impresión 3D que permitan fabricar elementos grandes con materiales metálicos. Estas máquinas tienen precios muy elevados; por lo que se plantea como línea de investigación futura el análisis de si es más económico utilizar dichas impresoras para imprimir las geometrías optimizadas, o si, por el contrario, sería más barato adaptar y combinar distintos procesos de fabricación convencional (por ejemplo, fundición con un posterior mecanizado) para fabricar las piezas optimizadas.

Siguiendo con esto último, se propone estudiar la fabricación de uno de los prototipos del componente optimizado por un método tradicional, como fundición, y comparar su comportamiento estructural con el de los prototipos impresos en ensayos de resistencia y de fatiga en banco de pruebas.

6. BIBLIOGRAFÍA:

- [1] *Aceromafe-Poliamida*. (s. f.). Recuperado 13 de junio de 2025, de <https://www.aceromafe.com/poliamida-usos-propiedades/>
- [2] *Additive-manufacturing/brainporteindhoven.com*. (s. f.). Recuperado 11 de junio de 2025, de <https://brainporteindhoven.com/int/business/sectors-technologies/additive-manufacturing>
- [3] *Brazo-eje-rigido-vs-independiente*. (s. f.). Recuperado 11 de junio de 2025, de <https://i.ytimg.com/vi/Hv9jzPsHZE0/hqdefault.jpg>
- [4] *Características-FFF*. (s. f.). <https://markforged.com/>
- [5] *Características-K1-MAX*. (s. f.). <https://store.creality.com/>
- [6] *Características-Method-XL-3D*. (s. f.). <https://store.ultimaker.com/>
- [7] *Características-Prusa-CORE-one*. (s. f.). <https://www.prusa3d.com/>
- [8] *Características-Tiertime-UP600*. (s. f.). Recuperado 13 de junio de 2025, de <https://www.3dnatives.com/3D-compare/es/impresoras-3d/up600/>
- [9] *ChatGPT*. (s. f.). Recuperado 11 de junio de 2025, de <https://chatgpt.com/>
- [10] *Comparador-de-resinas*. (s. f.). Recuperado 13 de junio de 2025, de <https://www.anycubic.es/blogs/guias-de-impresion-3d/guia-del-comprador-como-elegir-la-resina-adecuada-para-la-impresion-3d>
- [11] *CREAFORM*. (s. f.). <https://go.creaform3d.com/>
- [12] *Engine-Mount-How-does-it-work*. (s. f.). Recuperado 17 de junio de 2025, de <https://www.rpmrubberparts.com/what-is-an-engine-mount/>
- [13] *Engine-mounts*. (s. f.). Recuperado 11 de junio de 2025, de <https://www.youtube.com/watch?v=EUgK0VEIMho>
- [14] *Filament-ABS-S-Series-prize*. (s. f.). Recuperado 14 de junio de 2025, de <https://store.ultimaker.com/3d-printer-materials/s-series-materials/ultimaker-s-series-abs-material>
- [15] *Filament-PLA-S-Series-prize*. (s. f.). Recuperado 14 de junio de 2025, de <https://store.ultimaker.com/3d-printer-materials/s-series-materials/ultimaker-s-series-pla-material>
- [16] *Formlabs-printer-Form-4*. (s. f.). Recuperado 13 de junio de 2025, de https://formlabs.com/3d-printers/form-4/?utm_source=preform
- [17] *Free-slicers*. (s. f.). Recuperado 11 de junio de 2025, de <https://all3dp.com/1/best-3d-slicer-software-3d-printer/>
- [18] *Fuse 1 + 30W*. (s. f.). Recuperado 13 de junio de 2025, de <https://formlabs.com/es/3d-printers/fuse-1/?srsltid=AfmBOorvwxqeFDHic1OK7SIngfoB2sBxbGungl5txNO5C2XYcZaiunDw>
- [19] Gillespie, T. D. (s. f.). *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. https://books.google.es/books?id=LeybEAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

- [20] *Granta-EduPack*. (s. f.). Recuperado 11 de junio de 2025, de <https://www.ansys.com/products/materials/granta-edupack>
- [21] *Hydraulic-engine-mounts*. (s. f.). Recuperado 11 de junio de 2025, de https://www.team-bhp.com/forum/attachments/technical-stuff/1106756d1691574393t-hydraulic-engine-mounts-vs-rubber-engine-mounts-engine_transmission_mounts_passive_hydraulic.jpg
- [22] *l.materialise*. (s. f.). <https://www.protolabs.com/>
- [23] *Impresoras-FDM-con-ABS-PLA*. (s. f.). Recuperado 13 de junio de 2025, de <https://www.directindustry.es/prod/tiertime-corporation/product-196879-2394275.html>
- [24] *Instituto Nacional de Estadística*. (s. f.). <https://www.ine.es/>
- [25] *MacPherson-vs-double-suspension*. (s. f.). Recuperado 11 de junio de 2025, de https://www.youtube.com/shorts/O2u6Y_UmBMA
- [26] Maninas, N. (2024). *Design, analysis and topology optimization of a car's suspension lower control arm*. 393-404. <https://doi.org/10.21741/97816444903377-50>
- [27] *Material-MJF*. (s. f.). <https://formlabs.com/>
- [28] *Mejores-slicers-FDM*. (s. f.). Recuperado 11 de junio de 2025, de <https://www.3dnatives.com/es/programas-para-impresoras-3d-slicers-laminadores-200520192/>
- [29] *Mejores-slicers-SLA*. (s. f.). Recuperado 11 de junio de 2025, de <https://www.3dnatives.com/es/ranking-slicers-para-impresoras-3d-de-resina-110820222/#!>
- [30] *MIRO/TFG/VOD/OT*. (s. f.). <https://miro.com/app/board/uXjVLcyaiSw=/>
- [31] *Modix-BIG-60*. (s. f.). Recuperado 13 de junio de 2025, de https://www.modix3d.com/es/big60-order/?srsltid=AfmBOoolvCeCrcZ2ZF2Zv4OfhOHmDaLi_vSXdx5ZQbWbuPi2KFyk8rQ
- [32] *Multilink-suspension*. (s. f.). Recuperado 11 de junio de 2025, de <https://centralderepuestostr.com/wp-content/uploads/2017/08/Suspension-Multibrazo-Multilink.png>
- [33] *Naciones Unidas, objetivo 12*. (s. f.). <https://www.un.org/>
- [34] *Optimizacion-topologica/formlabs.com*. (s. f.). Recuperado 11 de junio de 2025, de <https://formlabs.com/es/blog/optimizacion-topologica/>
- [35] *Orca-slicer*. (s. f.). Recuperado 11 de junio de 2025, de <https://orca-slicer.com/>
- [36] Pachapuri, M. S. A., Lingannavar, R. G., Kelageri, N. K., & Phadate, K. K. (2021). Design and analysis of lower control arm of suspension system. *Materials Today: Proceedings*, 47, 2949-2956. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.035>
- [37] *Propiedades-RIGID-10K*. (s. f.). Recuperado 13 de junio de 2025, de https://formlabs.com/es/store/materials/rigid-10k-resin/?srsltid=AfmBOooFkt09Z7DmGXlQUWOJEG42fXYsiwDfUopxzXDRQKQ_MTojYef

-
- [38] *Protolabs/presupuestos*. (s. f.). <https://www.protolabs.com/>
- [39] *Resinas-RIGID-SLA-coste*. (s. f.). <https://filament2print.com/>
- [40] *Simplify3D-Slicer-DT600*. (s. f.). Recuperado 18 de junio de 2025, de https://www.3dprima.com/tr/3d-tulostimet-ja-muut-laitteet/muut/ohjelmistot/simplify3d-software_20450_1228
- [41] *SLA-slicers*. (s. f.). Recuperado 11 de junio de 2025, de <https://all3dp.com/es/2/slicer-3d-para-impresora-3d-resina-sla/>
- [42] *Suspension-Arm-basics*. (s. f.). Recuperado 17 de junio de 2025, de <https://www.eurocarparts.com/suspension-arm-and-suspension-joints?srsltid=AfmBOoo8ePTs0T0zMV5PalvYEWAfglBHfZnP829Hle0N34pD2nTHtGo->
- [43] *Ultimaker-Cura-3D-Printers*. (s. f.). Recuperado 17 de junio de 2025, de <https://ultimaker.com/3d-printers/>
- [44] *Xometry*. (s. f.). <https://xometry.eu/es/>