

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES (GITI)

TRABAJO FIN DE GRADO – MEMORIA FINAL

APLICACIÓN DEL DISEÑO LIGERO GENERATIVO
PARA LA REDUCCIÓN DE LA HUELLA ECOLÓGICA
Y EL INCREMENTO DE LA EFICIENCIA DE COMPONENTES
EN EL SECTOR DEL TRANSPORTE

Autor: Rubén Yagüe Núñez.

Director: Mariano Jiménez Calzado.

Codirector: Xavier Soldani.

Firma del Autor: Rubén Yagüe Núñez



Firma del Director: Mariano Jiménez Calzado



Firma del Codirector: Xavier Soldani



Madrid

Junio de 2025.

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
**APLICACIÓN DEL DISEÑO LIGERO GENERATIVO PARA LA REDUCCIÓN
DE LA HUELLA ECOLÓGICA Y EL INCREMENTO DE LA EFICIENCIA DE
COMPONENTES EN EL SECTOR DEL TRANSPORTE**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico **2024-2025** es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro,
ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: **Rubén Yagüe Núñez** Fecha: **23 / Junio / 2025**



Autorizada la entrega del proyecto
EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: **Mariano Jiménez Calzado** Fecha: **23 / Junio / 2025**



Fdo.: **Xavier Soldani** Fecha: **23 / Junio / 2025**



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES (GITI)

TRABAJO FIN DE GRADO – MEMORIA FINAL

APLICACIÓN DEL DISEÑO LIGERO GENERATIVO
PARA LA REDUCCIÓN DE LA HUELLA ECOLÓGICA
Y EL INCREMENTO DE LA EFICIENCIA DE COMPONENTES
EN EL SECTOR DEL TRANSPORTE

Autor: Rubén Yagüe Núñez.

Director: Mariano Jiménez Calzado.

Codirector: Xavier Soldani.

Firma del Autor: Rubén Yagüe Núñez



Firma del Director: Mariano Jiménez Calzado



Firma del Codirector: Xavier Soldani



Madrid

Junio de 2025.

Resumen del proyecto

Título:

APLICACIÓN DEL DISEÑO LIGERO GENERATIVO PARA LA REDUCCIÓN DE LA HUELLA ECOLÓGICA Y EL INCREMENTO DE LA EFICIENCIA DE COMPONENTES EN EL SECTOR DEL TRANSPORTE

Autor: Yagüe Núñez, Rubén

Director: Jiménez Calzado, Mariano

Codirector: Soldani, Xavier

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

Resumen corto:

En este proyecto se ha aplicado la tecnología de ingeniería inversa y diseño generativo en el soporte delantero del motor del Opel Corsa. Se han determinado las especificaciones de diseño y se ha llegado a una geometría optimizada un 12,3% más ligera. Se han fabricado dos prototipos por impresión 3D, uno con tecnología de filamentos y otro de polvo. Finalmente, se ha comparado el coste y el impacto en la huella de carbono de la pieza original fabricada por fundición de aluminio y la pieza optimizada para ser fabricada por impresión metálica.

Palabras clave:

Soportes del motor
Ingeniería inversa
Diseño generativo
Optimización topológica
Fabricación aditiva
Impresión 3D
Huella ecológica

Resumen detallado:

El sistema de soporte del motor es esencial en los vehículos de combustión interna. Cuando el motor está situado de forma transversal, este sistema suele estar formado por cuatro soportes distintos, que están fabricados de fundición de aluminio y con una interfaz de caucho para reducir las vibraciones. En este proyecto, se ha rediseñado el soporte delantero del motor de un *Opel Corsa* con criterios de diseño ligero generativo, buscando la reducción de la huella ecológica.

En primer lugar, se ha analizado en profundidad el sistema de soportes en automóviles. Se ha propuesto un estado de cargas realista a partir del peso estático del motor y de la reacción frente a una frenada brusca del vehículo. Para tener en cuenta los efectos dinámicos, se han ponderado por dos las cargas calculadas.

Al mismo tiempo, se ha empleado la herramienta de ingeniería inversa para capturar la geometría original del soporte. Se ha empleado el escáner industrial *HANDYSCAN* y el software de procesado del escaneado *VX* para obtener de la pieza un archivo CAD. Mediante la medida física de sus dimensiones relevantes y de su peso en una báscula (600g), se ha verificado que la geometría capturada coincide con la real.

A continuación, usando el software de *SolidWorks*, se ha realizado una simulación por elementos finitos (FEM) para verificar que el estado de cargas propuesto es razonable. A partir de estos datos se ha creado un plano técnico de la pieza original. Con una geometría y un estado de cargas verificado, se ha construido una nueva geometría del soporte que será la forma inicial en la reducción del material por diseño generativo.

Con una geometría de partida que conserva las interfaces clave de la pieza original, se han establecido las especificaciones del diseño generativo. Concretamente, las regiones preservadas y los límites de tensión y rigidez lateral han sido fijados. Empleando el módulo de *Diseño Generativo* del software de *Solid Edge*, se ha realizado la optimización topológica a través de reducciones sucesivas y crecientes del material, obteniendo una geometría límite con un 15% menos de masa.

Mediante el software de *Altair Inspire* se ha suavizado la geometría optimizada y se han mejorado algunas zonas que tenían problemas de agujeros internos y espesores delgados. Tras estas modificaciones, la masa de la pieza optimizada y refinada sería de unos 526g, por lo que la reducción de peso final sería de un 12,3%.

La geometría que se obtiene del diseño generativo es orgánica y compleja, difícil de conseguir por métodos de fabricación tradicionales. La fabricación aditiva permite la impresión 3D de este tipo de piezas y su uso está muy extendido en la creación rápida de prototipos. En concreto, en este proyecto se han fabricado 2 prototipos por distintas tecnologías: en filamentos por *Fused Deposition Modeling* (FDM) y en polvo por *Multi Jet Fusion* (MJF). También se han estimado los costes del prototipado.

Para la integración del componente en el sistema de soportes real del vehículo, la pieza optimizada debe ser fabricada por impresión metálica. La tecnología de fusión en lecho de polvo o *Powder Bed Fusion* (PBF), permite la transformación del polvo metálico Al-Si10Mg en una pieza de responsabilidad. Sin embargo, tanto los costes de producción como el impacto ambiental de esta tecnología son mayores en comparación con la fundición a presión de aluminio. Esta última tecnología sigue siendo la indicada para la producción de piezas de responsabilidad en tamaños de lote grandes.

En concreto, para el sector del transporte por tierra, la reducción de las emisiones por optimización de la masa de sus componentes requiere necesariamente de una extensión de la vida útil de la pieza o de reducciones mayores a las obtenidas en este proyecto. Un incremento en la vida de los soportes del motor actualmente no es posible, ya que requieren una sustitución completa cada vez que su caucho se desgasta.

No obstante, la tecnología de impresión metálica sí que tiene mayor impacto en el sector aeroespacial. En particular, se emplea en tamaños de lote reducidos, donde la reducción del peso es clave para ahorrar combustible y disminuir las emisiones durante el ciclo de vida completo de los componentes.

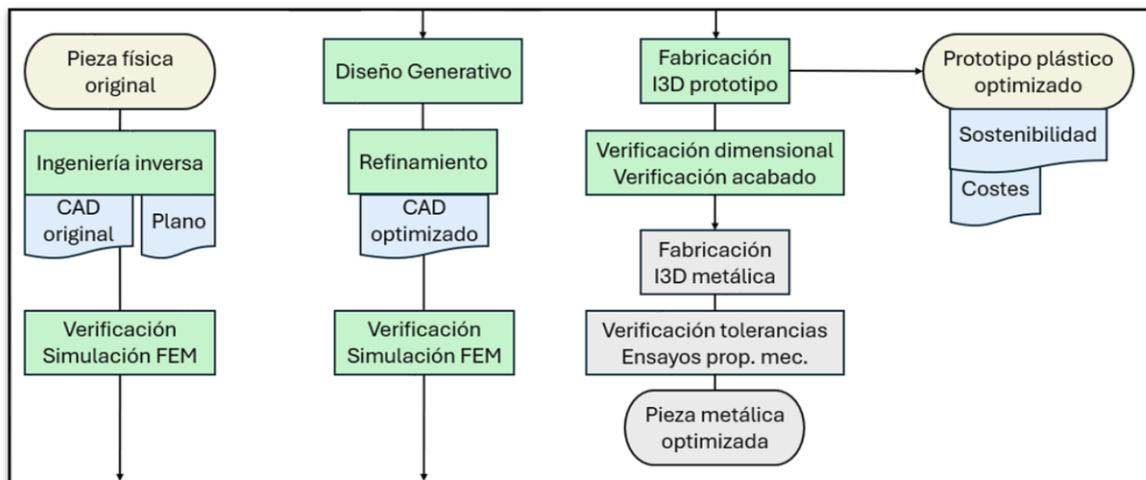


Figura 1: Flujo de trabajo del proyecto. En verde los procesos realizados, en azul los archivos obtenidos y en gris los desarrollos futuros.

Abstract

Title:

GENERATIVE DESIGN APLICATION FOR THE REDUCTION OF THE ECOLOGICAL FOOTPRINT AND THE IMPROVEMENT OF COMPONENT EFICIENCY IN THE TRANSPORT SECTOR

Author: Yagüe Núñez, Rubén

Director: Jiménez Calzado, Mariano

Co-director: Soldani, Xavier

Colaborating entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

Short abstract:

In this project, reverse engineering and generative design technologies have been applied to the front engine mount of the Opel Corsa. The design specifications were defined, resulting in an optimized geometry which is 12.3% lighter. Two prototypes were manufactured using 3D printing: one with filament-based technology and another with powder-based technology. Finally, the cost and carbon footprint of the original aluminium casting component were compared to those of the optimized part designed for metal additive manufacturing.

Key words:

Engine mounts
Reverse engineering
Generative design
Topology optimization
Additive manufacturing
3D printing
Ecological footprint

Detailed abstract:

The engine mounting system is essential in internal combustion vehicles. When the engine is transversely mounted, this system is usually composed of four different mounts, made of aluminium casting with a rubber interface to reduce vibrations. In this project, *Opel Corsa's* front engine mount has been redesigned through generative lightweight design criteria, aiming to reduce the ecological footprint.

First, the engine mount system in automobiles was thoroughly analysed. A realistic load condition was proposed based on the static weight of the engine and the reaction force during a sudden braking of the vehicle. To account for dynamic effects, the calculated loads were doubled.

At the same time, reverse engineering tools were used to capture the original geometry of the mount. The *HANDYSCAN* industrial scanner and the *VX* scanning software were used to obtain a CAD file. Through physical measurement of its relevant dimensions and scale weighting (600g), it was verified that the captured geometry matched the actual component.

Next, using *SolidWorks* software, a Finite Element Method (FEM) simulation was carried out to confirm that the proposed load condition was reasonable. Based on this data, a technical drawing of the original part was created. With the verified geometry and load conditions, a new mount geometry was developed to serve as the starting point for material reduction through generative design.

Starting from a geometry that preserves the key interfaces of the original part, the specifications for the generative design were established. Specifically, the preserved regions and the limits for stress and lateral stiffness were defined. Using the *Generative Design* module of *Solid Edge* software, topological optimization was performed through successive and increasing material reductions, resulting in a final geometry with 15% less mass.

The optimized geometry was then refined using *Altair Inspire* software. Smoothing the surface and improving some inner holes and thin connections were the main steps done. After these modifications, the mass of the optimized and refined part was about 526g, representing a final weight reduction of 12.3%.

The geometry resulting from generative design is organic and complex, making it difficult to manufacture using traditional methods. Additive manufacturing allows for 3D printing of such components and is widely used in rapid prototyping. In this project, two prototypes were produced using different technologies: filament-based with Fused Deposition Modeling (FDM) and powder-based with Multi Jet Fusion (MJF). The prototyping costs were also estimated.

To integrate the component into the actual engine support system of the vehicle, the optimized part must be manufactured using metal printing. Powder Bed Fusion (PBF) technology enables the transformation of Al-Si10Mg metal powder into a high-responsibility part. However, both the production costs and environmental impact of this technology are higher compared to aluminium die casting. The latter is still the preferred method for producing high-responsibility parts in large batch sizes.

Specifically, for the land transport sector, emission reductions through mass optimization of components require either a longer part lifespan or greater weight savings than those achieved in this project. Increasing the lifespan of engine mounts is currently not feasible, as they need to be completely replaced once the rubber wears out.

Nevertheless, metal printing technology has a greater impact in the aerospace sector. In particular, it is used in small batch sizes, where weight reduction is crucial for saving fuel and reducing emissions throughout the entire lifecycle of the components.

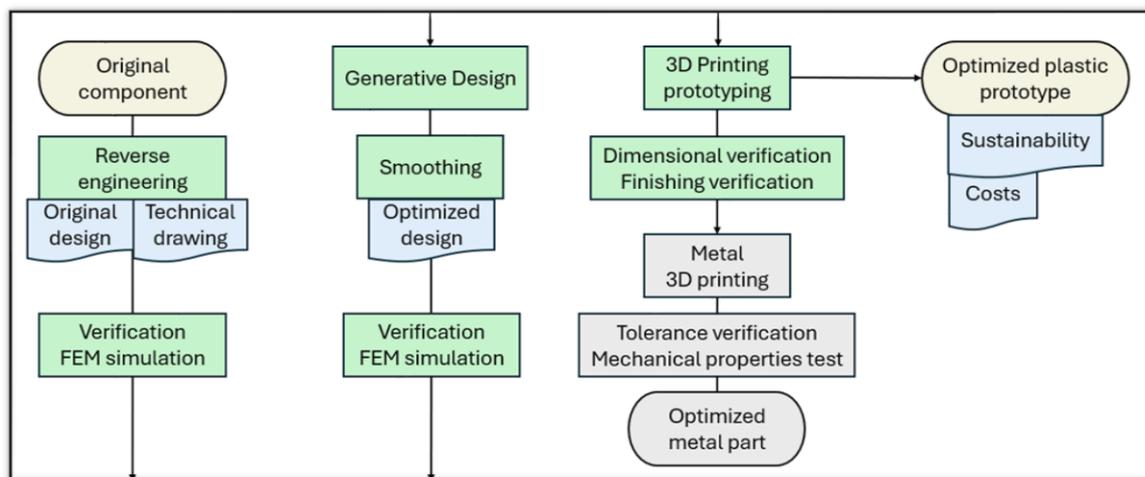


Figure 1: Project workflow. Processes completed are shown in green, files obtained in blue, and future developments in gray.

Source: own source

Contenido

Resumen del proyecto	4
Abstract	7
Capítulo 1. Introducción.....	13
1.1. Contexto actual en la industria de la fabricación	13
1.2. Motivación y propuesta de estudio.....	15
1.3. Objetivos del proyecto y alineación con los ODS.....	18
Capítulo 2. Estado del arte	19
2.1. Fabricación Aditiva	19
2.2. Diseño Generativo.....	23
2.3. Ingeniería inversa	26
2.4. Sostenibilidad y huella ecológica.....	28
2.5. Soportes del motor en automóviles	30
Capítulo 3. Metodología y recursos empleados.....	34
Capítulo 4. Implantación	35
4.1 Ingeniería inversa.....	35
4.1.1. Escaneado 3D.....	35
4.1.2. Procesado del escaneado.....	37
4.3. Determinación de la masa y geometría de la pieza original	41
4.2. Propuesta de estado de cargas.....	43
4.2.1. Consideraciones previas	43
4.2.2. Estructura propuesta	44
4.2.3. Cálculo de reacciones estáticas	46
Peso del sistema motriz	46
Fuerzas de inercia por frenada	48
4.2.4. Ponderación dinámica de las cargas	50
4.2.5. Análisis de sensibilidad.....	51
Sensibilidad de la reacción vertical por cálculo multivariable	52
Sensibilidad de la reacción vertical por simulación gráfica	54
4.3. Simulaciones y verificación.....	56
4.3.1. Consideraciones previas	56
4.3.2. Simulaciones	58

Peso del sistema motriz	58
Fuerzas de inercia por frenada	59
Combinación de acciones	60
Determinación de la rigidez	61
4.4. Diseño generativo	63
4.4.1. Construcción de un diseño de entrada	63
4.4.2. Simulación del diseño de entrada	65
4.4.3. Objetivos, especificaciones y parámetros de diseño	67
4.4.4. Ejecución de los diseños generativos	69
Iteraciones iniciales	69
Iteraciones definitivas	70
4.4.5. Elección de un diseño adecuado y refinamiento	77
4.5. Fabricación aditiva de un prototipo	78
4.5.1. Tecnología filamentos FDM	78
4.5.2. Tecnología polvo MJF	80
4.6. Análisis de costes e impacto ambiental	82
4.6.1. Costes del prototipado	82
Tecnología filamentos FDM	82
Tecnología polvo MJF	83
4.6.2. Costes fabricación final: fundición vs impresión metálica	83
4.6.3. Impacto ambiental: fundición vs impresión metálica	85
Alcance del estudio	85
Obtención de la materia prima	85
Procesos de fabricación	86
Vida útil de los componentes	89
Capítulo 5. Resultados	90
Capítulo 6. Conclusiones y desarrollos futuros	92
Bibliografía	94
Anexos	98
Planos	99

Capítulo 1. Introducción

1.1. Contexto actual en la industria de la fabricación

En las últimas décadas, ha surgido un gran interés en la industria para reducir la materia prima empleada en sus procesos de fabricación y en sus productos. El énfasis en la etapa de diseño de un producto, la adecuada formación de la mano de obra, la optimización de procesos o la actualización frecuente del inventario son algunas de las múltiples medidas empresariales e industriales para conseguir este objetivo. Todo ello se puede enmarcar en el contexto más amplio de las conocidas como fabricación apretada o la fabricación ágil. La fabricación apretada (*lean manufacturing*) es un modelo de gestión de origen japonés que busca una producción rápida y eficiente, reduciendo las pérdidas tanto de materia prima como de productividad. Por otro lado, la fabricación ágil (*agile manufacturing*) busca una producción flexible, que pueda adaptarse rápidamente a los cambios del mercado. En definitiva, cuando se complementan, la fabricación apretada y ágil (*leagile manufacturing*) buscan aprovechar al máximo los recursos disponibles ofreciendo respuestas rápidas para mantener la competitividad en un mercado cambiante como el de hoy en día. [1]



Figura 2 : Sinergias entre la fabricación aditiva y la “leagile manufacturing”
Fuente: elaboración propia.

Estas prácticas, permiten reducir los costes directos de fabricación y además son ecológicas ya que normalmente reducen los desechos industriales. Estos residuos son el resultado natural e indeseado de los procesos de fabricación tradicionales, normalmente sustractivos y por tanto generadores de material extruido. Por el contrario, la fabricación aditiva, coloquialmente llamada impresión 3D, elimina la mayor parte del material

desperdiciado. Adicionalmente, la fabricación aditiva permite simplificar la cadena de producción y suministro, facilitar el prototipado y reducir el tamaño del inventario, entre otras ventajas. Es por ello por lo que se asocia mucho la fabricación aditiva con la corriente *leagile manufacturing*. Las sinergias entre estas herramientas muestran en la Figura 2.

Asimismo, también se busca reducir la huella ecológica no sólo a través del ahorro de material, sino también a través del ahorro energético. La sustitución de métodos de fabricación tradicionales por otros con menores emisiones contaminantes es una opción que la industria de la fabricación debe considerar para mejorar su impacto medioambiental. La fabricación aditiva, una industria emergente y altamente electrificada se posiciona como una alternativa ecológica a los procesos de fabricación tradicionales. [2], [3]

Además del interés de los fabricantes en reducir el consumo de recursos para una fabricación más económica y ecológica, también existe una filosofía en la industria del transporte que busca vehículos más ligeros. De esta forma, se consigue mayor eficiencia en cada viaje porque se reduce el consumo de combustible o electricidad en las aceleraciones. Adicionalmente, los vehículos ligeros son más fáciles de maniobrar y en ellos se disminuye el desgaste de sus componentes.

Para conseguir menor peso es necesario la incorporación de herramientas de cálculo matemático y de inteligencia artificial como la optimización topológica o el diseño generativo. Las piezas que se optimizan de esta manera suelen tener geometrías complejas, elevando los costes o incluso imposibilitando su fabricación por tecnologías tradicionales. Es por ello por lo que la fabricación aditiva adopta un papel esencial en la producción de piezas cuyo diseño ha sido previamente optimizado por ordenador.

En este proyecto se va a estudiar el alcance del diseño generativo como herramienta de diseño iterativo impulsado por modelos de inteligencia artificial (IA). Se plantea un caso de un soporte de motor de un vehículo para aumentar su ligereza sin perder rigidez ni resistencia. Se definirán las condiciones y parámetros de diseño y se explorará la gama de diseños generados por IA. Por último, se escogerá un diseño adecuado y se realizará un estudio de sostenibilidad para la fabricación de la pieza.

1.2. Motivación y propuesta de estudio

Con la llegada de la transición ecológica, el sector del transporte está sufriendo una transformación hacia la electrificación y la reducción de emisiones. La fabricación de vehículos más ligeros permite reducir el consumo de combustible en los vehículos de combustión y aumentar la autonomía de los eléctricos. Además, con la incorporación de baterías pesadas en los coches o motocicletas eléctricas, la necesidad de reducir su masa e incrementar su eficiencia son objetivos de diseño a considerar.

En el presente Trabajo de Fin de Grado (TFG) se aplicarán las herramientas de diseño generativo y las tecnologías de fabricación aditiva para el rediseño de un soporte de motor de un vehículo, con el fin de optimizar su distribución de material y hacer este componente más ligero. A pesar de que la pieza ya está optimizada con vaciados y nervaduras, se hará un rediseño desde cero usando la metodología del diseño generativo y se compararán la geometría final con la original. Adicionalmente, se realizará un estudio de la sostenibilidad sobre el proceso de fabricación. Varias fotografías de la pieza a optimizar se muestran a continuación:



*Imagen 1: Soporte delantero de motor del Opel Corsa.
Fuente: recambios AUTODOC [4].*

*Imagen 2: Pieza física sobre la que se va a apoyar el proyecto
Fuente: elaboración propia.*

Cortesía del taller mecánico Mar Oceana en Las Rozas de Madrid.

La obtención física de la pieza ha supuesto un gran aprendizaje personal en el sistema de soportes del motor en automóviles. Por ello, el proceso completo de elección de la pieza se describe a continuación.

Originalmente se buscaba optimizar el soporte de un capó de un vehículo, ya que los soportes son piezas típicas de optimización de masa. No obstante, tras un análisis más detallado se descartó esta pieza: se puede ver en la Imagen 3 que está fabricada en una chapa de un espesor pequeño por lo que ya es suficientemente ligera la pieza.



*Imagen 3: Soporte del capó de un automóvil
Fuente: elaboración propia.*

Continuando con la búsqueda de piezas tipo soporte, se visitaron múltiples talleres de coche. Hay que agradecer el servicio a los talleres *Rocauto* y *Mar Oceana* en Las Rozas de Madrid, ya que ofrecieron acceso a varias piezas y además explicaron su funcionamiento. Al final se obtuvieron varios soportes de motor: un soporte delantero, otro trasero y tres soportes laterales antivibración diferentes (ver Imagen 4). El propósito de estas piezas es apoyar el motor al chasis, pero aislando las vibraciones de aquel. Por ello se emplean gomas elásticas, que aseguran un apoyo amortiguado.



*Imagen 4: Soportes de motor y su denominación según el plano de la Figura 12.
Fuente: elaboración propia.*

En la Figura 12 se puede ver un plano de los distintos soportes en un Opel Corsa C, turismo del 2001 cuya nueva generación se sigue fabricando en Figueruelas, Zaragoza. De hecho, según la consultora Inovev fue el automóvil más producido en España con 225.000 unidades. [5]

Estos soportes se componen de una pieza metálica y una goma. Debido al desgaste del material elástico la pieza completa suele necesitar sustitución cada cierto tiempo. El fabricante *GMT Rubber* asegura que estos soportes deberían durar entre cinco y siete años. [6] La refaccionaria *ERSO* recomienda sustituirlos cada 80.000 o 100.000 km, o cada 50.000 si es un vehículo de trabajo. [7]. Se comprende ahora que estas piezas fallan por el desgaste de la goma y nunca por la aparición de grietas o por deformación plástica en el soporte metálico. Estas piezas se pueden optimizar para reducir su peso y, de hecho, el soporte delantero nº1 ya parece tener elementos de optimización de masa debido a la existencia de nervaduras y vaciados.

Finalmente, la pieza escogida entre las mostradas en la imagen 4 es el soporte delantero nº1. A diferencia del soporte lateral nº5 o 10, en el soporte seleccionado no hay tantas cargas de choque o de impacto en la goma. Estos fenómenos se discutirán en el siguiente capítulo. Este soporte ya parece optimizado, pero se realizará la optimización desde su geometría básica (espacio de diseño) con técnicas de diseño generativo.

1.3. Objetivos del proyecto y alineación con los ODS

El objetivo principal de este TFG es el siguiente:

- Aplicar las herramientas de diseño generativo para el diseño y fabricación ligera de una pieza.

En particular, se emplearán algoritmos impulsados por IA para generar una gama de soluciones de diseño ligeras para el soporte frontal del motor del Opel Corsa. Los objetivos específicos en este proyecto también se exponen a continuación:

- Comparar proceso de diseño generativo en fabricación aditiva frente al flujo de trabajo de la fabricación tradicional.
- Explorar las tecnologías de ingeniería inversa y fabricación aditiva en el contexto del diseño mecánico.
- Realizar un estudio de la sostenibilidad de la pieza a fabricar.

Se alinea con el objetivo 12: Producción y consumo responsables. En concreto con la meta 12.7, que afirma lo siguiente:

“Alentar a las empresas, en especial las grandes empresas y las empresas transnacionales, a que adopten prácticas sostenibles e incorporen información sobre la sostenibilidad en su ciclo de presentación de informes” [12]

Con la fabricación aditiva se reduce al mínimo el desperdicio de material y se consume menor cantidad de energía (eléctrica) para la producción, en comparación con métodos de fabricación tradicionales. En el presente trabajo se analizará este parámetro en la fabricación de la pieza.

Con herramientas de IA como el diseño generativo se puede reducir el material empleado en la fabricación de piezas, directamente reduciendo la huella ecológica e indirectamente en su incorporación a componentes que serán más eficientes. También se evaluará la reducción del material empleado en la pieza.

Capítulo 2. Estado del arte

2.1. Fabricación Aditiva

La fabricación aditiva, comúnmente conocida como Impresión 3D, ha revolucionado la industria de la fabricación. Según un informe de Markets & Markets de 2024, actualmente tiene un valor de mercado de 17.000 millones de dólares y se estima que se duplique en los próximos 5 años. [8] Esta tecnología construye los modelos y las piezas mediante la unión, deposición o solidificación capa por capa del material. De esta forma, se caracteriza por ser un método de fabricación aditivo (añade poco a poco material), a diferencia de la fabricación tradicional que suele ser sustractiva (a partir de un bloque de material, se mecaniza para dar forma a la pieza final). Esto quiere decir que reduce significativamente el desperdicio de material en la fabricación.

Concretamente, en la industria automotriz, la fabricación aditiva tiene un papel fundamental. Se introdujo en el sector como una herramienta rápida de prototipado y hoy en día se usa tanto para la fabricación de piezas de repuesto como el desarrollo de productos finales. Ya se están produciendo componentes como intercambiadores de calor, turbocompresores, sistemas cilindro pistón o soportes ligeros. [9]

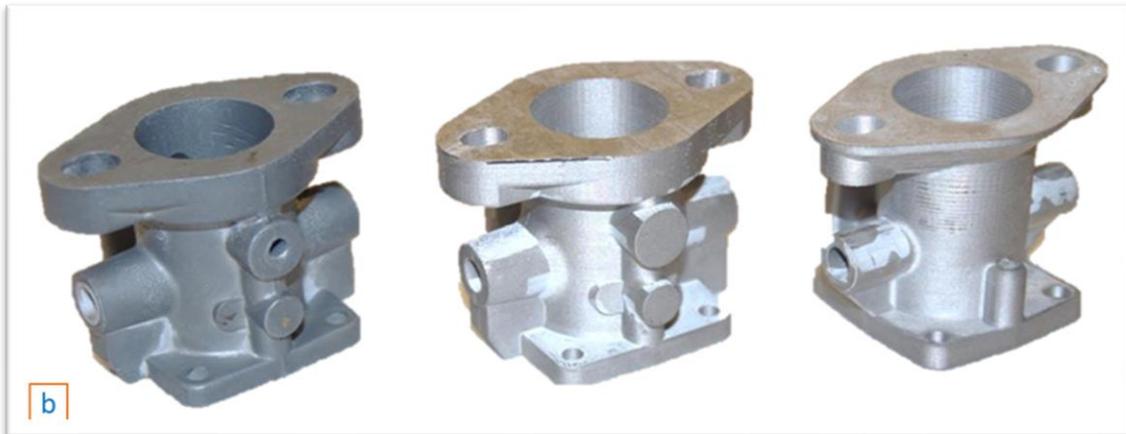


Imagen 5: Carburador original (izquierda) e impresiones para el recambio de la pieza (centro y derecha).

Fuente: A Review of Automotive Spare-Part Reconstruction Based on Additive Manufacturing [10]

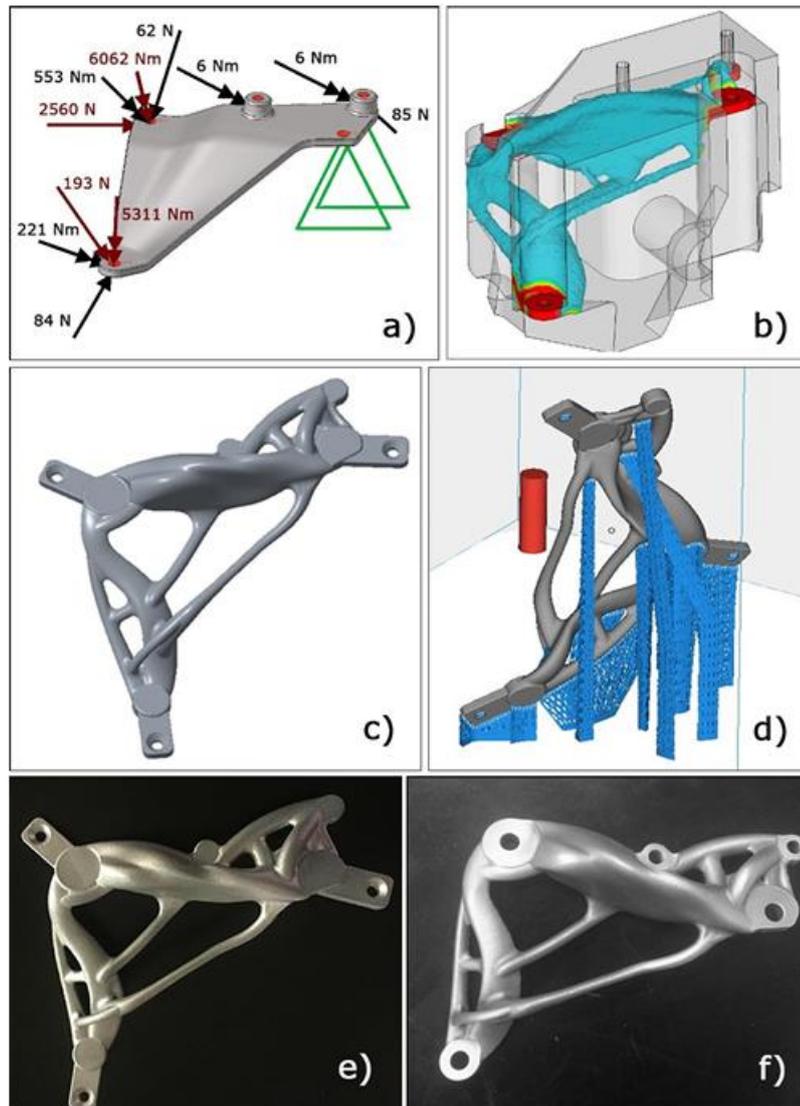


Figura 3: Aplicación de la optimización topológica para la fabricación ligera por impresión 3D de un soporte de un motor eléctrico.
Fuente: Design for Additive Manufacturing and for Machining in the Automotive Field [11]

Para prototipado rápido o para la fabricación final piezas de baja resistencia mecánica, existen múltiples tecnologías de impresión 3D. Adicionalmente, se ha desarrollado la impresión metálica, para la fabricación de componentes finales de responsabilidad. Todas estas tecnologías se pueden clasificar en función del estado base del material que conformará las piezas. Este estado puede ser sólido (como los hilos o filamentos), líquido (como las resinas curadas) o en polvo:

- Material base sólido:** La tecnología de extrusión de filamentos o *Fused deposition modeling* (FDM), parte de bobinas de filamentos termoplásticos que son calentados y depositados capa por capa por un extrusor. Es la más extendida de este tipo.

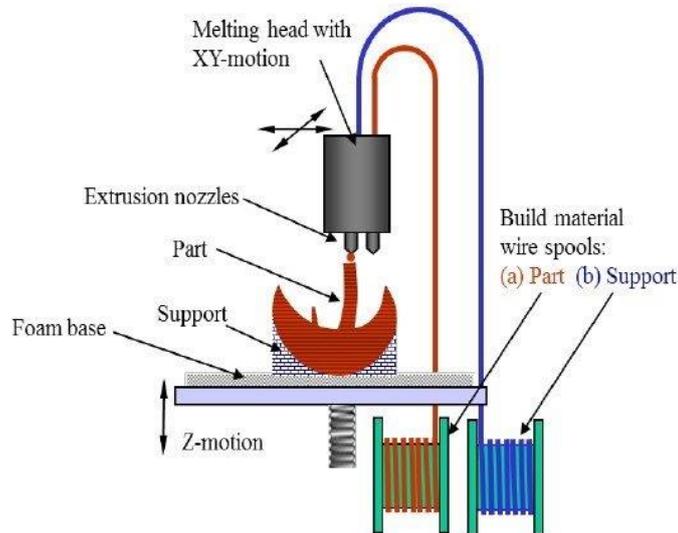


Figura 4: Diagrama de la tecnología FDM.

Fuente: Artículo sobre el acabado superficial de la tecnología FDM. [12]

- Material base líquido:** La impresión a partir de material líquido se basa en la polimerización de la resina gracias a la incidencia de un láser o luz. Las tecnologías más empleadas son la estereolitografía (SLA) y la Fotopolimerización por luz o *Direct Light Processing* (DLP).

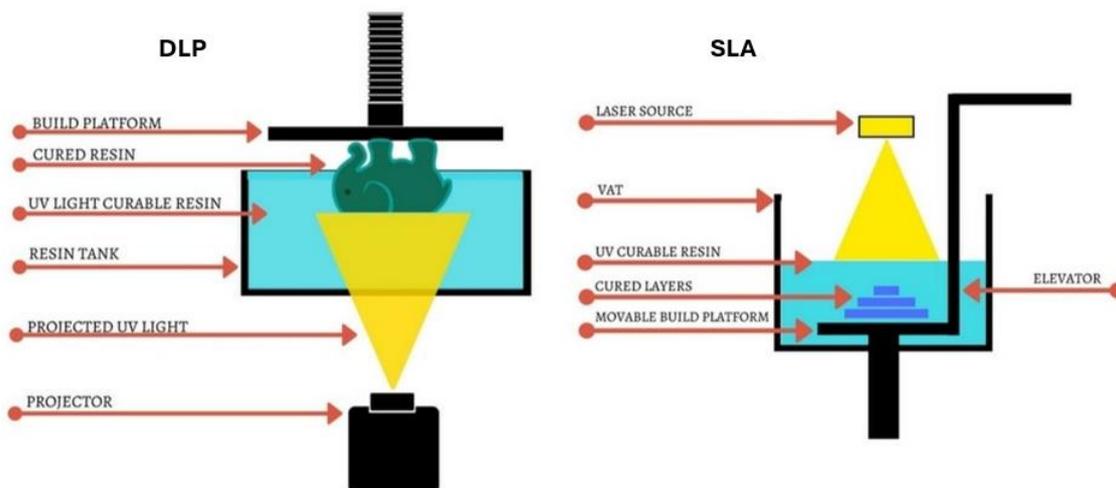


Figura 5: Diagramas de las tecnologías DLP y SLA.

Fuente: Revista digital Manufactur3D. [13]

- Material base en polvo:** Varias tecnologías en impresión plástica y metálica usan este tipo de material base. Estas tienen la particularidad de que no requieren material de soporte. Para la impresión metálica se emplean la fusión en lecho de polvo o *Powder Bed Fusion (PBF)* y la deposición de energía focalizada o *Direct Energy Deposition (DED)*. Ambas funden el material por medio de un láser. [14]

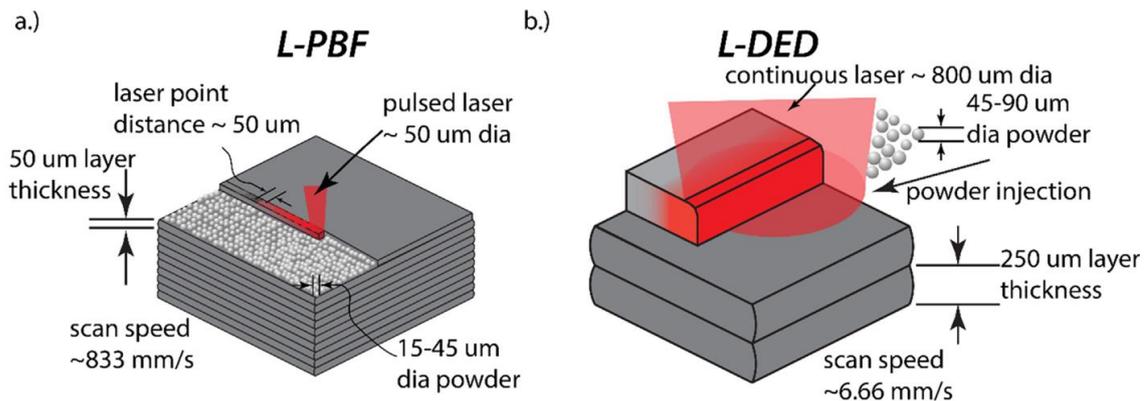


Figura 6: Diagramas de las tecnologías DED y PBF.

Fuente: Comparativa de las tecnologías de impresión metálica en polvo. [14]

La tecnología PBF cubre el 54% del mercado de impresión metálica y consiste generalmente en un láser que funde el polvo metálico que descansa en una bandeja. Se emplea para piezas de dimensiones medianas, ya que están limitadas por el tamaño de la impresora. La tecnología DED cubre el 16% del mercado de impresión metálica, y se parece más a la impresión plástica de deposición fundida, ya que un extrusor deposita el material que es inmediatamente fundido por un láser. Esta última tecnología permite además la reparación de componentes defectuosos o dañados. [9]

Existen además líneas de investigación que estudian la reusabilidad del polvo metálico y el reciclaje de las piezas metálicas. No obstante, se está buscando formas de garantizar la alta fiabilidad de las piezas fabricadas con estos residuos. Estas verificaciones son necesarias para industrias como la aeroespacial y la automotriz, que requieren altos estándares de calidad y poca variabilidad en las propiedades mecánicas, térmicas y superficiales de sus piezas para así poder escalar su producción y fabricar en masa sin riesgo a los usuarios. [15]

2.2. Diseño Generativo

En el contexto de la Industria 4.0 y la irrupción de la digitalización y la Inteligencia Artificial (IA), debemos revisar su impacto en la industria de la fabricación. Los avances en IA y en desarrollo de modelos han supuesto la aparición de herramientas de diseño como la optimización topológica y el diseño generativo. Ambas ofrecen soluciones de diseño que optimizan la distribución del material, siendo normalmente la reducción de la masa la principal condición de diseño. Los algoritmos matemáticos o impulsados por IA devuelven piezas con geometrías intrincadas, impidiendo su fabricación tradicional. Gracias a la fabricación aditiva, hay una fácil integración de estas herramientas, cuyas diferencias se muestran en la Tabla 1:

	OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA	DISEÑO GENERATIVO
PROPÓSITO	Optimizar la distribución del material en un espacio bien delimitado	Explorar múltiples diseños que cumplan restricciones impuestas por el diseñador
MÉTODOS EMPLEADOS	Elementos finitos Optimización matemática por descenso del gradiente	Elementos finitos Heurísticas Inteligencia Artificial
ALGORITMOS EMPLEADOS	Method of moving asymptotes (MMA) SIMP (Solid Isotropic Microstructure with Penalization)	Algoritmos genéticos Redes Neuronales Artificiales
DISEÑO DE ENTRADA	Requerido	No requerido
DISEÑO DE SALIDA	Único y optimizado	Múltiples soluciones de diseño Se llega a un compromiso sobre los parámetros a optimizar

*Tabla 1: Comparación entre la optimización topológica y el diseño generativo.
Fuente: elaboración propia.*

El diseño generativo es una herramienta de diseño multicriterio que permite, sin tener un diseño inicial, abstraer la pieza a una serie de parámetros, objetivos y restricciones, para que finalmente la IA genere múltiples opciones de diseño. Esto supone un cambio de paradigma en la función del diseñador, ya que ahora debe centrar sus esfuerzos en determinar esas condiciones de diseño, en refinar los parámetros del modelo por si fuera necesario volver a ejecutarlo y en escoger adecuadamente un diseño final entre decenas de opciones que ofrece la IA. [16]

Además, esta optimización de la pieza no solamente se puede realizar a nivel global, es decir, simplemente distribuyendo eficientemente el material. Gracias a la fabricación aditiva, se puede realizar una segunda etapa de diseño generativo para optimizar la distribución del material a un nivel local para así tener una pieza optimizada también en densidad. Esta técnica se conoce como microestructuras *lattice* de densidad variable. [17] El proceso completo de diseño generativo se muestra en la Figura 7:

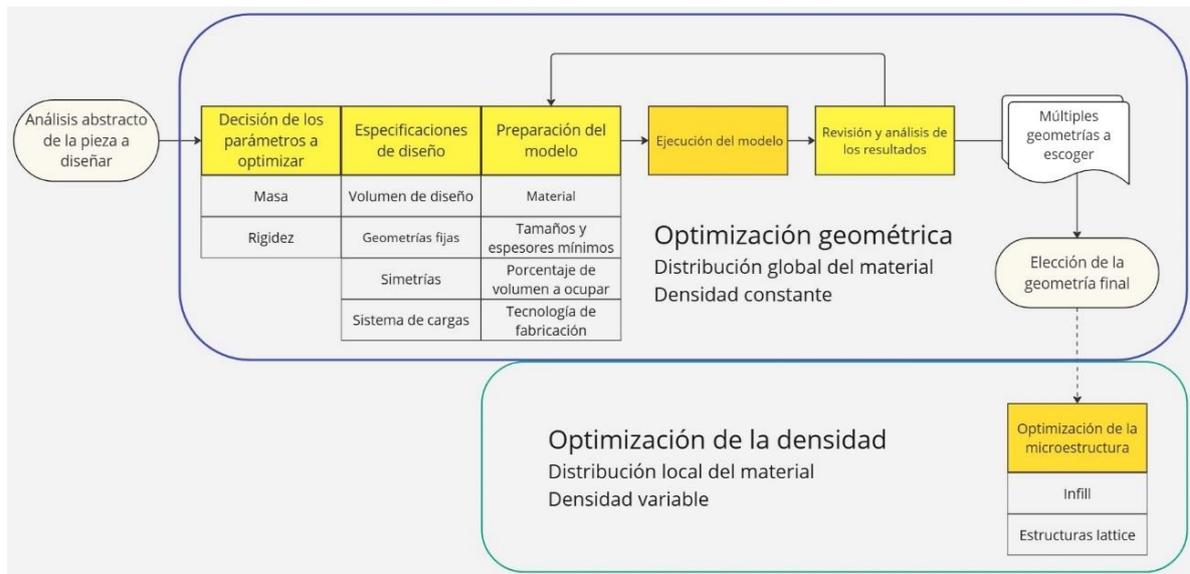


Figura 7: Proceso de diseño generativo multietapa con estructuras *lattice*
Fuente: elaboración propia.

Un ejemplo de la optimización local del material es el caso de las superficies giroides. Estos objetos matemáticos fueron ideados por el científico de la NASA Alan Schoen en 1970 y se pueden emplear como estructuras *lattice* en la fabricación por impresión 3D de piezas ligeras. Aunque no sean fruto de una optimización por diseño generativo, su uso tiene cabida en la fabricación ligera de estructuras y piezas.

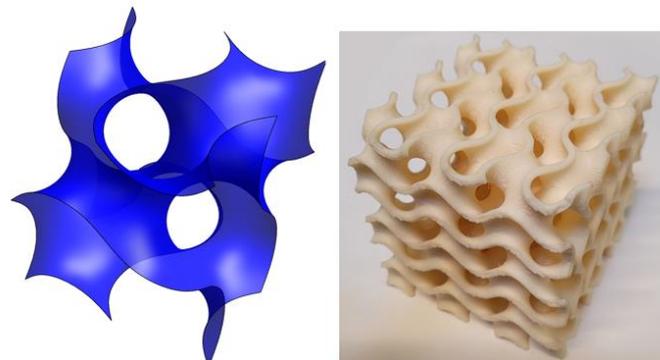


Imagen 6: Aplicación de la superficie giroide como estructura infill ligera y resistente.
Fuente: Artículo 2022 [18]

En la industria, ya se están empleando estas herramientas orientadas a la optimización de la masa de piezas. Por ejemplo, AIRBUS en 2015 fabricó un componente de cabina de avión un 45% más ligero a través de la optimización tanto de la geometría como de la microestructura (estructuras *lattice*). [19]

A finales del 2022, Toyota rediseñó un asiento de vehículo a través del diseño generativo que reducía el espesor y por tanto el peso (Imagen 7). [20] Con la electrificación del sector automotriz y la incorporación de baterías pesadas en los vehículos eléctricos e híbridos se están investigando soportes y componentes más ligeros para lograr mayor eficiencia y menor consumo.



*Imagen 7: Estructura de asiento fabricada con criterios de diseño ligero generativo
Fuente: Noticia en AUTODESK.com sobre Toyota [20]*

Existen múltiples softwares que aplican estas tecnologías de optimización. Algunos como Autodesk Fusion, se alinean más con el diseño generativo puro mostrado en la Tabla 1, porque no requieren de geometría de entrada y hay más personalización en las condiciones de diseño. No obstante, la mayoría de los softwares como Siemens Solid Edge realizan una optimización topológica porque requieren un diseño de entrada. En este proyecto se empleará el módulo de “*Diseño Generativo*” de Solid Edge a partir de una geometría de entrada nueva, distinta a la pieza original, pero manteniendo las interfaces clave.

2.3. Ingeniería inversa

La ingeniería inversa, también conocida como *reverse engineering*, ha aparecido en el contexto del diseño industrial como alternativa al proceso tradicional de concepción del producto. Mientras que en la ingeniería tradicional (directa) se parte de una idea abstracta y se transforma en un producto físico, la ingeniería inversa se apoya en un producto existente y lo analiza con detalle, capturando sus características clave. Estas características serán el pilar de la creación de un nuevo producto derivado del primero.

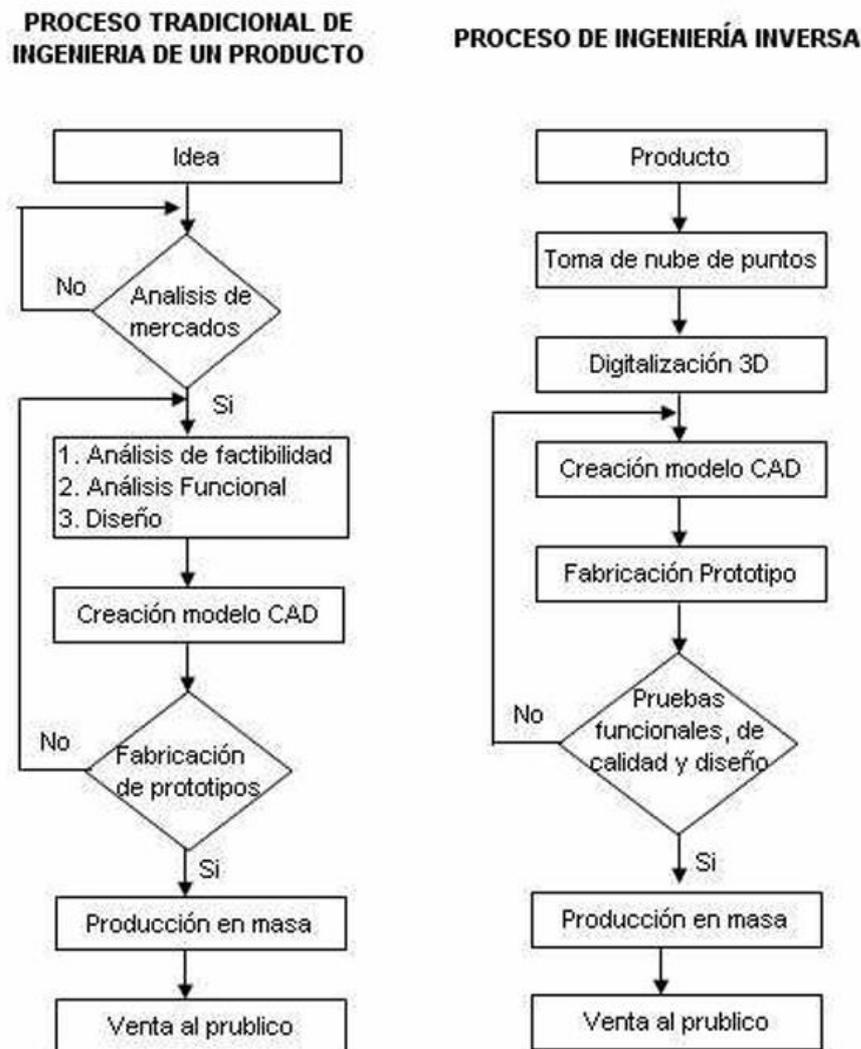


Figura 8: Comparativa de la ingeniería directa e inversa.
 Fuente: Ingeniería inversa y Diseño Industrial [21]

Los motivos que justifican el uso de la ingeniería inversa en la industria son varios. Según el diseñador industrial Daniel Zubik la ingeniería inversa permite [21]:

- Aprender sobre productos exitosos
- Analizar las causas de fallos en piezas de ingeniería
- Documentar un diseño previo, determinando sus procesos de fabricación
- Comparar alternativas de diseño
- Realizar un análisis competitivo del producto o *benchmarking*
- Mejorar un diseño y rediseñarlo para sacarlo de nuevo al mercado

Esta metodología de ingeniería inversa se puede aplicar a muchos ámbitos industriales y empresariales, como desarrollo de software, equipos electrónicos, maquinaria industrial o diseño de productos. Concretamente, en estos últimos dos sectores la ingeniería inversa destaca notablemente. Esto es debido a la existencia de softwares de diseño asistido por ordenador (CAD) y a la aparición de escáneres profesionales que permiten capturar con precisión la geometría de un producto y transformarla en un archivo de CAD. Con el modelo tridimensional, se puede estudiar en profundidad su geometría, realizar simulaciones por elementos finitos (FEM) o se pueden realizar modificaciones y realizar comparativas con alternativas de diseño.

La aplicación de la ingeniería inversa en la captura de la geometría de piezas requiere la realización de tres pasos [22]:

- 1) Escaneado
- 2) Procesado de puntos
- 3) Aplicación de geometría específica

El escaneado requiere dispositivos específicos, que se pueden agrupar en dos categorías:

- A) Escáneres de contacto
- B) Escáneres sin contacto

Los escáneres de contacto son más lentos y no se pueden aplicar a materiales blandos, pero obtienen mejores precisiones dimensionales ($< 30 \mu\text{m}$). Por el contrario, los escáneres sin contacto con tecnologías laser capturan rápidamente la geometría y sacrifican precisión ($> 30 \mu\text{m}$). [22] Concretamente, en este proyecto se empleará un escáner sin contacto láser.

2.4. Sostenibilidad y huella ecológica

Como se ha desarrollado en la introducción, en la industria de la fabricación hay un énfasis para evitar los desperdicios, tanto materiales como humanos. La filosofía de la fabricación ajustada o *leagile manufacturing* (ver Figura 2) integra esta idea perfectamente. Este modelo de producción es sostenible ya que cumple las tres condiciones de sostenibilidad: económica, ecológica y social: [1]

- **Ámbito económico:** buscando reducir costes de prototipado y de producción. Reducción de tiempos de espera y máxima eficiencia en los procesos.
- **Ámbito ecológico:** reduciendo a la mínima extensión los residuos y desperdicios tanto físicos como energéticos.
- **Ámbito social:** no es tan evidente, pero la fabricación ajustada favorece la participación activa de los trabajadores y las relaciones ágiles entre proveedores y clientes.

En el contexto de la sostenibilidad ecológica, se ha comprobado en los últimos años que con la fabricación aditiva aparecen procesos de fabricación alternativos con menor impacto ambiental que los tradicionales. [2], [3] La impresión 3D reduce los residuos generados al ser una tecnología de fabricación aditiva, a diferencia del mecanizado, que genera restos de viruta como deshechos. No solo eso, sino que la impresión 3D es una tecnología altamente electrificada, no emitiendo gases contaminantes en su uso.

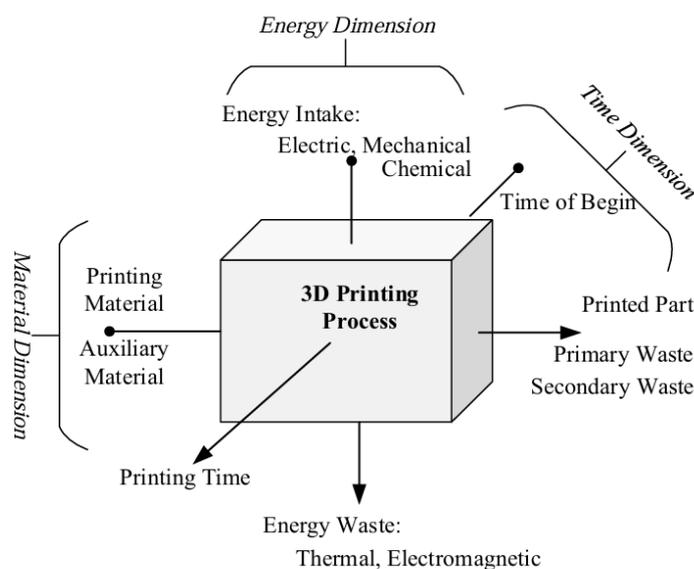


Figura 9: Dimensiones del estudio de la sostenibilidad en impresión 3D.
Fuente: *Analysis of Energy Utilization in 3D Printing Processes* [23]

Aplicado a la fabricación aditiva, la sostenibilidad del proceso de fabricación se puede medir en tres dimensiones:

- **Dimensión material:** uso del material de impresión y material de soportes. Evaluación de la posible reutilización del material.
- **Dimensión energética:** consumo eléctrico y eficiencia en la transformación de electricidad otras fuentes como calor (fundir material) o mecánica (movimientos del robot-extrusor o laser).
- **Dimensión temporal:** duración de la impresión.

Este análisis proviene originalmente de un artículo de 1994 de A.A. Munoz y P. Sheng sobre el impacto ambiental en procesos de conformado [24] y ha sido recuperado recientemente aplicado al caso de la impresión 3D por varios autores [25] [23]. Se muestra el diagrama en la Figura 9.

En el sector de la movilidad, también hay una tendencia hacia la sostenibilidad ecológica. Concretamente, los medios de transporte buscan ser menos nocivos para el medio ambiente; reduciendo la emisión de gases contaminantes como el dióxido de carbono (CO₂) o los óxidos de nitrógeno (NO_x). Esto se puede conseguir aumentando la eficiencia de los vehículos mediante la reducción de su peso en vacío y con la electrificación del sector. No obstante, la incorporación de baterías pesadas supone un reto para la fabricación de automóviles más ligeros.

Es por ello por lo que el diseño ligero impulsado por inteligencia artificial y la fabricación aditiva de prototipos, repuestos o componentes finales ligeros se relaciona tan bien con la reducción de la huella ecológica. En este proyecto se analizará la fabricación del prototipo y además se realizará un estudio del impacto ambiental a través de la huella ecológica, concretamente la huella de carbono de la pieza final:

- La **huella ecológica** es un indicador ambiental que evalúa la cantidad de recursos naturales necesarios para una actividad. Se mide en hectáreas globales (gha) y representan la cantidad de superficie necesaria para sostener dicha actividad.
- La **huella de carbono** es otro indicador ambiental que evalúa la cantidad de gases de efecto invernadero que se emiten en la realización de una actividad. Se miden en toneladas de dióxido de carbono equivalente (t CO₂ eq).

2.5. Soportes del motor en automóviles

El sistema de soporte y amortiguación del motor en automóviles es esencial para una conducción suave y segura. Este sistema tiene las siguientes funciones: [26]

- Posicionar el motor en el subchasis del vehículo.
- Restringir los movimientos del motor, evitando colisiones con otros componentes.
- Soportar las cargas estáticas asociadas al peso del motor.
- Soportar las cargas dinámicas asociadas a las aceleraciones del coche y del motor.
- Aislar vibraciones y ruido internos del motor o externos del pavimento.
- Amortiguar y disipar estas vibraciones.

En una frase, la función principal de estos soportes es mantener el motor en una posición correcta, aislándolo de la estructura del automóvil para evitar la transmisión de vibraciones al resto del vehículo.

Existen múltiples configuraciones de los soportes del motor en los automóviles, dependiendo de si son de tracción delantera, trasera o total y también en función de la orientación del motor con respecto al vehículo. En concreto, hay dos orientaciones del motor habituales (*drivetrain configurations*): la longitudinal y la transversal. Las combinaciones más típicas se muestran en la Figura 10. En ella, el motor se muestra en azul, el diferencial en rojo y la caja de cambios en verde.

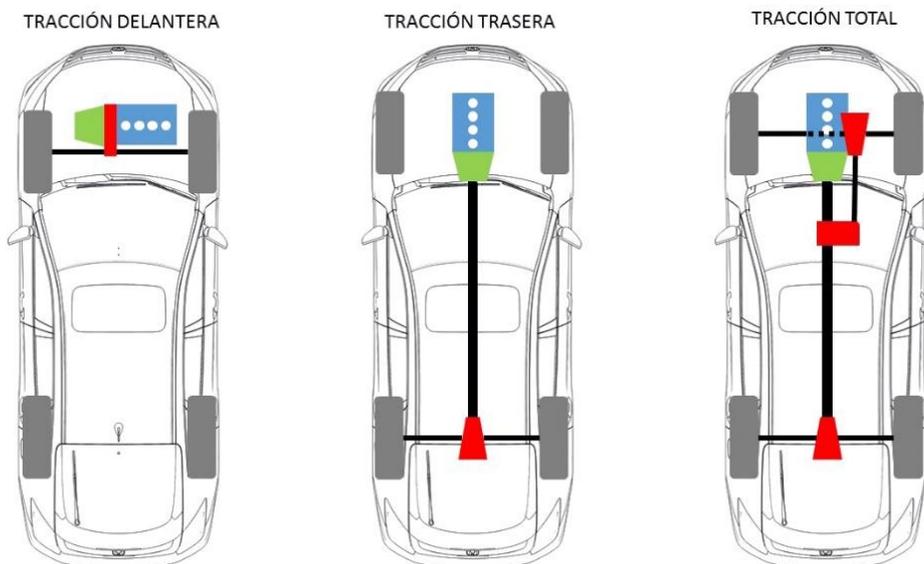


Figura 10: Configuraciones motrices más comunes en los vehículos.
Fuente: Reportaje de espíritu RACER. [27]

Como se observa en la Figura 10, en la configuración longitudinal el eje del motor es perpendicular al eje de las ruedas y está alineado con la dirección del movimiento del vehículo. Además, es común que en la configuración longitudinal haya tres soportes motores: dos laterales y uno trasero. Por el contrario, en la configuración transversal, el eje del motor está alineado (o paralelo) al eje de las ruedas y suele haber cuatro soportes motores: dos laterales, uno delantero y uno trasero. La posición aproximada de estos soportes se muestra en la Figura 11.

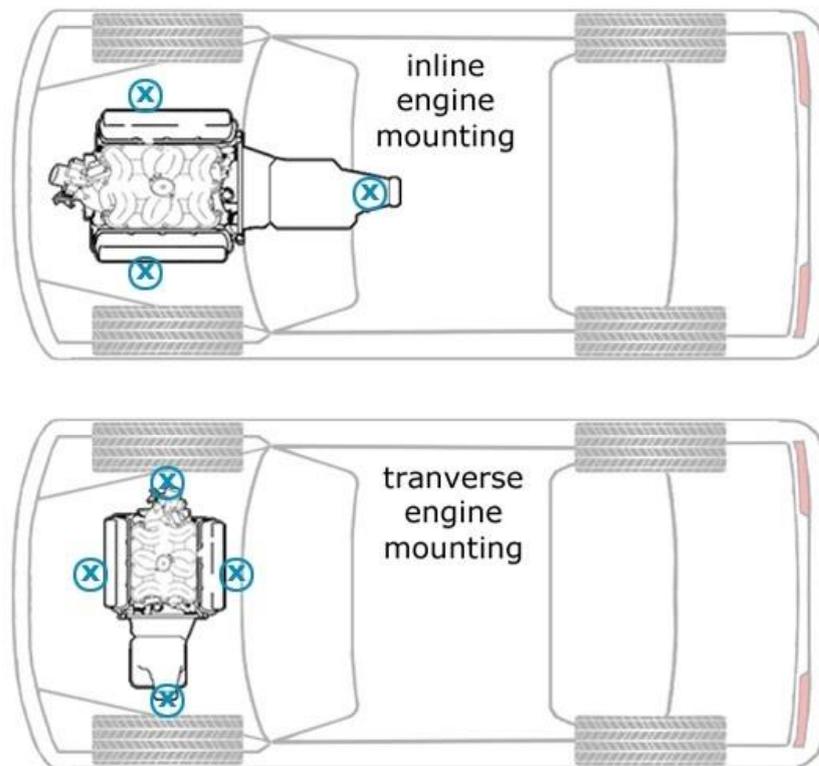


Figura 11: Sistemas típicos de soporte del motor delantero en función de su orientación.

Fuente: Artículo de GoMechanic [28]

La configuración transversal es la más empleada en vehículos de tracción delantera. Concretamente, en el Opel Corsa, se emplea esta configuración con el sistema motriz (motor, transmisión y diferencial) apoyado en cuatro soportes. La pieza a analizar y rediseñar en este proyecto es el soporte delantero. Se muestra el ensamblaje completo de los soportes del Opel Corsa C en la Figura 12.

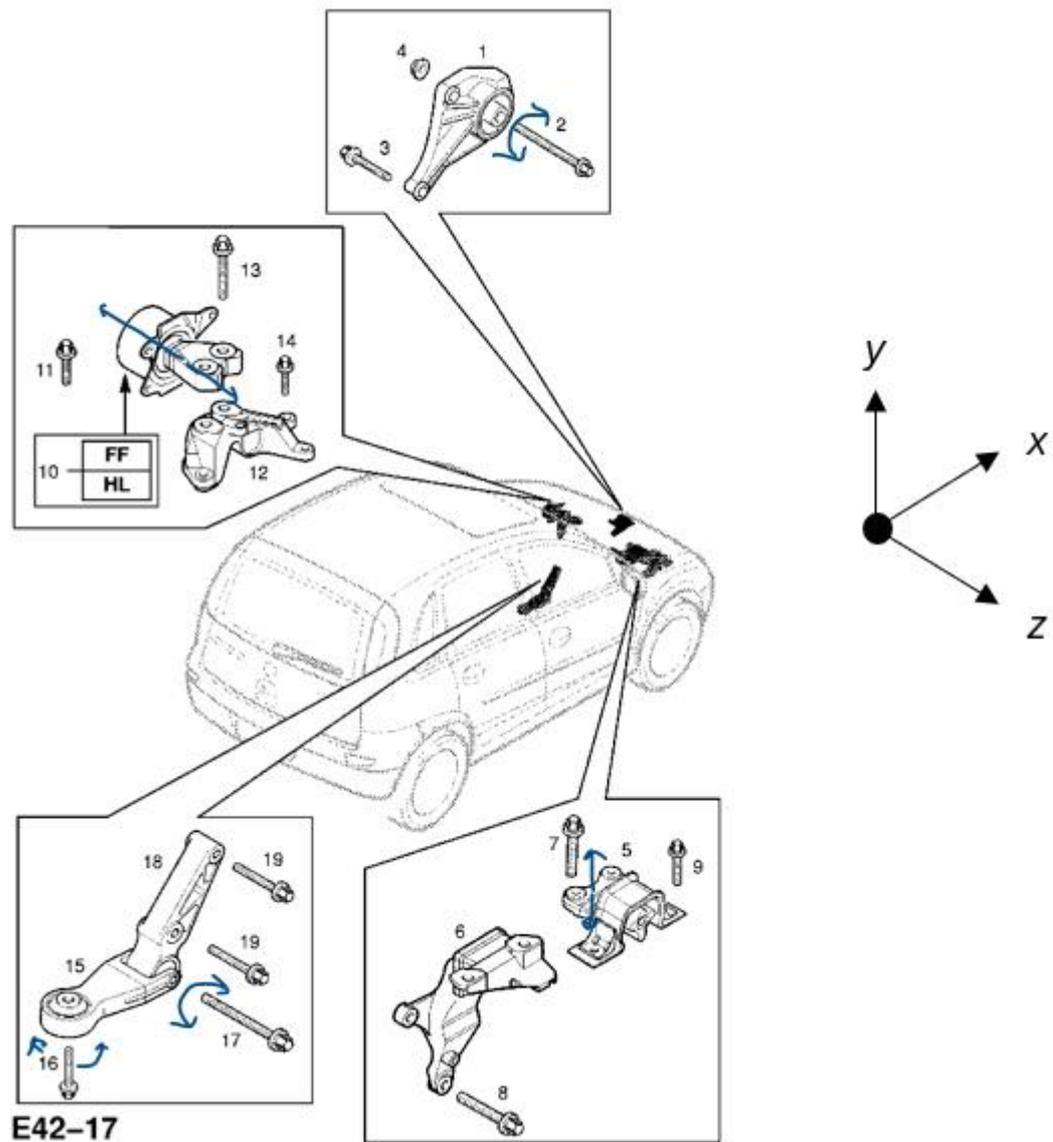


Figura 12: Plano de la lista de soportes del motor en un Opel Corsa C.
Fuente: Catcar.info [29]

Como se puede ver en la Figura 12, el motor está aislado del resto del vehículo a través de una serie de soportes amortiguados. Estos soportes son los siguientes:

- Brazo trasero nº18, cuyo giro del eje z está articulado el con el brazo trasero nº15 que se articula al subchasis con su giro del eje y.
- **Soporte delantero nº1**, articulado con el subchasis con su giro del eje z. Esta es la pieza a estudiar.
- Ensamblaje lateral de las piezas nº5 y nº6, que permite ligeros desplazamientos verticales (eje y) del motor, amortiguando estos movimientos con una goma de caucho.
- Ensamblaje lateral de las piezas nº12 y nº10, que permite ligeros desplazamientos del motor en el eje z.

No solo se apoya en estos soportes, sino que el propio motor se articula en ellos. Este sistema permite al motor realizar ligeros movimientos de balanceo y evitar colisiones del motor con el chasis del vehículo. En concreto, las perturbaciones a las que están sometidos los soportes del motor son las siguientes, resumidas en la Tabla 2:

Perturbación	Características	Causa principal
Vibraciones internas del motor	Alta frecuencia Baja amplitud	Desequilibrio de fuerzas y explosiones internas en el motor
Torque reacción e inercia rotacional del motor	Perturbación variable, y difícil de modelar	Variaciones del par o revoluciones del motor
Movimientos traslacionales del motor	Perturbación variable, y difícil de modelar	Aceleraciones, frenadas y giros del vehículo
Salto y rebotes verticales del vehículo	Baja frecuencia Alta amplitud	Baches, irregularidades en el terreno o en las ruedas

Tabla 2: Resumen de las principales perturbaciones en los soportes del motor Fuente: Elaboración propia basado en el vídeo “Engine Mounts: The Complete Guide” de How a Car Works [30]

Adicionalmente, cada pieza soporta una parte del peso del motor, que, aunque parezca constante, se verá afectada por las dinámicas del movimiento del mismo. Como ya se ha visto y se analizará más adelante, estos soportes tienen una fuerte componente de cargas variables que generarían modos de fallo a fatiga en la parte metálica si no fallara antes el bloque de goma.

Capítulo 3. Metodología y recursos empleados

La metodología de trabajo se ha basado en el diagrama de flujo de la Figura 13, donde se parte del soporte original y finalmente se obtiene un prototipo plástico optimizado por diseño generativo. Adicionalmente, se ha extraído un plano técnico de la pieza original y se ha realizado un estudio de la huella ecológica.

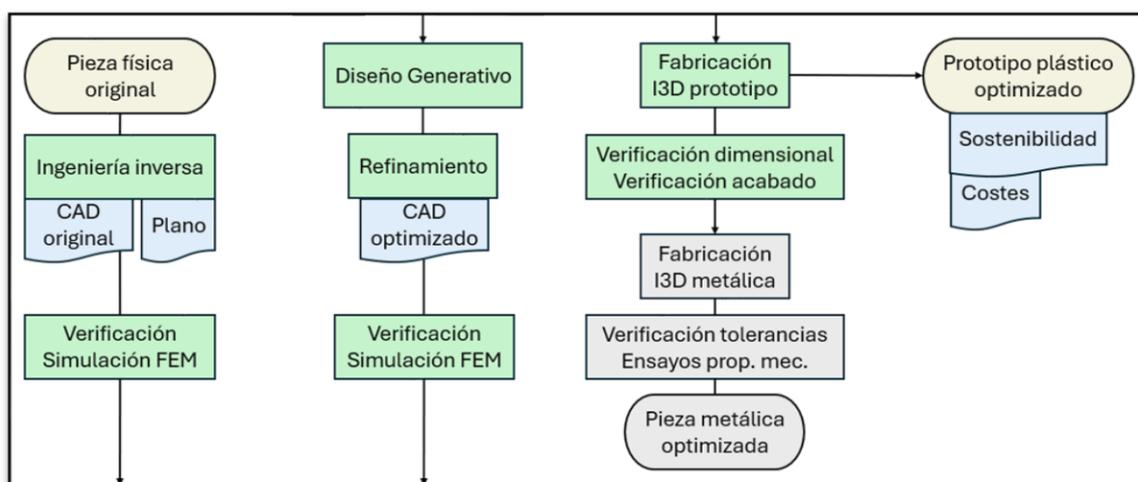


Figura 13: Flujo de trabajo del proyecto. En verde los procesos realizados, en azul los archivos obtenidos y en gris los desarrollos futuros.

Fuente: elaboración propia

Los recursos empleados y su propósito se muestran a continuación:

- Equipo de escáner industrial *HANDYSCAN* (tecnología láser)
- Softwares de ingeniería inversa
 - *VXScan*: visualización en tiempo real del escaneado
 - *VXModel*: procesado del escaneado
- Softwares de diseño asistido por computadora (CAD):
 - *SolidEdge*: simulaciones de Elementos Finitos (FEM) y Diseño Generativo
 - *Solidworks*: simulaciones FEM y creación de plano técnico
 - *AltairInspire*: suavizado de la geometría optimizada
- Softwares de preparación de la impresión 3D:
 - *Autodesk Netfab*
 - *Simplify3D*
- Impresoras 3D
 - *DT 600*
 - *HP Jet Fusion 580*

Todos ellos han sido proporcionados por el departamento de Fabricación de la facultad de Ingeniería (ICAI) de la Universidad Pontificia Comillas.

Capítulo 4. Implantación

4.1 Ingeniería inversa

4.1.1. Escaneado 3D

Antes de hacer el estudio de cargas para el diseño generativo, es recomendable tener un modelo CAD (*Computer Aided Design*) de antemano de la pieza original. Esto tiene las siguientes ventajas:

- Obtención directa de la geometría de la pieza original: Útil para posteriormente definir correctamente el espacio de diseño y la geometría de entrada para el diseño generativo.
- Posibilidad de validación del estado de cargas propuesto: Gracias a la simulación por elementos finitos, se puede comprobar que el estado de cargas impuesto a la pieza original no genera rotura del material o excesiva deformación.
- Determinación de parámetros físicos y mecánicos de la pieza original como la masa o la rigidez.

Se decide obtener el modelo CAD de la parte metálica de la pieza mediante el escaneo 3D. Esto agiliza el modelado ya que en este caso es una pieza de fundición, con varias nervaduras que dificultan su creación desde cero en CAD.



*Imagen 8: Escáner industrial HandySCAN3D empleado para la ingeniería inversa.
Fuente: Creaform3d.com [31]*

Para realizar esta labor de ingeniería inversa primero se limpió la pieza con disolvente para un acabado uniforme. Posteriormente, se empleó el escáner HandySCAN3D (ver Imagen 8) para obtener nubes de puntos tridimensionales. Como el soporte es una geometría tridimensional, se necesitaron dos vistas para poder capturar los detalles del anverso y del reverso de la pieza. Para ello, se pegó con goma adhesiva la pieza en una base giratoria para inmovilizarla durante la captura. Esta base contenía múltiples pegatinas de posición que son detectadas por el software del escaneo (ver Imagen 9).

De esta forma, se fueron tomando secuencias de fotos de forma continua y alrededor de la pieza sobre una esfera virtual, para así capturar toda la geometría de la vista. Este proceso se repitió para la vista trasera. Los escaneados se pudieron seguir a tiempo real gracias al software VXScan.



*Imagen 9: Preparación del Escaneo 3D con base llena de pegatinas de posición.
Fuente: elaboración propia con material y equipos del laboratorio de fabricación de ICAI.*

4.1.2. Procesado del escaneado

Tras el escaneado de dos vistas de la pieza y la obtención de los archivos .STL, se empleó el software VXModel y se realizaron las siguientes acciones:

- 1) Se eliminó el fondo de los dos escaneados, que corresponde a puntos de la superficie de la mesa escaneados pero que no pertenecen al modelo.
Se emplearon los comandos *Mantener Solo* y *Borrar (Supr.)* para mantener o eliminar los triángulos de fondo seleccionados.
- 2) Se crearon geometrías de referencia para la fusión de los escaneados. Se crearon planos y ejes añadiendo restricciones o relaciones como coincidencia, paralelismo y perpendicularidad para una correcta fusión.
- 3) Se fusionaron los escaneados y se generó una sola nube de puntos en el espacio.
- 4) Se posicionó esta nube (malla) en el origen y se alineó según los ejes de coordenadas. Concretamente, se alineó el eje del cilindro mayor con el eje y. Se empleó el comando *Alineación basado en entidades*.
- 5) Se mejoró y refinó la malla usando las siguientes operaciones en ese orden:
 - *Arreglar la malla*: Mejora automática del mallado.
 - *Eliminar parcelas aisladas*: Eliminación de triángulos desconectados de la malla central.
 - *Rellenar orificios*: Creación de una superficie que cubre un contorno abierto.
 - *Alisar malla*: Suaviza un área especialmente rugosa de la malla.
 - *Borrar elementos / punta*: Elimina cambios súbitos de curvatura.
 - *Re-mallado*: Vuelve a mallar un área específica del escaneado

Adicionalmente se puede modificar el mallado aumentando o reduciendo el número de triángulos para capturar mejor la geometría de la pieza.

- 6) Se crearon más geometrías a partir de la malla fusionada (líneas, planos, círculos y cilindros). Estas entidades facilitarán la creación del modelo CAD final con la extrusión de los agujeros correspondientes.
- 7) Con una malla lo completamente cerrada, se creó una superficie de parches planos.
- 8) Se exportó la superficie y las entidades geométricas como archivo .STEP al software CAD SolidWorks. Debe quedar un único sólido.

- 9) Una vez obtenido el sólido, se pueden realizar las operaciones clásicas de CAD como extrusiones y cortes. Estas operaciones se apoyan en las entidades creadas en VX del paso 6). Para esta pieza se decidió mallar como un sólido sin agujeros para facilitar la creación de una superficie convexa. Por lo tanto, se finalizó el modelado extruyendo los cortes de los agujeros que faltaban. La geometría relevante de la pieza escaneada se muestra en la Figura 15.

- 10) Una forma eficaz de comprobar que el mallado del sólido se han realizado correctamente es simulándolo en CAD con un estado de cargas arbitrario.

En la Tabla 3 se organiza el proceso de modelado con VX y en la Figura 14, se muestran las diferentes etapas del modelado en CAD por ingeniería inversa.

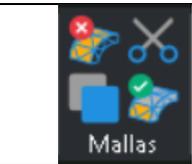
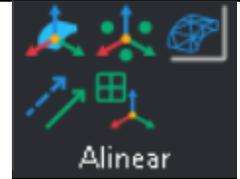
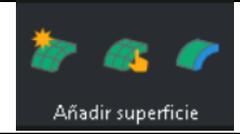
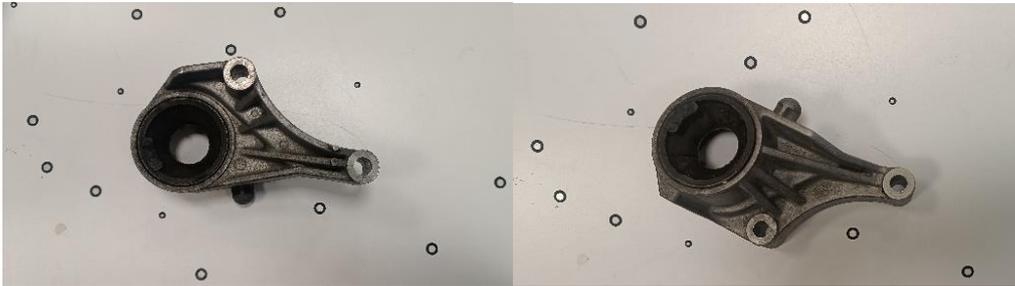
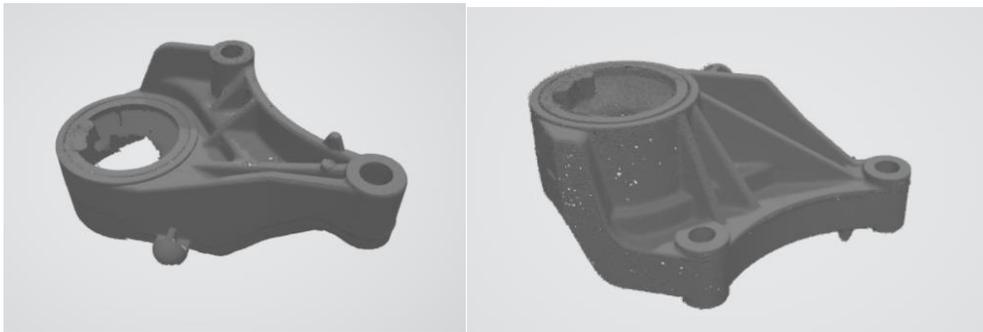
	Operación	Descripción	Comandos	Imagen
0	Escaneado 3D	Empleo de HANDYSCAN y VXScan	–	–
1	Eliminación del fondo del escaneado	Borrar los puntos de la superficie de la mesa que se han escaneado pero que no pertenecen al modelo	<i>Mantener Solo Borrar (Supr.)</i>	
2	Creación de geometrías de referencia para fusionar	Construcción de puntos, líneas, ejes o planos para el correcto fusionado. Imposición de relaciones entre entidades.	<i>Entidades: [Varias]</i>	
3	Fusionado de los escaneados	Generación de una única nube de puntos (malla). Se consigue a partir de las relaciones entre las entidades de los escaneados del apartado 2	<i>Fusionar</i>	
4	Alineación de la malla	Orientación y posición de la malla según los ejes de coordenadas a partir de relaciones de las entidades creadas en el apartado 2)	<i>Alinear: Alineación basado en entidades</i>	
5	Mejora y refinado de la malla	Obtención de una malla suave y cerrada. Verificar que la malla no tenga agujeros ni triángulos desconectados para poder crear la superficie correctamente	<i>Arreglar la malla Eliminación de parcelas aisladas Rellenar orificios Alisar malla Borrar elementos / punta Re-mallado</i>	
6	Creación de geometrías de referencia para CAD	Construcción de planos, círculos o cilindros para la extrusión / corte final en CAD Imponer relaciones.	<i>Entidades: [Varias]</i>	
7	Creación de una superficie	Creación de la superficie de parches planos que formará el sólido CAD	<i>Añadir superficie: Superficie automática</i>	
8	Exportar la superficie y entidades a CAD	Exportar como .STEP Verificar la creación de un único sólido en el programa CAD	<i>Export selected entities</i>	–
9	Finalización del modelado	Realización de operaciones auxiliares en CAD	–	–
10	Comprobación final	Verificar el correcto mallado del sólido en una simulación	–	–

Tabla 3: Resumen del proceso de ingeniería inversa usando VXScan y VXModel.
Fuente: Elaboración propia.

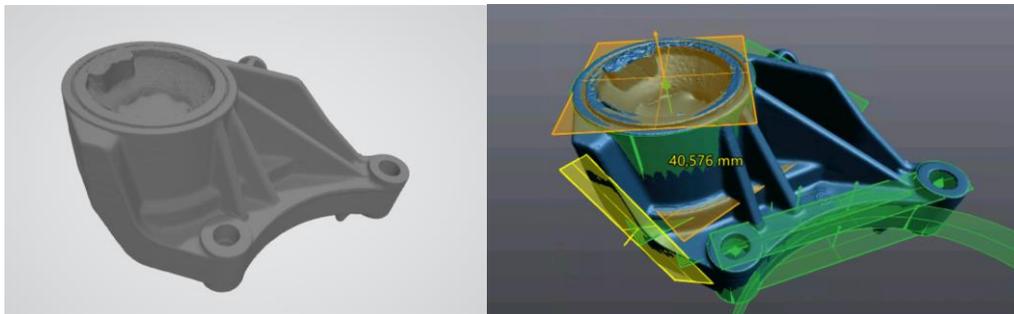
Limpieza de la pieza y escaneado de las dos vistas



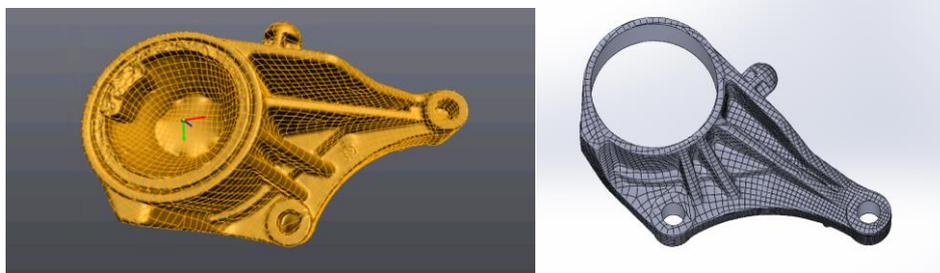
Generación de dos modelos de nube de puntos



Fusionado, cerrado y refinamiento de la malla. Construcción de entidades



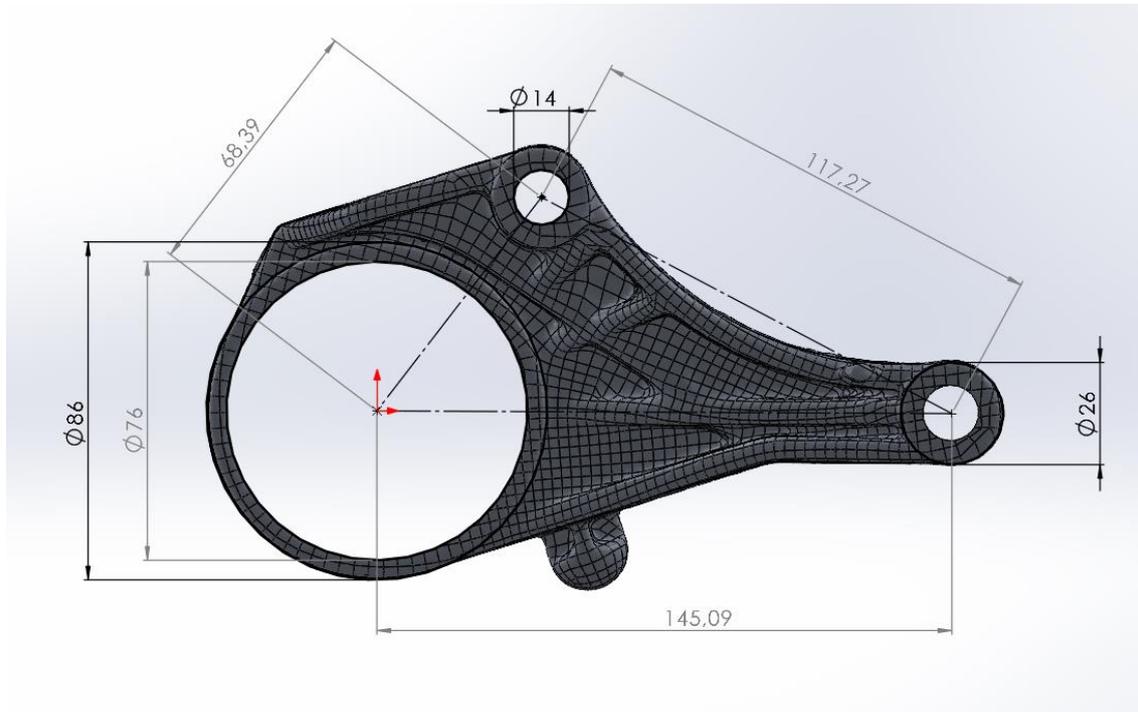
Creación de superficie, transformación en modelo CAD y extrusión de agujeros



*Figura 14: Imágenes de las etapas de modelado de la pieza original en CAD
Fuente: Elaboración propia*

4.3. Determinación de la masa y geometría de la pieza original

Una vez realizado el escaneado tridimensional de la pieza y con algunas mediciones directas se crea un modelo CAD de la geometría original. Las cotas principales se muestran en la Figura 15.



*Figura 15: La ingeniería inversa permite extraer de forma rápida la geometría de una pieza fundida. Cotas en milímetros.
Fuente: elaboración propia en SolidWorks*

Además, se busca determinar la masa del soporte metálico. Para ello se ha pesado la pieza de forma física y se ha calculado la masa en el software de SolidWorks.

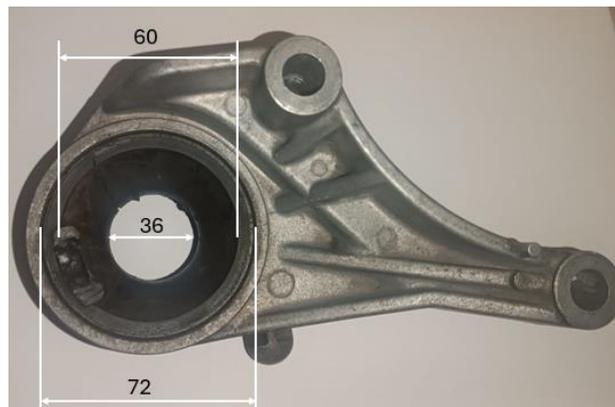
La medida de la masa en báscula del soporte completo (metal y caucho) dio un resultado de 750g (Imagen 10).

Para obtener la masa real del soporte metálico se debe sustraer la masa del amortiguador elástico. Se considera que este componente tiene una densidad de 1300 kg/m^3 y que geoméricamente es similar a un cilindro hueco de longitud 50 mm y diámetro externo 72mm. El diámetro interno con seguridad estará comprendido entre los 36 y los 60mm (Imagen 11). Se obtienen una cota inferior de 80g y una superior de 198g.



*Imagen 10: Medida de la masa del soporte, incluyendo amortiguador de caucho.
Fuente: elaboración propia.*

Según SolidWorks, solamente el soporte metálico tiene una masa de 600g. La diferencia de 150g está comprendida entre las cotas de 80g y 198g por lo que se verifica que la geometría de la pieza se ha capturado correctamente. Se tomará como masa de la geometría original los 600g.



*Imagen 11: Dimensiones de la parte de caucho del soporte delantero del motor.
Fuente: elaboración propia.*

4.2. Propuesta de estado de cargas

4.2.1. Consideraciones previas

La obtención de un estado de cargas que modele el comportamiento de la pieza en el vehículo será útil para la realización de las siguientes acciones:

- 1) Verificación de la geometría original a través de una simulación por elementos finitos (*finite element method*, FEM). Se comprobará que la pieza original no supera el límite elástico del aluminio fundido.
- 2) Aplicación del diseño generativo para la creación de una nueva geometría de la pieza resistente y ligera.

Se construirá un estado de cargas estático equivalente. El estudio de fatiga y el análisis del fenómeno vibratorio, comúnmente conocido como NVH (*noise, vibration and harshness*) quedan fuera del alcance de diseño. Sin embargo, esta exclusión no invalida el proyecto debido a los siguientes motivos:

- Los recubrimientos de caucho absorben las vibraciones de alta frecuencia, principal causa de la fatiga.
- El soporte seleccionado (el frontal) no tiene fuerzas de impacto directo, sino que se articula en uno de sus extremos.
- Los soportes de motor de goma no deben superar los 10 años de uso debido al desgaste del elastómero [6], [7] y se recambia la pieza completa ya que la retirada y sustitución aislada del caucho requiere el uso de una prensa hidráulica.

Los soportes de motor son piezas que están sometidas a múltiples perturbaciones y cargas variables durante el funcionamiento habitual de un vehículo. Como recogen Ashau y Kumar en su artículo para la *International Journal of Engineering Research & Technology* (IJERT) se pueden distinguir las siguientes cargas [32]:

- **Cargas estáticas:** Principalmente el peso del sistema motriz (motor, caja de cambios y diferencial)
- **Cargas dinámicas y de inercia:** Producidas por las perturbaciones analizadas de forma cualitativa en la Tabla 2.
- **Torque** o par del motor.

El soporte está articulado al subchasis y se fija al motor con dos tornillos. El objetivo ahora es conseguir las fuerzas en la articulación de la pieza. De esta forma, se pueden realizar las simulaciones por elementos finitos fijando los agujeros de los tornillos e imponiendo las cargas en la articulación.

4.2.2. Estructura propuesta

Para analizar con realismo lo que le sucede al soporte se construirá una estructura que simule el sistema de soporte del motor. Esta estructura obviará los soportes laterales y se centrará en el soporte delantero y en los brazos traseros (ver Figura 12 e Imagen 4). La geometría de la estructura propuesta se muestra en la *Figura 16*:

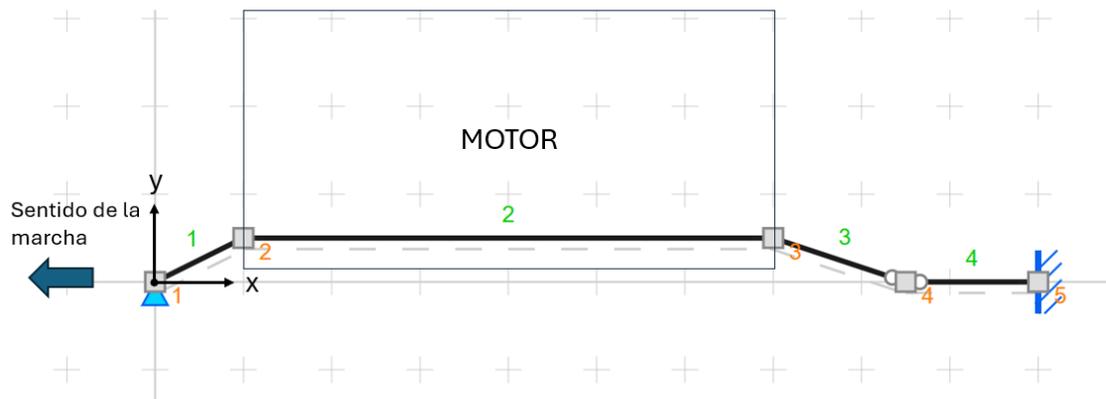


Figura 16: Estructura propuesta para determinar las reacciones en el soporte delantero. Fuente: elaboración propia empleando el análisis estructural gratuito STRIAN [33]

La posición y condiciones de contorno de los nudos de la estructura se muestra en la Tabla 5:

Nudo	Coordenadas (x, y) en mm	Comentarios
1	(0 , 0)	Articulación en subchasis delantero
2	(100 , 50)	Unión fija entre los elementos 1 y 2
3	(700 , 50)	Unión fija entre los elementos 2 y 3
4	(850 , 0)	Rótula
5	(1 , 0)	Empotramiento en subchasis trasero. Realmente es una articulación en el eje y, pero al ser un eje coplanar a la estructura se comporta como un empotramiento.

Tabla 4: Posición y condiciones de contorno de los nudos de la estructura. Fuente: elaboración propia

Los elementos de la estructura y su significado en el modelo de soporte del motor se muestran en la Tabla 5:

Elemento	Designación	Comentarios
Barra 1	Soporte delantero nº 1	Pieza a analizar, se articula al subchasis y se fija al motor
Barra 2	Espacio destinado al motor	Se considerará el motor como una masa puntual en el centro de esta barra
Barra 3	Brazo trasero nº 18	Se fija al motor y se articula en el eje z con el brazo nº15
Barra 4	Brazo trasero nº 15	Se articula en el eje z con el brazo nº18 y en el eje y al subchasis

*Tabla 5: Designación de los componentes de la estructura según la Figura 12
Fuente: elaboración propia*

Las características de la estructura propuesta son las siguientes:

- **Estructura plana:** Aunque es cierto que en el Opel Corsa C el soporte delantero no está alineado con los brazos traseros, se ha decidido simplificar el modelo colocando los soportes en el plano central del vehículo. De esta forma se realiza un análisis sin tener en cuenta los soportes laterales del motor, lo que supondrá resultados de cargas más conservadores.
- **Estructura hiperestática:** El grado de hiperestaticidad o grado de indeterminación estática (GDH, GIE o simplemente H) se define como el número de fuerzas incógnita que no pueden determinarse solamente con las ecuaciones de equilibrio.

Hay un empotramiento y un apoyo articulado lo que significa que son $3 + 2 = 5$ incógnitas. Como ecuaciones se tienen los sumatorios de fuerzas en los ejes x e y, el sumatorio de momentos en el eje z y la ecuación del momento nulo en la rótula. En total son 4 ecuaciones.

Por lo tanto, el $GDH = 5 - 4 = 1$. Esto quiere decir que si se quiere determinar por completo las reacciones de la estructura se necesita acudir a planteamientos de rigidez del material y de la sección. No obstante, se puede sacar información valiosa de la estructura e incluso determinar varias reacciones como se muestra más adelante.

4.2.3. Cálculo de reacciones estáticas

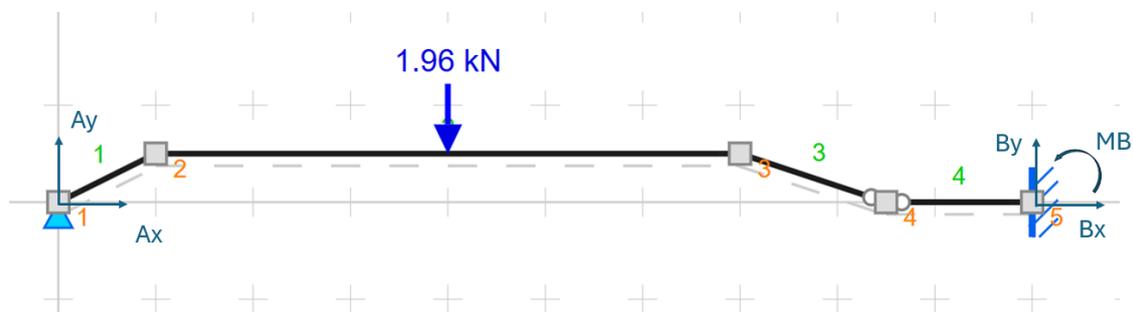
Se siguieron las recomendaciones de Ashau y Kumar [32] y se emplearon los análisis de Engel extraídos de su trabajo [26] para establecer las siguientes cargas en la estructura:

- 1) Peso del sistema motriz.
- 2) Fuerzas de inercia por frenada.

Se ha decidido no tener en cuenta el par del motor por un motivo principal: en este modelo estructural, al existir varias articulaciones, el par de un motor transversal no influye tanto como las dos cargas anteriores.

Peso del sistema motriz

El Opel Corsa C es un turismo con un motor de tres cilindros. Se considerará el motor y accesorios como una masa puntual de 200kg, por lo que su peso es de 1962 N. Se coloca esta carga en la estructura propuesta como se muestra en la



*Figura 17: Aplicación del peso del sistema motor en la estructura propuesta.
Fuente: elaboración propia en STRIAN [33]*

Para el cálculo de las reacciones es útil separar la estructura en dos a través de la rótula del nudo 4. La rótula trabaja principalmente a cortante, ya que en este caso la carga sobre la estructura es vertical. Todo ello aparece en la Figura 18.

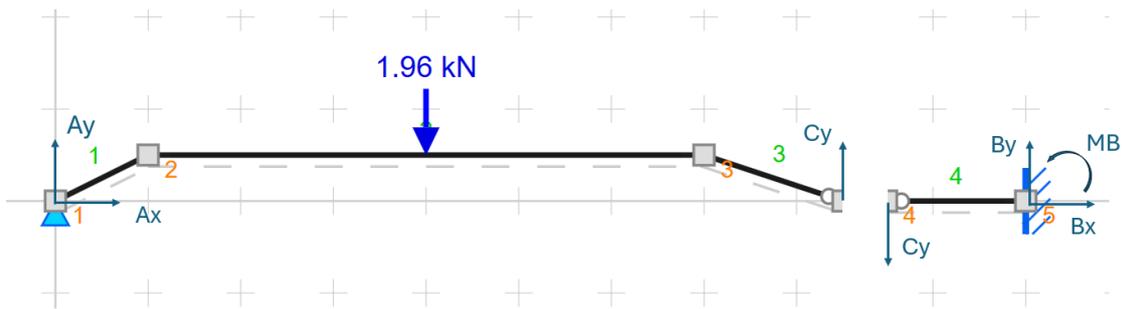


Figura 18: Separación de la estructura por la rótula.
Fuente: elaboración propia en STRIAN [33]

El primer paso es plantear las ecuaciones de equilibrio, concretamente la ecuación de momentos respecto el nudo 1 de la estructura de la izquierda:

$$\Sigma M_A = C_y \cdot 0,85 - 1962 \cdot 0,4 = 0 \quad (1)$$

$$C_y = 923,29 \text{ N} \quad (2)$$

A continuación, en la estructura de la derecha, al no existir cargas aplicadas, es inmediato lo siguiente:

$$B_y + C_y = 0 \quad (3)$$

$$B_y = 923,29 \text{ N} \quad (4)$$

Finalmente, volviendo a la estructura original, se puede escribir el equilibrio vertical como se muestra:

$$\Sigma F_y = A_y + B_y + 1962 = 0 \quad (5)$$

$$A_y = 1038,71 \text{ N} \quad (6)$$

Como se ha mencionado, a pesar de que la estructura es hiperestática se ha podido calcular la reacción vertical en el apoyo del soporte delantero. Para calcular la reacción horizontal, es necesario acudir a cálculos de flexibilidad de la estructura. Esto no es conveniente porque la estructura se ha construido con elementos de una dimensión (barras) y sin conocer datos de rigidez a flexión de los elementos reales del sistema de soporte del motor. Sin embargo, la reacción horizontal en este caso no será relevante en el análisis porque la carga es puramente vertical

Fuerzas de inercia por frenada

En el trabajo de K. Engel [26] se busca establecer las cargas relevantes en sistema de soporte del motor de tres apoyos, distinto al estudiado en este proyecto. Se plantean varias maniobras en las que se somete al vehículo a aceleraciones y frenadas bruscas y se mide su impacto en los soportes del motor. Aunque las mediciones no están disponibles, se seguirá su misma estrategia empleando los mismos datos de sus maniobras.

Lógicamente el caso en el que se inducen mayores cargas de inercia es una frenada brusca, ya que la capacidad de deceleración de los automóviles es mucho mayor que su aceleración. De esta forma, Engel empleó un Mini Cooper S y realizó una frenada desde los 120 km/h, como se muestra en la Figura 19.

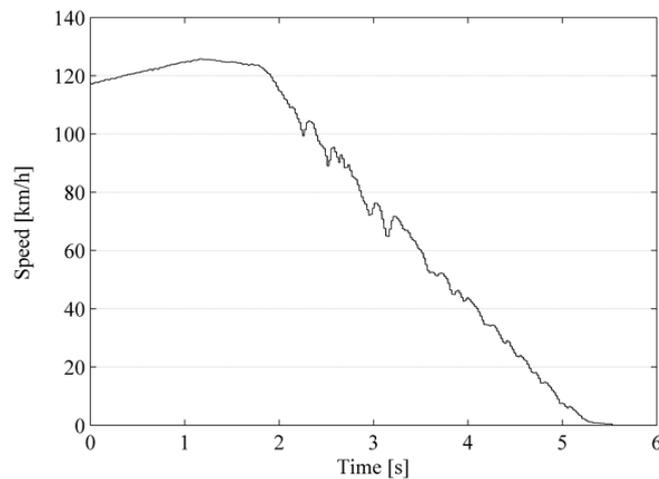


Figura 19: Maniobra de frenada brusca en un Mini Cooper S.

Fuente: “Predicting the design relevant loads in the engine mount system at an early stage of the development process” de K. Engel [26]

Analizando la Figura 19, se calcula la aceleración del vehículo, la cual se considera lineal:

$$a = \frac{dv}{dt} \approx \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (7)$$

$$a = \frac{-120 \frac{km}{h}}{5,5-1,8 \text{ s}} = -\frac{120 \cdot \frac{1000}{3600} \frac{m}{s}}{3,7} = -\frac{33,3}{3,7} = -9 \frac{m}{s^2} \quad (8)$$

Cuando el vehículo acelera y frena, el sistema de referencia de nuestra estructura deja de ser inercial. Esto supone que hay que incluir el termino correctivo de la fuerza de inercia para realizar cálculos por las Leyes de Newton en el sistema de coordenadas en

movimiento. En el caso de la maniobra de frenada, el vehículo decelera a razón de 9 m/s^2 y el motor, masa inercial de 200 kg , sufre una fuerza de inercia en el sentido opuesto a la aceleración como se describe a continuación:

$$F_{INERCIA} = -m \cdot a = 200 \text{ kg} \cdot 9 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1800 \text{ N} \quad (9)$$

La fuerza de inercia tiene el sentido opuesto a la aceleración y ésta va en el sentido opuesto de la marcha. Por consiguiente, la fuerza de inercia va en el sentido de la marcha.

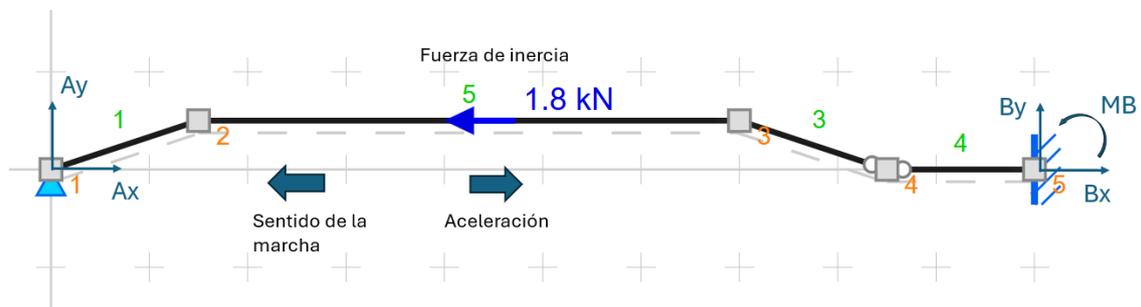


Figura 20: Aplicación del peso del sistema motor en la estructura propuesta. Fuente: elaboración propia en STRIAN [33]

En este caso de carga, la estructura se comporta de forma hiperestática para el cálculo de la reacción horizontal. No obstante, se puede establecer una cota superior a esta reacción. Este límite será la fuerza de inercia.

$$A_x < F_{INERCIA} = 1800 \text{ N} \quad (10)$$

Por lo tanto, se empleará la fuerza de inercia consecuencia de una frenada brusca como reacción en el soporte delantero del motor.

4.2.4. Ponderación dinámica de las cargas

En el análisis anterior, se han obtenido dos reacciones verticales y horizontales que aparecen en el soporte delantero del motor en casos estáticos o inerciales. Sin embargo, el sistema de soporte del motor presenta también unas cargas dinámicas que son difíciles de modelar.

Concretamente, en el proyecto de K. Engel sobre las cargas en estos soportes se plantean dos casos en los que es claro que hay un componente dinámico:

- 1) Frenada brusca: Analizada de forma inercial en el apartado 6.3.2. y obteniendo una reacción horizontal estática de 1800 N.
- 2) Aceleración del vehículo en un terreno irregular: En este caso además de reacciones horizontales de menor magnitud que en la frenada, existen variaciones del par del motor y movimientos verticales (sacudidas) del motor. Estáticamente, el peso del motor induce unas cargas de 1039 N en el soporte.

El hecho de que existan cargas dinámicas implica la existencia de picos de esfuerzos de escasa duración, pero de mayor intensidad que en el caso estático. Para tener en cuenta este efecto, se van a ponderar las fuerzas estáticas, multiplicándolas por un factor de amplificación.

En sistemas dinámicos, existen modelos clásicos de análisis de vibraciones como el sistema masa resorte. Ante la aplicación súbita de una fuerza escalón (constante), se genera un desplazamiento y fuerza transmitida máxima de valor el doble que la estática. Es por ello por lo que se ponderarán las cargas aplicadas por dos.

4.2.5. Análisis de sensibilidad

Antes de realizar la verificación del diseño original del soporte motor imponiendo las cargas calculadas, es importante evaluar la sensibilidad de estos resultados. Concretamente se busca evaluar en qué medida los cambios en las condiciones de carga y en la geometría de la estructura modifican los resultados obtenidos.

La primera conclusión a la que se llega es que la masa del motor es directamente proporcional a las reacciones calculadas. La masa aparece en la fuerza del peso y en la de inercia. Estas fuerzas se aplican en la estructura, que es un sistema lineal.

El segundo análisis es geométrico. Si nombramos de forma simbólica cada uno de los tramos de la estructura podemos obtener la expresión de la variación de la reacción vertical en función de la geometría de estructura. En la Figura 21 se muestran los parámetros simbólicos y en la XXX los valores empleados.

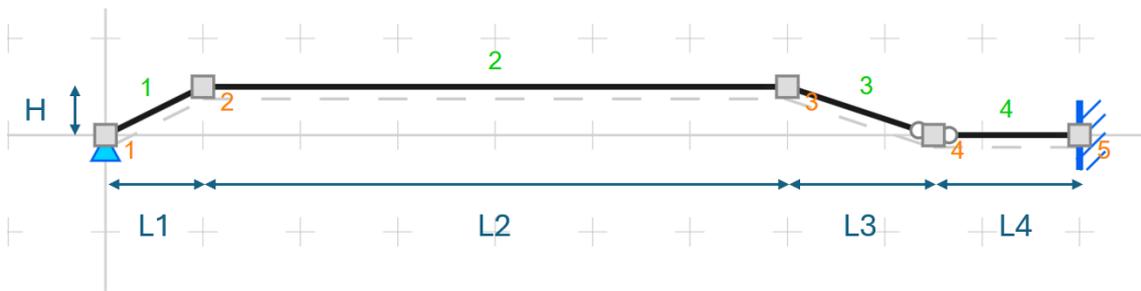


Figura 21: Parametrización de la estructura.
Fuente: elaboración propia en STRIAN [33]

Parámetro	L1	L2	L3	L4	H
Valor empleado (m)	0,1	0,6	0,15	0,15	0,05

Tabla 6: Parámetros empleados en el cálculo de las reacciones.
Fuente: elaboración propia.

A través de los equilibrios establecidos en las Ecuaciones (1) a (5), la Ecuación (11) expresa la reacción del peso del motor en función de los parámetros geométricos. Se puede comprobar que si se sustituyen los valores empleados de la Tabla 6, se llega al mismo resultado que la Ecuación (6).

$$A_y = mg \cdot \frac{\frac{L_2}{2} + L_3}{L_1 + L_2 + L_3} \quad (11)$$

$$F(L_1, L_2, L_3) = \frac{\frac{L_2}{2} + L_3}{L_1 + L_2 + L_3} \quad (12)$$

Si se estudia la expresión que multiplica al peso (Ecuación (12)), se puede deducir que el modelo tiene una sensibilidad baja ante variaciones en la geometría.

Sensibilidad de la reacción vertical por cálculo multivariable

Matemáticamente, la baja sensibilidad se puede comprobar con el concepto de elasticidad de una función. La elasticidad representa la razón entre los cambios relativos (porcentuales) del valor de la función respecto a las variaciones relativas de la variable. Concretamente, en el cálculo multivariable se define de esta manera:

$$E[F, x] = \lim_{x \rightarrow a} \frac{\frac{F(x) - F(a)}{F(a)}}{\frac{x - a}{a}} = \frac{\partial F}{\partial x} \cdot \frac{x}{F(x)} \approx \frac{\% \Delta F(x)}{\% \Delta x} \quad (13)$$

La elasticidad es una medida concreta que aporta información sobre la sensibilidad de una función respecto una variable. Si las elasticidades parciales son bajas, la función se comporta de forma inelástica en la dirección de esa variable y podemos decir que la sensibilidad de la función es baja.

Los resultados matemáticos se muestran en la Tabla 7 y Ecuaciones (14) a (19).

Variable	Representa	Elasticidad	Sensibilidad
L1	Longitud proyectada horizontal del soporte delantero del motor	-0,1177	Baja
L2	Distancia horizontal entre sujeciones del motor	-0,0392	Muy baja
L3	Longitud proyectada horizontal del soporte trasero del motor	0,1569	Baja

*Tabla 7: Resultados de la sensibilidad de los parámetros de la expresión (12).
Fuente: elaboración propia.*

Elasticidad de F respecto L1

$$E[F, L_1] = -\frac{L_2 + 2L_3}{2(L_1 + L_2 + L_3)^2} \cdot \frac{L_1}{F(L_1, L_2, L_3)} \quad (14)$$

$$E[F, L_1] = (-0,623) \cdot \frac{0,1}{0,5294} = -0,1177 \quad (15)$$

Elasticidad de F respecto L2

$$E[F, L_2] = \frac{L_1 - L_3}{2(L_1 + L_2 + L_3)^2} \cdot \frac{L_2}{F(L_1, L_2, L_3)} \quad (16)$$

$$E[F, L_2] = (-0,0346) \cdot \frac{0,6}{0,5294} = -0,0392 \quad (17)$$

Elasticidad de F respecto L3

$$E[F, L_3] = \frac{2L_1 + L_2}{2(L_1 + L_2 + L_3)^2} \cdot \frac{L_3}{F(L_1, L_2, L_3)} \quad (18)$$

$$E[F, L_3] = 0,5536 \cdot \frac{0,15}{0,5294} = 0,1569 \quad (19)$$

Las conclusiones que se obtienen son las siguientes (Tabla 7):

- 1) Los tres son valores puramente inelásticos ($|E| < 1$)
- 2) Los tres valores tienen una sensibilidad baja ($|E| < 0,2$)
- 3) La sensibilidad de la función respecto L2 es muy baja ($|E| < 0,05$)

Como L1 y L3 están relacionadas en la estructura con las longitudes de los soportes delantero y trasero del motor, sus valores empleados han sido seleccionados con criterio al tener sus dimensiones.

En cambio, la longitud entre soportes del motor se ha seleccionado sin medidas ni datos reales del espacio de soporte del motor. En cualquier caso, el análisis de sensibilidad confirma que esta medida (L2) no es tan importante en el análisis de la estructura porque cambios en su valor no producirán cambios importantes en el valor de la reacción vertical.

Sensibilidad de la reacción vertical por simulación gráfica

Una forma visual de comprobar la baja sensibilidad de la estructura es a través de gráficos. Se ha programado un código en Python en el que se han permitido variaciones del 50% en los parámetros de entrada y se han comprobado las variaciones que aparecen en la expresión (12). Los resultados coinciden con el análisis matemático y se muestran a continuación en las Figura 22 y Figura 23.

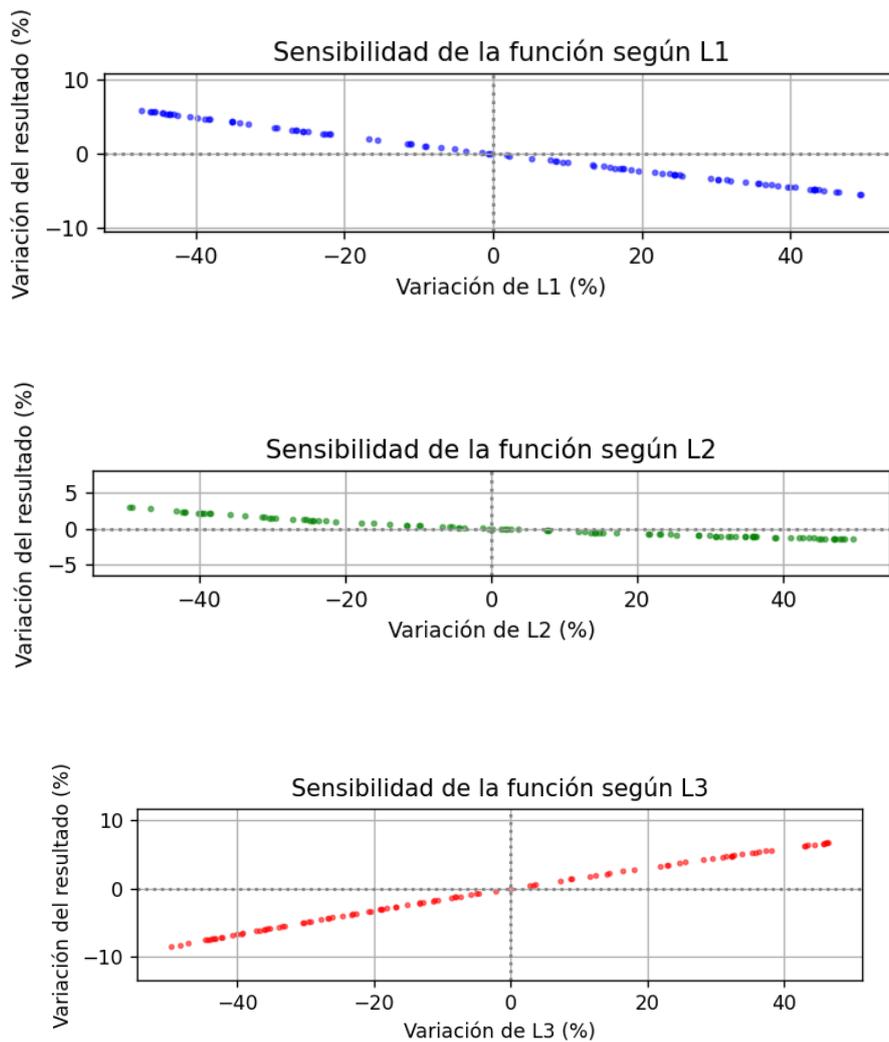
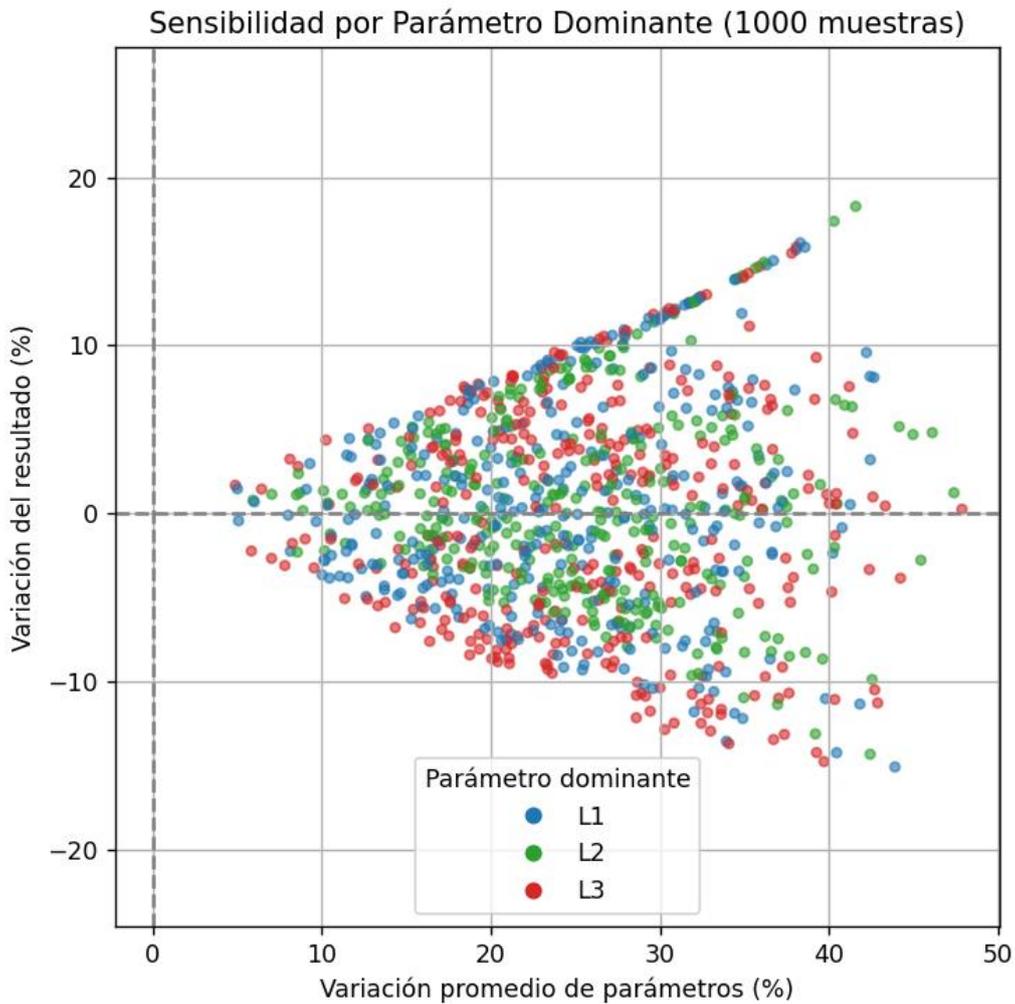


Figura 22: Sensibilidades de la función respecto los parámetros geométricos. Fuente: elaboración propia con código de Python



*Figura 23: Sensibilidad global de la función respecto los parámetros geométricos.
 Fuente: elaboración propia con código de Python.*

Se pueden extraer dos conclusiones. La primera es que ningún parámetro de entrada produce a nivel individual variaciones de más del 10% de la función ante cambios del 50% de su valor. En segundo lugar, se observa en el gráfico conjunto que a nivel global no se producen variaciones de más del 20% ante una superposición de cambios de los parámetros.

Por estos motivos, la sensibilidad de la estructura es baja, especialmente respecto al parámetro L2, que es el que se desconocen las medidas.

4.3. Simulaciones y verificación

4.3.1. Consideraciones previas

Para la verificación del estado de cargas, se empleó el software SOLIDWORKS y su módulo de Simulación. El archivo para simular se corresponde con el sólido de la geometría original escaneada por ingeniería inversa. Este fichero hubo sido importado como archivo .STEP o .IGES desde VX Model.

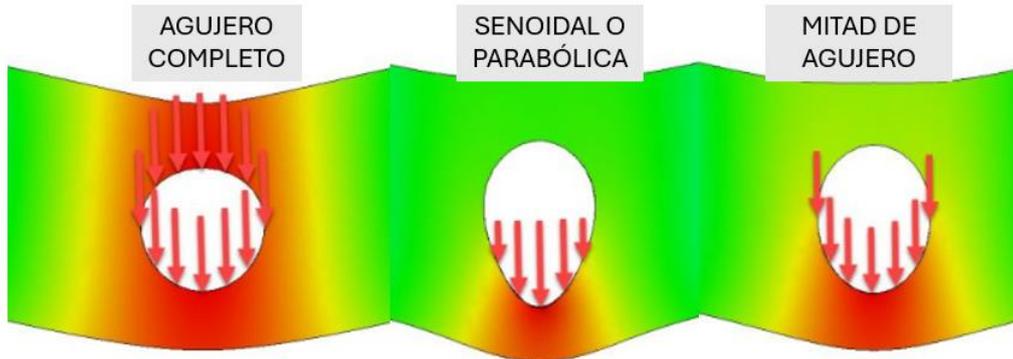
El propósito de estas simulaciones es múltiple:

- Verificar que el estado de cargas propuesto para la pieza genera tensiones y deformaciones razonables en la geometría original.
- Asegurar que la superposición de acciones o cargas tiene un efecto acumulativo.
- Hallar la rigidez lateral de la pieza original para su consideración en el diseño generativo.

El soporte motor es una pieza de fundición por coquilla de aluminio, y para estas simulaciones se ha empleado el material de SOLIDWORKS conocido como Aluminio 356 - T6 (moldeo permanente). Este aluminio tiene excelentes propiedades de moldeabilidad y resistencia a la corrosión. Su límite elástico se sitúa en los 152 MPa.

En las simulaciones se han impuesto un par de restricciones fijas en los agujeros donde van alojados los tornillos que fijan el soporte al motor. Estas condiciones de contorno impiden tanto el desplazamiento como el giro del material en su zona de aplicación. Las fuerzas se han aplicado en el cilindro donde se articula la pieza al subchasis.

La aplicación de las fuerzas se realizará en el cilindro mayor de la pieza, que es donde el soporte se articula al chasis a través de su junta de caucho. Al ser una pieza articulada, habrá un par de fuerzas, pero su posición en la superficie debe determinarse con cuidado. La fuerza vertical (hacia arriba) teóricamente se distribuye en la parte superior del cilindro interior de forma parabólica o senoidal. Lo mismo ocurre con la fuerza horizontal, al ser fuerzas de contacto solo afectan a la mitad correspondiente de la superficie del agujero. En muchos programas existe una opción de fuerza de cojinete o rodamiento que aplica la distribución automáticamente. Sin embargo, como se muestra en la Figura 24, una buena aproximación es la aplicación uniforme de la fuerza a la mitad del agujero.



*Figura 24: Comparativa de posibles aplicaciones de fuerza en un agujero.
Fuente: Artículo Javelin.tech [34]*

Al observar los resultados de las simulaciones, apareció un punto crítico de concentración de tensiones por cambio de geometría brusco. En esa zona se ha establecido un control de mallado y se ha repetido el análisis para obtener resultados precisos. Se comprueba que en ese punto del mallado se dispara la tensión de forma local y descontrolada, dando resultados de máxima tensión que no se corresponden con lo observado en regiones cercanas. Por tanto, se tomarán como las tensiones máximas las que se encuentran en regiones no puntuales de la pieza.

4.3.2. Simulaciones

Peso del sistema motriz

Se aplica verticalmente una fuerza de $2 \times 10^3 \text{ N} = 2078 \text{ N}$. Como se muestra en la Figura 25, se aplica esta fuerza en la superficie semicilíndrica superior del agujero mayor de la pieza y se fijan los agujeros de los tornillos. Los resultados de tensiones de la simulación se muestran en la Figura 26, existiendo un punto de concentración de tensiones a 142 MPa aproximadamente.

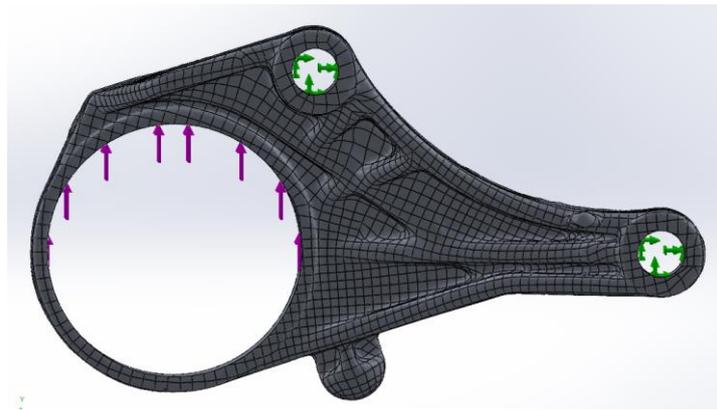


Figura 25: Reacción vertical (morado) y condiciones de geometría fija (verde) Fuente: elaboración propia en SOLIDWORKS Simulation

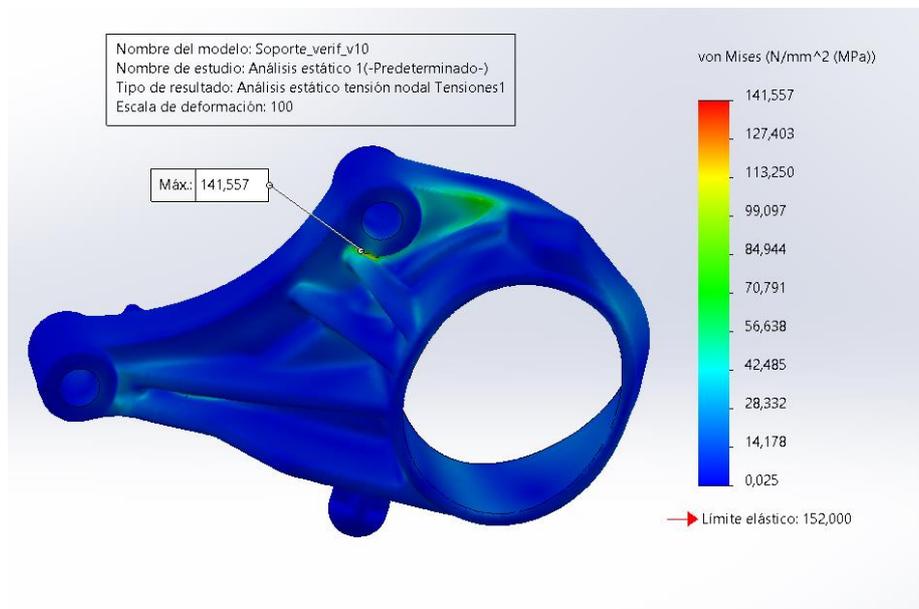


Figura 26: Resultado de la simulación del peso del motor. Fuente: elaboración propia en SOLIDWORKS Simulation

Fuerzas de inercia por frenada

Se considera una fuerza horizontal de $2 \times 1800 = 3600$ N. Como se muestra en la Figura 27, se aplica esta fuerza en la superficie semicilíndrica derecha del agujero mayor de la pieza y se fijan los agujeros de los tornillos. Los resultados de tensiones de la simulación se muestran en la Figura 28, existiendo un punto de concentración de tensiones a 109 MPa aproximadamente. Nótese que la barra de colores está a distinta escala que en la Figura 26.

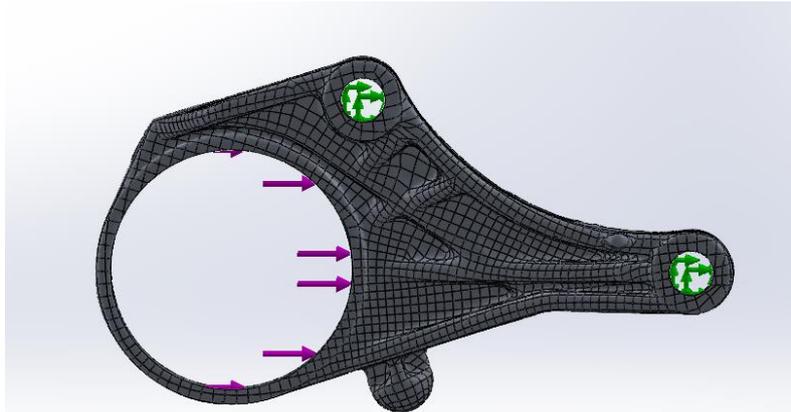


Figura 27: Fuerza horizontal (morado) y condiciones de geometría fija (verde) Fuente: elaboración propia en SOLIDWORKS Simulation

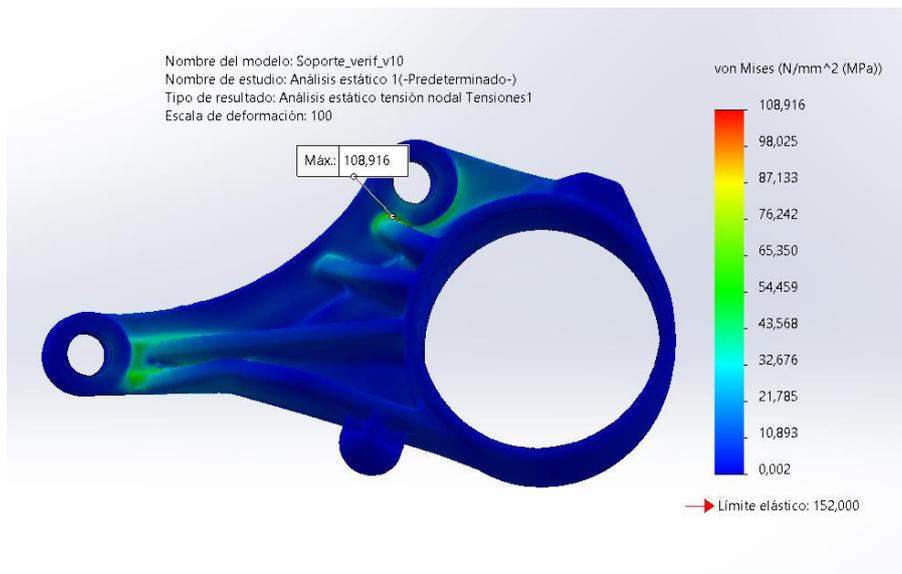
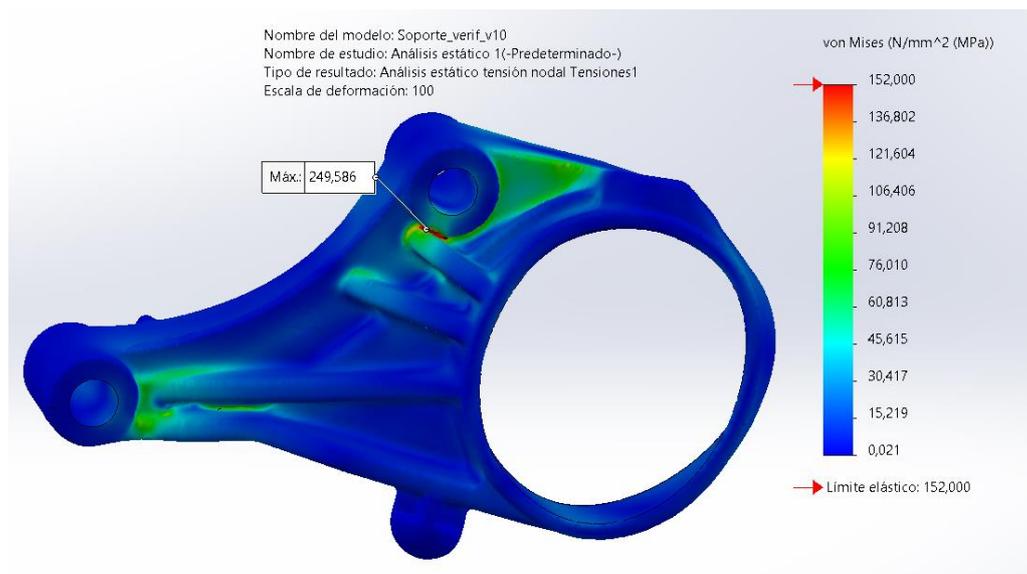


Figura 28 : Resultado de la simulación de las cargas de inercia. Fuente: elaboración propia en SOLIDWORKS Simulation

Combinación de acciones

Observando las zonas críticas con fuerzas verticales y horizontales, se puede comprobar que la superposición de las cargas va a tener un efecto acumulativo. Esto quiere decir que la combinación de ambas acciones generará tensiones máximas de mayor valor. Por lo tanto, se procedió a la superposición y se llegaron a los resultados esperados. (Figura 29)



*Figura 29: Resultado de la simulación de la superposición de las cargas.
Fuente: elaboración propia en SOLIDWORKS Simulation*

En la Figura 29 se observa que se produce una suma del valor de las tensiones individuales en un punto de la pieza. En una zona local de la malla se ha generado una concentración de tensiones por cambio brusco de geometría y se han llegado hasta los 250 MPa. Aunque se supere el límite elástico localmente, podemos validar el estado de cargas como razonable por las siguientes razones:

- Se trata de una consecuencia de la geometría y el mallado local.
- Se modificará con el diseño generativo y se obtendrá una nueva geometría que mejor se ajuste a las condiciones de carga.
- Globalmente la pieza no supera el límite elástico situándose en valores máximos de 130 MPa.

Determinación de la rigidez

En el diseño generativo se buscará una nueva geometría de la pieza que cumpla con el estado de cargas maximizando la rigidez y minimizando el material empleado. Las cargas deducidas en el Capítulo 6, al ser solo dos cargas coplanares, no garantizan un comportamiento rígido en la dirección perpendicular al plano que forma.

Es por ello por lo que a partir de una fuerza arbitraria en la superficie cilíndrica (200 N) y observando el desplazamiento máximo que aparece se puede determinar la rigidez lateral de la pieza original. Esta rigidez se tendrá en cuenta en el diseño generativo, para descartar posibles soluciones que no sean tan rígidas como la pieza original.

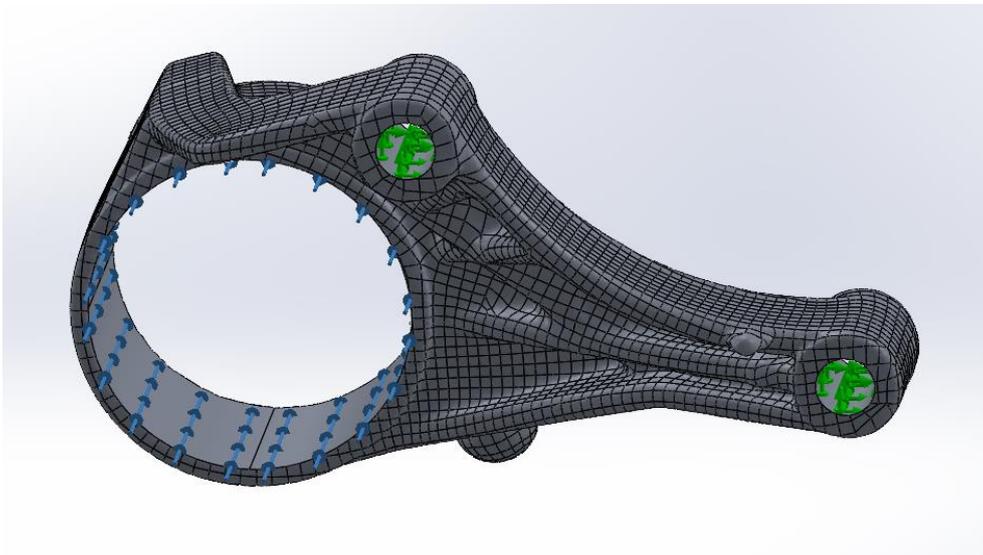
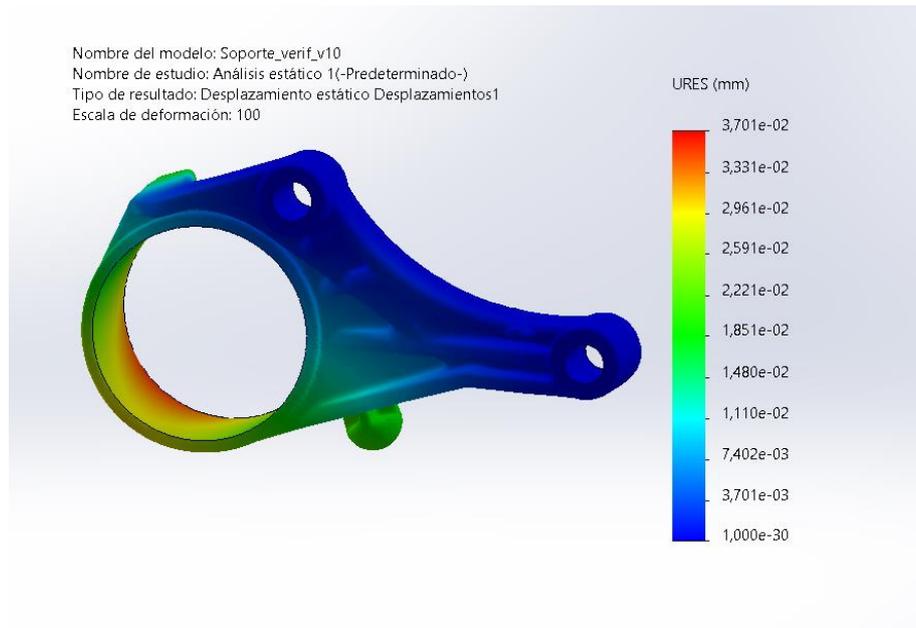


Figura 30: Fuerza lateral de 200N para la determinación de la rigidez de la pieza original.

Fuente: elaboración propia en SOLIDWORKS Simulation



*Figura 31: Resultado de la simulación de deformación ante fuerza lateral de 200 N.
 Fuente: elaboración propia en SOLIDWORKS Simulation*

A partir de los resultados de la Figura 31, podemos determinar la rigidez lateral de la pieza:

$$k_z = \frac{F_z}{U_z} = \frac{200 \text{ N}}{0,037 \text{ mm}} = 5405 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

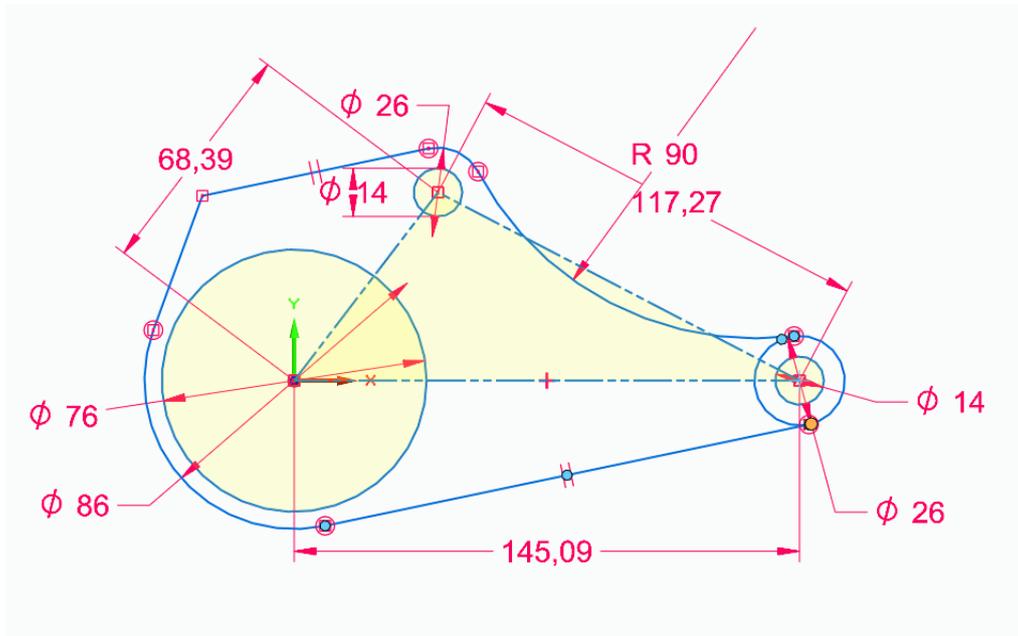
4.4. Diseño generativo

4.4.1. Construcción de un diseño de entrada.

Ya se han presentado en el apartado 2.2. Diseño Generativo del Capítulo 2. Estado del arte las características del diseño generativo. Concretamente, en la Tabla 1 se ha comparado este método con la optimización topológica, siendo la principal diferencia que en el diseño generativo permite más libertad con el diseño de entrada, que además de ser opcional, no necesariamente debe ser el mismo que el diseño original a optimizar.

Es por ello por lo que se puede rediseñar por completo la pieza, siempre y cuando mantenga sus características esenciales. En el caso del soporte delantero del motor, se propone una geometría inicial en la que no cambia ni el tamaño ni la posición de sus agujeros y que permita un amarre al motor. En la Figura 33 se muestra la geometría de partida. Sus características son las siguientes:

- Geometría simplificada.
- Interfaces preservadas.
- Espacio liberado en torno a los agujeros de los tornillos para facilitar el montaje y desmontaje.



*Figura 32: La geometría básica del diseño de entrada coincide con la del diseño original (Figura 15). Cotas en milímetros.
Fuente: elaboración propia en Solid Edge.*

Se va a emplear el módulo de Diseño Generativo de Solid Edge, por lo que se construyó el diseño de entrada en este software a partir de las medidas físicas y por ingeniería inversa

de la pieza original. El material es un aluminio para fundición similar al 356 T6, con un límite elástico de 160 MPa.

En las Figura 32 y Figura 33 se muestran la geometría de entrada a optimizar.

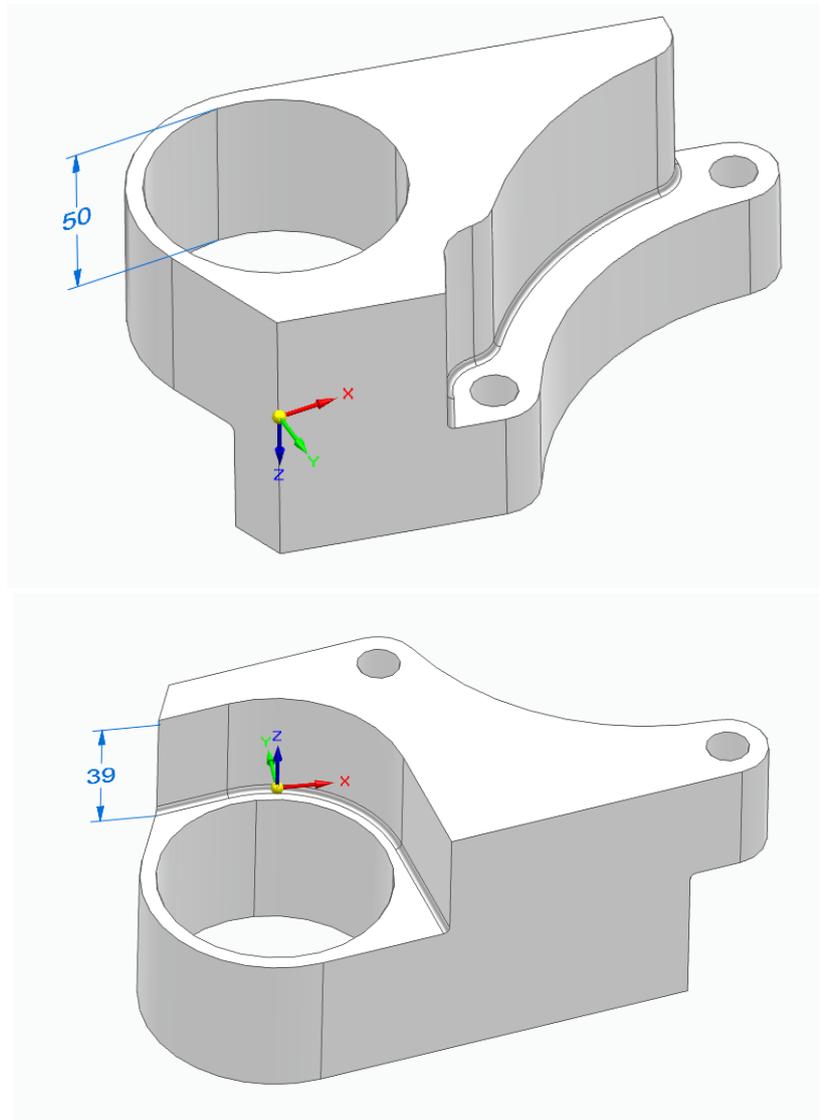
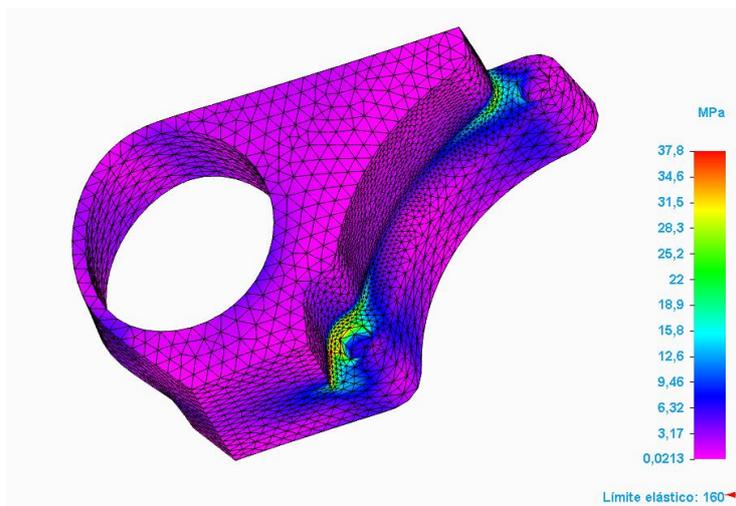


Figura 33: Dos vistas del diseño de entrada a partir del cual se generarán diseños optimizados. Cotas en milímetros.

Fuente: elaboración propia en Solid Edge

4.4.2. Simulación del diseño de entrada

Se busca ahora verificar el buen comportamiento del sólido y estimar cualitativamente cuánta reducción del material se puede realizar con el diseño generativo. Por lo tanto, se ha decidido realizar una simulación de la combinación de acciones del mismo estado de cargas, obteniendo los resultados de la Figura 34.



*Figura 34: Resultado de la simulación de las cargas sobre el diseño de entrada.
Fuente: elaboración propia en Solid Edge Simulation*

En la Figura 34 se observa que los puntos críticos siguen estando en la misma zona que en las simulaciones de la pieza original. Sin embargo, esta geometría de entrada no tiene ni vaciados ni nervaduras (el material es sólido) por lo que se espera que la tensión máxima sea menor a los 125 MPa de la Figura 29. De hecho, solamente se llega a 37,8 MPa en zonas locales, que es 25 % del límite elástico del material. Se comprueba el amplio margen de mejora del diseño de entrada que ahora pesa 1587 g según los cálculos de Solid Edge. Con el diseño generativo se buscará reducir al máximo el peso y soportar el estado de cargas del material.

Adicionalmente se calculará la rigidez lateral de esta pieza para ver cómo se modifica en diseños posteriores. Al igual que como se hizo en el apartado Determinación de la rigidez, se impuso una fuerza arbitraria de 200 N y se observó el desplazamiento resultante máximo en la Figura 35.

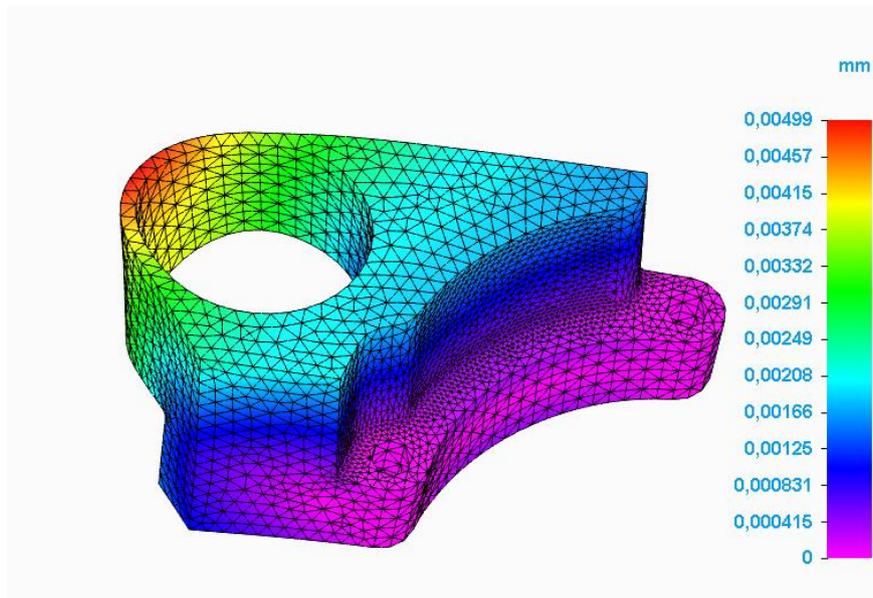


Figura 35: Resultado de la simulación de deformación ante fuerza lateral de 200 N
Fuente: elaboración propia en Solid Edge Simulation

A partir de los resultados de la Figura 35, podemos determinar la rigidez lateral de la pieza, lógicamente bastante mayor que la de la pieza original al haber mucho más material.

$$k_z = \frac{F_z}{U_z} = \frac{200 \text{ N}}{0,00499 \text{ mm}} = 40\,816 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad (20)$$

4.4.3. Objetivos, especificaciones y parámetros de diseño

El objetivo principal de este diseño generativo es el siguiente:

- Reducción al máximo de la masa de la pieza.

Adicionalmente, se deben establecer los siguientes límites:

- No superar el límite de fatiga del material con un cierto factor de seguridad.
- Asegurar una rigidez lateral mínima respecto la original.
- Preservar regiones críticas de diseño.

Para ello, se debe especifica un material para la fabricación final. Como ya se ha mencionado en el estado del arte, el diseño generativo produce geometrías complejas que se consiguen óptimamente mediante la fabricación aditiva. Aunque el prototipo a fabricar es en plástico, el producto final es una impresión metálica y se debe tener en cuenta el material final.

Concretamente, en la impresión metálica de aluminio, el material más empleado es el AlSi10Mg. Este material tiene buena resistencia mecánica y a la corrosión y adecuadas propiedades dinámicas. La tecnología más empleada es el *Power Bed Fusion (PBF)*, explicada en el estado del arte. Al ser fabricación aditiva existe una anisotropía en las propiedades del material, lo que significa que dependiendo de la dirección el comportamiento de la pieza será ligeramente distinto. En particular, las piezas impresas se comportan peor ante cargas “verticales” es decir que no se alinean con los planos horizontales de impresión. En la Tabla 8 se presentan estos resultados.

Material	AlSi10Mg en polvo
Composición	Al + 10% Si + [...] + 0,2-0,45% Mn
Módulo de Young	
- Horizontal	75 ±10 MPa
- Vertical	70 ±10 MPa
Límite elástico	
- Horizontal	270 ±10 MPa
- Vertical	240 ±10 MPa
Resistencia a fatiga	
- Vertical	97 ±7 MPa

Tabla 8: Propiedades del AlSi10Mg impreso en PBF sin posterior tratamiento térmico.
Fuente: Ficha técnica EOS GmbH [35]

Como las propiedades mecánicas varían según la dirección, y ante la ausencia de este material en las bases de datos de los programas CAD se ha decidido mantener el aluminio fundido de anteriores simulaciones, que tiene propiedades mecánicas similares. No obstante, se empleará como valor límite de tensión la de fatiga en la impresión metálica que son 90 MPa en el peor caso.

Se empleará un factor de seguridad de 1.5, que como se han ponderado por dos las cargas estáticas supondría un factor de seguridad estático de 3 frente a la tensión de fatiga.

Este valor ha sido seleccionado siguiendo las recomendaciones de la Asociación Australiana de Proveedores de carretera, que establecen un factor de seguridad mínimo de 3 para piezas de fijación (*mounting components*) en camiones. [36] Por lo tanto, con cargas mayoradas para tener en cuenta el efecto dinámico, el factor de seguridad de 1,5 supone que las tensiones deben ser menores a 60MPa.

La totalidad de las especificaciones de diseño se muestran en la Tabla 9 :

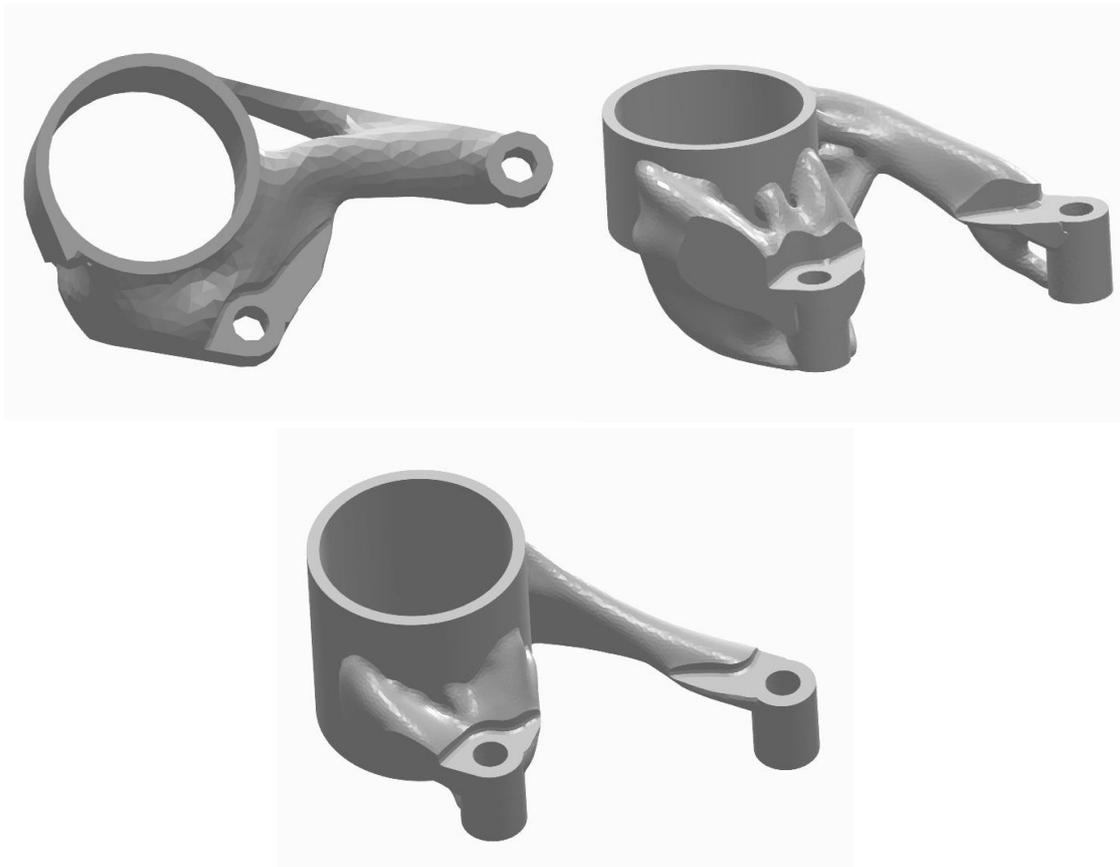
Objetivo principal	Reducción de la masa
Límites	Factor de seguridad de 1,5 frente a tensión de fatiga Tensión < 90MPa / 1,5 = 60 MPa Rigidez lateral $K_z > 5405$ N/mm
Espacio de diseño	Toda la pieza
Regiones preservadas	Interfaces y sus alrededores Curva apoyo motor
Material	AMn5 GOST 4784-97 // Al 356 T6 (idealmente se usaría el AlSi10Mg)
Cargas	Fuerza vertical y horizontal en articulación
Restricciones	Geometría fija en alojamientos de tornillos
Simetrías	No
Requisitos finales	Fabricación de un prototipo plástico por Impresión 3D Fabricación aditiva metálica del producto final. Espesores mínimos > 1 mm

*Tabla 9: Especificaciones del diseño generativo.
Fuente: elaboración propia*

4.4.4. Ejecución de los diseños generativos

Iteraciones iniciales

Inicialmente se especificó que el modelo de diseño solo preservara las regiones cercanas a los agujeros, pero no la curva en la que el motor se apoya. Los resultados obtenidos en cada iteración eliminaban la curva que abraza al motor y por lo tanto se cambiaron las especificaciones del diseño para conservar este elemento de interfaz. No obstante, se presentan las geometrías generadas en la Figura 36.



*Figura 36: Varias geometrías generadas en las iteraciones iniciales.
Fuente: elaboración propia en el módulo de Diseño Generativo de SolidEdge*

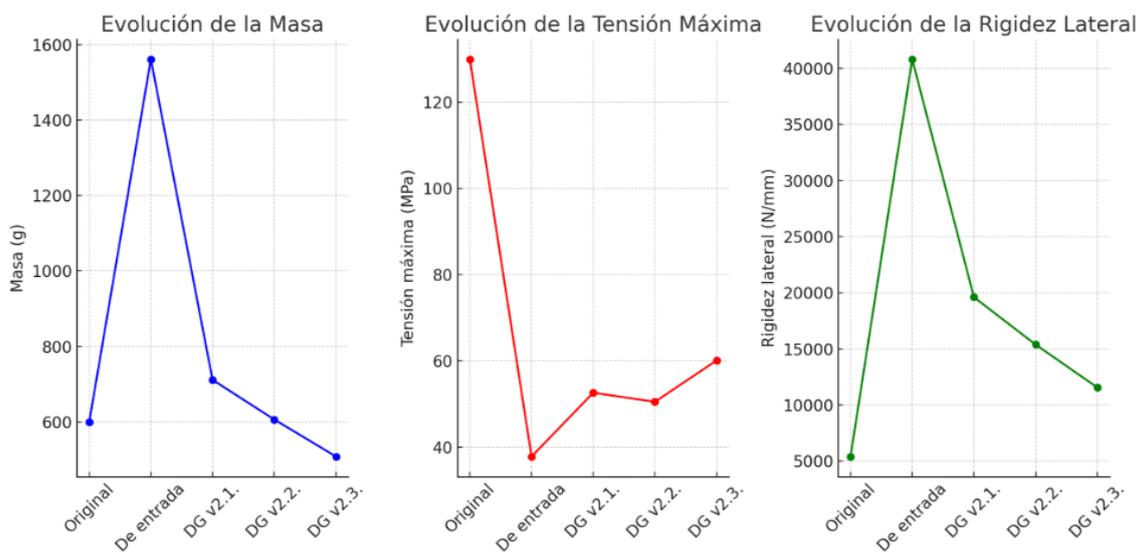
Iteraciones definitivas

Una vez se impuso que la curva que une los apoyos sea una geometría para preservar, se generaron diseños más adecuados que fueron analizados con detalle. Los resultados obtenidos se fueron almacenando en la Tabla 10 y las imágenes de los diseños con sus simulaciones se muestran en las figuras posteriores.

Geometría	Masa (g)	Tensión máxima (MPa)	Rigidez lateral (N/mm)
Original	600	*250 (fallo en mallado) 130 (más realista)	5 405
De entrada	1561	37,8	40 816
DG v2.1.	712	52,6	19 608
DG v2.2.	607	50,5	15 385
DG v2.3.	509	60,1	11 561

*Tabla 10: Comparación de los resultados del proceso de diseño generativo.
Fuente: elaboración propia.*

En la Figura 37 se puede apreciar que, a mayor reducción de la masa, la tensión tiende a ascender, y ocurre lo contrario con la rigidez lateral, coincidiendo con los resultados esperables.



*Figura 37: Evolución de los parámetros en los diseños generados.
Fuente: elaboración propia.*

DISEÑO GENERATIVO v2.1.



Figura 38: Resultado del diseño generativo 2.1.

La masa de la pieza es de 712 g.

Fuente: elaboración propia en el módulo de Diseño Generativo de Solid Edge

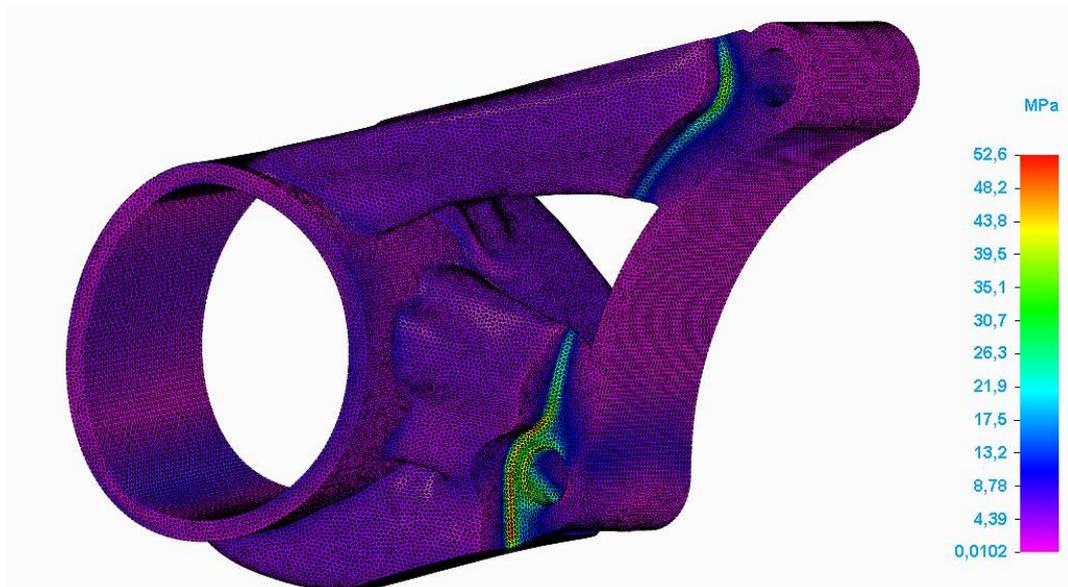
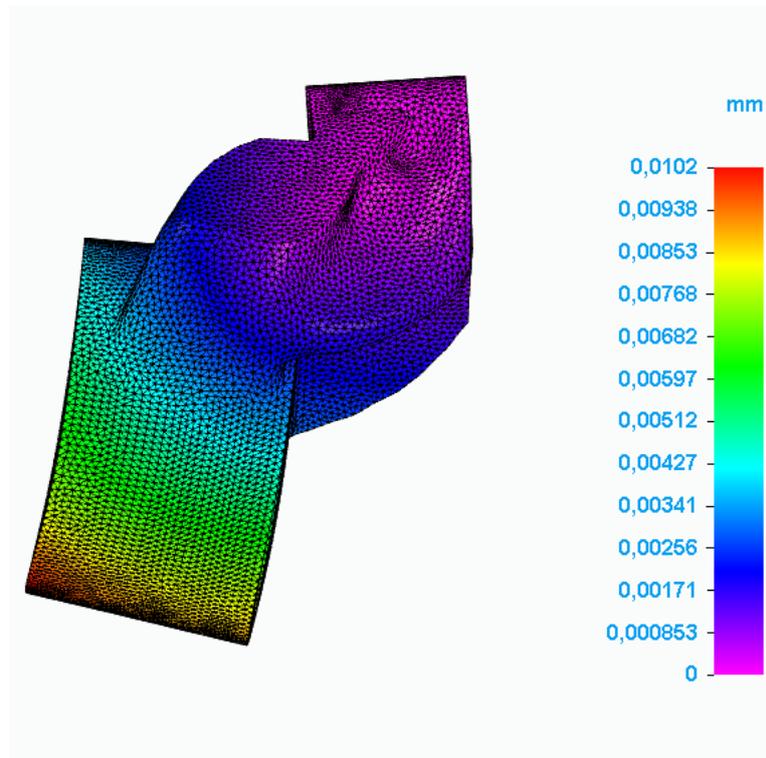


Figura 39: Resultado de la simulación de las cargas sobre el diseño generativo 2.1. La tensión máxima es de 52,6 MPa.

Fuente: elaboración propia en Solid Edge Simulation



*Figura 40: Resultado de la simulación de deformación ante fuerza lateral de 200 N.
La deformación máxima es de 0,0102 mm.
Fuente: elaboración propia en Solid Edge Simulation*

A partir de los resultados de la Figura 40, podemos determinar la rigidez lateral de la pieza, lógicamente bastante menor que la del diseño de entrada al haber mucho menos material.

$$k_z = \frac{F_z}{U_z} = \frac{200 \text{ N}}{0,0102 \text{ mm}} = 19\,608 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad (21)$$

DISEÑO GENERATIVO v2.2.

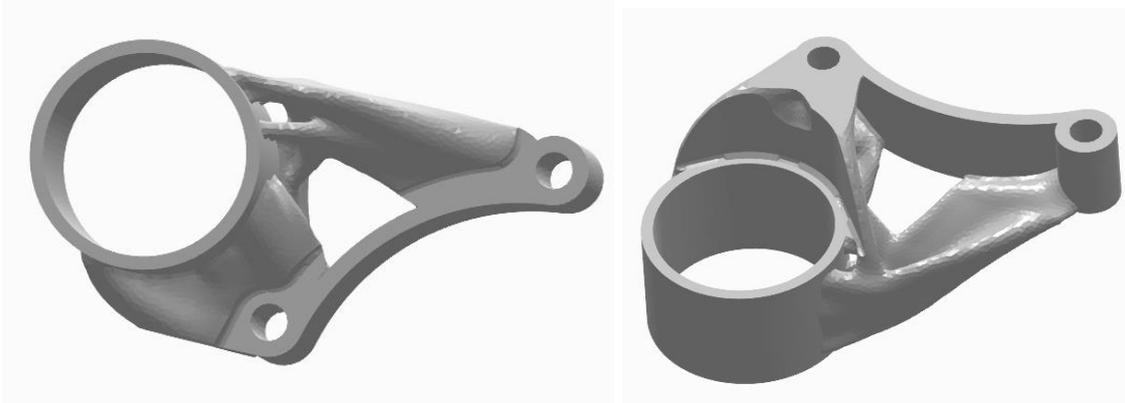


Figura 41: Resultado del diseño generativo 2.2.

La masa de la pieza es de 607 g.

Fuente: elaboración propia en el módulo de Diseño Generativo de Solid Edge

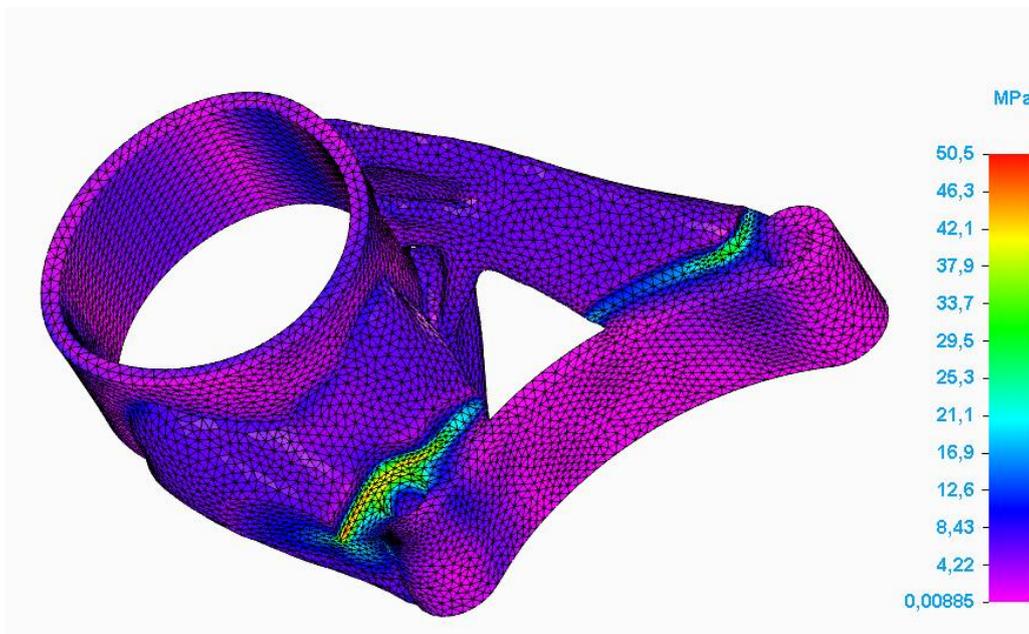
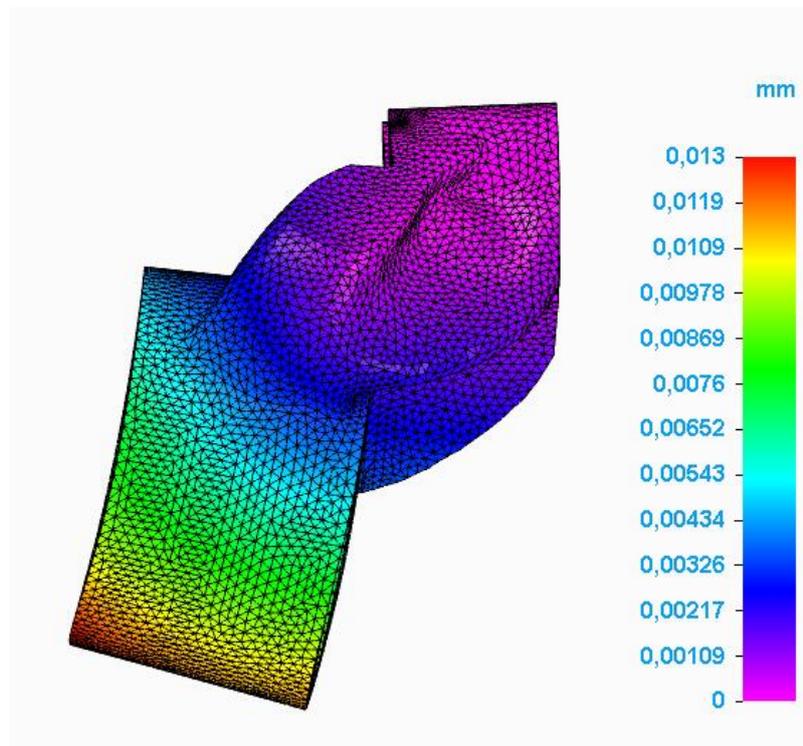


Figura 42: Resultado de la simulación de las cargas sobre el diseño generativo 2.2. La tensión máxima es de 50,5 MPa.

Fuente: elaboración propia en Solid Edge Simulation



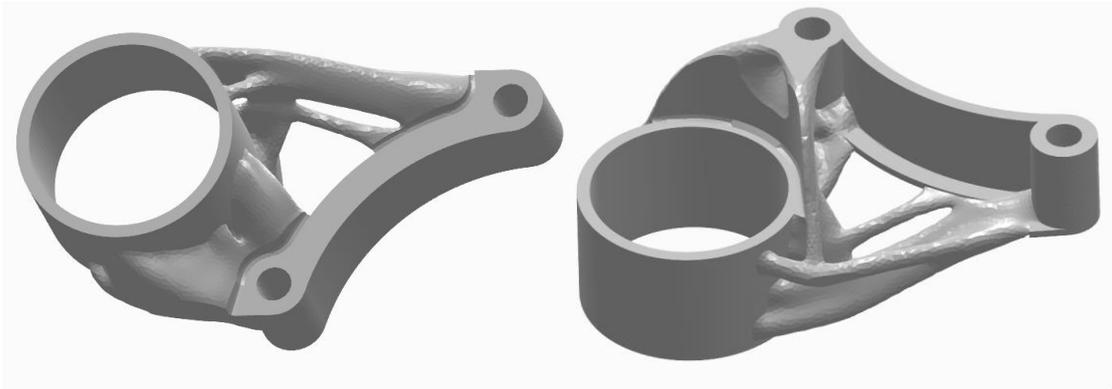
*Figura 43: Resultado de la simulación de deformación ante fuerza lateral de 200 N.
La deformación máxima es de 0,013 mm.*

Fuente: elaboración propia en Solid Edge Simulation

A partir de los resultados de la Figura 43, podemos determinar la rigidez lateral de la pieza que cada vez es menor al retirar más material.

$$k_z = \frac{F_z}{U_z} = \frac{200 \text{ N}}{0,013 \text{ mm}} = 15\,385 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad (22)$$

DISEÑO GENERATIVO v2.3.



*Figura 44: Resultado del diseño generativo 2.3.
La masa de la pieza es de 509 g.*

Fuente: elaboración propia en el módulo de Diseño Generativo de Solid Edge



Figura 45: Resultado de la simulación de las cargas sobre el diseño generativo 2.3. La tensión máxima es de 60,1 MPa.

Fuente: elaboración propia en Solid Edge Simulation

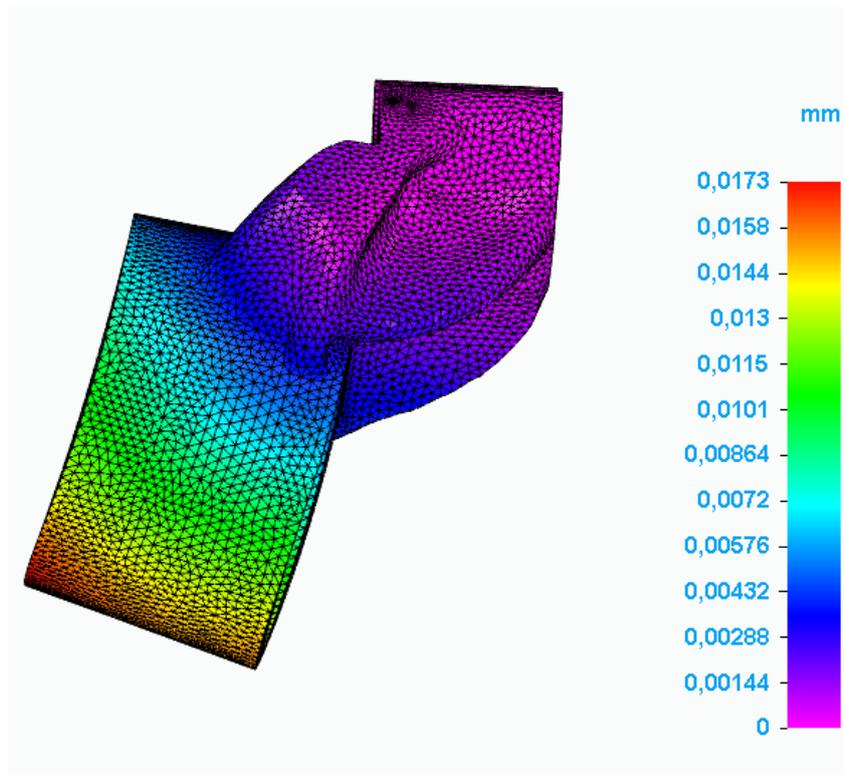


Figura 46: Resultado de la simulación de deformación ante fuerza lateral de 200 N. La deformación máxima es de 0,0173 mm.

Fuente: elaboración propia en Solid Edge Simulation

A partir de los resultados de la Figura 46, podemos determinar la rigidez lateral de la pieza que cada vez es menor al retirar más material.

$$k_z = \frac{F_z}{U_z} = \frac{200 \text{ N}}{0,0173 \text{ mm}} = 11\,561 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad (23)$$

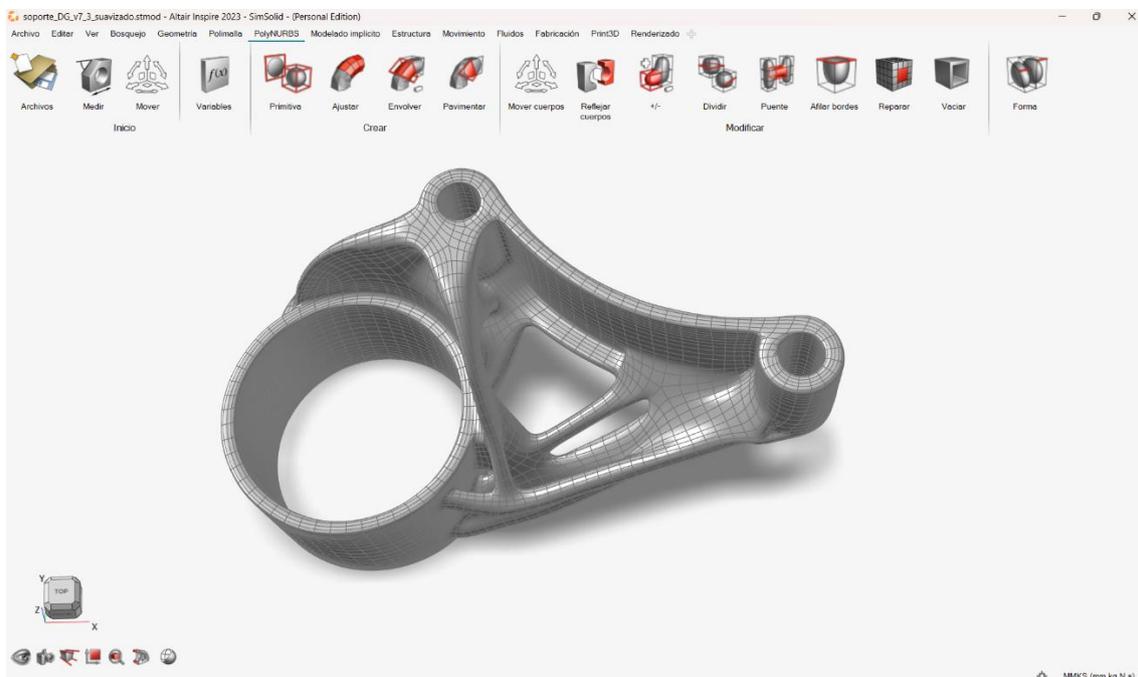
En este último diseño la tensión asciende hasta los 60MPa y se empiezan a generar espesores delgados. Teniendo en cuenta tanto el factor de seguridad de 1,5 frente a la tensión de fatiga de 90MPa, como la fabricación de la pieza se decide finalizar la optimización con este diseño, logrando una reducción de la masa del 15%.

A continuación, se refinará el modelo corrigiendo defectos de la optimización y facilitando la fabricación.

4.4.5. Elección de un diseño adecuado y refinamiento

Las iteraciones finalizan porque se ha llegado a un límite en tensión y el diseño escogido es el 2.3. Ahora se busca suavizar esta geometría optimizada y para ello se ha empleado el software Altair Inspire.

En la sección de *PolyNURBS*, se ha empleado el comando de *Ajustar* y se ha creado una superficie suavizada en la pieza. Se han eliminado recovecos y agujeros internos que dificultaban la fabricación. Adicionalmente, empleando el comando “+ / -” se ha añadido material en algunas uniones entre la geometría preservada y la optimizada para evitar espesores delgados. El resultado final se muestra en la Figura 47.



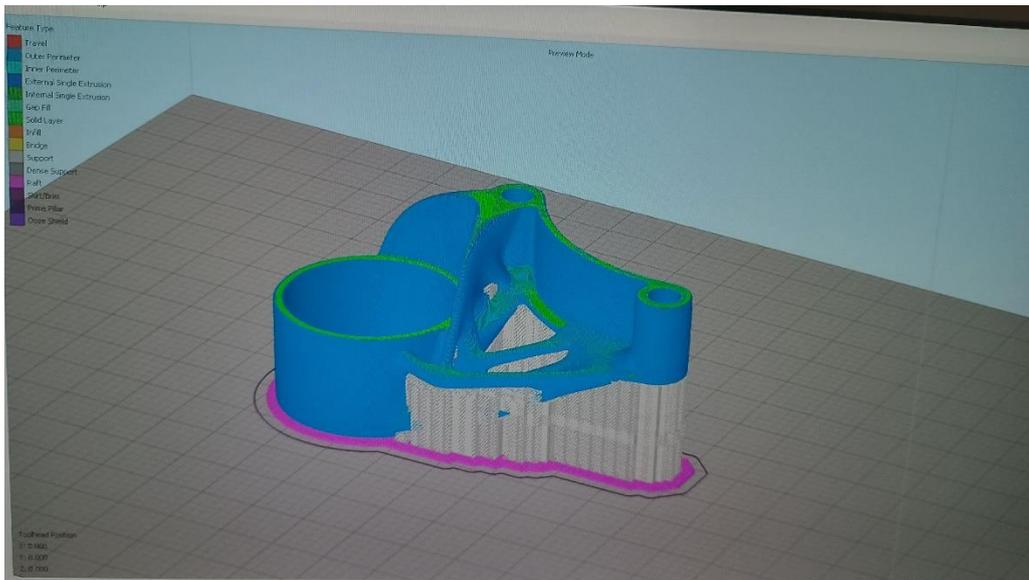
*Figura 47: Resultado del refinamiento del modelo por Altair Inspire.
Fuente: elaboración propia en portátiles del Departamento de Fabricación de ICAI*

A pesar de que en el proceso de refinado se ha añadido algo de material, la geometría básica es la misma. Por lo tanto, no es necesario realizar una simulación final. Concretamente la nueva masa pasa de los 509g iniciales a los 526 g. Esto supone una reducción final del 12,3 % en masa con respecto a la pieza original, que pesa 600g.

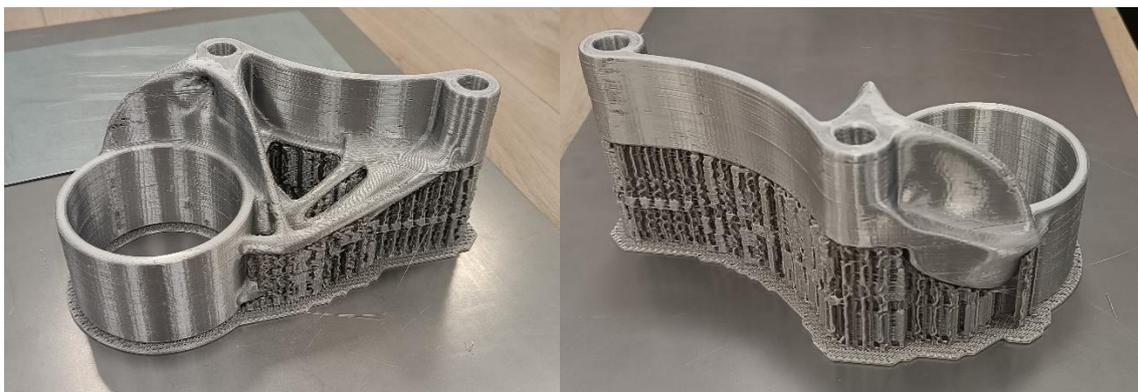
4.5. Fabricación aditiva de un prototipo

4.5.1. Tecnología filamentos FDM

El primer prototipo ha sido fabricado por la tecnología clásica de impresión 3D: extrusión de filamentos. Se ha empleado la impresora DT 600 que tiene dos cabezales independientes y un gran volumen de impresión. Los resultados de la impresión y el postprocesado se muestran a continuación.



*Figura 48: Simulación de la impresión de la pieza en la impresora DT600.
Fuente: Elaboración propia en software de la facultad.*



*Imagen 12: Dos vistas de la pieza recién sacada de la impresora DT600.
Fuente: elaboración propia*



*Imagen 13: Resultado de la impresión FDM tras postprocesado.
Fuente: elaboración propia*



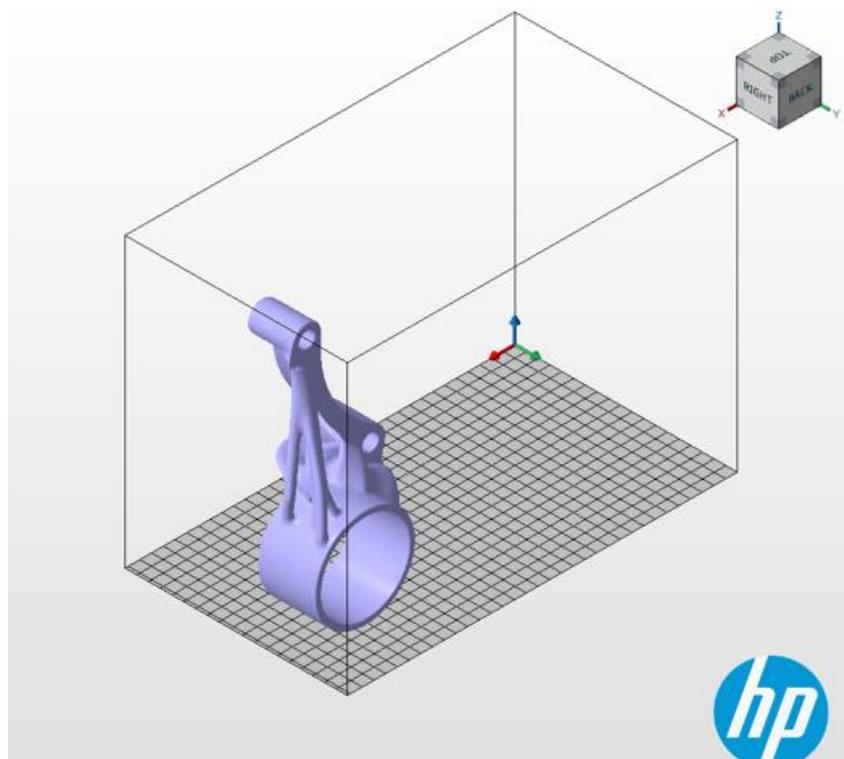
*Imagen 14: Impresora DT 600 de tecnología de filamentos FDM
Fuente: elaboración propia*

4.5.2. Tecnología polvo MJF

Para el segundo prototipo, y buscando un mejor acabado, se ha empleado la impresora HP Jet Fusion 580 que emplea la tecnología patentada *Multi Jet Fusion* (MJF). Este tipo de impresión 3D emplea como material base un polvo plástico, al igual que las tecnologías de sinterizado láser. No obstante, existen diferencias entre la tecnología MJF y la impresión de polvo por láser (PBF).

El proceso de impresión MJF comienza esparciendo una fina capa de polvo en la base de la impresión. A continuación, sobre este polvo se aplica un agente líquido facilitando la fusión de las partículas de polvo con la posterior emisión de calor infrarrojo. Se repite este proceso capa por capa, generando piezas con mejores propiedades mecánicas a altas velocidades. En concreto se consiguen componentes isotrópicos (mismas propiedades mecánicas en todas las direcciones y orientaciones), reduciendo la anisotropía propia de las tecnologías de filamentos.

Adicionalmente, la tecnología de impresión en polvo ofrece un mejor acabado superficial en comparación con las tecnologías de filamentos, por ello es ideal para prototipos con geometrías complejas. Los resultados de la impresión y el postprocesado se muestran a continuación.



*Figura 49: Vista de la preparación de la impresión en HP Jet Fusion 580.
Fuente: Elaboración propia en software de la facultad.*



*Imagen 15: Resultado de la impresión por polvo en HP Jet Fusion.
Fuente: elaboración propia*



*Imagen 16: Impresora HP Jet Fusion 580 de tecnología polvo (MJF)
Fuente: elaboración propia*

4.6. Análisis de costes e impacto ambiental

4.6.1. Costes del prototipado

Para el cálculo de los costes de la fabricación de los prototipos se ha empleado una hoja Excel proporcionada por el laboratorio de Fabricación Aditiva de ICAI. En ella se tienen en cuenta, la amortización de las impresoras, el coste del material, el trabajo de postprocesado y el margen de beneficio buscado.

Tecnología filamentos FDM

El coste de la impresión por tecnología FDM en la impresora DT600 ha sido de 116,77 € (Tabla 11), considerando un margen del 30% de beneficio.

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FDM		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)		50.000
Coste mantenimiento anual (€)		2.500
Años de amortización		4
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día		2000
Precio Hora máquina-amortización (€/h)		7,19
Precio Hora venta-público (€/h)		9,34
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material modelo: (€/kg)		20,00
Coste material soporte: (€/kg)		20,00
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)		20
PIEZA Soporte motor Rubén - Orientación HORIZONTAL		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (g)	169,21	3,38 €/ud
Soporte modelo (g)	0,00	0,00 €/ud
Tiempo modelo (h)	11,60	108,39 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,25	5,00 €
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	116,77 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	116,77 €	

*Tabla 11: Costes del prototipado con tecnología FDM en impresora DT600.
Fuente: elaboración propia a partir de hoja de cálculo del departamento de fabricación aditiva*

Tecnología polvo MJF

El coste de la impresión por tecnología MJF en la impresora HP Jet Fusion 580 ha sido de 133,08 €, considerando un margen del 60% del beneficio, mayor que la FDM al ser tecnología de última generación. (Tabla 12)

ANALISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -HP 580		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)		80.000
Coste mantenimiento anual (€)		8.000
Años de amortización		5
Días impresión/año		48
Impresiones/día		1
Precio impresión (€)		500,00
Precio Impresión venta-público (€)		800,00
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material: (€/kg)		100,00
Coste material: (€/cc)		0,11
Volumen Total (cc)		15634,75
Densidad de Empaquetado		10%
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. limpieza (€/h)		20
PIEZA Soporte motor Rubén - Orientación HORIZONTAL		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Sólido	Costes parciales
Material modelo (cc)	191,39	20,15 €/ud
Impresión	-	97,93 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,25	5,00 €/ud
Tiempo Limpieza (h)	0,50	10,00 €/ud
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	133,08 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	133,08 €	

Tabla 12: Costes del prototipado con tecnología MJF en impresora HP Jet Fusion 580
Fuente: elaboración propia a partir de hoja de cálculo del departamento de fabricación aditiva

4.6.2. Costes fabricación final: fundición vs impresión metálica

Hasta ahora se han estimado los costes del prototipado de la pieza optimizada. No obstante, puede ser relevante también comparar los posibles costes de producción de las piezas reales. Por un lado, se tiene la pieza original de fundición y por otro se tiene la pieza optimizada y diseñada para ser fabricada por impresión metálica. El material base es el polvo de aluminio Al-Si10Mg y la tecnología empleada es la *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS) otra forma de tecnología de fusión en lecho de polvo (PBF).

Para la estimación de los costes de la fabricación de las piezas finales se ha empleado la plataforma de fabricación bajo demanda *Xometry*, concretamente la opción de presupuestos. Según *Xometry*, el precio de venta al público de la fabricación de una unidad de la pieza optimizada por impresión metálica es de 811,49 € (Figura 50).

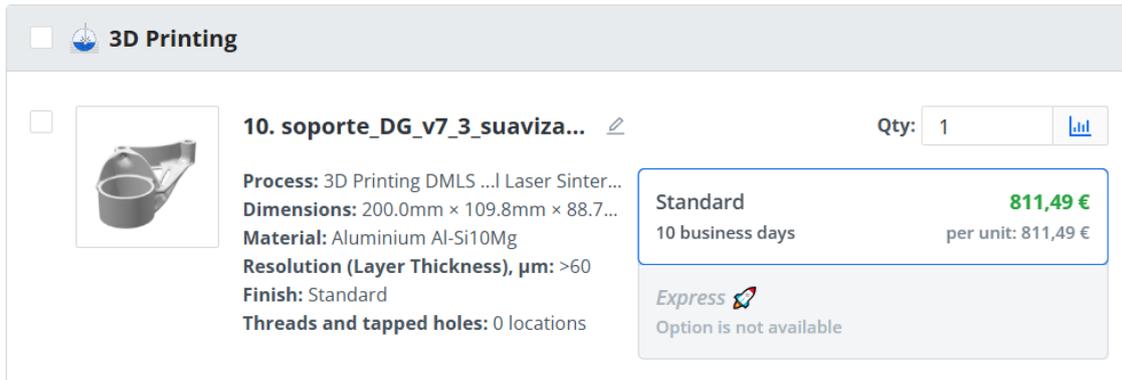


Figura 50: Presupuesto para la fabricación de una unidad de la pieza optimizada.
Fuente: Presupuestos automáticos de *Xometry*

Por otro lado, según la plataforma de venta de componentes del automóvil *AUTODOC*, el precio de venta al público de la pieza original fundida es de 23,78 € (Figura 51), mucho menor que la impresión metálica. Esto es debido a que la fundición de este componente ya está establecida en el mercado. Por el contrario, la fabricación a demanda de la pieza optimizada emplea tecnologías modernas que deben ser amortizadas.

Se comprueba que la fabricación aditiva de componentes de responsabilidad aún no tiene cabida en la producción de lotes elevados de piezas en el sector del automóvil, porque las tecnologías de conformado por fundición tienen mayor productividad y costes menores.

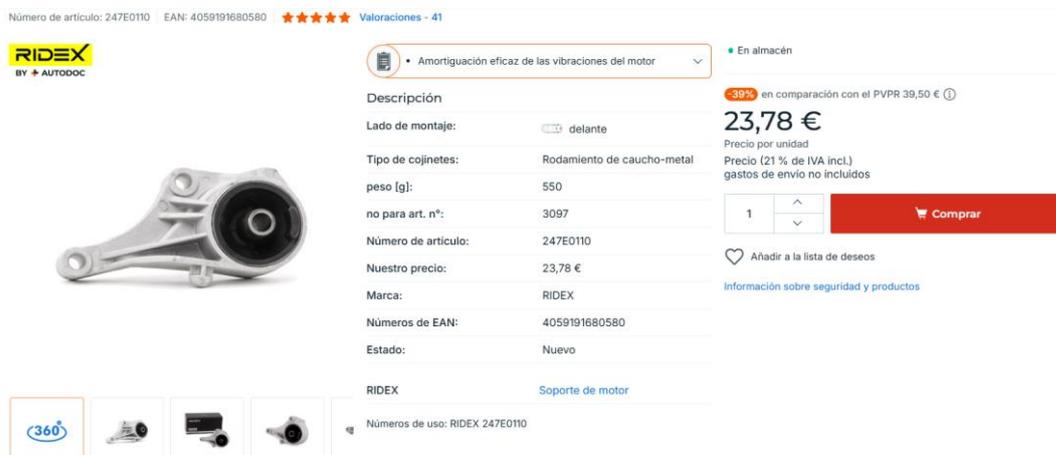


Figura 51: Precio de venta al público del recambio del soporte del motor original.
Fuente: recambios *AUTODOC* [4].

4.6.3. Impacto ambiental: fundición vs impresión metálica

Alcance del estudio

Para estimar el impacto ambiental y la huella de carbono, existen varias metodologías. Una de ellas es el estudio del ciclo de vida del producto o *Life Cycle Assessment* (LCA). En ella se pretende estudiar de forma global el impacto de cierto producto en el medio ambiente. Se pueden realizar varios tipos de análisis en función del alcance del estudio:

- Un análisis solamente del **proceso de fabricación**
- Un análisis desde la obtención de las materias primas hasta la fabricación (***Cradle to Gate***).
- Un análisis del ciclo de vida completo, desde la obtención de las materias primas hasta la disposición final o reciclaje del componente (***Cradle to Cradle***)

En el caso del soporte del motor el análisis se centrará en el proceso de fabricación, aunque también se tendrá en cuenta el ciclo de vida completo del producto. Este estudio no tendrá en cuenta el componente de caucho que se incorpora posteriormente a los soportes del motor, sino que simplemente se analizará la parte metálica.

En 2021 se celebró en Gotemburgo (Suecia) la vigesimotercera Conferencia Internacional sobre Diseño de Ingeniería o *International Conference on Engineering Design* (ICED21) y en este contexto los profesionales Van Sice y Faludi recogieron en un artículo la comparativa entre impresión metálica y procesos de fabricación tradicionales: *Comparing environmental impacts of metal additive manufacturing to conventional manufacturing* [37]. Este documento será la base de la comparativa del impacto ambiental entre fundición e impresión metálica. También se contrastará con los datos aportados del Instituto Internacional de Aluminio (IAI).

Obtención de la materia prima

Según el Instituto Internacional de Aluminio (IAI) el impacto global de la obtención del metal es del 16,8 kg CO₂ eq por cada kg de Aluminio. Este dato es una estimación teniendo en cuenta la contribución de distintos modos de extracción y transformación de la materia primaria (bauxita): los procesos con mayor dependencia del carbón pueden superar los 20 kg CO₂ eq / kg Al y los que evitan el uso de combustibles fósiles son del entorno de 5 kg CO₂ eq / kg Al. [38]

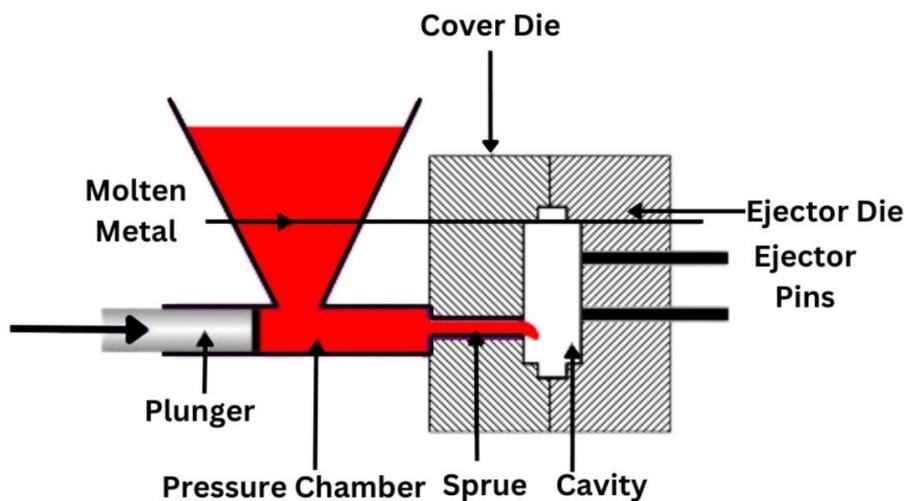
El reciclaje de piezas de aluminio reduce estos primeros valores significativamente, por lo que el impacto medioambiental dependerá en gran medida de si la materia prima proviene de chatarra de otras piezas o si es extraída de yacimientos mineros.

Procesos de fabricación

La pieza original (Imagen 17) es una aleación de Aluminio. Por su aplicación como soporte del motor se ha considerado como un Aluminio A356 que ha sido fabricado por fundición. En este proceso de fabricación el metal fundido se vierte en un molde capturando la geometría de la pieza deseada. Concretamente, en esta pieza la fundición es en coquilla, ya que el aluminio fundido es inyectado en un molde resistente de acero aleado. La parte metálica tiene una masa de 600g.



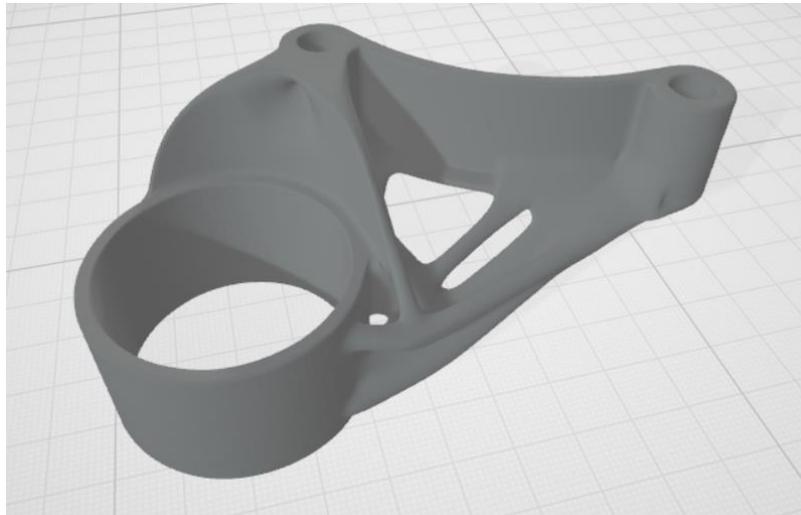
*Imagen 17: Soporte delantero del motor en su geometría original
Fuente: elaboración propia*



*Figura 52: Diagrama del proceso de fundición a presión
Fuente: Página web de HDC machining [39]*

La fabricación de piezas de aluminio para fundición exige el uso de hornos para alcanzar la temperatura de fusión del metal ($\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$) y para tratamientos térmicos posteriores a la colada (Figura 52). Según el IAI, Este proceso de transformación del metal solamente representa entre **0,4 y 0,8 kg CO₂ eq / kg Al**, mucho menos que la minería del mismo. [38]

En el artículo de Van Sice y Faludi (2021), la fundición de aluminio genera unas emisiones de entre **0,62 y 1 kg CO₂ eq / kg Al**. Estos datos fueron extraídos de la base de datos de materiales y procesos *Granta EduPack*. Además, el material de forma inherente tiene asociadas unas emisiones en el intervalo de 11 a 20 kg CO₂ eq / kg Al. Estos datos son coherentes con los aportados por el IAT sobre la obtención del aluminio. [37]



*Figura 53: Geometría optimizada para ser fabricada por impresión metálica
Fuente: elaboración propia*

Por otro lado, la pieza final optimizada, al tener geometrías complejas debe ser fabricada por impresión metálica. La tecnología de Fusión en Lecho de Polvo o *Powder Bed Fusion* (PBF) es la más empleada y será la escogida en este análisis. La pieza optimizada en peso tiene una masa estimada de 526g.

La fabricación de componentes por impresión metálica tiene tres procesos principales: la producción del polvo metálico, la impresión final de la pieza por tecnologías láser (Figura 6) y los tratamientos térmicos posteriores. La producción del polvo se realiza por medio de la atomización. En este proceso se funde el metal y posteriormente pasa por una boquilla donde inmediatamente se le hace incidir un chorro de gas (normalmente argón, nitrógeno o helio). Las pequeñas gotas del metal se solidifican formando partículas muy pequeñas del polvo metálico (Figura 54).

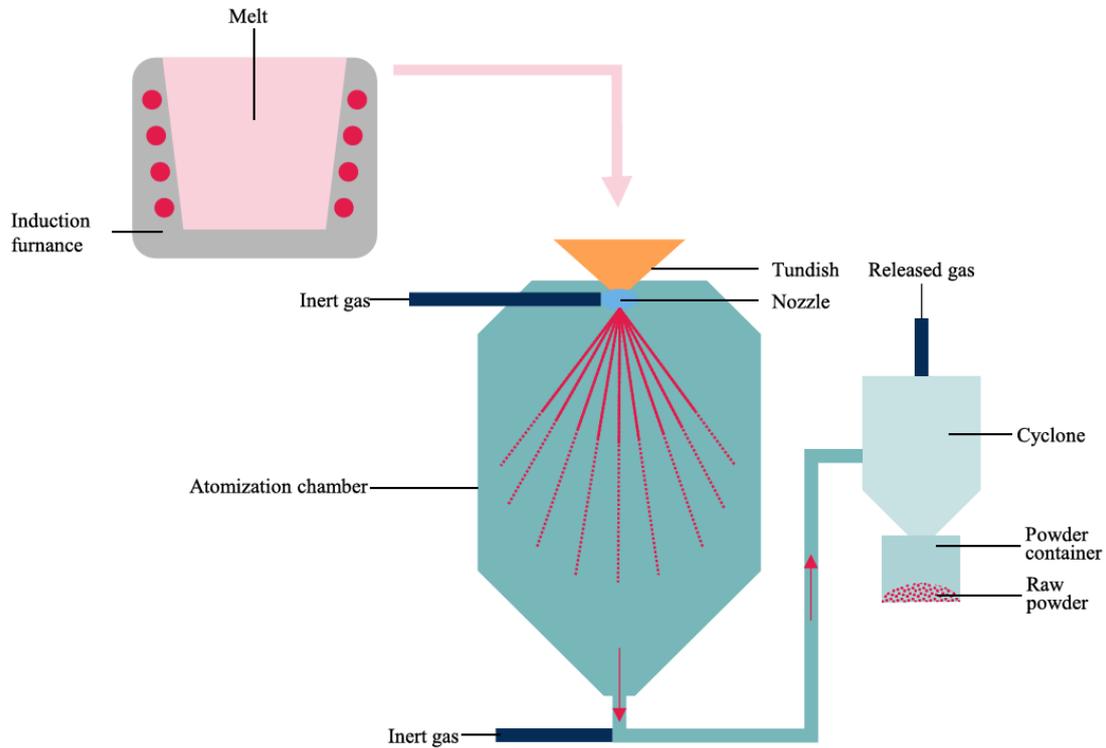


Figura 54: Diagrama del proceso de fabricación del polvo metálico (atomización)
Fuente: Artículo del impacto ambiental de la atomización por gas (2025) [40]

En el artículo de Van Sice y Faludi (2021) y según varios autores, la producción de piezas a través de la tecnología de fusión por láser (SLM o PBF) tiene un impacto de entre 50 y 192 kg CO₂ eq / kg Al, mucho mayor que la fundición [37]. Sin embargo, las referencias son del 2010 y del 2016, y no son lo suficientemente recientes para un sector en constante transformación como la fabricación aditiva. En un artículo del impacto ambiental del proceso de la atomización, se llegan a resultados de entre **5 y 25 kg CO₂ eq / kg polvo**, dependiendo del mix energético del país.

Por lo tanto, sin tener en cuenta los procesos de impresión metálica y el tratamiento térmico posterior, la fabricación aditiva metálica tiene un mayor impacto ambiental que la fundición. La razón es que la fabricación del polvo metálico consume altas cantidades de energía que en muchos casos proviene de fuentes no renovables. No obstante, para series cortas de piezas con geometrías complejas y optimizadas en masa la impresión 3D metálica es el proceso de fabricación predilecto.

Vida útil de los componentes

A pesar de que la impresión metálica tenga un orden de magnitud más impacto en la huella de carbono, la incorporación de herramientas como el diseño ligero generativo puede revertir el impacto ambiental a largo plazo. Por ejemplo, en el sector aeroespacial se ha encontrado un balance positivo en la reducción de las emisiones contaminantes con la impresión metálica de piezas optimizadas. Esto es debido a que una pieza ligera ahorra combustible en toda su vida útil.

En el sector del transporte por tierra, hay un impacto limitado de las tecnologías de impresión metálica con diseño generativo si se busca reducir la huella de carbono. En un caso concreto de la optimización en masa de un pedal, Yang (2019) afirmó que la fabricación aditiva metálica de una geometría optimizada puede llegar a ser más ecológica que la fabricación tradicional si se triplica la vida útil del componente o si se reduce un 30% el peso de la pieza. [41]

En el caso del soporte del motor optimizado, solamente se ha llegado a un 12,3% de reducción de masa por lo que no se justifica la reducción de la huella de carbono solamente con un uso habitual del vehículo. El incremento de la vida de estos soportes y la investigación en la fabricación del polvo metálico con menos impacto ambiental es un paso necesario para la reducción de la huella ecológica.

Capítulo 5. Resultados

La incorporación del diseño ligero generativo en el rediseño del soporte del motor ha ofrecido los siguientes resultados:

- Distribución más uniforme de los esfuerzos en la pieza. Reducción de la tensión máxima a 60MPa.
- Optimización de la masa. Reducción del 12,3% del peso del soporte.
- Incremento a más del doble de rigidez lateral.

La reducción del peso viene asociada a una geometría optimizada que debe ser fabricada por impresión metálica en vez de por fundición. La producción del polvo Al-Si10Mg, supone mayores costes y emisiones contaminantes comparado con la fundición original del componente. Los resultados se muestran en la Tabla 13. El impacto ambiental se ha ponderado según la masa de la pieza.

Pieza	Original	Optimizada
Tecnología	Fundición a presión	Impresión metálica por laser
Material	Aluminio A356	Al-Si10Mg
Masa (g)	600	526
Tensión máxima (MPa)	~130	60,1
Rigidez lateral (N/mm)	5 405	11 561
Estimación del impacto ambiental por el proceso de fabricación (kg CO2 eq)	0,24 - 0,6	2,63 - 13,15
Coste de la pieza (€)	23,78	811,49
Comentarios	recambio habitual	fabricación a demanda

*Tabla 13: Comparativa entre el soporte original y el soporte optimizado.
Fuente: elaboración propia*

Se ha comprobado que la impresión metálica, comparada con la fundición, todavía tiene una relevancia limitada en la fabricación de componentes de automoción terrestre para reducir la huella de carbono. No obstante, a día de hoy en el sector aeroespacial los componentes optimizados y ligeros consiguen ahorrar combustible y emisiones en su ciclo de vida completo. En este ámbito, la impresión metálica sí que tiene un impacto positivo.

Por otra parte, la fabricación aditiva sigue siendo la mejor tecnología para el prototipado rápido en todos los sectores, incluido en el de la automoción. En este proyecto se han realizado varios prototipos y la comparativa de tecnologías y costes se muestra en la Tabla 14.

Tecnología	Filamentos (FDM)	Polvo (MJF)
Impresora	DT 600	HP Jet Fusion 580
Material prototipo	PLA plateado	Nylon PA 12Z
Tiempo impresión (h)	11,6	11,3
Masa impresión (g)	169	181
Coste prototipo (€)	116,77	133,08
Comentarios	Impresión 3D de una unidad	Impresión 3D de la cuba llena de piezas

*Tabla 14: Comparativa entre los prototipos fabricados.
Fuente: elaboración propia*



*Imagen 18: Vista de la pieza original fundida (arriba), y los dos prototipos plásticos impresos por FDM (centro) y polvo (abajo).
Fuente: elaboración propia*

Capítulo 6. Conclusiones y desarrollos futuros

En el presente proyecto se partía de un componente real de automóviles: el soporte delantero del motor de un Opel Corsa. Se han aplicado las herramientas de diseño generativo para optimizar la forma metálica del soporte. Para ello se han revisado y aplicado las tecnologías de ingeniería inversa, simulación por elementos finitos (FEM) y optimización topológica.

El resultado es un diseño un 12,3% más ligero y con un mejor comportamiento mecánico ante las cargas propuestas. Concretamente, la distribución de esfuerzos es más uniforme y se reduce la tensión máxima. Este diseño optimizado presenta formas orgánicas y complejas y debe ser generado por fabricación aditiva. Estas tecnologías son ideales para la fabricación de lotes cortos de piezas, permiten una personalización total y un tiempo de fabricación reducido. Por ello, la impresión 3D se ha extendido en la industria como herramienta de prototipado rápido.

Adicionalmente, la impresión metálica tiene cabida en el sector del transporte para la sustitución de componentes defectuosos o sin recambios disponibles. También se emplea en el sector aeroespacial, integrándose con las herramientas de diseño generativo y optimización topológica para la fabricación de componentes ligeros. No obstante, las piezas impresas a partir del polvo metálico tienen un peor comportamiento a fatiga y su producción tiene mayor huella de carbono y costes que la fundición metálica.

Ahora bien, a lo largo de toda la vida útil del componente una reducción de peso sí que puede contrarrestar el impacto ambiental con la reducción de las emisiones asociadas a un consumo menor de combustible. Por ello, la combinación de diseño generativo y fabricación aditiva se aplica en el sector aeroespacial para la producción de series cortas de componentes ligeros.

De cara a desarrollos futuros, si se procede a la fabricación por impresión metálica del diseño optimizado, habría que realizar trabajos posteriores para una integración segura del componente en el sistema de soportes del motor. En primer lugar, una vez realizado el postprocesado de la pieza, habría que realizar una labor de verificación dimensional y una mejora del acabado superficial en los agujeros y en la superficie donde el motor se apoya. Posteriormente, se debería integrar el componente de caucho en el soporte metálico. Una vez construida la pieza final, se deberán realizar ensayos de carga para verificar un buen comportamiento mecánico y a fatiga. Por último, se deberá integrar el soporte en un vehículo de pruebas y realizar rodadas para comprobar su comportamiento real.

En el contexto de la sostenibilidad, hay margen de mejora en los procesos de impresión metálica para la reducción de la huella de carbono. Por un lado, el proceso de reciclaje del polvo metálico debe ser investigado para reducir emisiones en su fabricación. Por otro lado, con la electrificación de los procesos y la integración de energías renovables en los mixes energéticos de los países, la fabricación del polvo metálico y la producción a demanda de series cortas de piezas optimizadas en masa tiene una destacada proyección a futuro.

Bibliografía

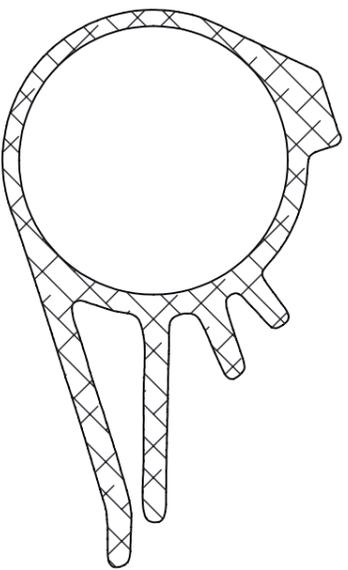
- [1] L. S. Valamede y A. C. S. Akkari, «Lean 4.0: A New Holistic Approach for the Integration of Lean Manufacturing Tools and Digital Technologies», *Int. J. Math. Eng. Manag. Sci.*, vol. 5, n.º 5, pp. 851-868, oct. 2020, doi: 10.33889/IJMEMS.2020.5.5.066.
- [2] S. Ford y M. Despeisse, «Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges», *J. Clean. Prod.*, vol. 137, pp. 1573-1587, nov. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.04.150.
- [3] M. Javaid, A. Haleem, R. P. Singh, R. Suman, y S. Rab, «Role of additive manufacturing applications towards environmental sustainability», *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.*, vol. 4, n.º 4, pp. 312-322, oct. 2021, doi: 10.1016/j.aiepr.2021.07.005.
- [4] «AUTODOC», RIDEX 247E0110 Soporte de motor. [En línea]. Disponible en: <https://www.autodoc.es/ridex/13631220>
- [5] «El Opel Corsa fue el automóvil más fabricado en España en 2023», *22 de abril de 2024*, 22 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://fleetpeople.es/el-opel-corsa-fue-el-automovil-mas-fabricado-en-espana-en-2023/>
- [6] «GMTrubber.com». [En línea]. Disponible en: <https://www.gmtrubber.com/5-signs-need-replace-engine-mounts/#:~:text=Usually%2C%20engine%20mounts%20should%20last,years%2C%20depending%20on%20the%20application.>
- [7] «erso.com.mx», Soportes del motor del auto. Señales de que debes cambiarlos. [En línea]. Disponible en: <https://erso.com.mx/blog/post/soportes-del-motor-del-auto-senales-de-que-debes-cambiarlos>
- [8] «3D Printing Market Size, Share, Industry Analysis Report 2030», abr. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/3d-printing-market-1276.html>
- [9] B. Sarzyński, L. Śniezek, y K. Grzelak, «Metal Additive Manufacturing (MAM) Applications in Production of Vehicle Parts and Components—A Review», *Metals*, vol. 14, n.º 2, p. 195, feb. 2024, doi: 10.3390/met14020195.
- [10] E. Dalpadulo, A. Petruccioli, F. Gherardini, y F. Leali, «A Review of Automotive Spare-Part Reconstruction Based on Additive Manufacturing», *J. Manuf. Mater. Process.*, vol. 6, n.º 6, p. 133, oct. 2022, doi: 10.3390/jmmp6060133.
- [11] E. Bassoli, S. Defanti, E. Tognoli, N. Vincenzi, y L. Degli Esposti, «Design for Additive Manufacturing and for Machining in the Automotive Field», *Appl. Sci.*, vol. 11, n.º 16, p. 7559, ago. 2021, doi: 10.3390/app11167559.
- [12] A. Haidiezul, A. Aiman, y B. Bakar, «Surface Finish Effects Using Coating Method on 3D Printing (FDM) Parts», *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 318, p. 012065, mar. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/318/1/012065.
- [13] «Manufactur3D». [En línea]. Disponible en: <https://manufactur3dmag.com/difference-dlp-sla/>

-
- [14] T. F. Babuska, B. A. Krick, D. F. Susan, y A. B. Kustas, «Comparison of powder bed fusion and directed energy deposition for tailoring mechanical properties of traditionally brittle alloys», *Manuf. Lett.*, vol. 28, pp. 30-34, abr. 2021, doi: 10.1016/j.mfglet.2021.02.003.
- [15] P. Moghimian *et al.*, «Metal powders in additive manufacturing: A review on reusability and recyclability of common titanium, nickel and aluminum alloys», *Addit. Manuf.*, vol. 43, p. 102017, jul. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.102017.
- [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] X. Jin, G. Li, y J. Gong, «Optimal design and modeling of 3D variable-density lattice structures», en *2017 8th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE)*, Prague, Czech Republic: IEEE, jul. 2017, pp. 320-325. doi: 10.1109/ICMAE.2017.8038664.
- [18] P. Bean, R. A. Lopez-Anido, y S. Vel, «Numerical Modeling and Experimental Investigation of Effective Elastic Properties of the 3D Printed Gyroid Infill», *Appl. Sci.*, vol. 12, n.º 4, p. 2180, feb. 2022, doi: 10.3390/app12042180.
- [19] R. Deplazes, «Autodesk and Airbus Demonstrate the Impact of Generative Design on Making and Building», noviembre de 2019. [En línea]. Disponible en: <https://adsknews.autodesk.com/es/news/autodesk-airbus-generative-design-aerospace-factory/>
- [20] «Toyota brings a generative design seat frame to the next level with AI», mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.autodesk.com/design-make/articles/generative-design-seat-frame>
- [21] D. Zubik, «VII CONGRESO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL».
- [22] R. H. Helle y H. G. Lemu, «A case study on use of 3D scanning for reverse engineering and quality control», *Mater. Today Proc.*, vol. 45, pp. 5255-5262, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.828.
- [23] T. Peng, «Analysis of Energy Utilization in 3D Printing Processes», *Procedia CIRP*, vol. 40, pp. 62-67, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.01.055.
- [24] A. A. Munoz y P. Sheng, «An analytical approach for determining the environmental impact of machining processes», *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 53, n.º 3-4, pp. 736-758, sep. 1995, doi: 10.1016/0924-0136(94)01764-R.
- [25] A. Espach y K. Gupta, «An Investigation on Achieving Sustainability in Fused Deposition Modeling via Topology Optimization», *Int. J. Recent Contrib. Eng. Sci. ITIJES*, vol. 9, n.º 3, p. 4, sep. 2021, doi: 10.3991/ijes.v9i3.23595.
- [26] K. Engel, «Predicting the design relevant loads in the engine mount system at an early stage of the development process».
- [27] P. Mallo, «El diferencial», *espíritu RACER*, 19 de septiembre de 2016. [En línea]. Disponible en: <https://espirituracer.com/reportajes/el-diferencial/>
- [28] U. Bhardwaj, «Transverse Vs Longitudinal | Engine Placement Explained», *GoMechanic*. [En línea]. Disponible en: <https://gomechanic.in/blog/engine-placement-explained/>
-

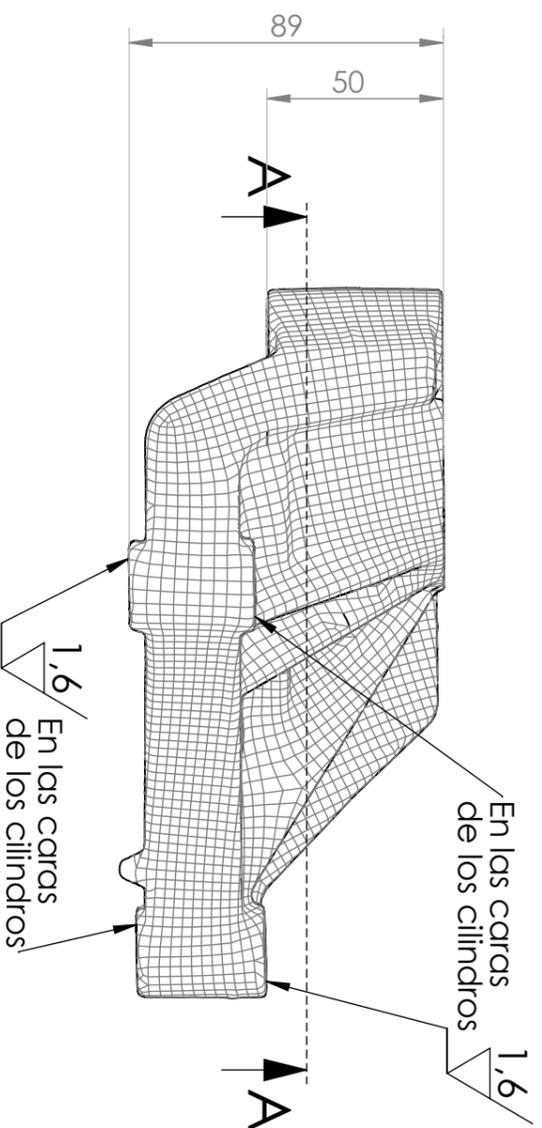
-
- [29] «Catcar.info», Opel CORSA C engine mountings. [En línea]. Disponible en: <https://www.catcar.info/opel/?lang=en&l=bW9kZWx0eXB1PT1YMDf8fG1jb2RlPT1PUE18fGxhbmc9PUdCfHxzD09NTB8fHN0cz09eylxMCI6Ik1vZGVsliwiMjAiOiJPcGVsICBDT1JTQS1DICggMjAwMSAtICkiLCIzMCI6IkUgRU5HSU5FIEFORCBDFVUQ0giLCI0MCI6IiA1IFoxNlNFw0w1NV0gUEVUUK9MIEVOR0lORSIsIjUwIjoiMzluTEVGVCBFTkdJTkUgTU9VTIRJTkcfXx8c2NvZGU9PUV8fHNzY29kZT09IDV8fG1uY29kZT09NHx8c21uY29kZT09M3x8aWtleT09NDJfMTc%3D>
- [30] *Engine Mounts: The Complete Guide*, (12 de febrero de 2019). [Vídeo de YouTube]. Disponible en: <https://youtu.be/EUgK0VEIMho?t=356>
- [31] «creaform3d.com», HandySCAN 3D | Serie SILVER. [En línea]. Disponible en: <https://www.creaform3d.com/es/products/portable-3d-scanners/handyscan-3d-silver-series-professional-3d>
- [32] A. Adhau y V. Kumar, «Engine Mounts and its Design Considerations», *Int. J. Eng. Res.*, vol. 2, n.º 11, 2013.
- [33] «STRIAN», STRIAN—Free Online Structural analysis. [En línea]. Disponible en: <https://structural-analyser.com/>
- [34] S. Durksen, «SOLIDWORKS Simulation Bearing Load», <https://www.javelin-tech.com/>. [En línea]. Disponible en: <https://www.javelin-tech.com/blog/2019/04/solidworks-simulation-bearing-load/>
- [35] «EOS.info», SOLUCIONES METÁLICAS EOS Aluminium AlSi10Mg Ficha de datos del material. [En línea]. Disponible en: <https://www.eos.info/es/de-de/metall-loesungen/metall-materialien/datenblatt/mds-eos-aluminium-alsi10mg>
- [36] «ARTSA.com.au», Chassis fatigue and factors of safety. [En línea]. Disponible en: https://www.artsa.com.au/assets/articles/2018_09.pdf
- [37] C. Van Sice y J. Faludi, «COMPARING ENVIRONMENTAL IMPACTS OF METAL ADDITIVE MANUFACTURING TO CONVENTIONAL MANUFACTURING», *Proc. Des. Soc.*, vol. 1, pp. 671-680, ago. 2021, doi: 10.1017/pds.2021.67.
- [38] M. Hartlieb y G. Wittbecker, «Minimizing the Carbon Footprint of A356 Castings». [En línea]. Disponible en: https://www.eccomelt.com/wp-content/uploads/2022/05/moderncasting-article-2021_edited.pdf
- [39] «¿Qué es la fundición a presión? Proceso, aplicaciones y materiales». [En línea]. Disponible en: <https://hdcmfmg.com/es/recursos/blog/cuales-son-las-aplicaciones-y-materiales-del-proceso-de-fundicion-a-presion/>
- [40] S. Ehmsen, J. Conrads, M. Klar, y J. C. Aurich, «Environmental Impact of Powder Production for Additive Manufacturing: Carbon Footprint and Cumulative Energy Demand of Gas Atomization», 13 de marzo de 2025, *In Review*. doi: 10.21203/rs.3.rs-6202700/v1.
- [41] S. Yang, W. Min, J. Ghibaudo, y Y. F. Zhao, «Understanding the sustainability potential of part consolidation design supported by additive manufacturing», *J. Clean. Prod.*, vol. 232, pp. 722-738, sep. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.05.380.
-

Anexos

Planos

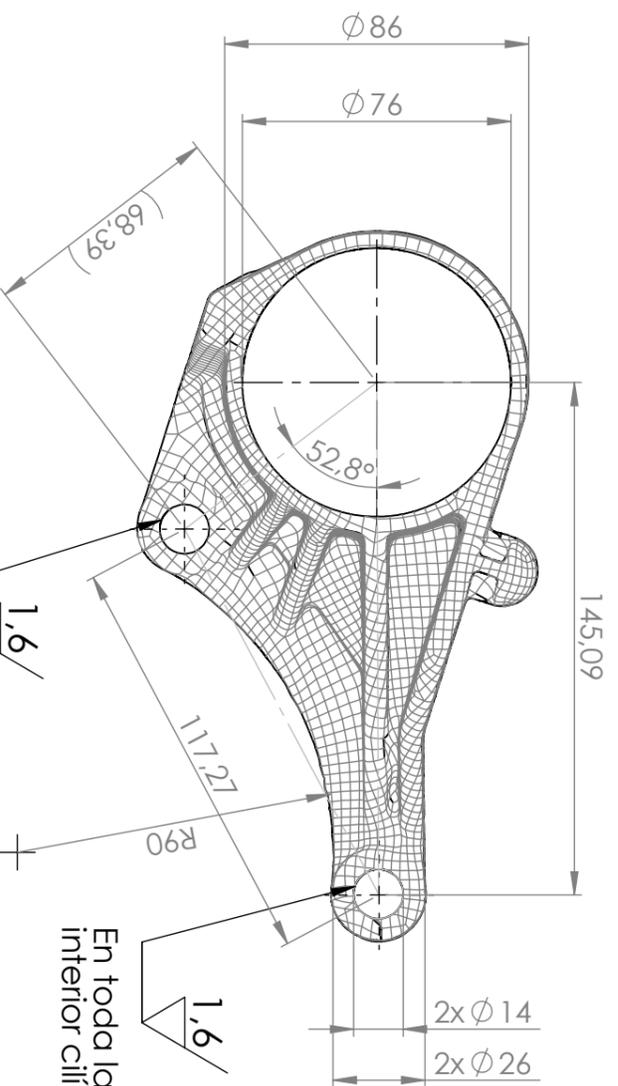
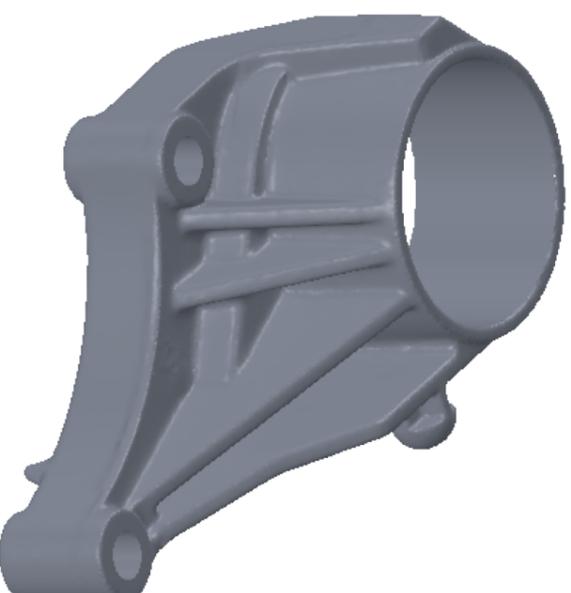


SECCIÓN A-A



En las caras de los cilindros

1,6 En las caras de los cilindros



En toda la superficie interior cilíndrica

En toda la superficie interior cilíndrica

Tolerancia medidas lineales	Desviaciones admisibles respecto al nominal (en mm)				
Designación	0,51 hasta 3	más de 3 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400
m (media)	± 0,1	± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5

6,4 Fundición

1,6 Mecanizado

1,6 Rectificado

TOLERANCIAS		UNE-EN ISO 8062		m K	
MATERIAL	FORMAT	NAME / STUDENT ID	DATE	SUBJECT	REV.
WEIGHT (g)	A3	RYN	14/04/2025	Trabajo Fin de Grado 2025	1
DRAWN				TITLE	
CHECKED				SopORTE delantero motor Opel Corsa	
SCALE:	SIGNATURE			DOCUMENT	
1:2				SHEET 1 OF 1	



