



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ANÁLISIS, DISEÑO GENERATIVO Y
FABRICACIÓN DE COMPONENTES DE USO
FINAL MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA
APLICACIÓN EN UN MOTOR DE
COMBUSTIÓN

Autor: Gonzalo García Samaranch

Director: Mariano Jiménez Calzado

Codirector: Javier Manini Gumz

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
“ANÁLISIS, DISEÑO GENERATIVO Y FABRICACIÓN DE COMPONENTES DE
USO FINAL MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA APLICACIÓN EN UN MOTOR
DE COMBUSTIÓN”

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.: Gonzalo García Samaranch

Fecha: 22 / 07 / 2025

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Mariano Jiménez Calzado

Fecha: 22 / 07 / 2025

EL CODIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Javier Manini Gumz

Fecha: 22 / 07 / 2025



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ANÁLISIS, DISEÑO GENERATIVO Y
FABRICACIÓN DE COMPONENTES DE USO
FINAL MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA
APLICACIÓN EN UN MOTOR DE
COMBUSTIÓN

Autor: Gonzalo García Samaranch

Director: Mariano Jiménez Calzado

Codirector: Javier Manini Gumz

Madrid

ANÁLISIS, DISEÑO GENERATIVO Y FABRICACIÓN DE COMPONENTES DE USO FINAL MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA APLICACIÓN EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN

Autor: García Samaranch, Gonzalo.

Director: Jiménez Calzado, Mariano.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Se ha analizado el pistón del motor de combustión interna de un automóvil. Para ello se ha realizado un estudio de las condiciones de contorno y de los esfuerzos que sufre la pieza durante su funcionamiento con el objetivo de optimizar la geometría topológicamente. Empleando simulaciones FEM (Métodos de los Elementos Finitos) y técnicas de diseño generativo se han conseguido alcanzar dos geometrías optimizadas topológicamente para su fabricación mediante técnicas de impresión 3D metálica. La primera con unas condiciones similares a la pieza original y optimizada al 22%, y una segunda llevada al extremo optimizada al 62%, que con el objetivo de reforzar su estructura será fabricada en Titanio Grado 5 para obtener una optimización final del 40%.

Palabras clave: Optimización Topológica, Diseño generativo, Análisis por elementos finitos, Fabricación aditiva, Impresión 3D, Análisis de costes

1. Introducción

El objetivo detrás del desarrollo de este proyecto es aumentar la eficiencia y sostenibilidad del motor de combustión interna. Para ello se buscará la optimización topológica de una de las piezas esenciales en el correcto funcionamiento del mci, el pistón. Una reducción de masa sobre el pistón, debido a las fuertes fuerzas de inercia que sufre el interior del motor resultará en una mayor potencia de este, una disminución en el consumo de combustible y una reducción del desgaste de la pieza a largo plazo[1].

2. Flujo del proyecto

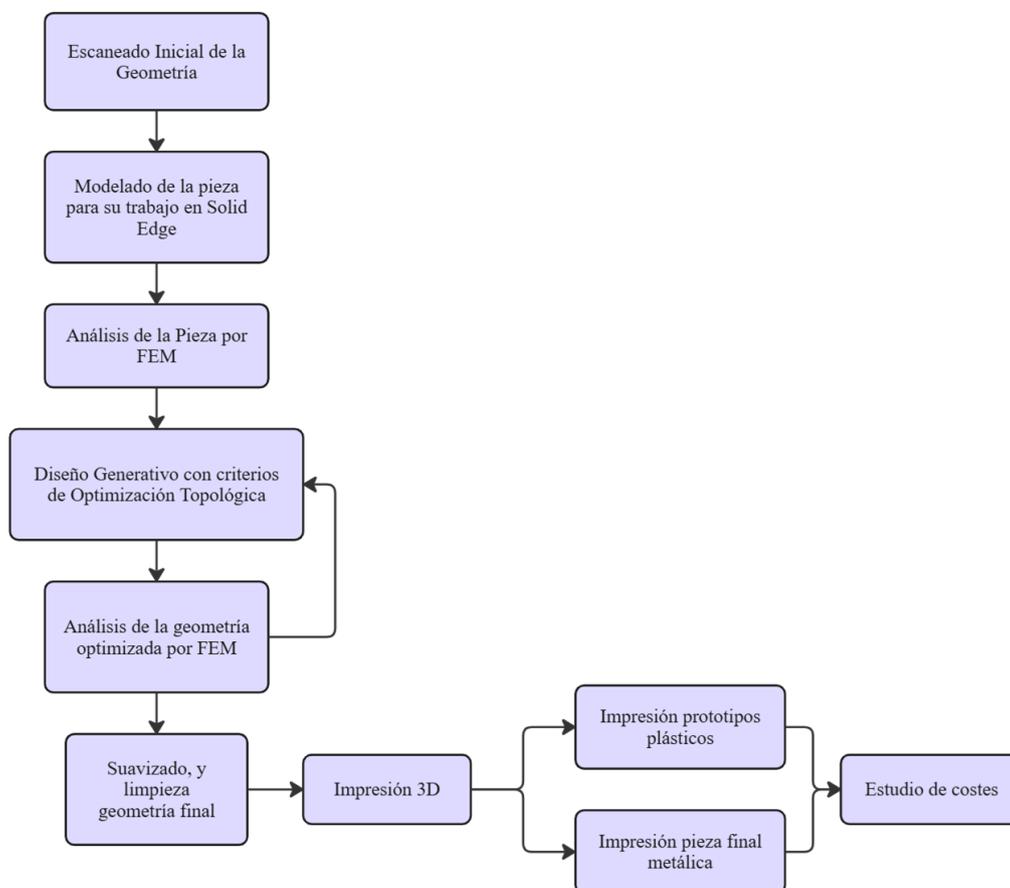


Ilustración 1: Flujo de trabajo

3. Descripción del proyecto

En el proceso de trabajo se partirá del análisis y obtención de la geometría de la pieza original. Mediante un escaneo previo y herramientas de diseño como VXELEMENTS y Solid Edge se modela la pieza. A partir de ahí, se realiza un estudio de las condiciones de contorno y los casos de cargas del pistón, con el fin de observar los esfuerzos que sufre la pieza mediante un análisis FEM.

Utilizando criterios de diseño generativo y optimización topológica se trabajará sobre el modelo de la pieza original para obtener una pieza final funcional, con una reducción de su masa y conservando sus propiedades y esfuerzos mecánicos. Se comprobará en todo momento el estado de las iteraciones mediante el método de elementos finitos.

Posteriormente, se suavizan y tratan las geometrías optimizadas para la fabricación de prototipos y su fabricación final mediante impresión 3D metálica. Y por último, se realiza un estudio económico de los costes de fabricación de prototipos y de los costes de producción de piezas finales mediante fabricación aditiva metálica.

4. Resultados

Tras el desarrollo del proyecto se obtienen 2 geometrías optimizadas topológicamente. Una de ellas optimizada al 22% que conserva los esfuerzos y propiedades mecánicas de la pieza original, y que será fabricada en la aleación de aluminio Al-Si10Mg, con una composición muy similar a la pieza original.

La segunda geometría, optimizada al 62% con respecto a la pieza original ha sido llevada al límite en cuanto a los esfuerzos mecánicos que sufre. Será fabricada entonces en Titanio Grado 5 para obtener una pieza final con una reducción de masa del 40%, pero de una altísima resistencia, bajo peso, y excelente comportamiento ante el calor y la corrosión.

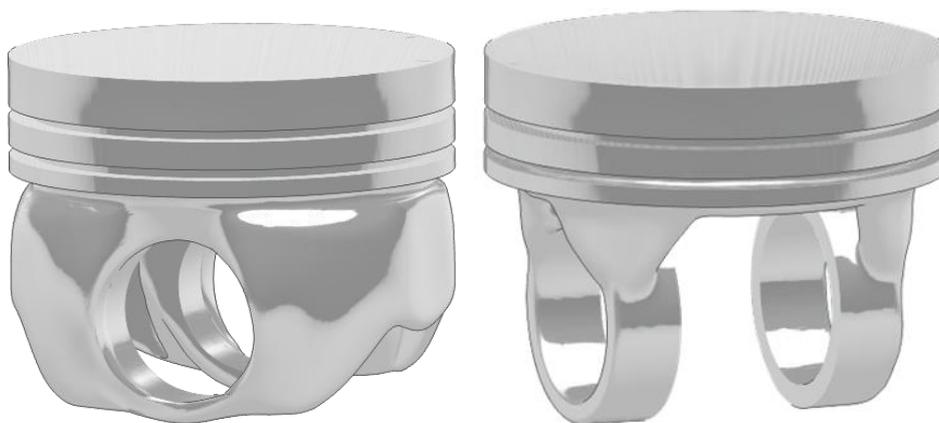


Ilustración 2: Resultados 22% y 62%

5. Conclusiones

La optimización topológica del pistón ha permitido obtener una pieza final fabricada en Titanio Grado 5 con una disminución de masa del 40%. Aunque sus costes de fabricación son muy elevados, y no pueden competir con los métodos de fabricación convencionales, resulta especialmente atractivo de cara a sectores como el de los vehículos de alto rendimiento y el automovilismo deportivo, donde cobra importancia la fabricación de componentes de alto rendimiento, eficientes, ligeros y adaptados a necesidades específicas[2].

6. Referencias

- [1] Mahle GmbH, *Pistons and engine testing*. en *ATZ/MTZ-Fachbuch*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012. doi: 10.1007/978-3-8348-8662-0.
- [2] «dmls-202403181». Accedido: 22 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://met3dp.com/es/dmls-202403181/>

ANALYSIS, GENERATIVE DESIGN AND MANUFACTURING OF END-USE COMPONENTS BY 3D PRINTING FOR APPLICATION IN A COMBUSTION ENGINE

Author: García Samaranch, Gonzalo.

Supervisor: Jiménez Calzado, Mariano.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

The piston of an automobile's internal combustion engine has been analysed. A study of its boundary conditions and the forces it suffers has been carried out in order to topologically optimize its geometry. Using FEM (Finite Elements Method), simulations, and generative design techniques, two topologically optimized geometries have been achieved, with the objective of manufacturing them using metal 3D printing technologies. The first one, with similar conditions to the original part has been optimized to 22%, while the second one, having been taken to its maximum efforts, has been optimized to achieve a 62% reduction of its mass. With the aim of reinforcing its structure, this last part will be manufactured in Grade 5 Titanium to obtain a final optimization of 40%.

Keywords: Topological Optimization, Generative Design, Finite Element Analysis, Additive Manufacturing, 3D Printing, Cost Analysis

1. Introduction

The objective behind the development of this project is to increase the efficiency and sustainability of the internal combustion engine. For this purpose, the piston, one of the essential parts in the correct functioning of the ICM, will be optimized topologically. A reduction in the piston mass, due to the strong inertia forces inside the engine, will result in a higher engine power, a decrease in fuel consumption and a reduction of the part's wear in the long run[1].

2. Project workflow

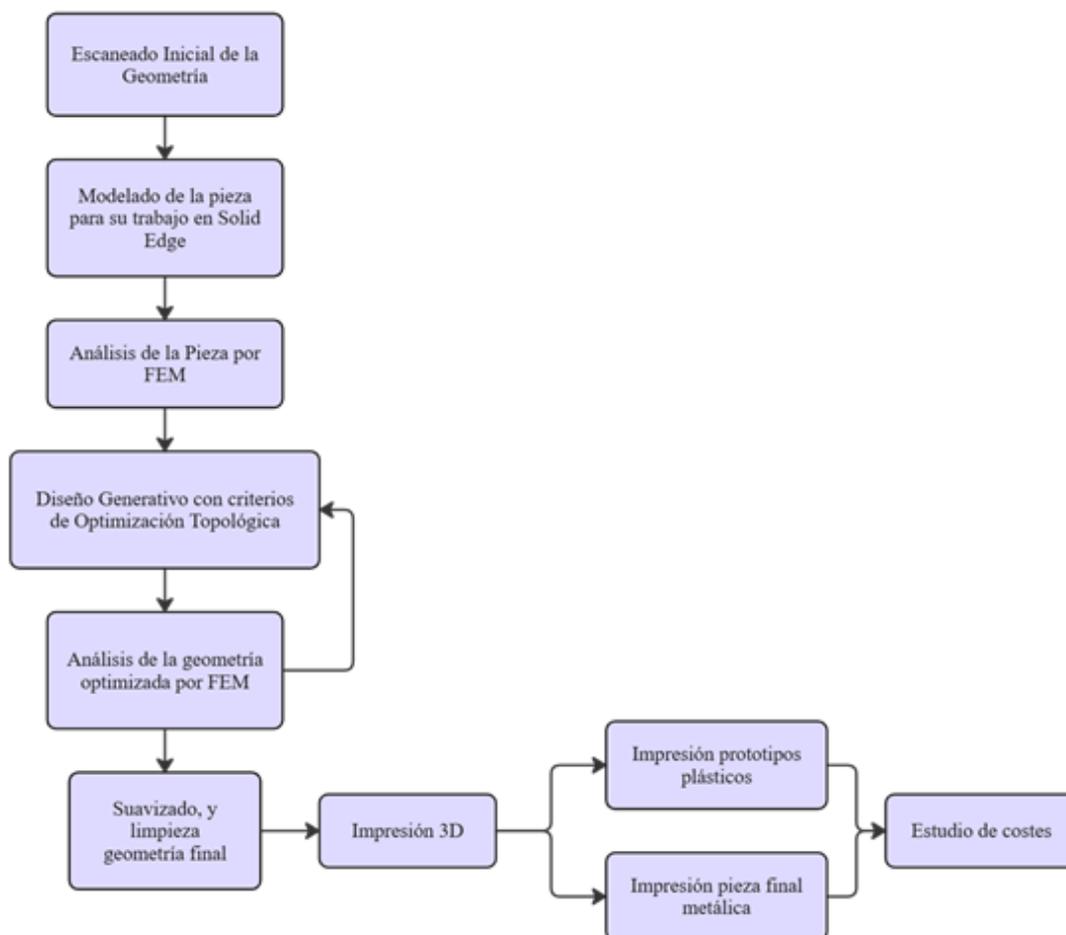


Ilustración 3: Project Workflow

3. Project description

The work process Will start with the analysis and obtention of the geometry of the original piston. By means of a previous scanning and design tools such as VXEelements and Solid Edge, we obtain a 3D modeling of the part. From there, a study of the boundary conditions and load cases of the part is performed in order to observe the forces suffered from the model through a FEM analysis.

Using generative design criteria and topological optimization, the original model will be studied to obtain a functional final part, with a reduction of its mass and preserving its mechanical properties. Each iteration will be checked and analysed by means of the finite element method.

Subsequently, the optimized geometries are smoothed and treated for the manufacturing of prototypes and their final manufacturing by metal 3D printing. Finally, an economic study of the prototypes' manufacturing costs and the production costs of the final parts is carried out.

4. Results

After the development of the project, two topologically optimized geometries are obtained. One of them optimized to 22%, which preserves the mechanical and structural properties of the original part, and will be manufactured in aluminium Al-Si10Mg, with a very similar composition to the original part.

The second geometry, optimized to 62%, has been pushed to the limits in terms of mechanical stress. As a result, it will be manufactured in Grade 5 Titanium to obtain a final part with a 40% mass reduction, very high strength, low weight, and excellent heat and corrosion resistance.



Ilustración 4: Results 22% & 62%

5. Conclusions

The topological optimization of the piston has enabled us to obtain a final part, manufactured in Grade 5 Titanium, with a 40% mass reduction. Its manufacturing costs are very high and cannot compete with conventional manufacturing methods. However, it is particularly attractive to sectors focused on the development of high-performance vehicles and motor sports, where the manufacture of high-performance, efficient, lightweight components, and adapted to specific needs, is becoming increasingly important[2].

6. References

- [1] Mahle GmbH, *Pistons and engine testing*. en *ATZ/MTZ-Fachbuch*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012. doi: 10.1007/978-3-8348-8662-0.
- [2] «dmls-202403181». Accedido: 22 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://met3dp.com/es/dmls-202403181/>

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS	12
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	13
1. INTRODUCCIÓN	17
1.1 Motivación del proyecto	17
1.2 Objetivos.....	21
1.3 Alineación con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS)	22
2. Estado del arte	23
2.1 El motor de combustión interna	23
2.1.1 El Pistón.....	28
2.2 Fabricación Aditiva	30
2.2.1 Sinterizado Directo de Metal por Láser.....	33
2.3 Optimización Topológica	34
3. Metodología	35
3.1 Planificación	35
3.2 Pieza propuesta	36
3.3 Procedimiento	37
3.3.1 Escaneado	37
3.3.2 Diseño	39
3.3.3 Impresión 3D	41
3.3.4 Estudio de costes	43
4. Desarrollo del Trabajo	44
4.1 Escaneado y Diseño en VX	44
4.2 Diseño Generativo y Optimización Topológica	50
4.2.1 Condiciones de Contorno	51

4.2.2	Estudio FEM Modelo Original	53
4.2.3	Diseño Modelo Extruido	57
4.2.4	Estudio FEM Modelo Extruido	61
4.2.5	Diseño Modelo Simplificado.....	63
4.2.6	Estudio FEM Modelo Simplificado.....	67
4.2.7	Optimización Topológica Modelo Simplificado	68
4.3	Refinado de Geometrías	82
4.3.1	PIEZA FINAL 22%.....	83
4.3.2	PIEZA FINAL 62%.....	84
4.4	Impresión 3D	85
4.4.1	Prototipos Finales	87
5.	Análisis de Resultados	88
5.1	Pieza Final 22%.....	88
5.2	Pieza Final 62%.....	90
5.3	Costes de Prototipos	93
5.4	Comparativa	95
6.	Conclusiones.....	96
	BIBLIOGRAFÍA	97

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

OT: Optimización Topológica

I3D: Impresión 3D

FEM: Método de los Elementos Finitos (Finite Element Analysis)

VX: VXElements

SE: Solid Edge

MJF: Multi Jet Fusion

DMLS: Sinterizado Directo de Metal por Láser (Direct Metal Laser Sintering)

MCI: Motor de combustión interna

CAD: Computer Aided Design

CAE: Computer Aided Engineering

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Flujo de trabajo.....	3
Ilustración 2: Resultados 22% y 62%.....	4
Ilustración 3: Project Workflow	7
Ilustración 4: Results 22% & 62%	8
Ilustración 5: Motor Combustión Interna (fuente AlgorCards).....	17
Ilustración 6:Impresión3D (fuente Impresum)	18
Ilustración 7:Optimización Topológica (fuente Formlabs)	19
Ilustración 8: Pistón (fuente AUTODOC CLUB)	20
Ilustración 9: ODS (fuente ONU).....	22
Ilustración 10: MCI (fuente britishmotorvehicles).....	23
Ilustración 11: Primeros planos del MCI (fuente teaching history)	24
Ilustración 12: Fases MCI (fuente Shutterstock).....	25
Ilustración 13: Árbol de levas (fuente coches.com)	26
Ilustración 14: Cigüeñal MCI (fuente autocasión)	26
Ilustración 15: Partes MCI (fuente mundotuerca)	27
Ilustración 16: Fuerzas sobre el piston (fuente Pistons and engine testing).....	28
Ilustración 17: Ciclo fuerzas pistón (fuente Pistons and Engine testing)	29
Ilustración 18: Herramientas CAD (fuente Artec3D)	30
Ilustración 19:I3D (fuente UE).....	31
Ilustración 20: DMLS (fuente KDMfabrication).....	33
Ilustración 21: Optimización Topológica (fuente FACFOX).....	34
Ilustración 22: Diagrama de flujo proyecto	35
Ilustración 23:Información pedido desguace.....	36
Ilustración 24: Pistón Audi A3 2.0 TDI, perfil.....	36
Ilustración 25:Pistón Audi A3 2.0 TDI	36
Ilustración 26: Escáner (fuente ICAI)	37
Ilustración 27: Aerosol revelador SKD-S2 (fuente ICAI).....	38
Ilustración 28:Objetivos posicionamiento (fuente ICAI)	38
Ilustración 29: Visualización Solid Edge (fuente Siemens)	39
Ilustración 30: Visualización Altair (fuente Altair Inspire).....	40

Ilustración 31:HP Jet Fusion 580 Color (fuente HP).....	41
Ilustración 32: Piezas fabricadas mediante DMLS (fuente protolabs)	42
Ilustración 33: Plataforma Xometry (fuente Xometry)	43
Ilustración 34: Pistón usado (fuente Desguaces Logroño)	44
Ilustración 35:Escaneado mitad inferior	45
Ilustración 36: Escaneado mitad inferior	45
Ilustración 37:Escaneado mitad superior.....	45
Ilustración 38: Herramientas Selección	45
Ilustración 39: Herramientas eliminar/conservar malla.....	45
Ilustración 40: Herramienta Mejor ajuste	46
Ilustración 41: Malla unida.....	46
Ilustración 42: Malla unida.....	46
Ilustración 43: Herramientas suavizad	47
Ilustración 44: Malla final	47
Ilustración 45: Creación de planos	48
Ilustración 46: Extrusión	48
Ilustración 47: Malla recortada.....	49
Ilustración 48: Malla Final sin ranuras	49
Ilustración 49: Modelo pieza original SE	50
Ilustración 50: Propiedades Aluminio 7075	51
Ilustración 51: Herramienta Simulación SE	53
Ilustración 52: Presión sobre la superficie superior.....	53
Ilustración 53: Reacción sobre la unión Pistón-Biela.....	54
Ilustración 54: Restricciones	54
Ilustración 55: Herramienta mallar	55
Ilustración 56: Proceso mallado	55
Ilustración 57: Error Simulación	56
Ilustración 58: Modelo Extruido Pistón	57
Ilustración 59: Herramientas de diseño	57
Ilustración 60: Extruido, Boceto 1	58
Ilustración 61: Extruido, Vaciado 1	58
Ilustración 62: Extruido, Boceto 2.....	59

Ilustración 63: Extruido, Vaciado 2.....	59
Ilustración 64: Extruido, Boceto 3.....	60
Ilustración 65: Modelo Final Extruido	60
Ilustración 66: Cargas modelo extruido.....	61
Ilustración 67: Error simulación 2	62
Ilustración 68: Simplificado, Extrusión 1	63
Ilustración 69: Simplificado, boceto 1	64
Ilustración 70: Simplificado, vaciado 1	64
Ilustración 71: Simplificado, vaciado interno.....	65
Ilustración 72: Simplificado, Redondeos internos.....	66
Ilustración 73: Modelo Pistón Simplificado	66
Ilustración 74: Caso cargas Simplificado	67
Ilustración 75: Estudio FEM Modelo Simplificado	67
Ilustración 76: Herramienta Diseño Generativo	68
Ilustración 77: Regiones preservadas optimización	68
Ilustración 78: Caso Cargas OT Simplificado	69
Ilustración 79: Herramienta generar SE	70
Ilustración 80: Optimización topológica 5%	71
Ilustración 81: Optimización topológica 15%.....	72
Ilustración 82: Optimización Topológica 20%.....	73
Ilustración 83: Error Optimización.....	74
Ilustración 84: Optimización Topológica 22%.....	74
Ilustración 85: Optimización Topológica 60%.....	76
Ilustración 86: 60% Vista Inferior	77
Ilustración 87: Optimización Topológica 45%.....	78
Ilustración 88: Optimización Topológica 61%.....	79
Ilustración 89: FEM 62%	80
Ilustración 90: Optimización Topológica 62%.....	80
Ilustración 91: Optimización Topológica 62%, vista inferior	81
Ilustración 92: Herramientas PolyNURBS.....	82
Ilustración 93: Pieza Final 22%.....	83
Ilustración 94: Pieza Final 22%, vista inferior	83

Ilustración 95: Pieza Final 62%.....	84
Ilustración 96: Pieza Final 62%, vista inferior	84
Ilustración 97: Impresión FDM Prusa	85
Ilustración 98: I3D HP 580 MJF	86
Ilustración 99: I3D Prototipos 1	87
Ilustración 100: I3D Prototipos 2	87
Ilustración 101: Propiedades Al-Si10Mg (fuente Xometry)	88
Ilustración 102: Presupuesto DMLS 22% (fuente Xometry)	89
Ilustración 103: Propiedades Ti64 Grado 5 (fuente Xometry)	91
Ilustración 104: Presupuesto DMLS 62% (fuente Xometry)	92
Ilustración 105: Costes I3D Prusa	93
Ilustración 106: Costes HP 580 MJF	94

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación del proyecto

La industria del automóvil, una de las mayores industrias de movilidad a nivel mundial, está sufriendo a lo largo de estos últimos años una de las transiciones más significativas en su historia. En vista de las crecientes preocupaciones que está generando el cambio climático en nuestras sociedades, los fabricantes de automóviles han iniciado un cambio urgente hacia tecnologías limpias, sostenibles y que permitan combatir los efectos del calentamiento global.

Durante décadas, el motor de combustión interna ha sido el protagonista como tecnología de propulsión de los automóviles. Sin embargo, esta búsqueda de tecnologías de propulsión alternativas ha llevado al inmenso crecimiento de un nuevo mercado dentro de esta industria, los vehículos eléctricos. Por primera vez en la historia, en 2017 se alcanzó la cifra de 1.000.000 de vehículos eléctricos matriculados a nivel mundial, llevándose China el registro de más del 60%[3]. Con el paso de los años, el mercado ha ido creciendo hasta que en junio de 2023, por primera vez en Europa las ventas de coches eléctricos superaron las de sus competidores Diesel[4].



Ilustración 5: Motor Combustión Interna (fuente AlgorCards)

El motor de combustión interna tal y como lo conocemos se está perdiendo. Con las crecientes limitaciones que implementan los gobiernos para frenar el cambio climático, los coches diesel o gasolina están perdiendo protagonismo y acabarán desapareciendo. No obstante, estos avances tecnológicos a lo largo de la última década también han incentivado el crecimiento de nuevas tecnologías de fabricación y la aparición de nuevas herramientas de diseño, las cuales pueden traer la clave para rediseñar el motor de combustión, y convertirlo en un medio de transporte sostenible y eficiente.

Entre estas nuevas herramientas aparece un término que ha ganado fuerza con el paso de los años y es la fabricación aditiva. Este nuevo concepto de producción permite transformar modelos y geometrías obtenidos a partir del diseño generativo en piezas sólidas tridimensionales para uso final. La fabricación aditiva, también conocida como impresión 3D se basa en la obtención de piezas mediante la acumulación y superposición de capas sucesivas de diferentes materiales, desde materiales plásticos hasta la fabricación de piezas metálicas[5].

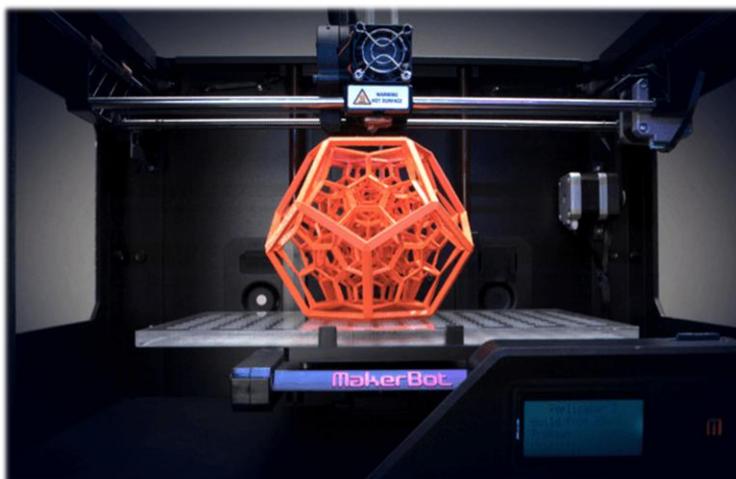


Ilustración 6: Impresión 3D (fuente Impresum)

Esta técnica de fabricación trae consigo también una extensa variedad de oportunidades a la hora de fabricar diferentes piezas, permitiendo trabajar con geometrías de alta complejidad. Uno de los grandes beneficios que trae consigo la fabricación aditiva es la producción de piezas basadas en la optimización topológica. Esta tecnología permite alcanzar el máximo rendimiento y eficiencia de una estructura, reduciendo su masa y los materiales necesarios para su producción, pero conservando sus propiedades y comportamiento mecánicos.

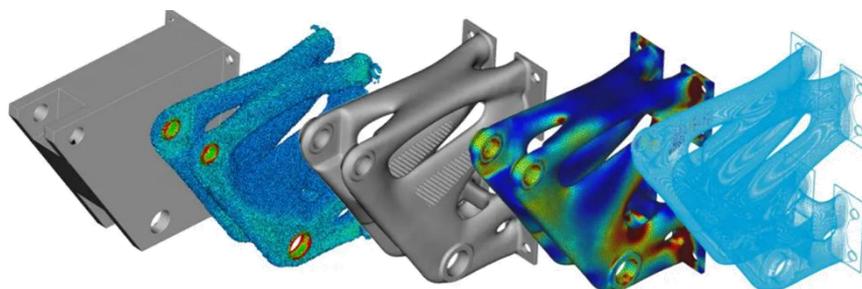


Ilustración 7: Optimización Topológica (fuente Formlabs)

Haciendo uso de estas tecnologías mencionadas se estudiará el rediseño del motor de combustión interna con el objetivo de aumentar su sostenibilidad y convertirlo en una tecnología más eficiente. En particular, se analizará el rediseño de uno de sus componentes principales, el pistón. El pistón es el encargado de la compresión de la mezcla de aire y combustible, transformando así la energía generada en la combustión en energía mecánica, que permite el movimiento del vehículo[6]. En este proyecto se realizará el estudio sobre el pistón de mi coche, un Audi A3 2.0 TDI de 2007.

Para rediseñar la pieza se aplicarán criterios de optimización topológica con el objetivo de reducir la masa del pistón y conservando sus propiedades mecánicas. El pistón está expuesto a presiones de hasta 160 bares en los motores de combustión modernos[7], y debido al movimiento circular de la biela y cigüeñal, sufre unas fuerzas de inercia muy elevadas. Una reducción en la masa del pistón permite una reducción significativa de las fuerzas de inercia que actúan sobre la pieza, y como consecuencia, mejoras notorias en su rendimiento y eficiencia. Un pistón más ligero permite una aceleración más rápida del motor y la posibilidad de aumentar sus revoluciones por minuto (RPM) debido a que debe mover una menor masa en cada ciclo. Además, trae consigo una reducción en el consumo

de combustible y una mayor eficiencia del motor ya que se requiere menos energía para mover los pistones. Por último, como consecuencia de la reducción de las fuerzas de inercia, se evita significativamente el alto desgaste de piezas dentro del motor, como pueden ser los cojinetes y el bulón del pistón[8].



Ilustración 8: Pistón (fuente AUTODOC CLUB)

1.2 Objetivos

El desarrollo de este trabajo de fin de grado tiene los objetivos siguientes:

- Aumentar la sostenibilidad y eficiencia del motor de combustión interna mediante el rediseño de la geometría del pistón, pieza esencial para su correcto funcionamiento.
- Análisis de la geometría del pistón de un Audi A3 2.0 TDI del año 2007, y estudio de su comportamiento dinámico mediante el método de elementos finitos.
- Rediseño de la geometría mediante criterios de diseño generativo y optimización topológica, con su posterior análisis por elementos finitos con el objetivo de reducir la masa de la pieza original, pero conservando sus propiedades dinámicas.
- Implementación de métodos de fabricación aditiva e impresión 3D. Se fabricarán prototipos plásticos de la pieza rediseñada para analizar y estudiar su geometría de cara a la impresión de la pieza final, en metal.
- Estudio de costes del proceso. Análisis de los costes de impresión de prototipos y de la pieza final con el fin de estudiar en qué medida sería posible su implementación para hacer el motor de combustión interna más sostenible y eficiente.
- Conocimiento de las herramientas y softwares de diseño generativo, optimización topológica y tratamiento de piezas, además de los diferentes métodos de fabricación aditiva e impresión 3D.

1.3 Alineación con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS)

El 25 de septiembre de 2015 se aprobaron en la Asamblea General de Naciones Unidas 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), los cuales abarcan metas sociales, económicas y medioambientales a cumplir antes del año 2030[9].

Estudiando los 17 Objetivos propuestos, este proyecto está firmemente alineado con la consecución de 3 de ellos:

- **9. Industria, Innovación e Infraestructura:** En este proyecto se proponen métodos de diseño y fabricación de piezas alternativos, basados en la impresión 3D y en los criterios de optimización topológica. A diferencia de otros métodos de fabricación convencionales, estos permiten la obtención de piezas de forma más sostenible y eficiente.
- **12. Producción y Consumo responsables:** Los métodos de diseño propuestos en este proyecto permiten la fabricación de piezas con una reducción significativa en la cantidad de materiales utilizados. Esto permite una reducción en el consumo de materias primas, y la posibilidad de llevar a cabo una producción más eficiente y sostenible energéticamente.
- **13. Acción por el Clima:** No solo se proponen métodos de producción alternativos y más eficientes, sino que con el rediseño de esta pieza mediante criterios de optimización topológica y su reducción de masa, se pretende convertir el motor de combustión interna en una tecnología más limpia y eficiente.



Ilustración 9: ODS (fuente ONU)

2. Estado del arte

2.1 El motor de combustión interna

De todos los avances tecnológicos que ha logrado el ser humano, el motor de combustión interna ha sido uno de los pilares fundamentales del desarrollo industrial y tecnológico en nuestra sociedad. Desde su invención en el siglo XIX hasta la actualidad, ha transformado nuestras vidas a niveles inexplicables hasta convertirse en el corazón de innumerables aplicaciones, desde el transporte terrestre, marítimo y aéreo, hasta todo tipo de maquinaria agrícola, e industrial.

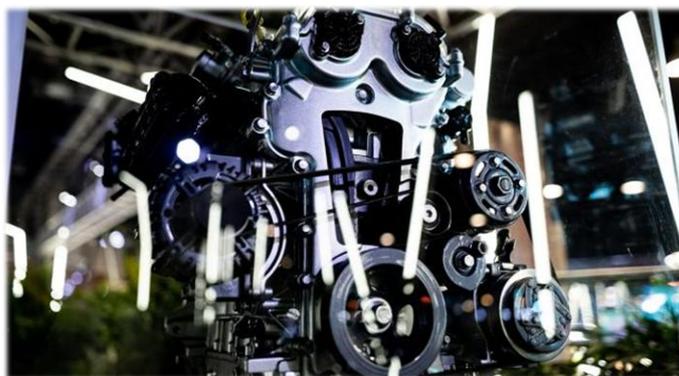


Ilustración 10: MCI (fuente britishmotorvehicles)

El desarrollo del motor de combustión interna comenzó a lo largo del siglo XIX. El primer concepto del MCI nace del interés de investigadores que buscaban aprovechar la potencia y energía generada en pequeñas explosiones controladas, siendo uno de sus pioneros Nicéphore Niépce. Durante la década de los 1860s, el ingeniero belga Étienne Lenoir patentó el primer concepto práctico de motor de combustión interna. Este primer prototipo era un motor de 2 tiempos que funcionaba con carbón como combustible. Aunque era extremadamente ineficiente, sirvió para asentar bases y avanzar en el desarrollo del motor.

El verdadero progreso se da en el año 1876, cuando Nikolaus Otto, ingeniero alemán, diseña y fabrica por primera vez en la historia un motor de combustión interna de cuatro tiempos funcional que usaba una mezcla de combustible y aire, que se encendía con una chispa. Conocido como el “Motor Otto”, asentó las bases de la tecnología que todavía

usamos hoy en día en los motores de gasolina modernos, introduciendo el ciclo de cuatro tiempos: admisión, compresión, combustión y escape[10].

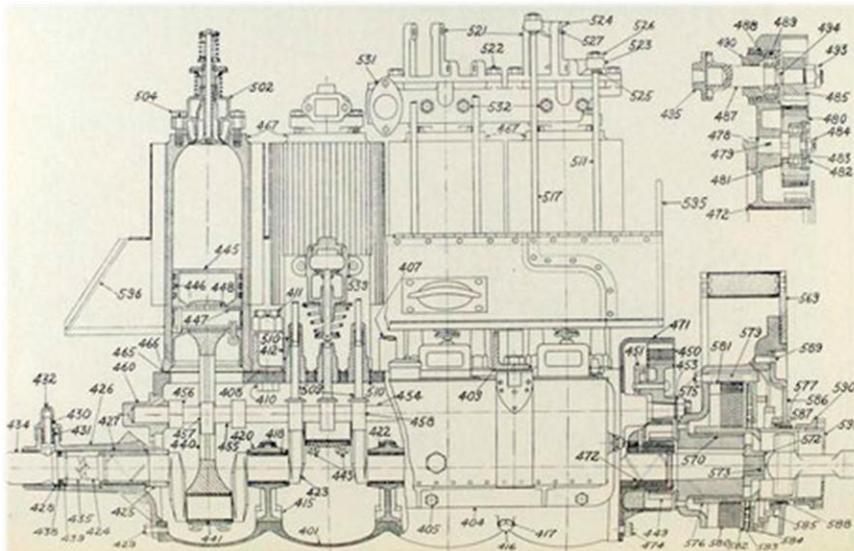


Ilustración 11: Primeros planos del MCI (fuente teaching history)

Aunque el motor de Otto revolucionó la industria, no fue hasta 1885 que este primer mci fue aplicado al sector del transporte, donde el inventor alemán Karl Benz desarrollo el primer automóvil potenciado por un motor de gasolina. Esta creación marcó un antes y un después en la revolución del transporte y es ampliamente conocida como el nacimiento del automóvil moderno. Sin embargo, esto no frenó el desarrollo de esta tecnología, siendo el siglo XX testigo de numerosos avances en la tecnología de combustión interna.

En 1892, el inventor alemán Rudolf Diesel introdujo el motor diesel. A diferencia del motor de otto, que necesitaba una chispa para realizar la combustión, el motor diesel utilizaba la compresión del aire para encender el combustible. Este nuevo motor era más eficiente, tenía un menor consumo, y generaba un torque mayor, por lo que fue rapida su aplicación a maquinaria industrial, barcos, locomotoras, y por supuesto automóviles. A lo largo del siglo XX, invenciones como los carburadores, los sistemas de inyección de combustible electrónicos y la implementación de turbocompresores aumentaron aún más la eficiencia de estos motores hasta convertirlos en los motores diesel modernos[10].

Profundizando en el funcionamiento de los motores de combustión interna modernos, se mantiene la diferencia entre los motores de ciclo otto, y los motores diesel. Estos MCI funcionan en base a cuatro fases:

- **Admisión:** Esta primera fase permite la entrada de la mezcla de combustible y aire en la cámara de combustión mediante una válvula de admisión. Se consigue mediante el movimiento de bajada del pistón en el cilindro, generando un vacío que aspira la mezcla.
- **Compresión:** En la fase de compresión, las válvulas de admisión y escape se mantienen cerradas, y el pistón sube comprimiendo la mezcla de aire y combustible.
- **Combustión:** En el punto más alto del pistón, la bujía emite una chispa que da lugar a la ignición de la mezcla. Como consecuencia de esta explosión el pistón baja produciendo movimiento sobre el cigüeñal a través de la biela. Se alcanzan en este punto las presiones más elevadas dentro de la cámara de combustión, alcanzando hasta 160 bar[7].
- **Escape:** En esta última fase el pistón vuelve a elevarse y la válvula de escape se abre, dando salida a todos los gases producidos durante la combustión.[11]

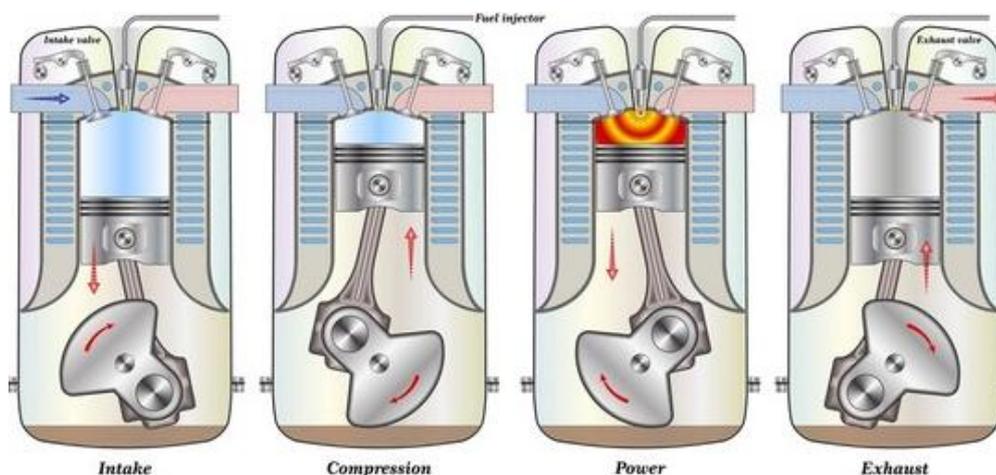


Ilustración 12: Fases MCI (fuente Shutterstock)

Una vez se ha visto su funcionamiento, se estudiarán las partes que lo componen:

- Bloque motor: se trata de la pieza base del MCI. Incluye en su interior los cilindros y los soportes de apoyo del cigüeñal.
- Culata: Parte superior del motor sobre la que se cierran los cilindros. Contiene las válvulas de admisión y escape, las bujías, el árbol de levas y todos los conductos de admisión de aire, combustible y gases de escape.
- Cilindros: son las ranuras sobre las que circulan los pistones. Son uno de los responsables de soportar las explosiones de energía de la combustión.
- Árbol de levas: es la pieza encargada de la regulación de la apertura y cierre de las válvulas.



Ilustración 13: Árbol de levas (fuente coches.com)

- Cigüeñal: se trata de una pieza fundamental en el mci. Actúa como eje principal y permite la transformación del movimiento lineal de los pistones resultante de la combustión, en movimiento rotatorio para impulsar el vehículo.



Ilustración 14: Cigüeñal MCI (fuente autocasión)

- Pistón: es el encargado de llevar a cabo la combustión mediante la compresión del aire y combustible. Transforma la energía generada en la explosión en movimiento mecánico, que a través de la biela es capaz de llevar al cigüeñal para impulsar el vehículo. [12]

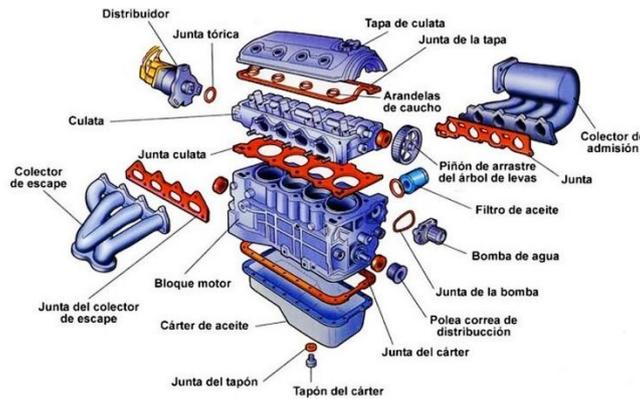


Ilustración 15: Partes MCI (fuente mundotuerca)

2.1.1 El Pistón

El pistón, además de ser el encargado de realizar la compresión e la mezcla, es un elemento de transmisión de potencia. En el interior de los cilindros del MCI, la energía generada en la combustión se convierte rápidamente en calor y presión. Los valores de presión y temperatura aumentan significativamente en un breve periodo de tiempo, y el pistón es el encargado de transformarlos en trabajo mecánico.

Analizando el comportamiento y movimientos del pistón podemos estudiar las fuerzas que actúan sobre él. El pistón se ve afectado principalmente por la presión que sufre sobre su corona, y por las fuerzas de rozamiento sobre las paredes del cilindro (despreciables en comparación). Aunque el movimiento del pistón sigue una trayectoria lineal en el interior del cilindro, está unido a la biela y cigüeñal que siguen una trayectoria de movimiento circular. Esto redirige las fuerzas resultantes del pistón en la dirección de la biela a lo largo de todo su movimiento, cambiando su dirección y generando unas fuerzas de inercia muy elevadas.

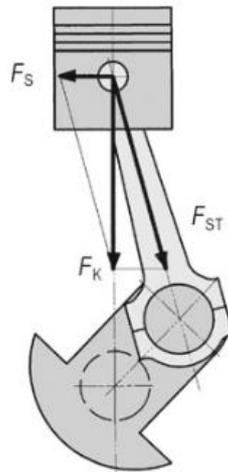


Ilustración 16: Fuerzas sobre el pistón (fuente Pistons and engine testing)

La dirección y magnitud de estas fuerzas va variando de forma cíclica siguiendo las cuatro fases de funcionamiento de un motor de combustión. El pistón se encuentra en su punto de máximo esfuerzo durante la fase de combustión, en el cual se encuentra en el punto más alto de su recorrido dentro del cilindro, y la biela está posicionada de forma completamente vertical. Es en este punto en el que se deben estudiar los esfuerzos que

sufre la pieza, siendo la componente generada por la presión de la combustión también vertical[1].

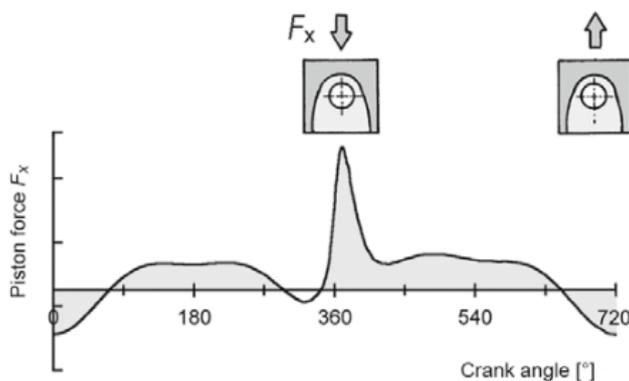


Ilustración 17: Ciclo fuerzas pistón (fuente Pistons and Engine testing)

El pistón, con todos sus componentes y unido a la biela forman parte de la masa oscilatoria del motor. Durante la combustión se generan presiones tan elevadas que las fuerzas de inercia resultantes suponen esfuerzos extremos en las piezas del motor para contrarrestarlas. Esta característica nos lleva a la necesidad de mantener las masas oscilatorias en valores mínimos, sobretodo en motores de alto rendimiento. El pistón constituye la principal de estas masas oscilantes por lo que cualquier estudio de reducción de masa debe comenzar sobre esta pieza. Una reducción sobre la masa del pistón resultará en la reducción de fuerzas de inercia, y como consecuencia en un aumento de la potencia, sostenibilidad y resistencia del motor.[1]

2.2 Fabricación Aditiva

Durante las últimas décadas, una nueva corriente de innovación tecnológica, conocida como la cuarta revolución industrial, ha generado una transformación a gran escala del panorama industrial global[13]. Siendo sus motores la conectividad, el análisis avanzado de datos, la automatización y la robótica, esta nueva corriente disruptiva nos ha llevado hacia la completa digitalización de los sistemas de diseño y fabricación[14].

En el ámbito del diseño, esta digitalización ha dado completo protagonismo a herramientas como el CAD (Computer Aided Design) y el CAE (Computer Aided Engineering), las cuales son los pilares de este desarrollo tecnológico. Los sistemas CAD nos dan la capacidad de llevar el entorno de diseño a otro nivel, pudiendo realizar el diseño de piezas, geometrías y componentes a través de gráficos interactivos. Estos nuevos programas permiten el trabajo con los productos en 2D y 3D, pudiendo rotar, ampliar y cortar las piezas por secciones con el uso rápido del ratón, facilitando enormemente la visualización y análisis de los productos diseñados. Pero no solo permite la visualización, sino que estos programas permiten el diseño desde 0 de estos productos, la modificación de geometrías y la corrección de errores de cara a su fabricación, creando un entorno de trabajo de productos completamente automatizado y al alcance de todos[15].

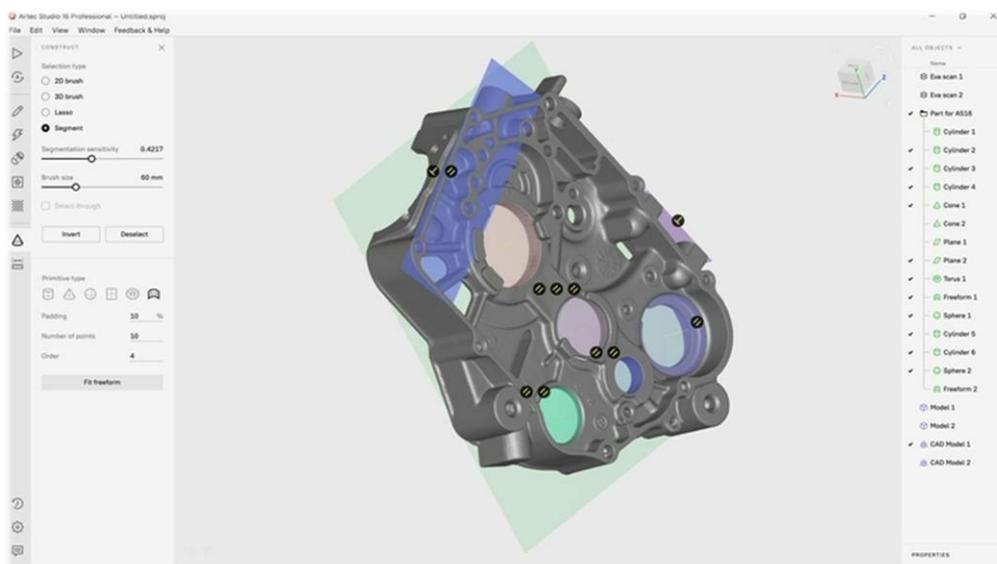


Ilustración 18: Herramientas CAD (fuente Artec3D)

Esta transición hacia lo digital ha revolucionado también el ámbito de la fabricación. La fabricación aditiva, también conocida como impresión 3D (I3D), es un proceso de fabricación que nos permite crear una pieza de uso final a partir de un modelo digital obtenido a partir de métodos de diseño CAD. Este proceso se basa en la manipulación de materiales a escalas micrométricas, que depositados capa por capa de manera extremadamente precisa permite la obtención de piezas y estructuras tridimensionales sólidas[16]. Una de las principales diferencias de este método de fabricación con respecto al resto de técnicas convencionales es su capacidad de crear una pieza final incorporando exclusivamente el material necesario para su formación, reduciendo enormemente los desperdicios y pérdidas de material, y convirtiéndolo en una de las principales técnicas de producción sostenible[17].

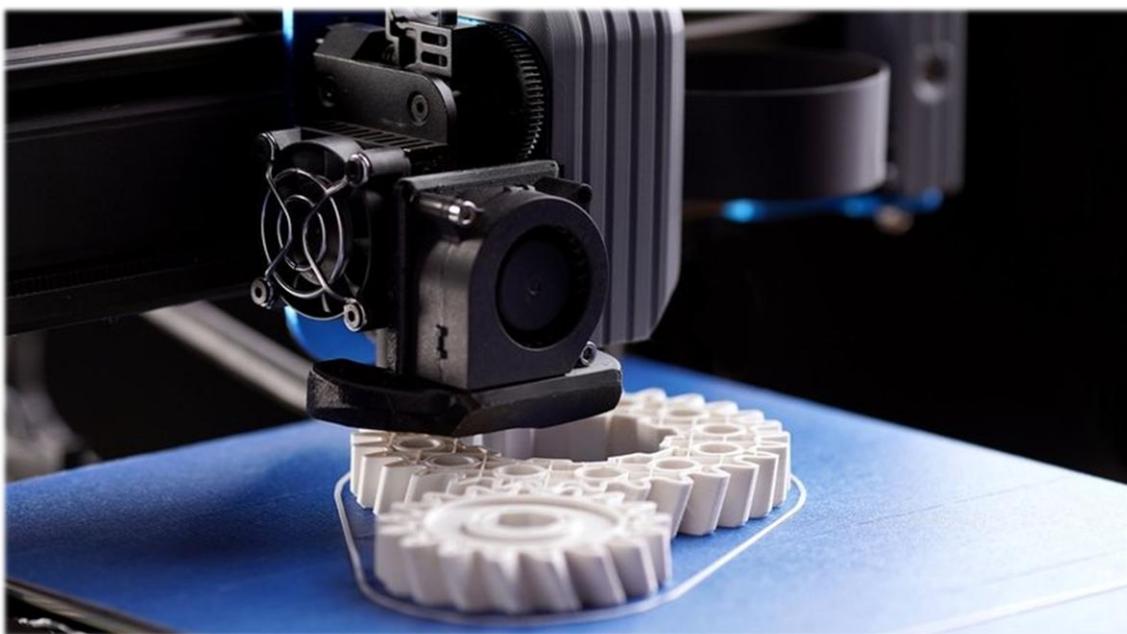


Ilustración 19:I3D (fuente UE)

La fabricación aditiva ha abierto un mundo de posibilidades a la hora de fabricar piezas funcionales. Ya sea a partir de polímeros, resinas o polvos metálicos, las tecnologías de I3D permiten fabricar desde prototipos hasta piezas de uso final en industrias como la aeroespacial, automotriz, médica o electrónica[18]. Entre las tecnologías de fabricación aditiva más conocidas están las siguientes:

- **FDM:** El modelado por deposición fundida, o FDM, es un método de fabricación aditiva en el que obtenemos una geometría mediante la extrusión de un filamento termoplástico fundido capa a capa a través de una boquilla caliente. Se trata de la técnica de I3D más extendida por su accesibilidad y bajos costes de producción. Las piezas funcionales están creadas a partir de materiales como el polímero PLA (Ácido Poliláctico)[19].
- **SLA:** El método SLA, también conocido como Estereolitografía, se basa en el uso de una resina líquida fotosensible como material y mediante un láser ultravioleta se trata para ir construyendo la pieza final capa a capa. Ofrece una precisión dimensional y superficial muy elevadas, resultando en piezas finales de muy elevada calidad. Su uso es especialmente interesante en los sectores de la joyería y en la fabricación de prototipos de alto detalle[19].
- **SLS:** En la técnica de sinterizado selectivo por láser, como su nombre indica, se dispone de un láser de alta potencia para sinterizar el material en polvo y fabricar la pieza capa a capa. Esta técnica permite la obtención de piezas densas, con buena resistencia mecánica y térmica, y es especialmente apta para la fabricación de prototipos funcionales. Se suelen usar como materiales polímeros, especialmente el nylon, y tiene un precio más elevado que las dos técnicas anteriores[19].

De cara al desarrollo de este proyecto nos centraremos en una técnica de fabricación aditiva metálica denominada Sinterizado Directo de Metal por Láser, o DMLS, la cual se explicará con más profundidad.

2.2.1 Sinterizado Directo de Metal por Láser

El sinterizado directo de metal por láser, o DMLS, es una técnica de fabricación que permite la construcción de piezas metálicas tridimensionales y funcionales mediante la fusión selectiva de polvo metálico con un rayo láser de alta potencia. A diferencia de los métodos de fabricación de piezas metálicas convencionales, esta novedosa técnica permite generar geometrías con una alta complejidad y libertad de diseño con unos niveles de precisión completamente inalcanzables e imposibles de lograr mediante el mecanizado o fundición tradicionales[2].

Esta técnica de fabricación es especialmente atractiva de cara al sector automotriz, gracias a su capacidad de producir piezas metálicas complejas, con geometrías mejoradas, y ofreciendo una mejora en el rendimiento, resistencia y gestión térmica de los componentes. Usando materiales como aleaciones de aluminio, titanio o aceros inoxidables nos permite fabricar piezas personalizadas bajo demanda, con completa libertad de diseño y con unas propiedades mecánicas excepcionales[2].



Ilustración 20: DMLS (fuente KDMfabrication)

2.3 Optimización Topológica

Los grandes avances en el diseño generativo y la fabricación aditiva han permitido el crecimiento de nuevas tecnologías y métodos de diseño centrados en la sostenibilidad y mejora estructural de las piezas. Una de estas nuevas técnicas es la optimización topológica, método de rediseño sobre el cual se basa el desarrollo de este proyecto.

La Optimización Topológica (OT) es un método de diseño estructural cuya base se centra en la eliminación del material innecesario de una geometría con el objetivo de reducir su masa, pero a su vez conservando sus propiedades estructurales y de comportamiento mecánico. Con esta técnica se busca la redistribución óptima del material dentro de un espacio definido, con el objetivo de conseguir una pieza final funcional más eficiente y con un mayor rendimiento. La alta complejidad y precisión necesaria en las piezas obtenidas mediante la optimización topológica no permitían su fabricación mediante técnicas convencionales, es por esto por lo que el desarrollo de la fabricación aditiva ha impulsado tanto ese método. La sinergia entre ambas técnicas, uniendo la alta complejidad de las geometrías optimizadas topológicamente con las capacidades de producción de la fabricación aditiva han resultado de gran interés en la industria, especialmente en sectores como el aeroespacial, automotriz y biomecánico[20].



Ilustración 21: Optimización Topológica (fuente FACFOX)

3. Metodología

3.1 Planificación

El desarrollo del presente Trabajo de Fin de Grado consiste en el análisis geométrico y dinámico inicial de una pieza, con el objetivo de rediseñarla mediante criterios optimización topológica. Seguido de esto, mediante impresión 3D se obtienen prototipos para su análisis geométrico además de la pieza de uso final en impresión 3D metálica. Por último, se realiza un estudio de costes de los prototipos y la fabricación de la pieza final. En la siguiente ilustración se observa el flujo del proyecto.

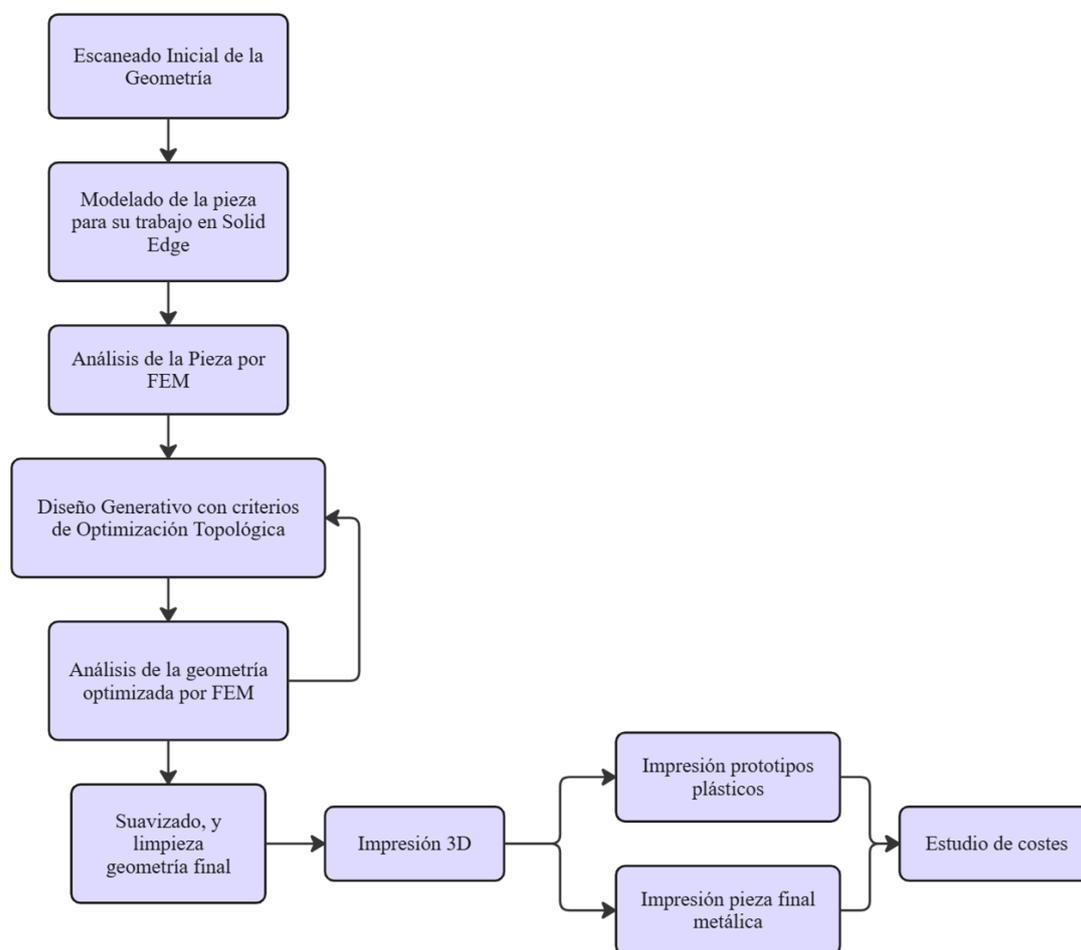


Ilustración 22: Diagrama de flujo proyecto

3.2 Pieza propuesta

La pieza por estudiar en este proyecto final de grado es el pistón, y más concretamente el pistón de un Audi A3 de 2007 con motor 2.0 TDI. La elección de este modelo en particular viene por dos razones diferentes. Primero, se trata de una generación de motores diesel fabricados en varios vehículos similares hace aproximadamente 20 años, y con las actuales regulaciones por el cambio climático destacan por los altos niveles de emisiones producidas. Sería interesante entonces estudiar el rediseño de este motor y estudiar la posibilidad de reducir sus emisiones y hacerlo más sostenible. La segunda razón tiene un carácter más personal. Mi pasión por los coches me ha llevado a realizar este proyecto, y por ello decidí utilizar y analizar el pistón de mi coche.

Para obtener la pieza propuesta me puse en contacto con un desguace en Logroño en el que ofertaban 1 unidad de la pieza de segunda mano, pero en excelente estado. El propósito detrás de conseguir la pieza original es poder realizar un estudio geométrico exhaustivo y un escaneo directo de la geometría original para el trabajo de diseño.

INFORMACIÓN DEL PEDIDO RV-PZPGUMQR

DESGUACES LOGROÑO - 941 250 877

1998651 - PISTON AUDI A3 SPORTBACK FASTBACK (2004-2013) 2.0 TDI

16V 140CV 1968CC

33,00

Ilustración 23: Información pedido desguace



Ilustración 25: Pistón Audi A3 2.0 TDI



Ilustración 24: Pistón Audi A3 2.0 TDI, perfil

3.3 Procedimiento

3.3.1 Escaneado

El primer paso en la realización de este estudio será el escaneo de la pieza. Para ello haremos uso del escáner Go!SCAN 3D 20, proporcionado por el laboratorio de Fabricación del ICAI. Este modelo se trata de un escáner de luz blanca portátil que permite capturar datos 3D de manera sencilla y aportando mediciones rápidas y fiables, con una resolución de 0,200mm y una precisión de hasta 0,100mm[21].



Ilustración 26: Escáner (fuente ICAI)

Para realizar un correcto escaneo de la pieza se deberá realizar una exhaustiva preparación de la superficie de escaneo y de la pieza. Primero, se pondrán objetivos de posicionamiento alrededor de la superficie de escaneo. Estos permiten compensar la posible falta de información de posicionamiento del escáner, y aseguran una mayor precisión, además de mejorar el rendimiento haciendo el proceso más rápido. Por otra parte, al estar trabajando con una pieza metálica, el escáner deberá enfrentarse a superficies reflectantes, que dificultarán una buena visión de la pieza y perjudicarán a la precisión. Para solventar esto se hará uso de un aerosol revelador SKD-S2, el cual permite crear una capa mate alrededor de la pieza que aumenta significativamente la precisión de escaneo.

Para la obtención del modelo se realizarán 2 escaneados diferentes. El primero apoyando la pieza sobre la superficie superior, y el segundo sobre la superficie inferior. Con esto se obtendrán 2 superficies con la información completa de la geometría, y se procesarán y unirán para conseguir el mejor modelo de la pieza original.



Ilustración 27: Aerosol revelador SKD-S2 (fuente ICAI)



Ilustración 28: Objetivos posicionamiento (fuente ICAI)

Para la obtención de las mallas escaneadas se usará un ordenador portátil con la aplicación VXElements. Este programa nos permitirá transformar la información obtenida con el escaneo en mallas de superficie sobre las que trabajar y modelar la geometría de la pieza original. Esta aplicación no solo transforma la información sino que además permite trabajar sobre las superficies obtenidas, limpiarlas, y dejar la pieza preparada para la fase de diseño.

3.3.2 Diseño

Una vez se ha realizado el correcto escaneado de la pieza, y se han tratado las mallas hasta conseguir la superficie de la pieza original, se exporta el fichero para su trabajo en la siguiente fase del proyecto.

En la fase de diseño haremos uso principalmente del programa Solid Edge. Solid Edge es un software de CAD (Computer-Aided Design) 3D lanzado por Siemens en 1995 que ofrece una gran variedad de herramientas enfocadas en el diseño y desarrollo de productos, simulación, fabricación, impresión 3D y gestión de datos[22]. Para la consecución de los objetivos nos centraremos en las herramientas de modelado, diseño de piezas, simulación y diseño generativo.

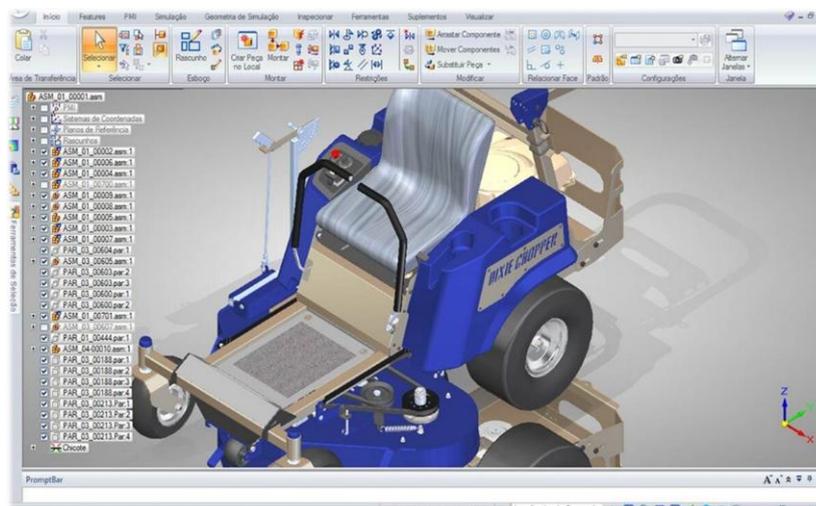


Ilustración 29: Visualización Solid Edge (fuente Siemens)

Con la ayuda de Solid Edge transformaremos la malla exportada desde VXEelements en una pieza sólida sobre la que trabajar. Una vez se tenga la pieza sólida, el programa nos permitirá realizar el análisis FEM de la pieza original mediante la herramienta de simulación. Una vez identificado el punto máximo de esfuerzos mecánicos de la pieza, procedemos al rediseño del pistón siguiendo criterios de optimización topológica. Para ello usaremos la herramienta de diseño generativo, la cual nos permite especificar la reducción de masa que buscamos sobre la pieza original, y nos devuelve la pieza optimizada topológicamente. El programa te devuelve también un nuevo análisis FEM del resultado de la optimización que permite llevar el diseño hasta el límite máximo que permite el material.

Una vez alcancemos el punto de optimización máximo de la pieza, pasamos al último paso en la fase de diseño que es la limpieza y suavizado final. Para mejorar el aspecto de la optimización y conseguir una pieza suavizada de cara a la fabricación final haremos uso de otro software de CAD, Altair Inspire. Este software, al igual que Solid Edge, sirve para el diseño y simulación de piezas en 3D. Altair además tiene muchas herramientas enfocadas a la optimización topológica y diseño generativo, lo que nos permite mejorar nuestra pieza final optimizada, realizando una limpieza y suavizado final de cara a la fase de fabricación.

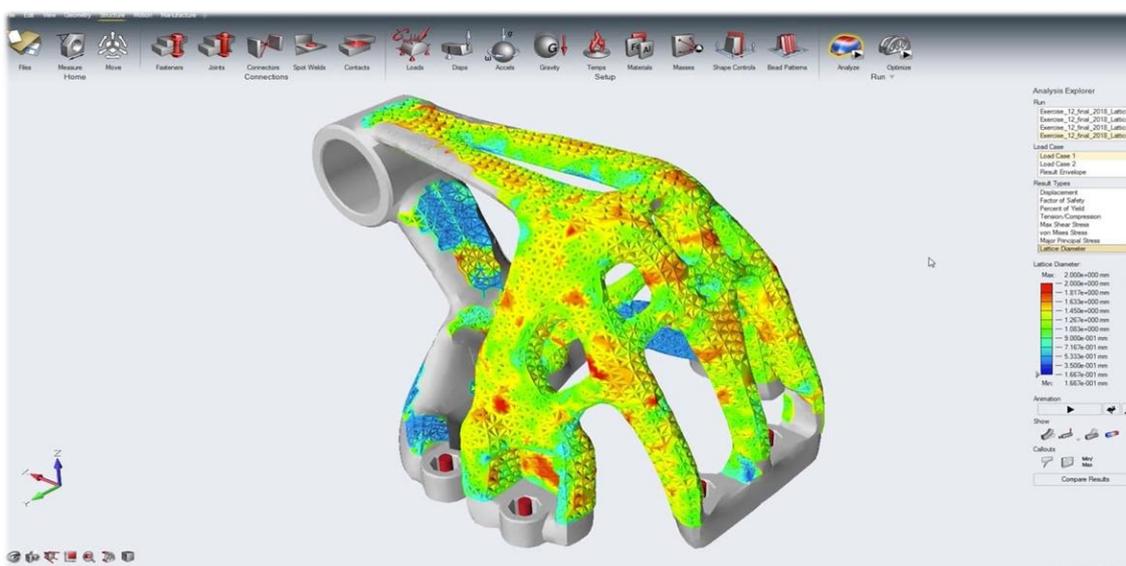


Ilustración 30: Visualización Altair (fuente Altair Inspire)

3.3.3 Impresión 3D

La última fase en el proceso de diseño y fabricación es la impresión 3D. Una vez dispongamos de la pieza final optimizada, y suavizada, se procederá a su impresión. De cara a la obtención de la pieza de uso final, se pretenden realizar dos impresiones diferentes. La primera impresión será un prototipo de la geometría optimizada. El objetivo detrás de la obtención de este primer prototipo es el análisis geométrico de la estructura, ya que los materiales usados para esta primera impresión no serán comparables a los necesarios para aguantar las fuerzas que sufre el pistón. Con ello se pretenden observar posibles defectos geométricos o estructurales de la pieza que no permitan un comportamiento óptimo y real del pistón.

Para la impresión de este primer prototipo se hará uso de la impresora 3D HP Jet Fusion 580 Color. Esta impresora hace uso de la tecnología multi jet fusion (MJF), un innovador proceso de impresión 3D que está ganando popularidad. Esta nueva tecnología hace uso de un cabezal de impresión que deposita materiales de fusión y polvo de nailon por capas, los cuales se solidifican mediante un proceso de fusión térmica con una lámpara de color infrarroja. Este método además no necesita hacer uso de soportes para la correcta impresión de la pieza, y permite la obtención de geometrías complejas y una amplia libertad de diseño, lo cual es muy interesante en la fabricación de piezas de optimización topológica[23].



Ilustración 31: HP Jet Fusion 580 Color (fuente HP)

Una vez completada la impresión del primer prototipo de planteará la impresión de la pieza de uso final. Se realizará un estudio de costes y se pedirá un presupuesto final. En función de la complejidad de la geométrica obtenida, el material de uso final elegido y el presupuesto generado se tomará la decisión de obtener la pieza final o no. El objetivo de este proyecto es el análisis y estudio del rediseño del pistón, pero se trata de un estudio analítico, y la impresión final de la pieza, en caso de realizarse servirá únicamente para poder visualizar el modelo optimizado.

El método de impresión 3D necesario para la fabricación de la pieza final será DMLS. Este método de fabricación aditiva permite la creación de piezas mediante la acumulación y fusión de finas partículas de polvo metálico. La geometría deseada se va creando capa por capa hasta obtener piezas finales funcionales, con una gran resistencia al calor y una elevada precisión y complejidad.



Ilustración 32: Piezas fabricadas mediante DMLS (fuente protolabs)

3.3.4 Estudio de costes

Para terminar el proyecto se realizará un estudio de costes de todos los procesos de fabricación aditiva utilizados, ya sea en la obtención de prototipos o de la pieza de uso final.

La impresión de los prototipos de realizará mediante las impresoras 3D del laboratorio de Diseño y fabricación de ICAI. Para realizar el análisis de costes se tendrán en cuenta todos los datos de precios, amortizaciones y costes de material de la impresora, necesarios para obtener un coste unitario de impresión realista.

En el caso de la impresión 3D metálica por DMLS, al no poder realizarse desde los laboratorios de ICAI se tendrá que recurrir a pedir un presupuesto externo. Para obtener este presupuesto disponemos de la plataforma online Xometry. Está plataforma online es un Marketplace impulsado por IA que proporciona a los clientes con presupuestos instantáneos de fabricación de piezas mediante fabricación aditiva, y facilita a los diseñadores acceso a opciones de fabricación a nivel global[24]. A través de esta plataforma podremos elegir el método de fabricación aditiva y los materiales deseados para obtener un presupuesto real de la fabricación de la pieza final.

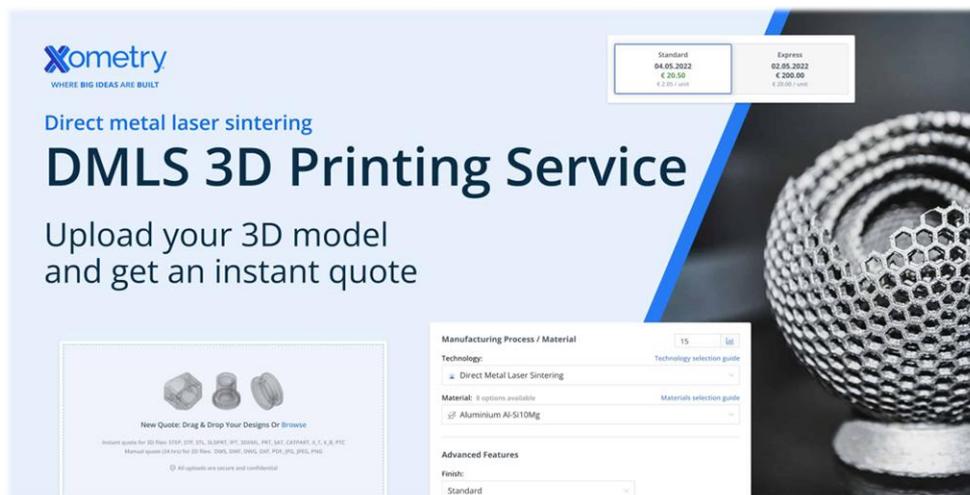


Ilustración 33: Plataforma Xometry (fuente Xometry)

4. Desarrollo del Trabajo

En este apartado se explicará de forma exhaustiva el desarrollo de cada una de las fases del proyecto.

4.1 Escaneado y Diseño en VX

El primer paso para poder realizar un correcto escaneado de la geometría fue la limpieza de la pieza. Al venir de un desguace, el pistón a estudiar había sido utilizado y sería necesario limpiarlo para poder observar de forma clara sus características.



Ilustración 34: Pistón usado (fuente Desguaces Logroño)

Una vez limpio el pistón, procedemos a la realización del escaneo de la pieza. Para la correcta visualización de las superficies de la pieza haremos uso del aerosol revelador SKD-S2 para crear una superficie mate alrededor de la geometría. Con esto podemos proceder con el escaneado de la pieza, dividiéndolo en 2 partes. El primer escaneo posicionando la pieza sobre su base, y el segundo apoyándola sobre su superficie superior. De esta manera somos capaces de obtener dos mallas con la información completa de la pieza, y con un doble escaneo de las paredes laterales del cilindro que son las que más cantidad de detalles y ranuras contienen. Mediante el programa de VXEelements somos capaces de visualizar ambas mallas y trabajarlas para modelar la geometría deseada.



Ilustración 35: Escaneado mitad inferior

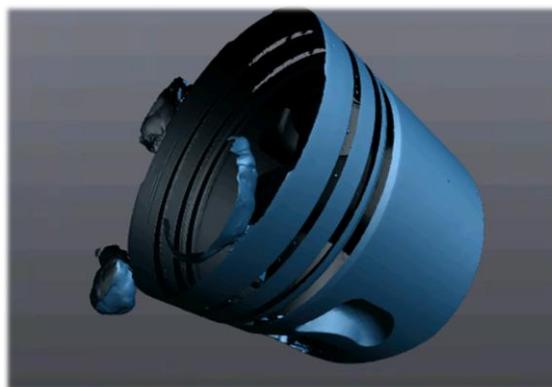


Ilustración 36: Escaneado mitad inferior

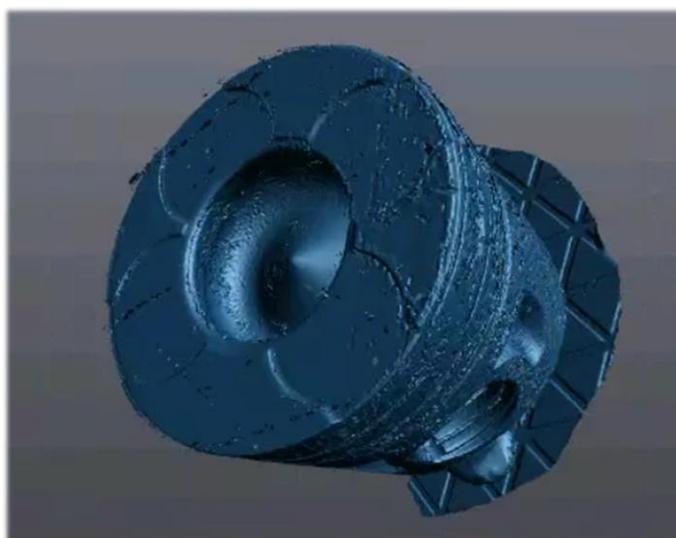


Ilustración 37: Escaneado mitad superior

Una vez tenemos ambos escaneos terminados, procedemos a la limpieza de las mallas obtenidas. Primero, por separado, limpiamos cada una de las mallas, eliminando el posible ruido de escaneo o restos de la superficie de apoyo de la pieza restantes como podemos ver en el escaneo de la mitad superior. Para ello en VX disponemos de varias herramientas de selección que usaremos para ir eliminando las zonas de la malla que no se necesiten.



Ilustración 38: Herramientas Selección



Ilustración 39: Herramientas eliminar/conservar malla

Una vez las partes superior e inferior del pistón están limpias, y sin ruido o elementos externos a la pieza procedemos a unir las en una misma malla. Para ello hacemos uso de la herramienta “Mejor Ajuste” de VX que nos permite, eligiendo puntos en común de ambas mallas, unir las en una sola.



Ilustración 40: Herramienta Mejor ajuste

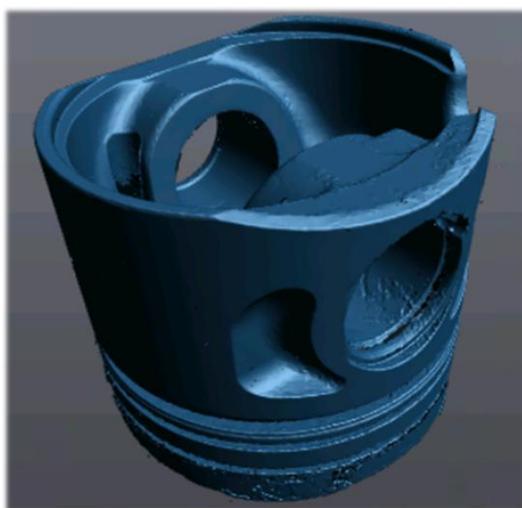


Ilustración 41: Malla unida

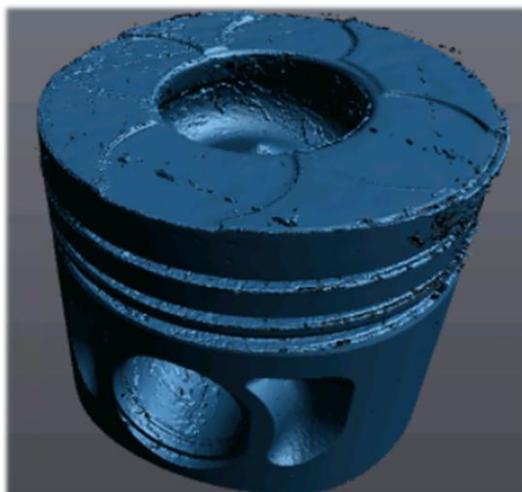


Ilustración 42: Malla unida

Como podemos observar en las ilustraciones 25 y 26, las superficies de la malla obtenida tienen una gran cantidad de rugosidades e imperfecciones. Haciendo uso de las herramientas que nos ofrece VX solucionaremos estos problemas para obtener un modelo final de la pieza de alta precisión. Haciendo uso de las herramientas bajo el título “Mejorar” seremos capaces de suavizar las superficies de la pieza, eliminar rugosidades, y con la herramienta “Cerrar Agujeros” cerrar todas aquellas pequeñas ranuras que el escaneo no ha sido capaz de desarrollar. Por último usaremos la herramienta “Arreglar la malla” que nos permitirá cerrar todos los pequeños agujeros que no hayamos solucionado, además de suavizar al máximo la pieza y reducir el número de triángulos de la malla. A menor número de triángulos, la pieza pierde resolución, pero debido a su alta complejidad geométrica esto será necesario para poder realizar un correcto análisis posterior en Solid Edge.



Ilustración 43: Herramientas suavizad



Ilustración 44: Malla final

Tras la obtención de esta malla en VX, se tomó la decisión de simplificar la geometría de cara a su trato en Solid. Se decidió que sería interesante prescindir de la mitad superior del pistón, quitando las ranuras laterales y agujero superior ya que son las partes con mayor complejidad geométrica, y en VX no se conseguía un modelo idéntico a la pieza original. La solución sería entonces extruir desde VX un cilindro sólido hasta la superficie superior, y desde el programa de Solid Edge crear las ranuras restantes. Se hizo uso de las herramientas de selección y eliminación de malla para retirar la mitad superior: Para extruir el cilindro, se creó un plano circular sobre la superficie superior del cilindro, y mediante la herramienta editar se extruye para crear una pieza sólida sin ranuras.



Ilustración 45: Creación de planos

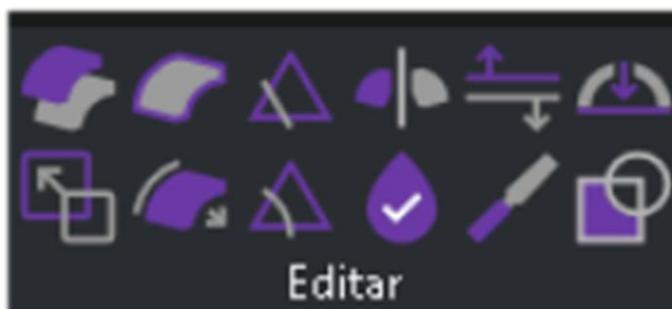


Ilustración 46: Extrusión

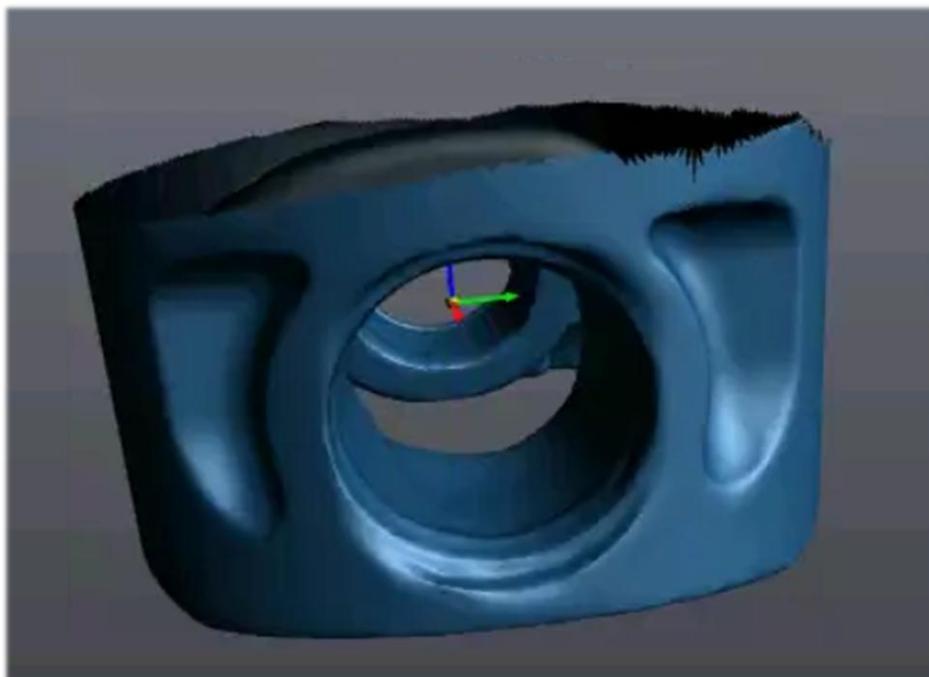


Ilustración 47: Malla recortada

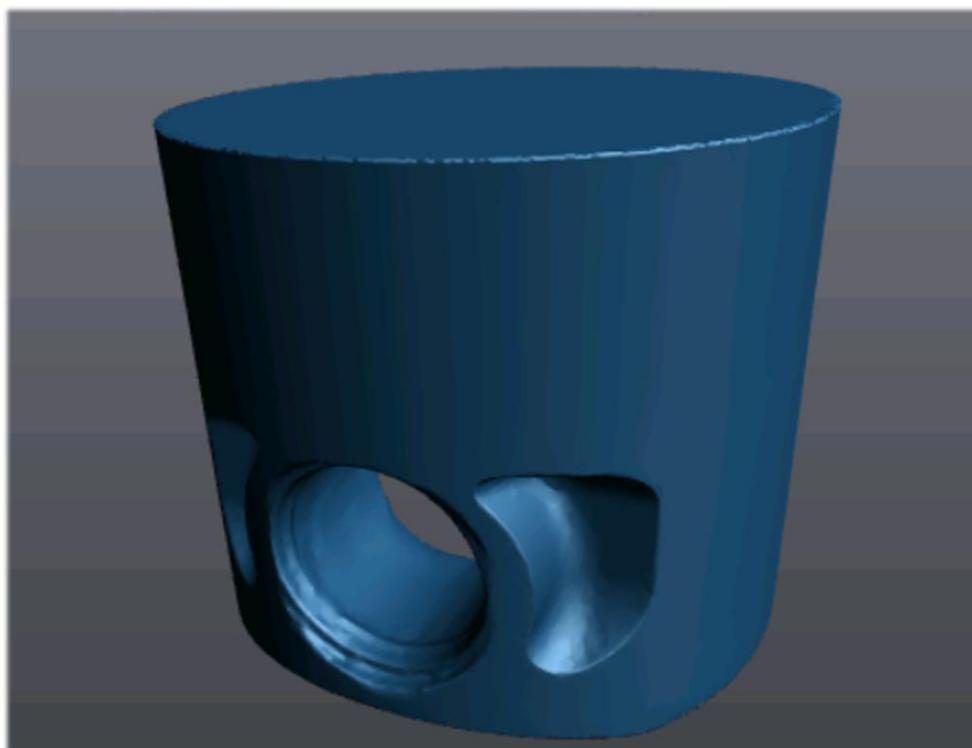


Ilustración 48: Malla Final sin ranuras

4.2 Diseño Generativo y Optimización Topológica

Con ambas mallas trabajadas en VX procedemos a exportar los ficheros .stl a Solid Edge. El siguiente paso de este proceso será convertir las mallas superficiales en piezas sólidas sobre las que trabajar. Si el procesado de las mallas se ha realizado correctamente, a la hora de abrirse los ficheros en SE estos deberán abrirse como cuerpos sólidos y no como superficies. En caso contrario, dentro del apartado “Superficies” se pueden cerrar los agujeros o imperfecciones restantes de la malla para su transformación en pieza sólida.

Se partirá del modelo original escaneado, y se usará el pistón extruido en VX únicamente en caso de que el modelo original de problemas por su complejidad.

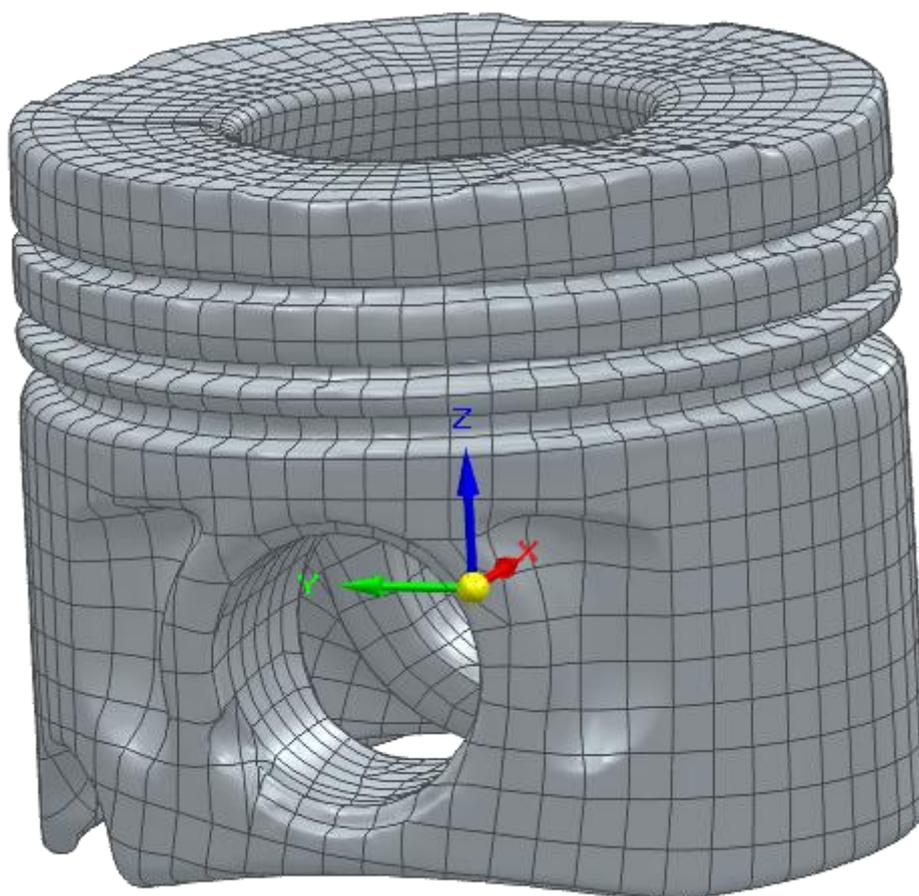


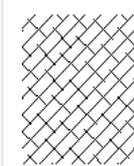
Ilustración 49: Modelo pieza original SE

4.2.1 Condiciones de Contorno

Para poder proceder con el diseño generativo y la optimización topológica se deberán definir claramente las condiciones de contorno de la pieza. A la hora de comenzar la simulación por FEM lo primero será analizar el material a utilizar. El pistón original se fabricó con Aluminio 4032 (4032-T6, AlSi12.5MgCuNi), y aunque SE dispone de una amplia librería de materiales, esta aleación no está entre los materiales disponibles. Tras estudiar las aleaciones de aluminio disponibles se valoró que aquella con las propiedades más similares es el Aluminio 7075 (AlZn5.5MgCu, 3.4365, 2L95, A97075), compartiendo además el 87% de su composición con la aleación original.

Mostrando propiedades de: Aluminio, 7075-T6 (Materials\Metales\Aleaciones de aluminio)

Estilo de cara: Aluminio  Administrar estilos...

Estilo de relleno: ANSI38(Aluminio)  Administrar estilos...

Propiedades

Nombre de propiedad	Valor	Elimina...	Editar...
Densidad	2795,000 kg/m ³		
Coefficiente de expansión térmica	0,0000 /C		
Conductividad térmica	0,121 kW/m-C		
Calor específico	920,000 J/kg-C		
Módulo de elasticidad	71705,473 MPa		
Coefficiente de Poisson	0,330		
Límite elástico	503,317 MPa		
Tensión de rotura	572,265 MPa		
Elongación %	0,000		

Ilustración 50: Propiedades Aluminio 7075

Posteriormente se deberá realizar un estudio de cargas para poder analizar los esfuerzos que sufre el pistón durante su funcionamiento. Como se ha visto previamente, los MCI modernos alcanzan presiones de hasta 160 bar dentro de la cámara de combustión[7], y aunque los pistones realizan un movimiento cíclico en el que varía su exposición a esta presión, el caso de cargas se estudiará siguiendo este punto máximo.

Para realizar el cálculo de la fuerza que sufren los pistones nos basaremos en la siguiente ecuación:

$$P[Pa] = \frac{F[N]}{A[m^2]}$$

Para calcular la superficie que sufre los efectos de esa presión mediremos el diámetro de la cara superior del pistón, que en este caso son 8cm y calculamos su área.

$$160bar = 16 * 10^6 Pa$$

$$A[m^2] = \pi * 0,04^2 = 5,027 * 10^{-3} m^2$$

$$P[Pa] = \frac{F[N]}{A[m^2]} \rightarrow F[N] = 16 * 5,027 * 10^3 = 80424,77N \approx 80kN$$

Además de la presión de la cámara de combustión, el pistón también sufre efectos del rozamiento de sus paredes con las paredes de los cilindros, y de su propio peso, sin embargo, los efectos de estas fuerzas son despreciables frente a la magnitud de la fuerza generada por la combustión. Es por esto por lo que se tendrán en cuenta para el estudio de cargas la fuerza sobre su superficie superior, y sus reacciones sobre las uniones con la biela (**40kN a cada lado**).

4.2.2 Estudio FEM Modelo Original

Teniendo las condiciones de contorno definidas podemos proceder con el análisis FEM del modelo de la pieza original. Para ello entraremos en la herramienta de simulación de Solid y crearemos un nuevo estudio en el que definiremos el material con el que trabajar, en este caso Aluminio 7075.



Ilustración 51: Herramienta Simulación SE

Para nuestro caso de cargas deberemos definir las fuerzas que actúan sobre la pieza, y las restricciones que asignaremos a nuestra geometría. Usando la herramienta de Cargas estructurales asignaremos a la pieza las fuerzas y presiones correspondientes.

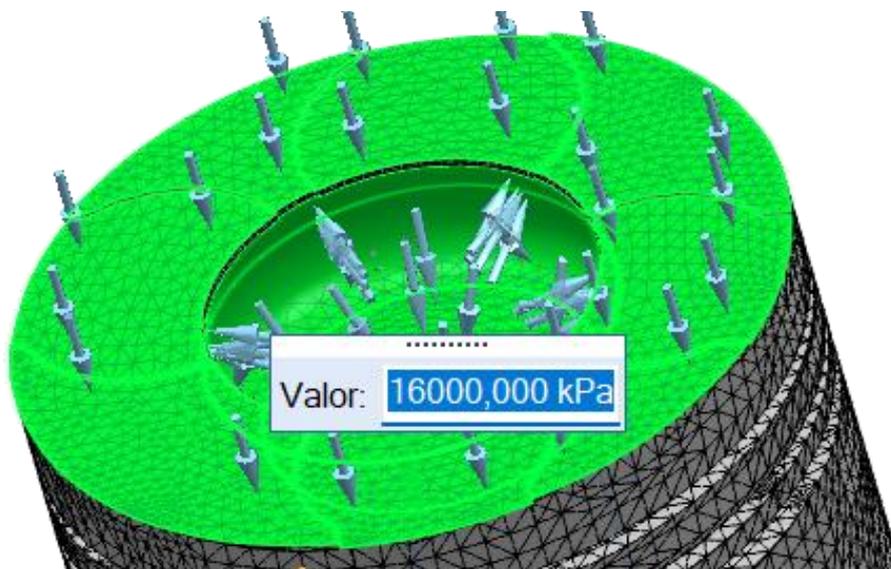


Ilustración 52: Presión sobre la superficie superior

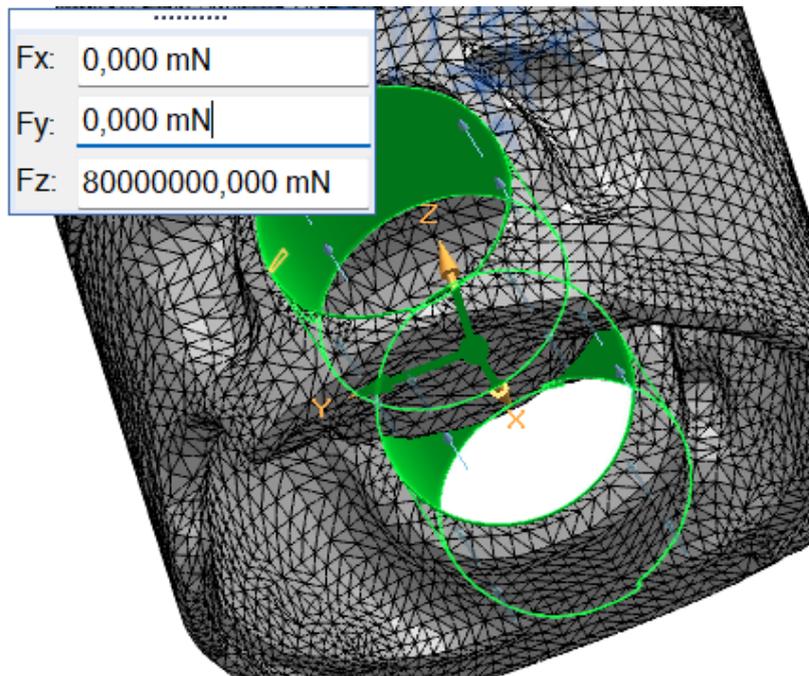


Ilustración 53: Reacción sobre la unión Pistón-Biela

Por último, se deberán definir ambos agujeros cilíndricos como puntos fijos ya que son las uniones entre el pistón y la biela.

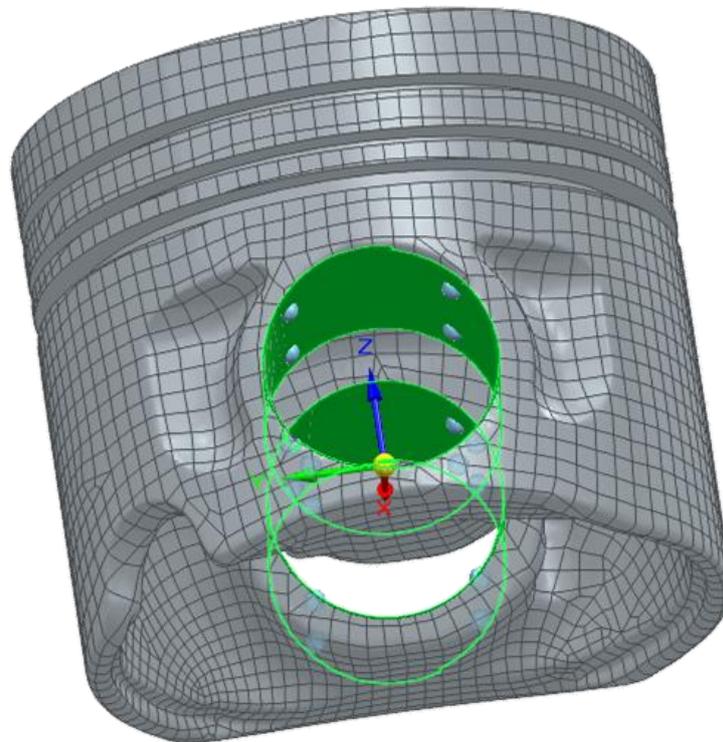


Ilustración 54: Restricciones

Una vez se han definido las condiciones de contorno podemos proceder con la resolución del caso de cargas mediante el análisis FEM. Para ello se usará la herramienta mallar de SE:

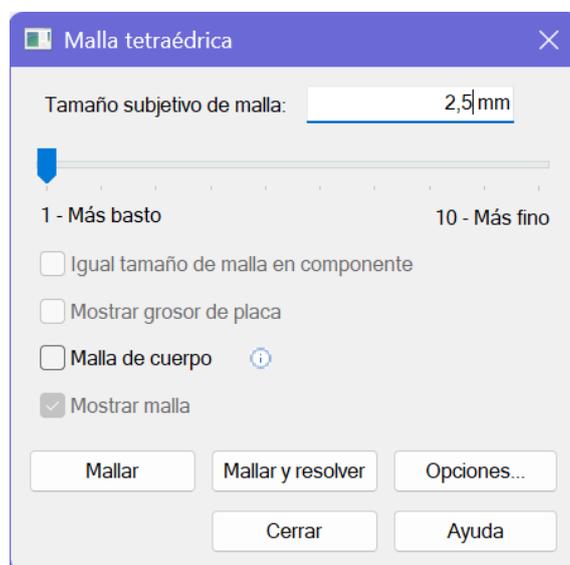


Ilustración 55: Herramienta mallar

Con esta herramienta podremos definir el tamaño de la malla que se usará para realizar el análisis y la calidad del estudio, de más basto a más fino. Realizaremos el estudio en el nivel 1-Más basto por la complejidad de la geometría analizada. Realizar el análisis aumentando la calidad puede resultar en tiempos de análisis muy elevados por la gran cantidad de detalle en la pieza.

Una vez definidos la calidad del estudio y el tamaño de malla procedemos a “Mallar y resolver”. Y el programa procederá con el estudio de cargas.

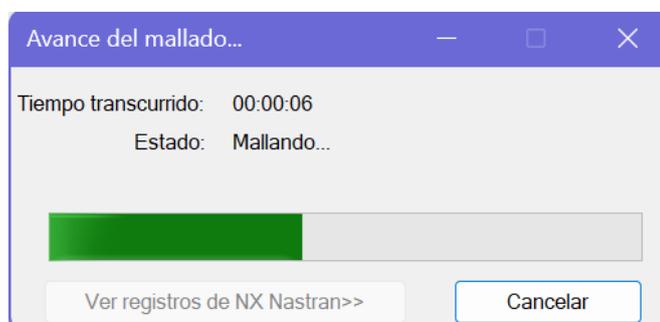


Ilustración 56: Proceso mallado

Tras el intento de mallado y resolución aparece el siguiente error por la alta complejidad y alto nivel de detalle de la pieza:

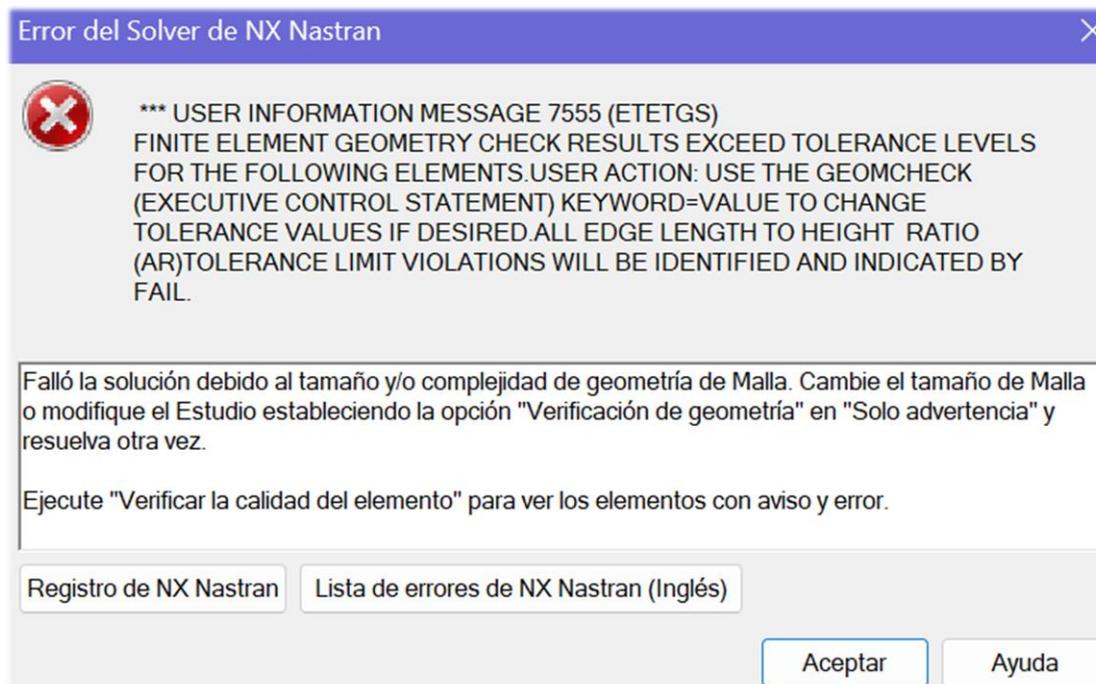


Ilustración 57: Error Simulación

Tras cambiar las propiedades y calidad del estudio para una máxima tolerancia vemos que el problema persiste. Reducir aún más el número de triángulos de la malla tampoco es una solución ya que durante el suavizado de la pieza en VX se redujo lo máximo el número de triángulos sin comprometer la geometría del modelo. Por lo tanto se tendrá que hacer uso del modelo simplificado extruido de la pieza.

4.2.3 Diseño Modelo Extruido

Tras el fallo con el modelo original, deberemos diseñar desde SE el modelo con el cilindro extruido para que se asemeje al máximo a la pieza original. Se exportará el fichero de la malla a Solid, y midiendo sobre la pieza original las diferentes ranuras y agujeros que la componen podremos diseñar la pieza con las herramientas de SE. Al realizarse desde el programa buscamos que la pieza final tenga un nivel de detalle y de triángulos de malla muy inferior, y así nos permita llevar a cabo el análisis por FEM.

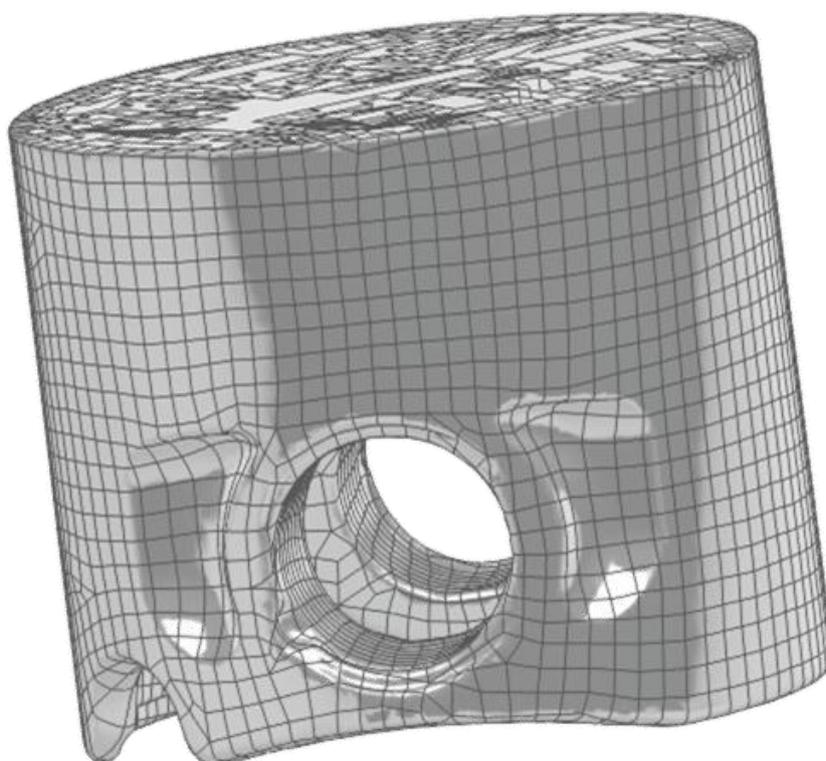


Ilustración 58: Modelo Extruido Pistón

Para crear las ranuras y agujeros usaremos las herramientas de diseño de SE, que permiten realizar bocetos, extrusiones y vaciados complejos.



Ilustración 59: Herramientas de diseño

Lo primero será realizar el vaciado de las ranuras en la cabeza de la pieza. Tomando medidas sobre el pistón original podemos realizar el boceto apropiado para obtenerlas:

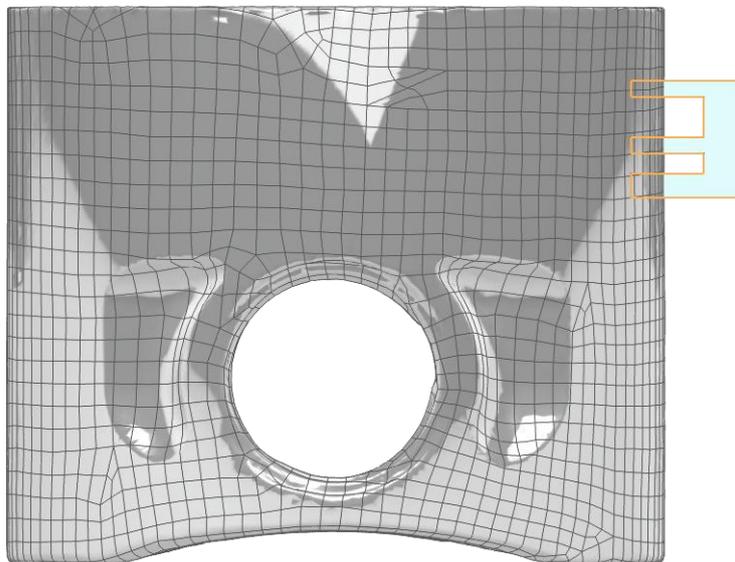


Ilustración 60: Extruido, Boceto 1

Y con este boceto realizamos un vaciado por revolución respecto al eje central del pistón para obtener las ranuras.

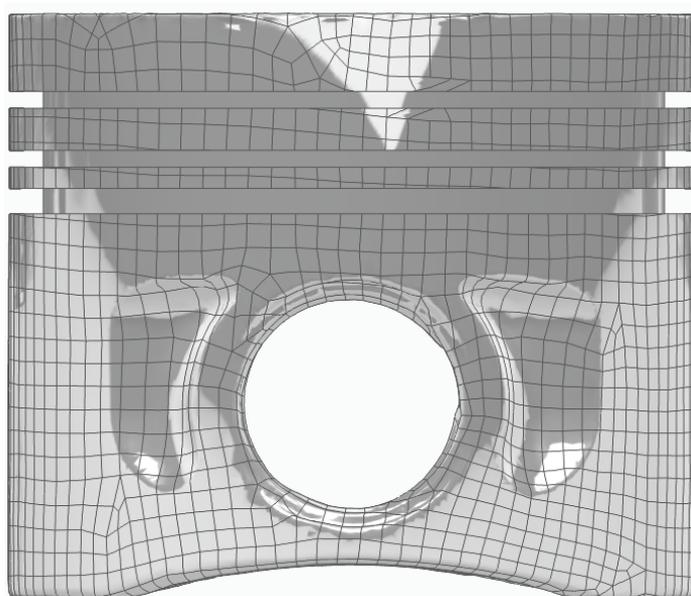


Ilustración 61: Extruido, Vaciado 1

El siguiente paso será realizar el boceto para el agujero de la superficie superior, y además se ha realizado un boceto para suavizar los agujeros laterales del pistón y que mantengan las medidas de la pieza original:

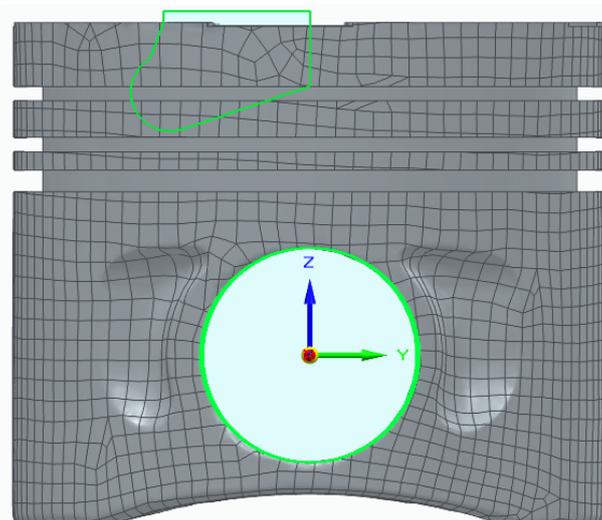


Ilustración 62: Extruido, Boceto 2

Y mediante un vaciado pasante en los agujeros laterales y un vaciado por revolución en el boceto de la cabeza del pistón obtenemos el modelo de la pieza:

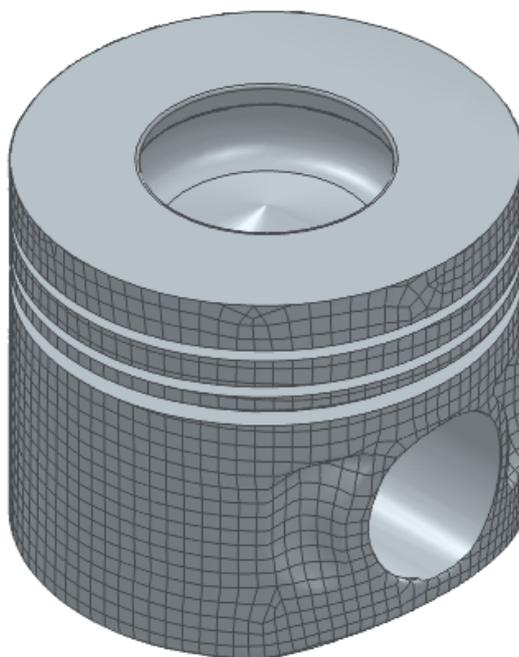


Ilustración 63: Extruido, Vaciado 2

Por último, para añadir los detalles finales sobre la superficie superior realizamos el boceto final:

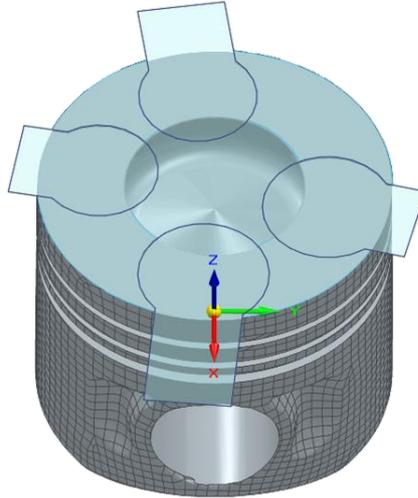


Ilustración 64: Extruido, Boceto 3

Y realizando este vaciado obtenemos el modelo final de la pieza.

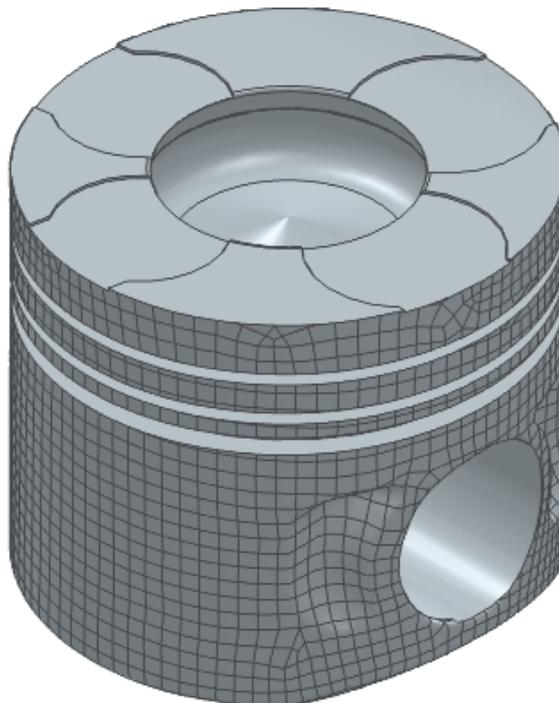


Ilustración 65: Modelo Final Extruido

4.2.4 Estudio FEM Modelo Extruido

Una vez hemos terminado el diseño de la pieza desde SE, el número de triángulos de malla será muy inferior a la pieza anterior, y las geometrías se habrán simplificado considerablemente, ya que las más complejas y pequeñas son las que han sido rediseñadas mediante SE. Procedemos entonces a definir el caso de cargas sobre la pieza y resolverlo mediante el análisis FEM.

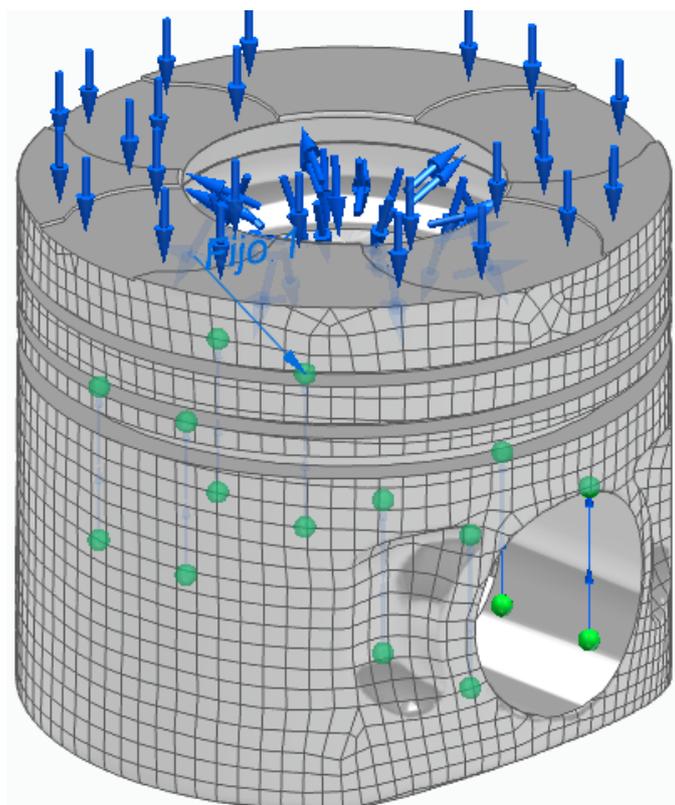


Ilustración 66: Cargas modelo extruido

Una vez está definido de nuevo el caso de cargas resolvemos con la calidad mínima y las menores restricciones posibles, pero volvemos a encontrarnos con el error anterior:

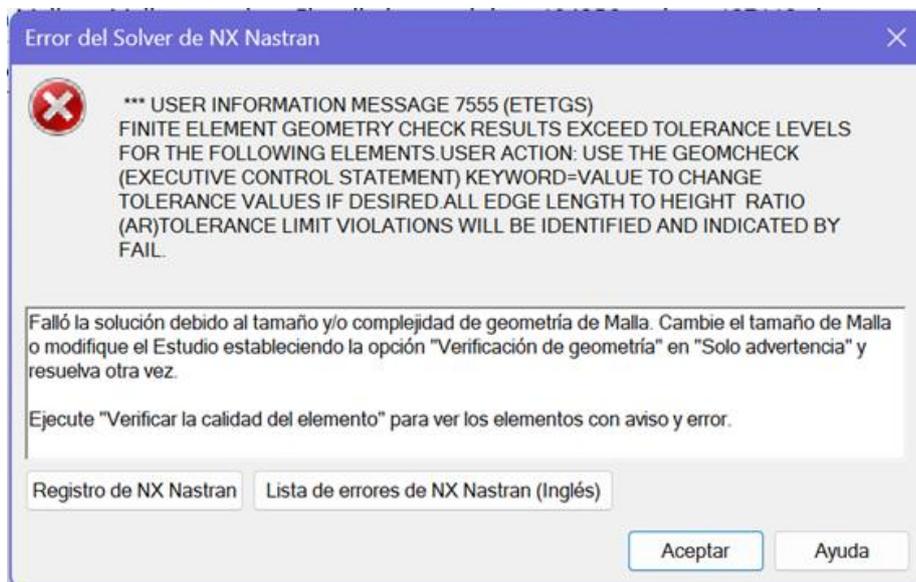


Ilustración 67: Error simulación 2

Podemos observar que la pieza escaneada es excesivamente compleja para el análisis en SE, por lo que recurriremos a una simplificación aún mayor de la pieza. Para ello se realizará un completo rediseño simplificado de la pieza con Solid y se analizará con ese nuevo modelo el estudio FEM y la OT.

4.2.5 Diseño Modelo Simplificado

Tras los fallos anteriores por la complejidad de los modelos escaneados, diseñaremos un pistón simplificado desde cero en Solid Edge. Siguiendo como guía las medidas y geometrías de la pieza original, vamos a rediseñarlo para partir de una geometría más sencilla de cara a la optimización topológica, que añadirá detalle y complejidad a la pieza.

El primer paso será extruir un primer cilindro sólido con las medidas de la pieza original. Tomando las medidas vemos que el pistón tiene un diámetro de 8cm y una altura de 7cm, por lo que usaremos un cilindro de esas dimensiones.

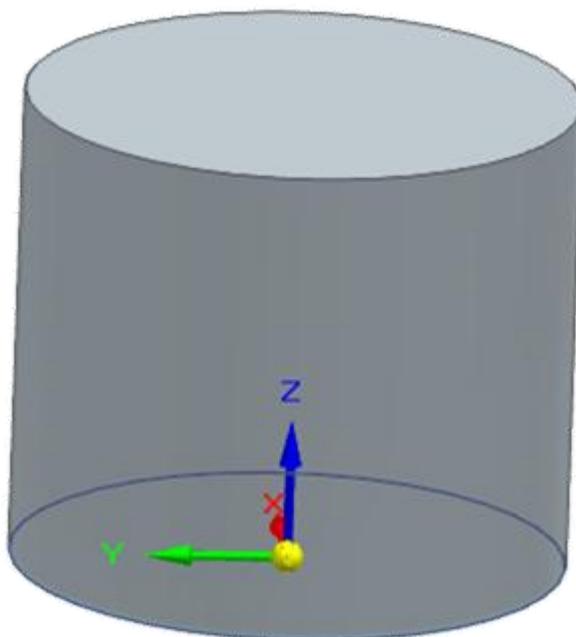


Ilustración 68: Simplificado, Extrusión 1

Teniendo la geometría inicial, los pasos siguientes consisten en la creación de bocetos y sus consecuentes vaciados para ir formando un pistón a partir del cilindro bruto.

El primer boceto serán los agujeros laterales del pistón. Midiendo sobre la pieza original vemos la posición de los agujeros y su dimensión, 2,8cm de diámetro.

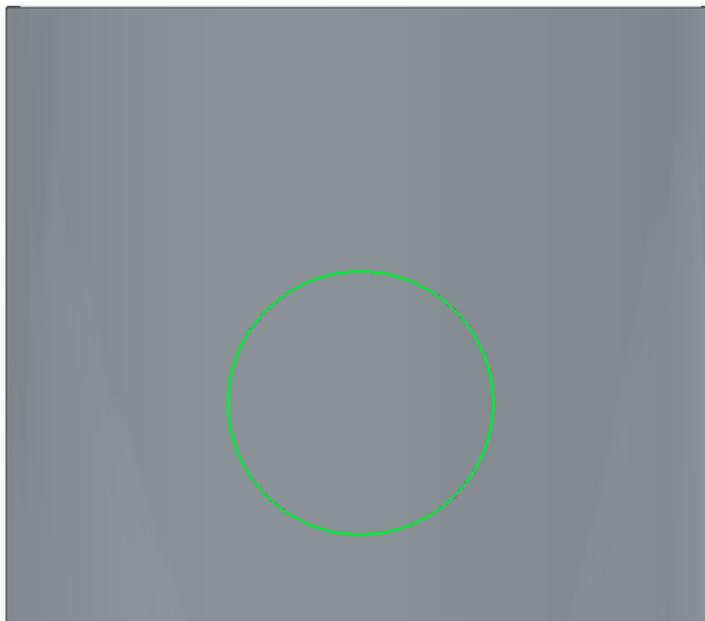


Ilustración 69: Simplificado, boceto 1

Y realizamos el primer vaciado pasante, de un lateral al otro de la pieza.

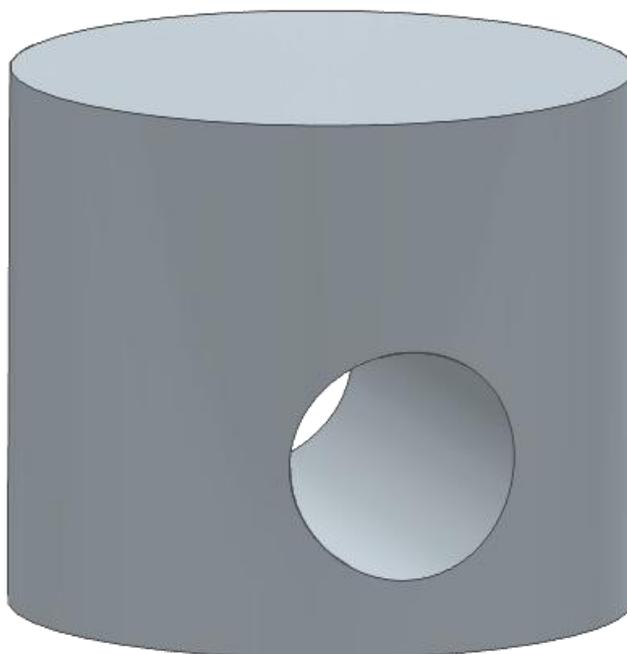


Ilustración 70: Simplificado, vaciado 1

Posteriormente diseñaremos el interior de la pieza. Observando la pieza original, podemos ver que el grosor de las paredes de la pieza es de aproximadamente 1cm, mientras que en los agujeros laterales tiene un refuerzo de 25cm en cada uno. Por último, medimos también que la profundidad de este vaciado es de aproximadamente 45cm, dejando los 25cm restantes de la cabeza del pistón completamente sólidos en su interior. Con esta información realizamos los vaciados necesarios de la pieza mediante la unión de distintos bocetos y geometrías.

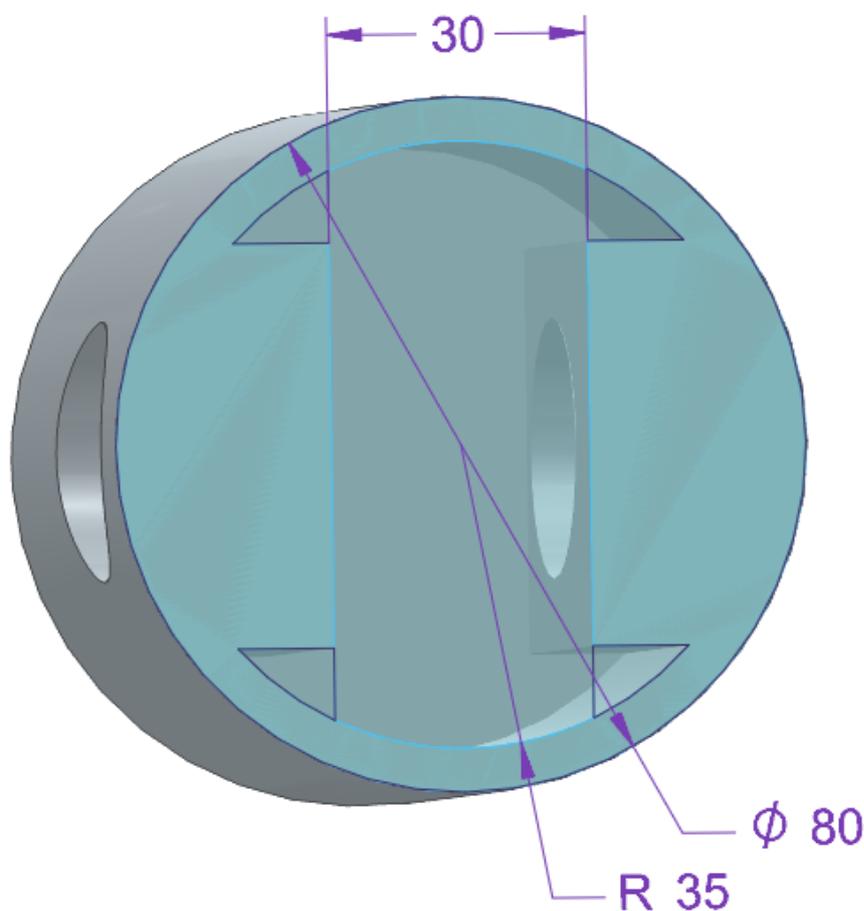


Ilustración 71: Simplificado, vaciado interno

Mediante observación de la geometría de la pieza original podemos destacar que su interior no tiene aristas, sino que se trata de una geometría redondeada y suavizada. Para conseguir la máxima similitud con la pieza original realizaremos un redondeo sobre todas las aristas internas del modelo:

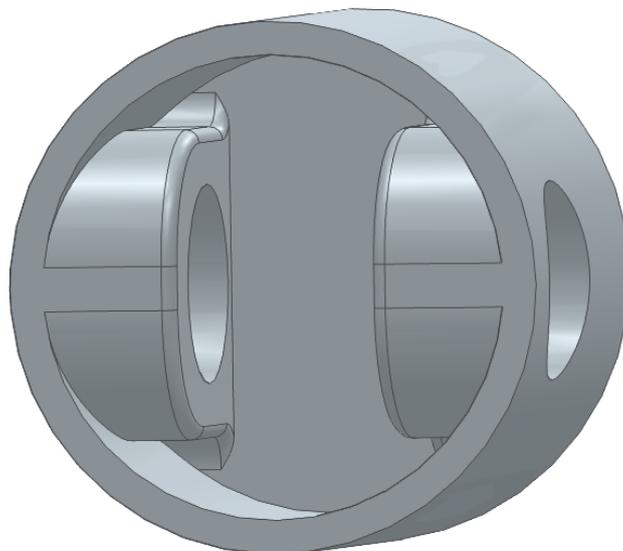


Ilustración 72: Simplificado, Redondeos internos

Para terminar con el modelado del pistón ya solo queda realizar el vaciado de las ranuras laterales y daremos el modelo simplificado por finalizado.

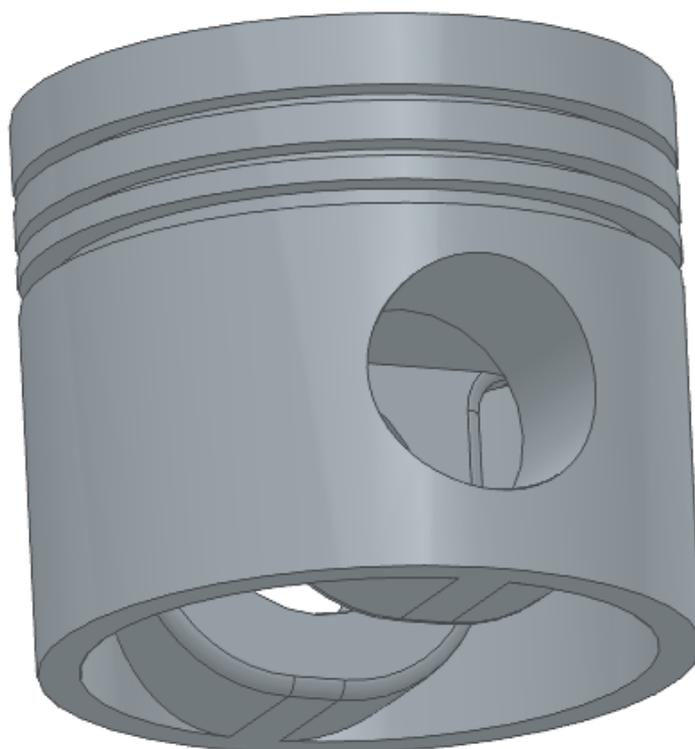


Ilustración 73: Modelo Pistón Simplificado

4.2.6 Estudio FEM Modelo Simplificado

Al igual que en los casos anteriores, para comenzar el estudio FEM lo primero será definir el caso de cargas sobre la pieza, que será igual que para los casos anteriores.

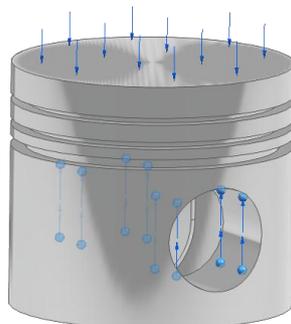


Ilustración 74: Caso cargas Simplificado

Una vez está definido, elegimos una calidad de estudio basta, y un tamaño subjetivo de malla de 5mm, que será más que suficiente para realizar un buen análisis sobre la pieza. Se procede entonces a su resolución.

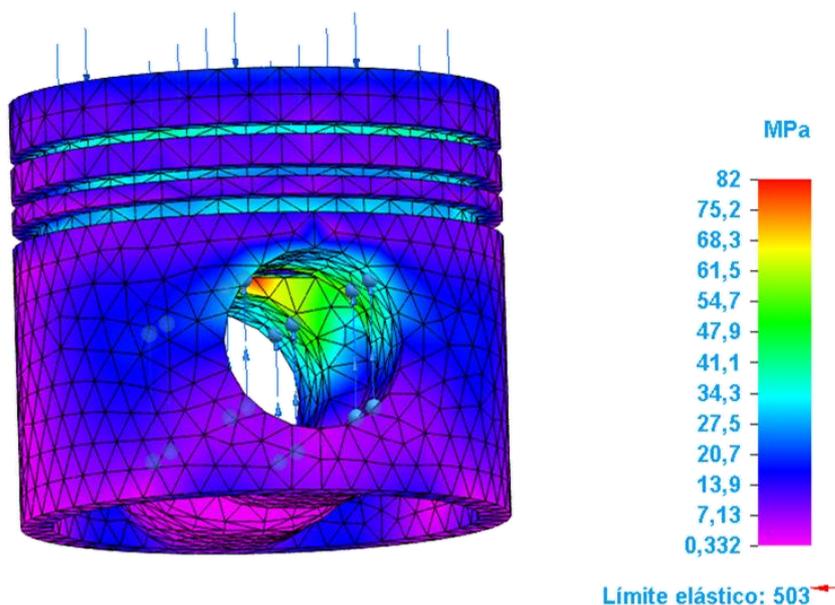


Ilustración 75: Estudio FEM Modelo Simplificado

Podemos observar como el esfuerzo máximo que sufre la pieza es de 82MPa, muy por debajo de su límite elástico de 503Mpa. Gracias a esto seremos capaces de realizar la optimización topológica con un amplio margen.

4.2.7 Optimización Topológica Modelo Simplificado

Una vez se ha realizado el estudio FEM y se ha observado el margen de esfuerzos de la pieza podemos proceder con la optimización topológica de la geometría. Para ello usaremos la herramienta “Diseño Generativo” de Solid Edge.



Ilustración 76: Herramienta Diseño Generativo

Dentro de esta pestaña, al igual que en la simulación FEM, lo primero será definir el material de la pieza. Como vemos en la Ilustración 76: Herramienta Diseño Generativo Ilustración 76 se vuelve a usar el Aluminio 7075-T6. Para seguir adelante con la optimización lo siguiente será definir todas aquellas superficies que no queremos que se pierdan en el rediseño. En el caso del pistón, toda la cabeza del pistón y sus ranuras son imprescindibles para su correcto funcionamiento, al igual que los agujeros laterales, los cuales deben conservar la rigidez necesaria para conservar la unión con la biela. Para definir esto usaremos la herramienta “Preservar Región”, la cual te permite definir que regiones deben conservarse con las iteraciones y en qué medidas.

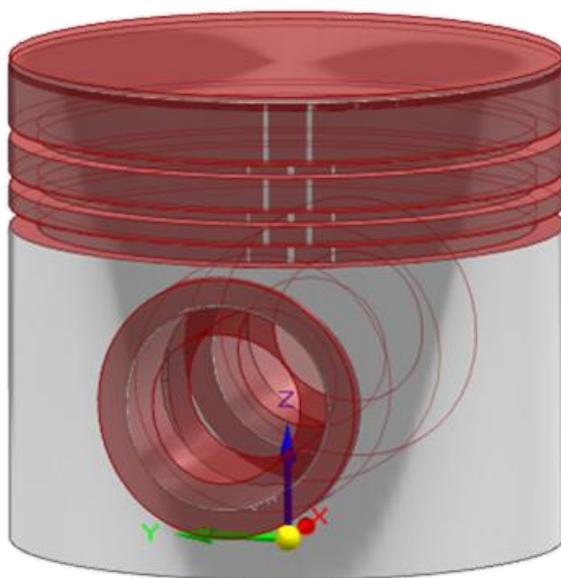


Ilustración 77: Regiones preservadas optimización

Ilustración : Regiones Preservadas Optimización

Una vez se han definido las caras y superficies que deberán conservarse en las iteraciones, procedemos a definir de nuevo el caso de cargas de la pieza. Usando la herramienta “Fuerzas” volveremos a especificar todos los esfuerzos que sufre la geometría, y con la herramienta “Fijo” podremos asignar a los agujeros laterales del pistón su propiedad de unión a la biela. Estos pasos previos son imprescindibles para que las iteraciones posteriores sean correctas, y para la obtención de la geometría optimizada topológicamente.

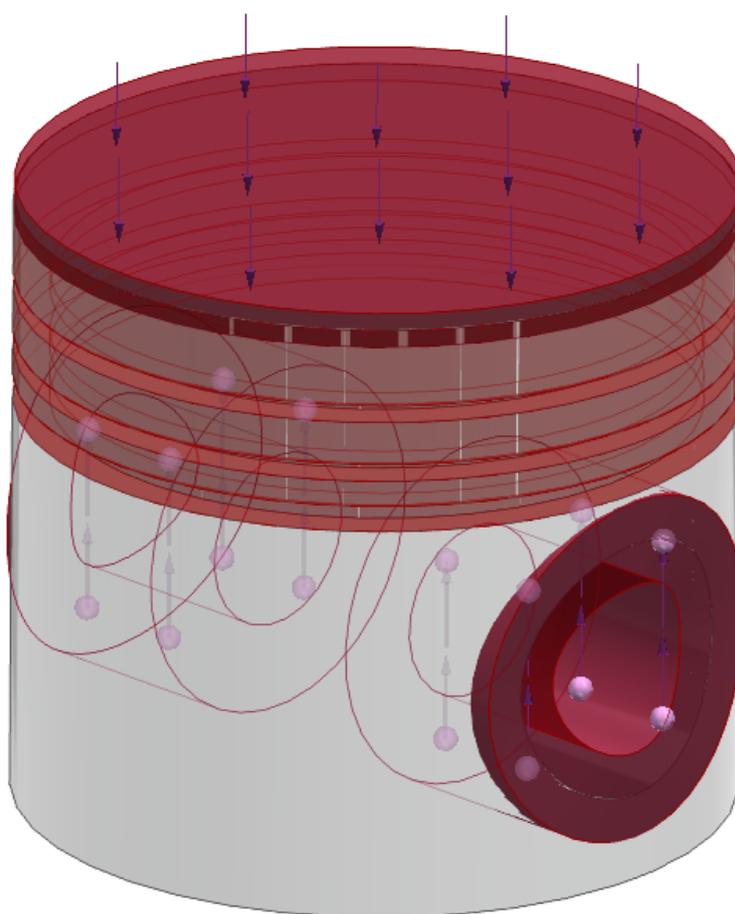


Ilustración 78: Caso Cargas OT Simplificado

Quedando definidas las condiciones de contorno, superficies a conservar y casos de cargas podemos comenzar con las iteraciones de diseño generativo.

Para comenzar con la optimización deberemos usar la herramienta “Generar”.

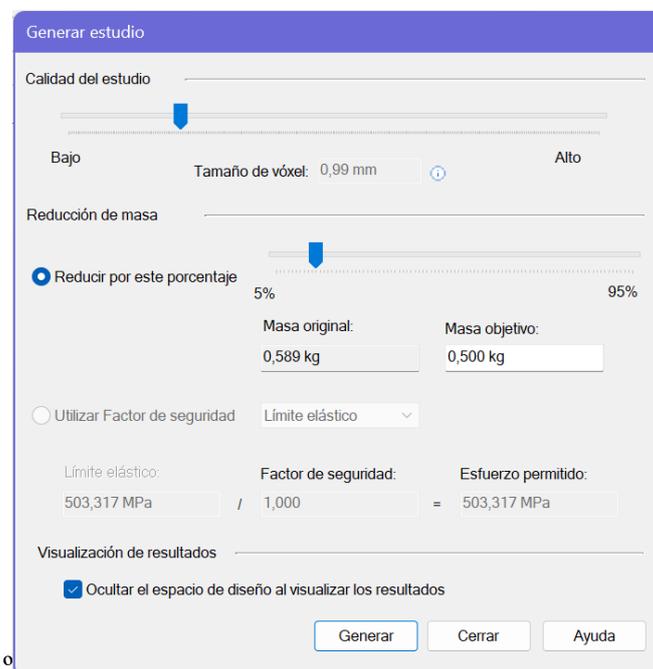


Ilustración 79: Herramienta generar SE

A través de esta pestaña podremos definir las últimas propiedades antes de la optimización. De cara a todas las iteraciones se definirá la calidad de estudio más bajo permitido por el tamaño de vóxel de la pieza. Se toma esta decisión debido a la gran complejidad de la geometría del pistón, ya que una calidad de estudio superior supondría tiempos de espera muy elevados, e incluso la imposibilidad de llevar a cabo la iteración. Por último, en el apartado de reducción de masa podremos definir el porcentaje de masa que se desea reducir en cada iteración. Además permite realizar una comparación entre la masa actual de la pieza y la masa objetivo que tendrá tras el rediseño.

ITERACIÓN 1

Para comenzar con el proceso de optimización, en la primera iteración tomaremos una perspectiva conservadora y de prueba para comprobar que todas las condiciones previas se han definido correctamente. Se realizará una primera iteración con el porcentaje mínimo de reducción de masa, un 5%. Aunque el margen entre los esfuerzos de la pieza original y su límite elástico es muy amplio, realizaremos esta primera iteración con el objetivo de realizar comprobaciones geométricas sobre el resultado, y poder proceder a las optimizaciones más agresivas con seguridad. Se genera entonces la pieza al 5% de reducción.

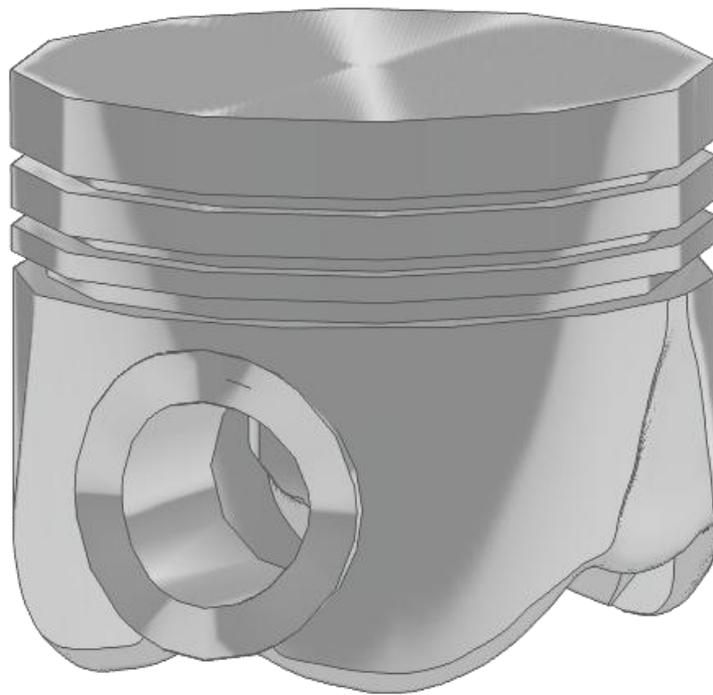


Ilustración 80: Optimización topológica 5%

Con simplemente una reducción de masa del 5%, la pieza presenta cambios observables en su geometría. Además podemos confirmar que mantiene intactas las geometrías especificadas por lo que seguiremos con las siguientes iteraciones.

ITERACIÓN 2

De cara a la segunda optimización, se tomará como objetivo de reducción de masa un 15%. Se ha elegido este valor debido al amplio margen que observamos entre los esfuerzos que sufre la pieza original y su límite elástico. En caso de observar que con la reducción de masa nos aproximamos en exceso al límite elástico bajaremos el porcentaje de reducción de masa. Asignando la calidad del estudio especificada y una reducción del 15% generamos la geometría.

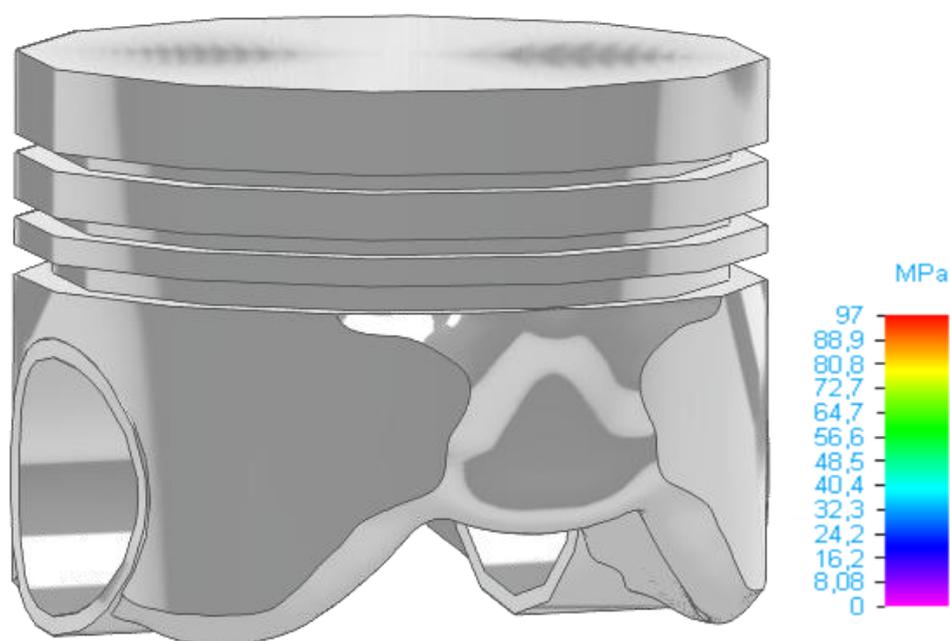


Ilustración 81: Optimización topológica 15%

Los cambios en la geometría son más evidentes, pero analizando el estudio FEM de la pieza vemos que los esfuerzos han variado muy poco respecto a la pieza original, estando muy lejos todavía del límite. Podemos seguir optimizando.

ITERACIÓN 3

Para la tercera iteración se tomará un 20% de reducción de masa.

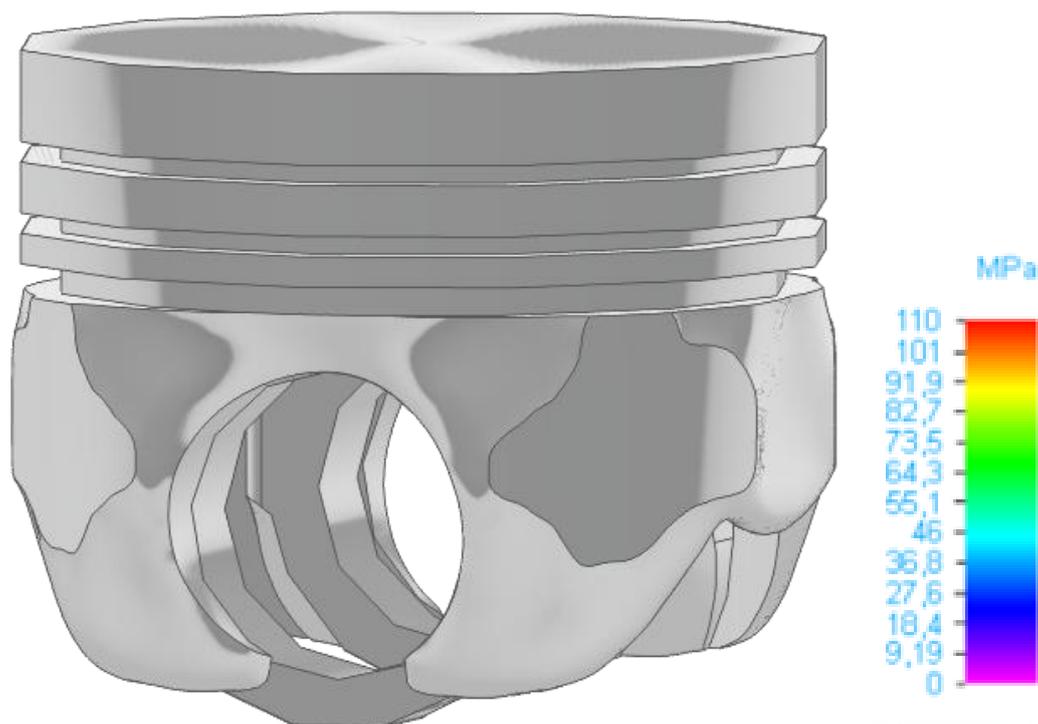


Ilustración 82: Optimización Topológica 20%

Aunque volvemos a observar cambios significativos sobre la geometría, los esfuerzos que sufre la pieza siguen siendo muy similares al de la pieza original. Empezaremos a realizar optimizaciones con una mayor reducción de masa.

ITERACIÓN 4

De cara a la cuarta iteración tomamos como porcentaje de reducción de masa un 25%. Sin embargo, a la hora de generar la geometría optimizada SE nos devuelve el siguiente error.

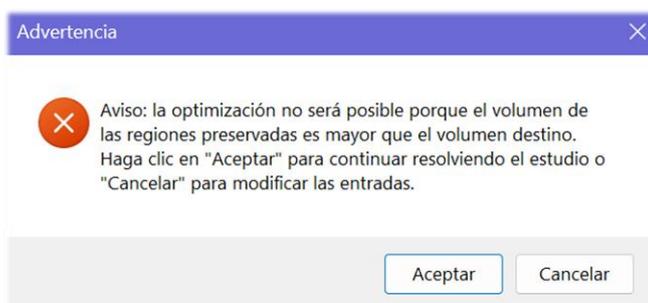


Ilustración 83: Error Optimización

Las condiciones impuestas sobre la pieza son muy restrictivas y por ello, para seguir con la optimización de la geometría deberíamos invadir las superficies conservadas. Lo primero será estudiar cual es el porcentaje máximo de reducción de masa que permite una optimización con las restricciones. Para ello vamos reduciendo el porcentaje desde 25% hasta que observamos que en 22% el error desaparece.

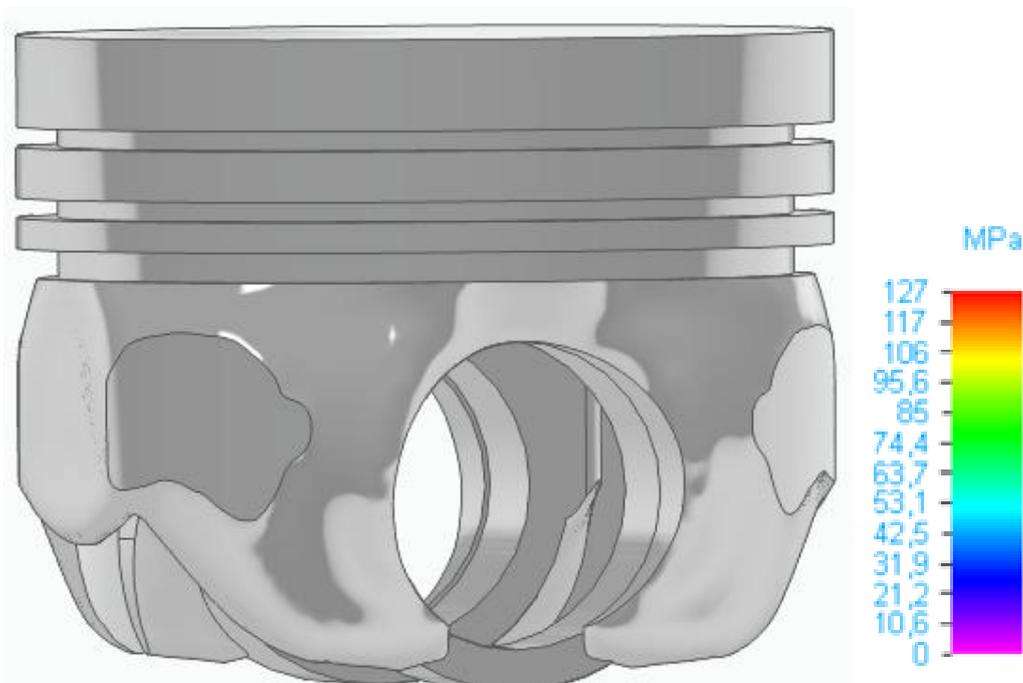


Ilustración 84: Optimización Topológica 22%

Se tomará esta iteración como un primer resultado de geometría optimizada topológicamente. Conservando las caras y partes definidas en el estudio, este primer rediseño del pistón permite reducir la masa de la pieza original un 22% y manteniendo el esfuerzo máximo en 127MPa, muy lejano todavía al límite elástico de 503MPa.

Sin embargo, el análisis no termina aquí. A partir de este primer resultado se buscará realizar una optimización topológica más agresiva de la pieza, siguiendo adelante con el diseño generativo hasta alcanzar el punto más cercano al límite elástico de la geometría. Con esta segunda optimización, se analizará la pieza geoméricamente y se tomará como segundo resultado aquella que sufriendo el mayor esfuerzo, aún mantenga geoméricamente las superficies necesarias del pistón, como los agujeros laterales, las ranuras laterales y su cara superior.

ITERACIÓN 5

Se comienza con las iteraciones con mayor reducción de masa de la pieza. Para tomar la decisión del porcentaje a analizar en la próxima iteración se observó como durante las 4 iteraciones anteriores el análisis FEM había resultado en unos esfuerzos muy similares. Se decide entonces realizar una iteración agresiva saltando hasta una reducción del 60% de masa para ver cómo reacciona la geometría y estudiar los esfuerzos que sufre la nueva geometría optimizada.

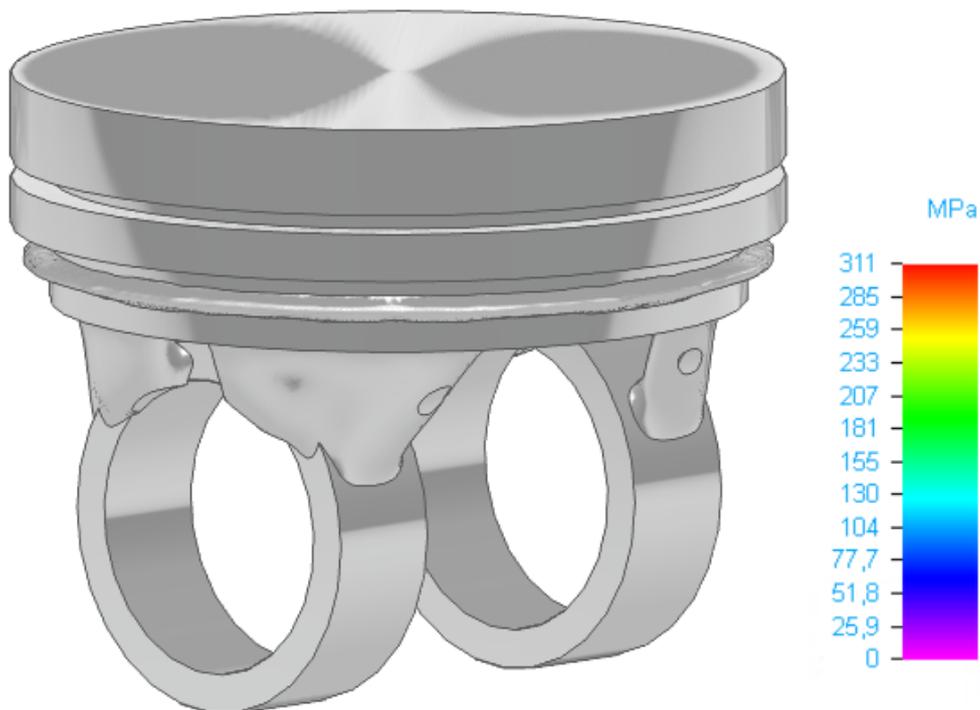


Ilustración 85: Optimización Topológica 60%

La geometría resultante es visualmente muy diferente a la anterior, habiendo perdido ya totalmente las paredes laterales de la pieza original. Como podemos observar en la ilustración 70, la cabeza del pistón se mantiene sujeta a los anillos laterales mediante 3 pequeñas uniones. La superficie superior del pistón se mantiene intacta y comprobamos que la parte que se ha visto más afectada por esta reducción de masa es el interior de la pieza, que ahora es hueca, conservando únicamente un pequeño grosor que ofrece rigidez a la cabeza del pistón.

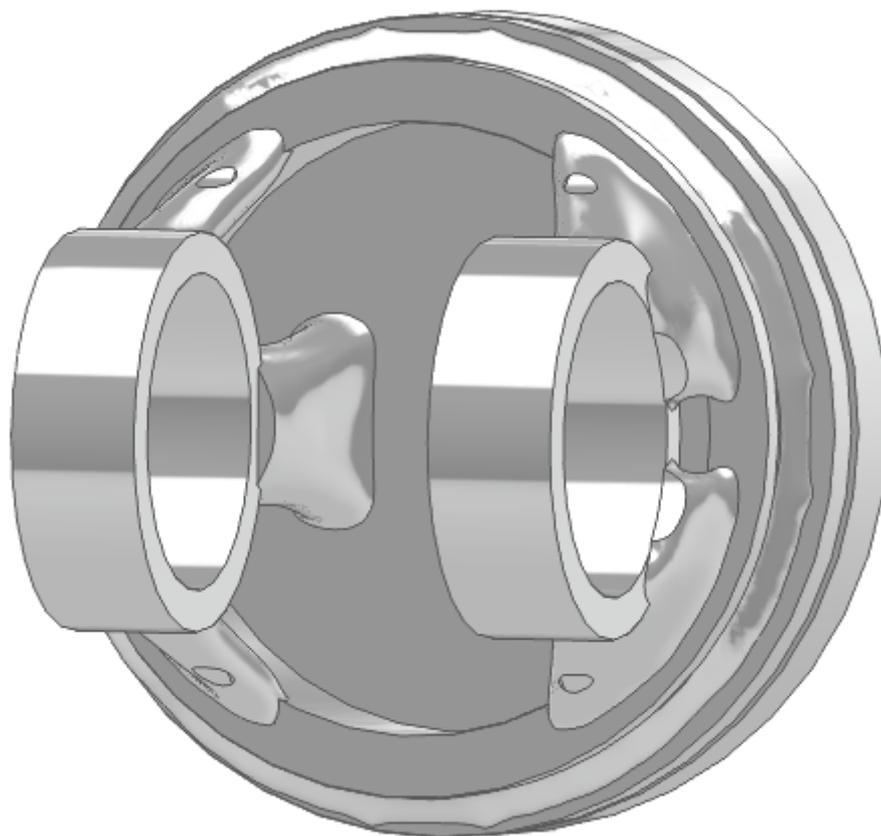


Ilustración 86: 60% Vista Inferior

Observando los esfuerzos de la pieza observamos un salto muy significativo con respecto a las geometrías anteriores, alcanzando valores de 311MPa, los cuales se acercan ya al límite elástico. Podemos ver que las partes restantes de las que reducir la masa de la pieza son muy limitadas por lo que las siguientes iteraciones se realizarán con saltos pequeños entre ellas. No obstante, antes de comenzar con la siguiente iteración, se toma la decisión de realizar una iteración intermedia para observar el proceso de optimización de la pieza, y ver claramente que zonas del pistón son prescindibles.

ITERACIÓN 6

Se realiza una iteración intermedia, con un porcentaje de reducción de masa del 45% con fines de estudiar y analizar las geometrías optimizadas más cercanamente.

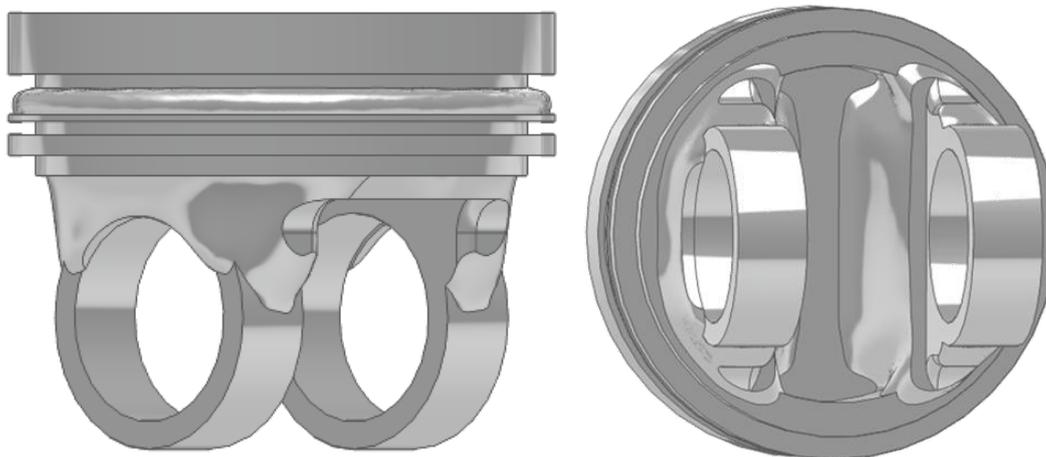


Ilustración 87: Optimización Topológica 45%

Se puede observar como geoméricamente el exterior de la pieza es muy similar a la iteración anterior, habiéndose eliminado las paredes laterales y conservando una unión entre los anillos laterales y la cabeza del pistón, que se mantiene intacta. Se observa también como toda la reducción de masa viene del vaciado del interior de la cabeza del pistón, siendo esta la parte con una mayor variación entre iteraciones. Esto nos permite deducir que una vez se complete el vaciado del interior de la cabeza, Solid Edge continuará con su optimización sobre las superficies exteriores del pistón, las cuales son imprescindibles para su correcto funcionamiento. Se analizarán uno por uno los porcentajes de reducción restantes hasta alcanzar el resultado final.

ITERACIÓN 7

Continuamos con una reducción de masa del 61%.

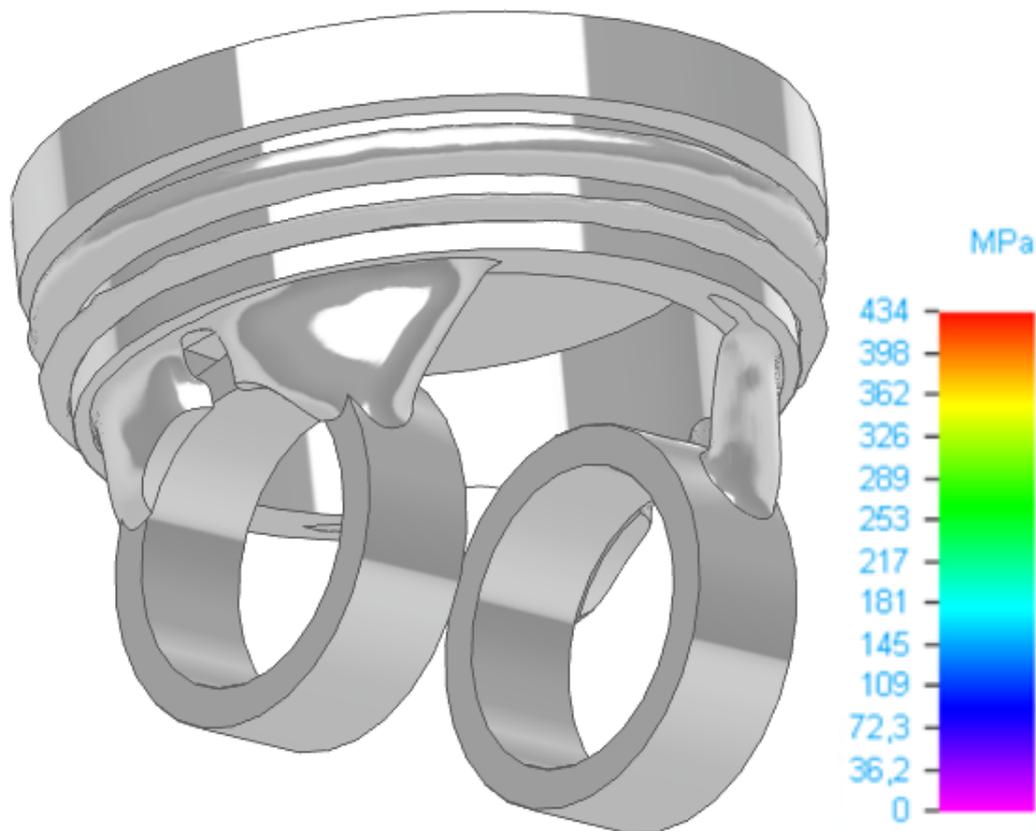


Ilustración 88: Optimización Topológica 61%

Podemos observar cómo se ha completado el vaciado de la pieza, y los anillos laterales ahora se ven sujetos únicamente por dos uniones laterales a la cabeza. Vemos también un salto muy significativo en los esfuerzos que sufre la pieza, habiendo subido hasta 434 MPa. No obstante sigue conservando los anillos y la cabeza del pistón intactos por lo que seguimos sin descartar la optimización. Se estudiará la siguiente iteración.

ITERACIÓN 8

Se realiza la iteración siguiente, definiendo una reducción de masa del 62%.



Ilustración 89: FEM 62%

Se obtiene una optimización con buen aspecto geométrico, pero sobretodo destaca su cercanía al límite elástico, siendo esta la última geometría optimizada que obtendremos antes de la rotura de la pieza. Siguiendo el criterio del análisis FEM la pieza es válida, pero debemos estudiar su geometría.



Ilustración 90: Optimización Topológica 62%

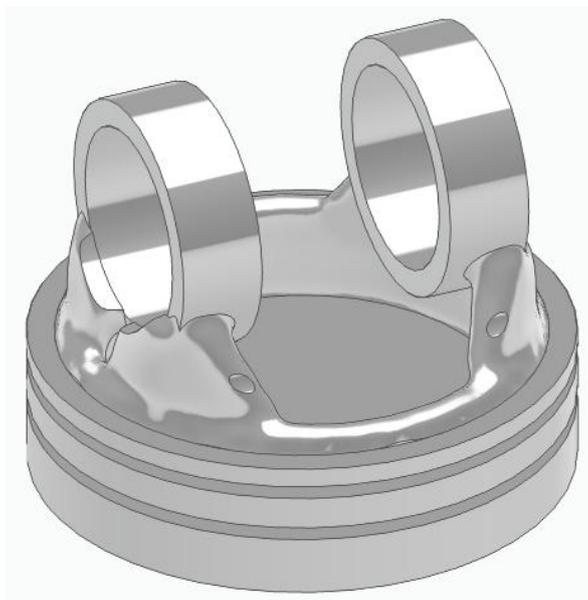


Ilustración 91: Optimización Topológica 62%, vista inferior

Tal y como podemos observar en las ilustraciones 90 y 91, esta geometría optimizada mantiene a la perfección las ranuras y superficies lisas de la cabeza del pistón, además de los anillos laterales que ofrecen soporte a la biela. Estos se mantienen sujetos a la pieza a través de dos uniones con 3 pequeñas ranuras que reducen aún más su masa. Además, vemos como el interior de la pieza se ha vaciado por completo, al igual que las paredes laterales, pero sin comprometer las superficies imprescindibles de la pieza.

Se toma esta optimización como segundo resultado de este proyecto debido a su calidad geométrica y su cercanía al límite elástico.

4.3 Refinado de Geometrías

Una vez definidos los dos resultados de la optimización, 22% y 62%, se deberá realizar un último procesado de estas piezas. De cara a su fabricación mediante técnicas de impresión 3D, usaremos el software de Altair Inspire para suavizar sus geometrías.



Ilustración 92: Herramientas PolyNURBS

Dentro de Altair, como observamos en la ilustración 92, haremos uso de la herramienta “Ajustar PolyNURBS”. Esta función crea una malla suavizada alrededor de la geometría optimizada actual, eliminando todas las aristas y zonas complejas. Sin embargo, se debe complementar con la herramienta “Afilarse” que nos permitirá definir las superficies que mantendrán sus propiedades de origen. En el caso de ambas geometrías, realizaremos el ajuste de malla para suavizar sus superficies pero aplicaremos la herramienta “Afilarse”. Esta se usará sobre las ranuras y superficies de la cabeza del pistón, y sobre los anillos laterales, ya que es necesario que conserven sus propiedades para el correcto funcionamiento de la pieza final.

4.3.1 PIEZA FINAL 22%



Ilustración 93: Pieza Final 22%

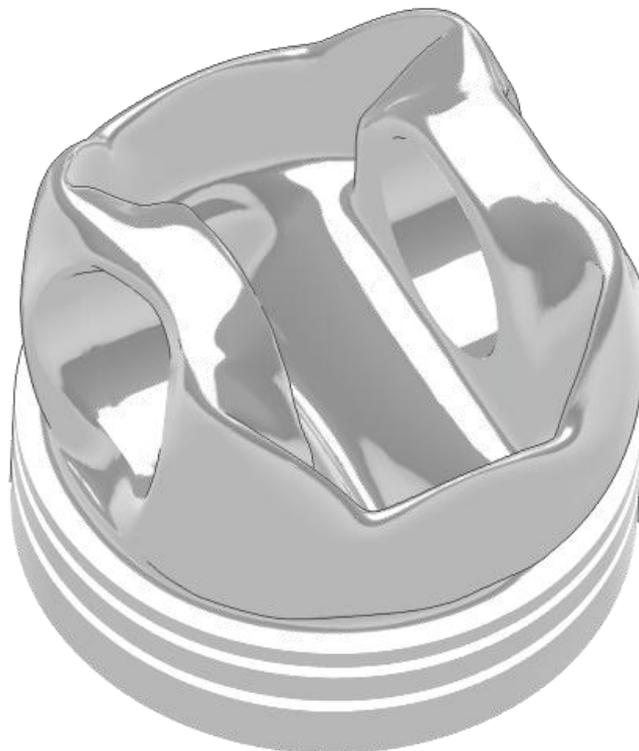


Ilustración 94: Pieza Final 22%, vista inferior

4.3.2 PIEZA FINAL 62%



Ilustración 95: Pieza Final 62%



Ilustración 96: Pieza Final 62%, vista inferior

4.4 Impresión 3D

Con las geometrías suavizadas, la última fase del proyecto es la I3D. Con vista en la fabricación final metálica de los materiales, se fabricarán prototipos plásticos previos con el objetivo de visualizar las geometrías y comprobar su viabilidad de cara al uso final de la pieza. Para la I3D de estos prototipos disponemos de las impresoras de fabricación aditiva de la universidad ICAI, por lo que se ha tomado la decisión de imprimir un prototipo de la pieza original, y otro de la geometría final optimizada al 62% con un alto nivel de detalle.

Para realizar la impresión del modelo de la pieza original, al no necesitar un alto nivel de detalle o complejidad se usará la impresora FDM Prusa del laboratorio. Para poder lanzar la impresión, haremos uso del programa UltimakerCura. Este software de I3D permite realizar un preparado de la pieza previo a su impresión. Exportando desde SE el fichero de la pieza original, el programa nos permite realizar una partición por capas de la geometría y añadirle los soportes necesarios para su correcta impresión. Posteriormente permite elegir el tipo de material a utilizar, que en este caso usaremos PLA genérico, y las propiedades de impresión deseadas. Una vez definido, se lanza la impresión.

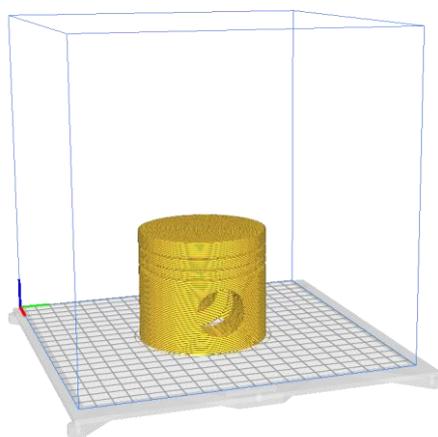
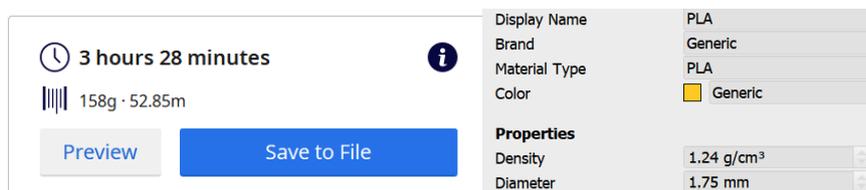


Ilustración 97: Impresión FDM Prusa

Para la impresión del prototipo de la pieza optimizada al 62% se busca un nivel de detalle elevado, con el objetivo de analizar exhaustivamente su geometría de cara a su fabricación metálica. Para ello se usará la impresora HP 580 con tecnología Multi Jet Fusion (MJF). Para el tratado de la pieza previo a la impresión en polvo usaremos el programa Preform. Al igual que Ultimaker se trata de un programa de procesado previo a la I3D, con la diferencia de que Preform utiliza tecnologías de impresión en polvo. Exportando la geometría desde SE la posicionamos sobre la zona de trabajo y definimos como material a utilizar la Poliamida 12, que es el que usaremos en el laboratorio de ICAI. Una vez preparada la pieza lanzamos su impresión.

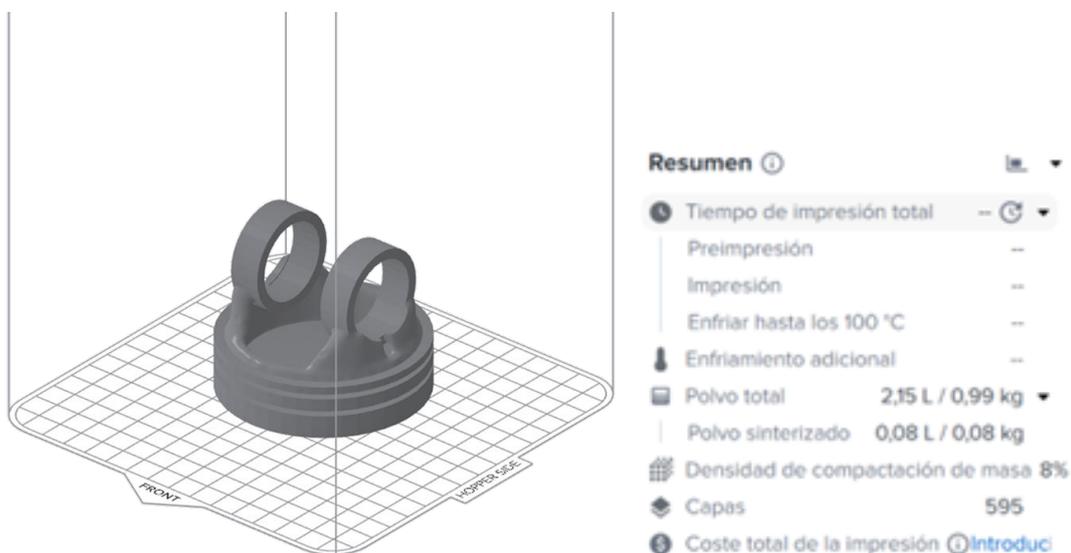


Ilustración 98: I3D HP 580 MJF

4.4.1 Prototipos Finales

Los resultados de la I3D de los prototipos son los siguientes:

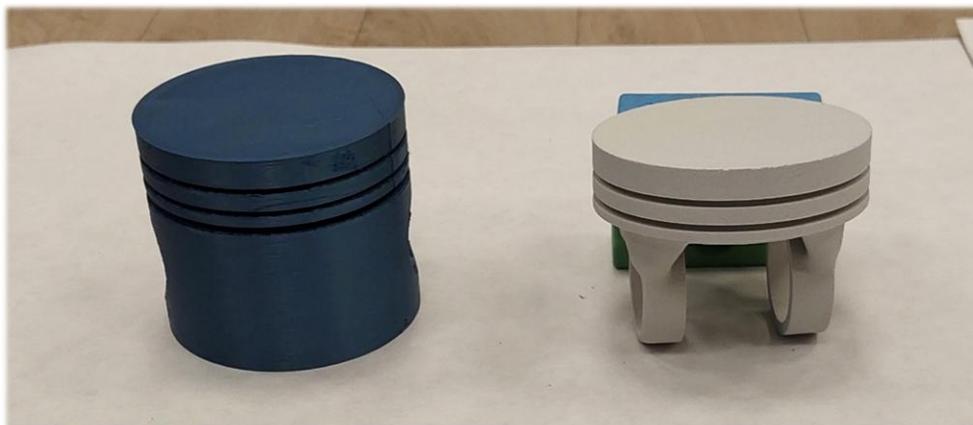


Ilustración 99: I3D Prototipos 1

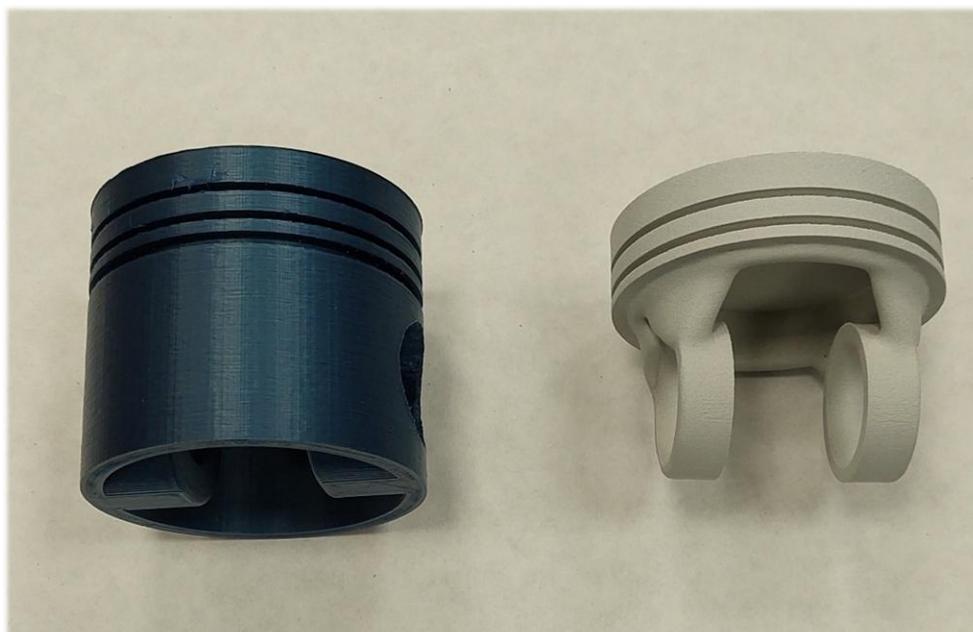


Ilustración 100: I3D Prototipos 2

5. Análisis de Resultados

5.1 Pieza Final 22%

El primer resultado obtenido es la geometría optimizada topológicamente al 22%. El análisis FEM de esta pieza nos muestra que aun teniendo un comportamiento ante los esfuerzos muy similar al de la pieza original, se ha conseguido reducir su masa un 22%. Además se han conservado todas aquellas superficies y partes imprescindibles para el correcto funcionamiento del pistón por lo que la pieza está preparada para el proceso final de fabricación en metal.

Para poder realizar la I3D metálica se implementará la técnica DMLS. El material elegido para su fabricación será la aleación de aluminio Al-Si10Mg. Se ha elegido este material de I3D metálica debido a sus propiedades extremadamente similares al Aluminio 4032 de la pieza original.

Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

Aluminium Al-Si10Mg

Key Features

Stiffness • Corrosion resistance • Thermal and electrical conductivity • Properties can be enhanced with heat treatments (T6)

Product Description

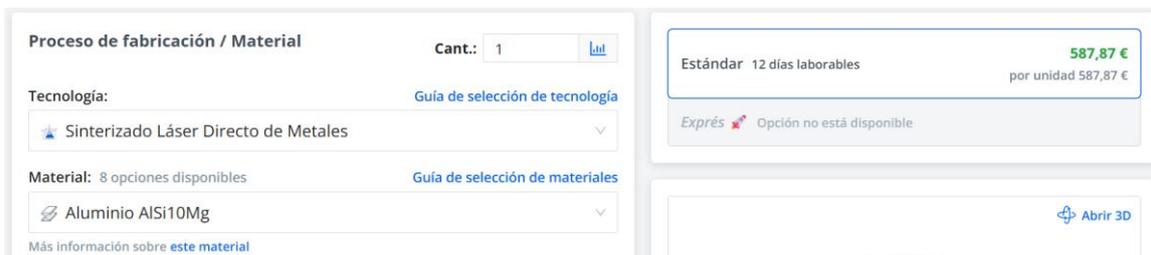
Aluminium AlSi10Mg is a lightweight alloy known for its good mechanical properties, including strength, hardness, and dynamic load-bearing capacity. It offers high corrosion resistance and good thermal and electrical conductivity, which can be enhanced with heat treatments to improve ductility and conductivity. This material is ideal for manufacturing gas-tight parts and is commonly used in general engineering, aerospace, automotive components, and lightweight designs, often substituting cast AlSi10Mg parts.

Properties*

Yield strength (xy/z)	270 / 230 MPa
Tensile strength (xy/z)	450 / 460 MPa
Elongation at break (xy/z)	10.2 / 6.3%
Electrical conductivity	25% IACS
Thermal conductivity (xy/z)	110/ 100 W/(mK)
Coefficient of thermal expansion	20*10 ⁻⁶ /K
Fatigue strength	110 MPa
Density	2.67 g/cm ³
Hardness	119 HBW
Weldability	Yes

Ilustración 101: Propiedades Al-Si10Mg (fuente Xometry)

Al no estar disponible la impresión metálica con las impresoras de la universidad se usará Xometry para obtener un presupuesto real de y estudiar los costes de fabricación. Definiendo la técnica DMLS y el material Al-Si10Mg, obtenemos el presupuesto de la pieza optimizada topológicamente al 22% para uso final.



Proceso de fabricación / Material Cant.: 1 [Límite](#)

Tecnología: [Guía de selección de tecnología](#)

Sinterizado Láser Directo de Metales

Material: 8 opciones disponibles [Guía de selección de materiales](#)

Aluminio AlSi10Mg [Más información sobre este material](#)

Estándar 12 días laborables **587,87 €**
por unidad 587,87 €

Exprés  Opción no está disponible

[Abrir 3D](#)

Ilustración 102: Presupuesto DMLS 22% (fuente Xometry)

5.2 Pieza Final 62%

El segundo resultado obtenido es la geometría optimizada topológicamente al 62%. Realizando el análisis FEM observamos que nos encontramos en el punto de esfuerzos máximo de la pieza antes de superar el límite elástico. Sin embargo, se han conservado todas aquellas superficies y partes imprescindibles para el correcto funcionamiento del pistón por lo que procederemos a la fabricación final de la pieza mediante I3D metálica.

Para poder realizar la I3D metálica se implementará la técnica DMLS. A la hora de escoger un material para su fabricación se observa que, por los altos esfuerzos que sufre la pieza y su cercanía al punto de deformación, las aleaciones de aluminio no tienen límites elásticos lo suficientemente elevados como para que la pieza funcione con seguridad. Al utilizar un material distinto al aluminio, se deberá prestar especial atención a la densidad de los materiales a elegir, ya que la baja densidad del aluminio permite la obtención de piezas ligeras y resistentes. Se descartan materiales como los aceros inoxidables con densidades por encima de 8g/cm³ que transformarían la geometría optimizada en más pesada que la pieza original.

Se plantea la opción de usar como material Titanio Grado 5 (Ti64), sin embargo, su densidad es mayor que la del aluminio, 4,4g/cm³ frente a 2,795g/cm³ por lo que se calcula la viabilidad:

$$Masa\ Original = 0,589kg , \quad DensidadAl = \frac{2,795g}{cm^3} ,$$

$$Densidad\ Ti64 = 4,4 \frac{g}{cm^3}$$

$$Calculamos\ Masa\ 62\% \ Ti64 = \frac{1}{2,795} * 589 * 0,38 * 4,4 = 0,352kg$$

$$\frac{Masa\ Ti64}{Masa\ Original} = 0,6 = 60\%$$

Por lo tanto, haciendo uso del Ti64 como material de fabricación estaríamos obteniendo una geometría optimizada topológicamente con una reducción del **40%** de masa con respecto a la pieza original.

Se elige entonces como material de fabricación el Titanio Grado 5. Ya no solo porque su densidad nos permite fabricar una pieza reduciendo considerablemente la masa de la geometría original, sino que las propiedades de este material permiten la fabricación de una pieza de alto rendimiento mecánico.

Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

Titanium Ti64 Grade 5

Alternative Designations

3.7164 / 3.7165 / Ti-6Al-4V

Key Features

Stiffness • Corrosion resistance • Low weight
• High fatigue resistance • Heat treatment is recommended to relieve stresses and increase ductility

Product Description

Titanium Ti64 Grade 5 is a Ti6Al4V alloy known for its low density, high strength, and excellent corrosion resistance. It offers higher fatigue resistance than other lightweight alloys and is lighter than superalloys and steels. Parts made from Titanium Ti64 Grade 5 can be machined, shot-peened, and polished in both as-manufactured and heat-treated states. Due to the layerwise building method, parts may exhibit anisotropy; heat treatment is recommended to reduce internal stresses and enhance ductility. Typical applications include aerospace and automotive components, as well as other industrial uses requiring low weight and high strength.

Properties*

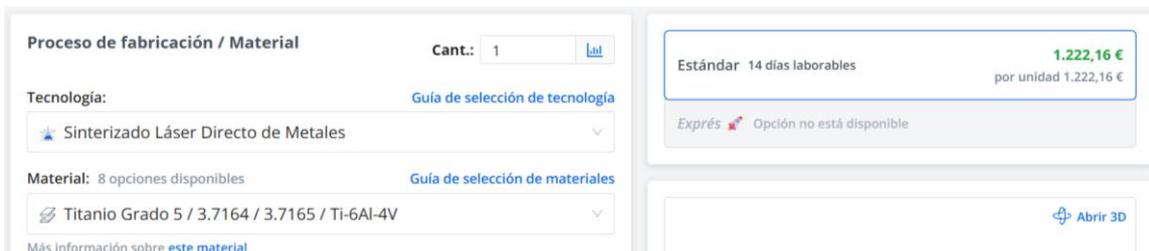
Yield strength (xy/z)	970 / 1,010 MPa
Tensile strength	1,080 MPa
Elongation at break (xy/z)	14 / 15%
Fatigue strength (at 1x10 ⁷ cycles)	595 MPa
Coefficient of thermal expansion (25 – 100 °C)	9.0 *10 ⁻⁶ /K
Density	4.4 g/cm ³
Hardness	30 - 35 HRC
Corrosion resistance	4/5

*Heat treated state, 40 µm layer thickness

Ilustración 103: Propiedades Ti64 Grado 5 (fuente Xometry)

El uso de este material permite la fabricación de un componente de uso final con un coeficiente de seguridad superior a 2 gracias a su alto límite elástico y resistencia a rotura. Además su baja densidad, alta resistencia y excelente resistencia a la corrosión permiten la fabricación de un **pistón de alto rendimiento con una reducción de masa del 40%**.

Al no estar disponible la impresión metálica con las impresoras de la universidad se usará Xometry para obtener un presupuesto real de y estudiar los costes de fabricación. Definiendo la técnica DMLS y el material Ti64 Grado 5, obtenemos el presupuesto de la pieza optimizada topológicamente al 62%, o al estar usando Titanio, al 40% para uso final.



The screenshot shows a web interface for Xometry. On the left, there are dropdown menus for 'Proceso de fabricación / Material' (set to 'Sinterizado Láser Directo de Metales') and 'Material' (set to 'Titanio Grado 5 / 3.7164 / 3.7165 / Ti-6Al-4V'). A quantity of '1' is entered. On the right, a price box shows 'Estándar 14 días laborables' for '1.222,16 €' per unit. A note below says 'Exprés Opción no está disponible'. At the bottom right, there is a button labeled 'Abrir 3D'.

Ilustración 104: Presupuesto DMLS 62% (fuente Xometry)

5.3 Costes de Prototipos

Para calcular el coste de fabricación del prototipo de la **pieza original** se hizo uso de los datos que observamos en la Ilustración 105, además de los costes de compra y amortización de la impresora en uso.

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FDM		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)		1.325
Coste mantenimiento anual (€)		133
Años de amortización		4
Amortización (h/año) - 223 días-año / 8 horas-día		1784
Precio Hora máquina-amortización (€/h)		0,24
Precio Hora venta-público (€/h)		0,24
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material modelo: filamento PLA (€/cc) (18,20€-750 cc)		0,02
Coste material soporte: filamento PLA (€/cc) (20€-750 cc)		0,00
Coste material bandeja (€/Ud.): (20€-100 uds.)		0,20
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)		30

PIEZA monica-lucia4-maxilar - Orientación HORIZONTAL		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	127,42	3,09 €/ud
Soporte modelo (cc)	0,00	0,00 €/ud
Tiempo modelo (h)	3,46	0,84 €/ud
Piezas por bandeja (ud)	1,00	0,20 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,50	15,00 €
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	19,13 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	19,13 €	

Ilustración 105: Costes I3D Prusa

Podemos observar que los costes de fabricación de este primer prototipo son muy reducidos. Esto es debido al bajo coste de la maquina y del material utilizados, que resultan en una pieza visualmente correcta pero sin un alto nivel de detalle.

Para calcular el coste de fabricación del prototipo de la **geometría optimizada** se hizo uso de los datos que observamos en la Ilustración 106, además de los costes de compra y amortización de la impresora en uso. También fue necesario calcular los cc de material de impresión utilizado, por lo que para ello usamos la densidad de la PA12, que es 1,02 g/cm³[25].

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -HP 580		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)		80.000
Coste mantenimiento anual (€)		2.000
Años de amortización		5
Días impresión/año		249
Impresiones/día		0,5
Precio impresión (€)		147,53
Precio Impresión venta-público (€)		147,53
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material: (€/kg)		141,00
Coste material: (€/cc)		0,15
Volumen Total (cc)		970,59
Densidad de Empaquetado		10,00%
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. limpieza (€/h)		20

PIEZA PISTON Optimizado al 62%		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	970,59	144,06 €/ud
Impresión	-	1475,29 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,50	10,00 €/ud
Tiempo Limpieza (h)	0,50	10,00 €/ud
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	1639,34 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	1639,34 €	

Ilustración 106: Costes HP 580 MJF

En comparación a la impresión del primer prototipo vemos una subida considerable de los costes de fabricación. Estos precios tan elevados se deben a que en el proceso de cálculo tenemos en cuenta el precio de la impresora y sus costes de amortización, y estos disparan los valores de las fórmulas a un valor total de 1639,34€. Este coste se plasma en la altísima calidad visual y geométrica del prototipo obtenido, con un elevado nivel de detalle y resolución.

No obstante, estas fórmulas se aplican a un uso general de la impresora. Teniendo en cuenta el volumen de la máquina y la densidad idónea de empaquetamiento recomendada por Hp, el coste real de impresión es de 0,7€/cm³. Por lo tanto obtenemos un coste de fabricación de este prototipo final de $\rightarrow 970,59\text{cm}^3 \cdot 0,7 = 679,42\text{€}$.

5.4 Comparativa

Estudiando los presupuestos de fabricación metálica y las propiedades de cada una de las geometrías vemos claramente que la pieza optimizada al 62% es más ventajosa. Se ha podido observar cómo los costes de fabricación unitarios de ambas piezas son tan elevados que no podrían competir económicamente con los sistemas de fabricación por lotes de pistones actual. Sin embargo, el objetivo de fabricar estas geometrías es la obtención de un pistón de alto rendimiento, a utilizar en vehículos de alta gama y sin la necesidad de producir lotes elevados de la pieza.

La geometría reducida un 22% mantiene propiedades y una resistencia al esfuerzo muy similares a la pieza original. Y por un coste de 587,87€ seremos capaces de fabricar un pistón optimizado topológicamente. Sin embargo, estaríamos obteniendo una pieza de uso final por un precio muy elevado, pero manteniendo los materiales de la pieza de origen, y sin una reducción significativa de la masa.

La geometría reducida un 62%, por otro lado, ha permitido un análisis de fabricación adicional. Debido a los elevados esfuerzos que sufre, se ha decidido fabricar la pieza en Titanio Grado 5, que aunque tiene una mayor densidad que el Aluminio, permite mantener una reducción de masa del 40%. Sin embargo, lo realmente interesante de este material es su alta resistencia, bajo peso y su excelente comportamiento frente al calor y la corrosión. El único inconveniente es el elevado coste de fabricación en este material, de 1222,16€, muy superior al de materiales como aluminios o aceros inoxidable. Sin embargo, el rediseño de esta pieza no se pretende aplicar a vehículos convencionales, sino a automóviles de alta gama y rendimiento. El objetivo de esto es reducir las fuerzas de inercia en sus motores, aumentando la potencia, reduciendo el consumo, e incrementando la vida útil y resistencia al desgaste de la pieza.

6. Conclusiones

En el desarrollo de este proyecto se han explorado las posibilidades de innovación que ofrecen el diseño generativo y la optimización topológica. Se ha demostrado su inmenso potencial como herramientas clave en el rediseño de componentes complejos sometidos a altas exigencias mecánicas, como es el caso de los pistones en un motor de combustión interna. Partiendo del pistón de un Audi A3 2.0 TDI, y aplicando estas técnicas, se ha logrado una reducción final de masa del 62% respecto al diseño convencional, manteniendo en todo momento la integridad estructural de la pieza. Gracias a estas herramientas se ha podido desarrollar una pieza funcional para su fabricación aditiva metálica haciendo uso de la tecnología DMLS (Direct Metal Laser Sintering). Tras un análisis exhaustivo de materiales, se ha tomado la decisión de usar Titanio Grado 5 como material de fabricación final. Aunque presenta una densidad superior respecto al Aluminio de la pieza original, ofrece unas propiedades de resistencia mecánica, al desgaste y a las altas temperaturas muy superiores. Esta decisión ha permitido obtener un pistón de uso final con una reducción de masa del 40%, pero con unas propiedades estructurales y funcionales muy superiores a los del pistón original.

Aunque los costes de fabricación asociados a la pieza son muy elevados, y las tecnologías de fabricación aditiva metálica aun no son competencia ante los métodos tradicionales de fabricación, el enfoque de este proyecto resulta especialmente atractivo de cara a sectores como el de los vehículos de alto rendimiento y el automovilismo deportivo, donde cobra importancia la fabricación de componentes de alto rendimiento, eficientes, ligeros y adaptados a necesidades específicas

A través de este proyecto se puede observar como la sinergia entre las nuevas tecnologías de diseño generativo y fabricación aditiva abren un inmenso abanico de posibilidades en la fabricación de piezas más ligeras y eficientes, redefiniendo los límites de la industria y potenciando su sostenibilidad e innovación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Mahle GmbH, *Pistons and engine testing*. en ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012. doi: 10.1007/978-3-8348-8662-0.
- [2] «dmls-202403181». Accedido: 22 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://met3dp.com/es/dmls-202403181/>
- [3] R. Casper y E. Sundin, «Electrification in the automotive industry: effects in remanufacturing», *J. Remanufacturing*, vol. 11, n.º 2, pp. 121-136, jul. 2021, doi: 10.1007/s13243-020-00094-8.
- [4] «las-ventas-de-coches-electricos-superaron-en-junio-por-primera-vez-a-las-de-diesel.html». Accedido: 13 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://elpais.com/economia/2023-07-19/las-ventas-de-coches-electricos-superaron-en-junio-por-primera-vez-a-las-de-diesel.html>
- [5] «Fabricación Aditiva». Accedido: 13 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.edimar.com/fabricacion-aditiva-que-es/>
- [6] «Pistón». Accedido: 13 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.hrmotor.com/que-es/piston/#:~:text=El%20pist%C3%B3n%20es%20una%20de,y%20combustible%20en%20movimiento%20lineal.>
- [7] M. A. Reyes Belmonte *et al.*, «Improving Heat Transfer and Reducing Mass in a Gasoline Piston Using Additive Manufacturing», presentado en SAE 2015 World Congress & Exhibition, abr. 2015, pp. 2015-01-0505. doi: 10.4271/2015-01-0505.
- [8] V. P. Bagul y V. K. Tripathi, «Design optimization of piston of IC engine for weight reduction», *Int. J. Eng. Sci.*, 2015.
- [9] «ODS». Accedido: 13 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.pactomundial.org/que-puedes-hacer-tu/ods/?gad_source=1&gad_campaignid=21296951996&gbraid=0AAAAA9e9AzhYtR9VQNeEkBo3zhSC2cOs1&gclid=Cj0KCQjwss3DBhC3ARIsALdgYxNw_MAJaS408pQ2wmswokpeEqCp4k0J_6dY2jisC3LxW2ZmvWoeQIaAiNcEALw_wcB
- [10] «ICE». Accedido: 21 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.britishmotorvehicles.com/blogs/a-brief-history-of-the-internal-combustion-engine>
- [11] «como-funcionan-los-motores-de-combustion-interna». Accedido: 21 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ifema.es/noticias/motor/como-funcionan-los-motores-de-combustion-interna>
- [12] «Partes MCI». Accedido: 21 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://mobilize-fs.es/blog/funcionamiento-motor-combustion-interna/>
- [13] «the-fourth-industrial-revolution-what-it-means-and-how-to-respond». Accedido: 21 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.weforum.org/stories/2016/01/the-fourth-industrial-revolution-what-it-means-and-how-to-respond/>
- [14] «what-are-industry-4-0-the-fourth-industrial-revolution-and-4ir». Accedido: 22 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mckinsey.com/featured-insights/mckinsey-explainers/what-are-industry-4-0-the-fourth-industrial-revolution-and-4ir>
- [15] V. A. Erazo-Arteaga, «El diseño, la manufactura y análisis asistido por computadora (CAD/CAM/CAE) y otras técnicas de fabricación digital en el

- desarrollo de productos en América Latina», *Inf. Tecnológica*, vol. 33, n.º 2, pp. 297-308, abr. 2022, doi: 10.4067/s0718-07642022000200297.
- [16] M. Zahera, «LA FABRICACIÓN ADITIVA, TECNOLOGÍA AVANZADA PARA EL DISEÑO Y DESARROLLO DE PRODUCTOS», 2012.
- [17] S. G. Barbieri, M. Giacomini, V. Mangeruga, y S. Mantovani, «A Design Strategy Based on Topology Optimization Techniques for an Additive Manufactured High Performance Engine Piston», *Procedia Manuf.*, vol. 11, pp. 641-649, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.162.
- [18] «additive-manufacturing». Accedido: 22 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.autodesk.com/es/solutions/additive-manufacturing>
- [19] «fdm-sla-sls-como-elegir-tecnologia-impresion-3d-adecuada». Accedido: 22 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://formlabs.com/es/blog/fdm-sla-sls-como-elegir-tecnologia-impresion-3d-adecuada/>
- [20] J. Liu *et al.*, «Current and future trends in topology optimization for additive manufacturing», *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 57, n.º 6, pp. 2457-2483, jun. 2018, doi: 10.1007/s00158-018-1994-3.
- [21] «Escáner creaform». Accedido: 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.creaform3d.com/es/about-us/press-releases/creaform-launches-next-generation-goscan-3d-portable-scanners>
- [22] «Solid Edge». Accedido: 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://solidedge.siemens.com/es/>
- [23] «HP Multi Jet Fusion». Accedido: 17 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.hp.com/es-es/printers/3d-printers/products/multi-jet-technology.html>
- [24] «Xometry». Accedido: 17 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://xometry.eu/es/sobre-nosotros/>
- [25] «pa12-tecamid-12-natural». Accedido: 21 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ensingerplastics.com/es-es/semielaborados/plastico/pa12-tecamid-12-natural#:~:text=En%20comparaci%C3%B3n%20con%20otras%20poliamidas,1%20C02%20g%2Fcm%C2%B3>.