



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Procesos de diseño de componentes con criterios de
diseño generativo. Análisis y optimización de una
pinza de freno.

Autor: Daniel Mateos Franco

Director: Mariano Jiménez Calzado

Co-director: Eduardo Fuster López

Madrid

AGOSTO DE 2023

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título *“Procesos de diseño de componentes con criterios de diseño generativo. Análisis y optimización de una pinza de freno”*

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2023 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.: Daniel Mateos Franco

Fecha: 30/08/2023



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Mariano Jiménez Calzado

Eduardo Fuster López



Fecha: 30/08/2023



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Procesos de diseño de componentes con criterios de
diseño generativo. Análisis y optimización de una
pinza de freno.

Autor: Daniel Mateos Franco

Director: Mariano Jiménez Calzado

Co-director: Eduardo Fuster López

Madrid

AGOSTO de 2023

Procesos de diseño de componentes con criterios de diseño generativo. Análisis y optimización de una pinza de freno.

Autor: Mateos Franco, Daniel.

Director: Jiménez Calzado, Mariano.

Co-director: Fuster López, Eduardo.

Entidad colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia de Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

En el marco global actual donde se persigue eficiencia y ahorro en cualquier innovación, la fabricación aditiva, unida a la optimización topológica, juegan un papel muy importante a la hora de mejorar los métodos no sólo de fabricación, sino también de diseño de componentes mecánicos con una masa reducida y propiedades mecánicas excepcionales. Se ha elegido una pinza de freno comercial para un coche de FSAE, a partir de cuyas especificaciones y un estudio de la dinámica vehicular en la frenada, se ha diseñado un modelo de pinza optimizada para mejorar la pieza en cuestión de masa, sin perder su capacidad estructural, además de seguir criterios de diseño para impresión 3D metálica. Tras una serie de iteraciones, se ha obtenido una pieza final que reúne los requisitos buscados. Se ha comprobado su validez mediante análisis FEM, a la par que se ha elaborado un breve estudio económico y una estimación del ahorro de emisiones que una pinza de freno optimizada topológicamente podría suponer en vehículos turismos.

Palabras clave: *pinza de freno, fabricación aditiva, optimización topológica, CAD, emisiones.*

1. Introducción

En el marco global actual, diversas crisis económicas, energéticas y sanitarias, la volátil situación inflacionaria y la grave situación medioambiental han hecho de la eficiencia y el ahorro las máximas bajo las que se rige casi cualquier innovación. Un claro ejemplo del camino que está tomando el mundo entero es el seguimiento que se le está dando a los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas [1].

En este contexto, las tecnologías existentes de fabricación aditiva y optimización topológica, hasta ahora con un papel predominantemente útil en cuestiones de prototipado y elaboración de piezas complejas en industrias con un grado alto de precisión requerido, empiezan a contemplar aplicaciones en la fabricación a escalas más grandes.

Una industria en la que estas tecnologías podrían, conjuntamente, tener un gran impacto es la automóvil. En plena revolución del coche eléctrico, las ventajas de fabricar componentes complejos obtenidos mediante optimización topológica son numerosas.

Para ejemplificar tal avance, este trabajo ha elegido una disciplina cuasi-amateur de la ingeniería de competición o *motorsport* como es la Fórmula Student (FSAE) [2] -una

competición de estudiantes universitarios en la que se diseñan y construyen vehículos monoplasas tipo fórmula para competir con ellos internacionalmente- como marco en el que optimizar un componente mecánico topológicamente y con criterios de impresión tridimensional con el objetivo de reducir su peso y mejorar así el rendimiento global del vehículo.

La pieza elegida es una pinza de freno, parte de un sistema de frenada de disco. Como parte de la masa no suspendida de un vehículo -la masa que no está anclada a la suspensión y cuyo peso se transmite al suelo a través de la rueda directamente-, una reducción de peso en una pinza de freno supone un gran aumento en la maniobrabilidad del vehículo, así como una mejora en su comportamiento frente a irregularidades del asfalto. La pinza de freno va situada en cada una de las ruedas, unida mediante pernos a la mangueta, y contiene cilindros donde van acoplados pistones. Estos pistones, al ser accionados por la presión del sistema hidráulico -que a su vez es presurizado gracias a la acción de la bomba, cuya fuerza viene directamente del pedal de freno- presionan las pastillas, que friccionan contra el disco de freno para reducir y/o detener el movimiento de la rueda.

Una pinza de freno actual se fabrica, normalmente, mediante fundición inyectada de aleación de aluminio [3]. En este proceso, muy utilizado en la industria, un pistón introduce a presión la aleación elegida en estado líquido en un molde, normalmente hecho mediante mecanizado CNC en acero. Este molde es de carácter permanente, por lo que su coste es elevado y su aplicación es generalmente para grandes producciones.

Las ventajas de este método de fabricación son sus costes para la gran escala y el conocimiento que se tiene sobre su proceso, ya que se ha utilizado y refinado durante un período largo de tiempo. Las limitaciones son principalmente geométricas, ya que, pese a que mediante máquinas CNC se pueden obtener formas relativamente complejas, el proceso de fundición inyectada no admite cualquier pieza para ser fabricada.

Frente a estos procesos de fabricación más tradicionales se encuentra la innovadora fabricación aditiva, que se basa en la deposición de material o material aglutinante capa a capa sobre una base consolidando así la pieza que se ha introducido previamente en el software de la máquina a partir de un fichero CAD. Hay numerosos tipos de tecnologías de fabricación aditiva, pero el más relevante para este proyecto es la fusión selectiva por láser sobre lecho en polvo -DMLS por sus siglas en inglés- ya que permite la impresión 3D metálica.

Por otro lado, la optimización topológica -un método que permite estudiar las posibilidades estructurales de un dominio espacial sujeto a unas cargas específicas para dar con la posición donde colocar material de forma que se cumpla con las cargas minimizando el material utilizado- ha sido hasta tiempos recientes una manera de obtener unas 'guías' para obtener diseños que fueran fabricables mediante métodos como la fundición. Sin embargo, gracias a la fabricación aditiva, los modelos optimizados topológicamente pueden ser fabricados sin importar cuán complejos sean, creando una auténtica revolución en las ciencias de fabricación.

Con la incorporación de algoritmos de optimización topológica en softwares CAD y CAE, se pretende mejorar el diseño de una pinza de freno para FSAE.

2. Metodología

El primer paso en este proyecto ha sido seleccionar una pinza de freno comercial en la que basar la optimización topológica y con la que comparar los resultados. El modelo es el CP2577 de AP Racing. El siguiente paso ha sido diseñar un sistema de frenada básico, de manera que se obtengan unas cargas reales con las que crear las restricciones de diseño de la optimización topológica. Para ello, estudiando la dinámica vehicular de la frenada para un vehículo ideal de FSAE y utilizando parámetros estándar típicos de esta clase de automóviles, se ha fijado un objetivo de deceleración de 1,6g y se ha diseñado un sistema de frenos con componentes comerciales que permita alcanzar tal grado de frenada. Los valores obtenidos para el eje delantero se presentan en la siguiente tabla.

Comparativa parámetros requeridos vs parámetros obtenidos del sistema diseñado			
Parámetro	Valor requerido	Valor del sistema diseñado	Validez
Fuerza de frenada del eje delantero	2068,67 N	2290,5 N	Válido
Par de frenada del eje delantero	537,85 Nm	595,5 Nm	Válido

Tab. 1. Valores de frenada requeridos vs valores del sistema ideal diseñado

Con estos valores, se obtienen las cargas que soportaría la pinza, y por tanto las cargas que sirven de restricción en la optimización topológica. Se presentan en la tabla 2.

Cargas para aplicar en la optimización de la pinza de freno	
Presión máxima del líquido en el cilindro	1,25 MPa
Fuerza de la pastilla sobre la pinza	1400 N

Tab. 2. Cargas para aplicar en la optimización de la pinza de freno

Usando las dimensiones de la pinza CP2577 y sus componentes asociados -pastillas y pistones- se ha creado el espacio de diseño de la figura 1 izquierda, sobre el que comenzar a iterar, aplicando las restricciones de cargas. Tras varias iteraciones tanto de optimización como de mejora del espacio de diseño, se crea el espacio de diseño final, de la derecha, con mejoras que acercan su masa a la de la pinza comercial -1,05 kg vs 1,10 kg- y que facilitan la optimización topológica.

Una vez obtenido el modelo final optimizado que satisface los requisitos establecidos, se realizó un breve estudio comparativo de costes con diferentes tecnologías, así como una estimación en el ahorro de emisiones de CO₂ a la atmósfera que las mejoras suponen. Para ello, se utilizó una reducción conservadora del porcentaje de reducción de masa final conseguido en la optimización topológica, y se aplicó a una pinza fija -modelo optimizado- y a una pinza flotante, ya que es el tipo de pinza que más montan los turismos comunes. Con estos ahorros de peso, se calculó el ahorro en emisiones según los datos obtenidos.

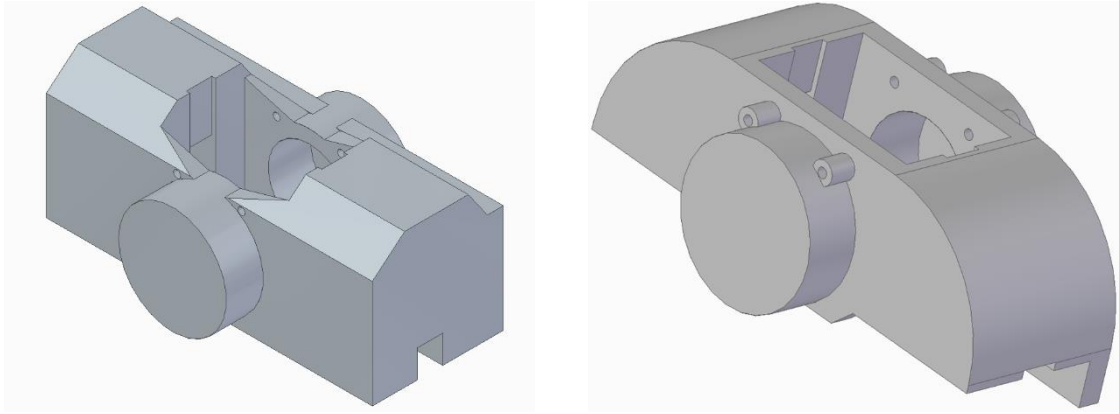


Fig. 1. Espacio de diseño inicial (izqda.) y espacio de diseño final (dcha.)

3. Resultados

Se realizaron múltiples iteraciones con cada uno de los espacios de diseño, obteniendo piezas altamente complejas que no satisfacían los requisitos funcionales al quedar incompletos, especialmente en los agujeros superiores que alojan los clips de retención de las pastillas. La última iteración -figura 2, izquierda- sin embargo, optimizada topológicamente teniendo en cuenta los criterios de impresión 3D, propuso un modelo que satisfacía casi todos los requisitos. Se intentaron añadir los agujeros para los clips mencionados sobre el modelo optimizado, pero restricciones computacionales hicieron la prueba fallida. Por tanto, se decidió trabajar manualmente sobre el espacio base para incluir las características proporcionadas por la optimización y así obtener la pieza final, presentada en la figura 2, derecha.

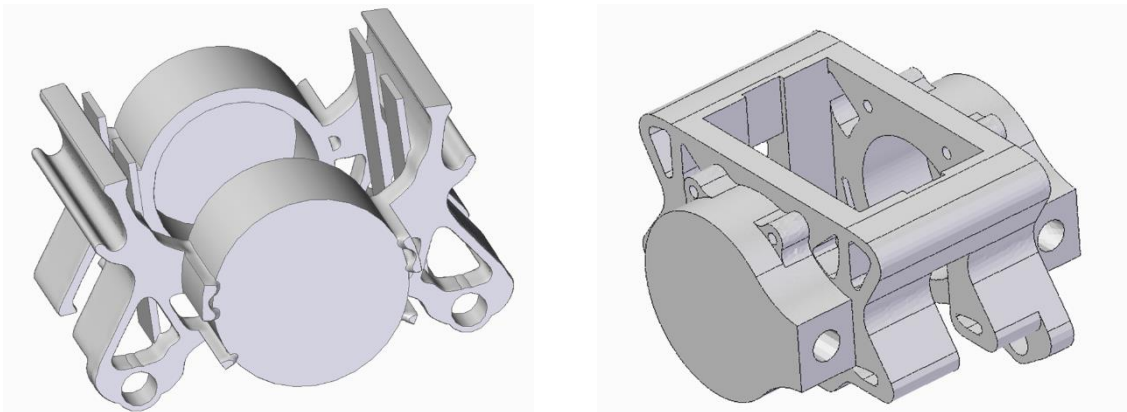


Fig. 2. Iteración optimizada final (izqda.) y pieza final (dcha.)

A esta pieza final se le añadieron extrusiones a los cilindros con agujeros de rosca M9x1,25 para incorporar los latiguillos del sistema hidráulico, y se sometió a un análisis FEM con las cargas comentadas para corroborar su capacidad de resistencia a las mismas.

En cuanto al estudio económico, se analizaron diferentes distribuidores de la pinza comercial, así como los precios que un fabricante de impresión 3D metálica ofrece, para realizar una comparación con los costes de la fabricación tradicional en fundición inyectada que se estimaron. Los resultados se comprueban en la tabla 3.

Precio y costes de una unidad de pinza de freno		
Pinza comercial	AP Racing CP2577 (precio medio)	397,1 €
Pinza optimizada topológicamente	Precio fabricante I3D metálica online <i>Materialise</i>	1252,87 €
	Precio fabricante CNC online <i>Rapid Direct</i>	227,81 €
	Coste estimado fundición inyectada	302,27 €

Tab. 3. Comparación de costes

Por último, utilizando datos del INE [4], IDAE [5] y la DGT [6], se realizó un análisis del potencial ahorro en emisiones contaminantes que una reducción de peso de un porcentaje similar al obtenido en el proyecto podría tener de ser aplicada a gran escala en la industria del automóvil. Los datos se presentan en la tabla 4.

Estimación de ahorro de emisiones a la atmósfera gracias a la optimización topológica de la pinza de freno		
Concepto	Valor para la pinza fija AP Racing	Valor para la pinza flotante TRW
Distancia media recorrida anual por un turismo	12562,9 km	12562,9 km
Consumo extra por cada kg	0,006 L / 100 km / kg	0,006 L / 100 km / kg
Consumo extra anual por cada kg	75,38 L / kg	75,38 L / kg
Ahorro de peso utilizando 4 pinzas optimizadas	6 kg	2,5 kg
Consumo ahorrado anualmente por la optimización topológica	452,28 L	188,45 L
Emisiones promedio en coche de gasolina por cada L	2,35 kg CO ₂ / L	2,35 kg CO ₂ / L
EMISIONES AHORRADAS AL AÑO POR COCHE	1062,86 kg	442,86 kg

Tab. 4. Estimación de ahorro de emisiones a la atmósfera gracias a la optimización topológica de la pinza de freno

4. Conclusiones

Tras llegar a la pinza final, se comprobó que, con una reducción del 56,8% en la masa de la pieza, ésta resiste correctamente a las cargas típicas que ofrece una frenada máxima. Por tanto, el estudio concluye satisfactoriamente y se determina que la mejora de una pinza de freno comercial para un vehículo de la FSAE se puede optimizar topológicamente, llegando a unos resultados excelentes.

Por otro lado, es sorprendente comprobar que un fabricante chino puede ofrecer un precio casi 100€ inferior al coste de la pinza comercial por una pieza impresa en 3D metálica que además ha de ser transportada una larga distancia. En caso de fabricar el modelo optimizado en masa, mediante fundición inyectada -si el mecanizado del molde es posible- los costes no son excesivos, aunque la estimación puede carecer de validez al no tener en cuenta el coste de la energía, tan volátil recientemente.

Para concluir, se demuestra que cualquier reducción de la masa de un vehículo supone un ahorro de emisiones contaminantes considerable. En el caso de la pinza de freno flotante, la más usada en turismos comerciales, si se pudiera optimizar en el mismo grado que se ha conseguido en este proyecto, el ahorro de contaminación sería de casi media tonelada por cada coche anualmente, lo que, considerando los más de 25 millones de vehículos en España, supondría un ahorro de 11 millones de toneladas de CO₂ al año.

En resumen, las nuevas tecnologías de diseño y fabricación ofrecen una mejora enorme en muchos aspectos. En este caso, el ahorro y la eficiencia se ven muy mejorados gracias a optimizar topológicamente una pinza de freno.

5. Referencias

- [1] Departamento de Asuntos Económicos y Sociales, «Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible». Naciones Unidas, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2020/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2020-Spanish.pdf>
- [2] «Formula SAE Rules 2023», 2023.
- [3] M. M. Espinosa, «Procesos de Moldeo de Materiales Metálicos», p. 49.
- [4] «Km medios recorridos al año por los vehículos para uso personal, por relación con la actividad económica de la persona de referencia y antigüedad del vehículo», INE. <https://www.ine.es/jaxi/Datos.htm?path=/t25/p500/2008/p10/10/&file=10020.px> (accedido 30 de agosto de 2023).
- [5] «IDAE ->». <https://coches.idae.es/consumo-de-carburante-y-emisiones> (accedido 30 de agosto de 2023).
- [6] «DGT - DGT en cifras detalle». <https://www.dgt.es/menusecundario/dgt-en-cifras/dgt-en-cifras-resultados/dgt-en-cifras-detalle/?id=00866> (accedido 30 de agosto de 2023).

Design processes of components with generative design criteria. Analysis and optimization of a brake caliper.

Author: Mateos Franco, Daniel.

Director: Jiménez Calzado, Mariano.

Co-director: Fuster López, Eduardo.

Collaborating entity: ICAI – Universidad Pontificia de Comillas

ABSTRACT

In the current global framework where efficiency and savings are pursued in any innovation, additive manufacturing, together with topological optimisation, play a very important role in improving not only manufacturing methods, but also the design of mechanical components with reduced mass and exceptional mechanical properties. A commercial brake caliper for an FSAE car has been chosen from whose specifications and a study of vehicle dynamics in braking, an optimised caliper model has been designed to improve the part in terms of mass, without losing its structural capacity, as well as following design criteria for metal 3D printing. After a series of iterations, a final part has been obtained that meets the desired requirements. Its validity has been checked by means of FEM analysis, while a brief economic study and an estimation of the emissions savings that a topologically optimised brake caliper could bring about in passenger cars has been carried out.

Key words: *brake caliper, additive manufacturing, topological optimization, CAD, emissions.*

1. Introduction

In the current global context, various economic, energy and health crises, the volatile inflationary situation and the serious environmental situation have made efficiency and savings the maxims under which almost any innovation is governed. A clear example of the path the world is taking is the follow-up to the United Nations Sustainable Development Goals [1].

In this context, existing additive manufacturing and topological optimisation technologies, so far with a predominantly useful role in prototyping and complex part making issues in industries with a high degree of precision required, are starting to contemplate applications in manufacturing at larger scales.

One industry where these technologies together could have a major impact is the automotive industry. In the midst of the electric car revolution, the advantages of manufacturing complex components obtained through topological optimisation are numerous.

To exemplify such an advance, this work has chosen a quasi-amateur discipline of motorsport engineering such as Formula Student (FSAE) [2] -a competition of university

students in which single-seater formula cars are designed and built to compete internationally- as a framework in which to optimise a mechanical component topologically and with 3D printing criteria with the aim of reducing its weight and thus improving the overall performance of the vehicle.

The part chosen is a brake caliper, part of a disc braking system. As part of the unsprung mass of a vehicle - the mass that is not anchored to the suspension and whose weight is transmitted to the ground directly through the wheel - a weight reduction in a brake caliper means a large increase in the vehicle's handling, as well as an improvement in its behaviour on uneven road surfaces. The brake caliper is located on each wheel, bolted to the stub axle, and contains cylinders to which pistons are attached. These pistons, when actuated by the pressure of the hydraulic system - which in turn is pressurised thanks to the action of the pump, whose force comes directly from the brake pedal - press the pads, which rub against the brake disc to reduce and/or stop the movement of the wheel.

Today's brake calipers are usually made by die-casting aluminium alloy [3]. In this process, which is widely used in industry, a piston presses the chosen alloy in a liquid state into a mould, usually made by CNC machining in steel. This mould is of a permanent nature, so its cost is high and its application is generally for large production runs.

The advantages of this manufacturing method are its cost for large scale and the knowledge of its process, as it has been used and refined over a long period of time. The limitations are mainly geometrical, as, although relatively complex shapes can be obtained by CNC machines, the die casting process does not allow for just any part to be manufactured.

In contrast to these more traditional manufacturing processes is the innovative additive manufacturing, which is based on the deposition of material or binder material layer by layer on a base, thus consolidating the part that has been previously entered into the machine's software from a CAD file. There are numerous types of additive manufacturing technologies, but the most relevant to this project is selective laser melting on a powder bed - DMLS - as it allows metal 3D printing.

On the other hand, topological optimisation - a method of studying the structural possibilities of a spatial domain subject to specific loads to find the position where to place material in a way that meets the loads while minimising the material used - has until recently been a way of obtaining 'guidelines' for designs that are manufacturable by methods such as casting. However, thanks to additive manufacturing, topologically optimised models can be manufactured no matter how complex they are, creating a real revolution in manufacturing science.

By incorporating topological optimisation algorithms into CAD and CAE software, we aim to improve the design of a brake caliper for FSAE.

2. Methodology

The first step in this project was to select a commercial brake caliper on which to base the topological optimisation and compare the results with. The model is the CP2577 from AP Racing. The next step was to design a basic braking system, so as to obtain real loads

with which to create the design constraints of the topological optimisation. To this end, by studying the vehicle dynamics of braking for an ideal FSAE vehicle and using standard parameters typical of this class of car, a deceleration target of 1.6g was set and a braking system was designed with commercially available components to achieve this degree of braking. The values obtained for the front axle are presented in the table below.

Comparison of required parameters vs parameters obtained from the designed system			
Parameter	Required value	Design system's value	Valid
Front axle braking force	2068,67 N	2290,5 N	Valid
Front axle braking torque	537,85 Nm	595,5 Nm	Valid

Tab. 5. Required braking values vs. ideal designed system values

With these values, the loads that the clamp would support are obtained, and therefore the loads that serve as a constraint in the topological optimisation. They are presented in table 2.

Load to apply in the optimisation of the caliper	
Max pressure of liquid in cylinder	1,25 MPa
Force of pad on the caliper	1400 N

Tab. 6. Loads to be applied for brake caliper optimisation

Using the dimensions of the CP2577 caliper and its associated components -pads and pistons- the design space of figure 1 left has been created, on which to start iterating, applying the load constraints. After several iterations of both optimisation and improvement of the design space, the final design space, on the right, is created, with improvements that bring its mass closer to that of the commercial caliper - 1.05 kg vs. 1.10 kg - and that facilitate topological optimisation.

Once the final optimised model that satisfies the established requirements was obtained, a brief comparative study of costs with different technologies was carried out, as well as an estimation of the savings in CO2 emissions to the atmosphere that the improvements entail. For this, a conservative reduction of the final mass reduction percentage achieved in the topological optimisation was used, and applied to a fixed caliper - optimised model - and to a floating caliper, as this is the type of caliper most commonly fitted in common passenger cars. With these weight savings, the emissions savings were calculated based on the data obtained.

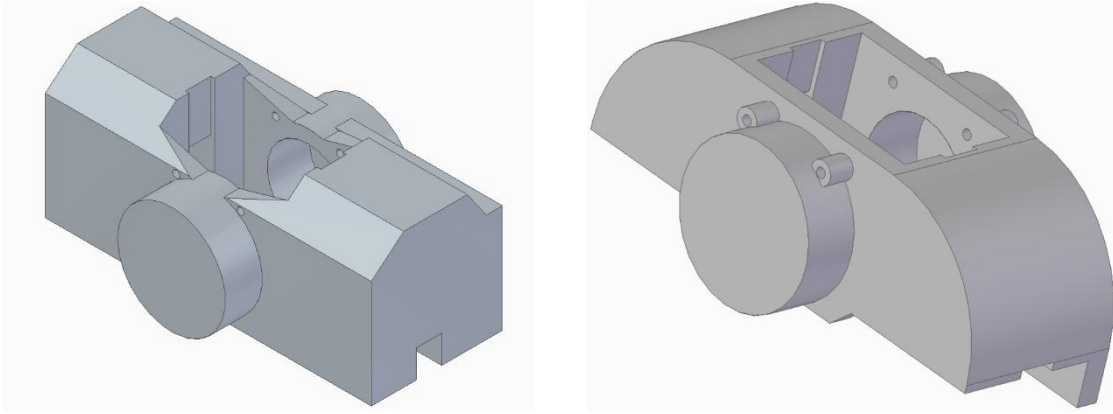


Fig. 3. Initial design space (left) and final design space (right)

3. Results

Multiple iterations were performed with each of the design spaces, resulting in highly complex parts that did not meet the functional requirements due to incompleteness, especially in the upper holes that house the pad retention clips. The last iteration - figure 2, left - however, optimised topologically taking into account the 3D printing criteria, proposed a model that satisfied almost all the requirements. Attempts were made to add the holes for the aforementioned clips on top of the optimised model, but computational constraints made the test fail. Therefore, it was decided to work manually on the base space to include the features provided by the optimisation to obtain the final part, presented in figure 2, right.

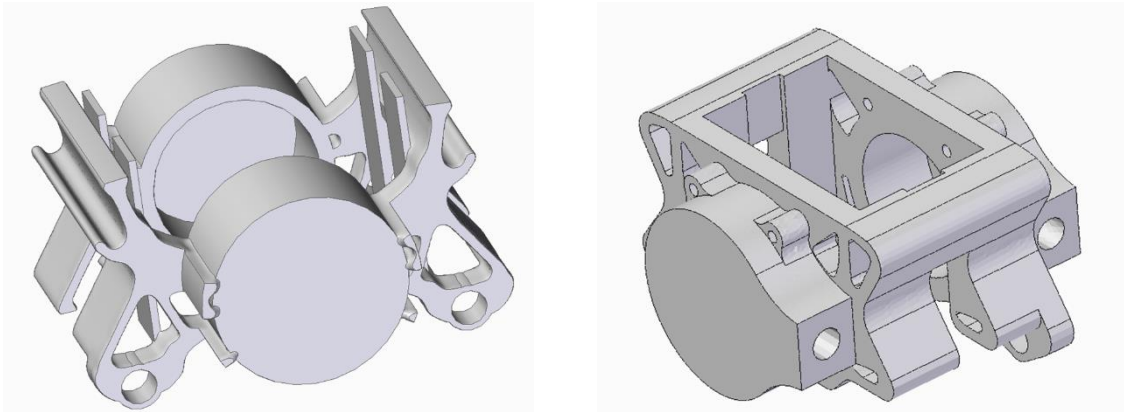


Fig. 4. Optimised final iteration (left) and final piece (right)

To this final part, extrusions were added to the cylinders with M9x1.25 threaded holes to incorporate the hydraulic system hoses, and it was subjected to a FEM analysis with the aforementioned loads to corroborate its capacity to withstand them.

As for the economic study, different distributors of the commercial gripper were analysed, as well as the prices offered by a metal 3D printing manufacturer, in order to make a comparison with the estimated costs of traditional die-cast manufacturing. The results are shown in table 3.

Price and costs of 1 unit of brake caliper		
Commercial caliper	AP Racing CP2577 (average price)	397,1 €
Topologically optimised caliper	Metallic 3D printing online manufacturer <i>Materialise</i>	1252,87 €
	Price of CNC online manufacturer <i>Rapid Direct</i>	227,81 €
	Injected casting estimated cost	302,27 €

Tab. 7. Cost comparison

Finally, using data from INE [4], IDAE [5] and DGT [6], an analysis was made of the potential savings in pollutant emissions that a weight reduction of a similar percentage to that obtained in the project could have if applied on a large scale in the automotive industry. The data are presented in table 4.

Estimated emission savings due to topological optimisation of the brake caliper		
Concept	AP Racing fixed caliper value	TRW floating caliper value
Average anual distance by personal vehicle	12562,9 km	12562,9 km
Extra consumption per kg	0,006 L / 100 km / kg	0,006 L / 100 km / kg
Annual extra consumption per kg	75,38 L / kg	75,38 L / kg
Weight reduction using 4 optimised calipers	6 kg	2,5 kg
Consumption reductions annually derived from topological optimisation	452,28 L	188,45 L
Average emissions by a gasoline car per liter	2,35 kg CO ₂ / L	2,35 kg CO ₂ / L
Emissions reduced annually per car	1062,86 kg	442,86 kg

Tab. 8. Estimated emission savings due to topological optimisation of the brake caliper

4. Conclusions

After reaching the final caliper, it was found that, with a 56.8% reduction in the mass of the part, it correctly resists the typical loads offered by maximum braking. Therefore, the study concludes satisfactorily and it is determined that the improvement of a commercial brake caliper for an FSAE vehicle can be topologically optimised, achieving excellent results.

On the other hand, it is surprising to see that a Chinese manufacturer can offer a price almost €100 lower than the cost of the commercial caliper for a metal 3D printed part that also has to be transported over a long distance. If the optimised model is mass-produced by injection moulding - if mould machining is possible - the costs are not excessive, although the estimate may not be valid as it does not take into account the recently volatile cost of energy.

In conclusion, it is shown that any reduction in the mass of a vehicle leads to considerable savings in pollutant emissions. In the case of the floating brake caliper, the most commonly used in commercial cars, if it could be optimised to the same degree as has been achieved in this project, the pollution savings would be almost half a tonne per car per year, which, considering the more than 25 million vehicles in Spain, would mean a saving of 11 million tonnes of CO₂ per year.

In short, new design and manufacturing technologies offer a huge improvement in many respects. In this case, savings and efficiency are greatly improved by topologically optimising a brake caliper.

5. References

- [1] Departamento de Asuntos Económicos y Sociales, «Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible». Naciones Unidas, 2020. [Online]. Available at: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2020/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2020-Spanish.pdf>
- [2] «Formula SAE Rules 2023», 2023.
- [3] M. M. Espinosa, «Procesos de Moldeo de Materiales Metálicos», p. 49.
- [4] «Km medios recorridos al año por los vehículos para uso personal, por relación con la actividad económica de la persona de referencia y antigüedad del vehículo», *INE*. <https://www.ine.es/jaxi/Datos.htm?path=/t25/p500/2008/p10/10/&file=10020.px> (accessed August 30th 2023).
- [5] «IDAE ->». <https://coches.idae.es/consumo-de-carburante-y-emisiones> (accessed August 30th 2023).
- [6] «DGT - DGT en cifras detalle». <https://www.dgt.es/menusecundario/dgt-en-cifras/dgt-en-cifras-resultados/dgt-en-cifras-detalle/?id=00866> (accessed August 30th 2023).

CONTENIDOS

1. Introducción	1
2. Objetivos del trabajo	4
3. Estado de la cuestión	5
3.1. Procesos de fabricación metálica: fundición.....	5
3.2. Fabricación aditiva	11
3.3. Optimización topológica	14
3.4. Nuevas técnicas de fabricación conjunta: AM y fundición	20
3.5. Sistemas de frenada para automóviles.....	22
4. Metodología del diseño	28
4.1. Elección de un modelo comercial de pinza	28
4.2. Restricciones geométricas y de cargas.....	31
4.3. Material seleccionado	38
4.4. Metodología de diseño en CAD con criterio de optimización topológica.....	39
4.5. Metodología de diseño para impresión 3D.....	46
5. Resultados.....	48
5.1. Pieza base 1.....	48
5.2. Pieza base 2.....	54
5.3. Pieza base 3.....	60
5.4. Resumen de resultados.....	70
6. Análisis de costes	71
7. Conclusiones.....	75
8. Trabajos futuros	76
Referencias.....	77
ANEXOS	82
Anexo I. Cálculos para obtención de restricciones de la pinza de freno y diseño del sistema de frenado.....	83
1. Cálculo de frenada.....	83
2. Diseño del sistema de frenado.....	86
Anexo II. Alineación con ODS	90
Anexo III. Planos de piezas comerciales: llanta y pinza de freno	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo de máquina CNC de cinco ejes para fabricación de moldes de inyección. Fuente: matriceriapastor.com	8
Figura 2. Ejemplo de moldes en acero para fundición inyectada de aluminio. Fuente: uddeholm.com	9
Figura 3. Proceso de inyección de metal en el molde. Fuente: dynacast.com	10
Figura 4. Fusión selectiva por láser sobre lecho en polvo (DMLS). Fuente: Materialise Manufacturing.....	12
Figura 5. Tipos de infill. Fuente: Diapositivas de Fabricación Aditiva de ICAI [].....	13
Figura 6. Problema de ejemplo para optimización topológica. Fuente: Hunar et al. [14]	16
Figura 7. Proceso de diseño y fabricación con nuevas tecnologías. Fuente: Hunar et al. [14] ..	17
Figura 8. Mejora en el diseño de un componente aeroespacial. Fuente: Shi et al [18].....	18
Figura 9. Espacio de diseño para una mangueta. Fuente: Hunar et al. [17]	18
Figura 10. Resultado de la optimización topológica de la mangueta. Fuente Hunar et al. [17]	19
Figura 11. Ejemplo de optimización topológica con estructuras lattice. Fuente: altair.com.....	19
Figura 12. Flujo de trabajo en diseño de modelos para fundición a la cera perdida Fuente: Wang	21
Figura 13. Comparación entre freno de disco (izqda.) y freno de tambor (dcha.). Fuente:autodoc.es	23
Figura 14. Pedalera con bombas incorporadas. Fuente: racingpedalboxes.com	24
Figura 15. Pinza de tipo fijo. Fuente: talleractual.com.....	26
Figura 16. Pinza de tipo flotante. Fuente: talleractual.com.....	26
Figura 17. Pinza de freno AP Racing CP369. Fuente: apracing.com.....	30
Figura 18. Modelo seleccionado como referencia: pinza de freno AP Racing CP2577 Fuente: apracing.com.....	31
Figura 19. Llanta OZ de 13" en aleación de magnesio. Fuente: ozracing.com.....	33
Figura 20. Bomba de freno CP5623 de AP Racing. Fuente: apracing.com.....	35
Figura 21. Pistones CP2577-102. Fuente: mailordercarparts.co.uk.....	36
Figura 22. Dibujo de pastillas CP2399. Fuente: apracing.com	36
Figura 23. Alzado de la pieza base. Fuente: elaboración propia.....	41
Figura 24. Planta de la pieza base. Fuente: elaboración propia	42
Figura 25. Detalle de partes de la pieza base. Fuente: elaboración propia	43
Figura 26. Vista isométrica del espacio base. Fuente: elaboración propia	44
Figura 27. Espacio base con estado de cargas aplicado. Fuente: elaboración propia	46

Figura 28. Simulación FEM sobre la pieza base. Fuente: elaboración propia	48
Figura 29. Parámetros de iteración 1. Fuente: elaboración propia	49
Figura 30. Alzado de la iteración 1. Fuente: elaboración propia	49
Figura 31. Vista de la iteración 1. Fuente: elaboración propia	50
Figura 32. Vista de iteración fallida A. Fuente: elaboración propia	51
Figura 33. Vista de iteración fallida B. Fuente: elaboración propia	51
Figura 34. Parámetros de segundo bloque de iteraciones. Fuente: elaboración propia	52
Figura 35. Iteración fallida A del segundo bloque. Fuente: elaboración propia	53
Figura 36. Iteración fallida B del segundo bloque. Fuente: elaboración propia	53
Figura 37. Alzado de la pieza base 2. Fuente: elaboración propia	54
Figura 38. Planta de la pieza base 2. Fuente: elaboración propia	55
Figura 39. Vista de la pieza base 2. Fuente: elaboración propia	55
Figura 40. Simulación FEM de la pieza base 2. Fuente: elaboración propia	56
Figura 41. Parámetros de optimización del tercer bloque. Fuente: elaboración propia	57
Figura 42. Vista de la iteración del tercer bloque	58
Figura 43. Iteración fallida A del tercer bloque. Fuente: elaboración propia	59
Figura 44. Iteración fallida B del tercer bloque. Fuente: elaboración propia	59
Figura 45. Alzado de la pieza base 3. Fuente: elaboración propia	60
Figura 46. Planta de la pieza base 3. Fuente: elaboración propia	61
Figura 47. Vista de la pieza base 3. Fuente: elaboración propia	61
Figura 48. Análisis FEM de la pieza base 3. Fuente: elaboración propia	62
Figura 49. Iteración fallida del cuarto bloque. Fuente: elaboración propia	63
Figura 50. Parámetros de iteración válida	64
Figura 51. Iteración final. Fuente: elaboración propia	65
Figura 52. Iteración final. Fuente: elaboración propia	65
Figura 53. Iteración final. Fuente: elaboración propia	66
Figura 54. Alzado de la pieza final. Fuente: elaboración propia	67
Figura 55. Perfil de la pieza final. Fuente: elaboración propia	67
Figura 56. Vista de la pieza final. Fuente: elaboración propia	68
Figura 57. Parámetros de análisis de elementos finitos. Fuente: elaboración propia	69
Figura 58. Resultado de análisis FEM sobre la pieza final. Fuente: elaboración propia	69
Figura 59. Opción de compra de Race and Rally. Fuente: raceandrally.ie	71
Figura 60. Opción de compra de Gieffe Racing. Fuente: giefferacing.com	71
Figura 61. Opción de compra de MCJ-Abarth. Fuente: mcj-abarth.com	72
Figura 62. Coste de impresión 3D metálica de la pieza final. Fuente: materialise.com	72

Figura 63. Coste de fabricación en CNC por Rapid Direct. Fuente: rapiddirect.com	73
Figura 64. Estimación de ahorro de emisiones a la atmósfera gracias a la optimización topológica de la pinza de freno. Fuente: elaboración propia	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Requisitos de carga en el eje delantero	34
Tabla 2. Cargas teóricas en una pinza del eje delantero según los componentes especificados	37
Tabla 3. Propiedades del AlSi10Mg. Fuente: Materialise Manufacturing [44]	39
Tabla 4. Resumen de resultados. Fuente: elaboración propia	70
Tabla 5. Estimación de costes de fundición inyectada de aleación de aluminio. Fuente: elaboración propia	73
Tabla 6. Precio y costes de una unidad de pinza de freno. Fuente: elaboración propia	74
Tabla 7. Parámetros estándar de un vehículo FSAE utilizados	83
Tabla 8. Dimensiones de llanta y rueda	86
Tabla 9. Parámetros del sistema de frenada con componentes comerciales	87
Tabla 10. Comparativa parámetros requeridos vs parámetros obtenidos del sistema diseñado	89
Tabla 11. Cargas a aplicar en la optimización de la pinza de freno.....	89

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Descripción matemática del problema de optimización topológica. Fuente: Sigmund y Maute [6].....	15
Ecuación 2. Aproximación al problema de optimización con tensor de rigidez. Fuente: Ayora [14]	15
Ecuación 3. Método de solución SIMP. Fuente: Ayora [14].....	16
Ecuación 4. Fuerza de frenado	84
Ecuación 5. Fuerza total de frenado	84
Ecuación 6. Deceleración	84
Ecuación 7. Transferencia de pesos	84
Ecuación 8. Peso en el eje delantero con transferencia de pesos	85
Ecuación 9. Fuerza de frenada en el eje delantero	85
Ecuación 10. Fuerza máxima de frenada	85
Ecuación 11. Coeficiente de fricción	85

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

- AM – Additive Manufacturing (fabricación aditiva)
- CAD – Computer-Aided Design (diseño asistido por ordenador)
- TO – Topology Optimization / Optimización topológica (diseño generativo)
- SIMP – Simplified Isotropic Material with Penalization (método de opt. Topológica)
- FSAE – Formula Society of Automotive Engineers (competición Formula Student)
- OEM – Original Equipment Manufacturer (fabricante de piezas originales)
- CNC – Computer Numerical Control (control numérico por computadora)
- CAM – Computer-Aided Manufacturing (fabricación asistida por ordenador)
- CAE – Computer-Aided Engineering (ingeniería asistida por ordenador)
- DMLS – Direct Metal Laser Sintering (sinterizado directo de metal por láser)

1. Introducción

La era tecnológica actual se desarrolla en un contexto global que busca, con la mayoría de sus innovaciones, mejorar la eficiencia y el ahorro sin comprometer el rendimiento.

Diferentes macroeventos en un corto período de tiempo (la crisis financiera de 2008, la crisis sanitaria del COVID-19 o el más reciente período de alta inflación derivado de la guerra en Ucrania y la crisis energética asociada a ella, sumado a disrupciones en la cadena de suministro global [1]) han impuesto estrictas condiciones de supervivencia para empresas de diferentes ámbitos, acelerando cambios que ya habían comenzado en el funcionamiento de las mismas [2]. Las compañías dedicadas a la producción y fabricación industrial, específicamente, se han visto expuestas a aumentos extremos y súbitos en los costes tanto de materias primas como de la energía necesaria para llevar a cabo su actividad, obligándolas a primar la eficiencia ante todo.

A este contexto debe de sumarse la delicada situación medioambiental a la que se ha llegado en todo el mundo, que ha provocado que la mayoría de los gobiernos a nivel global tomen cartas en el asunto, creando multitud de leyes y adoptando diferentes propósitos para moderar el impacto en el medioambiente. De esta tendencia se desprenden los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) [3] de la Organización de las Naciones Unidas, que especifican una serie de ámbitos concretos en los que enfocar cualquier actividad para fomentar un desarrollo sostenible. Concretamente en la industria, una vez más, las prescripciones generales se basan en el ahorro, la eficiencia y la sostenibilidad.

Dentro de este marco, diversas industrias se encuentran en una búsqueda constante de productos más livianos y a la vez más resistentes, cuya fabricación sea lo menos costosa posible en términos de tiempo, energía y dinero.

No obstante, los procesos de fabricación tradicionales, basados principalmente en técnicas de conformado y de sustracción, presentan un gran margen de mejora en todo lo relacionado a cantidad de material utilizado [4]. Este ha sido el foco de avances englobados en la conocida como *Industria 4.0* -un concepto que aglutina nuevas tecnologías de esta era, muchas de ellas relacionadas con la digitalización y las tecnologías de la información- como la fabricación aditiva o *additive manufacturing* (AM).

La fabricación aditiva se basa en la deposición de material por capas para obtener piezas funcionales de una manera rápida y directa. Este nuevo método de fabricación abre la posibilidad de conseguir geometrías altamente complejas que a menudo incluyen elementos como huecos o estructuras internas, difíciles o incluso imposibles de producir mediante procesos tradicionales [5]. Procesos que, además, necesitarían una mayor cantidad de material que luego sería sustraída.

La AM supone un cambio de paradigma que abre la puerta a la fabricación directa de modelos teóricos derivados de análisis de cargas, que previamente sólo servían de guía para diseñar piezas que sí fueran posibles de obtener con procesos más estándares, como la fundición con mecanizado posterior, por ejemplo.

Paralelamente, el grado de avance exponencial de las tecnologías de la información ha alcanzado un nivel tal que permite no sólo diseñar piezas en *CAD* (Computer-Aided Design), sino además analizarlas y someterlas a las condiciones reales a las que estarán expuestas una vez fabricadas, permitiendo un ahorro muy grande en costes, tanto de diseño como de fabricación, ya que se pueden obtener piezas que necesiten menos material y cuyo proceso de fabricación sea más refinado. En última instancia, la optimización topológica (*TO*, por sus siglas en inglés), el último avance en este ámbito, introducido como concepto en los años 90 del siglo XX, está cambiando las reglas del diseño gracias, una vez más, a las tecnologías de la información y la digitalización. La optimización topológica es una herramienta computacional del diseño mecánico que trata de hallar aquellos puntos donde es estrictamente necesario que haya material para obtener el mejor rendimiento estructural [6], consiguiendo encontrar la pieza que mejores características ofrece a la par que es la que menos material necesita.

Los avances en capacidad de computación han hecho que la *TO* dé unos resultados tremendamente eficientes y ricos en la definición de la solución, pero que no han sido posibles fabricar como tal hasta la introducción del AM.

La combinación de *CAD*, *topological optimization* y *additive manufacturing* supone, por tanto, una revolución en diseño mecánico que ya está siendo aplicado en multitud de industrias para obtener piezas más eficientes en sus aplicaciones y que antes no era posible ni imaginar, además de poder obtener prototipos ya analizados virtualmente en un tiempo mínimo y a una fracción del coste de un prototipo tradicional. Campos como el de la biomedicina o la aviación ya usan la impresión 3D habitualmente en sus actividades [7].

Una de las industrias en las que esta tecnología tiene más potencial es la amplia y global industria automotriz. En relación con las tendencias de eficiencia y ahorro mencionados, el automóvil se encuentra en medio de una revolución en la que el objetivo final es producir un medio de transporte no contaminante y cuya eficiencia sea máxima, tanto en términos ambientales como económicos. Por eso, la reducción del peso de los vehículos se ha convertido en un objetivo primordial para la industria. Esta industria utiliza la ingeniería de competición o *motorsport* como lugar donde probar las innovaciones más punteras, que frecuentemente acaban encontrando una aplicación a gran escala.

Es aquí donde el tándem de la nueva tecnología mencionada optimización topológica juega un papel crucial a la hora de mejorar componentes en los vehículos de manera que, junto con la fabricación aditiva, sea más barato producirlos y se puedan diseñar con un rendimiento mayor al actual.

En este contexto, se presenta este Trabajo Fin de Máster, en el que se evaluará una pieza existente de automóvil tan crucial como es la pinza de freno, en el contexto de una competición de motorsport. A partir de un modelo comercial, se diseñará un modelo 3D que analizar y optimizar topológicamente, de manera que se obtenga una mejora de rendimiento respecto a cantidad de material y peso. Para ello, será necesario realizar un estudio de qué tipo de pinza analizar, a qué condiciones está sujeta, y qué limitaciones podrían tener las mejoras derivadas de una optimización topológica, especialmente teniendo en cuenta criterios de impresión 3D metálica.

2. Objetivos del trabajo

Los objetivos del trabajo que llevan al objetivo principal final de obtener una mejora tecnológica de una pieza comercial existente son:

- Hallar una pinza de automóvil comercial cuya mejora pueda tener una utilidad real
- Diseñar un modelo en CAD de la pieza de estudio
- Especificar las condiciones de contorno de la pinza:
 - Condiciones geométrico-espaciales
 - Condiciones de material
 - Condiciones estructurales
- Analizar los esfuerzos de la pieza mediante un estudio *FEM*
- Optimizar topológicamente la pieza diseñada en CAD para reducir el material requerido y peso de esta
- Validar la funcionalidad de la pieza optimizada topológicamente
- Analizar y cuantificar la mejora de la nueva pieza respecto a la comercial

La utilidad del proyecto, por tanto, vendrá medido en función del éxito a la hora de conseguir estos objetivos establecidos. Sin embargo, también se atenderá a posibles derivaciones de la investigación que no estén previstas, y que pudieran surgir a lo largo del desarrollo de esta.

3. Estado de la cuestión

En este apartado se estudiarán los estados de todas las tecnologías y procesos relevantes para la investigación, como los procesos de fabricación o los sistemas de frenado.

3.1. Procesos de fabricación metálica: fundición

Los metales siguen siendo el tipo de material más usado en multitud de aplicaciones ingenieriles. Sus propiedades de resistencia a diferentes tipos de esfuerzo, la ligereza en comparación a otros materiales, la abundancia de metales en la naturaleza, y las mejoradas características gracias a las aleaciones hacen de los metales en general la mejor opción en cuanto a construcción de piezas mecánicas y estructurales. Estas piezas se pueden obtener mediante diversos procesos de fabricación, siendo la fundición la más antigua a la vez que la más usada hoy en día.

La fundición es un proceso esencial para la producción de piezas y componentes metálicos en masa. Se ha utilizado desde miles de años [8] y en la actualidad juega un importante papel en una variedad de sectores, desde la construcción hasta la electrónica o la automoción.

La fundición en arena, específicamente, es un proceso que consiste en verter metal líquido en un molde de material arcilloso, permitiendo que el metal se enfríe y solidifique para luego retirar el molde y extraer la pieza de metal. Hoy en día, con una producción mundial anual de más de 100 millones de toneladas métricas [9], este proceso es, sin duda, la técnica de producción de piezas metálicas más extendida en el mundo [10].

Las ventajas de este proceso de fabricación radican principalmente en la versatilidad que posee para producir piezas cuya geometría no sería posible obtener con otros métodos, además de que es aplicable a todos los metales importantes en la industria. Por otro lado, el uso de la fundición reduce el postproceso de las piezas, como el mecanizado, minimizando el coste de producción. También abarata el gasto en materia prima, ya que la fundición tiene una tasa de reciclado de material razonablemente alta.

La industria automotriz es uno de los principales usuarios de la fundición en arena, ya que esta técnica se utiliza para producir una amplia variedad de piezas de automóviles, como bloques de motores, frenos, o incluso llantas. Los principales fabricantes de automóviles, como Ford,

General Motors, Toyota y Volkswagen, utilizan la fundición en arena en su proceso de producción.

En cuanto a los materiales utilizados en la fundición en arena en la industria del automóvil, el hierro y el aluminio son los dos materiales más comunes. El hierro fundido se utiliza principalmente para piezas como bloques de motor, cabezas de cilindros y colectores de escape, mientras que el aluminio se utiliza para piezas más ligeras y resistentes a la corrosión, como carcasas de transmisión y componentes del sistema de frenos. Gracias a la ligereza propia de este metal, el mercado de fundición de aluminio global está estimado en 87000 millones de dólares [11], volumen alcanzado principalmente por el gran uso que este material tiene en los automóviles. También se utilizan otros metales, como el magnesio, para piezas más especializadas.

En términos de costes, la fundición en arena es generalmente más económica que otras técnicas de fundición, como la fundición a presión. Según un informe de la Asociación de Fundición de América [9], los costes de la fundición en arena oscilan entre \$2 y \$6 por libra de metal fundido, dependiendo del tamaño y la complejidad de la pieza. Sin embargo, los costes pueden variar significativamente según la ubicación geográfica y otros factores.

Actualmente, la fundición en arena sigue siendo una técnica ampliamente utilizada en la producción de piezas y componentes de automóviles. La capacidad de producir piezas grandes y complejas de manera eficiente y económica la convierte en una técnica esencial en la producción en masa de automóviles.

Sin embargo, es importante señalar que, aunque la fundición en arena es una técnica relativamente económica, también tiene algunos inconvenientes. Por ejemplo, la producción de moldes de arena puede ser un proceso intensivo en mano de obra y tiempo, lo que puede aumentar los costes y el tiempo de producción. Además, los moldes de arena tienen limitaciones para producir dimensiones precisas, y no son reutilizables, lo que significa que cada molde debe ser destruido y reconstruido para cada pieza nueva.

Ante estos inconvenientes, surge la técnica de fundición por inyección o fundición a alta presión. Este proceso emergió como respuesta a la necesidad de mayor precisión, repetibilidad y eficiencia en la manufactura de componentes metálicos.

A diferencia de la fundición en arena, la fundición inyectada se basa en la inyección de metal líquido en moldes permanentes con alta precisión geométrica, con tolerancias de entre el 0,3% y el 0,6%, lo que permite la producción de componentes complejos y de alta calidad. Esta innovación tecnológica abrió nuevas posibilidades en la industria automotriz y en otras áreas de manufactura donde la alta precisión es un requerimiento importante, pudiendo fabricar piezas en diferentes aleaciones, normalmente de hierro o aluminio. Por otra parte, al no tener que producir un molde para cada pieza fabricada, se aumenta enormemente la velocidad de producción.

En la producción de pinzas de freno, por ejemplo, normalmente fabricadas en aleaciones de aluminio, es indispensable mantener las tolerancias adecuadas entre la geometría obtenida de la fundición y las partes móviles como los pistones y las pastillas, por lo que este método supone indudablemente una mejora en la calidad de las piezas obtenidas [10]. Además, la subsecuente mejora de los costes de producción al poder reutilizar los moldes sólo hace que la fundición inyectada sea indispensable para estos componentes, pudiendo fabricar lotes de a partir de 1000 unidades con los mismos moldes.

La fundición inyectada tiene diferentes variaciones según cómo se introduzca el metal fundido en el molde y la posición del recipiente inicial relativa al molde. Sin embargo, se puede generalizar el proceso en los siguientes pasos [12]:

- Diseño de la pieza a fabricar. Además de cumplir con las funcionalidades requeridas, las piezas diseñadas para ser fabricadas por fundición han de tener consideraciones especiales como:
 - Priorizar la sencillez geométrica
 - Tener ángulos redondeados en lugar de esquinar y aristas con ángulos agudos que pueden ocasionar grietas y malformaciones por la contracción en la solidificación
 - Tener espesores constantes para no causar huecos internos
 - Tener en cuenta las operaciones del proceso de fundición como el llenado del molde con el metal líquido y el desmoldeo, ya que pueden ser limitantes a la hora de determinadas geometrías
 - Tener las tolerancias dimensionales previstas, ya que además de la contracción del material mencionada, las operaciones posteriores también pueden cambiar el producto final si no se diseña adecuadamente

- Diseño y elaboración del molde. Los moldes para fundición inyectada son moldes permanentes y suelen estar fabricados en acero endurecido o hierro fundido, cuyas características térmicas son especialmente buenas para soportar las condiciones extremas de la inyección de metal fundido y el posterior proceso de enfriamiento. Como la fundición inyectada suele estar altamente automatizada, los moldes para este proceso suelen tener extractores de pieza y sistemas de enfriamiento incorporados en su diseño, lo que le otorga una velocidad aún mayor. Además, los moldes permanentes incluirán los elementos básicos de cualquier molde de fundición como son bebederos, mazarotas, y salidas de aire.

Estos moldes se conforman mediante maquinaria de control numérico por computadora (CNC), donde cada detalle se esculpe con precisión micrométrica para asegurar la fidelidad geométrica y dimensional requerida. La desventaja de este tipo de moldes es que al utilizar este método para fabricar los patrones -normalmente consistentes en el negativo de la pieza final- se añaden las limitaciones de diseño de las máquinas de arranque de viruta CNC -figura 1- al proceso de fundición inyectada, siendo este un punto crítico en el que la fabricación aditiva consigue una gran ventaja. Aun así, los



Figura 1. Ejemplo de máquina CNC de cinco ejes para fabricación de moldes de inyección. Fuente: matriceriapastor.com

moldes fabricados con tecnología CNC pueden llegar a conseguir geometrías complejas, como se puede observar en la figura 2.

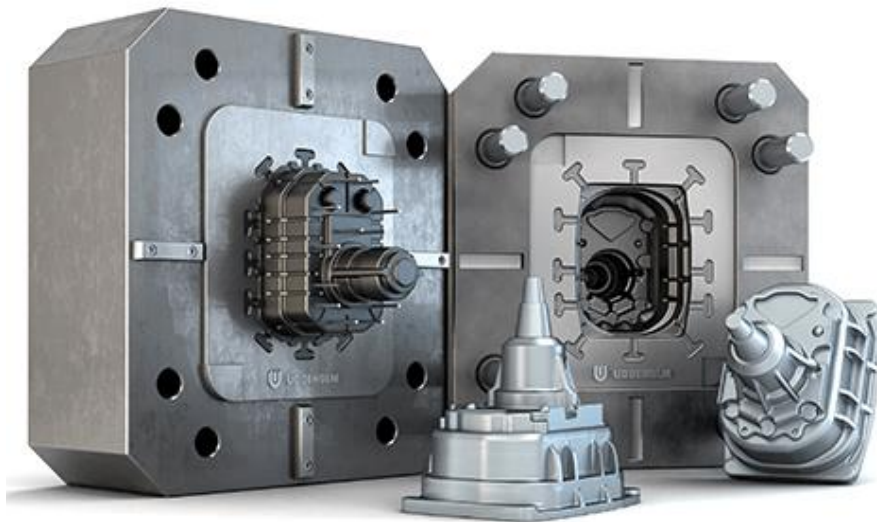


Figura 2. Ejemplo de moldes en acero para fundición inyectada de aluminio. Fuente: uddeholm.com

- Preparación y fusión del metal. La selección y preparación de la aleación metálica es importante para conseguir un material fusionado homogéneo y que al solidificar adquiera las condiciones térmicas y mecánicas esperadas. Es en esta fase cuando se mezclan los metales correspondientes a la aleación final en las proporciones correctas. Los parámetros de temperatura y composición son esenciales para establecer las propiedades metalúrgicas requeridas; en el caso de aleaciones de aluminio, suele exceder los 650 °C.

- Inyección del metal. El metal fundido se vierte en un recipiente conectado al molde, tras lo que es inyectado a alta presión dentro del mismo, garantizando su distribución uniforme y su penetración en cada cavidad y detalle del diseño. El proceso se ilustra en la figura 3. Siguiendo esta figura, cabe resaltar que el elemento llamado *corazón* también es conocido como *macho*, y sirve para introducir huecos en la pieza final. La fase de inyección no solo asegura la reproducibilidad exacta de las características de

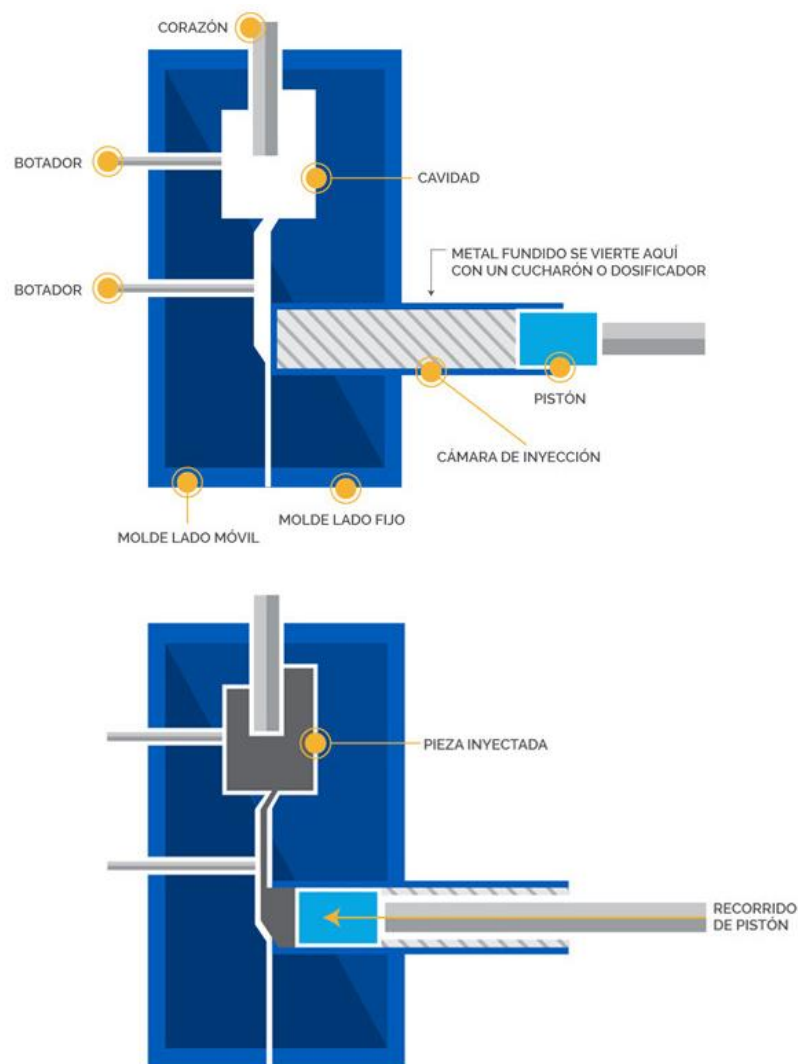


Figura 3. Proceso de inyección de metal en el molde. Fuente: dynacast.com

la pieza, sino que también permite la obtención de detalles minuciosos y con la máxima precisión. Estos detalles no serían posibles de obtener en la pieza si se utilizasen otros métodos como la fundición en arena, que utiliza la gravedad para distribuir el metal fundido por el molde.

- Enfriamiento y solidificación controlada. Tras la inyección, el metal se somete a un proceso de enfriamiento controlado dentro del molde. Esta solidificación es manejada con precisión para configurar la forma y la resistencia deseadas del componente.
- Desmoldeo y procesos de acabado. Una vez solidificado, el componente es extraído del molde y sometido a procesos de acabado. Estos procedimientos eliminan rebabas y otras imperfecciones superficiales, otorgando la estética y funcionalidad requeridas. Un buen diseño del molde a menudo evita el postproceso al mínimo. Aun así, es común someter las piezas fabricadas a un mecanizado que otorgue el nivel correcto de acabado superficial.

En el caso de la fundición por inyección, estos pasos se repiten una y otra vez de manera automatizada hasta alcanzar el nivel de producción requerido. El *lead time* de este proceso es, como se ha mencionado, muy inferior al que necesita la fundición por arena, método más artesanal, y por tanto se consiguen volúmenes muy grandes en muy poco tiempo.

Por ello, la fundición inyectada es el método más utilizado en industrias como la automóvil, produciendo piezas como las pinzas de freno, objeto de estudio de este trabajo, con unas calidades muy superiores a las que se podrían obtener por cualquier otro método.

3.2. Fabricación aditiva

La fabricación aditiva aparece en los años 80 del siglo XX como un nuevo proceso de fabricación útil en el prototipado rápido, que permite la implementación de iteraciones en el diseño de piezas a bajo coste en un tiempo reducido. La impresión 3D, parte más reconocida de la fabricación aditiva, funde el material inicial para luego solidificarlo, segmento a segmento, en la forma requerida, consolidando así, capa a capa, la pieza que se diseñó en CAD previamente [13].

La fabricación aditiva comenzó siendo aplicable a diferentes campos [14]:

- Industrias donde se requería fabricar componentes rápidos y de bajo coste para prototipar rápidamente o para obtener piezas desechables con formas concretas
- Disciplinas como la biomedicina para obtener piezas a medida de muy alta calidad
- Industria como la aeroespacial para poder fabricar piezas muy ligeras y precisas, sin que importase el coste

Sin embargo, con el tiempo se han ido descubriendo nuevas aplicaciones y posibilidades, que varían desde la automoción hasta la industria del juguete, pasando por otras industrias cuyo uso de la fabricación aditiva es menos esperado, como la alimentación o el textil.

Los tipos de fabricación aditiva más extendidos son:

- Fotopolimerización en tanque o cuba, como la *Stereolithography* (SLA). Fue la primera tecnología aditiva, basada en polímeros sensibles a la luz sobre los que se aplica un láser.
- Proyección de material o *Material Jetting* (MJ)
- Proyección de aglutinante o *Binder Jetting* (BJ), en la que se vierte aglutinante con una boquilla móvil sobre el material del modelo en polvo.
- Extrusión de material, como el *Filament Deposition Modeling* (FDM), por el que se extruye un material termoplástico por un extrusor que se va moviendo sobre la plataforma en la que se va formando la pieza
- Fusión de lecho en polvo, como el *Selective Laser Sintering* (SLS) o el *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS). El DMLS aparece en 1992. Tecnología consistente en sinterizar polímero en forma de polvo. Desarrollada por la empresa EOS, comienza la fabricación aditiva en metal. Actualmente, sigue siendo el método de fabricación aditiva por excelencia. Su funcionamiento se detalla en la figura 4.

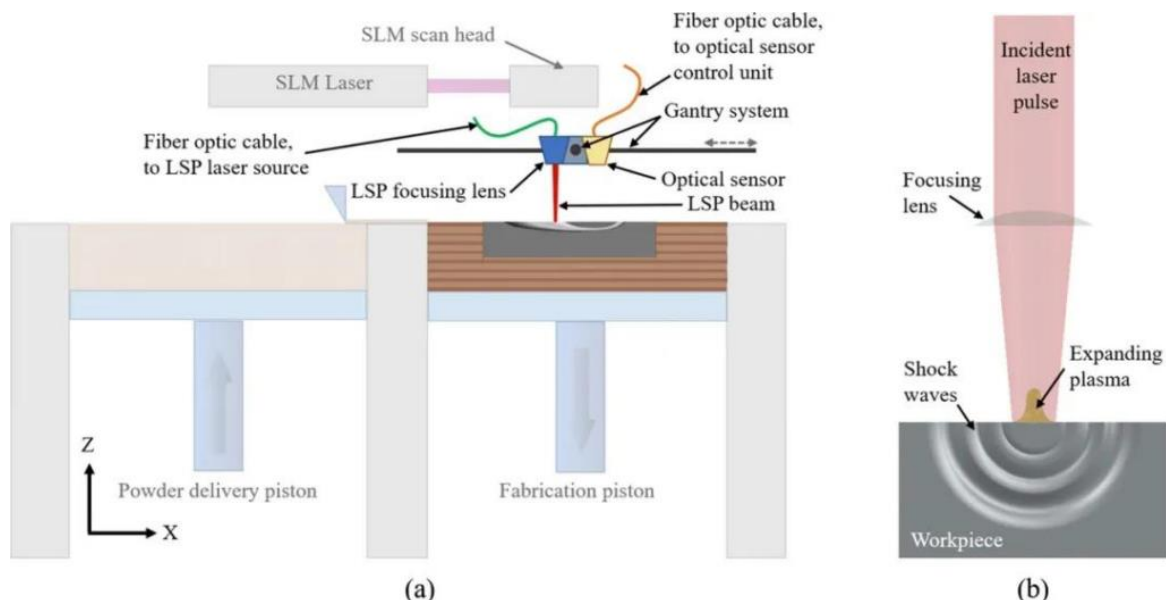


Figura 4. Fusión selectiva por láser sobre lecho en polvo (DMLS). Fuente: Materialise Manufacturing

En el DMLS, un pistón acoplado al recipiente con el material en polvo a una temperatura ligeramente menor que la de sinterización va subiendo a medida que el rodillo que reparte este material pasa, de manera que se añade una capa de polvo encima del recipiente contiguo, sobre la que el láser pasa, sinterizando y compactando el material en las zonas indicadas para crear la capa del diseño introducido en el software. El pistón acoplado al recipiente donde la pieza se va formando va bajando a medida que se añaden capas.

Otros métodos de fabricación aditiva para metales incluyen ultrasonidos o arco eléctrico como formas de fundir la materia prima para depositarla en la forma debida. Todas estas modalidades requieren de equipamiento novedoso y caro. Además, los tiempos de fabricación, aun dependiendo de la complejidad de la pieza, son considerablemente largos [15].

Los criterios de diseño para AM vienen dados por las limitaciones generales de las tecnologías de impresión 3D, tales como:

- Espesor de pared, que tiene un mínimo en cada tecnología bajo el que las paredes no se imprimirán correctamente. Entre paredes, se pueden incorporar rellenos no sólidos en patrones como panal de abeja y otros tipos de *infill* como se presenta en la figura 5, que permiten reducir la masa de la pieza sin perder propiedades mecánicas y consistencia

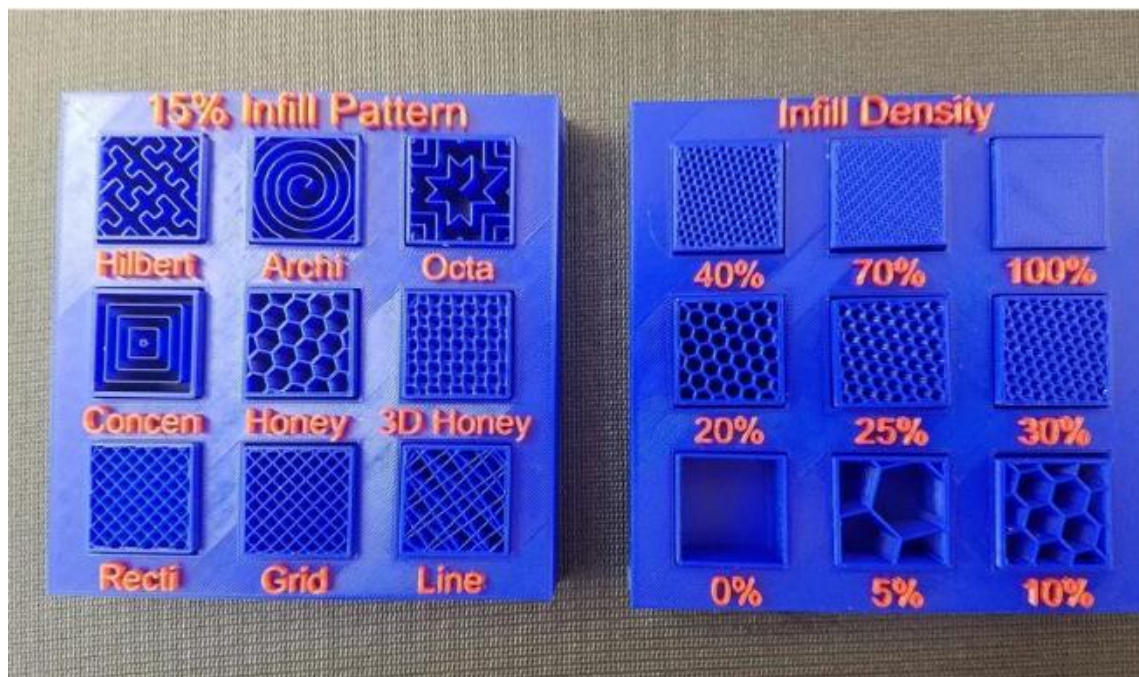


Figura 5. Tipos de infill. Fuente: Diapositivas de Fabricación Aditiva de ICAI []

- Calidad y orientación de la superficie, ya que las capas darán un resultado u otro dependiendo de la orientación de las formas impresas
- Anisotropía causada por la orientación
- Precisión dimensional
- Soportes, ya que se construye 'en el aire' y dependiendo de las superficies pueden quedar sin suficientes soportes de la pieza, necesitando crearlos aparte

También se ha de tener en cuenta el post procesado de las piezas, muy importante para producir detalles que quizá son más pequeños que la capacidad mínima de la máquina, u obtener acabados superficiales mejores a los que ofrecen las tecnologías AM. La retirada de los posibles soportes también entra en esta fase.

En resumen, aunque el uso de metales en AM está en auge, este éxito se limita a producciones cortas que requieren un nivel de calidad alto, no siendo posible aplicar estas técnicas en gran volumen, como requiere una industria como la automovilística. Una industria que, como se ha mencionado previamente, sigue valiéndose de la fundición como un proceso vital en su actividad de producción.

Este sector, sin embargo, está sufriendo grandes cambios en sus paradigmas, promovidos por una normativa más estricta que hace que la reducción de peso -y, por tanto, de consumo- sea una prioridad en el diseño y fabricación de vehículos. La industria del AM está pasando de ser considerada exclusiva para el *Rapid Prototyping* al *Rapid Manufacturing* a medida que las tecnologías mejoran, los costes bajan, y las velocidades de impresión se mantienen.

3.3. Optimización topológica

El diseño generativo es un conjunto de tecnologías que “sugieren opciones de diseño, u optimizan un diseño existente para cumplir unos criterios especificados por el usuario” [16]. De esta manera, el diseñador introduce en el software las restricciones adecuadas para que el programa desarrolle la solución. Dentro del diseño generativo se encuentran diferentes tipos de herramientas, pero el más usado es la Optimización Topológica (TO).

La optimización topológica fue introducida como concepto en 1988 por Bendsoe y Kikuchi, quienes propusieron un método de optimización numérica dentro de la teoría de homogeneización.

La optimización topológica responde a la pregunta fundamental de dónde colocar material dentro de un espacio determinado y sujeto a unas condiciones específicas para que la masa sea mínima y el rendimiento estructural máximo.

Matemáticamente, según Sigmund y Maute [6] el problema de optimización topológica se describe como encontrar la distribución de material que minimiza la función F en un entorno de volumen $G_0 \leq 0$ y sujeto a otras posible restricciones G_i . La distribución del material la describe la función de densidad $\rho(x)$, que puede tomar valores de 0 y 1, siendo 0 espacio vacío y 1 espacio sólido, dentro del dominio de diseño Ω . La descripción matemática del problema se encuentra en la ecuación 1:

$$\left. \begin{array}{l} \min_{\rho} : F = F(\mathbf{u}(\rho), \rho) = \int_{\Omega} f(\mathbf{u}(\rho), \rho) dV \\ s.t. : G_0(\rho) = \int_{\Omega} \rho(\mathbf{x}) dV - V_0 \leq 0 \\ : G_i(\mathbf{u}(\rho), \rho) \leq 0, j = 1, \dots, M \\ : \rho(\mathbf{x}) = 0 \text{ or } 1, \forall \mathbf{x} \in \Omega \end{array} \right\}$$

Ecuación 1. Descripción matemática del problema de optimización topológica. Fuente: Sigmund y Maute [6]

Desde este problema, se han formulado diversas maneras de llegar al diseño óptimo, como la aproximación RAMP o la ESO/BESO, sin embargo, la más extendida es la aportada por Bendsoe: Simplified Isotropic Material with Penalization (SIMP). Con este método, el tensor de rigidez $E_{ijkl}(x)$ es variable en el dominio, y se reformula el problema como la optimización de este tensor. Su expresión matemática es la siguiente [17]:

$$E_{ijkl}(x) = 1_{\Omega^{mat}}(x) E_{ijkl}^0 ; \quad 1_{\Omega^{mat}} = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in \Omega^{mat} \\ 0 & \text{si } x \in \Omega \setminus \Omega^{mat} \end{cases}$$

Ecuación 2. Aproximación al problema de optimización con tensor de rigidez. Fuente: Ayora [14]

La definición especifica que, en el análisis punto a punto del dominio, si el punto en cada momento pertenece al dominio de material solicitado, su rigidez será definida por el material, mientras que, si se halla en una zona del dominio que no pertenece al dominio del material, tendrá un valor mínimo. Para resolver el problema, el enfoque más común es sustituir las variables discretas por continuas e introducir una penalización, que devuelve la solución a valores discretos. Así, la rigidez depende de la densidad del material, siendo esta la variable de diseño. Como se pretende tener variables discretas en las que haya material o no, los valores intermedios de densidad son penalizados. Es aquí donde entra el método SIMP, definido como:

$$E_{ijkl}(x) = \rho(x)^p E_{ijkl}^0; \quad p > 1$$
$$\int_{\Omega} \rho(x) d\Omega \leq V; \quad 0 \leq \rho(x) \leq 1, \quad x \in \Omega$$

Ecuación 3. Método de solución SIMP. Fuente: Ayora [14]

La penalización $p > 1$ evita poner material allí donde la densidad es intermedia, aunque este valor se puede cambiar para variar el nivel de filtrado.

Con este y otros métodos de resolución del problema de optimización topológica, la metodología de diseño de piezas mecánicas ha cambiado radicalmente. El diseño ya no pasa por consolidar cada forma en pro de la funcionalidad del producto, sino que viene definido por la capacidad de identificar y sintetizar las restricciones espaciales y de cargas a las que va a estar sometida la pieza objetivo. Además, numerosos softwares de CAD y CAM incorporan módulos de optimización topológica que proporcionan resultados fascinantemente detallados y válidos respecto a las restricciones que se les introducen. SolidWorks, Ansys, Solid Edge o Autodesk Inventor son algunos ejemplos de estos programas, en los que se puede crear una pieza en CAD para optimizarla o directamente establecer el espacio máximo y las restricciones de cargas para dejar que el algoritmo desarrolle la solución idónea.

El ejemplo de la figura 6 [18] demuestra el resultado -a la dcha.- de la optimización topológica aplicado sobre un problema -a la izqda.- bidimensional en el que una viga -en amarillo- con una carga distribuida p es elevada sobre tres soportes fijos mediante un espacio de material -en azul- con forma indeterminada. El resultado de aplicar la optimización es la forma orgánica formada

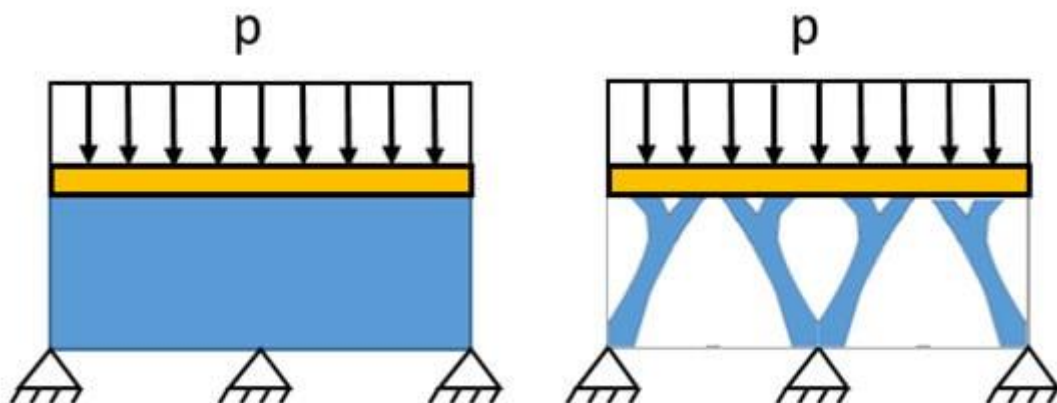


Figura 6. Problema de ejemplo para optimización topológica. Fuente: Hunar et al. [14]

por 4 columnas en forma de Y, la forma más eficiente de que la viga sea sostenida como se pretende. Este resultado, sin embargo, ha de ser refinado para obtener un cuerpo mallado continuo que pueda cumplir requisitos de manufactura.

Sin embargo, estos requisitos de fabricación han cambiado radicalmente desde la introducción de las tecnologías de fabricación aditiva, dando una libertad a los diseños en lo referido a complejidad geométrica nunca vista. El siguiente esquema da una idea del proceso de diseño y fabricación mediante TO y AM, añadiendo la impresión 3D y el post procesado.

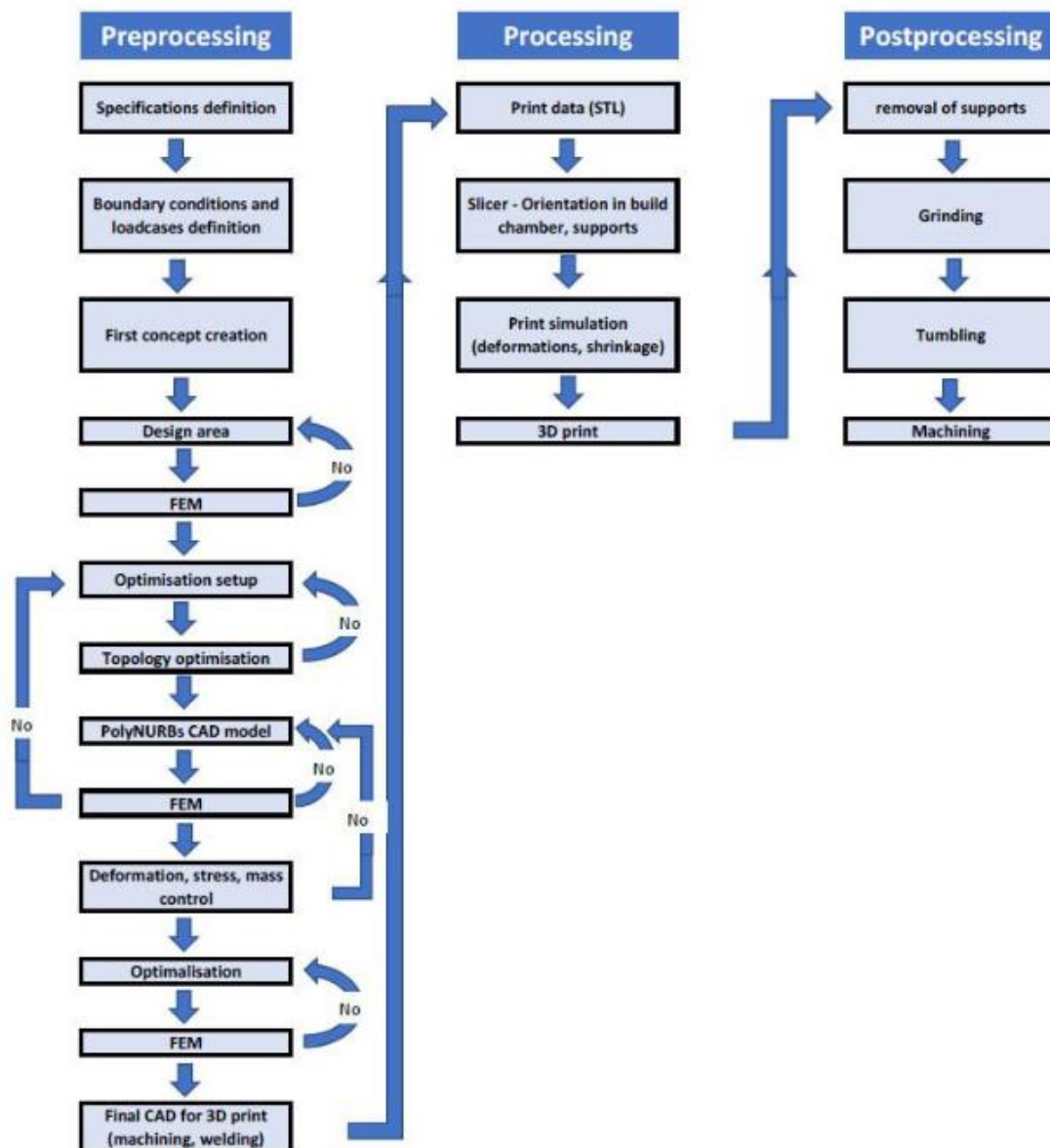


Figura 7. Proceso de diseño y fabricación con nuevas tecnologías. Fuente: Hunar et al. [14]

Los modelos obtenidos por optimización topológica, una vez teóricos, ahora pueden ser traídos al mundo físico casi tal y como el algoritmo los reproduce, creando unas oportunidades excelentes en objetivos como ahorro de materiales o velocidad de producción de prototipos.

Los resultados se están aplicando ya en industrias que pueden asumir los todavía elevados costes. Como ejemplo, la siguiente figura demuestra el diseño tradicional y el mejorado mediante optimización topológica de un componente aeroespacial [19].

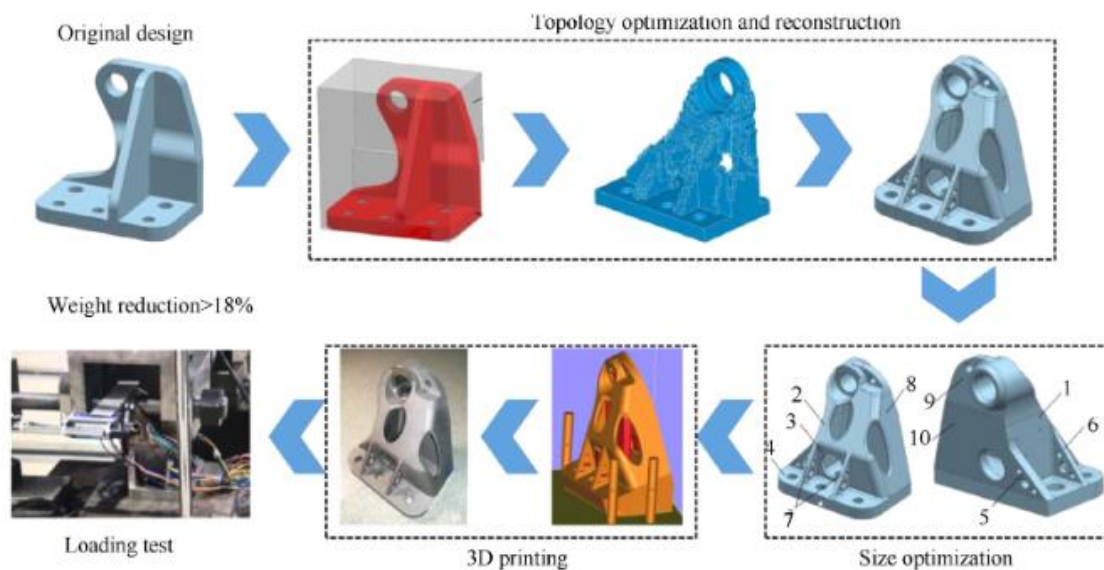


Figura 8. Mejora en el diseño de un componente aeroespacial. Fuente: Shi et al [18].

Por otro lado, la máxima innovación en el diseño de piezas no es tanto la mejorar de las existentes, si no la creación de soluciones totalmente nuevas que antes no se habían concebido siquiera. Hunar et al. [18] demuestran cómo se llega a una solución óptima para una mangueta

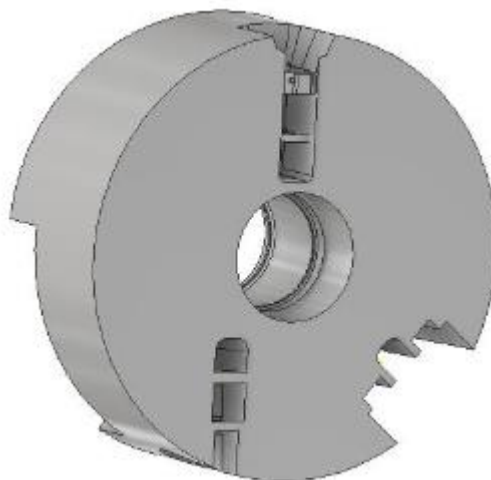


Figura 9. Espacio de diseño para una mangueta. Fuente: Hunar et al. [17]

introduciendo sólo el espacio disponible dentro de la llanta, y substrayendo los elementos que acompañan a la mangueta, dejando el espacio de diseño presentado en la figura 9.

El resultado tras la optimización topológica y el refinamiento del diseño, aportado en la figura 10, es excepcional; se consigue una reducción de peso de más del 40% respecto a la mangueta diseñada y fabricada con métodos tradicionales.



Figura 10. Resultado de la optimización topológica de la mangueta. Fuente Hunar et al. [17]

Por último, hay que destacar cómo, dentro de estas nuevas mejoras, se han desarrollado importantes innovaciones que aplican repeticiones de pequeñas estructuras o *lattices* de forma que las partes de piezas que antes eran necesariamente sólidas ahora están compuestas de estas estructuras, rebajando enormemente la masa de los diseños e incorporando múltiples mejoras. Se presenta un ejemplo proporcionado por Altair [20] en la figura 11.

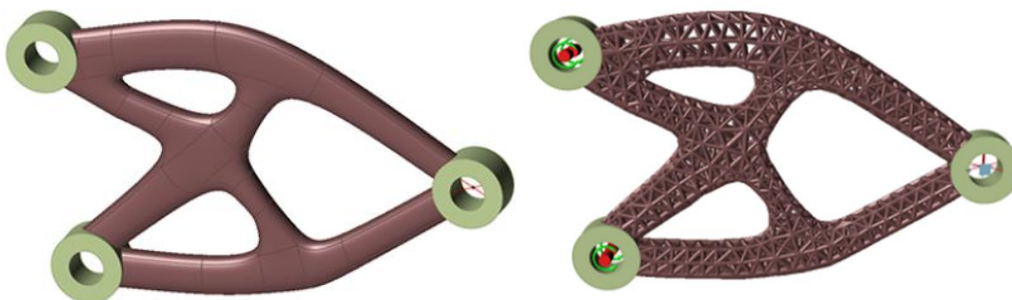


Figura 11. Ejemplo de optimización topológica con estructuras lattice. Fuente: altair.com

3.4. Nuevas técnicas de fabricación conjunta: AM y fundición

Las tecnologías de fabricación aditiva se están incorporando recientemente al proceso de fundición. El objetivo último de estas mejoras es unir las ventajas de libertad de diseño que la AM ofrece con el bajo coste y menor plazo de fabricación del método tradicional de fundición, buscando la transición entre el *Rapid Prototyping* y el *Rapid Manufacturing* [21]. La fabricación aditiva se puede aplicar a casi a cualquier parte del proceso de fabricación por fundición.

Una gran dificultad en la fundición es la creación del molde, que puede contar con una geometría demasiado complicada de crear con técnicas como el mecanizado. Por ello, una solución innovadora, que ya se comienza a adoptar en la industria es la fabricación en 3D de moldes con materiales como arena o resinas, mezcladas con catalizadores y con inyección de aglutinantes desde un cabezal móvil, que es el que crea las formas en las diferentes capas. Upadhyay estableció en 2017 [21] el potencial que este método tenía gracias al ahorro de producir el modelo a partir del que obtener el molde, pudiendo incorporar los machos y demás elementos a la fabricación directa del molde, sin procesos posteriores. Sin embargo, también se llegaba a la conclusión de que las técnicas de impresión 3D de arena para moldes aún eran demasiado caras, y sólo habían conseguido penetrar en el mercado en productores de series de gran volumen.

Comparando el proceso de fabricación del molde tradicional con su producción aplicando fabricación aditiva, Hawaldar y Zhang [22] llegaron a la conclusión en 2018 de que el ahorro tanto de arena como de metal era enorme en caso de imprimir en 3D el molde, aunque por coste, la técnica común prevalece, de nuevo, en producciones grandes. El límite estimado a partir del cual la fundición tradicional pasa a ser más conveniente es de 25 piezas [23].

El uso de la impresión en tres dimensiones en el molde, por el momento, parece que sólo tiene sentido para producir piezas de fundición con elevada complejidad geométrica, que requieran de unos márgenes de tolerancia reducidos [24] y que tengan justificado un coste razonablemente alto.

Por otro lado, el paso más sencillo y que menos varía el proceso de fundición es el de producir el modelo en 3D, para fabricar el molde en arena con él. De esta manera, sólo se cambia la manera en la que se fabrica el modelo en sí, mientras que el resto del proceso queda invariable. En 2011 Singh et Al. [25] consiguieron reducir el grosor de una pieza a fabricar en fundición de zinc de los 12 mm mínimos recomendados por estudios previos a 3 mm. Este avance supone una

reducción en más del 50% en coste de producción y de cerca del 40% en tiempo, tan sólo cambiando el tipo de proceso con el que se produce el modelo, ya que es posible obtener una forma más cercana a la pieza final, evitando exceso de uso de material y utillaje.

Otros estudios continúan mencionando la importancia del coste produciendo piezas mediante la fabricación del modelo de fundición en impresión 3D, pero entre sus objetivos no figuran la reducción de peso o la obtención de geometrías complicadas [26] [27].

Wang en [28] propone un cambio que puede implicar la clave para producir en masa de manera sostenible: la fundición a la cera perdida de piezas optimizadas topológicamente. Este método permite que el diseño se centre en la pieza en sí, en vez de en los espacios negativos del molde, para después obtener una fiel reproducción de la carcasa en la que se vierte el metal fundido tras extraer la cera. De esta manera, una forma intrincada derivada de diseño generativo puede ser fabricada mediante fundición estándar si se imprime en 3D en un material parecido a la cera.

Wang establece un flujo de trabajo en torno a esta técnica, representada en la figura 12.

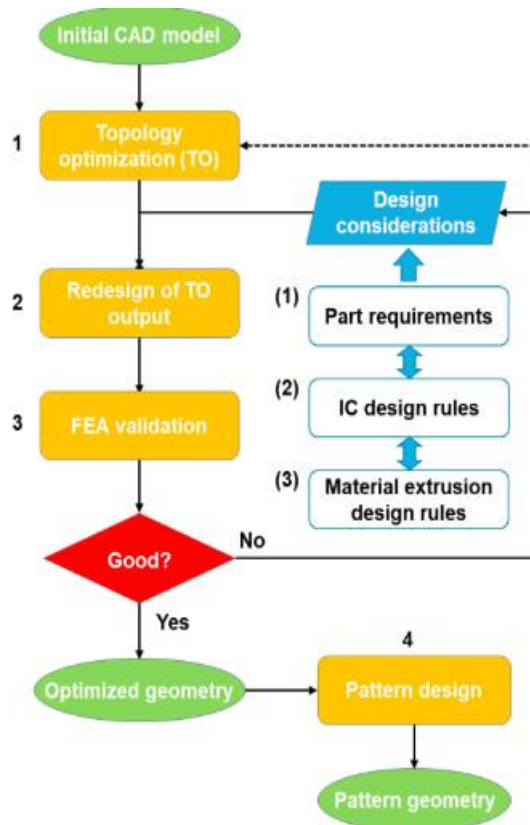


Figura 12. Flujo de trabajo en diseño de modelos para fundición a la cera perdida Fuente: Wang

Siguiendo el esquema, se alcanzan las iteraciones consideradas como suficientes para llegar a un modelo CAD optimizado topológicamente, es decir, con el mínimo de material posible, y que cumple con una serie de reglas que lo hacen apto para ser impreso en 3D.

La optimización topológica requiere la definición del espacio a optimizar de la pieza, así como las condiciones de contorno y las cargas a las que ésta estará sometida en condiciones normales de trabajo. El resultado de esta parte de diseño contará con una pieza CAD que cumple sus requisitos mínimos para ser utilizada y que cuenta con el mínimo material necesario para poder cumplir con su función, pero que quizá sea demasiado tosca o que no pueda ser impresa. El siguiente paso es el rediseño para conseguir estos dos factores, seguido de la validación de las reglas de fundición a la cera perdida, que acreditarán que los parámetros grosor de pared, sección uniforme, bordes redondeados, agujeros, y solidificación direccional son los adecuados para la fundición al modelo perdido.

Con estos parámetros, el estudio, publicado en 2019, establece una reducción en *lead time* de 50 a 2 semanas, y en coste de más de 40000 dólares a 100. Estos interesantes resultados se unen a los obtenidos por el mismo autor en una publicación previa [29] que trata los mismos temas sobre la fundición en arena tradicional, redefiniendo las reglas de diseño de modelo para la misma, ya que la impresión en 3D permite obtener mucho más fácilmente formas que antes no eran posibles.

La diferencia entre los casos de estudio en [29] y [28] radica en la utilización de fundición a la cera perdida, con un modelo o patrón no permanente, y fundición en arena, que implica la fabricación de un molde en torno al modelo impreso en 3D.

Estos métodos innovadores no tienen mucha utilidad en la industria actualmente, pero prometen ser el camino a seguir en investigaciones futuras con la intención de revolucionar las ciencias de la manufactura y poder aplicar las ventajas de la optimización topológica y la AM en la producción a gran escala, maximizando la eficiencia y el ahorro.

3.5. Sistemas de frenada para automóviles

El objeto de estudio elegido para optimizar es una pinza de freno. Este componente se encuentra enmarcado dentro del sistema de frenada de un automóvil.

Según el manual de sistema de frenado por José Antonio Guerra [30], el principio de un sistema de frenado es “la reducción de la energía cinética y/o potencial para transformarla en energía calorífica” y, con ello, reducir la velocidad del vehículo.

Los sistemas de frenada han evolucionado a lo largo de la historia del automóvil, pero siempre partiendo del concepto de transformar la fuerza ejercida por el conductor sobre una palanca o pedal en la fuerza suficiente de un componente de fricción sobre el material rotor, provocando su disminución de velocidad y parada según se requiera.

En las últimas décadas, dos tipos de frenos han sido los más usados, variando en los componentes de fricción. Uno es el freno de tambor y otro el freno de disco, comparados en la figura 13.

- Freno de tambor [31]. Comúnmente utilizado en el eje posterior de los vehículos, se trata de un cilindro llamado tambor conectado al eje que contiene un plato de freno y zapatas. Estas zapatas, hechas de chapas de acero soldadas, crean la fricción con el tambor cuando son accionadas por el sistema hidráulico. Debido a que este tipo de freno se sobrecalienta demasiado y pierde eficiencia, su uso sólo queda justificado con la intención de reducir el coste del automóvil. Está cada vez más en desuso.

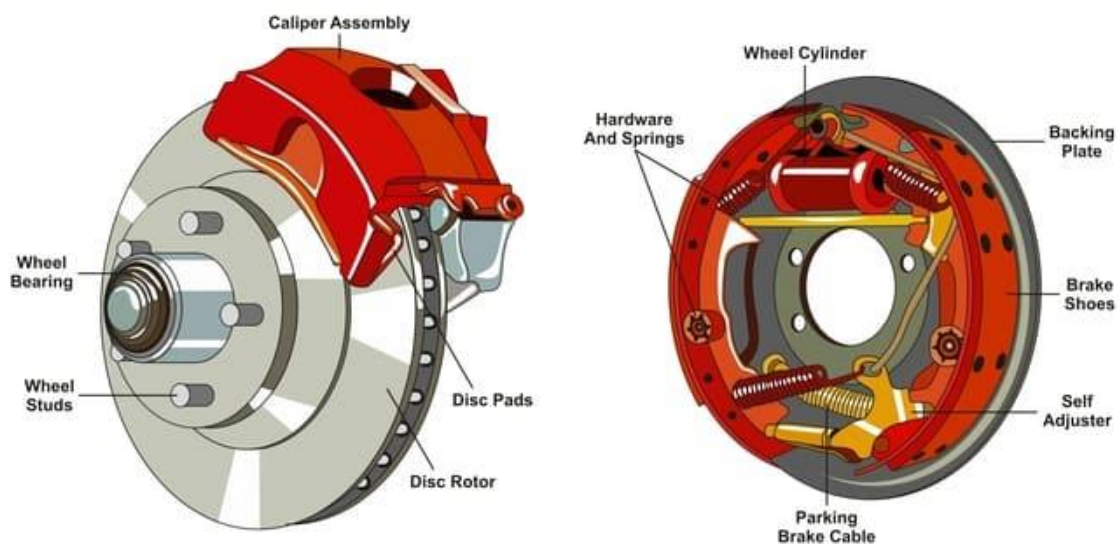


Figura 13. Comparación entre freno de disco (izqda.) y freno de tambor (dcha.). Fuente:autodoc.es

- Freno de disco [32]. El más eficiente en cuanto a disipación de calor. Consiste en una pinza de freno que alberga pastillas con materiales de fricción, acoplada en torno a un disco metálico o cerámico solidario al eje. La pinza está conectada al sistema hidráulico

del coche y contiene cilindros con pistones que, al ser presionados por el líquido de frenos, accionan las pastillas, que frenan el disco y por tanto, el vehículo. Este sistema de frenos permite una eficiente disipación creada por la fricción en la frenada, y es muy fácil de dimensionar según el rendimiento del vehículo, añadiendo más presión y superficie de fricción para aumentar la capacidad de frenada o aumentando el tamaño del disco para mejorar la disipación de calor. Por su eficiencia, los frenos de disco son los únicos utilizados en vehículos de competición, razón por la que es una pinza de freno el componente elegido para este trabajo.

Actualmente, los componentes más comunes presentes en cualquier sistema de frenada de disco son:

- Pedal (figura 14). Transfiere la fuerza del piloto al sistema. En los vehículos convencionales va unido al servofreno, que reparte la frenada de forma consistente y aumenta la fuerza, pero no es común en vehículos de competición. Hay infinidad de pedales, pero en general se clasifican según el espacio para la pedalera en el vehículo, y pueden estar colocados hacia arriba o hacia abajo.



Figura 14. Pedalera con bombas incorporadas. Fuente: racingpedalboxes.com

- Bomba de freno. Presuriza el líquido por todo el circuito hidráulico proporcionalmente a la fuerza aplicada en el pedal. En la competición de Fórmula Student, los vehículos

están obligados por normativa a incorporar dos circuitos hidráulicos separados para cada eje, por lo que el pedal de freno acciona dos bombas, una para cada eje. La elección del diámetro de la bomba es esencial, ya que un tamaño muy pequeño provocará presiones grandes que podrían ser un problema en juntas y un tamaño grande podría suponer presión insuficiente para frenar con seguridad. A menudo las bombas de freno vienen incluidas en la pedalera, como se indica en la figura 14.

- Sistema hidráulico. Compuesto por latiguillos que en vehículos convencionales son de goma, mientras que en competición suelen estar recubiertos por trenzados de metal, para evitar que la canalización sufra deformaciones o roturas que causen una bajada repentina de presión que pueda inutilizar el sistema de frenos. El líquido de frenos, probablemente el componente del sistema más importante, ha de ser incompresible, tener un punto de ebullición mínimo de 230 °C -por las altas temperaturas alcanzadas en ciertos componentes debido a la fricción-, tener una viscosidad reducida para que el freno funcione rápidamente al ser accionado, y que sea lubricante para los elementos con los que está en contacto. Ha de ser revisado con frecuencia, especialmente en competición.
- Pinza de freno. También conocida como *cáliper*, va anclada en la mangueta mediante pernos y rodea al disco de freno a la par que alberga las pastillas, sostenidas por clips pasantes, soportando la fuerza que estas ejercen cuando friccionan con el disco. Contienen pistones que son accionados cuando se presuriza el sistema hidráulico, empujando las pastillas contra el disco. Hay pinzas de diferentes tipos:

- Pinza fija o de pistón opuesto. Este tipo de pinza representado en la figura 15 va fija a la mangueta y se mantiene inmóvil alrededor del disco, siendo las pastillas las que son desplazadas linealmente para friccionar contra el disco. Las pinzas fijas son un sistema muy sólido al mantenerse inmóviles, y ofrecen una frenada muy estable gracias a que los pistones se mueven en la misma medida hacia el disco. Pueden tener desde un pistón a cada lado hasta cuatro, en modelos de coche de muy alto rendimiento.

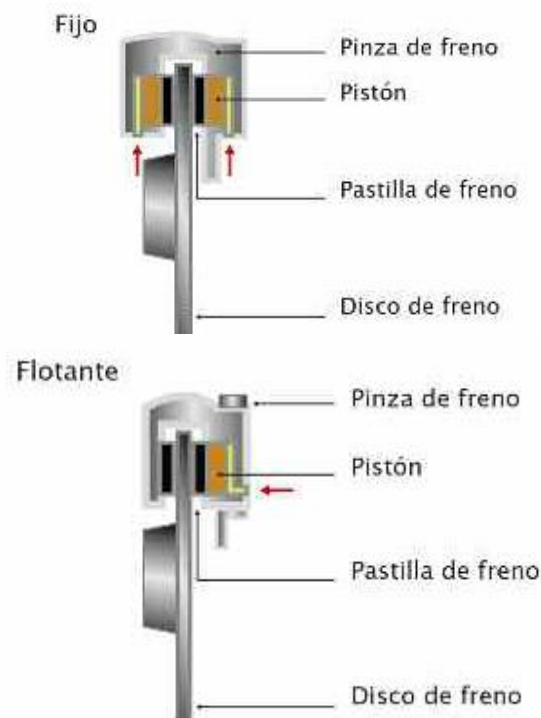


Figura 16. Pinza de tipo flotante. Fuente: talleractual.com

- Pinza flotante. En este tipo de pinza, que tiene sólo uno o dos pistones a un solo lado del disco, es el cuerpo de la pinza el que se desliza sobre el soporte de la mangueta cuando el freno se acciona, haciendo que las pastillas de ambos lados friccionen contra la superficie del disco. Estos discos son los más utilizados en vehículos por su mayor simpleza y coste. Ofrecen una frenada un tanto más inestable debido a su movimiento, y provocan problemas cuando no son correctamente calibrados. El esquema de la pinza flotante está en la figura 16.

- Disco de freno. Solidario al eje, de manera que rota a la misma velocidad, suele estar fabricado en acero o aluminio, pero también se encuentran modelos cerámicos de alto rendimiento. La clave en el diseño y fabricación de los discos de freno es la disipación de calor, por lo que se encuentran discos macizos -más económicos- y ventilados, con infinidad de tipos de agujeros, estrías, y formas para lograr un rápido enfriamiento.

Los componentes del sistema de frenos como el disco y la pinza con todos sus elementos forman parte de lo que se conoce como masa no suspendida. La masa no suspendida de un automóvil la conforman todos aquellos elementos cuyo peso no recae sobre la suspensión. Es decir, todos aquellos elementos que van, generalmente, en el espacio interior de la llanta, acoplados a la mangueta, que traslada las fuerzas de sus pesos directamente al eje, y éste, a la llanta, que las soporta contra el firme.

La importancia de la masa no suspendida es muy grande, especialmente en vehículos de competición, ya que de ella depende la respuesta de la suspensión ante alteraciones en el terreno, siendo mejor cuanto menor masa suspendida haya. Además, el rendimiento en el automóvil crece cuando se reduce esta masa gracias a una mejor maniobrabilidad, ya que las ruedas, especialmente en vehículos tipo fórmula, son los elementos más alejados del centro de gravedad, provocando mayores inercias cuanto mayor sea su masa y la de los elementos que soporta [33]. Supone una mejora considerable en el rendimiento, por tanto, la reducción del peso de una pinza de freno, cuya masa es no suspendida.

4. Metodología del diseño

Una vez conocido el estado de los diferentes conceptos directamente relacionados con la investigación, se puede comenzar a definir el proceso por el que se va a obtener la pieza final buscada.

4.1. Elección de un modelo comercial de pinza

El primer paso es seleccionar un modelo de pinza comercial que utilizar como referencia no sólo en costes y rendimiento, sino también en cuanto a restricciones de diseño.

Para facilitar el estudio y obtener unas mejoras que sean reales y comparables a lo existente en el mercado, se ha decidido utilizar una pinza de freno de tipo fijo, ya que es la más común y utilizada tanto en coches de calle como en modelos que buscan más rendimiento.

Además, ya que el modelo de pinza que se va a realizar es experimental, se ha decidido optar por un modelo que se utiliza típicamente en la *Formula Student* (FSAE), una competición internacional en la que equipos universitarios -entre ellos, ICAI con su equipo del *ICAI Speed Club*- desarrollan sus propios vehículos monoplasas para someterlos a diferentes pruebas que califican su diseño, fabricación, desarrollo y rendimiento. En estos monoplasas es frecuente encontrar diferentes grados de innovación, por lo que, como se ha comentado, se ha buscado una pinza de uso común en esta clase de vehículos para, en caso de llegar a un resultado favorable en este trabajo, que sirva de precedente para más tarde desarrollar una optimización similar de forma que se sustituyan las que se utilizan actualmente en el monoplasa del equipo de ICAI.

Para saber el tipo de modelo de pinza comercial a considerar, se ha de concretar primero el tamaño de la llanta, ya que definirá la categoría de la pinza debido a que el espacio interior de la llanta limita el tamaño de la pinza, siendo un factor muy restrictivo. El análisis de qué tamaño elegir se presenta en el apartado siguiente 'restricciones geométricas y de cargas', siendo el resultado la elección de un tamaño de pinza válido para llantas de 13”.

Una llanta de este tamaño tiene un diámetro interior de unos 300 mm, por lo que se buscará una pinza que permita su uso con un tamaño de disco de freno de 260 mm de diámetro como máximo, y cuyo tamaño una vez montada no supere los 40 mm desde la parte externa del disco hasta el punto más externo de la pinza.

Para acotar la búsqueda, se elegirá un OEM específico. Los principales fabricantes considerados han sido:

- Brembo [34]. Marca italiana especializada en kits de frenos para coches de calle y competición. Se trata de una marca a menudo considerada como *premium*, ya que muchos fabricantes de vehículos de lujo montan sistemas Brembo en sus modelos de serie. La oferta no es demasiado amplia para FSAE, y está basada en frenos de motocicleta que, aunque de máxima calidad, no siempre se adaptan a un monoplaza de características. Por otro lado, los precios son considerablemente altos.
- AP Racing [35]. Casa inglesa especializada en componentes de freno y embrague para automóvil, tanto de calle como de competición, además de proyectos especiales que incluyen unos niveles altos de investigación y desarrollo, lo que respalda sus modelos más consolidados. AP Racing oferta diferentes pinzas con pistones y pastillas comerciales para Formula Student, a un precio competitivo que los hace una opción comúnmente elegida.
- Wilwood [36]. Con base en California, EEUU, Wilwood es una marca comparable a AP Racing en cuanto a variedad de productos. Aunque no tiene modelos específicos para FSAE, sí cuenta con una selección de pinzas de freno para vehículos de competición *open Wheel*, con algunas referencias que son muy parecidas a lo que ofrece AP Racing.

El fabricante seleccionado ha sido AP Racing. Más común en Europa que Wilwood, es sin duda una mejor opción que Brembo en cuanto a costes, especialmente porque la variedad que ofrecen permite un nivel de adaptación mayor de sus productos. Un precio más competitivo hará que la comparación entre los costes de la pinza comercial y la pinza optimizada sea más fiable.

Dentro del catálogo de AP Racing [37], los modelos considerados varían entre monobloques y pinzas en dos cuerpos unidos mediante tornillería. Las diferencias principales son la rigidez conseguida en la pinza y el espacio disponible -según se argumenta en blogs especializados [38]- en relación al peso. En general, se consideran las pinzas de dos cuerpos como una mejor opción por la mayor rigidez y menor coste frente a un leve aumento de peso, pero, hoy en día, se encuentran indistintamente modelos de pinza de los dos tipos sin diferencias muy grandes de precio o rendimiento. En este análisis, ya que la pinza optimizada estará diseñada de manera que se pueda fabricar en una sola pieza mediante fabricación aditiva, se ha buscado un modelo de tipo monobloque de 2 pistones, lo más adecuado para el tipo de vehículo considerado. Dentro del catálogo de AP Racing, se especifica que la pinza más común corresponde a la referencia CP3696 -figura 17- de dos cuerpos.



Figura 17. Pinza de freno AP Racing CP369. Fuente: apracing.com

Por otro lado, también suele utilizarse su variante en monobloque con referencia CP2577. Por tanto, es esta pinza, en su variación CP2577 -figura 18-, la que se ha utilizado como referencia de modelo comercial.



Figura 18. Modelo seleccionado como referencia: pinza de freno AP Racing CP2577 Fuente: apracing.com

Esta pinza se fabrica en monobloque de fundición de aluminio, tras lo que se realizan taladros transversales para la canalización del fluido de frenos desde la entrada del latiguillo hacia un pistón y a otro. Las aperturas de estos canales se sellan mediante tornillos, algunos de los cuales de purga. La pinza CP2577 está pensada para un tamaño de discos de freno de 9,7 mm de grosor y un rango de diámetros que comienza en 254 mm, por lo que éste será el disco para el que se realizará la optimización. Los pistones que monta esta pieza son la referencia CP2577-102, de 44,5 mm de diámetro y 23,2 mm de ancho, mientras que las pastillas son de la familia CP2399, y están disponibles en diferentes acabados. El material seleccionado se concreta en el estudio de la dinámica vehicular, ya que de él depende el coeficiente de fricción aplicado en los cálculos.

4.2. Restricciones geométricas y de cargas

El diseño generativo de cualquier componente requiere de unas condiciones de contorno específicas que indiquen al algoritmo cómo definir la pieza. En este proyecto, ya que se ha decidido optimizar una pinza de freno de un automóvil, sus condiciones de carga vendrán dadas, por las dimensiones del modelo de freno específico elegido y el tamaño de llanta dentro de la que habrá de ser instalado, por un lado. Por otra parte, las cargas a las que estará sujeta la pinza se derivarán de un estudio sencillo de la dinámica vehicular del automóvil que se utilice como

ejemplo; en este caso, el Formula Student. Los cálculos detallados se pueden consultar en el Anexo I.

Restricciones geométricas

Para las restricciones geométricas o espaciales exteriores, que vienen dadas por el espacio entre el disco de freno y la llanta, se ha de considerar qué tamaño tiene ésta última.

Tras la investigación en foros dedicados a la FSAE [39] se llega a la conclusión de que, aunque hay un abanico grande de posibilidades, los tamaños más comunes en la competición son 10" y 13", siendo el primero el más buscado por equipos con una trayectoria más dilatada en la competición y con un nivel de experiencia en el desarrollo de componentes que les transfiera una capacidad mayor para el denominado *packaging*, proceso de diseño de los componentes de la masa no suspendida que se sitúan dentro del espacio de la llanta, que obviamente será más restrictivo en las llantas de menor tamaño.

Esta talla de llanta ofrece una mejora clara en cuanto a ahorro de peso, que suele ser una manera rápida y sencilla de mejorar el rendimiento del monoplaza, razón por la que es el tamaño buscado a medio plazo, aunque su resultado en otros factores como la adherencia sea peor. Sin embargo, los problemas de *packaging* son de mucha importancia siendo en ocasiones los causantes de que los frenos no funcionen de la manera adecuada.

Siendo el objetivo de este trabajo el ahorro de material y peso, si un equipo con menos experiencia que decida usar llantas de 13" puede aun así reducir peso de la masa no suspendida gracias a una pinza optimizada, podría suponer una mejora sustancial.

Además, al tratarse de pinzas más grandes, la posibilidad de reducir peso es mayor. Para contar con dimensiones reales, se ha seleccionado arbitrariamente una llanta comercial de 13" de la marca OZ, ejemplificada en la figura 19, creada específicamente para la competición FSAE.



Figura 19. Llanta OZ de 13" en aleación de magnesio. Fuente: ozracing.com

Como se ha especificado en el apartado anterior, esta llanta tiene un espacio libre en su interior de aproximadamente 155 mm de radio -desde el centro de rotación- y 125 mm de ancho, por lo que la pinza CP2577 es adecuada, con una dimensión máxima desde el centro del disco de 151 mm y 111 mm de ancho, dejando el espacio de seguridad mínimo que indica el fabricante de la llanta.

Para las restricciones geométricas del interior de la pinza, se tienen que considerar los espacios necesarios para alojar las pastillas y el paso del disco. Éste último, como se ha especificado anteriormente, tiene un grosor de 9,7 mm, por lo que se dimensionará la pinza con un paso de 14 mm, dejando algo más de 2 mm de holgura por diseño entre cada pastilla y el disco cuando el freno no está accionado, distancia recomendada por fabricantes de pastillas [40]. Esta dimensión corresponde, además, al recorrido de los pistones cuando se activa el freno.

El radio del disco es de 154 mm, por lo que su corte con el espacio de la pinza define esta limitación espacial.

Por otro lado, las pastillas han de estar en sus laterales en contacto con la pinza, ya que será este contacto el que transfiera la fuerza de fricción pastilla-disco a la pinza, y esta a su vez a la mangueta a través de los soportes atornillados. Por tanto, el ancho de las pastillas (unos 70 mm) es la dimensión utilizada para el hueco interior de la pinza que discurre paralelamente al paso

del disco. La altura de la pastilla define la altura de la pinza, en tanto que los agujeros por los que pasan los retenes de las pastillas tienen que coincidir con los agujeros que habrá en la pinza para el mismo propósito.

Asimismo, los pistones que el modelo utiliza, de 44,5 mm, restringen el diámetro de los cilindros en la pinza, así como el largo de 23,2 mm desde la posición de las pastillas hasta la cara interna del pistón, que estará en contacto con el líquido de frenos.

Por último, la distancia entre los taladros para los tornillos de sujeción de la pinza a la mangueta es la misma que la especificada en los planos del modelo CP2577-3E0, de manera que la pinza optimizada disponga de una medida estándar para poder ser acoplada a una mangueta comercial.

Todas estas restricciones espaciales ya dan un espacio bastante definido de cómo tiene que ser la pinza para optimizar. Las dimensiones que no tienen restricciones se desprenden siempre de las de la pinza CP2577 de AP Racing.

Restricciones de cargas – Sistema de frenado elegido

Las cargas que habrá de soportar la pinza se han dimensionado en base a parámetros estándar de la competición FSAE. Como ya se ha explicado, los cálculos detallados de la dinámica vehicular y la elección de componentes se puede consultar en el Anexo I.

Se ha estimado una masa total del vehículo de 250 kg, y una capacidad de deceleración de 1,6 g, valor común en la prueba de frenado [41]. Utilizando estos parámetros de entrada, se han hallado el par de frenado mínimo y la fuerza de frenada mínima, mostradas en la tabla 1, que tiene que cumplir la frenada de una pinza del eje delantero -por ser el que más carga de frenada soporta.

Requisitos de carga de frenada en una pinza del eje delantero	
Par de frenado mínimo [Nm]	Fuerza de frenada mínima [N]
537,9	1034,3

Tabla 1. Requisitos de carga en el eje delantero

Estos valores sirven de guía para iterar con los parámetros de los diferentes componentes de un sistema de frenos básico, hasta llegar a cumplir con la fuerza y par mínimos de manera teórica. Por tanto, se ha elaborado un diseño de sistema de frenos, teniendo en cuenta sólo los

componentes y parámetros relevantes para obtener las cargas que tiene que soportar la pinza. A continuación, se especifican los componentes y medidas elegidos¹:

- Pedal de freno. Como elemento de conexión entre el piloto y el sistema de frenado, el parámetro más importante es la relación de pedal, según la ley de la palanca, que hará que la fuerza aplicada en el pedal se multiplique más o menos antes de accionar la bomba. No es tan relevante elegir un pedal comercial ya que el estudio del sistema se hace de manera teórica y los pedales de freno en FSAE son frecuentemente fabricados por cada equipo a medida, cumpliendo con la relación buscada. Por ello, se ha decidido utilizar una relación estándar de 4,15:1. De esta manera, si el piloto ejerce una fuerza de 300 N sobre el pedal, la bomba recibirá una fuerza de 622,5 N en su pistón.
- Bomba de freno. Para este componente sí que es necesario encontrar un modelo comercial válido, por lo que se ha utilizado el catálogo de AP Racing para encontrar el modelo más utilizado en Fórmula Student, que no es otro que el CP5623 -en la figura 6. La bomba CP5623 es ligera y compacta, siendo apta para aplicaciones en las que el espacio para la pedalera y la bomba es restringido, como es el caso de estas Fórmulas. Tiene un rango de desplazamiento del pistón de 25,4 mm, y posibilidades de diámetro de émbolo que van desde los 14 mm hasta los 25,4 mm. El diámetro elegido es de 17,4



Figura 20. Bomba de freno CP5623 de AP Racing. Fuente: ap racing.com

¹ Nota: se trata de un sistema de frenada simplificado, por lo que elementos como el repartidor se han suprimido, asumiendo un reparto del 50% a cada eje.

mm, un valor medio que garantiza la multiplicación de la fuerza que viene del pedal en la presión del fluido para llegar a los cilindros de la pinza, sin ser demasiado pequeño como para que la presión del líquido suba demasiado y pueda causar problemas en los latiguillos.

- Latiguillos. Sin ser de especial relevancia en este sistema teórico, se asume que son metálicos y de una longitud y calidad mínimos como para que no haya problemas de conformidad en el circuito y la presión en los cilindros de las pinzas sea la adecuada.
- Pistones. Definidos por la pinza seleccionada, ya se ha explicado anteriormente que el modelo seleccionado es el CP2577-102 -en la figura 21-, fabricados en aluminio, de 44,5 mm de diámetro y 23,2 mm de ancho.



Figura 21. Pistones CP2577-102. Fuente: mailordercarparts.co.uk

- Pastillas de freno. De nuevo especificados según la pinza CP2577, como ya se ha comentado, han de ser del modelo de AP Racing CP2399 -en la figura 22.



Figura 22. Dibujo de pastillas CP2399. Fuente: apracing.com

El fabricante ofrece este modelo de pastillas en multitud de materiales con diferentes características según el uso y el tipo de vehículo, entre otras preferencias. Para este estudio, el parámetro que interesa es el coeficiente de fricción, que definirá una mayor o menor capacidad de frenada. Por ello, el material seleccionado tiene la referencia APF405 en el catálogo de AP Racing, y tiene un coeficiente de fricción de 0,36.

- Disco de freno. Las dimensiones de este componente ya fueron seleccionadas cuando se eligió la pinza comercial a utilizar como referencia -254 mm de diámetro y 9,7 mm de grosor-, siendo el resto de las características -material, perforaciones- irrelevantes para este estudio, ya que están relacionadas con la capacidad de disipar temperatura, una característica que queda fuera del rango de esta investigación.

Seleccionados los componentes del sistema de frenado y sus parámetros característicos, se han utilizado las nociones de dinámica vehicular para obtener los valores de cargas a los que se somete la pinza, y sobre los que se computará tanto la optimización topológica como las validaciones con análisis de elementos finitos. Dichas cargas, calculadas para una sola pinza del eje delantero, se presentan en la tabla 2.

Cargas teóricas en una pinza del eje delantero según los componentes especificados		
Par de frenada [Nm]	Fuerza de frenada [N]	Presión en el pistón [MPa]
595,5	1145,3	1,25

Tabla 2. Cargas teóricas en una pinza del eje delantero según los componentes especificados

Los valores obtenidos para el par de frenada y la fuerza de frenada son mayores que los mínimos requeridos, por lo que teóricamente el sistema de frenado diseñado permitiría alcanzar los parámetros de deceleración determinados al comienzo.

Resumen de restricciones

En este capítulo se han analizado las diferentes cuestiones que definen la pieza a optimizar y de las que resultan las limitaciones y características que la pinza ha de cumplir. Estas características se resumen en:

- Tipo de aplicación: vehículo monoplaza tipo de competición FSAE, que define
 - Rendimiento de frenada necesario: deceleración de 1,6g
 - Cargas en la pinza derivadas de la frenada:
 - Fuerza de la pastilla sobre el cuerpo de la pinza: 1400 N
 - Presión del líquido hidráulico de frenos: 1,25 MPa
- Restricciones geométricas externas: derivadas del tamaño de llanta: 13"
- Pinza comercial con la que comparar. Esto define:
 - Tipo de pinza: fijo
 - Número de pistones: 2
 - Restricciones geométricas internas: derivadas del tamaño de pistones y pastillas
 - Pistones: 44,5 mm de diámetro
 - Pastillas: modelo CP2399

4.3. Material seleccionado

El modelo de pinza comercial de AP Racing no ofrece una definición más detallada del material más que *casted aluminum*, es decir, aluminio de fundición. A la hora de producir una pieza optimizada, es crucial especificar el material dentro del software ya que la optimización depende de los esfuerzos internos y, estos a su vez, son dependientes del material de la pieza. Se ha escogido arbitrariamente una aleación de aluminio, silicio y magnesio cuya composición corresponde a la nomenclatura $AlSi_{10}Mg$.

Este material es frecuentemente encontrado en fundición de aluminio pero, además, también es muy común encontrarlo como material en fabricación aditiva, siendo el metal en polvo para impresión 3D más barato [42]. Según el fabricante *Materialise Manufacturing* [43], este material “tiene buena fluidez, buena estanqueidad a los gases, baja contracción, baja tendencia al agrietamiento térmico, buenas propiedades de fundición y es una de las aleaciones más

utilizadas para fundir aleaciones de aluminio". Su extenso uso en fabricación aditiva se debe a que es una aleación de silicio y aluminio sub-eutéctica, con una solidificación rápida. El alto contenido de silicio facilita que el material absorba energía de un láser y se quede solidificado de manera menos costosa, por lo que su aplicación con tecnologías de impresión 3D metálica por láser es idónea.

El $AlSi_{10}Mg$ tiene unas propiedades especialmente buenas para manufactura de piezas de automóvil que requieren de rigidez y ligereza conjuntamente. Estas propiedades se resumen en la siguiente tabla.

Propiedades del material elegido $AlSi_{10}Mg$	
Densidad	2600 kg/m ³
Resistencia a tensión	300 MPa
Límite elástico	190 MPa
Módulo elástico	70 GPa
Alargamiento a la rotura	2,0 %

Tabla 3. Propiedades del $AlSi_{10}Mg$. Fuente: Materialise Manufacturing [44]

4.4. Metodología de diseño en CAD con criterio de optimización topológica

Conocidos los parámetros que limitan y definen la pieza a diseñar, se selecciona el entorno software que va a servir como marco en el desarrollo de la investigación. Este software es *Solid Edge*, un porfolio de herramientas CAD, CAM y CAE proporcionado por la marca Siemens. Las razones de selección de este programa han sido:

- Conocimiento previo del entorno de Siemens
- Disponibilidad de licencia de estudiante para uso en ordenador personal
- Licencia disponible en los ordenadores de la universidad
- Integración de diferentes entornos:
 - o Modelado en 3D (CAD). La base de este software, permite crear y modelar piezas a partir de diferentes operaciones como extrusiones, cortes o taladros, y definir infinidad de curvas y superficies, así como generar ensamblajes de varias piezas. También permite obtener planos de cualquier pieza.
 - o Módulo de simulación. Esta herramienta propia del CAE permite simular diferentes estados de cargas sobre las piezas modeladas, permitiendo un diseño

más eficiente al evitar tener que fabricar las piezas y realizar ensayos sobre ellas. Para este proyecto, se utiliza la simulación de cargas estructurales además del módulo de diseño generativo que permite optimizar las piezas topológicamente en función de las cargas aplicadas.

- Ajustes de fabricación 3D. Solid Edge dispone de un módulo de impresión 3D que aplica los criterios de este tipo de fabricación en el diseño generativo para dar lugar a piezas complejas propias de la optimización topológica pero que tienen en cuenta las características de la fabricación aditiva de forma que la pieza producida sea realizable por una impresora 3D. Esto es muy importante en este trabajo. Por último, el módulo de impresión 3D del programa ofrece diferentes validaciones como de ángulos salientes y espacios vacíos, que permiten comprobar que la pieza diseñada va a poder ser impresa correctamente.

Diferencias entre el diseño estándar y el diseño con criterio de optimización topológica

Utilizando la licencia del año 2023 de Solid Edge, se ha diseñado la pieza a optimizar topológicamente.

El diseño de una pieza mecánica con este criterio es diferente al diseño tradicional. Como se ha comentado en el capítulo del estado de la cuestión, un diseño y fabricación al uso irían de la mano, de manera que la pinza se diseñase teniendo en cuenta los criterios de fabricación del molde para fundición inyectada. Estos requieren:

- Pocas o nulas oquedades interiores
- Pocas aristas, que sean redondeadas
- Inexistencia de ángulos agudos
- Espesores mínimos suficientemente grandes para permitir al material fundido la entrada y la correcta solidificación
- Dimensiones correctamente aumentadas para que la contracción de la aleación al solidificarse no desvirtúe las dimensiones necesarias. Esto, como se verá unos párrafos más abajo, es de suma importancia en los cilindros de la pinza y el hueco para las pastillas de freno

Además del diseño de la pinza en sí, se deberían tener en cuenta los requisitos de la fabricación del molde, y estudiar el diseño de la pinza en negativo para ello.

En cambio, el diseño con el objetivo de una optimización topológica es radicalmente diferente. Gracias a la selección de las condiciones de la funcionalidad de la pinza -espacio y cargas- se sabe con detalle qué dimensiones máximas debe ocupar la pieza, para que quepa en el espacio de la llanta. También se conocen las dimensiones mínimas interiores, de manera que los elementos de la pinza que no son el cuerpo -pistones, pastillas y disco- tengan espacio para sus funciones en el interior de ésta. Por último, se toman como referencia la posición relativa de los agujeros para los pernos del cuerpo de la pinza a la mangueta, quedando así el espacio exterior e interior de la pinza totalmente especificados.

Sabiendo el funcionamiento iterativo de la optimización topológica, se diseña un espacio base con todas las anteriores restricciones espaciales, para posteriormente dejar que el software itere sobre el cuerpo producido eliminando material allá donde los esfuerzos internos sean menores o nulos.

Este espacio base está representado en las figuras 23, 24 y 25 -con las medidas en mm- en base a las restricciones comentadas anteriormente.

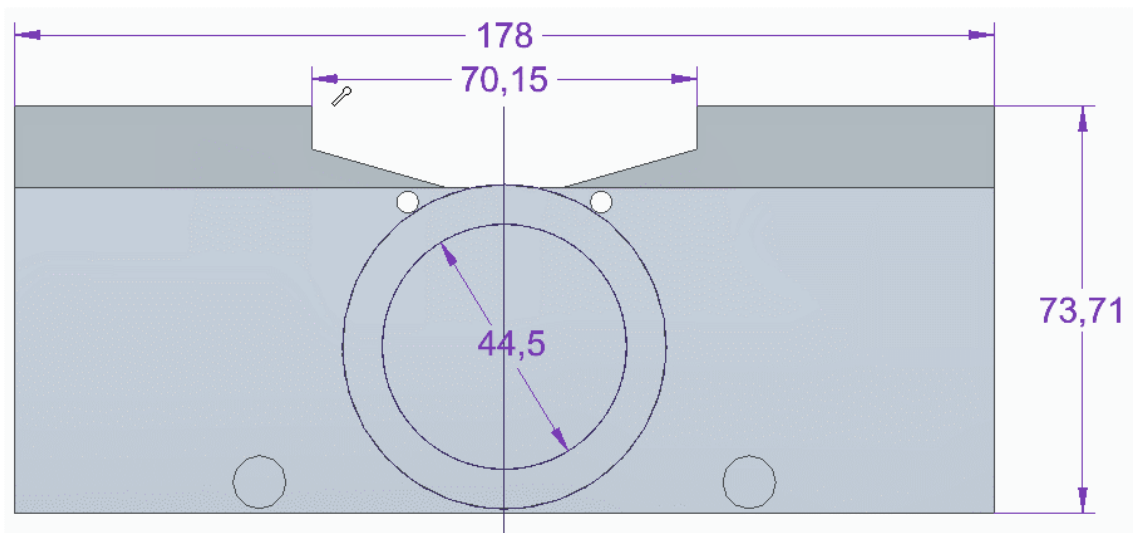


Figura 23. Alzado de la pieza base. Fuente: elaboración propia

En el alzado, en la figura 23, se observa el cumplimiento del ancho del hueco para que quepan las pastillas CP2399, así como los agujeros para los clips que las sostienen. El diámetro de los cilindros donde se alojan los pistones, así como su longitud, se cumple rigurosamente. Otras medidas menos importantes, como el alto de la pieza o la longitud (178 mm) también se

desprenden de los planos de la pinza CP2577, presentada en los anexos, aunque se han tomado como guía de tamaño y no han de ser cumplidas estrictamente.

Por otro lado, en la planta, en la figura 24, se presenta el correcto ancho de 16 mm de la pared sobre la que apoyan las pastillas cuando están ejerciendo la fuerza de fricción sobre el disco. En medio de estas paredes, a cada lado, se observa en la figura una pequeña muesca de un ancho similar, que corresponde al paso del disco.

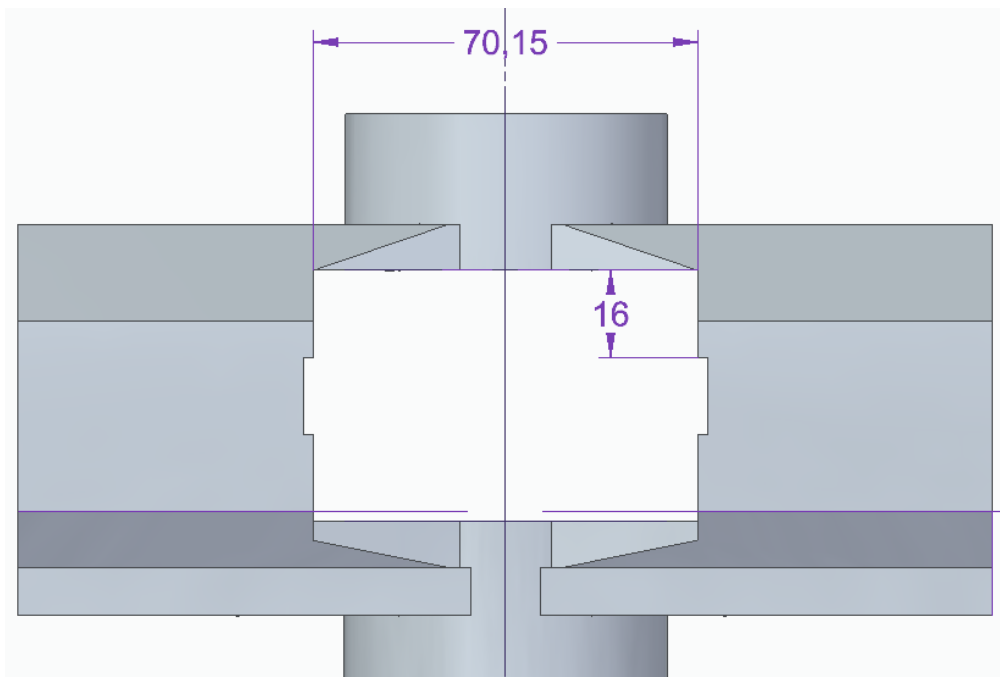


Figura 24. Planta de la pieza base. Fuente: elaboración propia

Las medidas del ancho de las pastillas y en especial los diámetros de los cilindros son de suma importancia, ya que han de tener un ajuste muy preciso. Se contempla un ajuste con tolerancia H7/h7 según tolerancias básicas y la norma ISO 286 [45], de forma que se permita un mínimo deslizamiento de una pieza sobre otra, es decir, del pistón dentro del cilindro en el accionamiento del freno y de las pastillas en el hueco de la pinza a la hora de ser reemplazadas. Por esto, para cumplir con el rango de tolerancia dado, el cilindro tiene una dimensión de 44,52 mm, precisión no mostrada en la cota de la figura 23. No es posible controlar la tolerancia del pistón ya que es una pieza comercial, pero se asume que es la adecuada para que, al introducirlo en el cilindro con el segmento de goma correspondiente, el fluido de frenada se mantenga en el compartimento sin fugas. Para el ancho de las pastillas se contempla la misma situación, aunque en este caso el ajuste es menos restrictivo al no haber líquido involucrado.

En la figura 25 se detallan las diferentes partes de esta pieza, ya que se hará referencia a ellas a lo largo del resto de este documento:

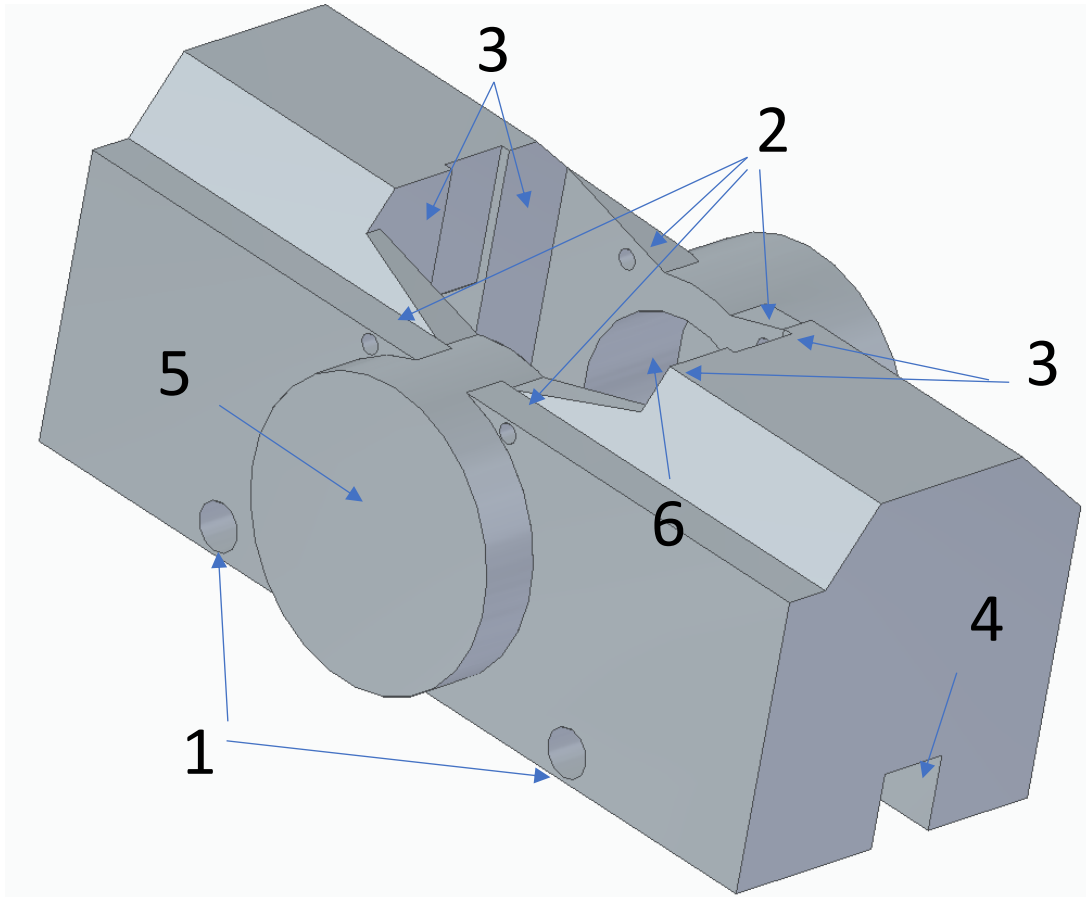


Figura 25. Detalle de partes de la pieza base. Fuente: elaboración propia

1. Agujeros para la unión atornillada de la pinza a la mangueta. La medida sigue la indicación de la pinza comercial
2. Agujeros para el paso de los clips de retén de las pastillas. Colocados para alinear perfectamente las pastillas en su posición correcta, siguiendo una vez más los planos de la pinza comercial, incluidos en los anexos.
3. Guías para las pastillas. Delimitan la posición longitudinal de las pastillas, y es donde éstas apoyarán para transmitir la fuerza de frenado a la pinza.
4. Paso del disco de freno.
5. Cilindro exterior.
6. Cilindro interior. Aquí se alojarán los pistones, por lo que la precisión en su medida y su acabado superficial es de gran importancia.

La forma final del espacio base se presenta en la figura 26.

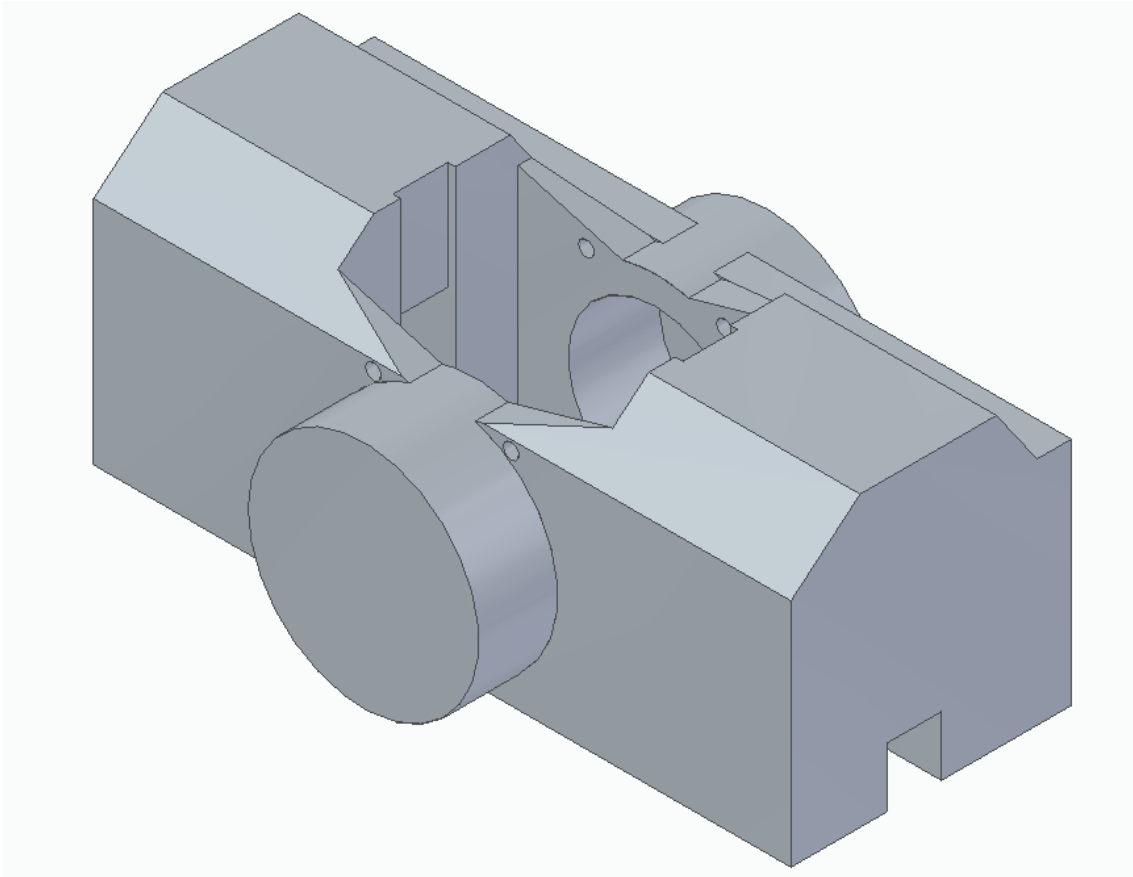


Figura 26. Vista isométrica del espacio base. Fuente: elaboración propia

Sobre este espacio de trabajo se aplican las cargas obtenidas del estudio de la dinámica vehicular teniendo en cuenta los componentes elegidos para el sistema de frenado que se ha diseñado. Estas cargas, como se ha detallado, son simplemente dos:

- Presión en todas las caras de los dos cilindros. Valor: 1,25 MPa
- Fuerza de fricción de las pastillas aplicada sobre la pared de apoyo de la pinza. Valor: 1400 N

La fuerza de frenada que las pastillas aplican sobre el disco de freno viene directamente del líquido. Por tanto, aunque por intuición parezca que hay que aplicar una fuerza hacia fuera aplicada en las caras interiores de la pinza, esta fuerza en realidad sólo está aplicada en la pinza a través de la presión del fluido. No hay otro elemento que aplique la carga perpendicular al disco de freno.

Por otro lado, la fuerza de fricción de las pastillas sobre el disco, con una dirección paralela a la cara de éste, hace que las pastillas se apoyen sobre sus 'guías' en la pinza, lugar donde se ejerce

toda la fuerza. Dependiendo de la orientación de la pinza, esta fuerza se aplicará a las guías de un lado u otro, por lo que se ha elegido un lado arbitrariamente para la optimización.

De esta manera quedan definidas las fuerzas que la acción de la frenada causa sobre la pinza. Este componente, por su parte, trasladará estas fuerzas a la mangueta a través de sus uniones atornilladas. Sin embargo, en el estudio de cargas de la optimización topológica no es necesario especificar estas fuerzas, ya que el software las computará automáticamente al especificar que estas uniones son elementos fijos.

La figura 27 muestra cómo queda el estudio de cargas previo a la optimización topológica. Se aprecia en rojo la especificación para que se preserven los agujeros para insertar los clips de retención de las pastillas; en fucsia la especificación de elementos fijados para la unión atornillada de la pinza a la mangueta y, en verde, las cargas aplicadas de fuerza y presión.

Por otro lado, este estudio de cargas será el mismo que se aplique para evaluar las diferentes iteraciones mediante simulación de elementos finitos.

Definido este espacio base, con una masa total de 1,563 kg se procede a la optimización topológica para obtener una primera iteración, que será presentada en el capítulo de resultados.

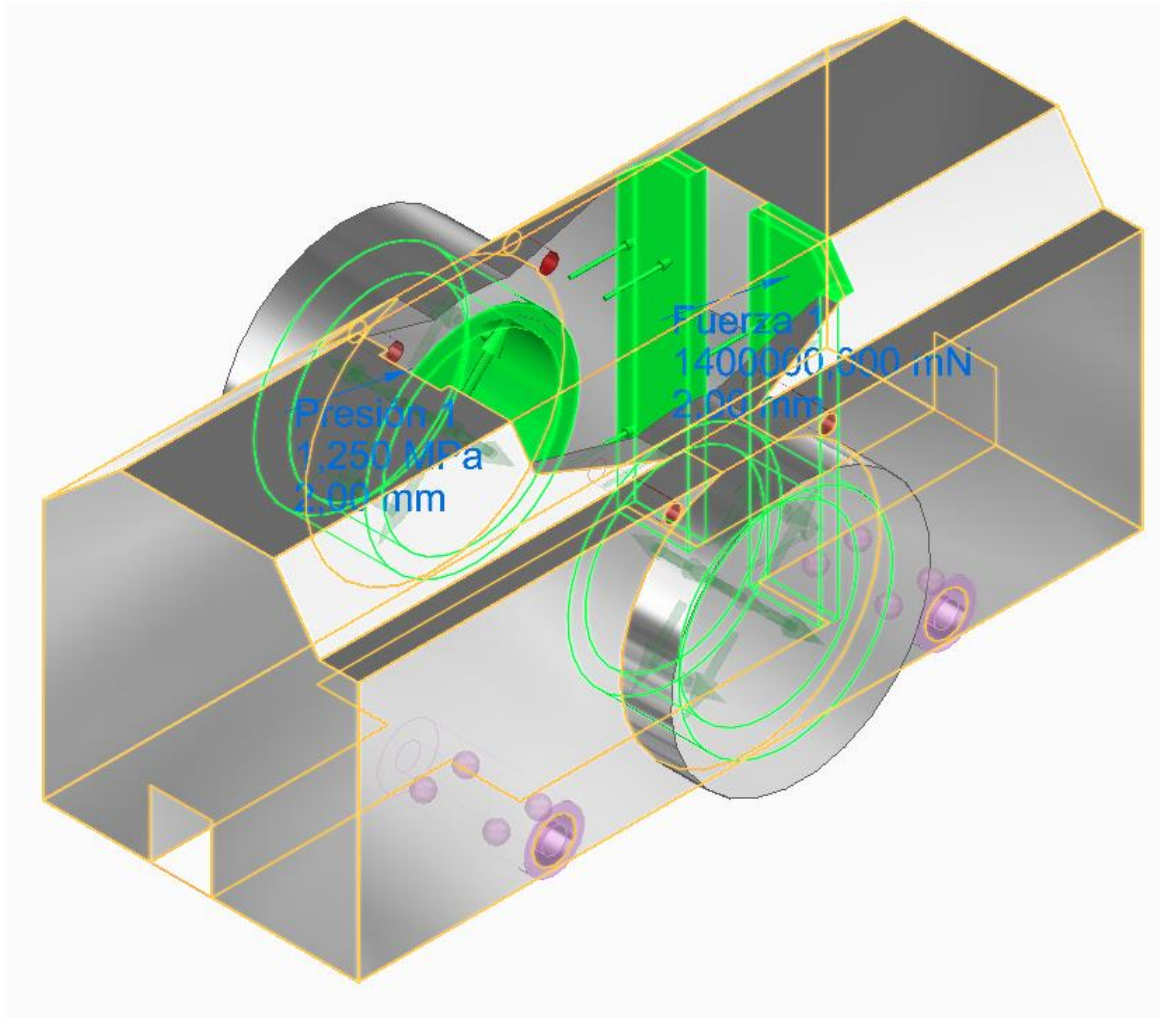


Figura 27. Espacio base con estado de cargas aplicado. Fuente: elaboración propia

4.5. Metodología de diseño para impresión 3D

Aunque se ha diseñado el espacio base con un criterio de optimización topológica para que el software pueda trabajar sobre él en las distintas iteraciones, será importante considerar el método de fabricación aditiva para el que se quiere diseñar la pieza.

Ya que se pretende que la pinza de freno sea funcional, la única manera de fabricarla es en el metal elegido, AlSi₁₀Mg. La tecnología de fabricación aditiva válida para obtener piezas en este material es el Sinterizado Directo de Metal por Láser (DMLS) o fusión de lecho en polvo,

explicado en el capítulo del estado de la cuestión, mediante el que se compacta el metal en polvo con un láser sobre una plataforma descendiente, obteniendo la pieza. Esta tecnología tiene sus propias limitaciones e indicaciones para maximizar la calidad de sus resultados, y son los que se deben tener en cuenta a la hora de retocar la iteración de la optimización topológica elegida para ser la pieza final.

Los fabricantes Xometry [46] y Solid Concepts [47] ofrecen guías de los aspectos más importantes a tener en cuenta:

- Acabado superficial 8,75 μm sin procesado posterior
- Distancia mínima de 0,4 mm – 0,5 mm entre partes diferentes de la pieza para evitar que se fusionen
- Ángulos menores de 30º respecto a la horizontal necesitarán apoyos
- Ángulos de entre 30º y 45º respecto a la horizontal pueden no necesitar apoyos, pero tendrán un acabado grueso
- Utilizar chaflanes y redondeamientos para reducir las esquinas
- Implementar características para reducir el peso y el volumen necesario en el diseño
- Precisión de 20 a 150 μm en características positivas (salientes)
- Características en negativo estarán infra dimensionadas en un rango de 100 a 150 μm
- Las piezas obtenidas por DMLS necesitan un post procesado para eliminar los apoyos y/o mejorar el acabado superficial

Los más importantes en la realización de la pinza son los soportes, ya que según la dirección de impresión serán más o menos necesarios, así como la distancia mínima entre partes, que puede tener mucha relevancia si la pieza obtenida por optimización es muy compleja.

5. Resultados

5.1. Pieza base 1

Para tener una referencia de esfuerzos internos, se ha realizado un análisis FEM sobre la pieza base 1, cuyo resultado se presenta en la figura 28. La tensión máxima se encuentra en las uniones para atornillar, con un valor inferior a los 23 MPa, muy inferiores al límite elástico de 190 MPa que tiene el material, que es la restricción de diseño que se tiene que cumplir en este análisis. Conocido este resultado, se procede a la primera iteración de diseño generativo con esta pieza base. La figura 29 especifica los parámetros para esta iteración, que se presenta en las figuras 30 y 31.

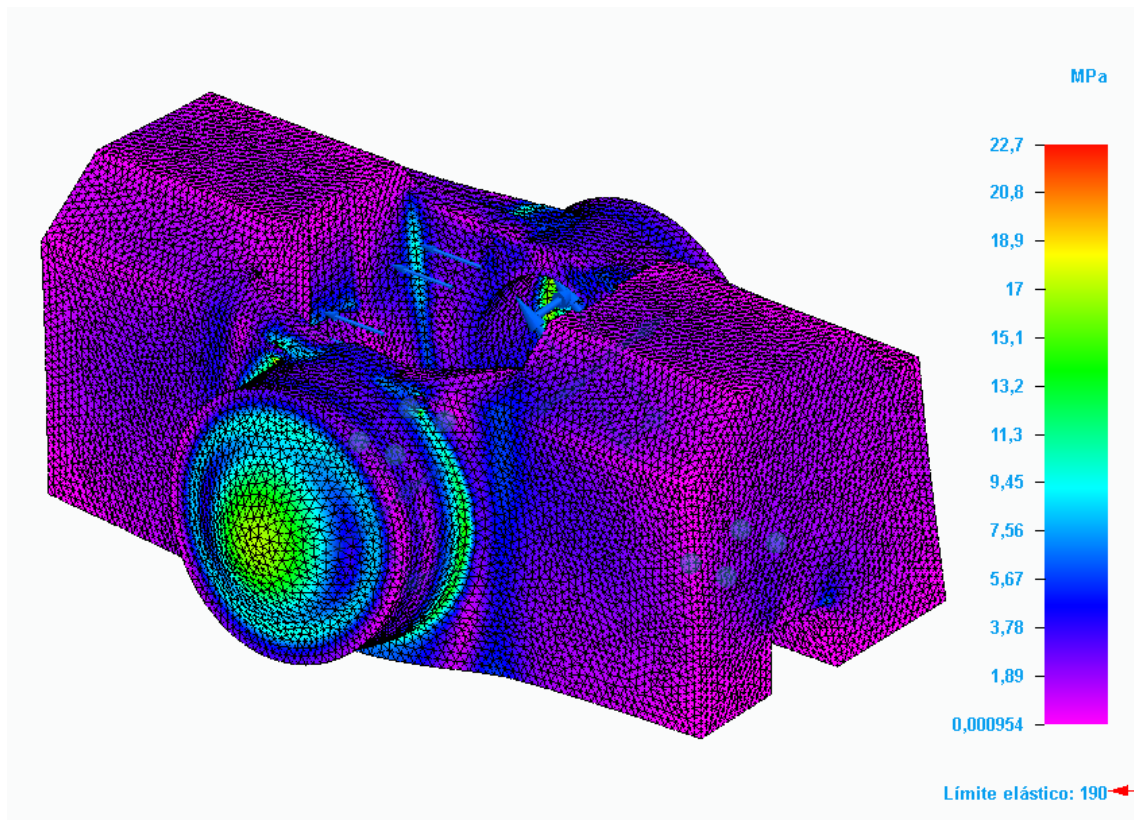


Figura 28. Simulación FEM sobre la pieza base. Fuente: elaboración propia

La calidad se ha situado para un tamaño de vóxel -la definición de un píxel en tres dimensiones- de 1 mm, lo que supone una resolución de nivel medio-alto en la optimización. El porcentaje de reducción de masa se coloca en torno al 70%, para lograr un peso final de 0,547 kg.

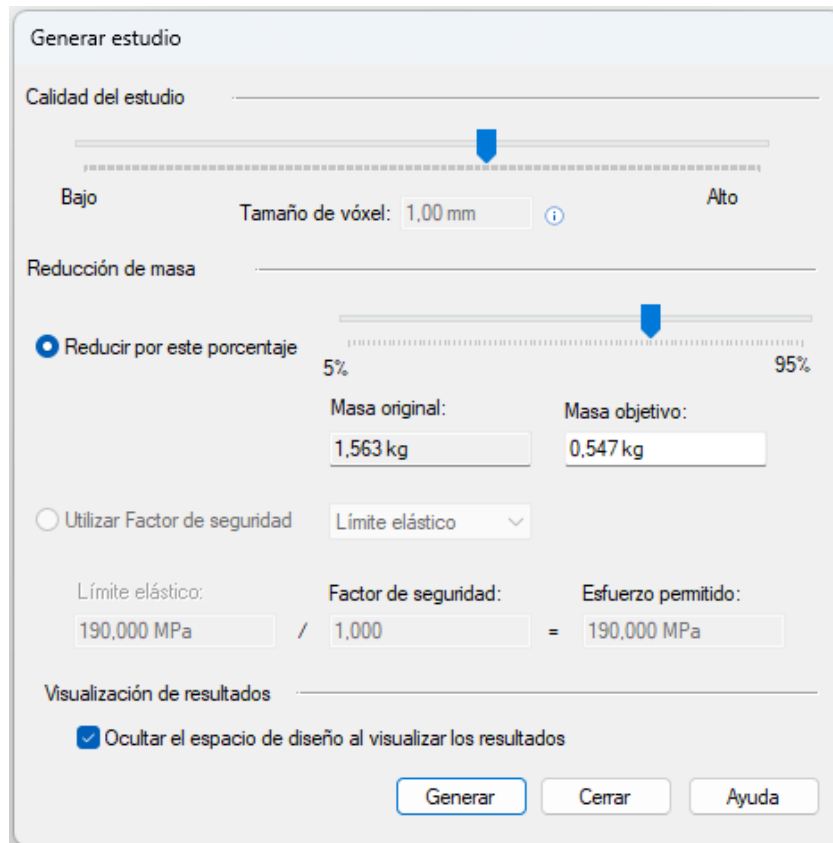


Figura 29. Parámetros de iteración 1. Fuente: elaboración propia

La geometría obtenida en esta optimización, pese a ser muy compleja, es satisfactoria, ya que cumple con casi todos los requisitos espaciales. Sin embargo, los agujeros para los clips de las pastillas no quedan correctamente definidos, como se señala en rojo.

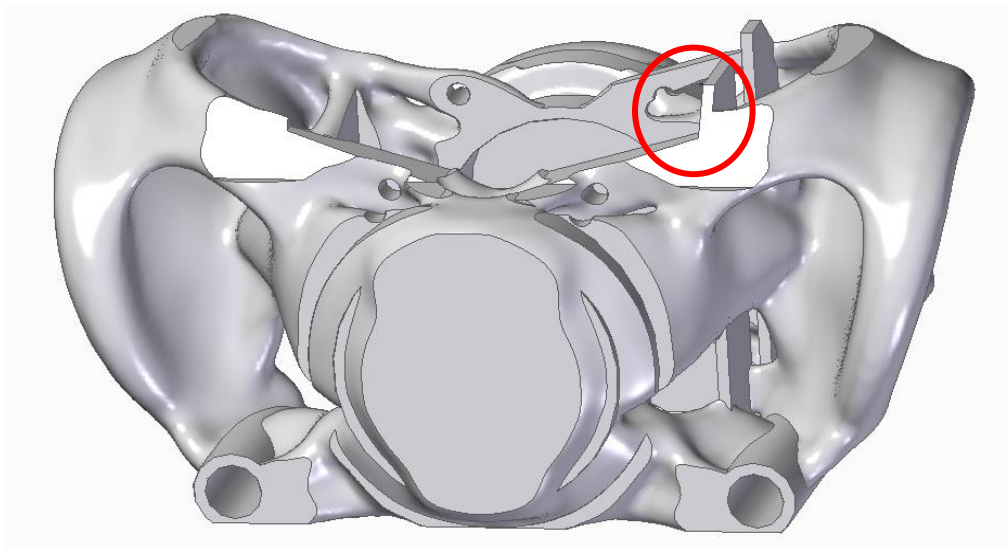


Figura 30. Alzado de la iteración 1. Fuente: elaboración propia

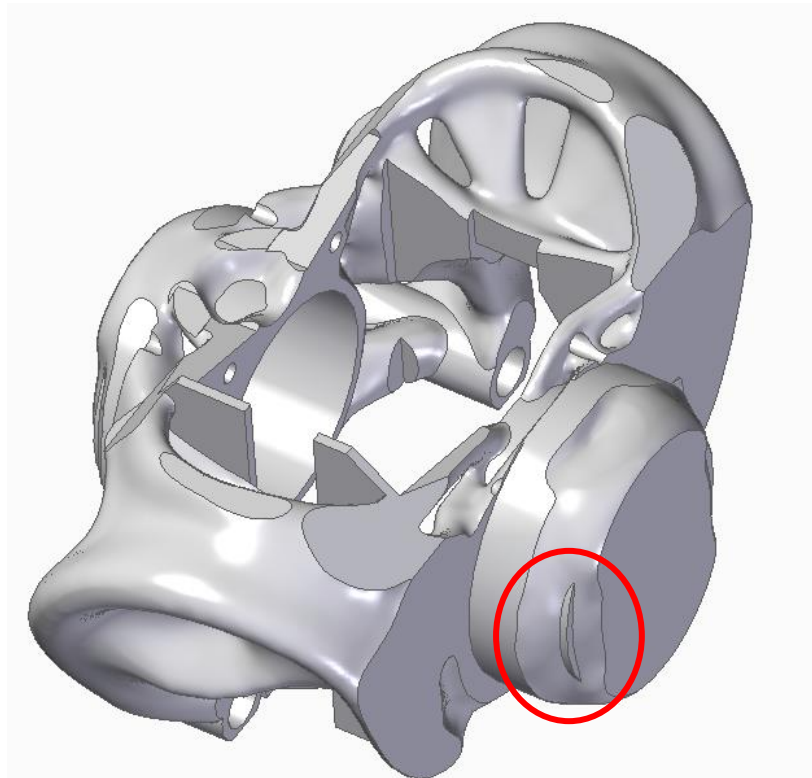


Figura 31. Vista de la iteración 1. Fuente: elaboración propia

Por otro lado, la cara externa de los cilindros se ve muy reducida, llegando a traspasar incluso la cara interna, lo que supone un error. En cuanto a la geometría general, hay demasiados huecos y ángulos 'orgánicos' que harían imposible la impresión en 3D metálica.

Quedando esta iteración descartada, las siguientes iteraciones de este primer bloque, presentadas en las figuras 32 y 33, variaban en diferentes formas de uso de la opción de 'preservar geometría', para tratar de evitar los errores geométricos mencionados, sin éxito.

En la iteración de la figura 32, con la masa reducida a 0,226 kg, se presenta una geometría altamente compleja, con los agujeros para los clips totalmente disjuntos en algún caso, y los cilindros exteriores totalmente deformados.

En la iteración de la figura 33, se intentó forzar a la optimización a dar más consistencia en las zonas que unen ambos cilindros mediante la preservación forzada de los pasos del disco de freno, dando lugar a una geometría aún más compleja y asimétrica, algo que se ha de evitar para conseguir una pinza de freno que pueda funcionar a cualquier lado del eje. La reducción de masa en este caso fue del 80%, con un peso final de 0,327 kg.

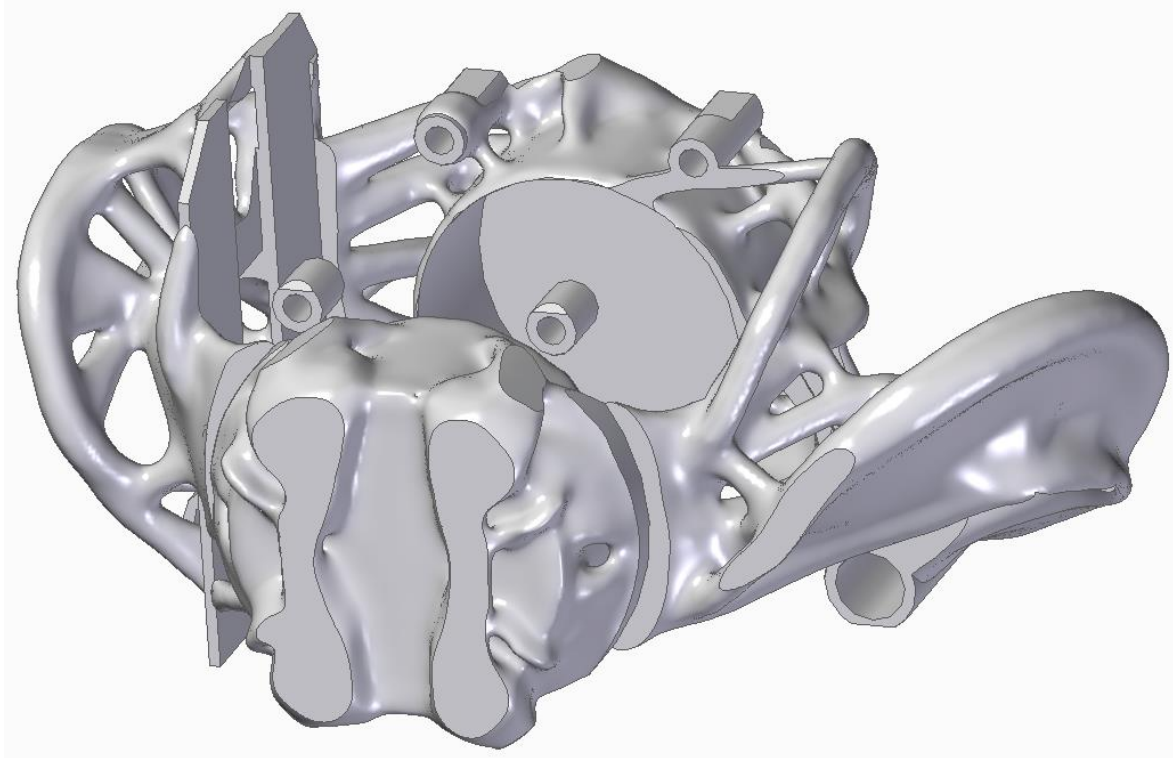


Figura 32. Vista de iteración fallida A. Fuente: elaboración propia

A partir de este punto se hace evidente que es necesario establecer una simetría en el diseño generativo, de manera que la optimización quede nivelada a ambos lados de un plano que cruza los dos cilindros en su diámetro vertical.

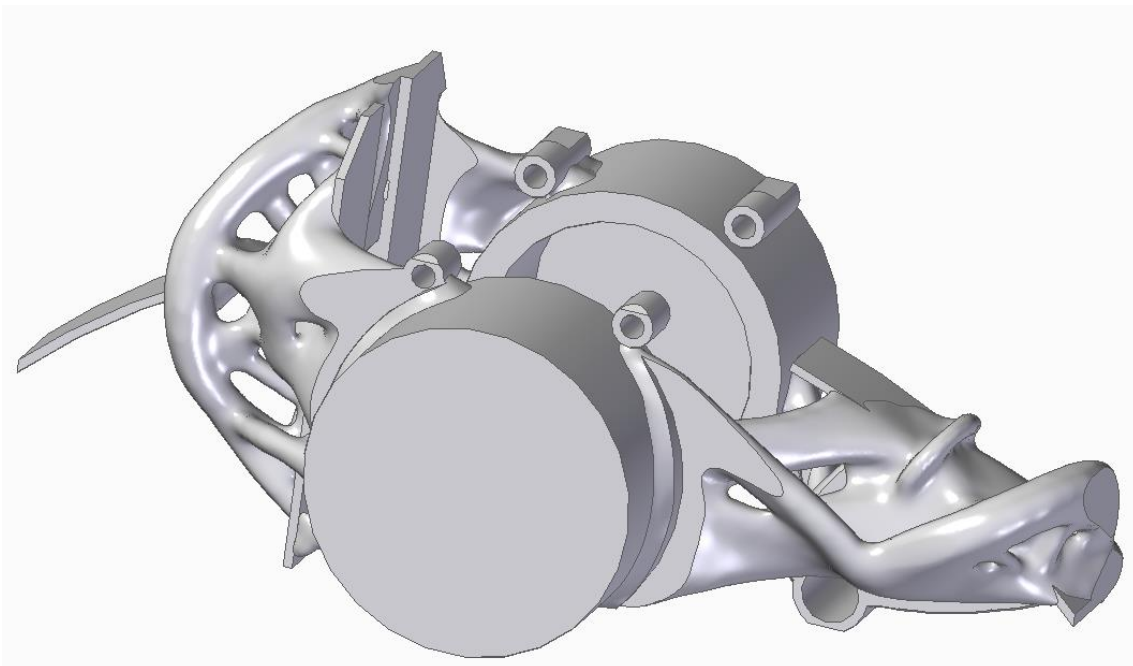
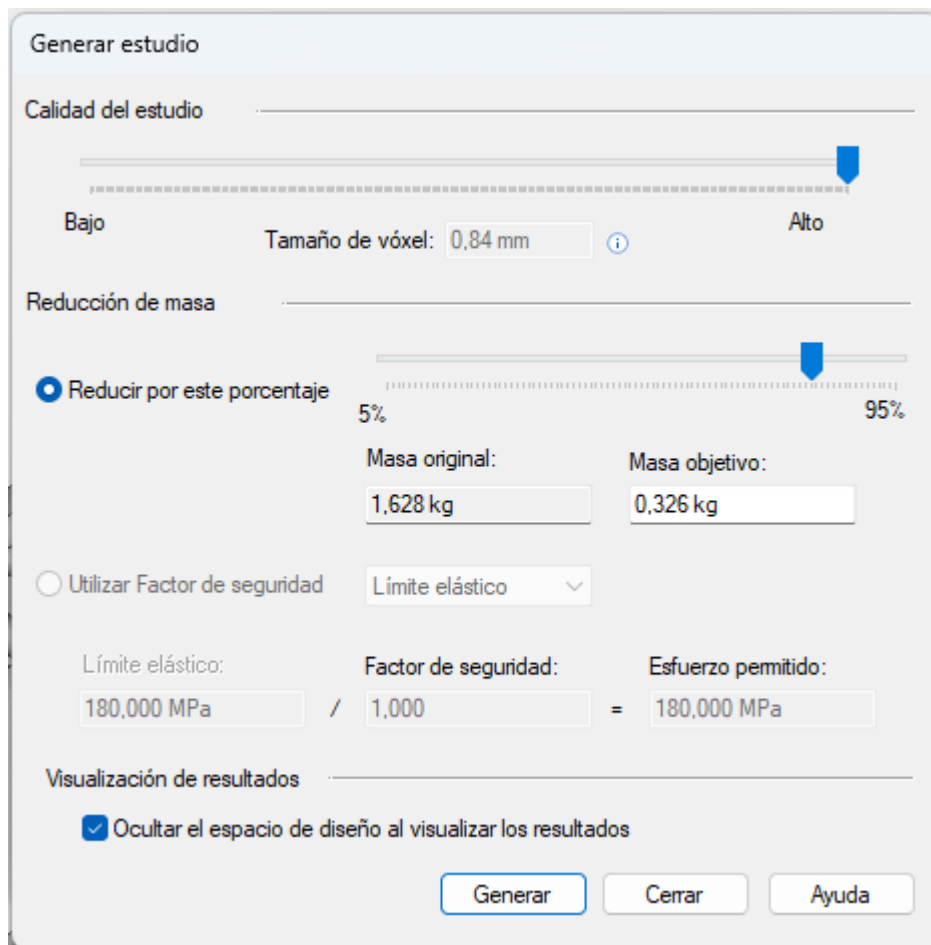


Figura 33. Vista de iteración fallida B. Fuente: elaboración propia

En el segundo bloque de iteraciones, aplicando nuevas condiciones, se obtuvieron mejoras consistentes. Los parámetros de optimización para estas iteraciones se muestran en la figura 34.



Generar estudio

Calidad del estudio

Bajo Alto

Tamaño de vóxel: 0,84 mm

Reducción de masa

Reducir por este porcentaje

5% 95%

Masa original: 1,628 kg

Masa objetivo: 0,326 kg

Utilizar Factor de seguridad

Límite elástico

Límite elástico: 180,000 MPa / Factor de seguridad: 1,000 = Esfuerzo permitido: 180,000 MPa

Visualización de resultados

Ocultar el espacio de diseño al visualizar los resultados

Generar Cerrar Ayuda

Figura 34. Parámetros de segundo bloque de iteraciones. Fuente: elaboración propia

A partir de este bloque se busca la máxima calidad del estudio -con el consecuente mínimo tamaño de vóxel: 0,84 mm-, y se varía la reducción de peso en torno al 80%. Se asume, por tanto, el riesgo de obtener geometrías demasiado complejas, con la intención de lograr una masa muy reducida. Ejemplos de este bloque de iteraciones se presentan en las siguientes figuras. Tras

mejorar esta primera iteración fallida A, se eligieron diferentes superficies para forzar el preservado.

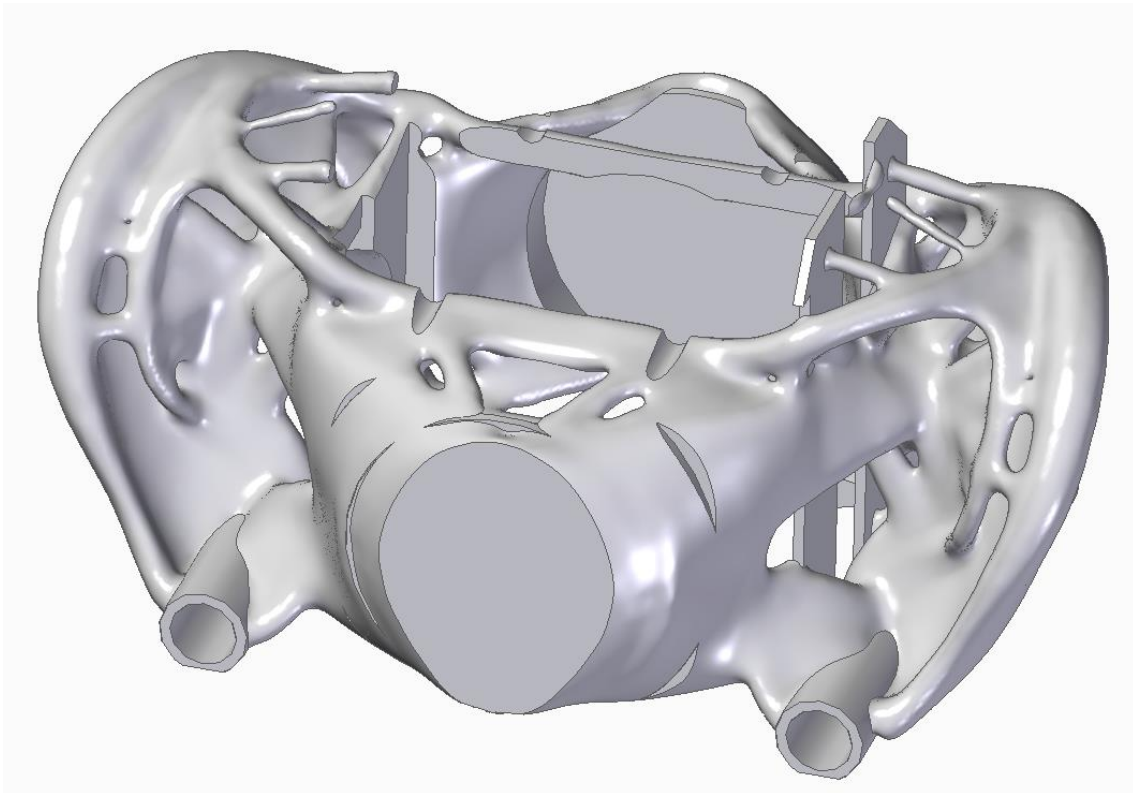


Figura 35. Iteración fallida A del segundo bloque. Fuente: elaboración propia

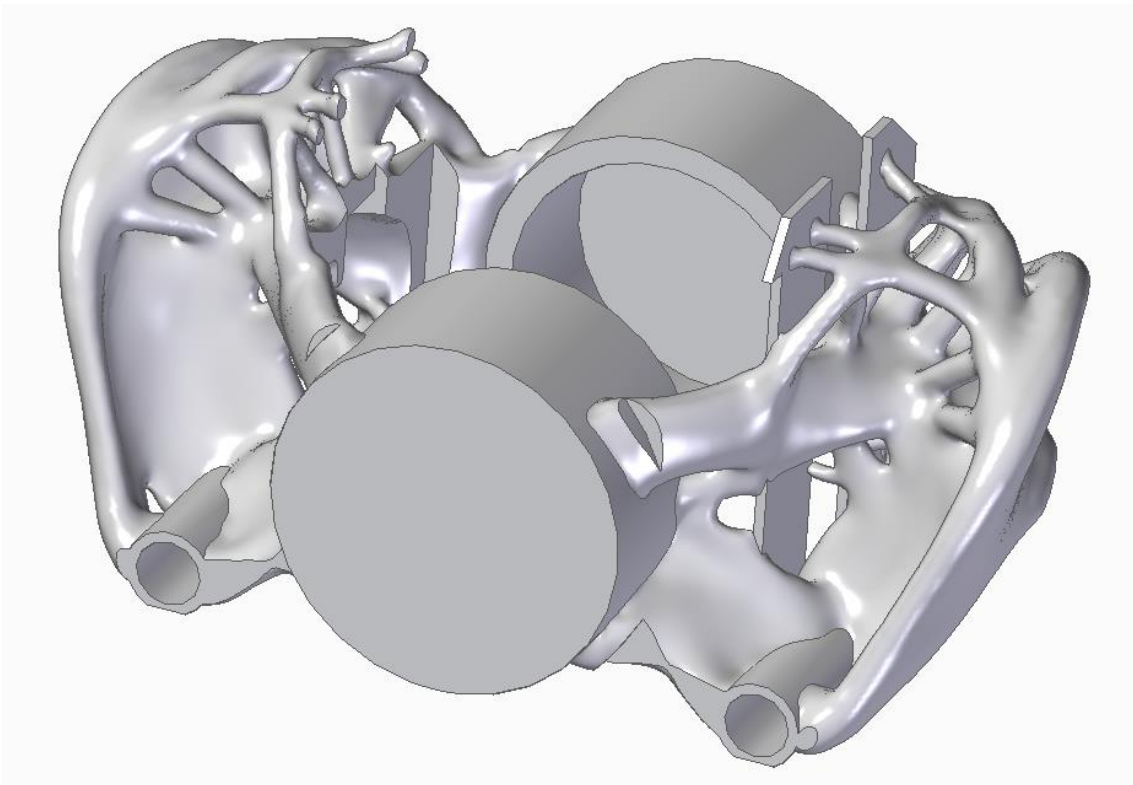


Figura 36. Iteración fallida B del segundo bloque. Fuente: elaboración propia

En la figura 36 se observa cómo, de nuevo con geometrías altamente complejas pero muy eficientes, se produce una mejora ya que los cilindros y los agujeros para la unión a la mangueta quedan definidos correctamente.

Sin embargo, las paredes guía de las pastillas sobre las que no se aplica fuerza desaparecen, al igual que los agujeros para los clips. En esta ocasión -iteración B del segundo bloque- la masa final fue de 0,318 kg.

5.2. Pieza base 2

Con lo aprendido en las múltiples variantes obtenidas de los dos primeros bloques de iteraciones, se refina la pieza base, obteniendo la segunda versión presentada en las figuras 37, 38 y 39, con las dimensiones en milímetros.

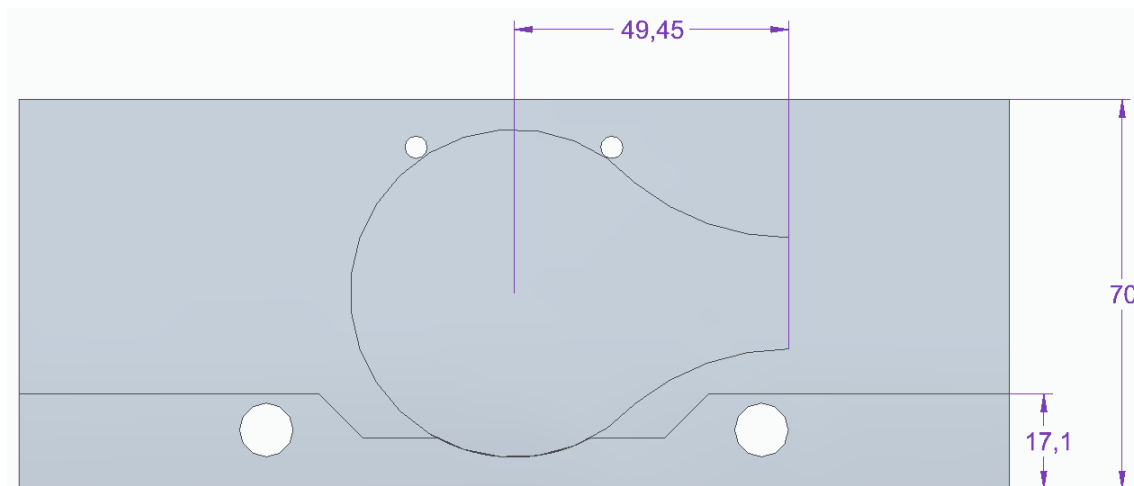


Figura 37. Alzado de la pieza base 2. Fuente: elaboración propia

Se ha añadido una extrusión a cada uno de los cilindros, con la función de albergar un agujero roscado donde atornillar el latiguillo que comunica la presión del líquido de frenos a los cilindros. Asimismo, se ha reducido material de la zona inferior del frontal, ya que esta franja sólo es necesaria en la parte posterior para los agujeros de unión a la mangueta, y se ha reducido la complejidad en la zona superior, que antes constaba con chaflanes que imitaban la forma de la pinza comercial CP2577. Ahora se produce un perfil totalmente rectangular del espacio base, con el fin de facilitar la optimización.

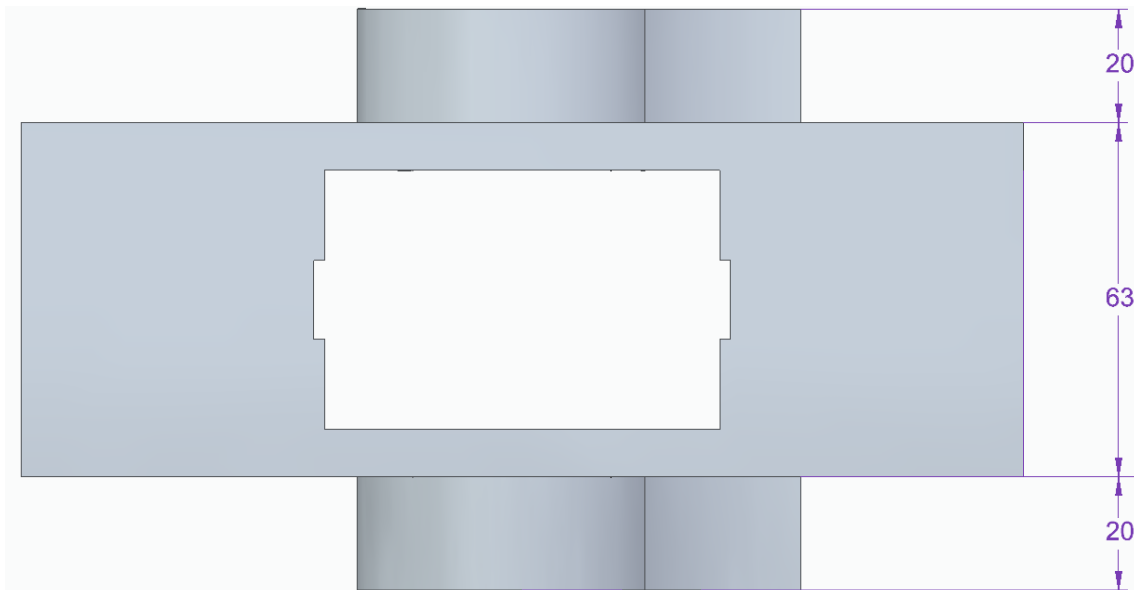


Figura 38. Planta de la pieza base 2. Fuente: elaboración propia

Además, se ha otorgado a la pieza de una geometría simétrica longitudinalmente, para que la extrusión de los cilindros desde la cara externa del cuerpo de la pinza tenga la misma longitud.

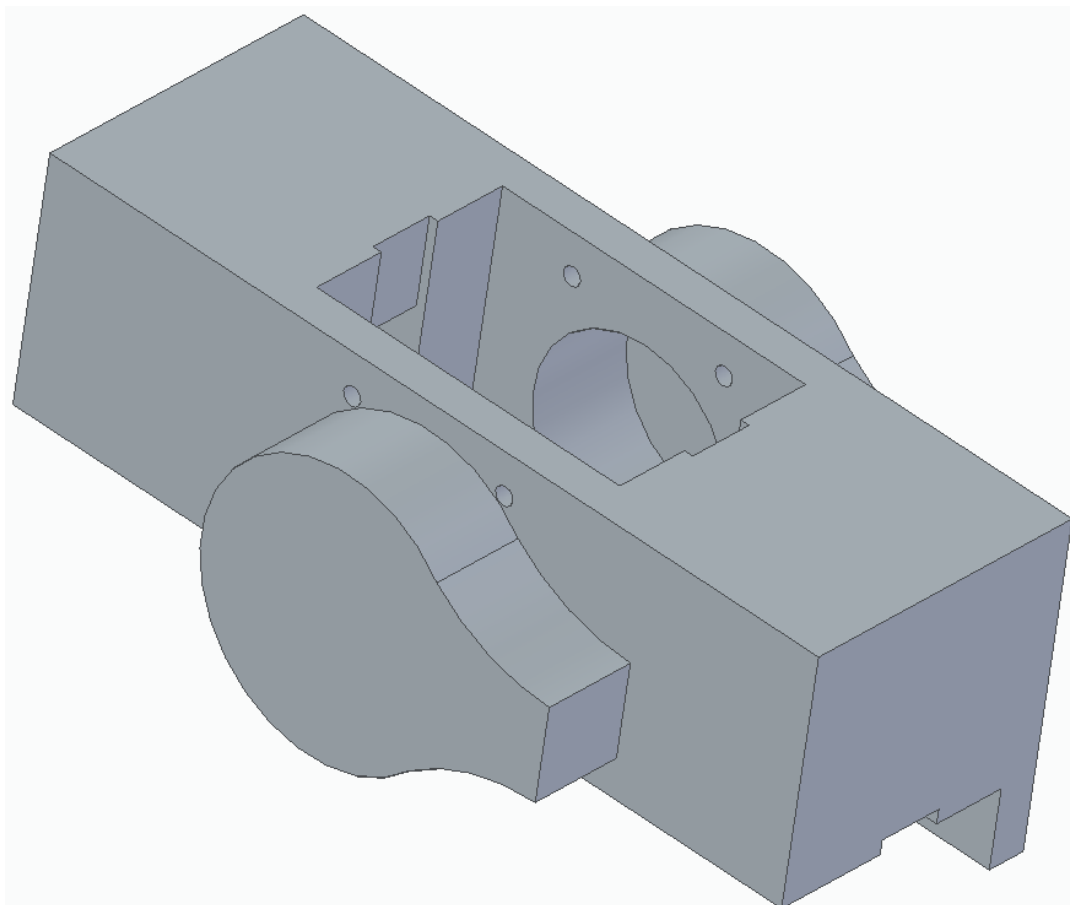


Figura 39. Vista de la pieza base 2. Fuente: elaboración propia

La pieza base 2 cuenta con un peso de 1,232 kg, algo superior a la masa de la pinza comercial de 1,1 kg.

De igual manera que con la pieza base 1, se ejecuta un análisis de elementos finitos sobre la pieza base 2 para tenerla como referencia. Tras el mallado -con tamaño subjetivo de 4,26 mm- los resultados del análisis se adjuntan en la figura 40:

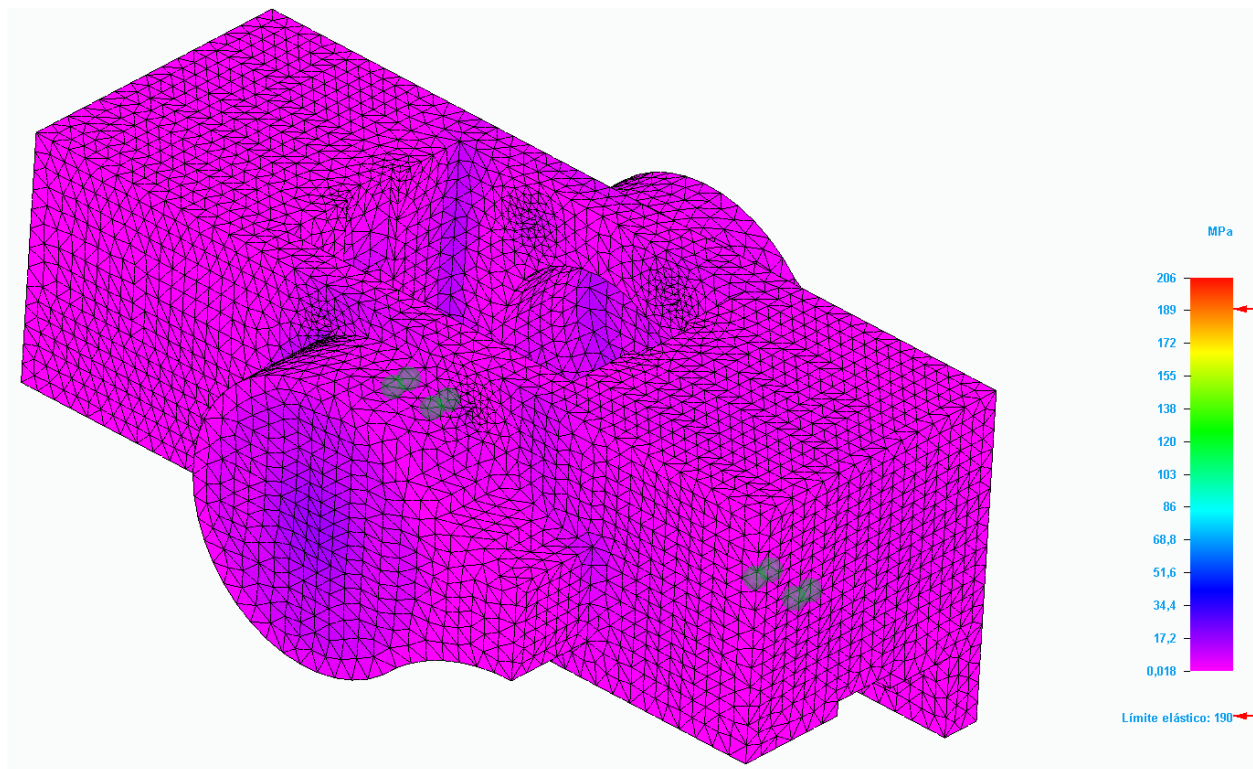


Figura 40. Simulación FEM de la pieza base 2. Fuente: elaboración propia

Pese a que se encuentran valores mayores al límite elástico, estas se encuentran en zonas microscópicas de aristas y pueden ser despreciables al no superar el límite elástico más que en un 8%, quedando muy por debajo de la tensión de rotura. En general, los esfuerzos internos son suficientemente pequeños para dar la pieza base como válida frente a las cargas.

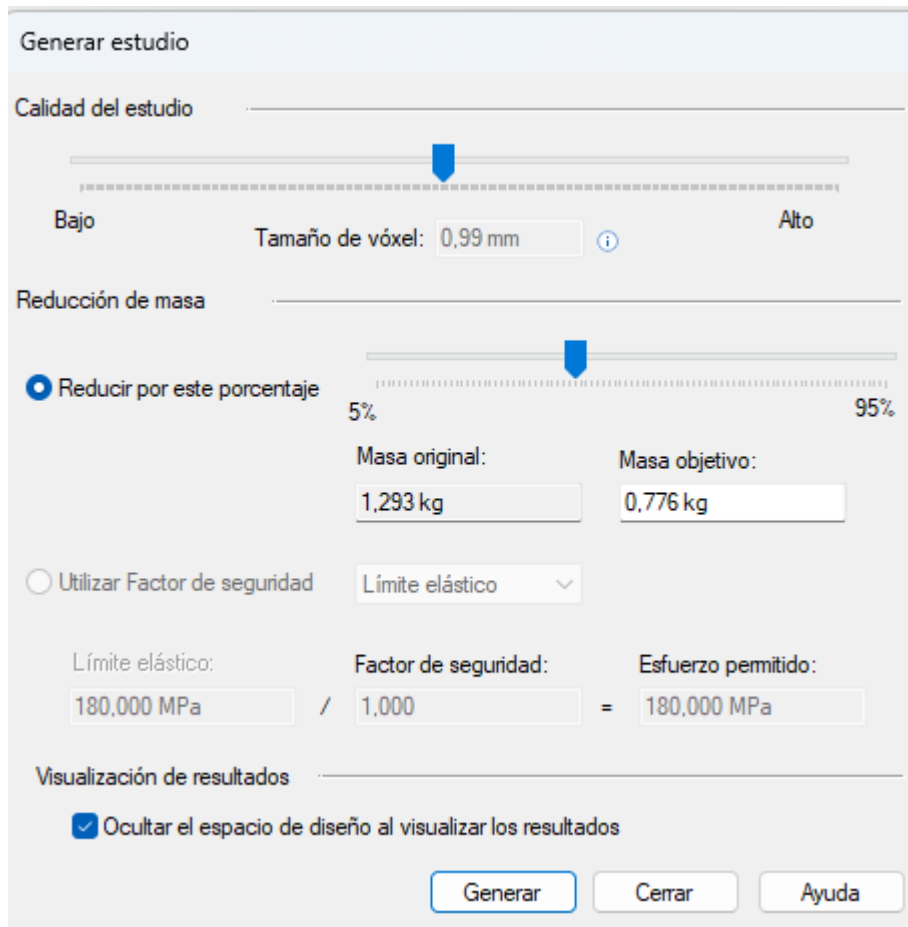
A partir de la pieza base 2, para las optimizaciones se utilizan las mismas regiones preservadas que en la pieza base 1, además de la simetría que también se aplicaba antes.

Para reducir la complejidad geométrica en los resultados, se añade la opción de ajustes de fabricación por impresión 3D del módulo de fabricación, que facilita el diseño de la pieza en base a una dirección de extrusión.

La dirección de extrusión se ha definido teniendo en cuenta, principalmente, dónde es necesaria una mayor calidad de acabado superficial, ya que se podría producir escalonamiento si se elige

una dirección paralela a la dirección de extrusión. Estas zonas que requieren mayor suavidad superficial son los cilindros, por lo que se elige la dirección de extrusión perpendicular a su diámetro, de manera que, al imprimir la pieza, el extrusor trace círculos con tolerancias mínimas, y las diferentes capas no produzcan el mencionado escalonado.

Con estas prescripciones, se obtiene un tercer bloque de iteraciones, siguiendo los parámetros indicados en la figura 41.



Generar estudio

Calidad del estudio

Bajo Tamaño de vóxel: 0,99 mm Alto

Reducción de masa

Reducir por este porcentaje 5% 95%

Masa original: 1,293 kg Masa objetivo: 0,776 kg

Utilizar Factor de seguridad Limite elástico

Limite elástico: 180,000 MPa / Factor de seguridad: 1,000 = Esfuerzo permitido: 180,000 MPa

Visualización de resultados

Ocultar el espacio de diseño al visualizar los resultados

Generar Cerrar Ayuda

Figura 41. Parámetros de optimización del tercer bloque. Fuente: elaboración propia

Se ha tratado de conseguir una menor reducción de masa a fin de obtener una geometría más sólida, obteniendo los resultados de la figura 42.

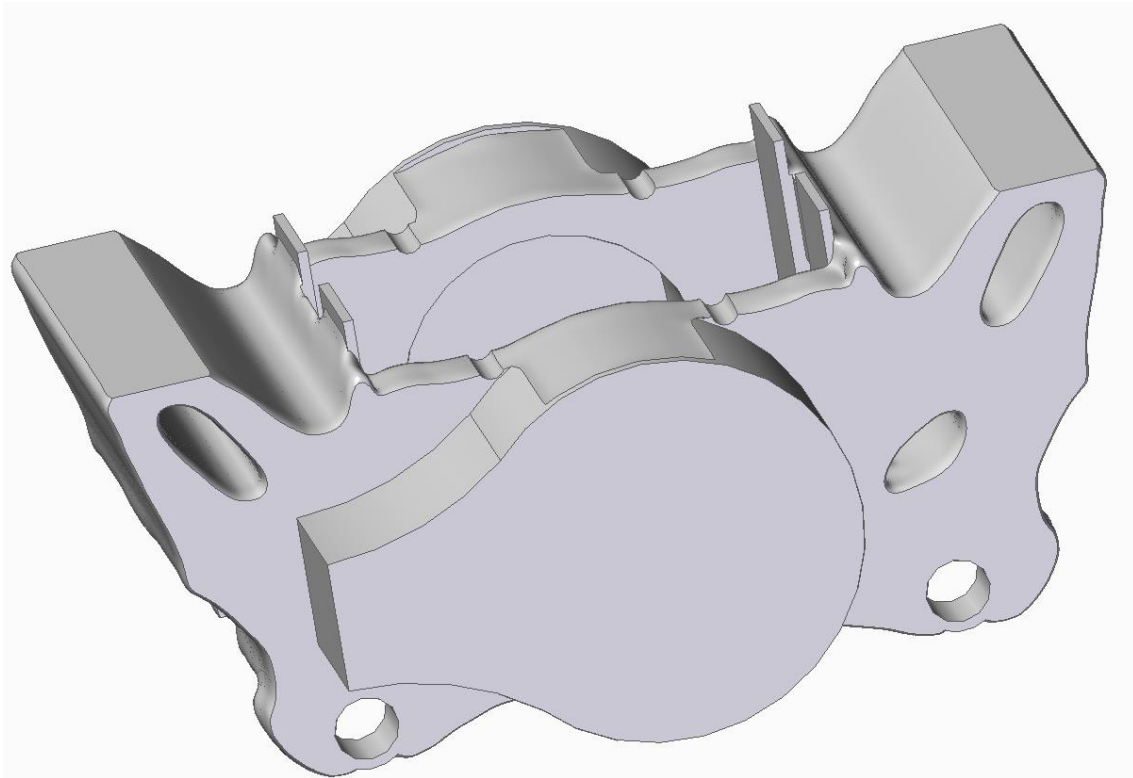


Figura 42. Vista de la iteración del tercer bloque

El resultado es satisfactorio. Los cilindros y las extrusiones para los latiguillos se mantienen con suficiente integridad, al igual que las guías para las pastillas y los agujeros de unión a la mangueta. Sin embargo, los agujeros para los clips de las pastillas siguen desapareciendo completamente.

La masa final de esta optimización es de 0,729 kg, una reducción menor que las anteriores iteraciones, razón por la que la geometría acaba siendo más completa.

Otras iteraciones de este bloque se muestran en las siguientes figuras.

En el resultado de la figura 43 se observa cómo una mayor reducción de masa -del 80%, hasta bajar de los 300 g- provoca la eliminación por completo de los clips, una vez más, así como la

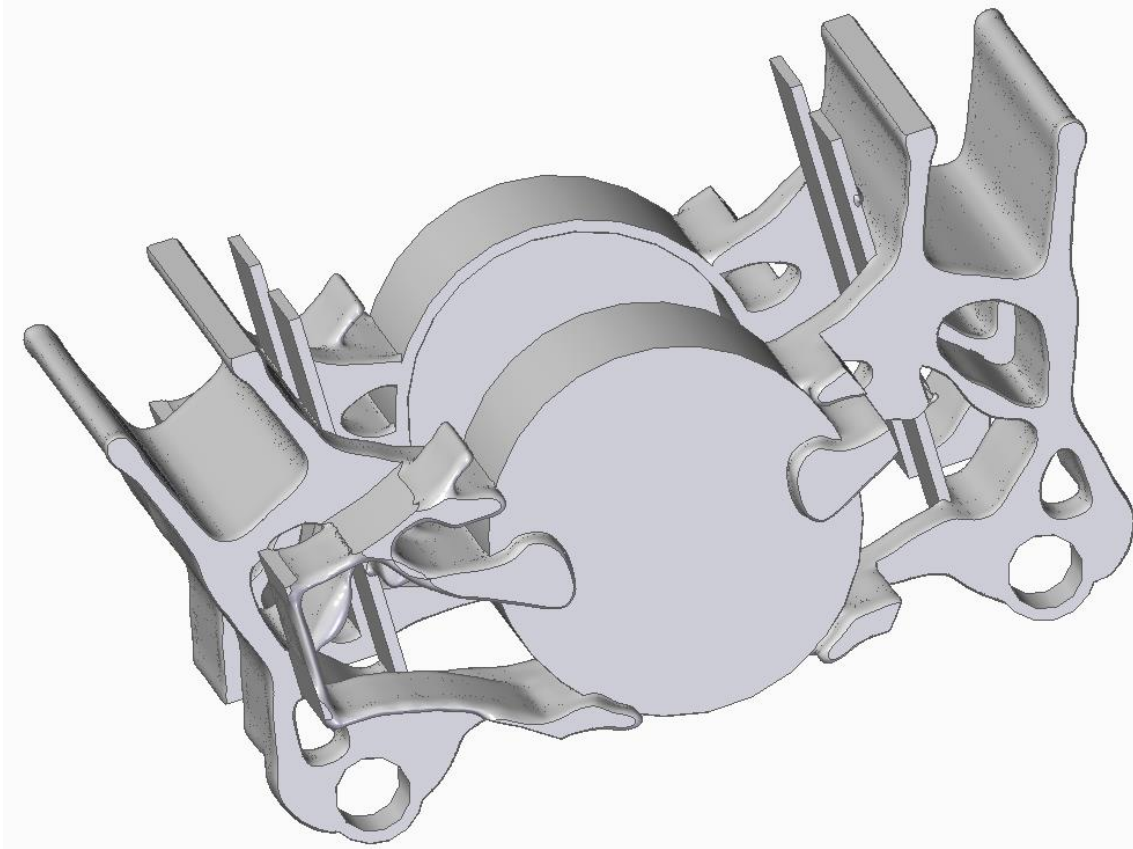


Figura 43. Iteración fallida A del tercer bloque. Fuente: elaboración propia

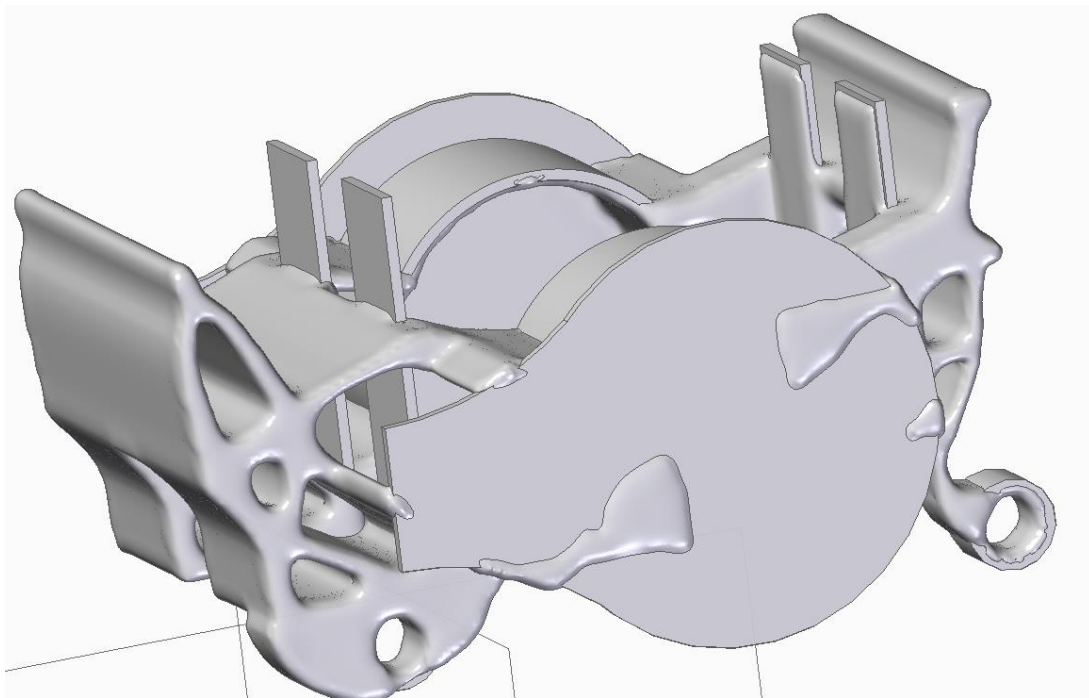


Figura 44. Iteración fallida B del tercer bloque. Fuente: elaboración propia

extrusión para la unión con el latiguillo. La estructura general, aun así, se mantiene válida, con las uniones de la mangueta.

En la iteración B de este bloque, en la figura 44, conseguida cambiando las zonas preservadas, se pierde por completo la simetría, y se desfigura toda la estructura, no siendo válida ninguna parte, pese a que se consigue una reducción de masa menor que en la iteración de la figura 32.

5.3. Pieza base 3.

Continuando con la mejora del espacio de optimización base, se toma la pieza base 2 y se eliminan las extrusiones para la unión de los latiguillos. Ya que la optimización sólo se complica con estos elementos, siendo eliminados en la mayoría de las iteraciones, la pieza base 3 no los tiene en cuenta. Tras obtener una optimización válida, se añadirán manualmente al resultado.

Para intentar forzar el mantenimiento de los agujeros de los clips, se añaden extrusiones integradas en los cilindros exteriores.

También se han añadido redondeados en las esquinas superiores; en las iteraciones anteriores estas zonas siempre carecían de material, por lo que se mejora la velocidad de procesado de la optimización eliminando estas esquinas, que a su vez otorgan a la pieza base un parecido mayor con la pinza comercial CP2577.

Por otro lado, se ha conseguido que la masa de esta pieza base 3, representada en las figuras 45, 46 y 47, sea de 1,05 kg, lo que la hace tener una masa equivalente a la pinza comercial

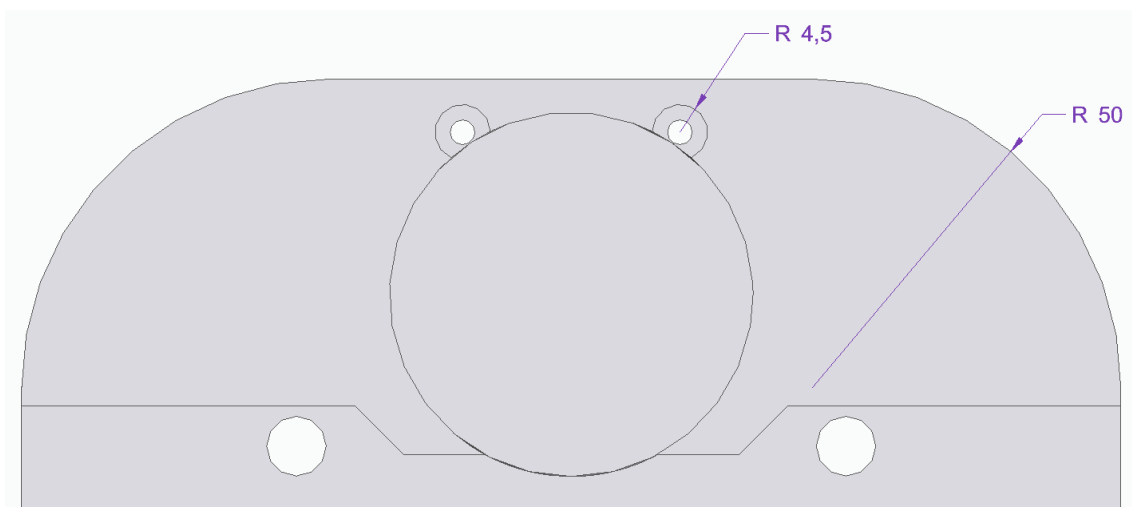


Figura 45. Alzado de la pieza base 3. Fuente: elaboración propia

CP2577 -1,10 kg según las especificaciones del fabricante- que facilitará la comparación de ahorro de masa en las optimizaciones.

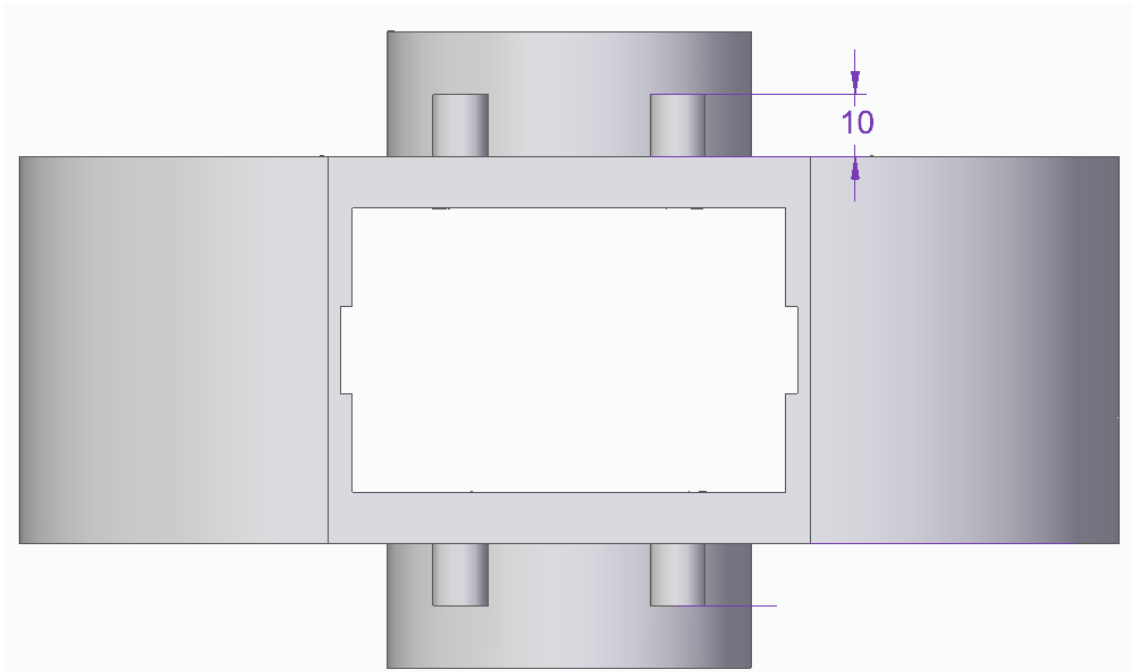


Figura 46. Planta de la pieza base 3. Fuente: elaboración propia

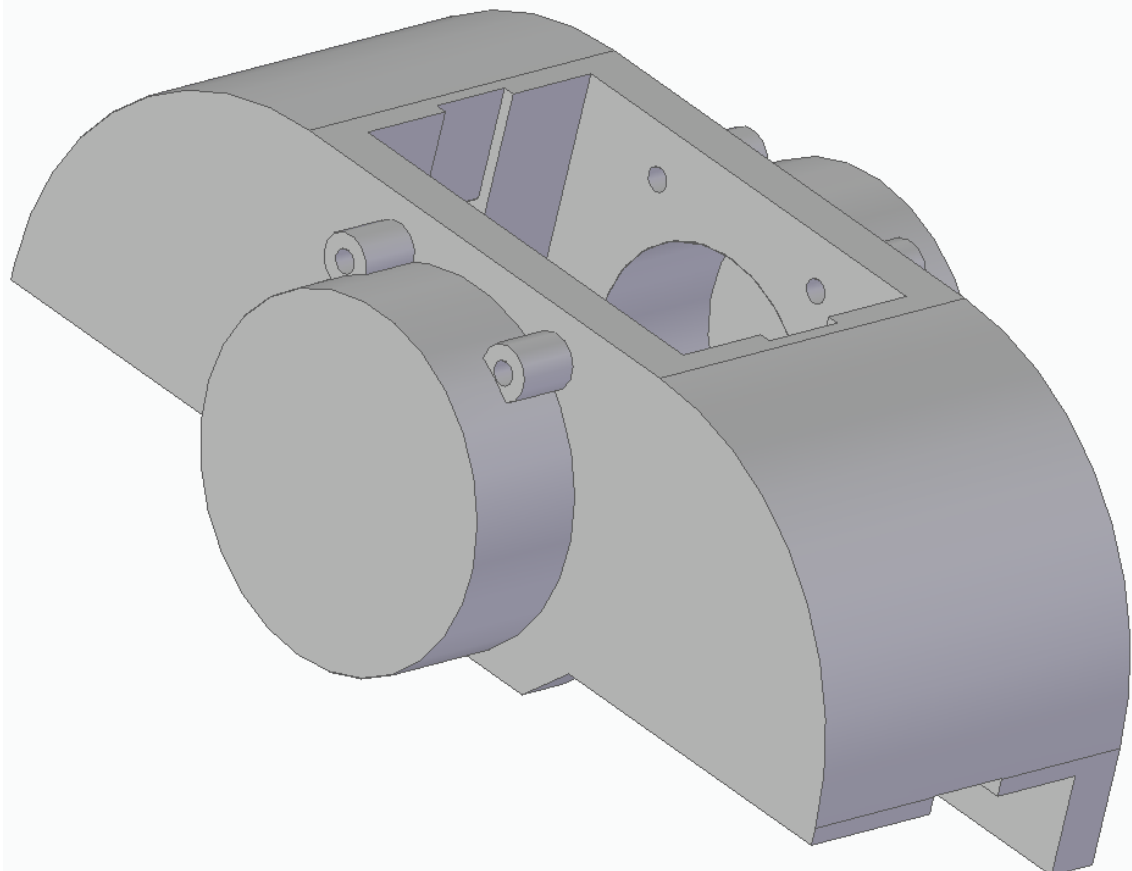


Figura 47. Vista de la pieza base 3. Fuente: elaboración propia

El análisis de elementos finitos de referencia se presenta en la figura 48.

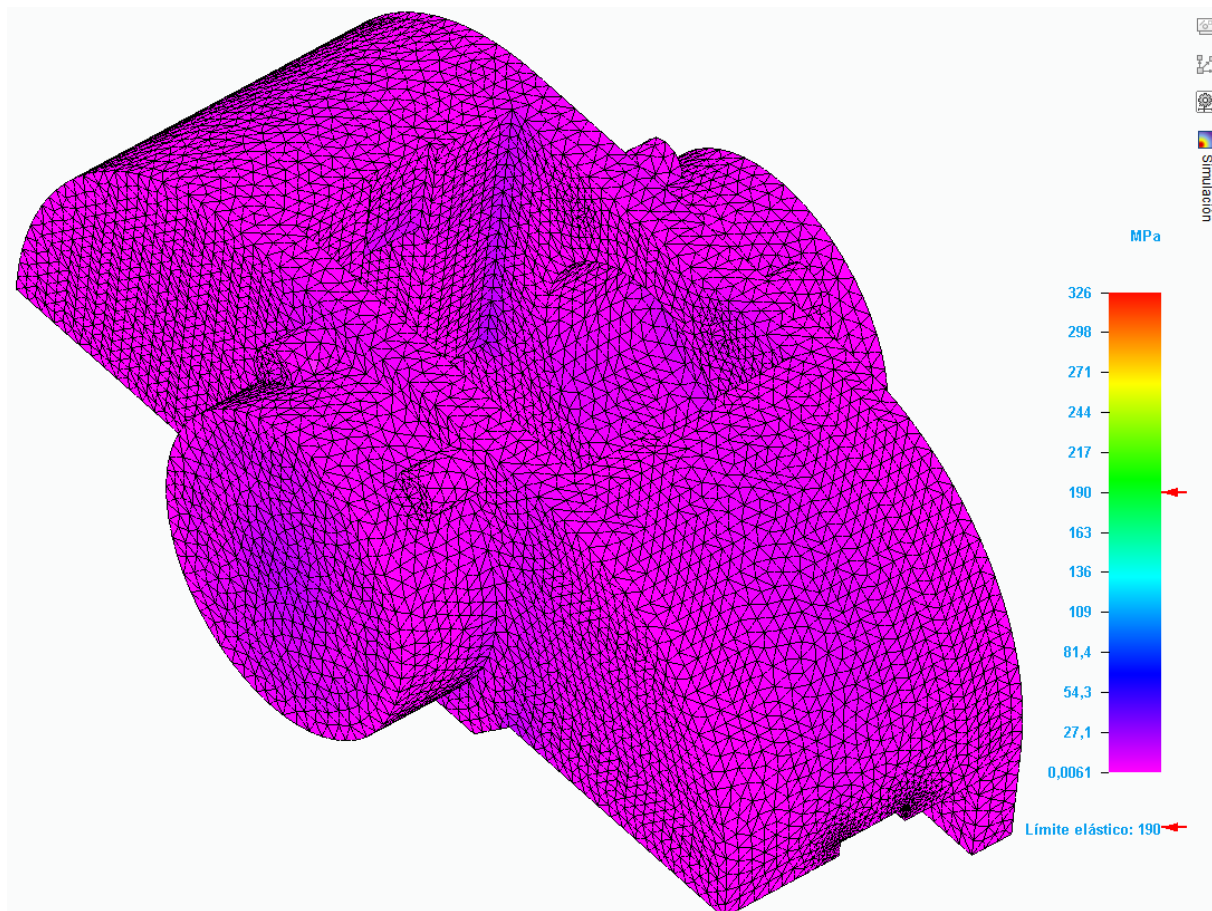


Figura 48. Análisis FEM de la pieza base 3. Fuente: elaboración propia

Con un tamaño de malla de 3,3 mm, las tensiones máximas obtenidas son de 326 MPa, de nuevo en zona microscópicas causadas por aristas. Estas zonas de tensiones superiores al límite elástico se suavizarán al introducir redondeados para la fabricación, por lo que no son considerados problemáticos. Por lo demás, las tensiones son admisibles.

En este cuarto bloque de iteraciones, preservando la unión de la mangueta, los cilindros, y los agujeros para los clips de las pastillas, se obtienen las siguientes optimizaciones:

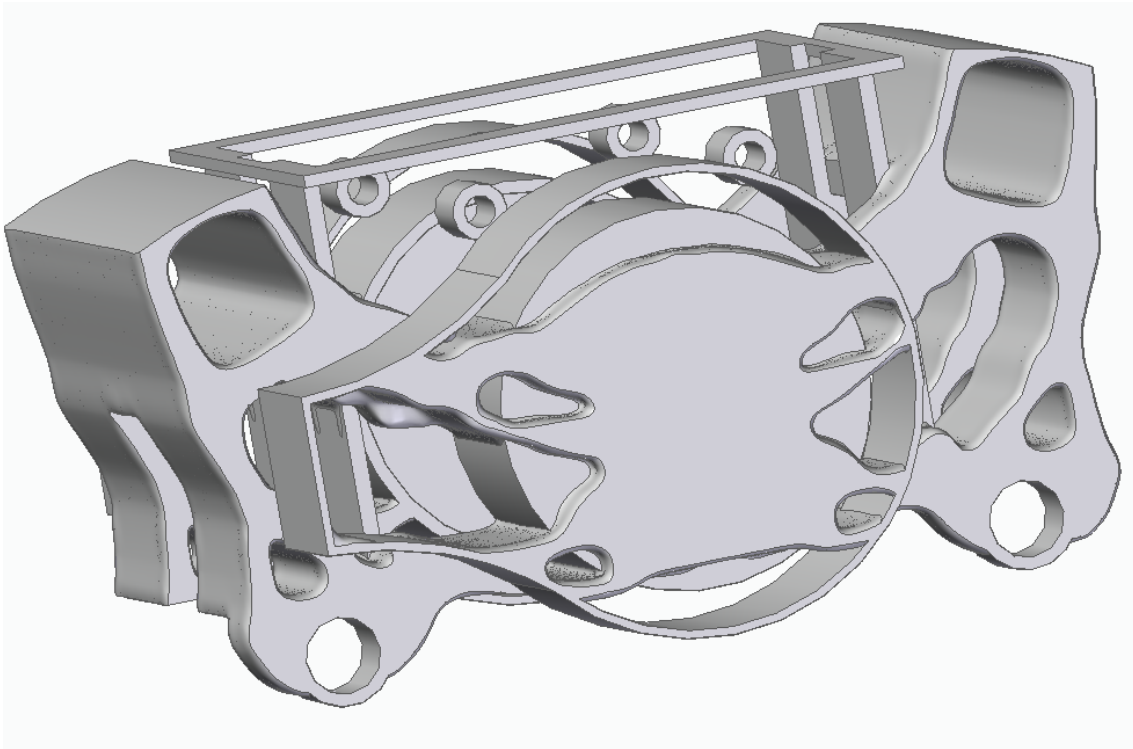


Figura 49. Iteración fallida del cuarto bloque. Fuente: elaboración propia

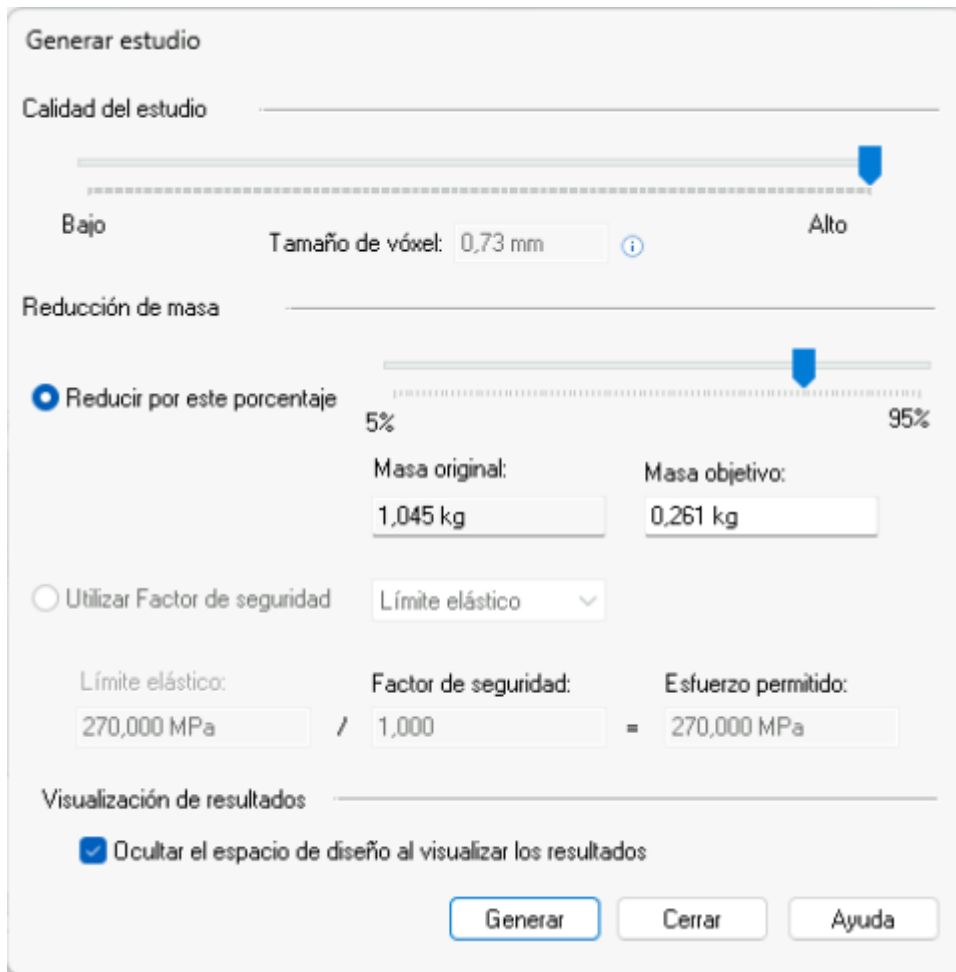
En la figura 49 se presenta una iteración con la extrusión para el latiguillo añadida, pero fallidamente. El cilindro en su parte exterior aparece desdibujado.

La parte superior se ha mantenido, con la intención de proporcionar más espacio a la optimización de forma que se mantuviesen los agujeros para los clips, pero el resultado es una lámina superior que une las guías para las pastillas que no cumple con ninguna función y cuya fabricación sería imposible.

Los agujeros de los clips quedan parcialmente disjuntos del cuerpo de la pinza, y el perfil del cilindro exterior queda en una lámina demasiado fina y parcialmente colgada, también imposible de fabricar.

Por contraparte, la estructura general es suficientemente sólida y la geometría sencilla de fabricar con impresión 3D.

Después de esta iteración se introdujeron los parámetros de la siguiente figura para obtener la iteración final considerada como válida para la mejora de la pinza de freno.



Generar estudio

Calidad del estudio

Bajo Alto

Tamaño de vóxel: 0,73 mm

Reducción de masa

Reducir por este porcentaje

5% 95%

Masa original: 1,045 kg

Masa objetivo: 0,261 kg

Utilizar Factor de seguridad

Límite elástico

Límite elástico: 270,000 MPa / Factor de seguridad: 1,000 = Esfuerzo permitido: 270,000 MPa

Visualización de resultados

Ocultar el espacio de diseño al visualizar los resultados

Generar Cerrar Ayuda

Figura 50. Parámetros de iteración válida

La iteración final se presenta en la figura a continuación. Pese a que los agujeros de los clips desaparecen y que los cilindros exteriores tienen unas formas demasiado complejas, la construcción general es sólida y permite la fabricación con impresión 3D utilizando un número reducido de apoyos.

La pieza obtenida es simétrica, y ofrece los huecos necesarios para poder incorporar extrusiones añadiendo las partes que faltan en el diseño y quedando una pieza sólida muy optimizada, pero a la vez suficientemente sencilla como para poder ser fabricada. Además, su reducido peso de alrededor de 260 gramos es un resultado excelente que, aunque se añadan las partes restantes, seguirá siendo una masa mínima en comparación con los 1,1 kg de partida.

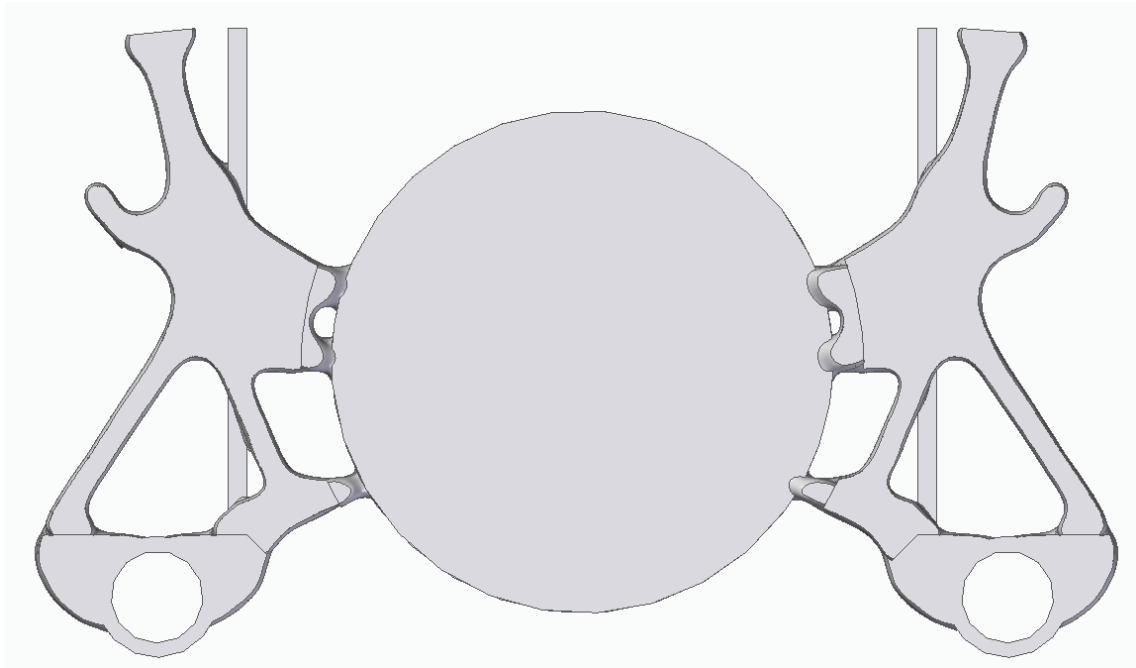


Figura 51. Iteración final. Fuente: elaboración propia

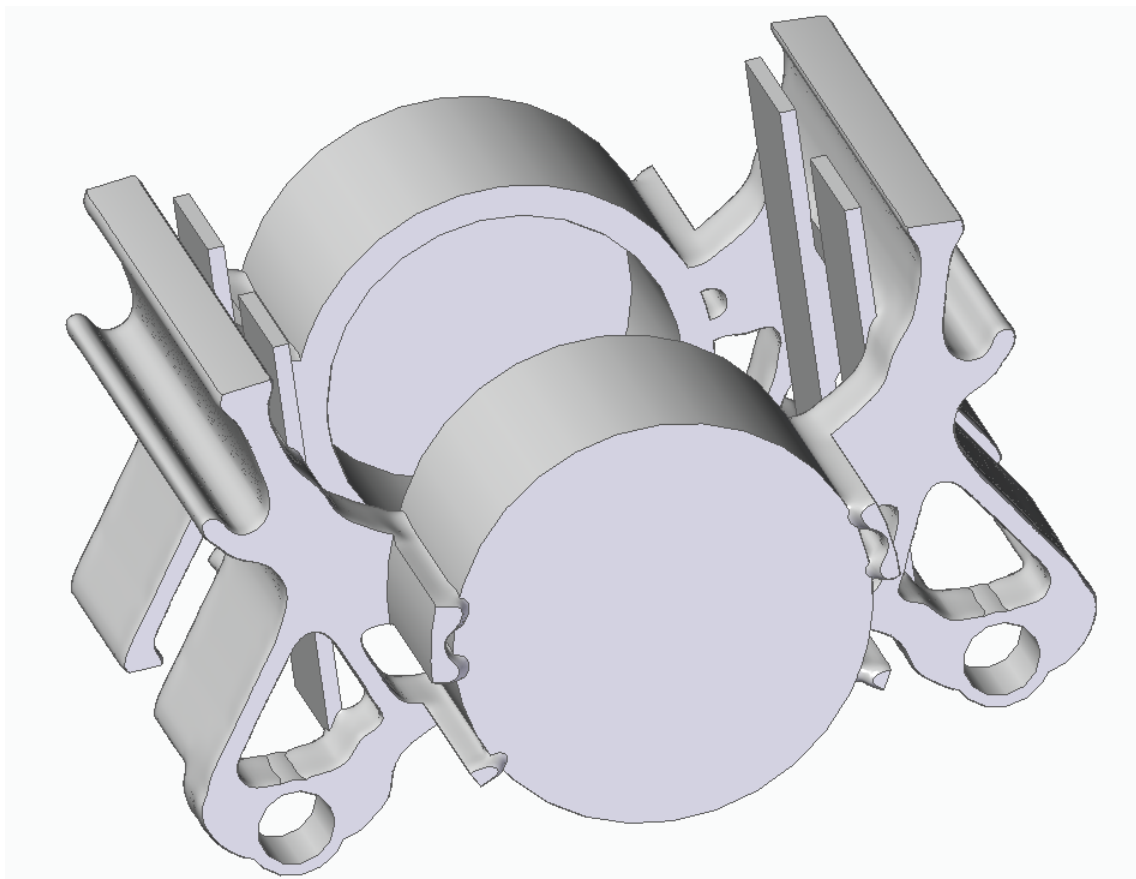


Figura 52. Iteración final. Fuente: elaboración propia

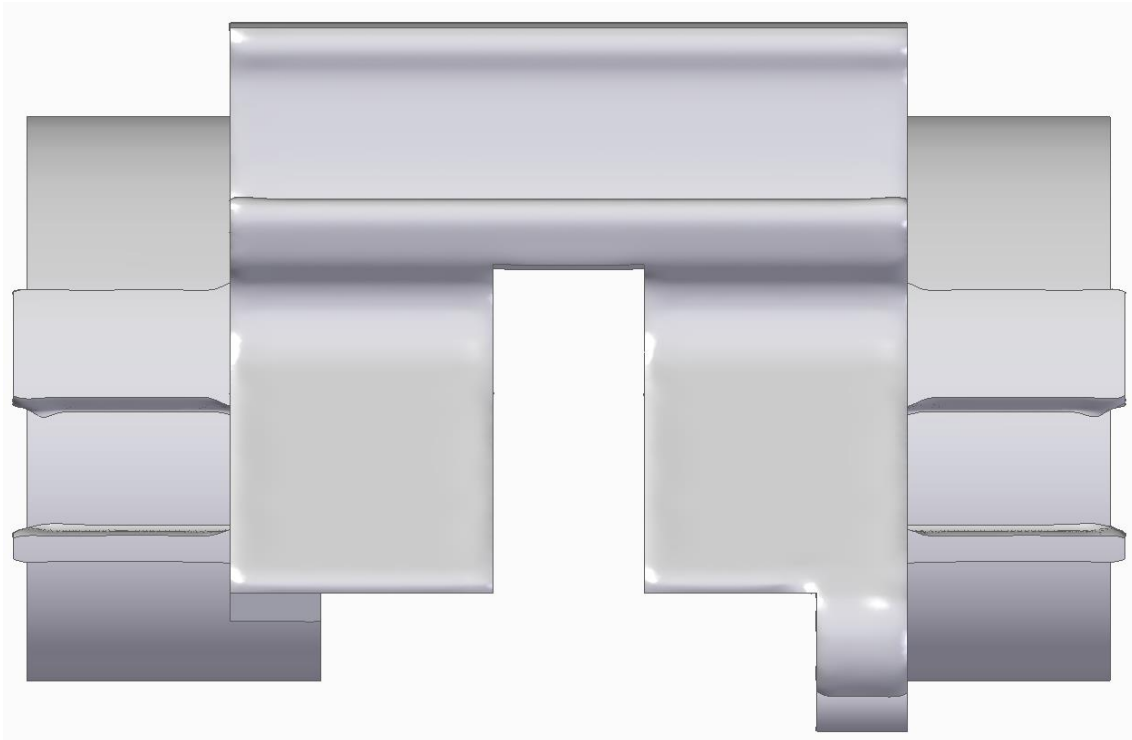


Figura 53. Iteración final. Fuente: elaboración propia

Debido a la complejidad del archivo, la potencia de computación disponible no fue suficiente para modificar el resultado de la iteración, por lo que se decidió modificar el espacio base 3 manualmente incorporando los agujeros y las formas que resultan de la optimización como guía para reducir la masa sin perder las propiedades mecánicas.

El resultado se observa en las figuras 54 a 56. Gracias a la introducción manual de las características de la pinza, todas las que causaban problemas como los agujeros para los clips de las pastillas o la extrusión para los latiguillos quedan ahora correctamente definidas. Además, la simetría es perfecta, y se han podido modelar los huecos de manea que las guías queden totalmente soportadas por la estructura y los cilindros y zonas de los latiguillos totalmente unidas al cuerpo de la pinza sin huecos vacíos.

Como últimos detalles, se han añadido los redondeamientos de esquinas para mejorar la fabricación en impresión 3D y reducir las tensiones internas, así como taladrado las extrusiones de los latiguillos con agujeros de tamaño M9x1,25, adecuados para que sean medidas estándar de manera que encontrar latiguillos adecuados no suponga un problema.

La geometría final resulta totalmente compatible con la tecnología DMLS gracias al módulo de impresión 3D de Solid Edge. La pinza, impresa en una dirección tal que la cara de uno de los cilindros esté apoyada, ofrece sólo unas pocas superficies horizontales que necesitan soportes a la hora de imprimir. Estas superficies, además, requieren de pocos soportes y se pueden generar fácilmente con el software de impresión 3D.

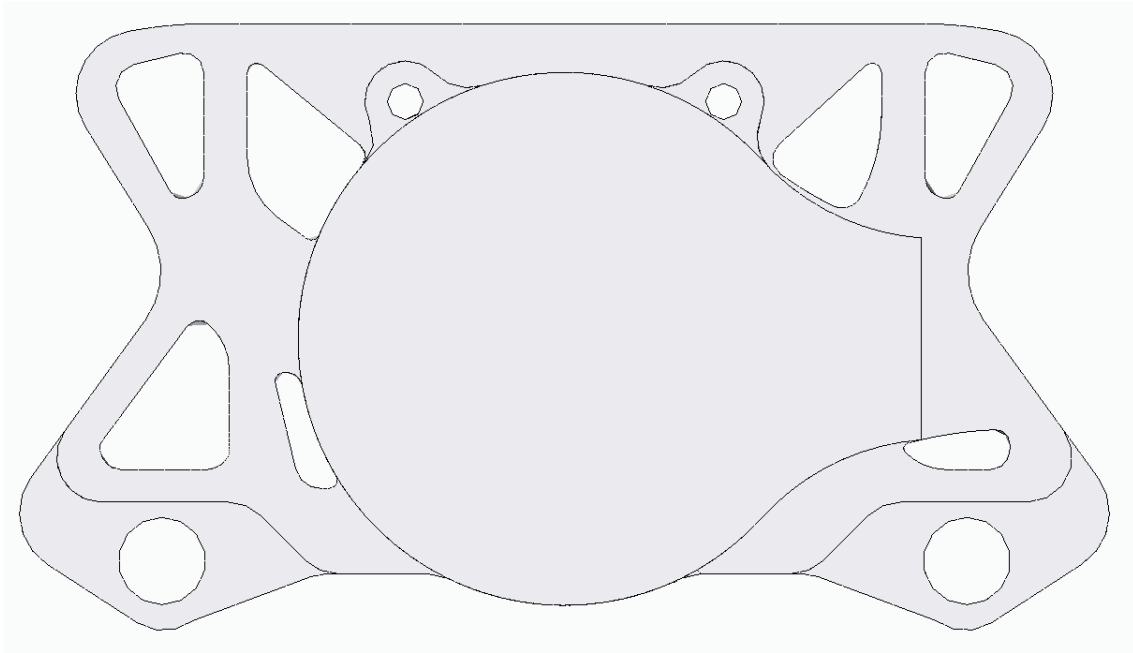


Figura 54. Alzado de la pieza final. Fuente: elaboración propia

Esta pieza final logra una masa total de 0,475 kg, lo que supone un ahorro de 0,625 kg respecto a la pinza comercial, una reducción del 56,8%, bastante considerable. Si se tiene en cuenta que

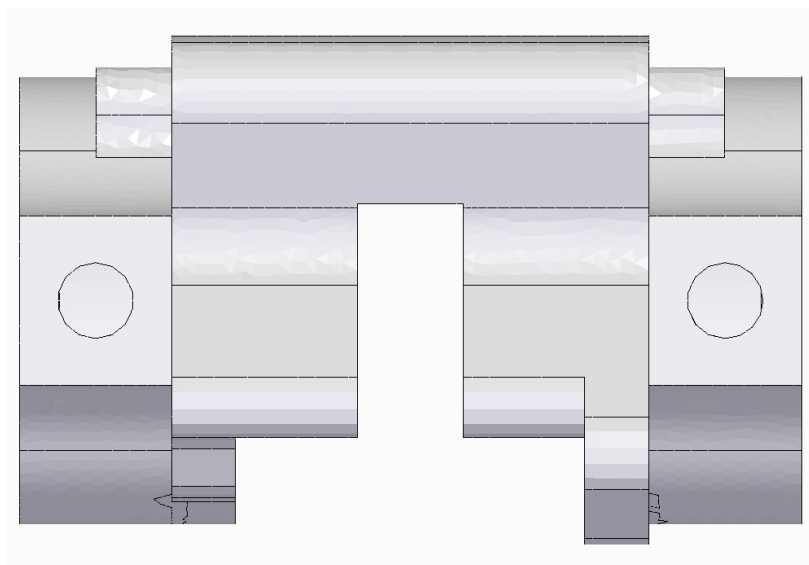


Figura 55. Perfil de la pieza final. Fuente: elaboración propia

en un FSAE son necesarias 4 pinzas, el ahorro total será de 2,5 kg, que es bastante significativo en un coche de sólo 250 kg.

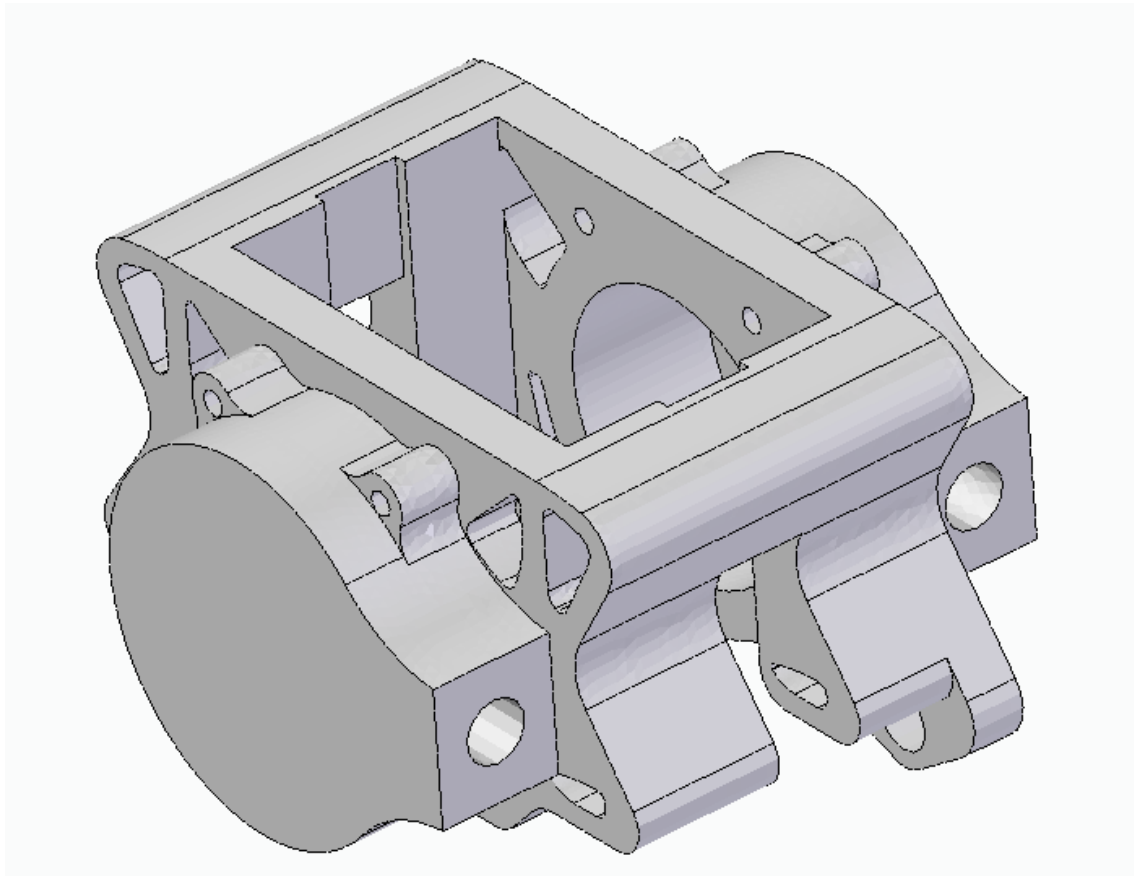


Figura 56. Vista de la pieza final. Fuente: elaboración propia

Con la geometría final definida y construida, el último paso es analizar el estado de cargas calculado con dinámica vehicular sobre esta pieza, para comprobar que sirve para su fin. El análisis de elementos finitos correspondiente se ha evaluado con los parámetros de la figura 57.

El tamaño subjetivo de malla no es extremadamente fino, pero se ha considerado válido ya que los detalles de la pieza en general no son tan pequeños. Los resultados de este análisis se especifican en la figura 58.

Los esfuerzos máximos internos no superan los 173 MPa, por debajo del límite elástico, lo que valida la pieza para su uso. Además, estos valores máximos corresponden a zonas de aristas que, aunque podrían resultar dañadas tras un uso continuado por fatiga, no constituyen un problema mayor. Posteriores trabajos en los que se realicen ensayos de estas características podrían esclarecer el impacto de la fatiga en estas zonas.

En el resto de la pinza, en cambio, las tensiones no alcanzan más de 57 MPa, siendo el 30% del límite elástico, por lo que queda asegurado el cumplimiento del límite buscado.

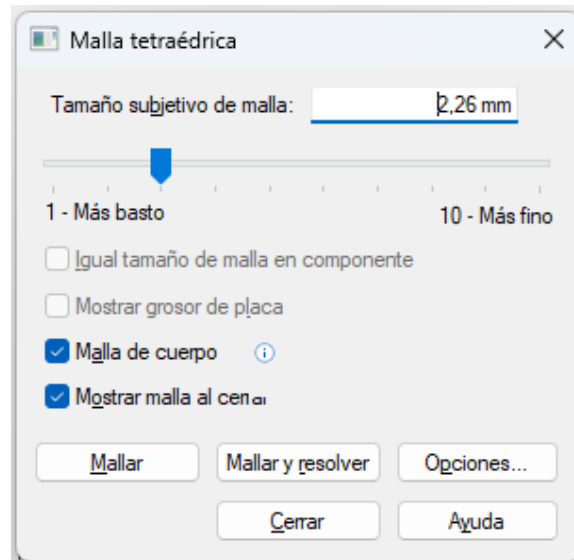


Figura 57. Parámetros de análisis de elementos finitos. Fuente: elaboración propia

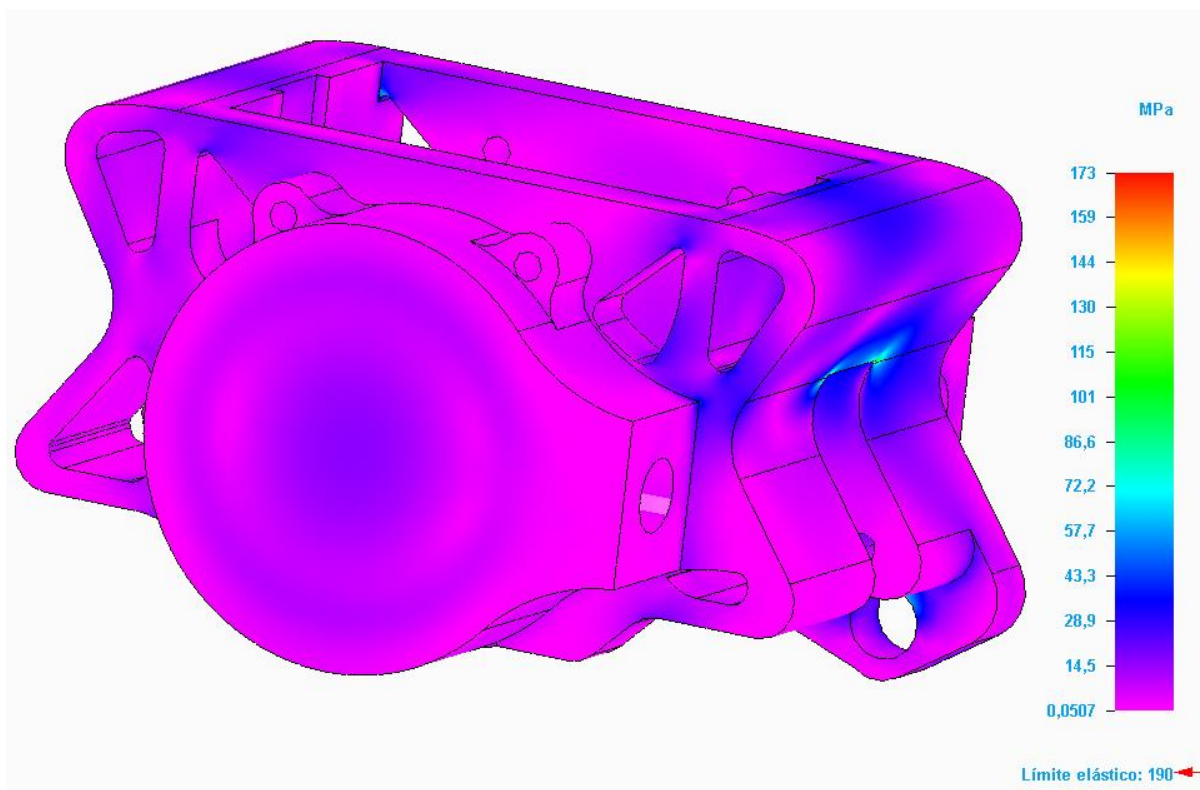


Figura 58. Resultado de análisis FEM sobre la pieza final. Fuente: elaboración propia

5.4. Resumen de resultados

Se adjunta la siguiente tabla a modo de resumen de todas las iteraciones y piezas diseñadas, junto a sus reducciones de peso conseguidas y los fallos encontrados por los que se han descartado.

Resumen de resultados				
	Espacio base 1	Espacio base 2	Espacio base 3	Pieza final
Nº de iteraciones	6	5	3	1
Reducción de masa conseguida	82%	80%	80%	57%
Fallos	<ul style="list-style-type: none"> - Agujeros de clip desaparecen - Formas demasiado complejas - Asimetría - Cilindros externos deformes 	<ul style="list-style-type: none"> - Agujeros de clip desaparecen - Formas muy complejas e indefinidas 	<ul style="list-style-type: none"> - Agujeros de clip desaparecen - Extrusión latiguillo deforme - Guías no suficientemente apoyadas 	-

Tabla 4. Resumen de resultados. Fuente: elaboración propia

6. Análisis de costes

Para poder valorar el estudio realizado se realiza un breve análisis de posibles costes mediante diferentes fuentes. Hay que destacar que al ser una pieza prototipo, los costes serán mayores que los de una pinza de producción comercial, pese a que se va a utilizar ésta como guía comparativa.

Primero se evalúan diferentes distribuidores online de componentes automovilísticos para ver el precio de la pinza CP2577 en el mercado.

- Opción 1: Race and Rally. Precio: 321,57 €



Figura 59. Opción de compra de Race and Rally. Fuente: raceandrally.ie

- Opción 2: Gieffe Racing. Precio: 443,27 €



Figura 60. Opción de compra de Gieffe Racing. Fuente: giefferacing.com

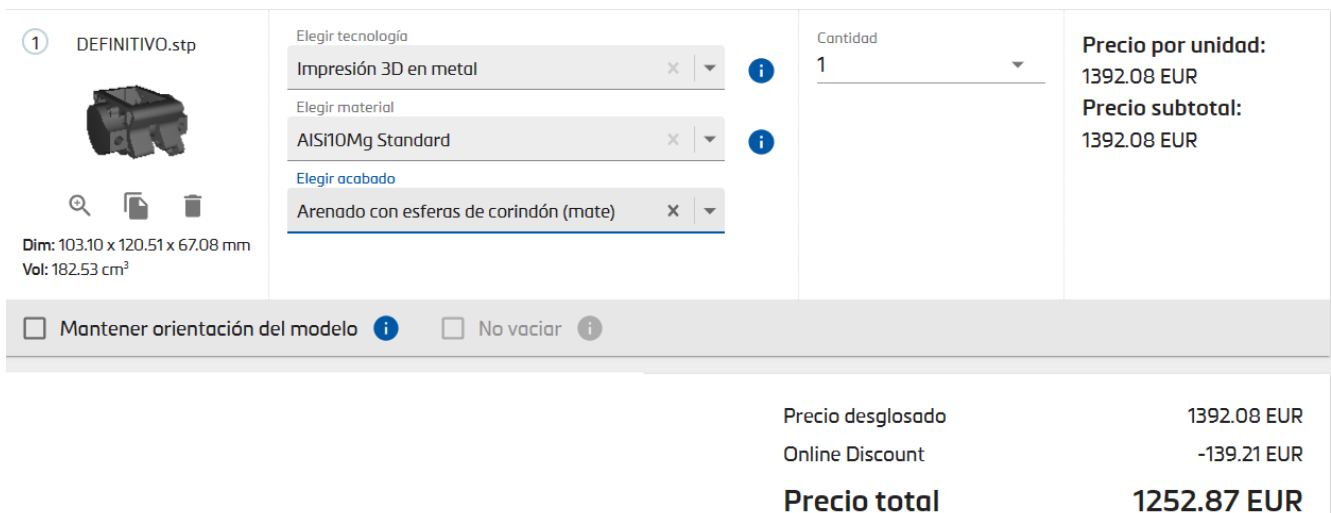
- Opción 3: MCJ Abarth. Precio: 426,53 €



Figura 61. Opción de compra de MCJ-Abarth. Fuente: mcj-abarth.com

Se observa una variabilidad en el precio unitario bastante grande, rondando los 400 € de precio medio.

Por otro lado, la fabricación aditiva en metales es aun relativamente costosa y no tan común para aleaciones de aluminio, aunque no es difícil encontrar fabricantes que ofrecen estos servicios online. Como ejemplo se utiliza la información de Materialise OnSite [48] y su herramienta de elaboración de presupuestos, presentado en la figura 62.



<input type="checkbox"/> Mantener orientación del modelo <i>i</i>	<input type="checkbox"/> No vaciar <i>i</i>	Precio desglosado	1392.08 EUR
		Online Discount	-139.21 EUR
		Precio total	1252.87 EUR

Figura 62. Coste de impresión 3D metálica de la pieza final. Fuente: materialise.com

También se han consultado servicios instantáneos de presupuestos para diferentes tecnologías de fabricación, la mayoría basados en China. Para la web Rapid Direct, por ejemplo, se obtienen los siguientes resultados:

- Mecanizado CNC. Precio: 246,44 \$/ud (227,81 €/ud)



The screenshot shows a product listing for a CNC-machined part. The file name is 'DEFINITIVO.stp' with dimensions '120.51 x 67.08 x 103.12mm'. The price is listed as 'US\$246,44' and 'US\$246,44/pcs'. The lead time is '6 business day'. There is a 'Check DFM analysis' button and a 'Configure' button. The configuration is 'CNC Machining / Aluminum 6061 / Brushed-150'.

Figura 63. Coste de fabricación en CNC por Rapid Direct. Fuente: rapiddirect.com

En resumen, aun tratándose de un prototipo, el coste de un fabricante chino en CNC, aunque no sea el método más conveniente para este tipo de pieza, es considerablemente más económico que una pinza comercial.

Sin embargo, si los objetivos de la investigación son la mejora del rendimiento de los automóviles en términos de eficiencia y ahorro, obtener piezas producidas en países lejanos que han de ser transportadas sería contraproducente.

Por último, se hace una estimación de costes de producción tradicional en fundición inyectada con el material AlSi₁₀Mg en base a información extraída de webs de fabricación metálica [49]. En esta suposición, la producción de la pinza es en masa, ya que el molde sería de tipo permanente y su amortización sólo sería posible en lotes grandes. Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Estimación de costes de producción en fundición de AlSi ₁₀ Mg inyectada			
Costes			Coste / ud
Fijos	Diseño CAD	-	-
	Molde	5000 €/molde	250 € /pinza
Variables	AlSi ₁₀ Mg [50]	3,24 € /kg	2,27 € /pinza
	Procesado posterior	1 h/pieza · 50 € /h	50 € /pinza
TOTAL			302,27 €/pinza

Tabla 5. Estimación de costes de fundición inyectada de aleación de aluminio. Fuente: elaboración propia

Estimaciones realizadas:

- El diseño CAD carece de precio al ser fruto de investigación, pero tendría un coste considerable en una inversión real
- La necesidad del material por cada pinza es aproximadamente un 75% mayor a la masa de la pieza final, debido al material sobrante en la producción por inyección
- Vida útil del molde de 20000 piezas
- Salario de técnico maquinista de 50 €/h
- No se ha considerado el uso de la energía, cuyo precio fluctuante en la actualidad puede suponer una variación bastante considerable en el coste final

El coste de producción estimado está relativamente en línea con el precio de la pinza comercial, lo que supone una ventaja si se consideran las mejoras que el modelo optimizado introduce.

Se ofrece un resumen de los diferentes costes reflejados en este apartado en la tabla 6.

Precio y costes de una unidad de pinza de freno		
Pinza comercial	AP Racing CP2577 (precio medio)	397,1 €
Pinza optimizada topológicamente	Precio fabricante I3D metálica online <i>Materialise</i>	1252,87 €
	Precio fabricante CNC online <i>Rapid Direct</i>	227,81 €
	Coste estimado fundición inyectada	302,27 €

Tabla 6. Precio y costes de una unidad de pinza de freno. Fuente: elaboración propia

7. Conclusiones

A lo largo de esta memoria se ha detallado la investigación satisfactoriamente realizada con el objetivo de mejorar una pieza mecánica utilizada en todos los automóviles como es una pinza de freno.

En primer lugar, hay que destacar la importancia del estudio previo de dinámica vehicular, que, aportando un marco a la investigación, ha permitido delimitar unas condiciones geométricas y de cargas concretas y obtener un modelo comercial de pinza de freno con el que comparar.

La investigación de la literatura ha permitido conocer el estado de las nuevas tecnologías y técnicas relacionadas con este trabajo, como son el diseño CAD, la optimización topológica, el análisis FEM y la impresión 3D, así como las más tradicionales como la fundición, para poder establecer una comparativa entre las distintas fabricaciones, además de definir el material más adecuado para esta pieza.

De esta manera, se han podido diseñar los espacios base presentados teniendo en cuenta las opciones de fabricación y los requisitos funcionales que debía cubrir. Las diferentes iteraciones han aportado un mayor conocimiento en el funcionamiento del software de cara a conseguir unos resultados válidos, que se traducen en la pieza final topológicamente optimizada.

Este resultado final, validado mediante el análisis de elementos finitos y brevemente contrastado mediante el análisis de costes, significa una gran mejora respecto de la pinza de freno comercial gracias a la reducción de la masa de más del 55%.

El ahorro en material supone, a priori, un ahorro económico y en producción. Sin embargo, la importancia de este resultado es aún mayor si se considera el impacto que la reducción de peso supone en los vehículos, mejorando su rendimiento y eficiencia.

Este trabajo ha permitido un avance mejorando el componente mecánico de la pinza, pero sienta la base para aumentar el ahorro en todos los componentes de los vehículos para, llegado el momento en el que la impresión 3D metálica en masa sea posible, las optimizaciones permitan reducir coste, contaminación y, en definitiva, ayudar a construir un mundo mejor.

8. Trabajos futuros

Las limitaciones temporales y de recursos a lo largo de esta investigación han dejado algunas líneas abiertas para posibles trabajos futuros.

Por un lado, la fabricación física de la pieza optimizada para realizar ensayos que validen los simulados en el mundo real. De estos ensayos se podrían desprender nuevas características de la pieza o quizá nuevas posibilidades de diseño que ayuden en la optimización. Además, permitiría estudiar de cerca el coste de elaboración del prototipo, acercando la estimación de los costes de producción a un valor más realista teniendo en cuenta posibles costes ocultos.

Por otro lado, resultaría interesante comprobar la posibilidad de obtener piezas optimizadas topológicamente, generalmente complejas, evitando la costosa impresión 3D metálica. Esto podría realizarse aplicando las técnicas de AM y fundición al modelo perdido explicadas en el capítulo del estado del arte. Se piensa que, elaborando modelos complejos en impresión 3D de polímeros, barata hoy en día, se podrían utilizar directamente en moldes de fundición en arena tradicionales, obteniendo dichas formas complejas mediante un proceso tradicional y poco costoso.

Referencias

- [1] J. Torrent, «DISRUPCIONES EN LAS CADENAS DE SUMINISTRO GLOBALES: ¿Y AHORA QUÉ?».
- [2] «Así será el diseño de productos, después del Coronavirus.», *JORDI RIZO*, 9 de junio de 2020. <https://jordirizo.com/asi-sera-el-diseno-de-productos-despues-del-coronavirus/> (accedido 14 de agosto de 2023).
- [3] Departamento de Asuntos Económicos y Sociales, «Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible». Naciones Unidas, 2020. [En línea]. Disponible en: https://unstats.un.org/sdgs/report/2020/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2020_Spanish.pdf
- [4] M. Zahera, «LA FABRICACIÓN ADITIVA, TECNOLOGÍA AVANZADA PARA EL DISEÑO Y DESARROLLO DE PRODUCTOS», 2012.
- [5] E. SDC, «Impresoras 3D, tendencias en el mercado actual», *Sistemas Digitales*, 9 de abril de 2021. <https://www.sistemas-catalunya.com/impresoras-3d-tendencias/> (accedido 14 de agosto de 2023).
- [6] O. Sigmund y K. Maute, «Topology optimization approaches: A comparative review», *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 48, n.º 6, pp. 1031-1055, dic. 2013, doi: 10.1007/s00158-013-0978-6.
- [7] «Cinco industrias que más se benefician de la impresión 3D», *Dassault Systèmes*, 4 de enero de 2023. <https://www.3ds.com/es/make/solutions/blog/five-industries-benefit-most-3d-printing> (accedido 14 de agosto de 2023).
- [8] R. F. Tylecote, *A history of metallurgy*. Maney Pub., for the Institute of Materials, 2002.
- [9] Statista, «Global Casting Production Worldwide 2018 to 2020». Accedido: 27 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.statista.com/statistics/237526/casting-production-worldwide-by-country/>
- [10] K.-H. Grote y E. K. Antonsson, Eds., *Springer handbook of mechanical engineering*. New York: Springer, 2009.
- [11] Grand View Research, «Aluminum Casting Market Size, Share & Trends Analysis Report By Process (Die Casting, Permanent Mold Casting), By Application (Transportation, Industrial, Building & Construction), By Region, And Segment Forecasts, 2022 - 2030». Accedido: 28 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/aluminum-casting-market?_ga=2.175148134.594107497.1669575853-1739306798.1669575853

- [12] M. M. Espinosa, «Procesos de Moldeo de Materiales Metálicos», p. 49.
- [13] Mary Beth O’Leary, «A new era in 3-D printing». Accedido: 28 de noviembre de 2022. [En línea].
Disponible en: <https://news.mit.edu/2019/new-era-3d-printing-0516>
- [14] M. J. Calzado, «FABRICACIÓN ADITIVA (IMPRESIÓN 3D) TEORÍA».
- [15] S. Das, D. L. Bourell, y S. S. Babu, «Metallic materials for 3D printing», *MRS Bull.*, vol. 41, n.º 10, pp. 729-741, oct. 2016, doi: 10.1557/mrs.2016.217.
- [16] T. Briard, F. Segonds, y N. Zamariola, «G-DfAM: a methodological proposal of generative design for additive manufacturing in the automotive industry», *Int. J. Interact. Des. Manuf. IJIDeM*, vol. 14, n.º 3, pp. 875-886, sep. 2020, doi: 10.1007/s12008-020-00669-6.
- [17] M. J. M. Ayora, «Optimización topológica para fabricación aditiva de mangueta de vehículo de Formula Student».
- [18] M. Hunar, L. Jancar, D. Krzikalla, D. Kaprinay, y D. Srnicek, «Comprehensive View on Racing Car Upright Design and Manufacturing», *Symmetry*, vol. 12, n.º 6, Art. n.º 6, jun. 2020, doi: 10.3390/sym12061020.
- [19] G. Shi, C. Guan, D. Quan, D. Wu, L. Tang, y T. Gao, «An aerospace bracket designed by thermo-elastic topology optimization and manufactured by additive manufacturing», *Chin. J. Aeronaut.*, vol. 33, n.º 4, pp. 1252-1259, abr. 2020, doi: 10.1016/j.cja.2019.09.006.
- [20] A. Deacon, «Lattice Optimization». https://2022.help.altair.com/2022/inspire/en_us/topics/inspire/structure/optimization_lattice.htm (accedido 29 de agosto de 2023).
- [21] M. Upadhyay, T. Sivarupan, y M. El Mansori, «3D printing for rapid sand casting—A review», *J. Manuf. Process.*, vol. 29, pp. 211-220, oct. 2017, doi: 10.1016/j.jmapro.2017.07.017.
- [22] N. Hawaldar y J. Zhang, «A comparative study of fabrication of sand casting mold using additive manufacturing and conventional process», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 97, n.º 1-4, pp. 1037-1045, jul. 2018, doi: 10.1007/s00170-018-2020-z.
- [23] D. Weiss, «Advances in the Sand Casting of Aluminium Alloys», en *Fundamentals of Aluminium Metallurgy*, Elsevier, 2018, pp. 159-171. doi: 10.1016/B978-0-08-102063-0.00005-9.
- [24] S. R. Sama, T. Badamo, y G. Manogharan, «Case Studies on Integrating 3D Sand-Printing Technology into the Production Portfolio of a Sand-Casting Foundry», *Int. J. Met.*, vol. 14, n.º 1, pp. 12-24, ene. 2020, doi: 10.1007/s40962-019-00340-1.

- [25] R. Singh, «Comparison of Hybrid Rapid Mouldings for Zinc Alloy Castings», *Appl. Mech. Mater.*, vol. 110-116, pp. 653-659, oct. 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.110-116.653.
- [26] O. Bilek y L. Rokyta, «Rapid Prototyping in Casting Technology: Case Study», en *DAAAM Proceedings*, B. Katalinic, Ed., 1.^a ed. DAAAM International Vienna, 2011, pp. 1157-1158. doi: 10.2507/22nd.daaam.proceedings.563.
- [27] E. Bassoli, A. Gatto, L. Iuliano, y M. Grazia Violante, «3D printing technique applied to rapid casting», *Rapid Prototyp. J.*, vol. 13, n.º 3, pp. 148-155, jun. 2007, doi: 10.1108/13552540710750898.
- [28] J. Wang, S. R. Sama, P. C. Lynch, y G. Manogharan, «Design and Topology Optimization of 3D-Printed Wax Patterns for Rapid Investment Casting», *Procedia Manuf.*, vol. 34, pp. 683-694, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.06.224.
- [29] J. Wang, S. R. Sama, y G. Manogharan, «Re-Thinking Design Methodology for Castings: 3D Sand-Printing and Topology Optimization», *Int. J. Met.*, vol. 13, n.º 1, pp. 2-17, ene. 2019, doi: 10.1007/s40962-018-0229-0.
- [30] José Antonio Guerra Morilla, «Manual Sistema de frenado Road House.pdf».
- [31] «Qué es el freno de tambor y para qué sirve». <https://blog.frenkit.es/es/freno-de-tambor-que-es> (accedido 29 de agosto de 2023).
- [32] «Freno de tambor y freno de disco: funcionamiento, partes y diferencias ► AUTODOC BLOG». <https://www.autodoc.es/info/freno-de-tambor-y-freno-de-disco-funcionamiento-partes-y-diferencias> (accedido 29 de agosto de 2023).
- [33] E. Tyflopoulos, M. Lien, y M. Steinert, «Optimization of Brake Calipers Using Topology Optimization for Additive Manufacturing», *Appl. Sci.*, vol. 11, n.º 4, p. 1437, feb. 2021, doi: 10.3390/app11041437.
- [34] «Racing», *Brembo – Official WebSite*. <https://www.brembo.com/en/car/racing-professionals> (accedido 18 de agosto de 2023).
- [35] «Formula Student / SAE | AP Racing». <https://ap racing.com/race-car/formula-student-sae> (accedido 18 de agosto de 2023).
- [36] «Wilwood Disc Brakes - Specialty OEM, Racing, and Street Performance Bolt-On Brake Kits». <https://www.wilwood.com/> (accedido 18 de agosto de 2023).
- [37] AP Racing, «AP Racing- 2023 Product Catalogue». 2023.

- [38] «Mono Block versus 2-Piece Calipers | Brakes-shop.com». <https://www.brakes-shop.com/brakepedia/calipers/mono-block-vs-2-piece-calipers> (accedido 18 de agosto de 2023).
- [39] «Choosing Rim Size [Archive] - FSAE.com Forums». <http://www.fsae.com/forums/archive/index.php/t-3220.html?s=5ce42bd67e1ff12ad0ef134603742939> (accedido 18 de agosto de 2023).
- [40] «Información sobre holgura para el correcto funcionamiento y ajuste de frenos | Ferodo», *Frenos, pastillas, discos, forros y accesorios premium | Ferodo*. <https://www.ferodo.com/es/es/support/commercial-vehicles/technical-tips/Running-Clearance.html> (accedido 20 de agosto de 2023).
- [41] «Braking System Design questions [Archive] - FSAE.com Forums». <http://www.fsae.com/forums/archive/index.php/t-11454.html> (accedido 25 de agosto de 2023).
- [42] «AlSi10Mg(Fe) composición material y aplicación», *EMP Tech Co.,Ltd.* <https://es.empcasting.com> (accedido 28 de agosto de 2023).
- [43] «Polvos de aleación de aluminio para impresión 3D», 17 de septiembre de 2021. <https://am-material.com/es/news/alsi10mg-aluminium-alloy-powders/> (accedido 28 de agosto de 2023).
- [44] «materialise-datasheets-metal-3d-printing-01-12-2022.pdf». Accedido: 28 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://assets-eu-01.kc-usercontent.com/8ff24b0e-57a3-0157-62d1-fa4ac9734eb5/1ec47c00-f95a-45fd-b577-71085942c8f5/materialise-datasheets-metal-3d-printing-01-12-2022.pdf>
- [45] «UNE-EN ISO 286-2:2011 | Normas AENOR». <https://tienda.aenor.com/norma-une-en-iso-286-2-2011-n0046880> (accedido 28 de agosto de 2023).
- [46] Xometry, «Direct Metal Laser Sintering Design Guide».
- [47] Solid Concepts Inc., «Direct Metal Laser Sintering Design Guidelines». 2011.
- [48] «Presupuesto - Materialise OnSite | 3D Prototypes». <https://onsite.materialise.com/es/ordering/quotation/3869018> (accedido 28 de agosto de 2023).
- [49] «Foro MetalAficion - Índice». <https://foro.metalaficion.com/index.php> (accedido 28 de agosto de 2023).

- [50] «Polvo Alsi12 Impresión 3d Polvo De Metal Polvo De Acero Inoxidable Para Piezas De Automóviles Impresión 3d - Buy 3d Printing Metal Powder,Stainless Steel Powder,Metal Powder Product on Alibaba.com». <https://spanish.alibaba.com/p-detail/AlSi12-1600926959571.html?s=p> (accedido 28 de agosto de 2023).
- [51] «Formula SAE Rules 2023», 2023.
- [52] Elena Criado Ocaña, «Diseño y cálculo del sistema de frenado para un prototipo fórmula student».
- [53] A. M. Garrido, «Diseño y cálculo del sistema de frenado para un monoplaza “Formula Student”».
- [54] Francisco Aparicio Izquierdo, Carlos Vera Alvarez, y Vicente Díaz López, «Teoría de los Vehículos Automóviles». noviembre de 2001.
- [55] R. Limpert, *Brake design and safety*, 2nd ed. Warrendale, Pa: Society of Automotive Engineers, 1999.
- [56] A. C. Serrenho, J. B. Norman, y J. M. Allwood, «The impact of reducing car weight on global emissions: the future fleet in Great Britain», *Philos. Transact. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 375, n.º 2095, p. 20160364, jun. 2017, doi: 10.1098/rsta.2016.0364.
- [57] «Los 10 coches más vendidos en España del 2022: varios SUV y alguna sorpresa», *Car and Driver*, 5 de enero de 2023. <https://www.caranddriver.com/es/coches/planeta-motor/g38737836/coches-ventas-espana/> (accedido 30 de agosto de 2023).
- [58] RACE, «7 trucos para ahorrar gasolina y hacer una conducción eficiente | RACE», 23 de febrero de 2023. <https://www.race.es/como-ahorrar-gasolina> (accedido 30 de agosto de 2023).
- [59] «Km medios recorridos al año por los vehículos para uso personal, por relación con la actividad económica de la persona de referencia y antigüedad del vehículo», *INE*. <https://www.ine.es/jaxi/Datos.htm?path=/t25/p500/2008/p10/I0/&file=10020.px> (accedido 30 de agosto de 2023).
- [60] «IDAE -». <https://coches.idae.es/consumo-de-carburante-y-emisiones> (accedido 30 de agosto de 2023).
- [61] «DGT - DGT en cifras detalle». <https://www.dgt.es/menusecundario/dgt-en-cifras/dgt-en-cifras-resultados/dgt-en-cifras-detalle/?id=00866> (accedido 30 de agosto de 2023).

ANEXOS

Anexo I. Cálculos para obtención de restricciones de la pinza de freno y diseño del sistema de frenado

El contexto elegido para dimensionar la pinza de freno ha sido el de un vehículo estándar de la competición Fórmula Student (FSAE). La FSAE, según su libro de normas de 2023 [51] es una competición que tiene como objetivo preparar a estudiantes universitarios en diferentes disciplinas entorno al motorsport, mediante el diseño, construcción y desarrollo de un pequeño vehículo monoplace tipo fórmula. El concepto de la competición es que los equipos consideren que trabajan para una empresa de ingeniería dedicada a la competición, por lo que se valorarán los rendimientos del vehículo en las diferentes pruebas, así como la manera de diseñar y el coste del producto.

En cuanto a pinzas de frenos, la normativa no establece ninguna prescripción más allá de asegurar la estanqueidad del sistema hidráulico, por lo que queda libertad para su diseño y fabricación.

No contando con los datos de ningún equipo concreto de FSAE, se ha decidido utilizar parámetros estándar dentro de la competición, obtenidos de diferentes investigaciones [52] [53] y presentados en la siguiente tabla:

Parámetros estándar de un vehículo FSAE utilizados		
Símbolo	Concepto	Valor
h	Altura del centro de gravedad	250 mm
L	Batalla (distancia entre ejes)	1500 mm
m	Masa total	250 kg

Tabla 7. Parámetros estándar de un vehículo FSAE utilizados

Para el cálculo de la frenada y los distintos componentes, se ha revisado literatura existente sobre el tema [54] [55].

1. Cálculo de frenada

La fuerza de frenado se define como la fuerza que detiene el movimiento del vehículo, ejercida desde el sistema de frenos sobre el eje al que van montadas las ruedas, y creando las fuerzas de reacción correspondientes entre la calzada y el asfalto. Esta fuerza se formula de la siguiente manera:

$$Fuerza\ de\ frenado = \frac{N_{frenado}}{R_{neumático}}$$

Ecuación 4. Fuerza de frenado

Siendo:

- $R_{neumático}$ el radio el correspondiente al radio efectivo del neumático
- $N_{frenado}$ el par el ejercido sobre el eje para reducir su rotación
- Fuerza de frenado la fuerza de reacción entre un neumático y la superficie.

De esta manera, la fuerza total de frenada es la suma de cada fuerza de frenado de cada uno de los cuatro neumáticos.

$$F_{total\ de\ frenado} = \sum F_{frenado\ DI,DD,TI,TD}$$

Ecuación 5. Fuerza total de frenado

Con esta fuerza de frenada, y conocida la masa del vehículo, se puede conocer su velocidad de deceleración según la segunda ley de Newton:

$$a_x = \frac{F_{total\ de\ frenado}}{m_v}$$

Ecuación 6. Deceleración

En la deceleración de un vehículo en movimiento el reparto de pesos juega un papel importante, ya que la capacidad de frenada de cada eje viene determinada por el peso que soporta, y el reparto dinámico varía por la fuerza de inercia, aumentando el peso en el eje delantero -y por tanto, su capacidad de frenada- y disminuyéndolo en el trasero.

Esta transferencia de pesos se define con la siguiente fórmula:

$$TP = \left(\frac{a_v}{g}\right) \cdot \left(\frac{h}{L}\right) \cdot P$$

Ecuación 7. Transferencia de pesos

Donde:

- TP es la transferencia de peso del eje trasero al delantero

- a_v es la deceleración provocada por el sistema de frenos
- g es la aceleración de la gravedad, asumida en $9,81 \text{ m/s}^2$
- h es la altura del centro de gravedad del vehículo
- L es la distancia entre ejes o batalla
- P es el peso total del vehículo

Debido a esta transferencia de pesos, y sabiendo que el eje delantero es el que más capacidad de frenada requerirá, la pinza optimizada se va a dimensionar solamente para este eje. El peso final del eje delantero será:

$$P_{d,d} = P_d + TP$$

Ecuación 8. Peso en el eje delantero con transferencia de pesos

A su vez, la fuerza máxima de frenada del eje delantero viene definida por

$$F_{f,d} = \mu \cdot P_d$$

Ecuación 9. Fuerza de frenada en el eje delantero

Siendo:

- μ el coeficiente de fricción máximo entre rueda y superficie. Para esta investigación, se ha estimado un valor de 1,6 según lo aportado en webs de la competición [41]

Sustituyendo con la segunda ley de Newton, se obtiene:

$$F_{max} = P \cdot \mu = m_v \cdot a_v$$

Ecuación 10. Fuerza máxima de frenada

Y, por tanto:

$$\mu = \frac{m_v \cdot a_v}{P} = \frac{a_v}{g}$$

Ecuación 11. Coeficiente de fricción

Lo que quiere decir que el coeficiente de máxima fricción entre neumático y asfalto determina la máxima deceleración que se puede esperar en el vehículo, es decir, considerando un coeficiente de fricción de 1,6, la deceleración máxima será de 1,6 g o $15,7 \text{ m/s}^2$.

Con este valor, y conocido el resto, de variables, se pueden conocer los siguientes parámetros utilizando las ecuaciones 8, 9 y 10:

$$TP = 66,92 \text{ N}$$

$$P_{d,d} = TP + P_d = 1292,92 \text{ N}$$

Por tanto, la fuerza de frenada buscada en el eje delantero es:

$$F_{f,d} = 1,6 \cdot P_d = 2068,67 \text{ N}$$

Que se traduce en una fuerza de frenada de una rueda de **1034,33 N**.

Por otro lado, eligiendo el tamaño de llanta de 13" como se ha comentado en apartados anteriores, las dimensiones de llanta y rueda son:

Dimensiones para llanta de 13"	
Radio llanta	165,1 mm
Radio neumático	260 mm

Tabla 8. Dimensiones de llanta y rueda

Por tanto, con estas dimensiones y la ecuación 4, se sabe que el par de frenada requerido en el eje delantero es:

$$N_{\text{frenado,d}} = R_{\text{neumático}} \cdot F_{f,d} = \mathbf{537,85 \text{ Nm}}$$

Conocidos el par y la fuerza requeridos, se procede a diseñar un sistema de frenado básico que cumpla estos parámetros.

2. Diseño del sistema de frenado

Para obtener unas condiciones de carga de la pinza, siempre cumpliendo con los requisitos de frenada establecidos, se tienen en cuenta los siguientes parámetros de un sistema de frenos:

- Ratio de pedal
- Diámetro de la bomba de freno
- Presión del líquido de frenos
- Reparto de freno delantero y trasero, estimado al 50%
- Diámetro de pistón de la pinza de frenos, que deriva en la fuerza de la pinza sobre el disco
- Coeficiente de fricción de la pastilla
- Diámetro efectivo del disco de freno

Algunos de estos parámetros se pueden estimar, pero, para asegurar que el sistema sea real, se decide optar por elegir componentes reales y comerciales para saber sus medidas. Estos componentes están descritos en el apartado de metodología.

A continuación, se detallan los parámetros del sistema de frenada final diseñado con los componentes comerciales, tras realizar una serie de iteraciones para llegar a los requerimientos de frenada descritos anteriormente.

Parámetros sistema de frenada con componentes comerciales				
Componente	Modelo comercial	Parámetro relevante	Valor del parámetro	Comentarios
Pedal	-	Ratio de palanca	4,15	Estimado según valores comunes
Repartidor	-	Reparto	50%	Estimado ya que depende del objetivo de rendimiento del vehículo y se suele ajustar
Bomba	CP5623 de AP Racing	Diámetro	17,8 mm	-
Pistones	CP2577-102 de AP Racing	Diámetro	44,5 mm	-
Pastillas	CP2399 de AP Racing, con material APF405	Coefficiente de fricción	0,36	-
Disco de freno	-	Radio efectivo	106,54 mm	Calculado a partir de los radios externo (127 mm) e interno (83 mm)

Tabla 9. Parámetros del sistema de frenada con componentes comerciales

Gracias a estos datos, se calcula la capacidad de frenada del sistema.

La entrada máxima de fuerza del piloto en el pedal se ha estimado en 300 N, a partir del cual las ruedas bloquearían. Este valor se ha escogido al ser suficientemente alto como para proporcionar sensibilidad suficiente en el freno, pero no demasiado como para provocar fatiga en pruebas de tipo *endurance* en la competición.

Con el ratio del pedal, la fuerza a la entrada de la bomba para el eje delantero resulta ser la mitad, ya que se sitúa el reparto de frenos en el 50%:

$$F_{\text{bomba, d}} = 4,15 \cdot 300 \text{ N} / 2 = 622,5 \text{ N}$$

Esta fuerza se transmite en el émbolo de la bomba al líquido de frenos, creando la presión. Con el diámetro de la bomba, se obtiene el valor de la presión:

$$P_{\text{líquido}} = F_{\text{bomba, d}} / A_{\text{bomba}} = 622,5 \text{ N} / (17,8^2 \text{ mm} \cdot 2 \cdot \pi) = \mathbf{1,25 \text{ MPa}}$$

Esta presión se transmite a través de los latiguillos por diferentes componentes, irrelevantes en lo que concierne este estudio, hasta los cilindros de la pinza de freno. Por ello, esta carga es una de las que se ha de incorporar en el estudio de optimización de la pinza.

Sabiendo cuál es el diámetro de los pistones, es posible determinar la fuerza que la pinza ejerce sobre una pastilla y esta, a su vez, sobre una cara del disco de freno:

$$F_{\text{pinza, d}} = P_{\text{líquido}} \cdot A_{\text{pistón}} = 1,25 \text{ MPa} \cdot 44,5^2 \text{ mm} \cdot 2 \cdot \pi = 3881,9 \text{ N}$$

Con el coeficiente de fricción de la pastilla seleccionada, se obtiene la fuerza de fricción de la pastilla sobre una cara del disco, paralela a la cara de la pastilla y en sentido opuesto a la rotación del disco:

$$F_{\text{fricción}} = \mu_{\text{pastilla}} \cdot F_{\text{pinza, d}} = 0,36 \cdot 3881,9 \text{ N} = \mathbf{1397,5 \text{ N}}$$

Esta fuerza es la más importante junto a la presión, ya que la fuerza de reacción del disco sobre la pastilla empujará a la pastilla contra la guía de la pinza, y será esta la carga principal de la pinza, además de la presión.

Con la fuerza de fricción de las dos caras del disco y su radio efectivo, se obtiene el par de frenada generado en una de las ruedas del eje delantero, que multiplicada por dos será el par de frenada total de dicho eje:

$$N_{\text{frenada, d}} = 2 \cdot F_{\text{fricción}} \cdot R_{\text{efectivo}} = 2 \cdot 1397,5 \text{ N} \cdot 106,54 \text{ mm} = 595,5 \text{ Nm}$$

A su vez, conocido el radio del neumático, la fuerza de frenada de este eje es:

$$F_{\text{frenada, d}} = N_{\text{frenada, d}} / R_{\text{efectivo}} = 595,5 \text{ Nm} / 260 \text{ mm} = 2290,5 \text{ N}$$

Comparando los valores obtenidos con los que se requerían en el estudio previo de la dinámica vehicular:

Comparativa parámetros requeridos vs parámetros obtenidos del sistema diseñado			
Parámetro	Valor requerido	Valor del sistema diseñado	Validez
Fuerza de frenada del eje delantero	2068,67 N	2290,5 N	Válido
Par de frenada del eje delantero	537,85 Nm	595,5 Nm	Válido

Tabla 10. Comparativa parámetros requeridos vs parámetros obtenidos del sistema diseñado

Queda así validado el sistema teórico de frenada diseñado según los componentes comerciales comentados.

Con estos valores, también se validan las cargas que va a soportar la pinza de freno a optimizar, presentadas en la tabla 11.

Cargas para aplicar en la optimización de la pinza de freno	
Presión máxima del líquido en el cilindro	1,25 MPa
Fuerza de la pastilla sobre la pinza	1400 N

Tabla 11. Cargas a aplicar en la optimización de la pinza de freno

Anexo II. Alineación con ODS

El Trabajo Fin de Máster a realizar, además del propósito específico de investigación explicado en los anteriores objetivos, mapea con varios de los ODS establecidos por la Organización de las Naciones Unidas para la unificación de metas que conseguir como humanidad en 2030 [3].

9 INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURAS



ODS 9. La innovación que el proceso de obtención de piezas de fundición a partir de modelos optimizados e impresos en 3D es indudable, además del favorecimiento a la industrialización sostenible que este método propone, por lo que contribuye al núcleo de este Objetivo.

12 PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES



ODS 12. El proceso innovador trata de ahorrar material en la producción, razón por la cual se alinea con este Objetivo de Desarrollo Sostenible. No obstante, cabe mencionar el beneficio que las piezas optimizadas topológicamente tendrán en el sector de los transportes, al hacer más ligero cualquier tipo de vehículo. Por tanto, también incide en la disminución del consumo global de energía, muy importante en este ODS.

11 CIUDADES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES



ODS 11. La reducción de material utilizado en la fabricación de las piezas optimizadas tiene un interés enorme en la industria del transporte, en especial el terrestre. De poder ser aplicado en masa, los vehículos podrán reducir drásticamente los consumos de energía, ya sea de origen eléctrico o

derivada de la combustión. Por tanto, la circulación y la seguridad en las calles de las urbes serán mejoradas, además de la contaminación, punto clave para este ODS.

Para cuantificar la alineación con este objetivo, se tiene en cuenta el artículo *The impact of reducing car weight on global emissions: the future fleet in Great Britain*, por Serrenho et al. [56]. En él, se demuestra que si se estableciesen políticas que fueren la reducción en el peso medio de los coches de Gran Bretaña, las mejoras en cuanto a contaminación emitida por estos vehículos superarían con creces a las implicadas siguiendo las actuales políticas que favorecen el coche eléctrico. Esto se relaciona directamente con la investigación realizada, ya que se ha conseguido obtener una reducción total de aproximadamente 2,5 kg para un vehículo monoplace que utilice 4 pinzas del modelo optimizado en vez de el modelo comercial, es decir una reducción del 60% del peso.

Para realizar una estimación del potencial ahorro de emisiones por reducción de peso derivada de optimizaciones topológicas en pinzas de freno de coches comerciales se ha supuesto una reducción del peso más conservadora, en torno al 50%, ya que no en cualquier modelo de pinza comercial se podrá realizar una optimización tan extrema.

Para comenzar, se ha tomado un modelo de pinza fija estándar del mismo catálogo de AP Racing [37], esta vez de 4 pistones, modalidad más usada.

Sin embargo, también hay que extrapolar el ahorro de peso a modelos de pinza comerciales para vehículos que ofrecen menos rendimiento. En este caso, lo más común es encontrar modelos de pinza flotante. Según la revista especializada *Car and Driver* [57], el coche más vendido en España en el año 2022 fue el Hyundai Tucson, que monta unas pinzas TRW modelo BHN1139E.

Para la estimación del ahorro en emisiones, se han utilizado los siguientes datos:

- Peso de la pinza AP Racing de 4 pistones: 2,5 kg. Con optimización topológica: 1,25 kg.
Peso total ahorrado entre las 4 pinzas: 6 kg
- Peso de la pinza TRW del Hyundai Tucson: 1,5 kg. Con optimización topológica: 0,63 kg.
Peso total ahorrado entre las 4 pinzas: 2,5 kg
- Datos del RACE [58] y el gobierno de Canadá por los que se sabe que un vehículo consume hasta 0,6 L / 100 km más de combustible por cada 100 kg. Es decir, se consumen 0,006 L / 100 km más de combustible por cada kilogramo extra

- Datos del INE [59] que demuestran que la distancia media recorrida al año por un vehículo personal en España es de 12562,9 km
- Datos del IDAE [60] que especifican que el coche de gasolina promedio emite 2,35 kg de CO₂ por litro consumido de gasolina

La tabla a continuación presenta, así, la estimación en el ahorro de emisiones por vehículos personales:

Estimación de ahorro de emisiones a la atmósfera gracias a la optimización topológica de la pinza de freno		
Concepto	Valor para la pinza fija AP Racing	Valor para la pinza flotante TRW
Distancia media recorrida anual por un turismo	12562,9 km	12562,9 km
Consumo extra por cada kg	0,006 L / 100 km / kg	0,006 L / 100 km / kg
Consumo extra anual por cada kg	75,38 L / kg	75,38 L / kg
Ahorro de peso utilizando 4 pinzas optimizadas	6 kg	2,5 kg
Consumo ahorrado anualmente por la optimización topológica	452,28 L	188,45 L
Emisiones promedio en coche de gasolina por cada L	2,35 kg CO ₂ / L	2,35 kg CO ₂ / L
EMISIONES AHORRADAS AL AÑO POR COCHE	1062,86 kg	442,86 kg

Figura 64. Estimación de ahorro de emisiones a la atmósfera gracias a la optimización topológica de la pinza de freno.
Fuente: elaboración propia

La contribución a la reducción de emisiones es evidente. Pese a que los turismos convencionales tienden a montar pinzas más parecidas a las TRW flotantes, si se consigue un ahorro de peso similar al obtenido en la pinza de este trabajo, se evitarían 442,86 kg de CO₂ emitidos a la atmósfera al año, por cada vehículo. Si se tienen en cuenta los más de 25 millones de turismos que registra la DGT en

Procesos de diseño de componentes con criterios de diseño generativo. Análisis y optimización de una pinza de freno



Anexo II: alineación con ODS

sus bases de datos [61], el ahorro total sería de 11 millones de toneladas de CO₂. Estas cifras son signo evidente de que la optimización topológica como método para reducir el peso de componentes mecánicos tiene un valor muy relevante en el mundo actual.

Procesos de diseño de componentes con criterios de diseño generativo. Análisis y optimización de una pinza de freno



Anexo III: planos de componentes

Anexo III. Planos de piezas comerciales: llanta y pinza de freno

A1 INSTALLATION DRAWING

IF THIS DOCUMENT IS PRINTED IN HARDCOPY, IT IS FOR INFORMATION USE ONLY AND THEREFORE IS NOT SUBJECT TO UPDATING CONTROLS. ALWAYS REFER TO SOLIDWORKS VIEWER FOR LATEST ISSUE



THIS DRAWING IS CONFIDENTIAL AND IS SUPPLIED ON THE EXPRESS CONDITION THAT IT SHALL NOT BE LOANED OR COPIED OR DISCLOSED TO ANY OTHER PERSON OR USED FOR ANY OTHER PURPOSE WITHOUT THE WRITTEN CONSENT OF AP RACING LTD.

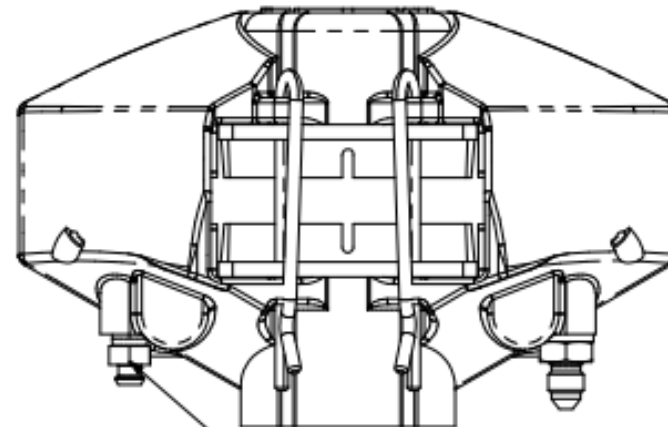
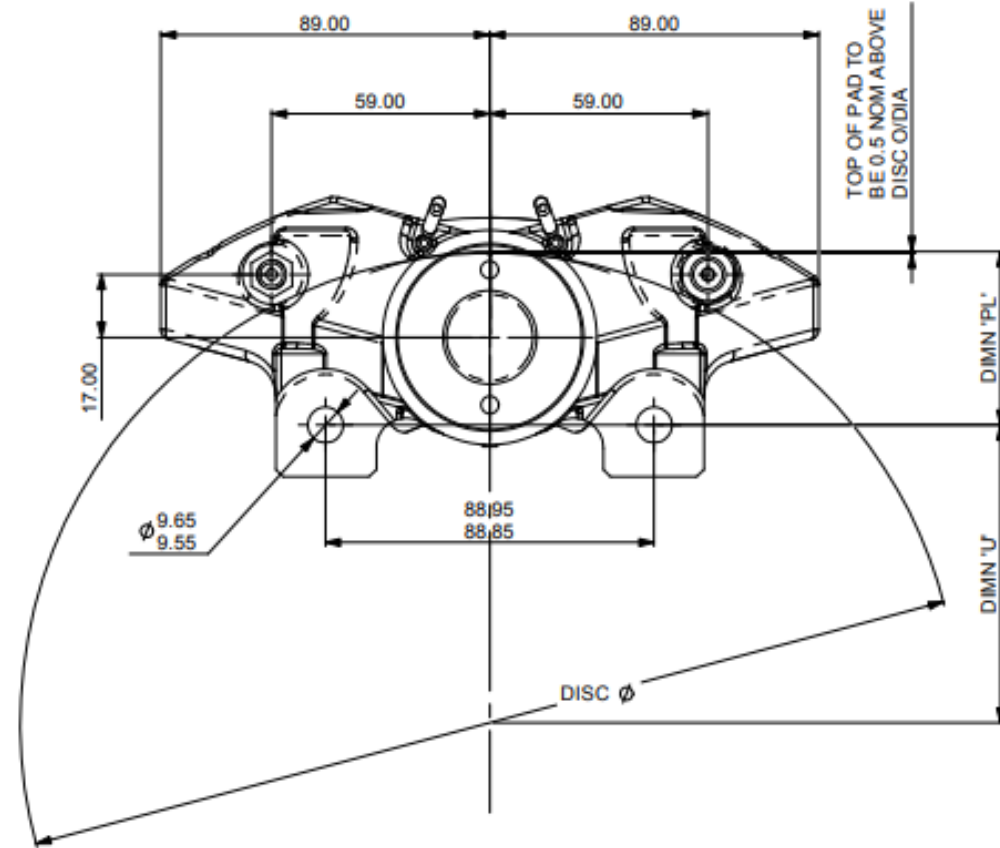
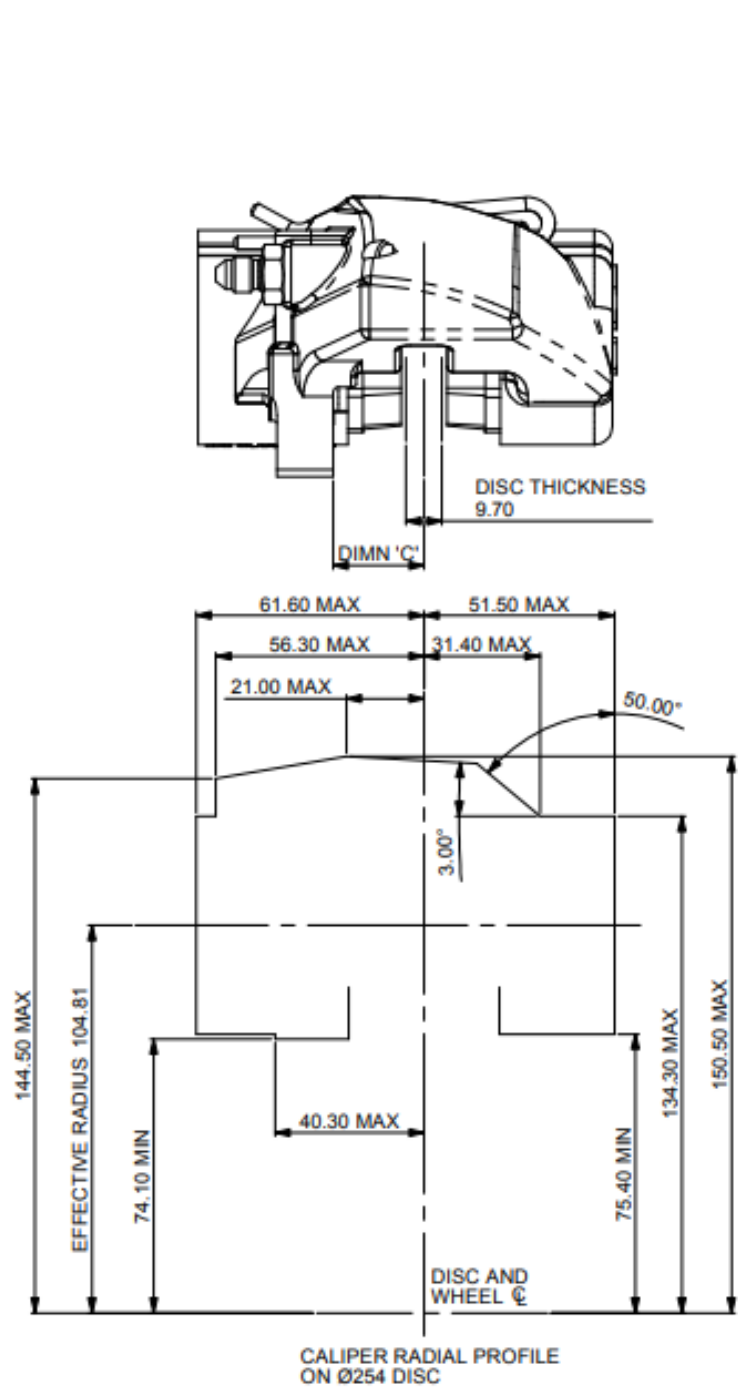


AP Racing
Wheler Road
Coventry
CV3 4LB

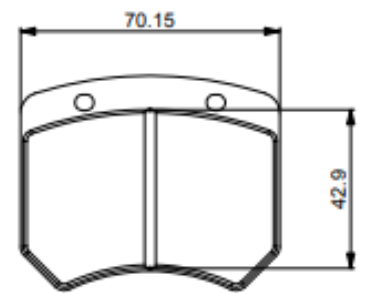
Tel: +44 (0) 24 7663 9595
Fax: +44 (0) 24 7663 9599
e-mail: engineering@apracings.com
Web site: http://www.apracings.com

© AP Racing Ltd. 2005

Issue No.	Alterations		Zone	Initials
	Date & No.	Particulars		
1	09/06/08 B5164	FIRST ISSUE		



BLEED SCREW TIGHTENING TORQUE 17.0MN (12.5 Lbft)



PAD FAMILY CP2399
PAD AREA - 27.38 cm²
PAD VOLUME - 28.75 cm³

GENERAL DESCRIPTION

THIS IS A TWIN OPPOSED BORE ONE PIECE CAST CALIPER, DESIGNED TO OPERATE ON A SOLID IRON DISC FROM 10.0" (254.0mm) TO 10.5" (266.7mm). OF THICKNESS 0.38" (9.70mm)

TECHNICAL DATA

PISTON DIA- 2 x 1.75" (44.5mm)
TOTAL PISTON AREA- 4.81in² (31.04 cm²)
PISTON MATERIAL - ALUMINIUM ALLOY
BODY MATERIAL - ALUMINIUM ALLOY
ALL HYDRAULIC THREADS - 3/8" x 24 UNF

DETAILS

DIMN 'PL' - TOP OF PAD MATERIAL TO MOUNTING HOLE C
DIMN 'U' - WHEEL CENTRE TO MOUNTING HOLE C
= (DISC DIA/2) +0.5 - 'PL' DIMN
EFFECTIVE RAD - RADIUS FROM WHEEL C TO PISTON C

CALIPER PART No.

CP2577-3E0 - UNHANDED CALIPER

INSTALLATION INFORMATION

DISC AND CALIPER MOUNTING TOLERANCES TO BE SUCH THAT THE DISC IS CENTRAL TO THE CALIPER TO WITHIN ±0.5mm

CALIPER IS HANDED BY SWITCHING POSITIONS OF BLEED SCREW AND INLET PORT.
CALIPER TO BE MOUNTED ON ITS SIDE, WITH BLEED SCREW UPPERMOST.

REPLACEMENT SEAL KIT

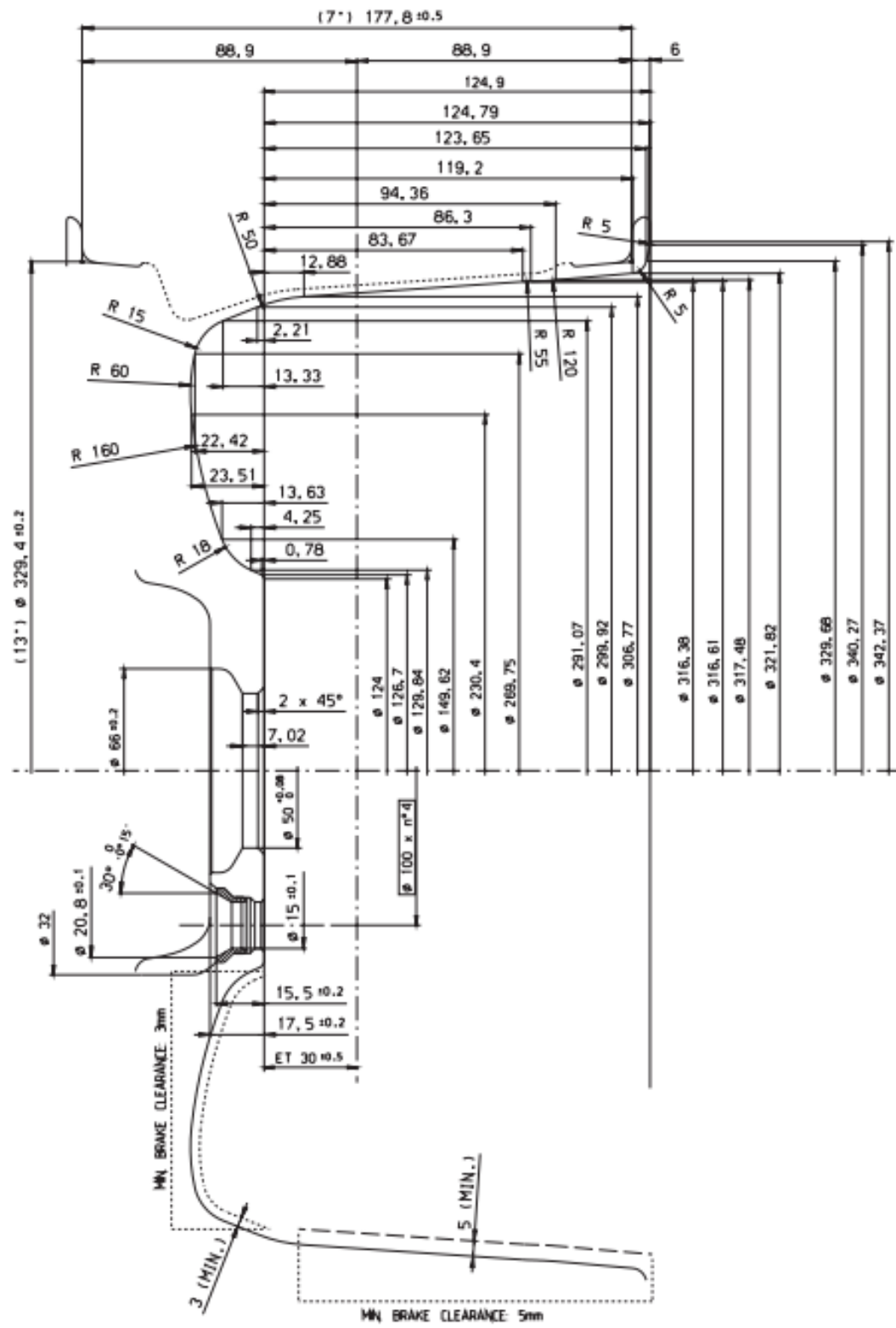
SEAL KIT (HIGH TEMP) CP4518-L

CALIPER PART No.	OFFSET DIMN 'C'	DIMN 'PL'
CP2577-3E0	24.6	46.97
CP2577-14E0	20.6	49.0

SCALE 2:1	SHEET 1 OF 1
DRAWN	D.ARROWSMITH
APPROVED	
DERIVED FROM	
TITLE 2 PISTON CALIPER	
DRG NO.	CP2577-1CD



WHEEL SECTION PROFILE



HUB DESIGN: SUGGESTED DIMENSIONS

