



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES (GITI)

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO GENERATIVO DE UN COMPONENTE INDUSTRIAL Y SU FABRICACIÓN MEDIANTE IMPRESIÓN 3D Y FUNDICIÓN AL MODELO PERDIDO

Autor: Marco José Gosá Escudero

Director: Mariano Jiménez Calzado

Madrid

Julio de 2025

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

“ DISEÑO GENERATIVO DE UN COMPONENTE INDUSTRIAL Y SU
FABRICACIÓN MEDIANTE IMPRESIÓN 3D Y FUNDICIÓN AL MODELO
PERDIDO ”

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

curso académico 2024/25 es de mi autoría, original e inédito y

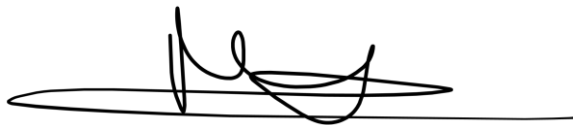
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

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.: Marco José Gosá Escudero

Fecha: 15 / 07 /2025



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Mariano Jiménez Calzado

Fecha: 15 / 07 /2025



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES (GITI)

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO GENERATIVO DE UN COMPONENTE INDUSTRIAL Y SU FABRICACIÓN MEDIANTE IMPRESIÓN 3D Y FUNDICIÓN AL MODELO PERDIDO

Autor: Marco José Gosá Escudero

Director: Mariano Jiménez Calzado

Madrid

Julio de 2025

Agradecimientos

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia: a mi padre, a mi madre y a mis hermanos, por ser mi pilar fundamental y darme fuerzas cada día a lo largo de estos cuatro años de grado. Pero, sobre todo, quiero agradecer a mis padres el gran esfuerzo que hicieron para traerme a esta excelente universidad, la cual hoy siento como mi propia casa.

También, me gustaría dar las gracias a mi tutor, Mariano Jiménez Calzado, por el estupendo tutelaje y su acompañamiento durante la elaboración de este proyecto, así como durante todo este último año de mi carrera.

DISEÑO GENERATIVO DE UN COMPONENTE INDUSTRIAL Y SU FABRICACIÓN MEDIANTE IMPRESIÓN 3D Y FUNDICIÓN AL MODELO PERDIDO

Autor: Gosá Escudero, Marco José.

Director: Jiménez Calzado, Mariano.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Palabras clave: Optimización Topológica, Fabricación aditiva, Fundición

1. Introducción

El sistema de suspensión de un vehículo de Formula Student requiere de componentes resistentes y ligeros que permitan mejorar la respuesta dinámica del vehículo en competición. En este proyecto, se ha rediseñado la mangueta trasera -parte de la que fue diseñada para el monoplaza IFS-06- aplicando criterios de optimización topológica y explorando una alternativa innovadora de fabricación: la fundición al modelo perdido a partir de un modelo impreso en 3D. Además, se estudiará la viabilidad económica y técnica de este método propuesto frente a alternativas del mercado como el mecanizado o la fabricación aditiva en metal.

2. Metodología del proyecto

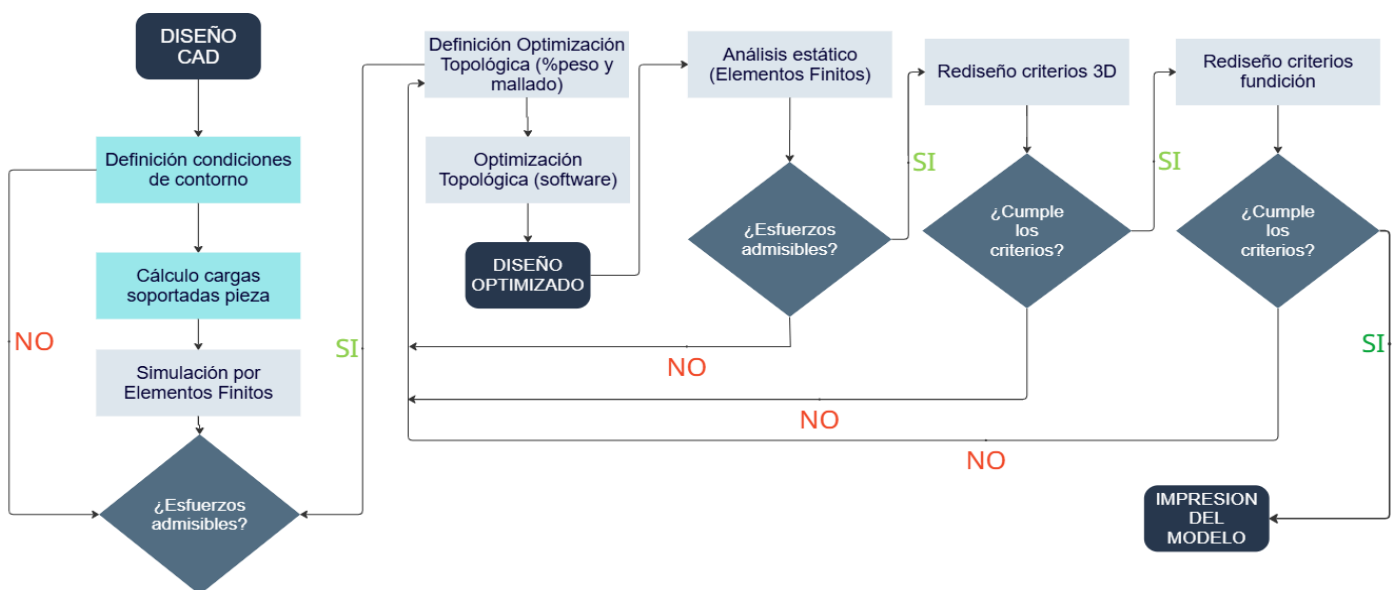


Ilustración 1: Flujo de trabajo del entorno de diseño, simulación y optimización en el proyecto (Fuente: Elaboración propia)



Ilustración 2: Flujo de trabajo del entorno de impresión 3D del modelo y fundición en el proyecto (Fuente: Elaboración propia)

3. Definición del trabajo

Primero de todo, se realizó una simulación del diseño original (sin optimizar) para comprobar los esfuerzos a los que se somete la mangueta -todas las simulaciones y optimizaciones se realizaron con el software de *Solid Edge*-. Para definir el estado de cargas soportado por la mangueta se empleó el modelo de "cuarto de coche" y el método matricial de rigidez. El esfuerzo máximo obtenido fue de 148 MPa muy inferior al límite elástico del *Aluminio 7075-T6* (503 MPa), luego se deduce que hay margen para poder optimizar.

Tras la primera simulación (comprobación) se realizó una optimización topológica, en la que se logró una reducción del 29 % de masa respecto a la mangueta original. Para comprobar que dicha reducción de peso no había comprometido la rigidez ni la funcionalidad estructural de la pieza, se realizó una segunda simulación (bajo el mismo estado de cargas que la primera). El esfuerzo máximo obtenido fue de 198 MPa de nuevo inferior al límite elástico del *Aluminio 7075-T6*. Posteriormente, se utilizó *Altair Inspire* para suavizar la geometría optimizada, garantizando un modelo viable para su fabricación.

Las geometrías optimizadas topológicamente son difíciles de fabricar mediante procesos tradicionales, como el mecanizado. Por otro lado, métodos como la fabricación aditiva en metal resultan demasiado costosos y generan un alto impacto ambiental, lo que dificulta su

justificación para la producción de prototipos. En este contexto surge como alternativa la impresión de un modelo en 3D para fundición al modelo perdido.

Durante la fase de fabricación se realizaron varias iteraciones de impresión para posteriormente poder evaluar las distintas tecnologías (FDM y SLA), impresoras (DT600, Flashforge y Form 3L) y filamentos (PLA y filamentos calcinables). Además, se rediseñó el modelo de la mangueta optimizada bajo los criterios de fundición -sobreespesores, integración del sistema de colada y el factor de escala- antes de empezar con la etapa de fundición.

4. Resultados



Ilustración 3: Resultados de la mangueta final obtenida tras la fundición al modelo perdido (Fuente: Elaboración propia)

Los resultados obtenidos durante el proceso de fundición fueron especialmente satisfactorios. La pieza final presenta muchos menos errores y defectos en comparación a proyectos anteriores, tras haber incorporado nuevas ideas y mejoras propuestas en dichos trabajos.

5. Conclusiones

Por último, se realizó un análisis técnico-económico del proceso completo. Se compararon los costes de la impresión 3D de un modelo para fundición al modelo perdido frente a la impresión 3D metálica (DMLS) y el mecanizado.

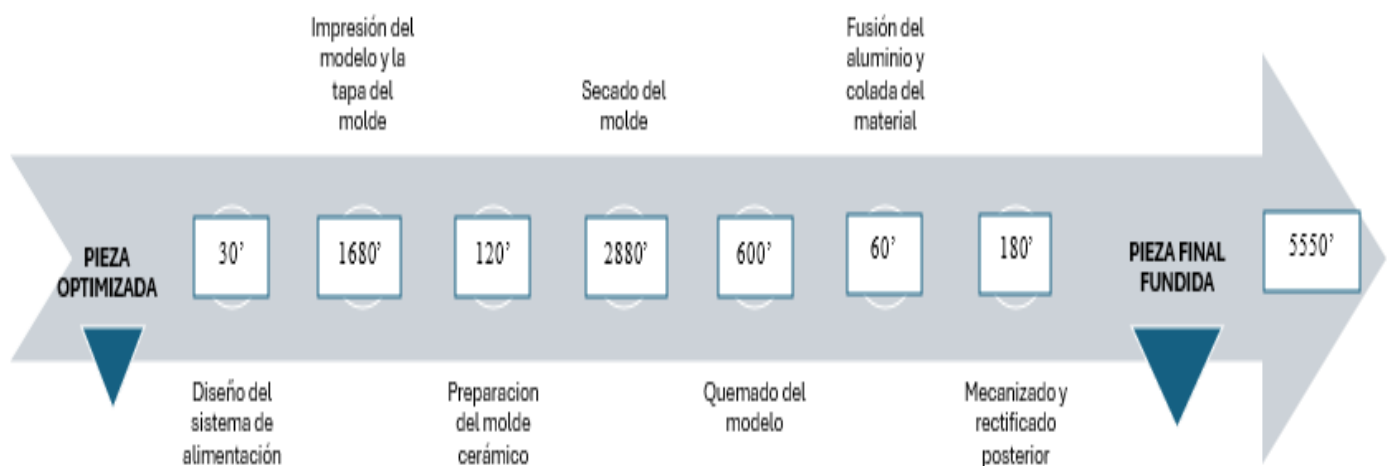
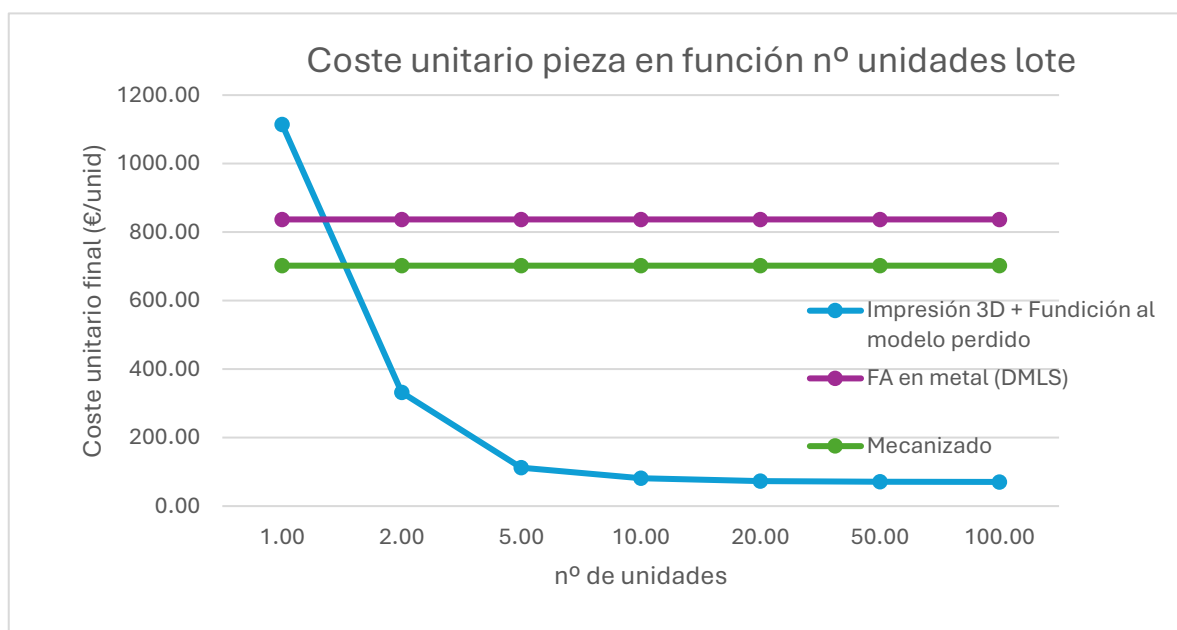


Ilustración 4: Diagrama de flujo que representa las distintas fases y su tiempo para el proceso de fabricación de fundición al modelo 3D perdido (Fuente: Elaboración propia)



Gráfica 1: Comparativa del coste unitario por pieza en función nº piezas fabricadas en el lote, entre la fabricación aditiva en metal y la impresión de modelo 3D para fundición al modelo perdido (Fuente: Elaboración propia)

Concluyendo que la fundición al modelo perdido es una alternativa rentable económicamente si se compara con la fabricación aditiva en metal (DMLS) y el mecanizado. Y que, además, los tiempos de fabricación, de acuerdo con las fases planteadas son cortos respecto a las alternativas del mercado.

GENERATIVE DESIGN OF AN INDUSTRIAL COMPONENT AND ITS MANUFACTURING USING 3D PRINTING AND LOST-MODEL CASTING

Author: Gosá Escudero, Marco José.

Supervisor: Jiménez Calzado, Mariano.

Collaborating Entity: ICAI -Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

Key words: Topology Optimization, Additive Manufacturing, Casting

1. Introduction

The suspension system of a competition vehicle, such as those used in Formula Student, requires strong and lightweight components that enhance the vehicle's dynamic response. One of the key elements in the suspension system is the upright. In this project, the rear upright designed for the IFS-06 has been redesigned using topology optimization criteria, while exploring an innovative manufacturing alternative: investment casting from a 3D printed model. In addition, the economic and technical feasibility of the proposed method is evaluated in comparison to market alternatives such as machining or metal additive manufacturing.

2. Work methodology

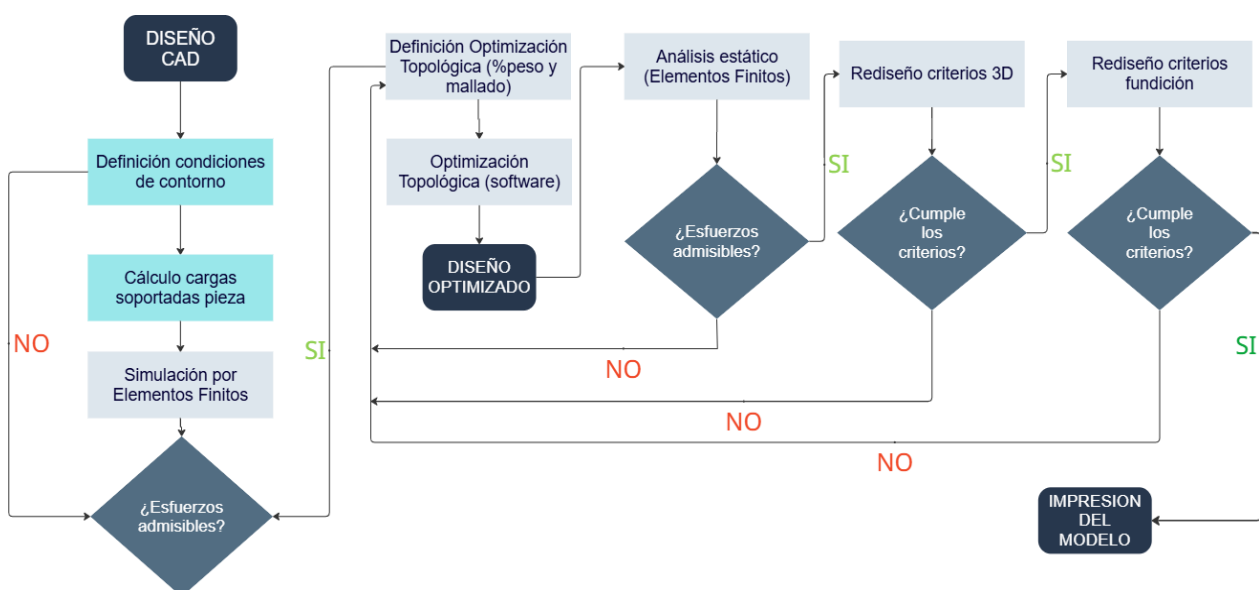


Ilustración 5: Workflow of the design, simulation, and optimization environment in the project (Source: Own elaboration)



Ilustración 6: Workflow of the 3D printing and casting environment in the project (Source: Own elaboration)

3. Scope of the work

First, a simulation of the original (non-optimized) design was performed to analyze the stress distribution on the upright — all simulations and optimizations were carried out using *Solid Edge* software. To define the load conditions acting on the upright, the "quarter-car model" and the matrix stiffness method were employed. The maximum stress obtained was 148 MPa, which is well below the yield strength of 7075-T6 Aluminum (503 MPa), indicating that there is room for optimization.

After the initial verification simulation, a topology optimization was carried out, achieving a 29% mass reduction compared to the original upright. To ensure that this weight reduction did not compromise the structural stiffness or functionality of the part, a second simulation was performed under the same load conditions. The maximum stress observed was 198 MPa, again well below the yield strength of the aluminum. Subsequently, Altair Inspire was used to smooth the optimized geometry (PolyNURBS), ensuring a viable model for manufacturing.

Topologically optimized geometries are difficult to produce using traditional methods such as machining. On the other hand, technologies like metal additive manufacturing are too expensive and have a high environmental impact, which makes it hard to justify prototype production. In this context, printing a 3D model for investment casting emerges as an attractive alternative.

During the manufacturing phase, several printing iterations were carried out to evaluate different technologies (FDM and SLA), printers (DT600, Flashforge, and Form 3L), and filaments (PLA and burnout materials). In addition, the optimized upright was redesigned according to foundry requirements — including machining allowances, integration of the gating system, and scaling factor — before starting the casting phase.

4. Results



Ilustración 7: Flowchart showing the different stages and time required for the 3D printed model investment casting process (Source: Own elaboration)

The results obtained during the casting process were particularly satisfactory. The final piece showed significantly fewer defects and errors compared to previous projects, thanks to the incorporation of new ideas and improvements suggested in earlier works.

5. Conclusions

Finally, a technical and economic analysis of the complete process was conducted. Costs, manufacturing times, and emissions were compared between the developed process and direct metal additive manufacturing (DMLS) and machining.

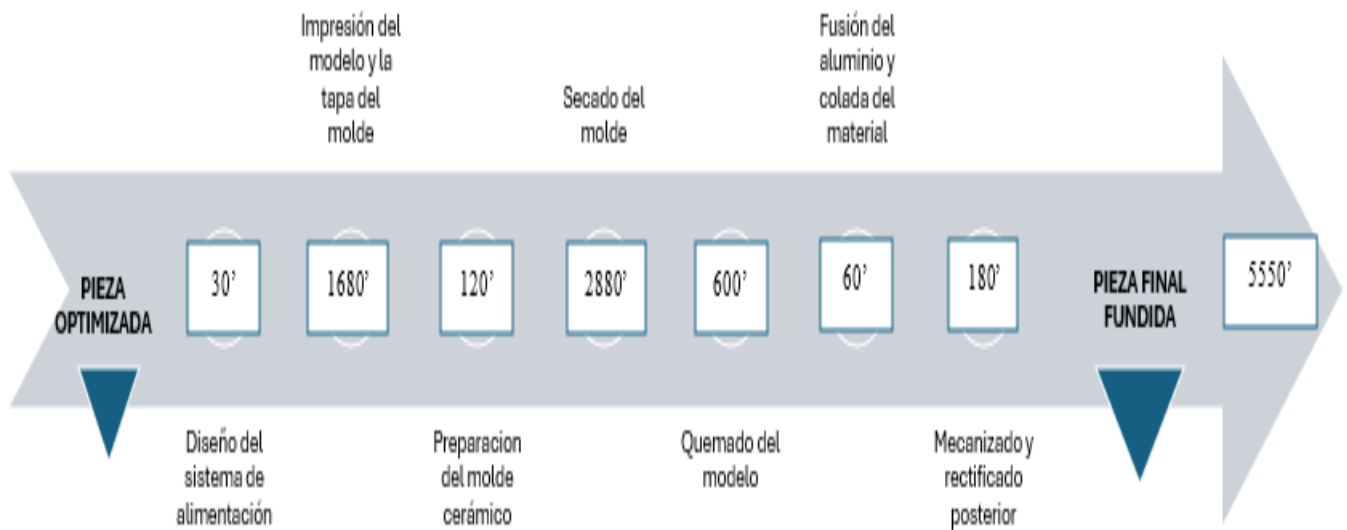
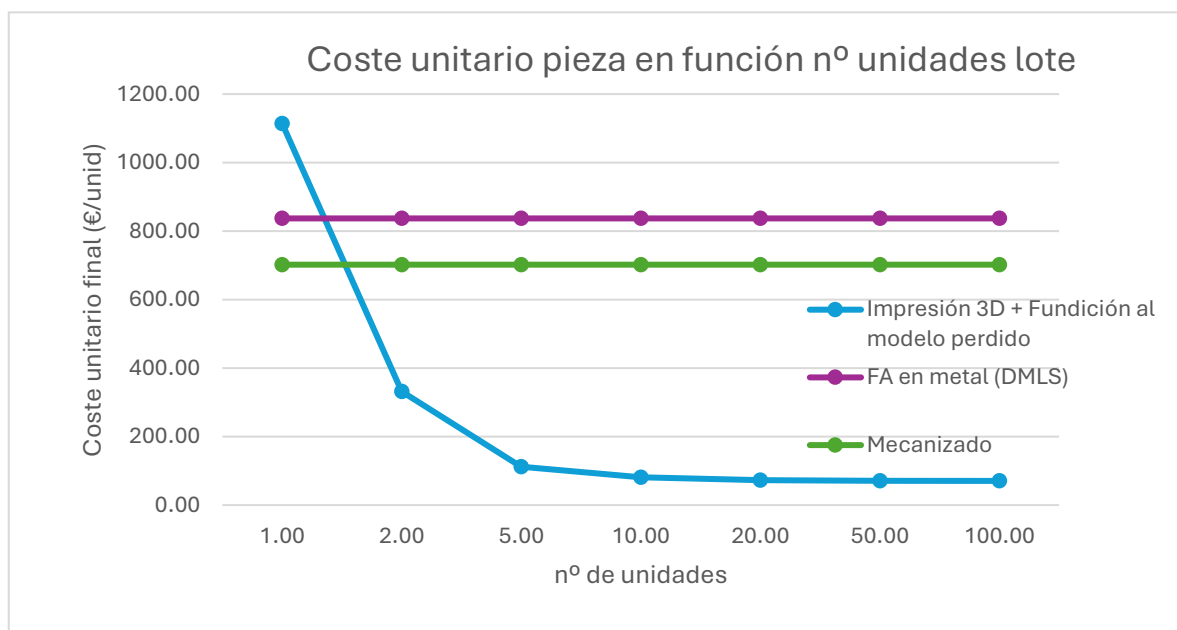


Ilustración 8: Flowchart showing the different stages and time required for the 3D printed model investment casting process (Source: Own elaboration)



Gráfica 2: Comparison of unit cost per part as a function of batch size between metal additive manufacturing and 3D printed model investment casting (Source: Own elaboration)

In conclusion, investment casting from a 3D printed model proves to be economically viable when compared with metal additive manufacturing (DMLS). Furthermore, the total production time, according to the stages defined in this project, is shorter than the alternatives of the market.

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1. Introducción	11
1.1 Motivación del proyecto.....	14
1.2 Objetivos	15
1.3 Alineación con los objetivos de desarrollo sostenible (ods).....	17
1.4 Metodología del proyecto.....	18
2. Estado del arte	19
2.1 Optimización Topológica (OT)	19
2.1.1 Historia	20
2.1.2 Flujo de trabajo	24
2.1.3 Objetivos	25
2.1.4 Ejemplo de OT	25
2.2 Fabricación Aditiva (FA)	27
2.2.1 Flujo de trabajo	28
2.2.2 Parámetros de impresión	29
2.2.3 Materiales en la impresión 3D.....	34
2.2.4 Técnicas de impresión en plástico y metal.....	38
2.3 Fundición.....	45
2.3.1 Tecnologías de fundición y variables de fabricación.....	46
2.3.2 Fundición al modelo/cera perdida.....	48
2.4 Sistema de Suspensión y Mangueta de Dirección.....	50
3. Definición del Trabajo	53
3.1 Entorno de diseño 3D.....	53
3.2 Entorno de simulación y optimización	55
3.2.1 Cálculo del estado de cargas	55
3.2.2 Calculo cargas en la pinza de freno	60
3.2.3 Primera simulación.....	62
3.2.4 Primera optimización de la mangueta	65

3.2.5	<i>Simulación de la mangueta optimizada</i>	68
3.2.6	<i>Refinamiento geometría desde Altair inspire</i>	69
3.2.7	<i>Simulación de la geometría final</i>	71
3.3	Entorno de impresión 3d	72
3.3.1	<i>Tecnologías de impresión 3d</i>	73
3.3.2	<i>Laminadores y Variables de impresión</i>	75
3.3.3	<i>Tapa molde cerámico</i>	80
3.4	Entorno de fundición	82
3.4.1	<i>Rediseño pieza para fundición</i>	82
3.4.2	<i>Fabricación del molde Cerámico</i>	83
3.4.3	<i>Quemado del modelo 3D en el horno</i>	86
3.4.4	<i>Colada del metal</i>	87
3.4.5	<i>Resultados de la fundición</i>	90
3.4.6	<i>Análisis de defectos mangueta</i>	91
4.	<i>Análisis de técnico y de costes</i>	93
4.1	Analisis de tiempos	93
4.2	Calculo costes modelo original	94
4.3	Calculo costes modelo optimizado	95
4.3.1	<i>Impresión 3D en plástico para prototipado</i>	95
4.3.2	<i>Impresión 3D en metal (DMLS) para prototipo funcional</i>	98
4.3.3	<i>Fundición al modelo en 3D perdido para prototipado funcional</i>	99
5.	<i>Conclusiones y Trabajos Futuros</i>	102
5.1	Conclusiones	102
5.2	Ideas para Trabajos futuros	105
6.	<i>Bibliografía</i>	107

ANEXO I	112
----------------	------------

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Flujo de trabajo del entorno de diseño, simulación y optimización en el proyecto (Fuente: Elaboración propia)	5
Ilustración 2: Flujo de trabajo del entorno de impresión 3D del modelo y fundición en el proyecto (Fuente: Elaboración propia)	6
Ilustración 3: Resultados de la mangueta final obtenida tras la fundición al modelo perdido (Fuente: Elaboración propia)	7
Ilustración 4: Diagrama de flujo que representa las distintas fases y su tiempo para el proceso de fabricación de fundición al modelo 3D perdido (Fuente: Elaboración propia)	8
Ilustración 5: Workflow of the design, simulation, and optimization environment in the project (Source: Own elaboration)	9
Ilustración 6: Workflow of the 3D printing and casting environment in the project (Source: Own elaboration)	10
Ilustración 7: Flowchart showing the different stages and time required for the 3D printed model investment casting process (Source: Own elaboration)	11
Ilustración 8: Flowchart showing the different stages and time required for the 3D printed model investment casting process (Source: Own elaboration)	12
Ilustración 9: Pieza del sector aeroespacial “Gooseneck Bracket” fabricada por impresión 3D en metal en una aleación de titanio Ti6Al4V (Fuente: Delteco [1])	11
Ilustración 10: Mangueta trasera del IFS-06 para optimizar en el proyecto (Fuente: ICS FS Racing Team)	16
Ilustración 11: Pasos de OT (Fuente: Formlabs)	20
Ilustración 12: Ejemplo Estructura Óptima de Michell (Fuente: ResearchGate [8])	21
Ilustración 13: Ejemplo resolución problema (Fuente: ResearchGate[9])	22
Ilustración 14: Flujo de trabajo OT (Fuente: Departamento de Diseño y Fabricación de ICAI)	24
Ilustración 15: Diseños de la Bell Crank original y optimizada topológicamente (Fuente: ReserachGate [9])	25

Ilustración 16: Comparativa en el ejemplo de OT entre el Bell Crank original y el optimizado (Fuente: ReserachGate [10]).....	26
Ilustración 17: Principio básico de la Fabricación Aditiva como deposición de capas sucesivas (Fuente: University [12] of Maryland [11])	27
Ilustración 18: Curva de Gartner 2018 sobre la adopción de tecnologías en el mercado (Fuente: 3DNatives [12]).....	28
Ilustración 19: Flujo de trabajo Fabricación Aditiva para proyectos de impresión (Fuente: Technorphosis [13]).....	29
Ilustración 20: Ejemplo de la interfaz del laminador PrusaSlicer (Fuente: Easine [15])	30
Ilustración 21: Altura de capa ejemplo del efecto del acabado (Fuente: Prusa Blog).....	31
Ilustración 22: Efecto de la velocidad de impresión en la impresión de un Benchy en una Ender3 V3 (Fuente: How To Mechatronics [18])	31
Ilustración 23: Torre de temperaturas para deducir parámetros de impresión (Fuente: All3DP [19]).....	32
Ilustración 24: Porcentaje de relleno (Fuente: 3DWorks)	33
Ilustración 25: Patrones de relleno (Fuente: 3D natives)	33
Ilustración 26: Diferencia entre termoplástico en estado filamento y en estado de pellets, ambos sólidos (Fuente: PlastikCity [22])	34
Ilustración 27: Propiedades termoplásticos más comunes de imprimir (Fuente: Markforged [23])	36
Ilustración 28: Tanque de resina impresora 3D (Fuente: 3D natives).....	37
Ilustración 29: Piezas impresas en metal (Fuente: 3DNatives)	37
Ilustración 30: Impresión con materiales compuestos (Fuente: Century3D [26])	38
Ilustración 31: Esquema resumen de la norma UNE-EN ISO/ASTM 52900 (Fuente: UNE)	39
Ilustración 32: Partes del extrusor de una impresora 3D de impresión 3D de extrusión directa (Fuente: Impresoras3D [28])	40
Ilustración 33: Comparativa de la fragilidad entre una pieza funcional impresa en SLA (gris) y otra en FDM (naranja) (Fuente: Formlabs [30]).....	41

Ilustración 34: Principio básico de funcionamiento de la tecnología de impresión SLA (Fuente: Protolabs [33]).....	42
Ilustración 35: Impresión de una cabeza con un gran nivel de detalles mediante la tecnología de SLA (Fuente: Morgen).....	43
Ilustración 36: Principio de funcionamiento de la tecnología MJF (Fuente: Weerg [35])..	44
Ilustración 37: Corazón humano y su sistema vascular impreso a color en HP MJF (Fuente: Printables).....	45
Ilustración 38: Carcasa de motor fundida por baja presión en Aluminio A380 (Fuente: Metallecas[38]).....	46
Ilustración 39: Flujo de trabajo de la técnica de fundición al modelo perdido (Fuente: i.materiqlise [40])	48
Ilustración 40: Ejemplo de una configuración de suspensión de doble trapecio y pushroad (Fuente:Asopartes[42]).....	50
Ilustración 41; Modelo de “cuarto de coche” para estudiar el comportamiento dinámico del coche (Fuente: ResearchGate [43])	51
Ilustración 42: Esquema para realizar el cálculo de transferencia de pesos en un coche de competición (Fuente: Graining [44]).....	52
Ilustración 43: Diseño original IFS-04 (Fuente: ICS FS Racing Team)	54
Ilustración 44: Propuesta de diseño integral (Elaboración Propia)	54
Ilustración 45: Barras de suspensión (Fuente: Elaboración Propia).....	56
Ilustración 46: Matriz de Rigidez (Fuente: TFM Iñigo Manrique [45]).....	58
Ilustración 47: Cotas mangueta para resolución equilibrio (Fuente: Elaboración propia) ..	62
Ilustración 48: Fuerzas sobre la mangueta (Fuente: Elaboración propia)	63
Ilustración 49: Restricciones sobre la mangueta (Fuente: Elaboración propia)	64
Ilustración 50: Mallado de la mangueta (Fuente: Elaboración propia)	64
Ilustración 51: Resultados simulación (Fuente: Elaboración propia).....	65
Ilustración 52: Regiones preservadas (Fuente: Elaboración propia)	66
Ilustración 53: Regiones preservadas por defecto (Fuente: Elaboración propia).....	67
Ilustración 54:Mangueta optimizada al 29% de reducción de masa (Fuente: Elaboración propia).....	68

Ilustración 55: Simulación de la mangueta optimizada (Fuente: Elaboración propia).....	69
Ilustración 56: Refinamiento de la geometría optimizada generando una PolyNURBS desde el Altair Inspire (Fuente: Elaboración propia).....	70
Ilustración 57: Geometría final mangueta tras conservar las regiones claves para la funcionalidad de la pieza(Fuente: Elaboración propia).....	71
Ilustración 58: Laminación primer modelo mangueta en el slicer SIMPLIFY para la DT600 (Fuente: Elaboración propia).....	76
Ilustración 59: Primera impresión DT600 con malos resultados (Fuente: Elaboración propia)	76
Ilustración 60: Laminación primer modelo mangueta en el slicer OrcaSlicer para la Flashforge Adventurer (Fuente: Elaboración propia).....	78
Ilustración 61: Resultado primera impresión Flashforge Adventurer 5M Pro (Fuente: Elaboración propia)	78
Ilustración 62: Modelo laminado PreForm (Fuente: Elaboración propia)	79
Ilustración 63: Diseño tapa molde cerámico (Fuente: Elaboración propia)	80
Ilustración 64: Tapa del molde y el modelo de impreso de la mangueta ensamblados (Fuente: Elaboración propia)	81
Ilustración 65: Comprobación ajustes impresión 3D (Fuente: Departamento Fabricación).....	82
Ilustración 66: Rediseño modelo mangueta previo a la impresión (Fuente: Elaboración propia).....	83
Ilustración 67: Preparación del molde cerámico con la jaula y el modelo impreso en 3D (Fuente: Elaboración propia).....	84
Ilustración 68: Preparación del revestimiento cerámico para ser vertido en el molde (Fuente: Elaboración propia)	85
Ilustración 69: Molde cerámico con el revestimiento vertido sobre la jaula (Fuente: Elaboración propia)	85
Ilustración 70: Molde en el horno y los restos de plástico presentes al retirarlo (Fuente: Elaboración propia)	87
Ilustración 71: Explicación del sistema de alimentación y el canal de colada (Fuente: Elaboración propia)	88

Ilustración 72: Momento de la colada del metal (Fuente: Elaboración propia)	90
Ilustración 73: Resultado final de la fundición de la mangueta por la técnica de modelo 3D perdido (Fuente: Elaboración propia).....	90
Ilustración 74: Porosidades externas en el anillo de la mangueta (Fuente: Elaboración propia)	91
Ilustración 75: Llenado incompleto en la zona de anclaje de las pinzas de freno (Fuente: Elaboración propia)	92
Ilustración 76: Presupuesto del modelo original mecanizado(Fuente: Xometry)	95
Ilustración 77: Presupuesto de impresión 3D en metal (Fuente: Xometry)	98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comparativa sobre tecnologías de FA en metal y ejemplos de impresoras (Fuente: Elaboración propia)	12
Tabla 2: Comparativa de las diferentes tecnologías de FA en metal, así como sus ventajas y desventajas (Fuente: ResearchGate [3])	13
Tabla 3: Ventajas de la OT que justifican su uso e implementación en piezas (Fuente: Elaboración propia)	20
Tabla 4: Comparativa de las tecnologías de fundición (Fuente: Elaboración propia).....	47
Tabla 5: Condiciones de diseño y fabricación del modelo para fundición (Fuente: Elaboración propia)	49
Tabla 6: Coordenadas Puntos de Suspensión ISC (Elaboración Propia)	57
Tabla 7: Fuerzas en las barras de suspensión para los 4 casos dinámicos (Fuente: TFM MANRIQUE)	58
Tabla 8: Vectores unitarios de la dirección de las barras de suspensión (Fuente: Elaboración propia).....	59
Tabla 9: Fuerzas resultantes para los distintos casos dinámicos (Fuente: Elaboración propia)	59
Tabla 10: Estado de cargas ficticio (Fuente: Elaboración propia).....	60
Tabla 11: Variables de primera impresión DT600 (Fuente: Elaboración propia).....	76
Tabla 12: Variables de primera impresión Flashforge Adventurer 5M Pro (Fuente: Elaboración propia)	77
Tabla 13: Variables impresión tapa molde (Fuente: Elaboración propia).....	81
Tabla 14: Temperaturas y tiempos de la secuencia de quemado del modelo 3D (Fuente: Elaboración propia)	86
Tabla 15: Costes impresión mangueta en DT600 (Fuente: Departamento fabricación ICAI)	96
Tabla 16: Costes impresión mangueta en Flashforge (Fuente Departamento fabricación ICAI).....	97

Tabla 17: Costes impresión mangueta en FORM3L (Fuente: Departamento fabricación ICAI).....	98
Tabla 18: Costes variables del proceso de fabricación de fundición al modelo 3D perdido (Fuente: Elaboración propia).....	100
Tabla 19: Costes fijos del proceso de fabricación de fundición al modelo 3D perdido (Fuente: Elaboración propia)	101

ACRÓNIMOS

OT: Optimización Topológica

FA: Fabricación Aditiva

FEM: *Finite Element Method* (Método de Elementos Finitos)

FS: Formula Student

1. INTRODUCCIÓN

La aparición de softwares de optimización topológica (OT) ha impulsado la demanda de componentes más ligeros y con un rendimiento estructural mejorado en diversos sectores, desde la automoción y defensa hasta la industria aeroespacial. En este contexto, nuevas tecnologías de producción como la fabricación aditiva (FA) en metal, han surgido y se han asentado como soluciones eficientes a esta imperiosa necesidad de la industria.

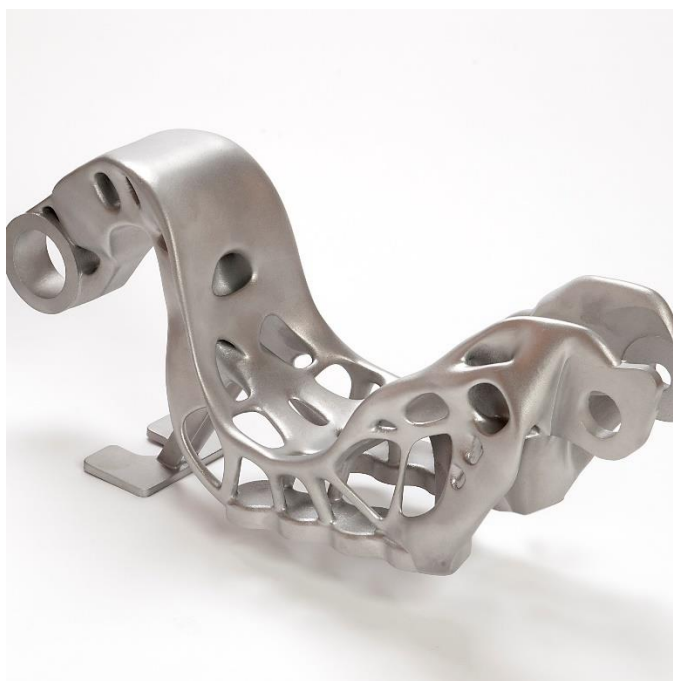


Ilustración 9: Pieza del sector aeroespacial “Gooseneck Bracket” fabricada por impresión 3D en metal en una aleación de titanio Ti6Al4V (Fuente: Delteco [1])

Esta técnica es capaz de fabricar exitosamente geometrías complejas y optimizadas que son imposibles de obtener por otros métodos de fabricación tradicionales, permitiendo así llevar a la realidad los componentes generados por los softwares de OT.

Esta tecnología conlleva grandes inversiones iniciales de capital si se quiere acceder a impresoras punteras y eficientes en el mercado, que ofrezcan ritmos y volúmenes de impresión para producción en la industria. Encontramos las siguientes tecnologías en el mercado de acuerdo con la norma *ISO/ASTM 52900* [2]:

Categoría (UNE-EN ISO/ASTM 52900)	Descripción	Ejemplos de uso en metal
Material Extrusion	Filamento fundido, como FFF/FDM	• Markforged Metal X • Desktop System 2
Powder Bed Fusion (PBF)	Fusión de lecho de polvo con láser o haz de electrones	• Xact Metal • EOS M100 • RenAM 500Q
Binder Jetting	Inyección de aglutinante sobre polvo metálico	• HP Metal Jet • ExOne
Directed Energy Deposition (DED)	Suministro de polvo o hilo con láser o haz de electrones	• LENS • BeAM
Material Jetting	Gotas de material metálico	• Digital Metal
Sheet Lamination	Laminado por ultrasonido	• Fabrisonic

Tabla 1: Comparativa sobre tecnologías de FA en metal y ejemplos de impresoras (Fuente: Elaboración propia)

Sin embargo, a pesar de su crecimiento exponencial en los últimos años, su adopción a gran escala se ve limitada por una serie limitaciones. En la *Tabla 2* se observan en la segunda columna de “Disadvantages” dichas barreras de entrada.

Technology	Advantages	Disadvantages
Material Extrusion	Widespread, inexpensive ABS plastic can be used (good structural properties and easily accessible)	Nozzle radius limited Low accuracy and speed Required constant pressure of material
Powder Bed Fusion	Relatively inexpensive Suitable for visual models and prototypes Ability to integrate technology into small scale Office sized machine Powder support structure Large material options	Relatively slow speed Lack of structural properties in materials Size limitations High power usage Finish dependent on powder grain size
Binder Jetting	Different colours High range of materials Fast process Allows two materials	Not always suitable for structural parts, due to the use of binder material High time post processing
Material Jetting	High accuracy, low waste Multiple material parts and colours under one process	Support often required Limited materials
Directed Energy Deposition	High quality, functional parts Speed often sacrificed for high accuracy	May require post processing for desired effect Limited material
Sheet Lamination	High speed Low cost Ease of material handling	Fusion processes require more research
Vat Photopolymerisation	High level of accuracy and good finish Relatively quick process Typically, large build areas	Relatively expensive High post processing time Limited material Requires support structures

Tabla 2: Comparativa de las diferentes tecnologías de FA en metal, así como sus ventajas y desventajas (Fuente: ResearchGate [3])

Además de la alta inversión inicial y las desventajas mostradas en la *Tabla 2*, la FA en metal conlleva altos costes operativos fruto de; el elevado consumo energético, la necesidad de mano de obra cualificada y de materiales especializados. Todos estas necesidades y

exigencias encarecen el coste final de la pieza y la vuelven poco competitiva en áreas como el prototipado.

Adicionalmente, el impacto medioambiental de la impresión 3D en metal es una preocupación creciente. Aunque dependerá de la aplicación final de la pieza, hay estudios que demuestran que la huella de carbono (totalidad de GEI emitidos durante todo el ciclo de vida de la pieza) de las piezas impresas en metal es mucho mayor que con otros métodos convencionales. Este problema yace en la gran demanda energética en la fase de impresión, disparando el impacto medioambiental entre unas 5 y unas 54 veces mayor (dependiendo del material) que métodos convencionales.[4]

Ante esta situación, surge la necesidad de desarrollar métodos de fabricación para piezas metálicas con geometrías complejas y optimizadas, y que principalmente sean más económicos y ecológicos que la FA en metal. Dado que, como ya se ha explicado, hay en ocasiones donde la FA en metal no está justificada ya sea por sus altos costes o por su elevado tiempo de postprocesado. Dentro de este horizonte de posibilidades, ha emergido una alternativa prometedora: el uso de la fabricación aditiva en plástico – más económica y extendida que la FA en metal- para producir piezas de plástico empleadas en el proceso de fundición al modelo perdido.

En este proyecto se estudiará la viabilidad de esta combinación de tecnologías como alternativa a la FA en metal para la producción de componentes metálicos optimizados.

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

La motivación de este proyecto es investigar sobre las capacidades y limitaciones que presenta la fabricación de modelos de fundición a través de la impresión 3D. También, se intentará descubrir las áreas/aplicaciones que esta tecnología es capaz cubrir superando los inconvenientes de otros métodos actuales como la impresión 3D en metal o la fundición a la cera perdida.

Por un lado, la impresión 3D metálica permite la fabricación de piezas optimizadas topológicamente. Pero los altos costes de inversión inicial y operativos encarecen el coste de la pieza final, y la convierten en una tecnología poco rentable en ciertas áreas, como por ejemplo el prototipado. Por otro lado, los métodos de fundición a la cera no tienen la posibilidad de obtener geometrías topológicamente optimizadas. Además, es una alternativa poco flexible al volumen de producción. Para la producción de pequeñas tiradas de piezas, donde no aplican las economías de escala, el útil (molde) de inyección de cera implica un elevado coste de amortización. [5]

En definitiva, con este proyecto se busca colaborar en el impulso de un método de fabricación emergente, que permita la fabricación de piezas metálicas topológicamente optimizadas con un menor coste e impacto medioambiental, que la impresión 3D metálica.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo final del proyecto es aplicar el proceso de fundición al modelo perdido a una mangueta trasera de una formula SAE con geometría optimizada topológica. Se muestra en la *Ilustración 10* la pieza a optimizar junto con el resto del ensamblaje de la rueda del *IFS-06*:

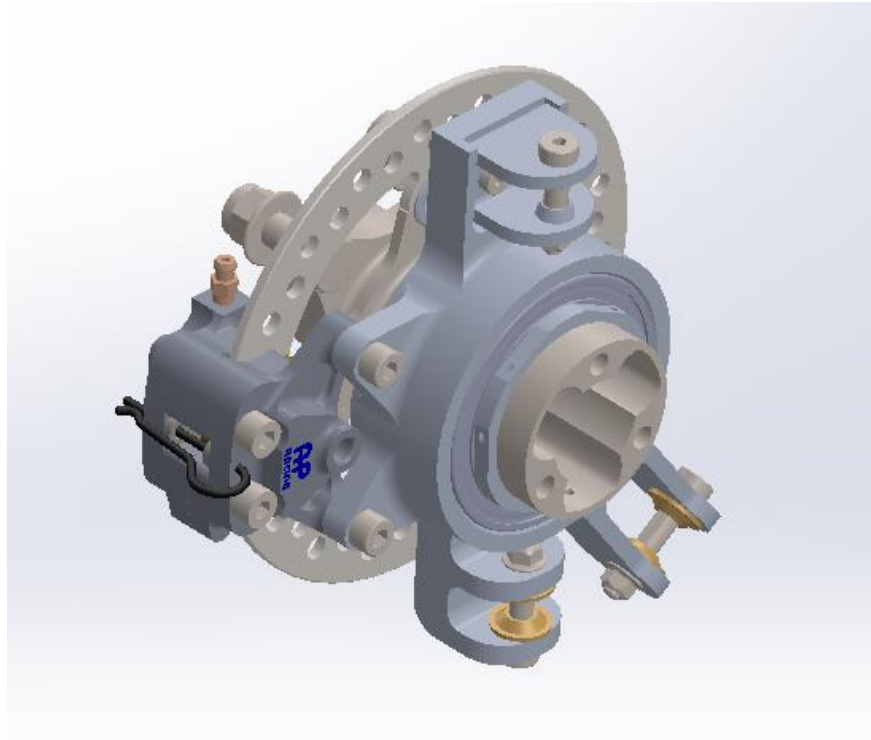


Ilustración 10: Mangueta trasera del IFS-06 para optimizar en el proyecto (Fuente: ICS FS Racing Team)

Posteriormente a su optimización se hará un análisis de los costes, tiempos y emisiones para poder compararlo con la impresión 3D en metal.

Para lograr este objetivo y obtener resultados valiosos se tendrá que:

- ✓ Seleccionar la tecnología de fabricación aditiva en plástico, que más se adecue a la fabricación de nuestro modelo. Así como el material con mejores prestaciones.
- ✓ Rediseñar la mangueta original implementando los criterios de impresión 3D y de fundición al modelo perdido.
- ✓ Diseñar un sistema de alimentación, en base a anteriores propuestas de fundición al modelo perdido, que minimice los defectos obtenidos en la pieza final.
- ✓ Repetir numerosas veces este proceso de selección y combinando distintas alternativas, hasta dar con la aquel que nos ofrezca mejores resultados

1.3 ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

Este trabajo de fin de grado se orienta hacia el desarrollo de ciertos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuestos por la ONU en 2015. En particular, con el ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructuras, mientras que de forma secundaria abordará el ODS 12: Producción y Consumo Responsables.

Objetivo primario: *Construir Infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación*



El proyecto propone un método de fabricación alternativo a la impresión 3D en metal. Cuyos beneficios sostenibles, durante la vida útil del producto, están comprometidos por las elevadas emisiones durante la fase de impresión. Este novedoso método de fabricación permite la creación de piezas complejas, optimizadas topológicamente, reduciendo el uso de material y energía. Además, esta técnica ofrece una alternativa más económica y accesible para pequeñas empresas y logra flexibilizar la fabricación en metal (abaratando la fabricación de pequeñas remesas de producto).



Objetivo Secundario: *Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles*

La optimización topológica de la mangueta, junto con la personalización del proceso de fabricación, permite minimizar el desperdicio de material, garantizando piezas adaptadas específicamente a sus necesidades y evitando la producción innecesaria de piezas estándar. Este enfoque contribuye a una producción más eficiente y sostenible en muchos sectores de la industria.

1.4 METODOLOGÍA DEL PROYECTO

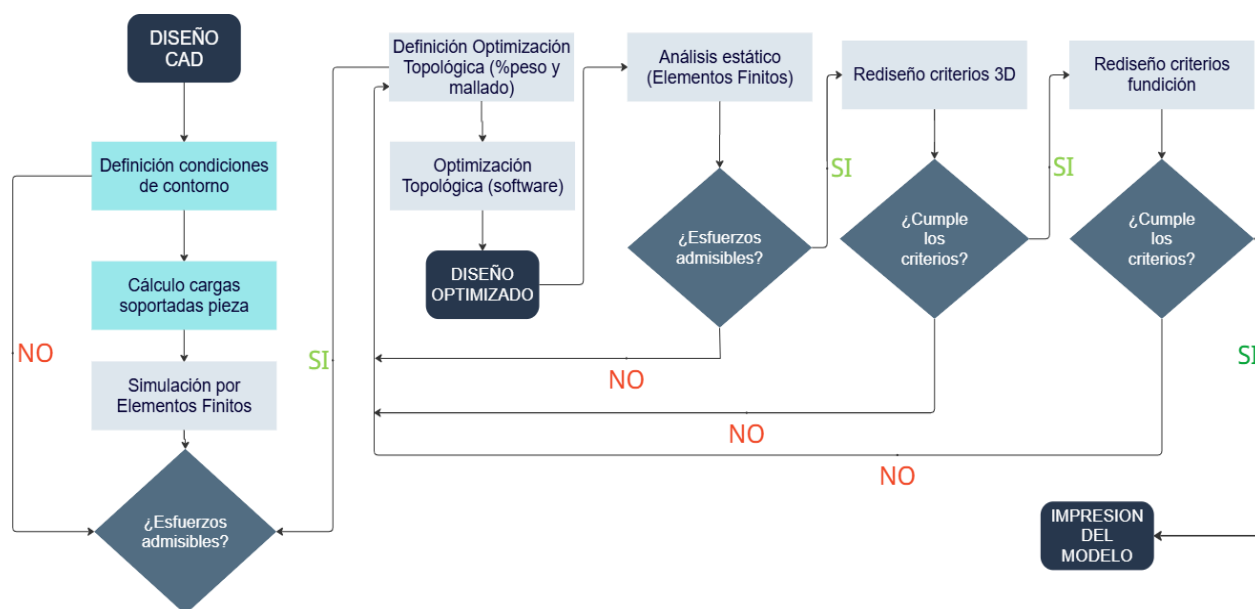


Ilustración 3: Flujo de trabajo entorno de diseño 3D para la obtención del modelo impreso final (Fuente: Elaboración propia)

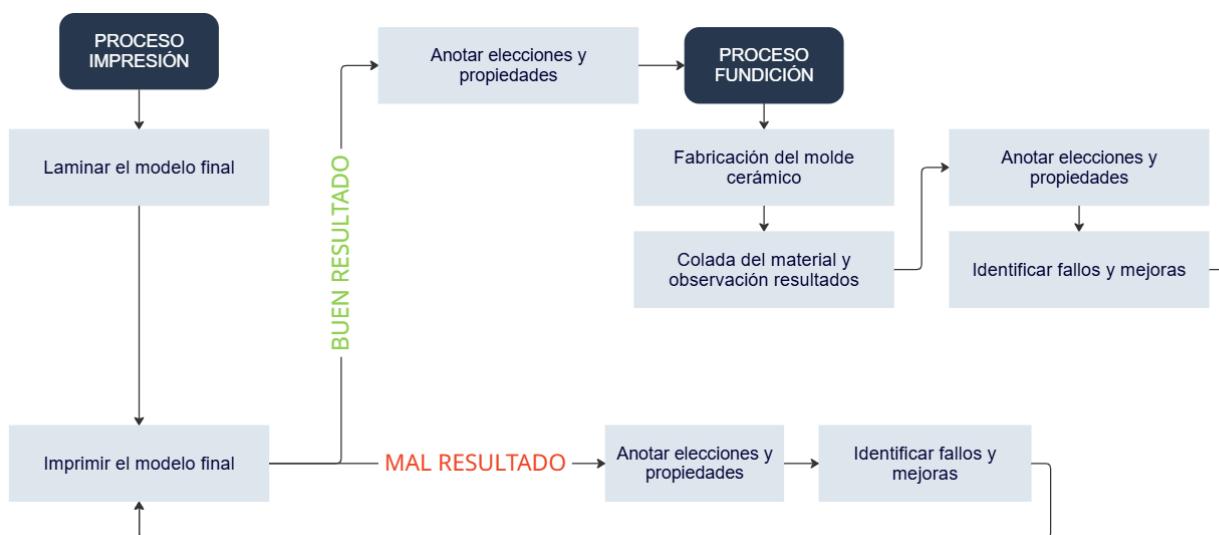


Ilustración 4: Flujo de trabajo entorno de fundición para la obtención de conclusiones y resultados (Fuente: Elaboración propia)

2. ESTADO DEL ARTE

Con este proyecto, se tratará de explicar las capacidades y limitaciones del proceso de fundición al modelo perdido con un modelo impreso en 3D. Para ello se realizará un estado del arte que permita conocer los resultados y conclusiones obtenidas en anteriores investigaciones sobre esta técnica de fabricación.

A lo largo del proyecto se abordarán 4 áreas fundamentales en base a las cuales se asentarán las bases de este estudio: Optimización topológica, Impresión 3D, Fundición y los Sistemas de Suspensión.

2.1 OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA (OT)

La **OT** es una herramienta de diseño computacional que permite la elaboración de geometrías optimizadas y más ligeras. Este método permite aligerar los diseños determinando la mejor distribución posible de material dentro de un dominio original restringido. En términos generales esta técnica responde a la pregunta: "¿Dónde se necesita material y dónde no?". [6]

La OT parte de un diseño original de la pieza con un determinado volumen. Esta pieza, para reducir su peso, se introduce en el software de OT y se somete a una serie de condiciones de contorno, cargas y restricciones de geometría -que aseguran la funcionalidad de la pieza tras la optimización-. El software analiza los esfuerzos soportados en cada punto de la pieza y una vez concluido el análisis, para una reducción de peso especificada, el software procederá a eliminar material de aquellas zonas donde sea menos necesario.

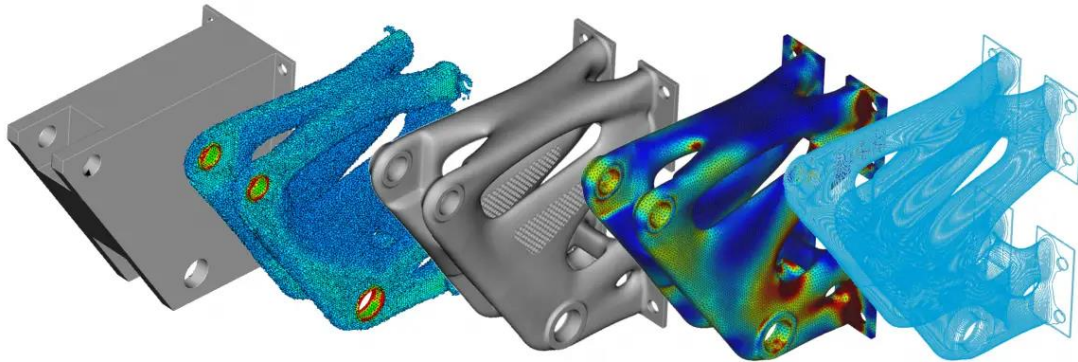


Ilustración 11: Pasos de OT (Fuente: Formlabs)

El objetivo fundamental de esta tecnología es la reducción de peso/volumen de la pieza final. Sin embargo, a partir de este objetivo se cimentan otra serie de ventajas.



Tabla 3: Ventajas de la OT que justifican su uso e implementación en piezas (Fuente: Elaboración propia)

2.1.1 Historia

El origen de la optimización estructural se remonta al trabajo del ingeniero Anthony George Michell. Michell formuló, basándose en los estudios previos de elasticidad en estructuras de Maxwell (1870), las denominadas estructuras óptimas de Michell. Este planteamiento

permite maximizar la rigidez de una estructura bajo un volumen finito, unas cargas y unos puntos de apoyo concretos. [7]

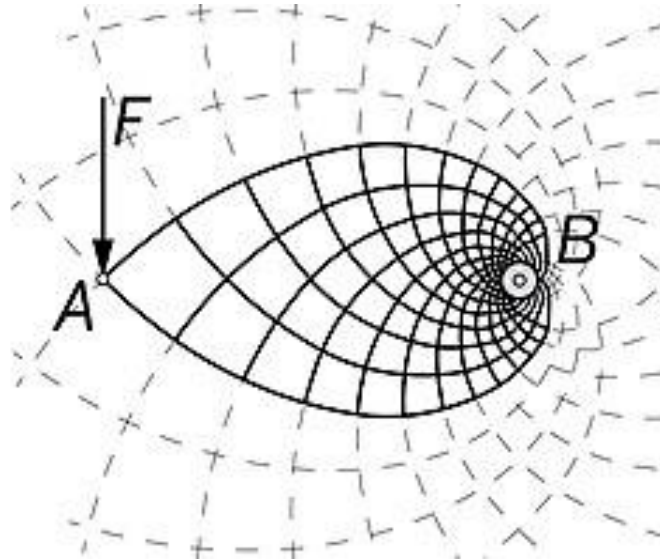


Ilustración 12: Ejemplo Estructura Óptima de Michell (Fuente: ResearchGate [8])

La revolución de la optimización topológica llegó en 1988 con la publicación del artículo “*Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method*” de Bendsoe y Kikuchi. En este trabajo se planteó la primera formulación computacional de la OT, basada en métodos numéricos.[7]

Con el auge de los ordenadores la OT evolucionó rápidamente y una de las simplificaciones clave fue el desarrollo del método SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) desarrollado por el propio Bendsoe. La idea central de este método era básicamente dividir el elemento a estudiar en una malla fija, y a cada elemento de la malla podía se le asociaban unas propiedades mecánicas en función de su exigencia estructural. Dichas propiedades se relacionaban directamente con un valor de densidad de material que podía ser un número entre 0 (vacío) y 1 (sólido) – a mayor densidad mayor rigidez-. A partir de un proceso iterativo, el algoritmo ajusta las densidades de material en cada elemento. Finalmente, las densidades intermedias, son empujadas hacia los valores extremos 0 o 1, que es igual a decir “no material” o “material” respectivamente, y esto da como resultado una estructura optimizada. [9]

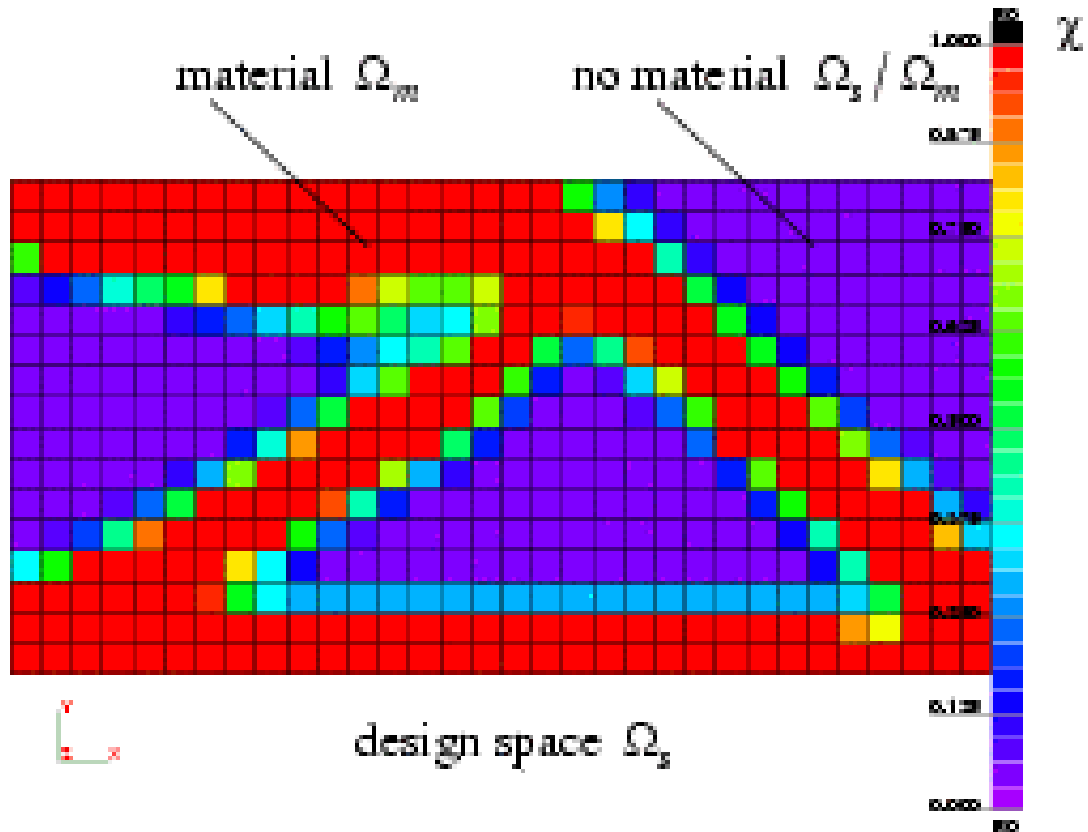


Ilustración 13: Ejemplo resolución problema (Fuente: ResearchGate[9])

Sin embargo, el método *SIMP* presentaba la gran limitación de que, aunque las estructuras fuesen matemáticamente válidas, no se podían fabricar al presentar las geometrías o fronteras difusas o geometrías poco suavizadas.

Frente a esta limitación surgieron nuevos enfoques, entre ellos el método *Level-Set*, que presenta la ventaja de generar fronteras más nítidas y suaves. Más recientemente, con el auge de la fabricación aditiva, ha cobrado fuerza la *optimización topológica basada en vóxeles*, que consiste en representar el dominio de diseño mediante una malla tridimensional de pequeños volúmenes cúbicos (vóxeles). [7]

Estos métodos de OT se han ido incorporando en los programas de diseño por ordenador. El método *SIMP* ha sido ampliamente implementado en software comercial como **SolidWorks**, **Altair Inspire**, **ANSYS** o **Fusion 360**. Mientras que el *Level-Set* ha comenzado a integrarse en plataformas más avanzadas como **Siemens NX**.

2.1.2 Flujo de trabajo

OPTIMIZACION TOPOLOGICA DEL BRAZO DE SUSPENSION

32

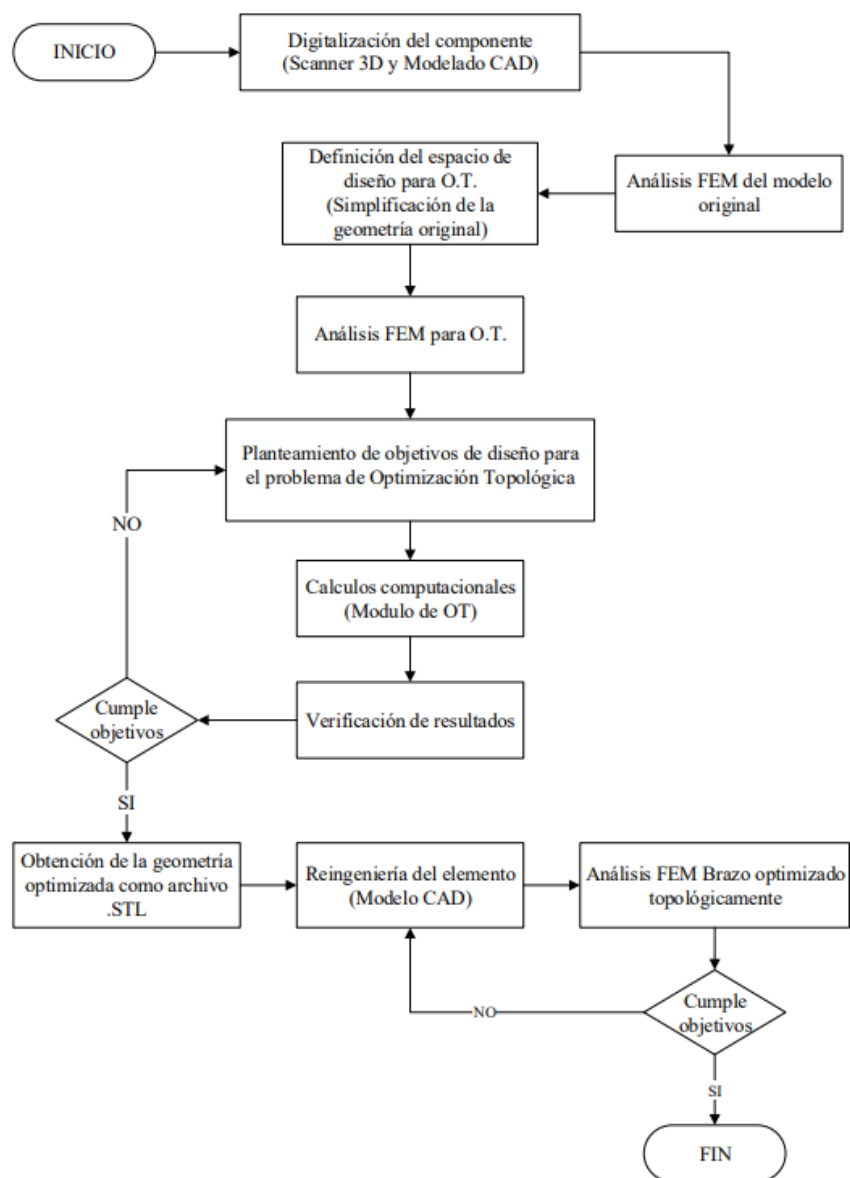


Ilustración 14: Flujo de trabajo OT (Fuente: Departamento de Diseño y Fabricación de ICAI)

2.1.3 Objetivos

Como ya se ha comentado en la *Tabla 3*, los objetivos principales son:

1. **Reducción de peso:** Al eliminar material innecesario se aligera el componente sin comprometer su resistencia estructural. Esto es crucial en sectores como el aeroespacial, donde cada gramo cuenta.
2. **Disminución de los costes:** Se logra principalmente al reducir la cantidad de material utilizado. Algo especialmente relevante en industrias como la automoción donde se realizan lotes de fabricación muy grandes y este ahorro de material resulta más crítico.
3. **Mejora del rendimiento estructural:** Las piezas optimizadas presentan mejor distribución de esfuerzos y mayor rigidez específica, aumentando así la vida útil del componente.

2.1.4 Ejemplo de OT

Se expondrán a continuación un ejemplo de OT del *Bell Crank* (balancín) de un coche del Fórmula Student (FS). [10]



Ilustración 15: Diseños de la Bell Crank original y optimizada topológicamente (Fuente: ReserachGate [9])

El *Bell Crank* es un componente clave del sistema de suspensión de un coche de Fórmula Student. Su función es transferir las fuerzas entre los distintos elementos de suspensión, como el amortiguador, la barra estabilizadora y los brazos de suspensión. Convierte cargas y movimientos lineales en angulares. Su rigidez y peso son esenciales para asegurar un comportamiento dinámico en competición.

El software empleado en este proyecto es el *SolidThinking Inspire*. La pieza se somete a dos cargas en los puntos de sujeción de la suspensión, ambas del orden de los **3000 N**, determinadas a partir de un análisis dinámico del comportamiento en la competición. Se definieron como “zonas no optimizables” los agujeros para el anclaje y conexión de la pieza. Y el material elegido fue el *Inconel 718*, una aleación de níquel de alta resistencia propia de la fabricación aditiva en metal (SLM).

La comparación entre la pieza original y la optimizada muestran una reducción de masa del 7% (134 g a 125), una reducción de la tensión máxima del 43% (650 MPa a 381 MPa) y, por último, un aumento de la rigidez estructural del 32 %.

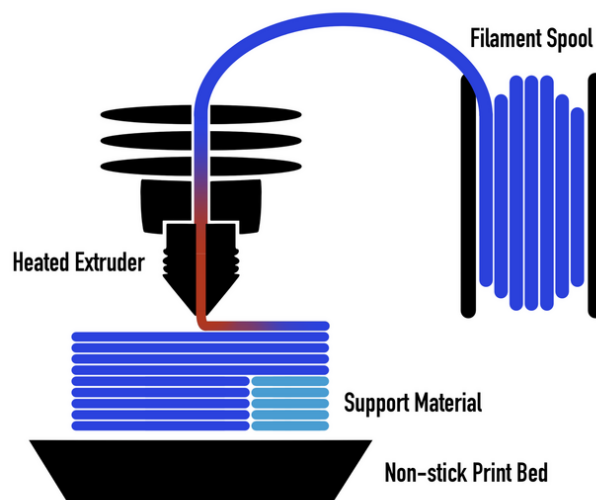
PROPERTIES	MATERIAL	MASS	REDUCTION OF MASS	MAX. YIELD STRESS	TOTAL DEFORMATION	INCREASE STIFFNESS
ORIGINAL BELL CRANK	Docol 700	134 g	-	650 MPa	0.25 mm	-
OPTIMIZED BELL CRANK	INCONEL 718	125 g	7 %	381 MPa	0.17 mm	32 %

Ilustración 16: Comparativa en el ejemplo de OT entre el Bell Crank original y el optimizado

(Fuente: ReserachGate [10])

2.2 FABRICACIÓN ADITIVA (FA)

La fabricación aditiva también conocida como impresión 3D surge a principios de los años 80. Es una técnica de fabricación basada en la deposición de material capa a capa, lo que la diferencia de otros métodos tradicionales basados en la sustracción o arranque de material como mecanizado o fundición. Este principio básico la convierte en una herramienta fundamental para el desarrollo del diseño optimizado. [11]



*Ilustración 17: Principio básico de la Fabricación Aditiva como deposición de capas sucesivas
(Fuente: University [12] of Maryland [11])*

La FA ha experimentado una notable expansión de sus aplicaciones y fronteras en las últimas décadas. La Curva Gartner para tecnologías emergentes es un modelo visual en el que se observan las 5 fases por las que atraviesan todas las nuevas tecnologías hasta alcanzar una adopción generalizada en el mercado (quinta fase). Aunque sea un estudio de hace unos años, se observa cómo, aún todavía, se sigue innovando en aplicaciones para las tecnologías de FA y como otras aplicaciones ya están completamente consolidadas en el mercado de la industria. [12]

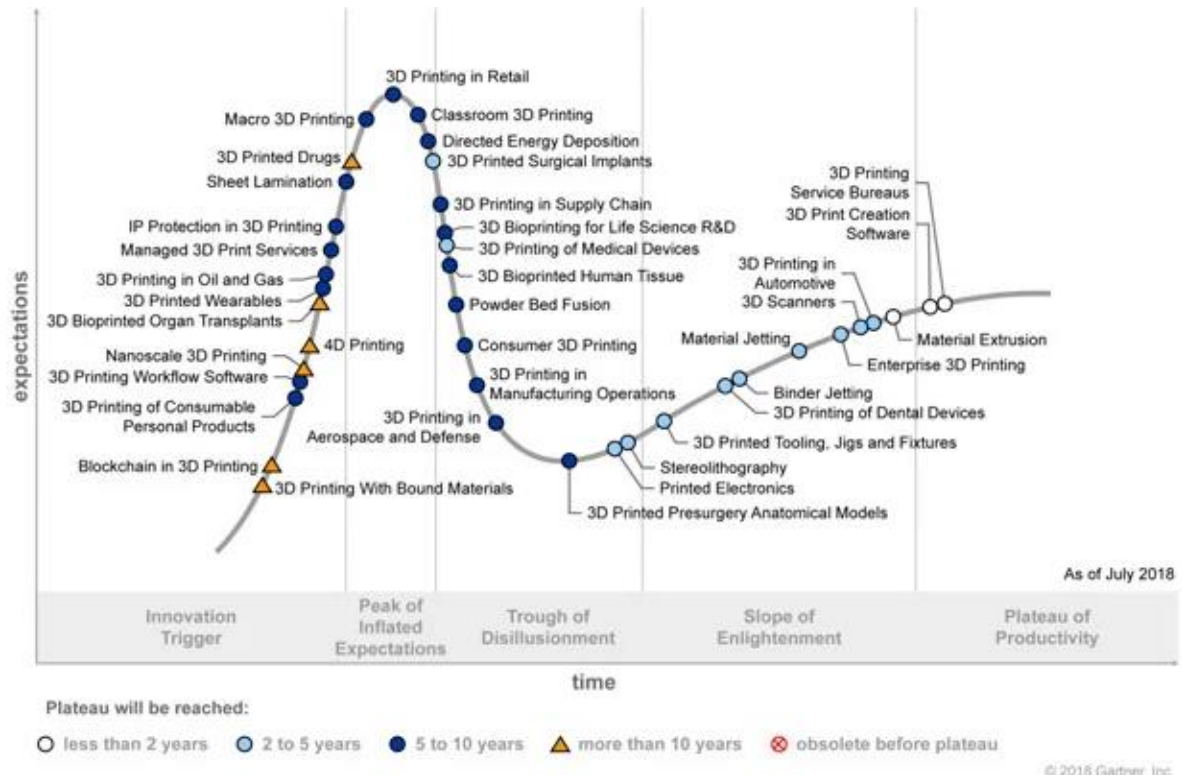
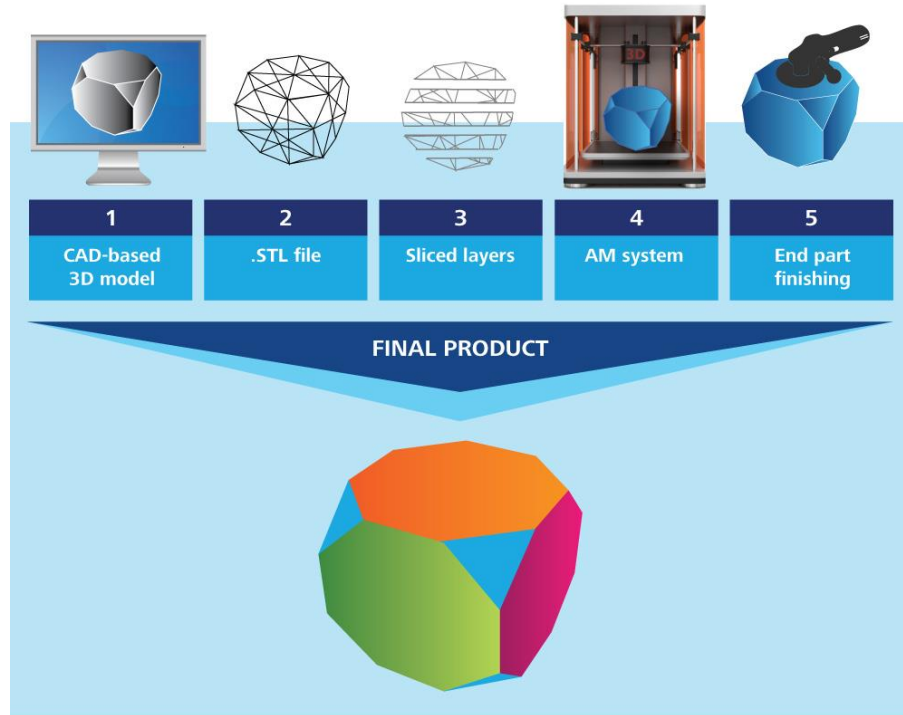


Ilustración 18: Curva de Gartner 2018 sobre la adopción de tecnologías en el mercado (Fuente: 3DNatives[12])

2.2.1 Flujo de trabajo

El flujo de trabajo habitual en un proyecto de fabricación aditiva consta de varios pasos expuestos en la Ilustración 19.

Figure 2. Additive manufacturing (AM) process flow



Graphic: Deloitte University Press | DUPress.com

Ilustración 19: Flujo de trabajo Fabricación Aditiva para proyectos de impresión (Fuente: Technorphosis [13])

Todo comienza con el diseño de un elemento desde un software de diseño 3D – en muchas ocasiones se pueden descargar archivos ya diseñados desde librerías online como *Thingiverse*, *GrabCad* o *Printables* –. Una vez diseñado el elemento se exporta a un *slicer* (laminador) en uno de los múltiples formatos de impresión 3D disponibles hoy en día (STL, 3MF o OBJ entre otros). Posteriormente, el archivo desde el propio laminador se convierte en archivo G-CODE, que básicamente son las instrucciones que sigue la impresora para fabricar la geometría exportada.

2.2.2 Parámetros de impresión

En la fabricación aditiva, los parámetros o variables de impresión son fundamentales para obtener una pieza exitosa. Estas variables son configuradas desde el *slicer* y son las pautas que se le dan al software sobre cómo se quiere imprimir la pieza. Por tanto, impactan

directamente sobre la calidad y las propiedades de la pieza final, así como sobre el tiempo y costes de impresión. [14]

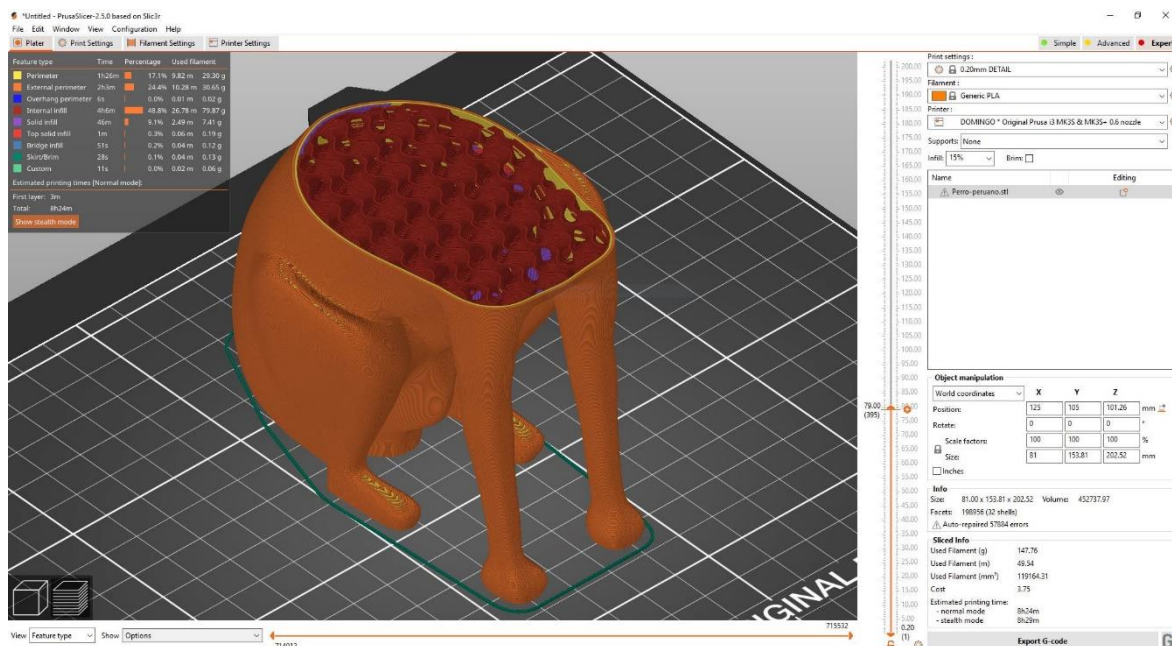


Ilustración 20: Ejemplo de la interfaz del laminador PrusaSlicer (Fuente: Easine [15])

Es importante destacar que muchas impresoras en el mercado tienen softwares de laminado propios y cerrados, lo que significa que existen parámetros de impresión optimizados e inamovibles para cada material. Por lo que, en ciertos casos no será necesario manipular manualmente las variables de impresión. Sin embargo, en tecnologías como *Filament Deposit Modeling* (FDM), principalmente, la comprensión y manipulación de estas variables es de vital importancia.

Las principales variables de impresión en FDM son:

- **Altura de capa:** define el espesor de las capas que se van depositando una encima de otra. Afecta principalmente al acabado superficial de la pieza final.[16]

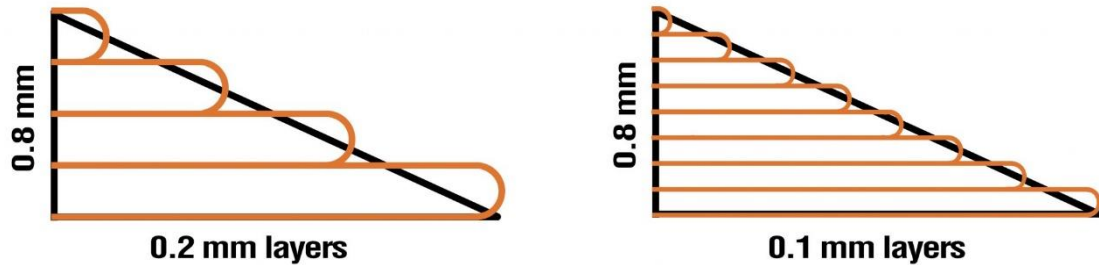


Ilustración 21: Altura de capa ejemplo del efecto del acabado (Fuente: Prusa Blog)

- **Velocidad de impresión:** define la velocidad a la que se desplaza el cabezal del extrusor cuando deposita el material de los perímetros, el relleno o la primera capa -puede variar la velocidad en función de la capa que estés depositando-. El valor de la velocidad depende fundamentalmente del tipo de movimiento de la impresora. Impresoras tipo *CoreXY* o *Delta* suelen ser más rápidas que las *Cartesianas*. [17]

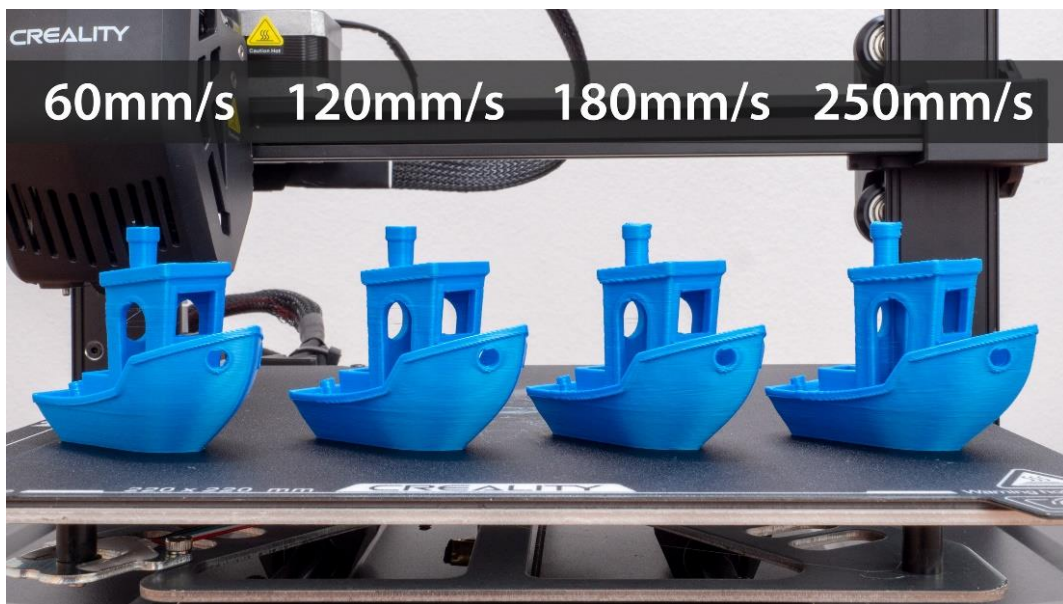


Ilustración 22: Efecto de la velocidad de impresión en las impresión de un Benchy en una Ender3 V3 (Fuente: How To Mechatronics[18])

- **Temperaturas de extrusión y cama:** definen la temperatura del *hottend* y de la cama durante la impresión. Dependerá del material que se quiera imprimir y normalmente son facilitadas por el fabricante del material. [16] La elección de la temperatura adecuada afecta principalmente al acabado final de la pieza y también permite evitar errores de adhesión de la primera capa, de *stiring* o de falta de extrusión entre otras. En caso de desconocer este valor existen impresiones que permiten sacar conclusiones sobre parámetros como la temperatura de extrusión.



Ilustración 23: Torre de temperaturas para deducir parámetros de impresión (Fuente: All3DP[19])

- **% Relleno:** el relleno en la impresión 3D cumple las funciones de soporte interior para las capas superiores y de aportar rigidez a la pieza final -a mayor porcentaje de relleno mayor soporte y rigidez-. [20]

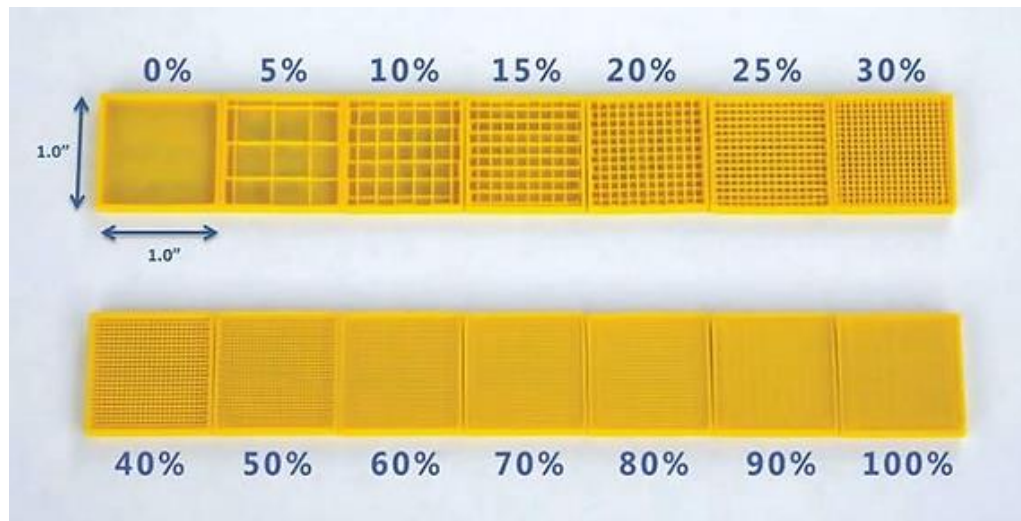


Ilustración 24: Porcentaje de relleno (Fuente: 3DWorks)

- **Patrón de Relleno:** en función del patrón de relleno que escojamos en el laminador principalmente variarán las propiedades mecánicas de la pieza. [20]

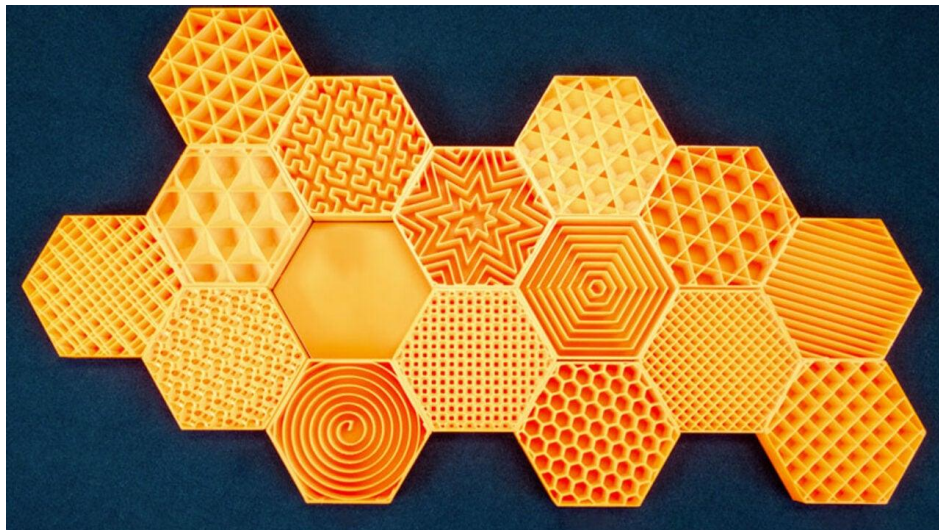


Ilustración 25: Patrones de relleno (Fuente: 3D natives)

Aunque estos parámetros sean propios de la tecnología de impresión FDM – muy relevante en nuestro proyecto- muchos de ellos se pueden extrapolar al resto de tecnologías de FA.

2.2.3 Materiales en la impresión 3D

La diversidad de materiales es uno de los grandes pilares que de la FA. Dentro de esta diversidad, el material más extendido y popular entre los usuarios son los termoplásticos, empelados en tecnologías como FDM o MJF. También encontramos otros grupos de materiales, cada vez más frecuentes, como las resinas fotopolimerizables, aleaciones metálicas para piezas funcionales y materiales compuestos para piezas funcionales reforzadas.

1. **Termoplásticos:** este tipo de plásticos tienen la característica de que se pueden fundir y solidificar numerosas veces sin perder por completo sus propiedades [21]. Normalmente el estado inicial de los termoplásticos es en forma de filamento, pellets o en polvo.



Ilustración 26: Diferencia entre termoplástico en estado filamento y en estado de pellets, ambos sólidos (Fuente:PlastikCity [22])

Dentro de este grupo los más populares son [23]:

- **PLA (Ácido poli láctico):** biodegradable, fácil de imprimir, poca resistencia térmica.
- **ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno):** más resistente que PLA e ignífugo, pero emite humos y requiere de una mayor experiencia para imprimirse.
- **PETG:** buena resistencia química y mecánica, fácil de imprimir.
- **Nylon:** excelente resistencia y flexible.
- **TPU:** flexible, usado para componentes con absorción de impactos.

Cada uno de estos materiales cuenta con distintas propiedades, por lo que, se pueden cubrir distintas necesidades a la hora de imprimir una pieza (coste, rigidez, resistencia al calor o resistencia química).

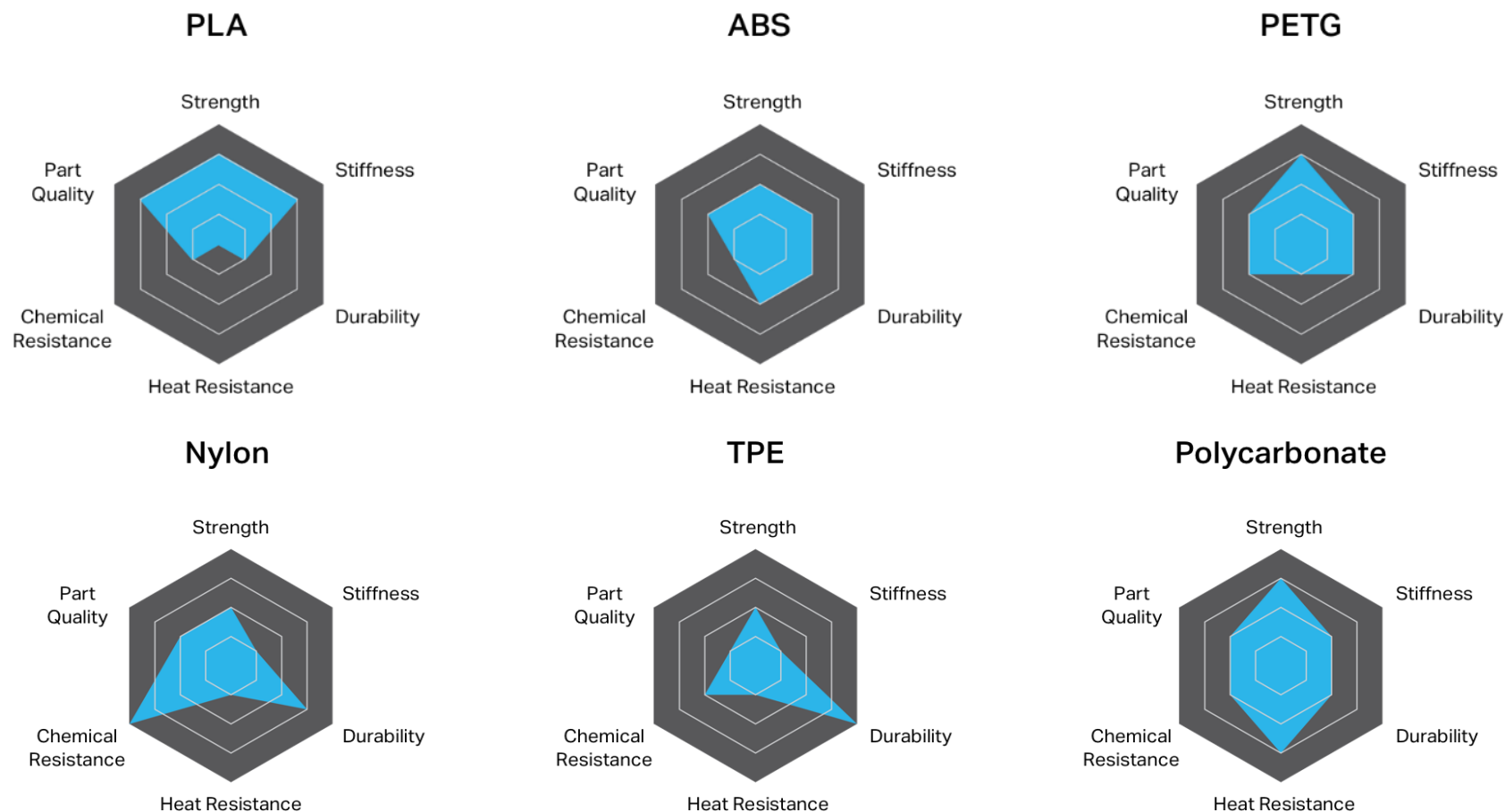


Ilustración 27: Propiedades termoplásticos más comunes de imprimir (Fuente: Markforged [23])

2. **Resinas polimerizables:** las resinas inicialmente se encuentran en estado líquido, pero, tras ser expuestas a un foco de luz o un láser a determinadas longitudes de onda se produce la solidificación de la resina [24]. Existen distintas resinas en el mercado y cada una de ellas nos ofrecerá diferentes ventajas y posibles aplicaciones. Algunas de las más destacadas son las resinas transparentes, biocompatibles, calcinables, flexibles o de resistencia a alta temperatura [25].



Ilustración 28: Tanque de resina impresora 3D (Fuente: 3D natives)

3. **Aleaciones metálicas:** parten de estado sólido, ya sea en forma de polvo o de filamento. Las aleaciones metálicas más utilizadas en la industria son el aluminio, acero, el titanio y metales preciosos como el oro.



Ilustración 29: Piezas impresas en metal (Fuente: 3DNatives)

4. **Polímeros reforzados con materiales compuestos:** tienen como objetivo mejorar las propiedades de las piezas impresas con termoplásticos. Emplean como matriz un material termoplástico (Nylon, PLA, PA, PETG, o PEEK) y se le añade un material de refuerzo (fibra de carbono, fibra de vidrio o kevlar entre otros). [26]



Ilustración 30: Impresión con materiales compuestos (Fuente: Century3D [26])

2.2.4 Técnicas de impresión en plástico y metal

De acuerdo con la norma *UNE-EN ISO/ASTM 52900* distinguimos 7 principios básico de fabricación dentro del cual se engloban cada una de las tecnologías de impresión 3D [27]:

- Fotopolimerización en tanque o cuba / SLA – DLP – CDLP
- Proyección de material / MJ – NPJ – DOD
- Proyección de aglutinante / BJ
- Fusión de lecho de polvo / SLS – EBM – MJF – SLM – DMLS
- Extrusión de material / FDM
- Deposición de energía focalizada / LENS – EBAM
- Laminado de hojas / LOM

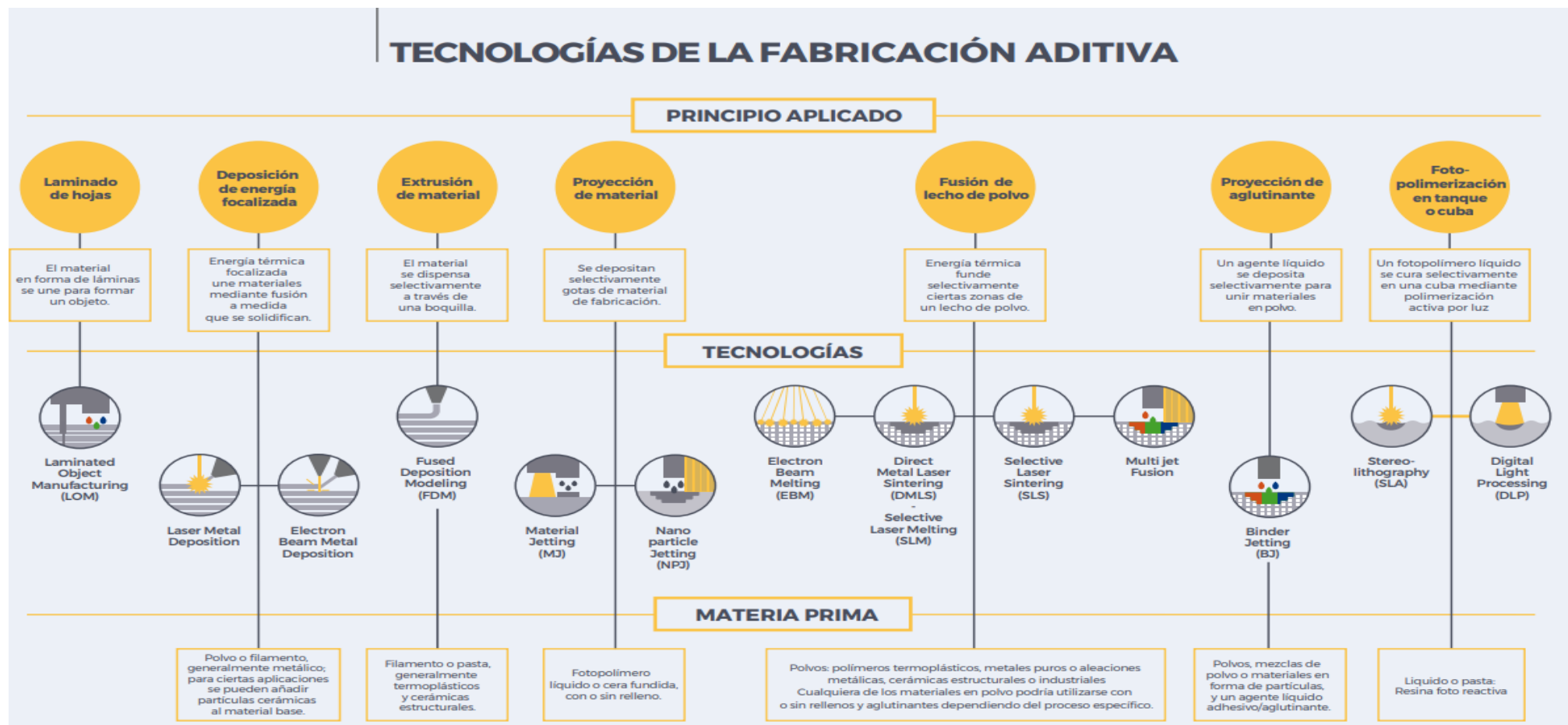


Ilustración 31: Esquema resumen de la norma UNE-EN ISO/ASTM 52900 (Fuente: UNE)

En nuestro proyecto, para imprimir nuestro modelo, nos centraremos en 3 tecnologías de todas recogidas en la norma *UNE-EN ISO/ASTM 52900*.

2.2.4.1 Fused Deposit Modeling (FDM)

La tecnología FDM es una de las técnicas de impresión 3D más extendidas y accesibles - dada la gran variedad de gamas y precios de sus impresoras-. Su **principio básico de funcionamiento** se basa en la extrusión de un filamento termoplástico (a través de una boquilla de normalmente 0.4 mm de diámetro) que se funde al pasar por el *hotend* y se va depositando capa por capa sobre una placa de impresión, siguiendo el *GCODE* enviado. A medida que el filamento se enfría, se solidifica, permitiendo construir la pieza de abajo hacia arriba.

Sistema Extrusor

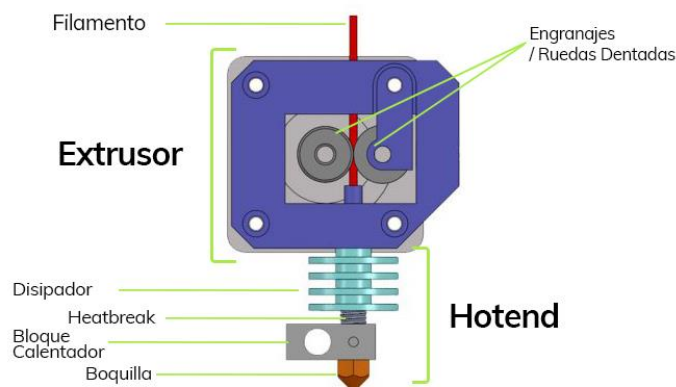


Ilustración 32: Partes del extrusor de una impresora 3D de impresión 3D de extrusión directa

(Fuente: Impresoras3D [28])

Una de las principales limitaciones de esta tecnología es la **anisotropía** mecánica que presentan las piezas obtenidas – las propiedades mecánicas del material no son las mismas en todas las direcciones-. Esto supone que las piezas impresas mediante FDM son más frágiles en unas direcciones que en otras, de ahí la complejidad de imprimir prototipos funcionales a partir de esta tecnología. [29]



Ilustración 33: Comparativa de la fragilidad entre una pieza funcional impresa en SLA (gris) y otra en FDM (naranja) (Fuente: Formlabs [30])

Respecto a la **precisión**, el FDM ofrece tolerancias típicas de ± 0.5 mm en impresoras domésticas y de hasta ± 0.05 mm para impresoras industriales. Sin embargo, su resolución está limitada por el diámetro de la boquilla y el espesor de capa, lo que impide la obtención de detalles muy finos o superficies completamente lisas – a mayor altura de capa peor precisión dimensional y rugosidad superficial del objeto impreso-. [31]

El **postprocesado** en FDM suele ser sencillo en comparación con otras tecnologías. Las operaciones más comunes incluyen el lijado, eliminación de soporte y el uso de disolventes como la acetona para suavizar superficies.

2.2.4.2 Stereolithography (SLA)

La estereolitografía (SLA) se basa en la fotopolimerización de resinas líquidas sensibles a la luz ultravioleta. El **principio básico de funcionamiento** consiste en dirigir un haz láser, con alta precisión, sobre de una cubeta rellena de resina. El láser va capa a capa recorriendo el contorno del modelo, endureciendo selectivamente la resina. [32]

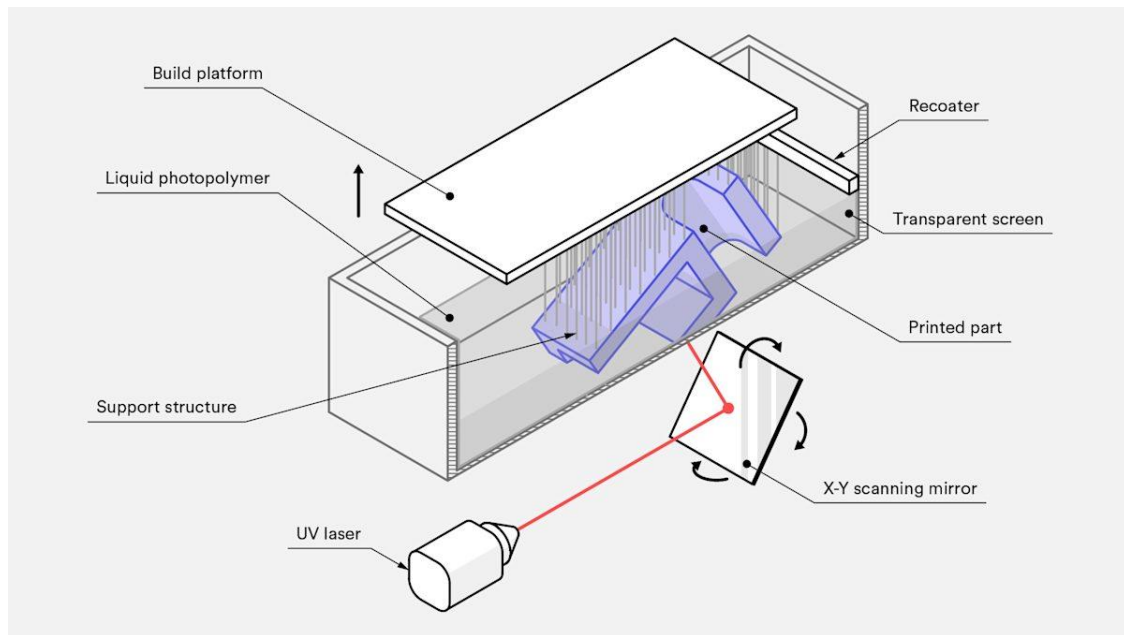


Ilustración 34: Principio básico de funcionamiento de la tecnología de impresión SLA (Fuente: Protolabs [33])

Como se observa en la *Ilustración 33* las impresiones con SLA no presentan problemas de **anisotropía**, son impresiones más homogéneas.

Por otro lado, una de las grandes ventajas de esta tecnología es la alta **precisión** y nivel de detalle que se puede alcanzar. La altura de capa llega hasta las 25 micras (0.025 mm) lo cual la convierte en una opción ideal para aplicaciones que requieren gran exactitud, como joyería, prótesis dentales, o figuras decorativas.



Ilustración 35: Impresión de una cabeza con un gran nivel de detalles mediante la tecnología de SLA (Fuente: Morgen)

El postprocesado en SLA es más complejo que en FDM [34]. Consta de varias etapas:

- 1) Una vez retirada de la impresora, se eliminan los soportes generados durante la impresión. Todas, prácticamente, de las impresiones van a requerir generar soportes es mayor medida. Porque la manera correcta de orientar las piezas en este tipo de impresoras genera bastantes voladizos.
- 2) La pieza debe lavarse en alcohol isopropílico para eliminar los restos de resina no curada atrapada en huecos y pegada a la superficie.
- 3) Curado adicional con luz UV para dotar a la resina de las propiedades mecánicas finales.
- 4) Puede ser que sea necesario lijar si se desea mejorar el acabado superficial, para eliminar la huella de los soportes sobre la pieza final.

2.2.4.3 Multi Jet Fusion (MJF)

La tecnología Multi Jet Fusion (MJF) ha sido desarrollada por HP. Al igual que en FDM la materia prima es un termoplástico (nylon), pero en este caso en forma de polvo. A diferencia

de procesos de la misma familia (Fusión de Lecho de Polvo) como el Sinterizado Selectivo por Láser (SLS), el MJF no utiliza láseres. Su **funcionamiento** se basa en unos cabezales que inyectan selectivamente unas gotas de aglutinante y posteriormente una fuente de energía térmica (lámpara infrarroja) solidifica el termoplástico de aquellas zonas en las que se han depositado las gotas. [35]

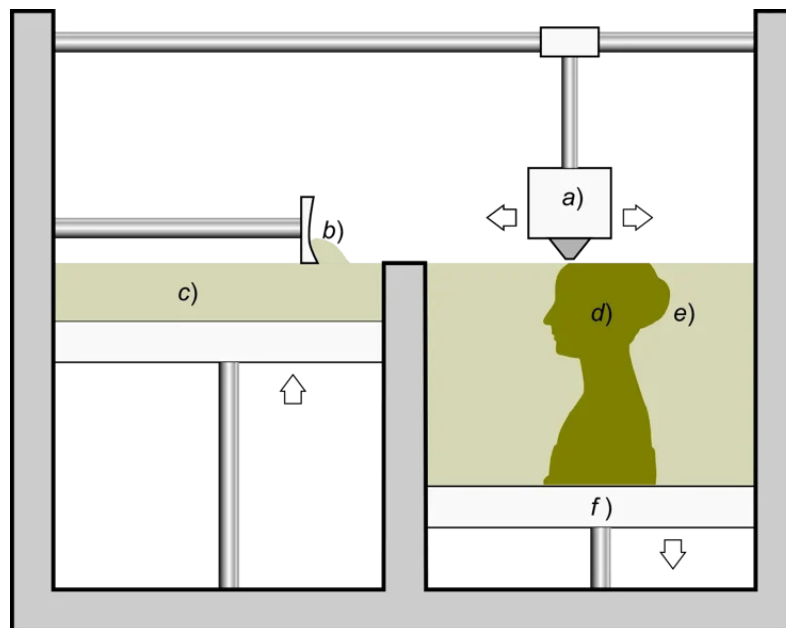


Ilustración 36: Principio de funcionamiento de la tecnología MJF (Fuente: Weerg [35])

Esta tecnología ofrece una gran **isotropía**, debido al principio de fusión que emplea. Por esta razón, se usa para fabricar piezas funcionales de moderada exigencia mecánica.[36]

En términos de **precisión**, permite fabricar piezas con tolerancias de ± 0.3 mm, aunque las superficies son ligeramente rugosas por la propia naturaleza del polvo. Aunque no aplica a nuestro proyecto, existe una versión de MJF con impresión a color que saca las piezas de la bandeja de impresión ya pintadas.

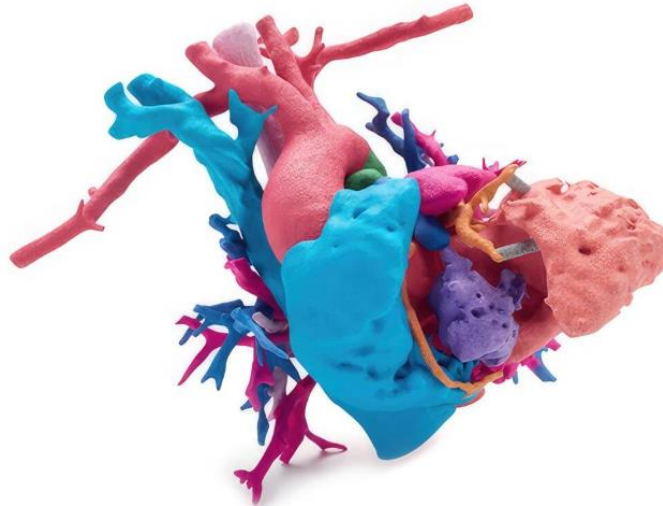


Ilustración 37: Corazón humano y su sistema vascular impreso a color en HP MJF (Fuente: Printables)

Pese a ser una tecnología muy eficiente en tiempo y coste cuando se trata de producir múltiples piezas a la vez, ya que todo el volumen de impresión se puede llenar de pieza, cuenta con la desventaja del elevado tiempo de posprocesamiento. Es necesario un **posprocesamiento** intenso para retirar el exceso de polvo de las piezas impresas y de la bandeja de impresión.

2.3 FUNDICIÓN

La fundición es un proceso de fabricación en el que una aleación metálica, ferrosa o no ferrosa, fundida se vierte o inyecta en un molde, y una vez solidificado se extrae obteniendo así la geometría del molde, cercana a la pieza final. Es una técnica milenaria, pero todavía presente en la industria en cada una de sus tecnologías o aplicaciones. [37]

Un ejemplo típico de fundición es la carcasa de un motor eléctrico. En este caso *Metallecas* fabrica carcasas de motor mediante fundición de aluminio o hierro por distintas tecnologías en función de las especificaciones del cliente.

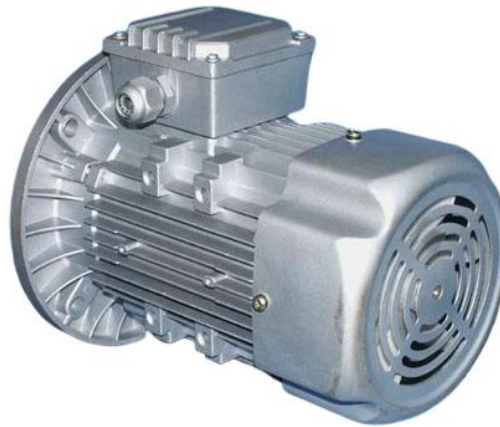


Ilustración 38: Carcasa de motor fundida por baja presión en Aluminio A380 (Fuente: Metallecas[38])

2.3.1 Tecnologías de fundición y variables de fabricación

En la *Tabla 4* se muestra una comparativa entre las diferentes tecnologías y aplicaciones de la fundición, así como algunas de sus ventajas y de sus limitaciones.

	PROCESO	MATERIALES	LOTES	ACABADOS Y LIMITACIONES
Modelo permanente	Arena	Todos (ferricos y no ferricos)	Bajos y medios	Acabados bastos
Molde desechable	Cascara	Todos	Grandes	Mejor acabado y precisión dimensional que arena Piezas <100kg
Modelo y molde desechables	Modelo a la cera perdida	Todos	Medios	Buena precisión y acabado Piezas pequeñas de <500gr
	Modelo a la espuma perdida	Todos	Medios	Buena acabado y mala presión
Molde permanente	Inyección (alta/baja presión y cámara fría/caliente)	No ferricos	Grandes	Buena precisión y acabado
	Estampada	Todos	Medios y Grandes	Buena precisión y acabado
	Centrifuga	Todos	Medios y Grandes	Buena precisión y acabado Exclusivamente para piezas de revolución

Tabla 4: Comparativa de las tecnologías de fundición (Fuente: Elaboración propia)

La elección de una técnica u otra a la hora de fabricar un lote de piezas depende principalmente de[39]:

- **Volumen de piezas del lote:** como se observa en la *Tabla 4* hay técnicas más adecuadas para pequeños tamaños de lote y otras para más grandes. Esto depende se fundamenta en la viabilidad económica del proyecto. Técnicas con altos costes fijos, normalmente ligadas a las de molde permanente, necesitarán más unidades para amortizar la fabricación de dicho molde.

- **Geometría de la pieza:** Piezas con geometría compleja, normalmente, requieren de técnicas de inyección a alta presión.
- **Material:** Algunas técnicas permiten aleaciones ferrosas y otras no. Además, hay una criba de técnicas en función de la temperatura de fusión del material a emplear - no todas las tecnologías permiten todos los materiales-.
- **Precisión dimensional:** No todas las tecnologías aseguran la misma precisión dimensional. Por ejemplo, la fundición a alta presión tiene tolerancias más ajustadas que la de arena o por gravedad.

2.3.2 Fundición al modelo/cera perdida

Esta técnica de fundición permite la obtención de piezas con una gran precisión dimensional y un buen acabado superficial. Se diferencia de otras técnicas de fundición en que el tanto el modelo como molde son desechables.

El flujo de trabajo se muestra en la *Ilustración 39*:

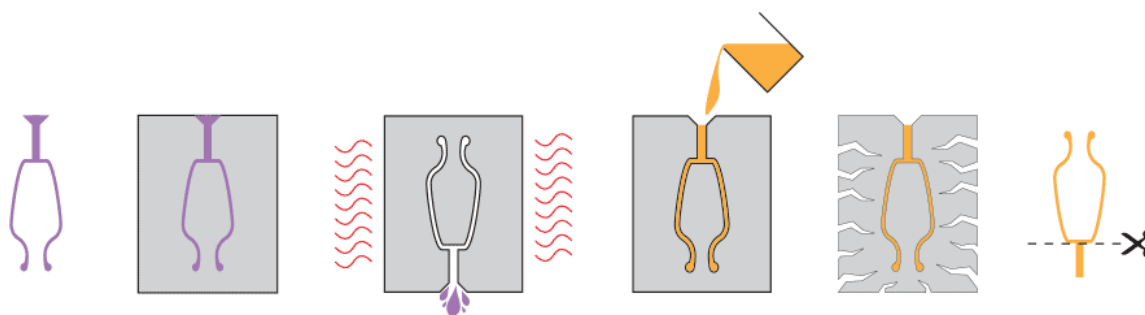


Ilustración 39: Flujo de trabajo de la técnica de fundición al modelo perdido (Fuente: i.materiqlise [40])

- 1) Se parte de la fabricación de un modelo, que trata de reproducir salvo por ligeras modificaciones la pieza final. Los modelos cumplen los siguientes criterios de diseño y fabricación:

La temperatura de fusión del material empleado debe ser más baja que la del material del molde, de tal manera que en el proceso de eliminación del modelo el molde no se dañe

Pueden contener elementos que no pertenecen a la pieza final. Pero son necesarios para el proceso fundición como bebederos o respiraderos

Las dimensiones del modelo pueden ser distintas a las de la pieza final deseada, para compensar el efecto de contracción que sufrirá el metal al enfriarse

Tabla 5: Condiciones de diseño y fabricación del modelo para fundición (Fuente: Elaboración propia)

- 2) En segundo lugar, se realiza el molde de fundición. Para ello, se introduce el modelo en un recipiente y se cubre con el material refractario (arena, yeso, cerámicas ...). Se espera hasta que se solidifique.
- 3) Después de solidificar se procede a la quema/volatilización del material del modelo. Se eleva la temperatura, en un horno, por encima de la temperatura de fusión del material del modelo, quedando únicamente el molde con la forma del modelo.
- 4) Se vierte la aleación metálica fundida sobre el molde. Tras solidificar y enfriarse, se rompe el molde liberando así la pieza
- 5) En ocasiones se requerirá una fase de posprocesamiento para eliminar los canales de colada y salidas de aire entre otras.

2.4 SISTEMA DE SUSPENSIÓN Y MANGUETA DE DIRECCIÓN

El sistema de suspensión de un vehículo tiene como finalidad principal asegurar que los neumáticos mantengan un contacto constante con el asfalto frente a las posibles irregularidades de este mismo. [41]



*Ilustración 40: Ejemplo de una configuración de suspensión de doble trapecio y pushrod
(Fuente:Asopartes[42])*

En vehículos de alto rendimiento, como los de competición, se emplean configuraciones de suspensión como la de doble trapecio con *pushrod*, mostrada en *Ilustración 40*. Este tipo de suspensión proporciona una mejor respuesta dinámica del vehículo porque permite que elementos como el amortiguador y el muelle estén fijados al chasis. Disminuyendo así la masa no suspendida del vehículo -uno de los objetivos principales de los vehículos de competición de FS-. Dentro de esta suspensión, la mangueta es el punto de conexión entre los distintos componentes del sistema (trapecios, barra de dirección), sistema de frenado (pinza de freno), y rueda (a través del buje).

Para analizar correctamente las cargas a las que se ve sometida la mangueta se va a emplear, como es habitual, el modelo de “cuarto de coche”. Este modelo simplifica el sistema a una

masa suspendida (representando parte del chasis) y una masa no suspendida (que incluye la mangueta, buje y neumático.), unidas entre sí por un muelle y un amortiguador. [43]

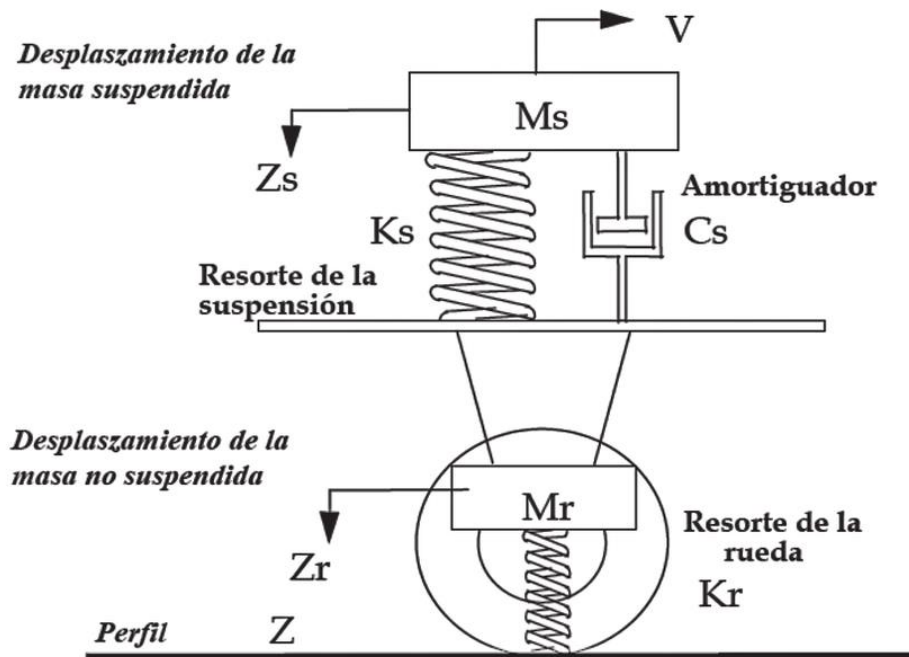


Ilustración 41; Modelo de "cuarto de coche" para estudiar el comportamiento dinámico del coche
 (Fuente: ResearchGate [43])

En el contexto de un vehículo del Formula Student, las cargas que soporta la mangueta varían en función de la situación en la que se encuentre: frenada, aceleración, paso por curva. Cada una de estas situaciones tiene una combinación de aceleración longitudinal y lateral que es conocida. Y es a partir de estas, además de conociendo ciertos parámetros vehículo (masa, la batalla o la altura del centro de gravedad), se realiza un cálculo de transferencia de pesos en las ruedas mediante balances de fuerzas y momentos.

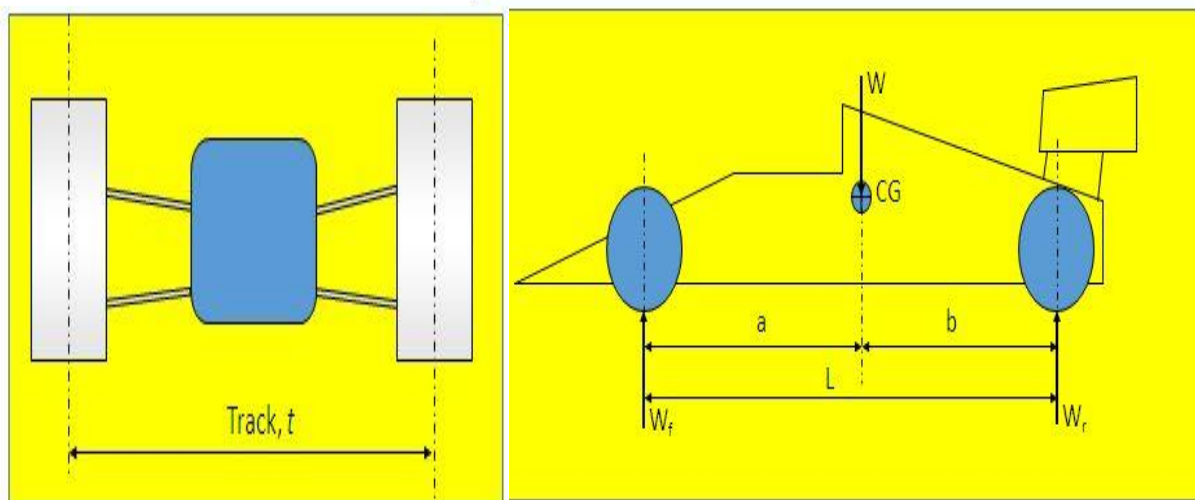


Ilustración 42: Esquema para realizar el cálculo de transferencia de pesos en un coche de competición (Fuente: Graining [44])

Una vez obtenidas la carga vertical soportada por cada neumático, se determinan las fuerzas en la huella de contacto del neumático que se quiera estudiar. Tras estos pasos, llega el punto crítico que consiste en trasladar las fuerzas en la huella del neumático a la mangueta. Para ello, existen dos enfoques: el método directo y el método inverso. [45] En nuestro caso solo se estudiará el método inverso, por convergencia con el software de Simulación y Optimización de *Solide Edge*.

3. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

3.1 ENTORNO DE DISEÑO 3D

Para el desarrollo de este proyecto, se diseñó de una mangueta de automóvil, específicamente para su aplicación en un vehículo de Formula Student.

La propuesta del año de competición 24-25 del equipo planteaba una mangueta en dos componentes: una parte principal y un enganche superior independiente, diseñado para la fijación de los tornillos articulados. Sin embargo, tras una evaluación de las capacidades y limitaciones del módulo de diseño generativo de Solid Edge, se ha optado por integrar estos dos componentes en una única pieza. Esta decisión se fundamenta en las siguientes ventajas clave:

- **Simplificación de la Fabricación:** Al simplificar el diseño, se eliminan etapas de fabricación separadas para cada componente, lo que se traduce en una reducción significativa del tiempo de producción.
- **Fiabilidad:** al integrar las piezas en una única se evita el uso de tornillos de alta resistencia para la unión. Lo que aumenta la fiabilidad de la mangueta, al eliminar posibles puntos débiles o concentraciones de tensión.
- **Reducción de Costes:** La supresión de elementos de fijación adicionales (tornillos de alta resistencia, tuercas, arandelas) y la simplificación del proceso de manufactura global contribuyen a una potencial reducción de los costes de materiales y de producción.

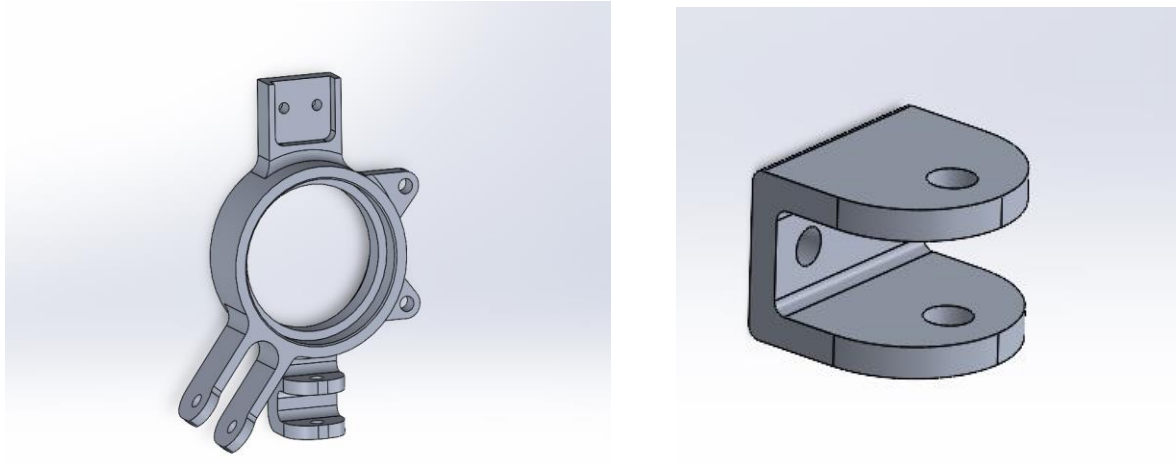


Ilustración 43: Diseño original IFS-04 (Fuente: ICS FS Racing Team)

Esta aproximación de diseño único no solo se alinea con las herramientas de software disponibles, sino que también promete una mangueta final más robusta, eficiente y económica de producir.

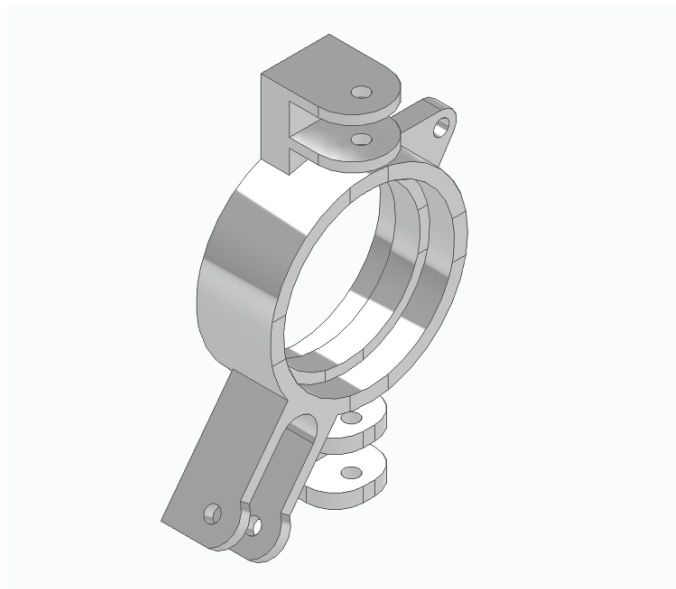


Ilustración 44: Propuesta de diseño integral (Elaboración Propia)

Una vez definida la geometría base, el siguiente paso ha sido la definición del estado de cargas de la mangueta.

3.2 ENTORNO DE SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN

3.2.1 Cálculo del estado de cargas

Para la determinación de las fuerzas que actúan sobre la mangueta, existen dos metodologías principales: el método directo y el método inverso. Como ya ha sido comentado en la sección “*Sistema de Suspensión y Mangueta de Dirección*”. Lo ideal sería el estudio de ambos métodos y su posterior comparación. Sin embargo, dada la complejidad de adaptación del método directo se opta por la puesta en práctica de únicamente el inverso.

En este método se parten de las fuerzas de las barras de suspensión y pinza de freno sobre los puntos de suspensión teóricos de la mangueta -que habrá que previamente a partir de un análisis estructural del sistema, aplicando el método matricial de rigidez-. Además, se restringen los seis grados de libertad de la mangueta con los asientos de los rodamientos. Como se ha comentado, es necesario calcular las fuerzas transmitidas a la mangueta por las barras de la suspensión y la pinza de frenos.

Para obtener las fuerzas de las barras, se ha empleado la metodología de un trabajo previo sobre el diseño de una mangueta, es ese caso una mangueta delantera, para un prototipo FSAE. Como ya se ha comentado, se calculan mediante el método matricial de rigidez. Las fuerzas en la huella del neumático hacen traccionarse o comprimirse a las barras de la suspensión -sabiendo que las barras trabajan únicamente a axil al estar articuladas por ambos extremos-. Además podemos saber las direcciones de las fuerzas de las barras con las coordenadas teóricas de los puntos de suspensión. En base a estas ideas, se plantean las

ecuaciones que garantizan el equilibrio de la mangueta y de las que despejaremos las fuerzas en las barras, nuestras incógnitas.

El sistema de suspensión del coche consta de un total de 6 barras, las cuales se muestran en la Ilustración 45: Barras de suspensión (Fuente: Elaboración Propia).

- Un trapecio/horquilla “Whisbone” (W) superior “Upper” (U) e inferior “Lower” (L) con una barra delantera “Fore” (F) y trasera “After” (A) cada uno. (UF, UA, LF y LA)
- Barra de dirección o “Tieroad” (T)
- Varilla de empuje o “Pushroad” (P).

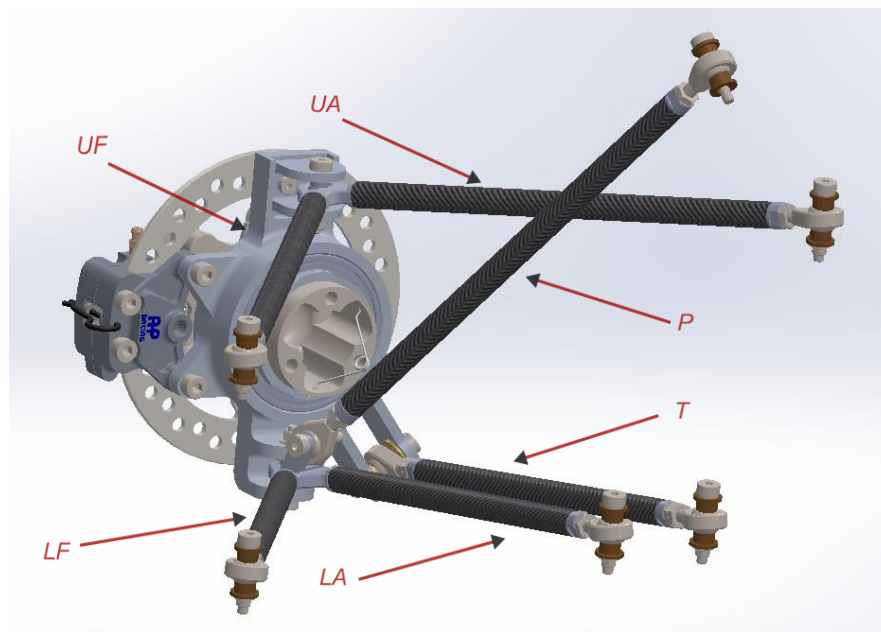


Ilustración 45: Barras de suspensión (Fuente: Elaboración Propia)

Las coordenadas de los puntos teóricos de suspensión sobre el chasis “Inboard” y sobre la mangueta “Outboard”, que nos definen la dirección de las fuerzas de las barras, son de acuerdo con el ISC:

INBOARD				OUTBOARD			
	x	y	z		x	y	z
UF	1529	259	347	UF	1730	540	390
UA	1895	259	390	UA	1730	540	390
LF	1523	240	230	LF	1730	550	230
LA	1756	240	230	LA	1730	550	230
P	1824	275	491	P	1730	530	254
T	1816	240	230	T	1790	550	230

Tabla 6: Coordenadas Puntos de Suspensión ISC (Elaboración Propia)

Las ecuaciones de las que se deduce la matriz de rigidez son:

$$\Delta x = x_{mangueta} - x_{chasis}$$

$$L_{Barra} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$$

$$\sum F_x = \frac{\Delta x_{UF}}{L_{UF}} \cdot |F_{UF}| + \frac{\Delta x_{UA}}{L_{UA}} \cdot |F_{UA}| + \frac{\Delta x_{LF}}{L_{LF}} \cdot |F_{LF}| + \frac{\Delta x_{LA}}{L_{LA}} \cdot |F_{LA}| + \frac{\Delta x_T}{L_T} \cdot |F_T| + \frac{\Delta x_P}{L_P} \cdot |F_P| + F_{x_w} = 0$$

Ecuación 1: Equilibrio de fuerzas en la mangueta (Fuente: TFM Iñigo Manrique [45])

$$r_{barra} = [x_{chasis} \quad y_{chasis} \quad z_{chasis}]$$

$$r_{barra} \times F_{barra} = [M_x \quad M_y \quad M_z] \cdot |F_{barra}|$$

$$\sum M_x = M_{xUF} \cdot |F_{UF}| + M_{xUA} \cdot |F_{UA}| + M_{xLF} \cdot |F_{LF}| + M_{xLA} \cdot |F_{LA}| + M_{xT} \cdot |F_T| + M_{xP} \cdot |F_P| + M_{x_w} = 0$$

Ecuación 2: Equilibrio de fuerzas en la mangueta Fuente: TFM Iñigo Manrique [45])

La expresión final que se obtiene, donde ($F_A, F_B, \dots$) son nuestras incógnitas, es:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta x_{UF}}{L_{UF}} & \frac{\Delta x_{UA}}{L_{UA}} & \frac{\Delta x_{LF}}{L_{LF}} & \frac{\Delta x_{LA}}{L_{LA}} & \frac{\Delta x_T}{L_T} & \frac{\Delta x_P}{L_P} \\ \frac{\Delta y_{UF}}{L_{UF}} & \frac{\Delta y_{UA}}{L_{UA}} & \frac{\Delta y_{LF}}{L_{LF}} & \frac{\Delta y_{LA}}{L_{LA}} & \frac{\Delta y_T}{L_T} & \frac{\Delta y_P}{L_P} \\ \frac{\Delta z_{UF}}{L_{UF}} & \frac{\Delta z_{UA}}{L_{UA}} & \frac{\Delta z_{LF}}{L_{LF}} & \frac{\Delta z_{LA}}{L_{LA}} & \frac{\Delta z_T}{L_T} & \frac{\Delta z_P}{L_P} \\ \frac{M_{xUF}}{L_{UF}} & \frac{M_{xUA}}{L_{UA}} & \frac{M_{xLF}}{L_{LF}} & \frac{M_{xLA}}{L_{LA}} & \frac{M_{xT}}{L_T} & \frac{M_{xP}}{L_P} \\ \frac{M_{yUF}}{L_{UF}} & \frac{M_{yUA}}{L_{UA}} & \frac{M_{yLF}}{L_{LF}} & \frac{M_{yLA}}{L_{LA}} & \frac{M_{yT}}{L_T} & \frac{M_{yP}}{L_P} \\ \frac{M_{zUF}}{L_{UF}} & \frac{M_{zUA}}{L_{UA}} & \frac{M_{zLF}}{L_{LF}} & \frac{M_{zLA}}{L_{LA}} & \frac{M_{zT}}{L_T} & \frac{M_{zP}}{L_P} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{UF} \\ F_{UA} \\ F_{LF} \\ F_{LA} \\ F_T \\ F_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F_{x_w} \\ -F_{y_w} \\ -F_{z_w} \\ -M_{x_w} \\ -M_{y_w} \\ -M_{z_w} \end{bmatrix}$$

Ilustración 46: Matriz de Rigidez (Fuente: TFM Iñigo Manrique [45])

Se obtienen los siguientes valores en las barras para los distintos casos dinámicos: máxima frenada, paso por curva, velocidad, y aceleración.

	UF	UA	LF	LA	P	T
Max Frenada	174.59	-289.70	-614.43	639.68	-158.78	183.79
Max Curva	3569.00	3034.68	-6661.13	-4579.52	2279.30	-2301.61
Max Velocidad	280.36	153.73	-469.06	-235.08	846.86	-103.70
Max Aceleración	2947.05	-2671.31	-8515.91	6272.55	1269.74	1672.63

Tabla 7: Fuerzas en las barras de suspensión para los 4 casos dinámicos (Fuente: TFM Iñigo Manrique [45])

Una vez se han obtenido las fuerzas en las barras, calculamos los vectores unitarios que definen las direcciones de las barras, a partir de las coordenadas de los puntos de suspensión.

VECTORS				UNIT VECTORS			
	x	y	z		x	y	z
UF	200.90	281.00	43.00	UF	0.58	0.81	0.12
UA	-165.00	281.00	0.00	UA	-0.51	0.86	0.00
LF	206.70	310.00	0.00	LF	0.55	0.83	0.00
LA	-26.00	310.00	0.00	LA	-0.08	1.00	0.00
P	-94.20	255.50	-237.30	P	-0.26	0.71	-0.66
T	-26.00	310.00	0.00	T	-0.08	1.00	0.00

Tabla 8: Vectores unitarios de la dirección de las barras de suspensión (Fuente: Elaboración propia)

Posteriormente, aplicando un producto escalar con las fuerzas y sus vectores unitarios, se calculan las componentes de fuerza en las direcciones x, y, z en cada uno de los 3 puntos de la suspensión para cada caso dinámicos.

Fuerzas resultantes			F _x	F _y	F _z
Max. Frenada	Trapezio Superior	UW	-259.69	52.12	-26.92
	Trapezio Inferior + Varilla empuje	LW + P	598.31	183.08	-152.25
	Barra de dirección	T	0.00	-236.02	0.00
Max. Curva	Trapezio Superior	UW	102.27	2680.98	197.02
	Trapezio Inferior + Varilla empuje	LW + P	-84.64	-5932.31	-1717.57
	Barra de dirección	T	0.00	210.97	0.00
Max. Velocidad	Trapezio Superior	UW	46.45	207.87	19.80
	Trapezio Inferior + Varilla empuje	LW + P	-38.44	-303.35	-780.08
	Barra de dirección	T	0.00	95.82	0.00
Max. Aceleración	Trapezio Superior	UW	2108.10	343.34	271.43
	Trapezio Inferior + Varilla empuje	LW + P	-4614.92	-2441.03	-1612.81
	Barra de dirección	T	0.00	2105.05	0.00

Tabla 9: Fuerzas resultantes para los distintos casos dinámicos (Fuente: Elaboración propia)

Cómo se puede observar en la *Tabla 9* cada uno de estos casos dinámicos genera un estado de cargas distintos sobre la mangueta. Dadas la necesidad de implementar un estado de

cargas único para poder optimizar la mangueta (no se puede optimizar en base a varios estados de carga) se ha optado por crear un único caso de carga “sintético”. El cual se ha construido seleccionando la fuerza de mayor magnitud (más desfavorable) para cada punto de anclaje de la suspensión sin tener en cuenta el caso dinámico.

Fuerzas resultantes		F_x	F_y	F_z
Estado de cargas sintético	Trapezio Superior UW	-259.69	52.12	-26.92
	Trapezio Inferior + Varilla empuje LW + P	598.31	183.08	-152.25
	Barra de dirección T	0.00	-236.02	0.00

Tabla 10: Estado de cargas ficticio (Fuente: Elaboración propia)

3.2.2 Cálculo cargas en la pinza de freno

Además de las cargas transmitidas por las barras de la suspensión, la mangueta está sometida a esfuerzos derivados de la acción del sistema de frenado. Para calcular estas fuerzas sobre la mangueta, se ha resuelto un equilibrio estático ficticio de la pinza de freno.

El punto de partida del estudio es la fuerza de frenado ($F_{frenada}$) que experimenta la pinza de freno, debido al rozamiento de las pastillas de freno con el disco de frenado. Esta fuerza se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$F_{frenada} = P_{pistón} * A_{pistón} * n^{\circ} pistones * \mu_{pastillas-disco} = 4212 \text{ N}$$

Donde los parámetros brindados por el departamento de frenos y dirección del ISC son:

- $P_{pistón} = 39 \text{ bar}$:
- $A_{pistón} = 491 \text{ mm}^2$
- $n^{\circ} pistones = 4$
- $\mu_{pastillas-disco} = 0.55$

Esta fuerza tangencial actúa a un radio efectivo de frenado conocido ($R_{efectivo} = 81\text{mm}$)

La pinza de freno se encuentra anclada, mediante tornillos, a la mangueta. Para determinar las reacciones en estos apoyos (fuerza de cortante del tornillo), se ha planteado un sistema de equilibrio estático ficticio de la pinza de freno. Se dice que es ficticio, porque originalmente el problema es hiperestático ($n^{\circ} \text{ incógnitas} > n^{\circ} \text{ ecuaciones}$), pero para simplificar la resolución se plantea una ecuación adicional bajo la hipótesis de que los cortantes de ambos tornillos son iguales.

El siguiente sistema de ecuaciones ilustra este equilibrio - donde las incógnitas de las fuerzas y la $F_{frenada}$ van en el sentido positivo de los ejes de la *Ilustración 47: Cotas mangueta para resolución equilibrio* (Fuente: *Elaboración propia*) -

$$\sum F_x = 0 \rightarrow F_x^1 + F_x^2 = F_{frenada} = 4212 \text{ N}$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow F_y^1 + F_y^2 = 0 \rightarrow |F_y^1| = |F_y^2|$$

$$\sum M_1 = 0 \rightarrow F_y^2 * 64 + 4212 * (81 - \sqrt{70.49^2 - \left(\frac{64,2}{2}\right)^2}) = 0$$

$$\text{Hipótesis: } |F^1| = |F^2| \rightarrow |F_x^1| = |F_x^2|$$

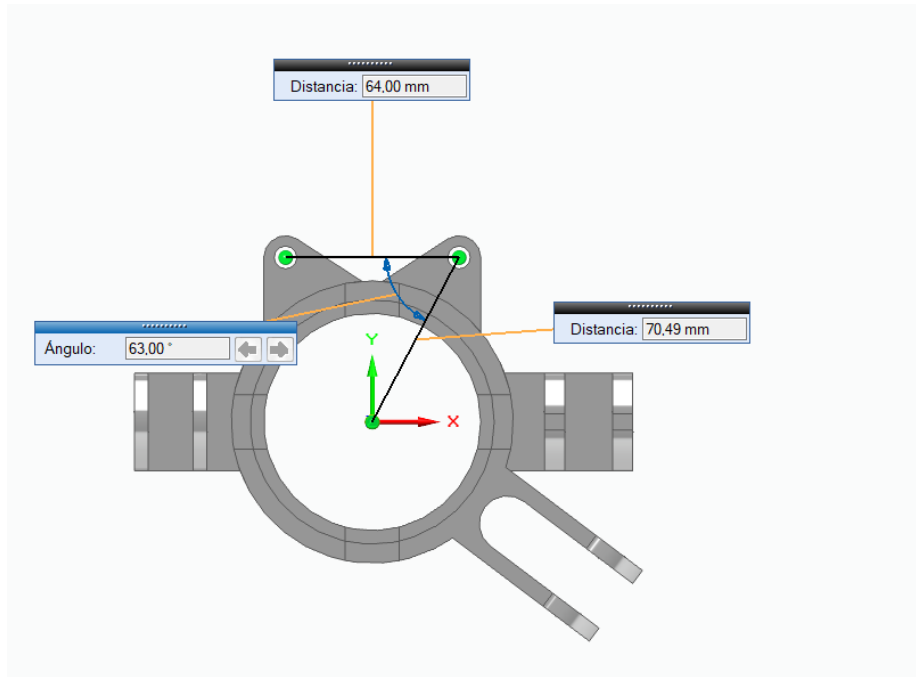


Ilustración 47: Cotas mangueta para resolución equilibrio (Fuente: Elaboración propia)

Para resolver el sistema se han empleado las medidas de los apoyos mostradas en la *Ilustración 47: Cotas mangueta para resolución equilibrio (Fuente: Elaboración propia)*, así como el punto de aplicación de la fuerza de frenado ($R_{efectivo}$).

Los valores obtenidos son, por tanto:

$$F_x^1 = -2106 \text{ N}$$

$$F_x^2 = -2106 \text{ N}$$

$$F_y^1 = 1200 \text{ N}$$

$$F_y^2 = -1200 \text{ N}$$

3.2.3 Primera simulación

Una vez acabado el diseño de la mangueta y definido el estado de cargas al que estará sometida, el siguiente paso de acuerdo con nuestra metodología consiste en simular la pieza

previamente a su optimización topológica. Para ello se empleará el entorno de simulación de Solid Edge.

Dicho entorno consta de una serie de parámetros clave que influirán directamente en los resultados del diseño

- **Material de la pieza:** Se ha seleccionado la aleación de Aluminio 7076-T6. Es una elección común en la fabricación de componentes de la industria automotriz. Esta decisión se justifica por su excelente relación resistencia/peso y su excelente resistencia a la fatiga.[46]
- **Estado de cargas:** Se seleccionan el estado de cargas que actúa sobre la mangueta calculado en las secciones 3.2.1 y 3.2.2.

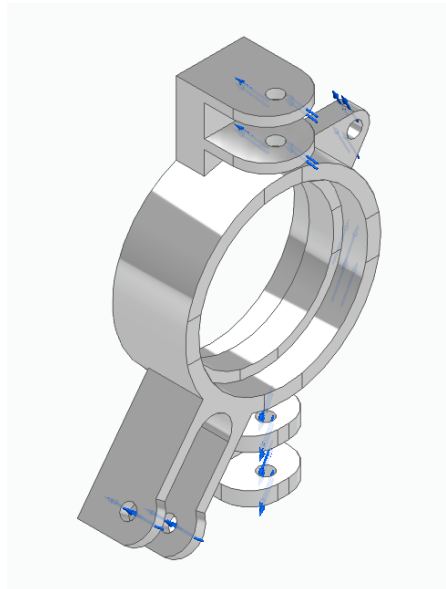


Ilustración 48: Fuerzas sobre la mangueta (Fuente: Elaboración propia)

- **Apoyos:** Se restringen los seis grados de libertad (traslaciones en X, Y, Z y rotaciones alrededor de X, Y, Z) con dos restricciones colocadas en la zona de contacto de los anillos exteriores de los rodamientos.

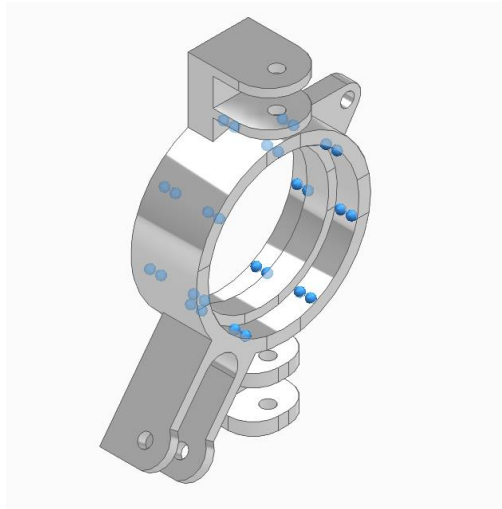


Ilustración 49: Restricciones sobre la mangueta (Fuente: Elaboración propia)

- **Mallado de la geometría:** Consiste en dividir la mangueta en un número finito de elementos más pequeños (nodos) para que el software pueda resolver las ecuaciones de equilibrio. Se seleccionará un tamaño subjetivo de malla que permita obtener una solución precisa del problema de elementos finitos sin tener que invertir un tiempo de cálculo excesivo. Se realizarán distintas pruebas con diferentes densidades de malla para optimizar el rendimiento de la simulación.

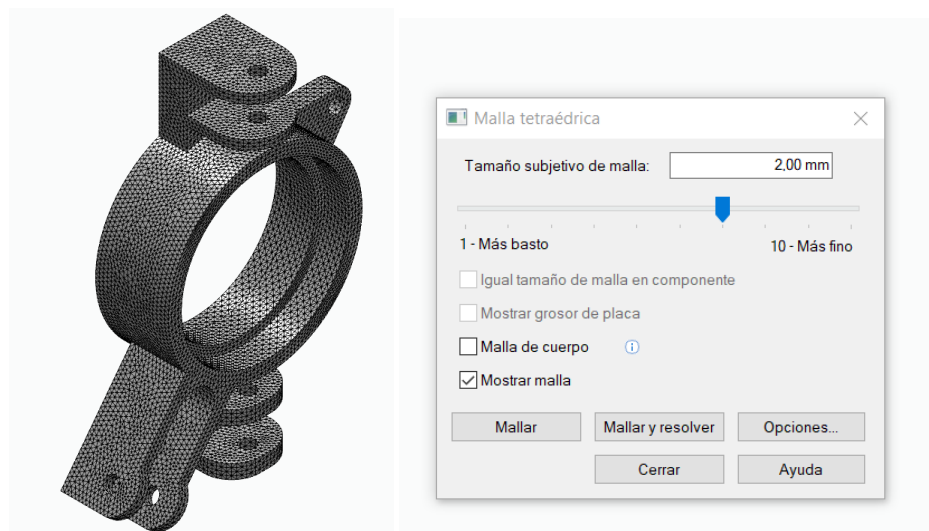


Ilustración 50: Mallado de la mangueta (Fuente: Elaboración propia)

- Resolución y conclusiones: Los resultados obtenidos muestran una gran holgura de la tensión máxima respecto al límite elástico del material. La tensión máxima obtenida es de 148 MPa frente a los 503 MPa del límite elástico del Aluminio 7075-T6.

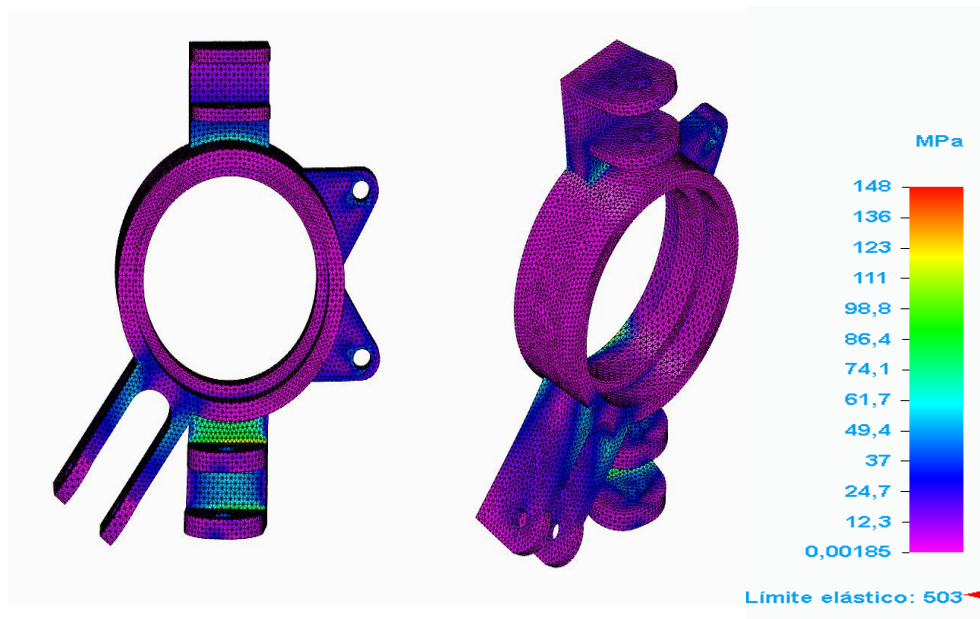


Ilustración 51: Resultados simulación (Fuente: Elaboración propia)

3.2.4 Primera optimización de la mangueta

Una vez verificado mediante una primera simulación la tensión máxima obtenida no supera el límite elástico del material (Aluminio A356), se confirma la viabilidad de poder realizar una optimización topológica. Este margen de resistencia indica que la pieza tiene un exceso de material que puede ser reducido sin comprometer su integridad estructural.

La optimización topológica se lleva a cabo utilizando el módulo de Diseño Generativo de Solid Edge. En el estudio de optimización se siguen los siguientes pasos:

1. Estado de cargas: Se aplica el estado de cargas sintético planteado, al igual que en la primera simulación. Este estado, recordamos, simula unas sollicitaciones ficticias que no se darán bajo el funcionamiento real de la mangueta.

2. Apoyos: Se definen, al igual que cuando simulamos, las restricciones sobre los anillos exteriores de los rodamientos.
3. Preservar regiones (Zonas No Optimizables): El software de diseño generativo permite seleccionar ciertas regiones de la geometría inicial de la mangueta que no serán optimizadas.
 - Se han seleccionado 4 superficies de la parte interior de la mangueta, sobre los que se apoyan los rodamientos y se bloquea su desplazamiento axial.
 - El cilindro exterior también se ha seleccionado por completo, por cuestiones de prueba y error en la optimización. Su no-preservación suponía la eliminación de material indispensable para la funcionalidad de la pieza.

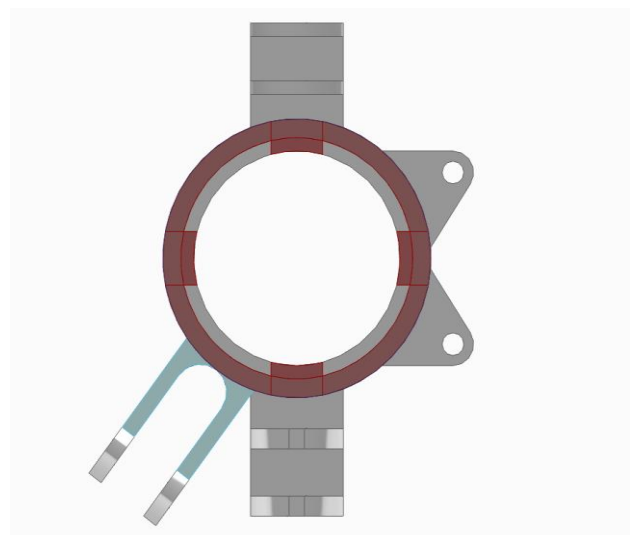
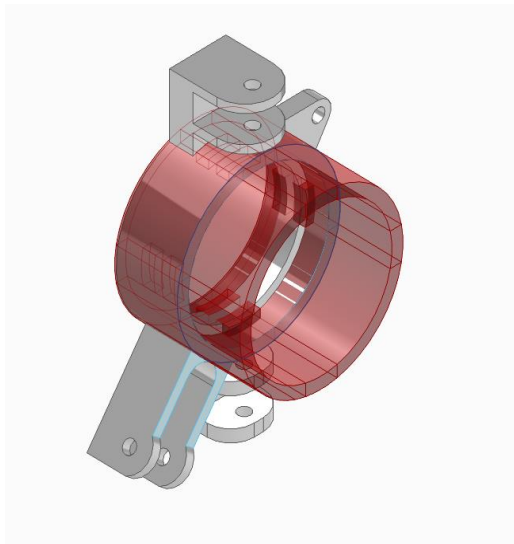


Ilustración 52: Regiones preservadas (Fuente: Elaboración propia)

Además de aquellas zonas que son seleccionadas, también se preservan las zonas donde se aplican las cargas y apoyos:

- Orificios de ensamblaje de los pernos sobre los que se aplican las cargas y se articulan barras de suspensión.
- Orificios de montaje de la pinza de freno.
- Superficies de apoyo de los anillos exteriores de los rodamientos.

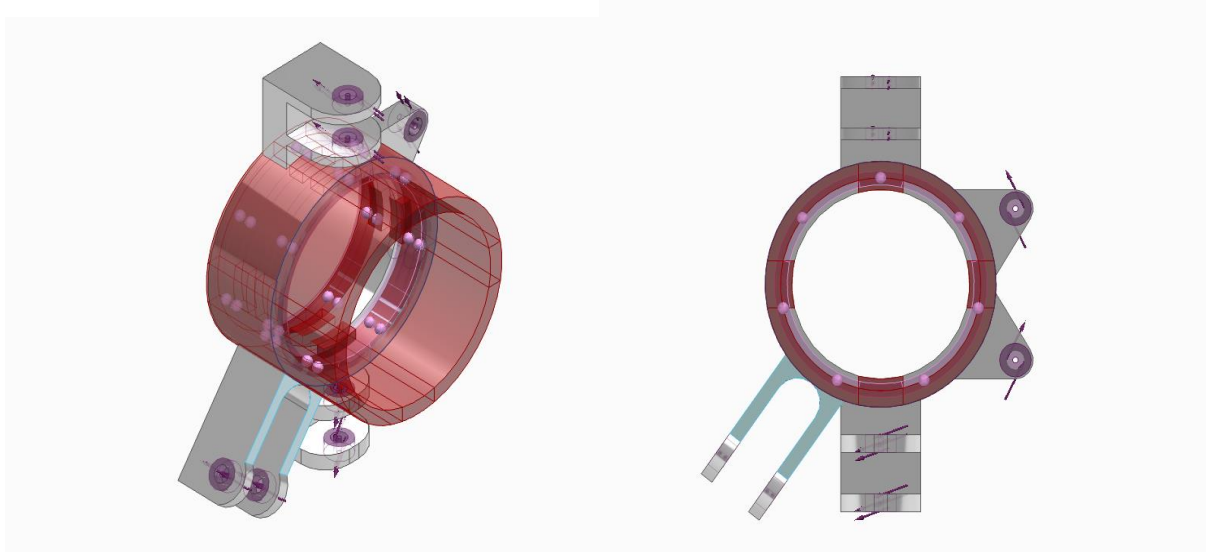


Ilustración 53: Regiones preservadas por defecto (Fuente: Elaboración propia)

4. Tamaño de vóxel: Se asocia directamente a la calidad de la optimización. El tamaño del vóxel elegido es la unidad mínima que se le permite al algoritmo emplear para poder discretizar la geometría de la pieza. Un menor tamaño de vóxel resultará en una eliminación de material con mayor detalle y precisión. Sin embargo, el tiempo de computación será mayor. Al igual que para el mallado, se realizaron varias pruebas preliminares hasta dar con el tamaño de vóxel de una calidad adecuada sin disparar el tiempo de optimización.
5. Porcentaje de reducción de masa: Se define el porcentaje de masa que se desea retirar de la masa inicial de la mangueta. Para determinar el porcentaje óptimo se realizaron varias iteraciones con distintos porcentajes. Finalmente se optó por una reducción de peso del 29%.



Ilustración 54: Mangueta optimizada al 29% de reducción de masa (Fuente: Elaboración propia)

3.2.5 Simulación de la mangueta optimizada

Una vez terminado el proceso de optimización topológica de la mangueta, hay que verificar la funcionalidad e integridad de la nueva geometría obtenida. Para ello se volverá a empelar el módulo de simulación de elementos finitos (FEM) de Solid Edge.



Ilustración 55: Simulación de la mangueta optimizada (Fuente: Elaboración propia)

Los resultados obtenidos de esta simulación confirman que la optimización topológica no ha comprometido la capacidad estructural y funcional de la mangueta. Puesto que, la *Ilustración 55* muestra que la tensión máxima en la mangueta es de 198 MPa, la cual se encuentra significativamente por debajo del límite elástico del Aluminio 7075-T6.

3.2.6 Refinamiento geometría desde Altair inspire

El resultado obtenido de la optimización, como hemos comprobado cumple los criterios de resistencia. Sin embargo, hay parte de la geometría que se propone en la optimización que resulta poco estética y funcional. Son geometrías como por ejemplo agujeros y salientes abruptos que podrían traer problemas durante la vida útil de la pieza (introduciendo concentraciones de tensión o inicios de grieta) e incluso dificultades en las etapas de fabricación.

Es por ello por lo que es necesario una etapa **refinamiento de la geometría**, donde se transforme y suavice el modelo optimizado, obteniendo una pieza fabricable y estéticamente razonable.

Para esta etapa, se ha empleado el software de **Altair Inspire**. Dentro de este software se encuentra la herramienta de creación de **PolyNURBS**, muy útil para el postratamiento de los resultados obtenidos de la optimización topológica. Dentro del software se han realizado 2 pasos:

1. Creación de la **PolyNURBS**: Se importa el modelo optimizado con Solid Edge en formato STL al **Altair Inspire**. A partir del STL con la herramienta “Ajustar” se crea la **PolyNURBS** que suaviza la geometría optimizada.

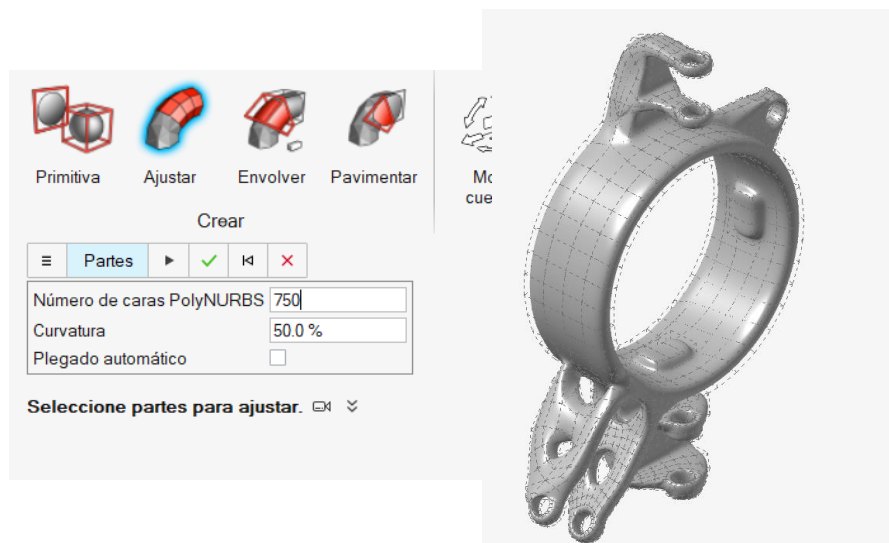


Ilustración 56: Refinamiento de la geometría optimizada generando una PolyNURBS desde el Altair Inspire (Fuente: Elaboración propia)

2. Preservación de geometría funcional: Al igual que sucedía con la optimización, en su cuarto paso “Preservar regiones”, hay regiones de la mangueta que por la funcionalidad y ensamblaje de piezas adyacentes se deben de conservar. Se reintroduce sobre el modelo suavizado dichas partes de la mangueta original han sido modificadas por la herramienta de PolyNURBS.

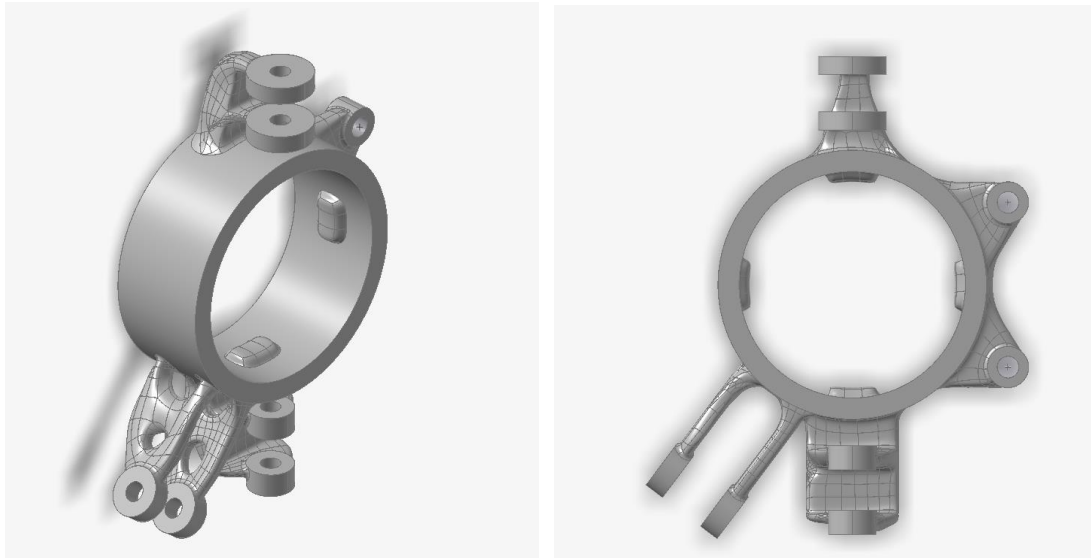
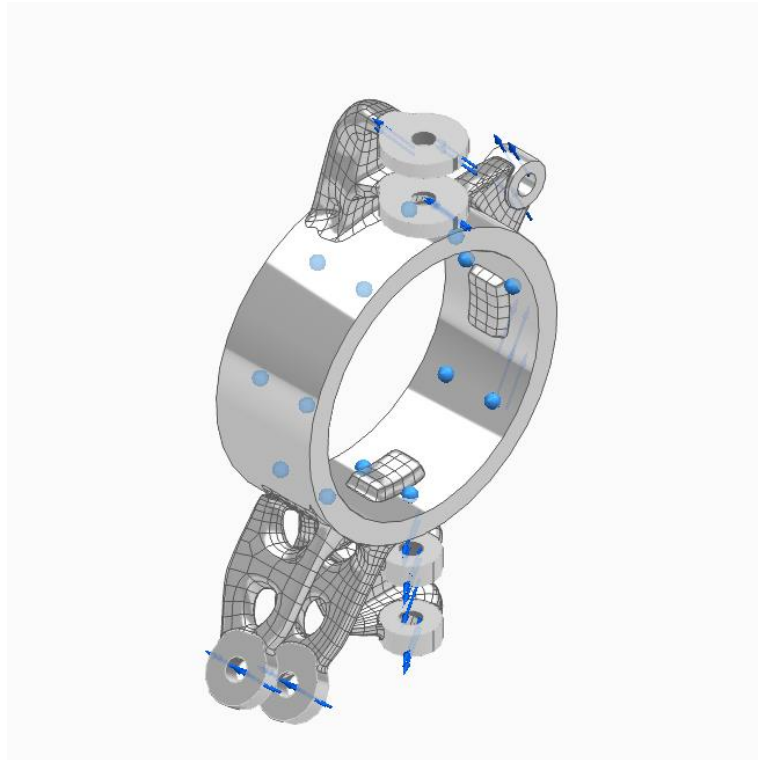


Ilustración 57: Geometría final mangueta tras conservar las regiones claves para la funcionalidad de la pieza(Fuente: Elaboración propia)

3.2.7 Simulación de la geometría final

Tras el refinamiento de la mangueta en Altair Inspire es necesario realizar una simulación final. Este paso asegura que las modificaciones introducidas durante el proceso de suavizado no han comprometido la integridad estructural de la mangueta.

Para llevar a cabo esta validación, la pieza suavizada final, mostrada en la *Ilustración 57: Geometría final mangueta tras conservar las regiones claves para la funcionalidad de la pieza*(Fuente: Elaboración propia) se reexporta desde Altair Inspire a Solid Edge con el formato Parasolid (.x_b). Ya en Solid Edge, se procede a realizar una nueva simulación por elementos finitos (FEM), siguiendo la misma metodología aplicada en las anteriores simulaciones -detallada en la sección 3.2.3-.



Lamentablemente, no ha sido posible completar la última simulación de la mangueta optimizada y suavizada, importada desde *Altair Inspire*, debido a la falta de tiempo y a la aparición de problemas en el mallado del modelo. Pese a este contratiempo, cabe destacar que la geometría resultante del suavizado no difiere significativamente de la optimizada original -que se encontraba lejos del límite elástico-. Por lo tanto, desde un punto de vista teórico, se considera que la mangueta optimizada y suavizada es válida y se le da el visto bueno para su continuar con su fabricación.

3.3 ENTORNO DE IMPRESIÓN 3D

Con el modelo de la mangueta final validada estructuralmente, el siguiente paso se centra en la fabricación. Cabe destacar que este proyecto está enfocado en estudiar la viabilidad de

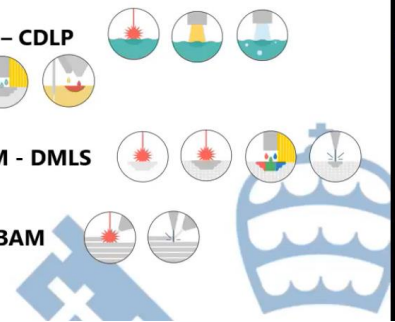
fabricación de una mangueta como modelo dentro de la técnica de fundición al modelo perdido. En ningún caso se está fabricando la pieza final.

3.3.1 Tecnologías de impresión 3d

Dentro de la impresión 3D en plástico encontramos multitud de tecnologías. Cada una de ellas ofrece diferentes posibilidades de precisión, precios, materiales, etc. Las tecnologías más extendidas en la industria son:

UNE-EN ISO 17296 (2017)

- ☐ **Fotopolimerización en tanque o cuba** (Vat Polymerization) / **SLA – DLP – CDLP**
- ☐ **Proyección de material** (Material Jetting) / **MJ - NPJ – DOD**
- ☐ **Proyección de aglutinante** (Binder Jetting) / **BJ**
- ☐ **Fusión de lecho de polvo** (Powder Bed Fusion) / **SLS – EBM – MJF – SLM – DMLS**
- ☐ **Extrusión de material** (Material Extrusion) / **FDM**
- ☐ **Deposición de energía focalizada** (Direct Energy Deposition) / **LENS - EBAM**
- ☐ **Laminado de hojas** (Sheet Lamination) / **LOM**



- Modelado por Deposición Fundida (FDM)
- Estereolitografía (SLA)
- Sinterizado Selectivo por Láser (SLS)
- Fusión Multi Jet (MJF - Multi Jet Fusion)
- Fusión por Lecho de Polvo (PBF)

En nuestro caso nos centraremos en las tecnologías de FDM y SLA, las cuales han sido empleadas anteriormente para proyectos de fundición al modelo perdido. [47], [48]

Para nuestro proyecto se desea imprimir la pieza lo más ligera posible. De esta forma cuando se introduzca el modelo (pieza) junto al molde cerámico en el horno sea menor la cantidad de material que se debe volatilizar. Este criterio será crítico para la elección de la impresora.

Dentro del área de impresión 3D de la universidad, se cuenta con diversas impresoras de ambas tecnologías.

- 1. Modelado por Deposición Fundida (FDM):** Se dispone de las impresoras *DT600* y *Prusa i3+*. Adicionalmente hay una *Flashforge Adventurer 5M Pro* en el FabLab de la universidad.

Ventajas	Desventajas
1. Bajo coste operativo 2. Amplia gama de materiales termoplásticos (PLA, PETG, ...) 3. Materiales especializados (<i>Moldlay</i> o <i>PoliCast</i>) 4. Laminador te permite controlar parámetros de impresión críticos para la facilitar la volatilización del modelo	1. Menor precisión dimensional 2. Peor acabado superficial en comparación con otras tecnologías

- 2. Fotopolimerización en tanque o cuba (SLA):** Se cuenta con las impresoras Form 3 y la Form 3L de la marca Formlabs.

Ventajas	Desventajas
1. Elevada precisión dimensional 2. Buen acabado superficial 3. Existen resinas especializadas para fundición	1) Mayor coste operativo 2) Menor velocidad de impresión 3) Mayor coste materiales 4) Necesidad de mano de obra y tiempo de posprocesamiento (limpieza tediosa soportes y curado UV)

3.3.2 Laminadores y Variables de impresión

Finalmente se van a emplear las siguientes impresoras:

- **DT600 (FDM)**

Se opta por la *DT600* frente a la *Prusa i3+* debido a su mayor fiabilidad. Las variables de impresión se han elegido en base a proyectos de fundición al modelo perdido anteriores y a las recomendaciones del fabricante del material.[48]

Material	PLA
Altura de capa	0.2 mm
Tª extrusor	205°
Tª cama de impresión	50°
Relleno	5%
Patrón de relleno	Rejilla
Perímetros de pared	2
Paredes superiores e inferiores	2

Tabla 11: Variables de primera impresión DT600 (Fuente: Elaboración propia)

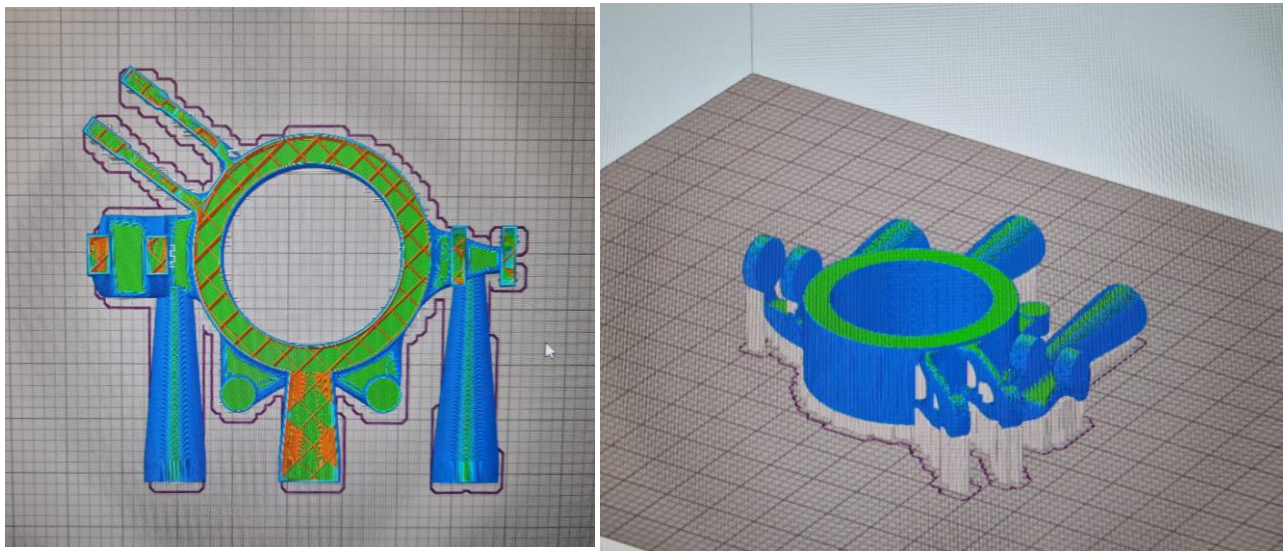


Ilustración 58: Laminación primer modelo mangueta en el slicer SIMPLIFY para la DT600
(Fuente: Elaboración propia)

Se ha observado en el resultado obtenido, mostrado en la *Ilustración 58*, que se deberían aumentar el número de paredes superiores del modelo en el laminado de 2 a 3. Puesto que quedan huecos en las últimas capas de impresión.



Ilustración 59: Primera impresión DT600 con malos resultados (Fuente: Elaboración propia)

- **Flashforge Adventurer 5M Pro (FDM)**

Para esta impresora se prueba a imprimir con filamento especializado en moldes tanto para fundición a la cera perdida como para el moldeo permanente. Las variables de impresión se han elegido de acuerdo con las recomendaciones del proveedor. El parámetro clave para la correcta impresión con este filamento es el flujo volumétrico (mm^3/s). [49]

Material	MoldLay
Flujo volumétrico	$5 mm^3/s$
Altura de capa	0.2 mm
Tª extrusor	215°
Tª cama de impresión	20°
Relleno	5%
Patrón de relleno	Rejilla
Perímetros de pared	2
Paredes superiores e inferiores	4

Tabla 12: Variables de primera impresión Flashforge Adventurer 5M Pro (Fuente: Elaboración propia)

Los resultados de impresión obtenidos son gratificantes y a simple vista parecen robustos. Sobre el modelo impreso, posteriormente se probará a pegar los bebederos.

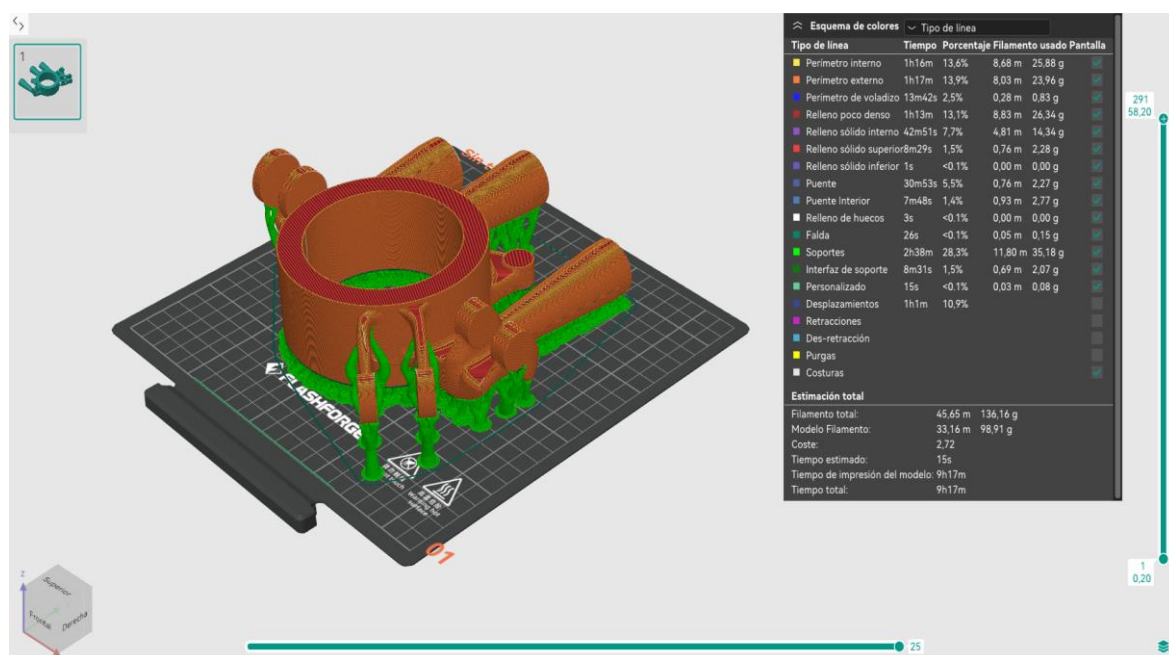


Ilustración 60: Laminación primer modelo mangueta en el slicer OrcaSlicer para la Flashforge Adventurer (Fuente: Elaboración propia)



Ilustración 61: Resultado primera impresión Flashforge Adventurer 5M Pro (Fuente: Elaboración propia)

- **FORMLABS 3L (SLA)**

En el caso de la impresión en resina se opta por la impresora Form 3L, debido una limitación del volumen de impresión de la Form 3.

Para poder imprimir la pieza lo más ligera posible se emplea la herramienta de ahuecar (disponible partir de la versión 3.41.0 de PreForm)[50]. También permite ahorrar material y reducir el tiempo de impresión. Además de la herramienta de ahuecar, será necesario generar soportes que sujeten el modelo y orificios para evacuar la resina residual del interior de la pieza. Por último, la altura de capa empleada es de 0.1mm. y el material empleado será

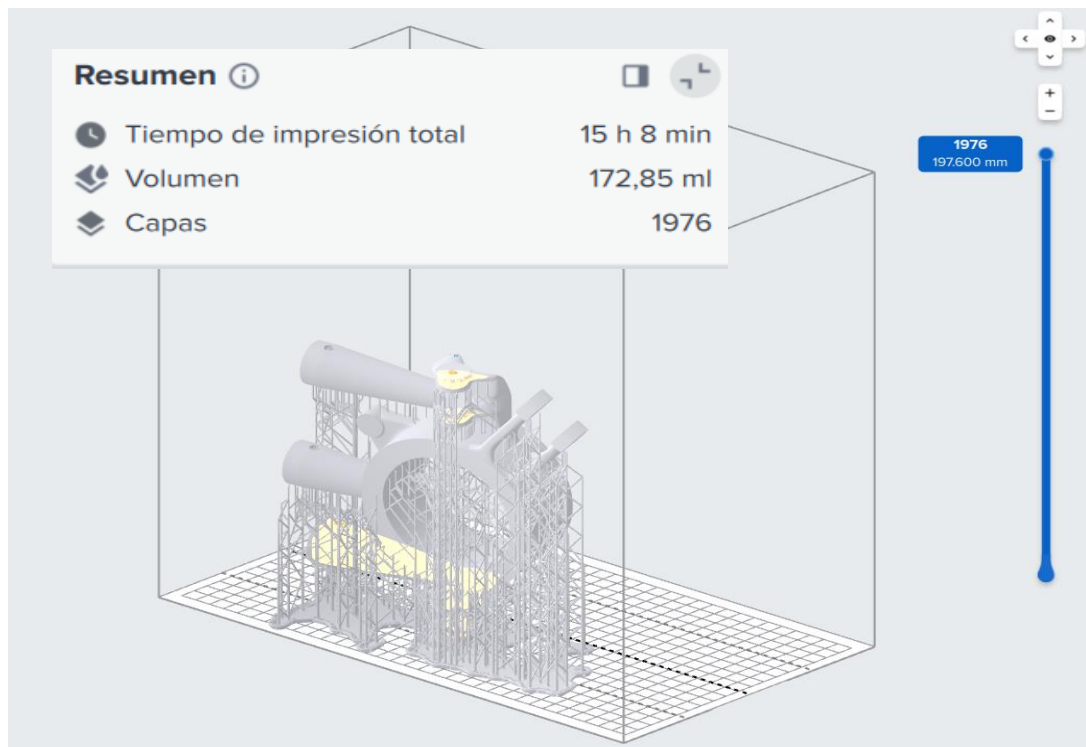


Ilustración 62: Modelo laminado PreForm (Fuente: Elaboración propia)

Finalmente, no se pudo imprimir el modelo en la Form 3L porque la impresora estaba en mantenimiento. Aun así, calcularemos los costes asociados a esta tecnología (*Sección 4: Análisis de técnico y de costes*)

3.3.3 Tapa molde cerámico

Para el proceso de fundición se requiere de una tapa que garantice la estanqueidad del molde durante el vertido del revestimiento. La tapa se diseña para garantizar el posicionamiento y ajuste con el sistema de alimentación, por lo que variará si este también lo hace.

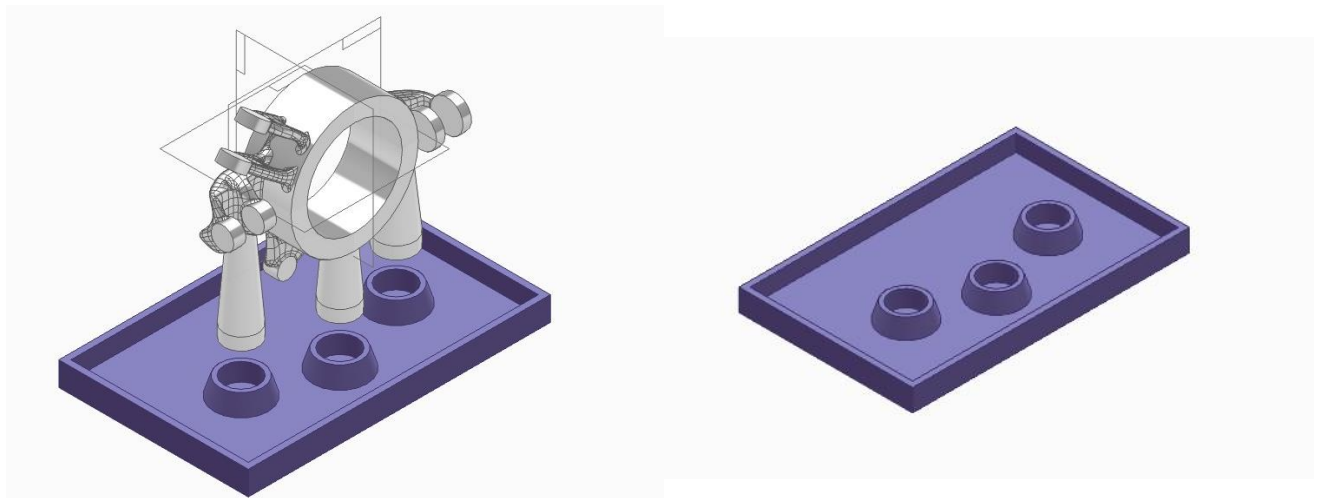


Ilustración 63: Diseño tapa molde cerámico (Fuente: Elaboración propia)

Se empleará la impresora DT600 (FDM) para imprimir esta pieza. Se presentan, a continuación, las variables de impresión de la tapa, así como el resultado final.

Material	PLA
Altura de capa	0.2
Tª extrusor	205°
Tª cama de impresión	50°

Relleno	15%
Patrón de relleno	Rejilla
Perímetros de pared	3
Paredes superiores e inferiores	4

Tabla 13: Variables impresión tapa molde (Fuente: Elaboración propia)

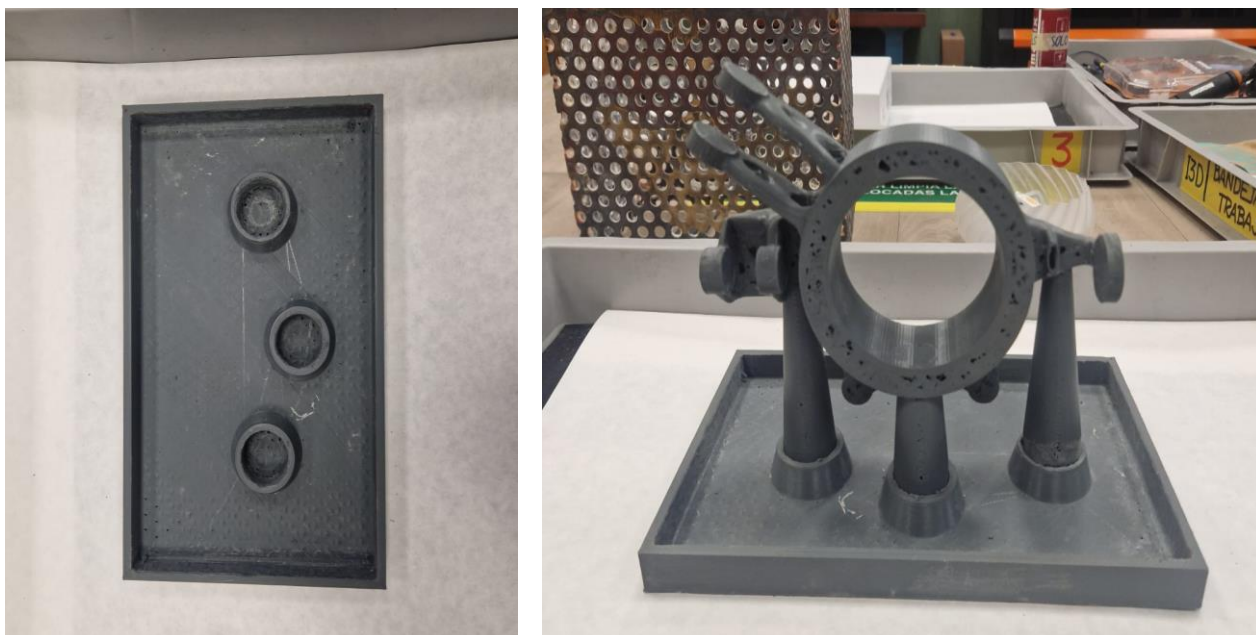


Ilustración 64: Tapa del molde y el modelo de impreso de la mangueta ensamblados (Fuente: Elaboración propia)

Se han observado una serie de problemas que se deberán de corregir en futuros trabajos. En primer lugar, la tapa y el sistema de alimentación no presentan suficiente holgura para el ensamblaje. Esto ha supuesto que se invirtiese más tiempo del requerido en la corrección del ajuste.



Ilustración 65: Comprobación ajustes impresión 3D (Fuente: Departamento Fabricación)

Sabiendo un juego de 6 décimas -habitual en las impresoras 3D para asegurar la holgura en un ajuste eje-agujero en cualquier orientación de impresión- no ha sido suficiente, para trabajo futuros hay que desarrollar un método fiable que permita estandarizar el cálculo de la tapa del molde y su ajuste con el sistema de alimentación. Donde se tengan en cuenta factores como la perpendicularidad de los bebederos, entre otras, y que no se han tenido en cuenta para el desarrollo de esta primera iteración.

3.4 ENTORNO DE FUNDICIÓN

3.4.1 Rediseño pieza para fundición

Se requiere de una serie de modificaciones de diseño previas a la impresión del modelo en 3D. Para asegurar el correcto funcionamiento de la mangueta y el ensamblaje con el resto de las piezas del sistema de suspensión. Los cambios son:

- 1) Sobre espesores de mecanizado para los agujeros de ensamblaje de los pernos y los asientos de los rodamientos (de 2 a 5 mm para el modelo perdido)[51]. Dado que la técnica de fundición por gravedad no obtiene las tolerancias requeridas para estas geometrías de la pieza.

- 2) Escalar la pieza para compensar la contracción del *Aluminio L-2560* -introducir un factor de escala del 101,2 %-.
- 3) Integración y diseño del sistema de alimentación. Basado en ejemplos de trabajos anteriores. Además, de la importancia del sistema de alimentación para la fase de la colada de la aleación de aluminio, hay que tener en cuenta que para esta técnica de fabricación el sistema de alimentación también es el canal de evacuación de los restos plásticos del modelo. Por ello, es importante estudiar cómo se va a evacuar el plástico por el sistema de alimentación con anterioridad.

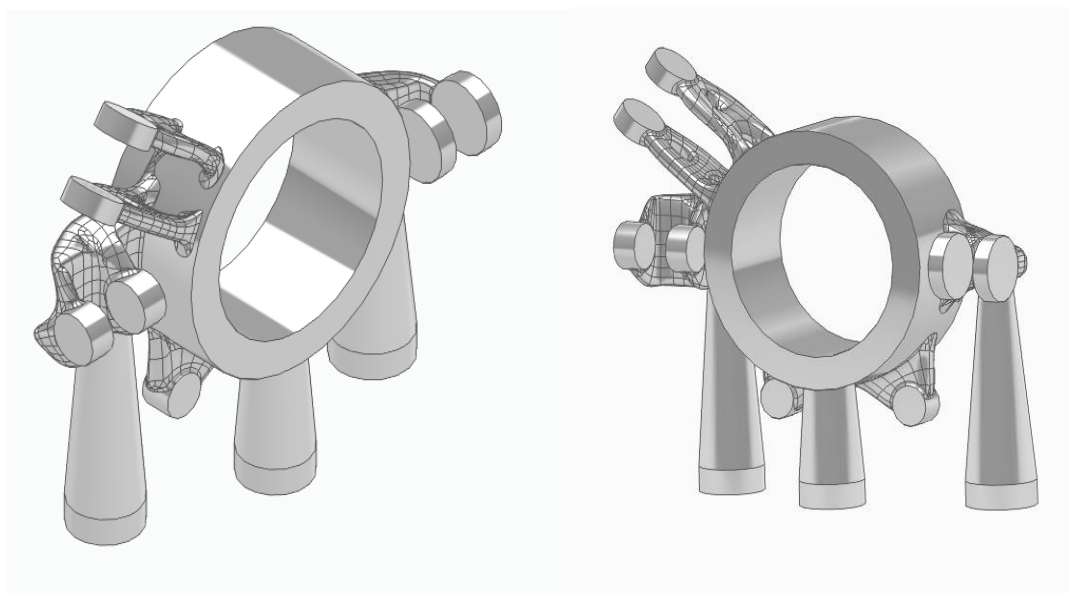


Ilustración 66: Rediseño modelo mangueta previo a la impresión (Fuente: Elaboración propia)

3.4.2 Fabricación del molde Cerámico

Una vez impresas la mangueta junto su sistema de alimentación y la tapa del molde, el siguiente paso es la fabricación del molde cerámico. Este molde cerámico es sobre el cual se

cuela el metal fundido, por lo que la calidad de este es crítica para obtener una pieza final sin defectos.

Para la creación del molde cerámico, se siguieron los siguientes pasos:

1. **Preparación de la jaula metálica:** la jaula con el modelo dentro, una pared de plástico y una pared de cartón pluma se forran en cinta de carroceros. De esta manera se asegura que al volcar el revestimiento sobre el recipiente este no se derrame.



Ilustración 67: Preparación del molde cerámico con la jaula y el modelo impreso en 3D (Fuente: Elaboración propia)

2. **Preparación de la Mezcla Cerámica:** para que la calidad del molde sea la adecuada se debe respetar la relación 0.4 l de agua por cada kg de material cerámico –el material cerámico empleado es el *SatinCast 20* que cuesta aproximadamente 2.4 €/kg [52]–. Una vez mezclados, para eliminar las burbujas de aire atrapadas en el material se remueve con una batidora hasta ver una mezcla homogénea y no ver grumos.

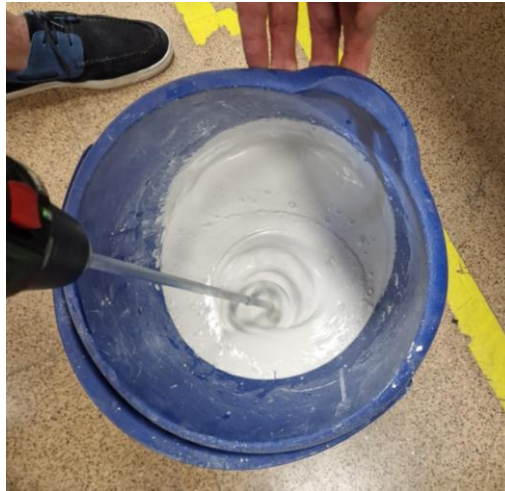


Ilustración 68: Preparación del revestimiento cerámico para ser vertido en el molde (Fuente: Elaboración propia)

- 3. Vertido y Secado del Molde:** ya hecha la mezcla, se vierte suavemente sobre el molde, llenando la completamente. Una vez vertido se deja secar el revestimiento durante 48 horas, al ser un molde grande.



Ilustración 69: Molde cerámico con el revestimiento vertido sobre la jaula (Fuente: Elaboración propia)

3.4.3 Quemado del modelo 3D en el horno

Una vez pasadas las 48 horas, para dejar secar el molde, se mete el molde cerámico con todavía el modelo impreso en 3D en el horno. El objetivo de esta fase es lograr que se evacue del molde todo el plástico del modelo y que no obstruya ni genere defectos en la colada de metal posterior. Para ello se sigue la secuencia de calentamiento mostrada en la *Tabla 14* - respecto a trabajos anteriores se ha incluido la fase de 800°C y 120'.

TEMPERATURAS	TIEMPOS
150°C	2 h (120')
370°C	2 h (120')
480°C	2 h (120')
730°C	2 h (120')
800°C	2 h (120')

Tabla 14: Temperaturas y tiempos de la secuencia de quemado del modelo 3D (Fuente: Elaboración propia)

Los resultados obtenidos fueron bastante satisfactorios, dado que aparentemente se consiguió eliminar la gran parte del modelo de plástico. Se observa en la

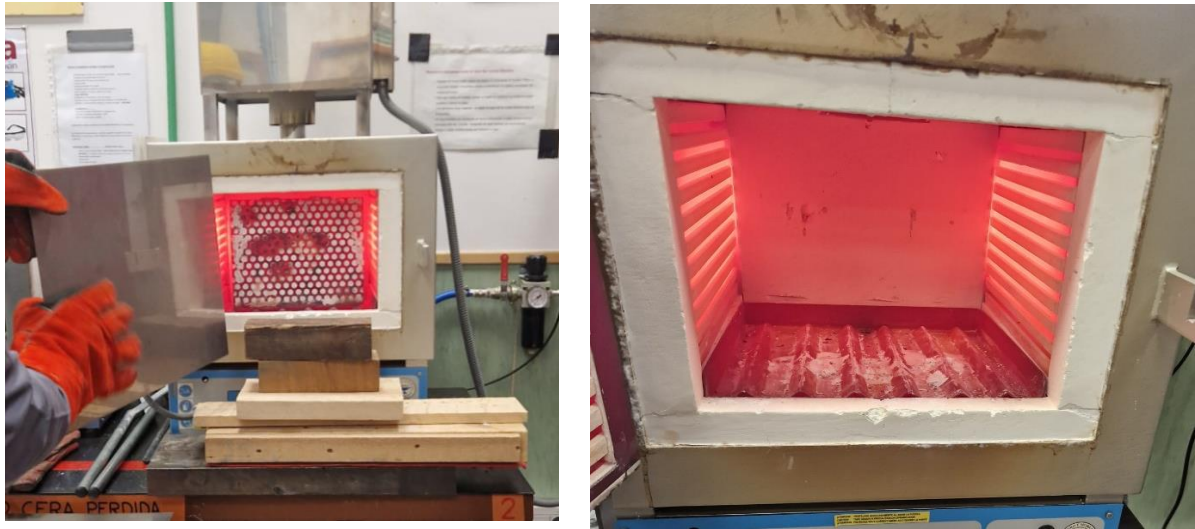


Ilustración 70: Molde en el horno y los restos de plástico presentes al retirarlo (Fuente: Elaboración propia)

3.4.4 Colada del metal

Una vez se retira el molde del horno se introduce el aluminio, en este caso es el *Aluminio L-2560*, a 800°C y este comienza a fundir. Se tendrá que ser rápido en este cambio para minimizar el choque térmico entre el molde cerámico (que se comenzará a enfriar) y el aluminio que vendrá a unos 700°C del horno. Antes colar se comprobó que la capacidad de mantener el calor que tuvo el molde fue sorprendente alta, al no notarse apenas el choque térmico.

Se elige verter el aluminio fundido sobre el bebedero de la derecha de la *Ilustración 71* por dos cuestiones. Primero, se descarta el bebedero del medio por su poca profundidad. El bebedero de la izquierda y el de la derecha son igual de profundos -por lo que el metal llegará con velocidades similares de acuerdo con el *Principio de Bernoulli*-. Segundo, porque el área de ataque en la pieza es mayor en el bebedero de la derecha, por lo que el caudal será mayor y llenaremos más rápido la pieza.

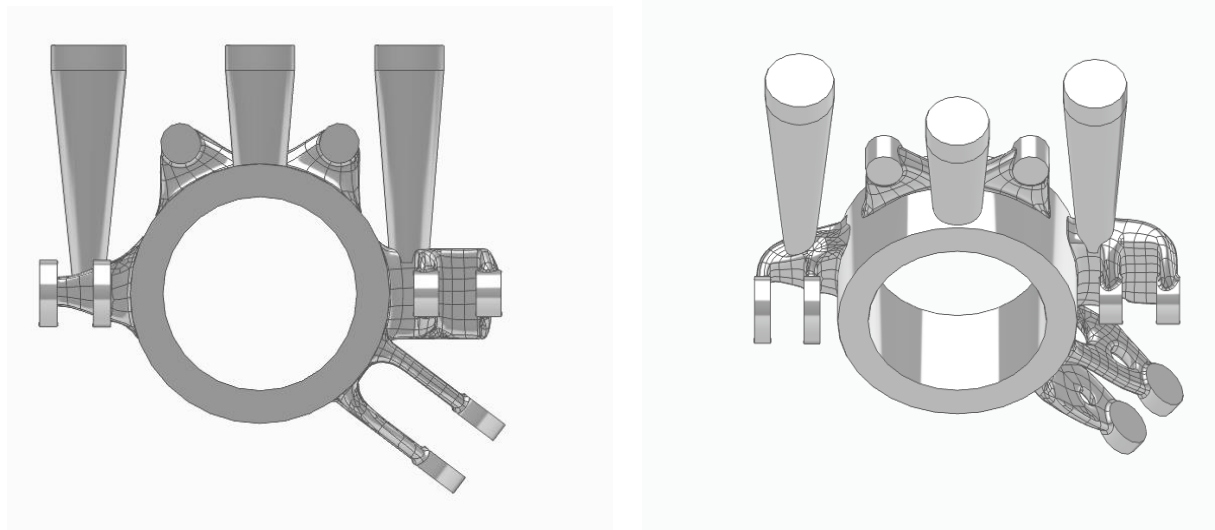


Ilustración 71: Explicación del sistema de alimentación y el canal de colada (Fuente: Elaboración propia)

ALEACIONES DE ALUMINIO PARA FUNDICIÓN

Designación Corta		L-2520	L-2521	L-2530	L-2551	L-2560	L-2561	L-2570	L-2610	L-2620	L-2630	L-2631
Densidad a 20 °C	Kg / dm ³	2,65	2,63	2,67	2,7	2,68	2,65	2,68	2,75	2,79	2,75	2,70
Intervalo de fusión	°C	575 a 585	570 a 585	570 a 590	535 a 565	555 a 590	555 a 585	555 a 625	515 a 615	515 a 610	510 a 610	510 a 610
Contracción al solidificar	%	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2
Coefficiente de dilatación	x 10 ⁻⁶ K ⁻¹	20,0	20,5	20,0	19,5	20,0	21,0	23,0	21,0	21,5	21,5	21,5
Conductividad térmica	W / m x K	146 a 167	125	146 a 163	117 a 154	138 a 159	125	146 a 180	125 a 159	113 a 125	109	109
Conductividad eléctrica	mW x cm ² / cm	4,5 a 5,0	5,5	4,4 a 5,0	5,0 a 6,0	4,5 a 5,0	5,5	4,5 a 5,3	4,5 a 6,0	5,5 a 6,5	7,5	7,5
Resistencia a la tracción, R _m	N / mm ²	150 a 170	170	150 a 170	190 a 270	160 a 250	180	125 a 250	130 a 280	145 a 160	170	170
Límite elástico, R _{p0,2}	N / mm ²	70 a 80	-	80 a 90	-	80 a 200	-	80 a 180	70 a 230	80 a 90	100	100
Módulo elástico	N / mm ²	75.000	75.000	75.000	75.000	75.000	75.000	72.000	72.000	72.000	72.500	72.500
Alargamiento	%	4 a 5	2	1 a 2	-	2 a 3,5	1	1 a 2	1 a 2	1	1	1
Dureza Brinell	-	50 a 55	-	50 a 55	80 a 125	60 a 90	-	55 a 95	65 a 100	70 a 75	75	75
Designación simbólica		Al-12Si	Al-12SiCuFe	Al-12SiCu	Al-10SiNi	Al-12SiMg	Al-10SiMgFe	Al-5SiMg	Al-5Si3Cu	Al-6Si4Cu	Al-9Si3Cu3ZnFe	Al-9Si3CuZnFe
Si	%	13,5 10,5	13,5 11,0	13,5 10,5	13,0 11,0	10,5 9,0	11,0 9,0	5,5 4,0	6,0 4,0	7,5 5,5	11,0 8,0	11,0 8,0
Fe	%	0,65	1,3	0,80	0,80	0,60	1,0	0,60	0,80	1,3	1,3	1,3
Cu	%	0,15	1,0	1,0	0,50 1,50	0,10	0,10	0,10	2,0 4,0	3,0 5,0	2,0 4,0	2,0 4,0
Mn	%	0,55	0,50	0,05 0,55	0,3	0,30 0,50	0,55	0,60	0,30 0,70	0,20 0,60	0,55	0,55
Mg	%	0,10	0,20	0,35	0,70 1,50	0,20 0,40	0,20 0,50	0,50 0,80	0,15	0,10 0,30	0,05 0,55	0,05 0,55
Ni	%	0,10	0,50	0,30	0,50 1,50	0,10	0,15	0,10	0,30	0,30	0,55	0,55
Zn	%	0,15	0,50	0,55	0,20	0,10	0,15	0,10	0,50	2,00	3,00	1,20
Ti	%	0,20	0,20	0,20	0,20	0,10	0,20	0,20	0,20	0,20	0,25	0,25
Pb	%	0,10	0,15	0,20	0,10	0,05	0,15	0,10	0,10	0,20	0,35	0,35
Sn	%	0,05	0,10	0,10	0,10	0,05	0,05	0,05	0,05	0,10	0,25	0,25
Al	%	Resto	Resto	Resto	Resto	Resto	Resto	Resto	Resto	Resto	Resto	Resto
Gran Bretaña (BS) .		LM 6	-	LM 20	LM 13	LM 2	-	LM 8	LM 4	LM 21	LM 24	-

Tabla 15: Ficha técnica para los Aluminios de fundición (Fuente: Fejota)



Ilustración 72: Momento de la colada del metal (Fuente: Elaboración propia)

3.4.5 Resultados de la fundición

Los resultados obtenidos fueron muy satisfactorios en la primera prueba. El modelo fue prácticamente llenado por completo y la pieza obtenida contaba con muchos menos defectos que otros estudios y pruebas anteriores.



*Ilustración 73: Resultado final de la fundición de la mangueta por la técnica de modelo 3D perdido
(Fuente: Elaboración propia)*

3.4.6 Análisis de defectos mangueta

A pesar de considerar un éxito el resultado obtenido, dada la complejidad de la pieza. Existen varios defectos en la pieza fundida obtenida. En este apartado se comentarán dichos defectos, así como las posibles explicaciones y soluciones.

- 1) **Superficie rugosa y porosidades externas:** Se observa en las superficies del anillo de la mangueta zonas de mayor rugosidad. Esto se puede a inclusiones o erosión del molde durante el llenado (fractura por choque térmico) o incluso a restos del material plástico del modelo.



Ilustración 74: Porosidades externas en el anillo de la mangueta (Fuente: Elaboración propia)

- 2) **Llenado incompleto:** En la zona de anclaje de las pinzas de freno se aprecia que no ha llegado el material, lo que podría deberse a la acumulación de gases en la parte superior de la cavidad del molde. Ante este problema sería conveniente colocar unos respiraderos en estas zonas para permitir la salida de los gases.



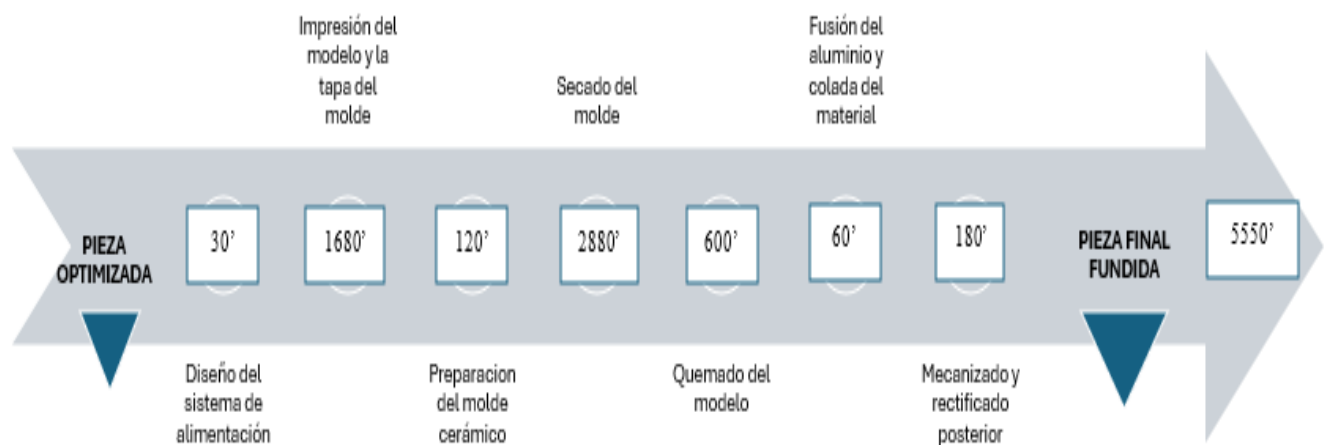
*Ilustración 75: Llenado incompleto en la zona de anclaje de las pinzas de freno (Fuente:
Elaboración propia)*

4. ANÁLISIS DE TÉCNICO Y DE COSTES

Esta sección del estudio tiene como objetivo principal comparar la viabilidad económica y técnica del método de fabricación que se plantea.

4.1 ANALISIS DE TIEMPOS

En cualquier proceso productivo, es necesario exprimir al máximo la eficiencia temporal para poder ser competitivos en el mercado y la industria. Para ello es necesario hacer un análisis de tiempos, cuyo objetivo principal sea cuantificar la duración de cada una de las fases de un proceso. En la *Gráfica 4* se muestra el análisis de tiempos de la fundición al modelo 3D perdido que hemos planteado y realizado.



Gráfica 3: Diagrama de flujo que representa las distintas fases y su tiempo para el proceso de fabricación de fundición al modelo 3D perdido (Fuente: Elaboración propia)

Este diagrama muestra la duración de cada etapa y permite identificar dónde se pueden implementar mejoras para acelerar el ciclo de producción.

En este caso el tiempo total del proceso está claramente indicado en el diagrama de flujo y es de 5550 minutos:

- En horas: $5550 / 60 \approx 92.5$ horas
- En días (jornadas de 24 horas continuas): $92.5 / 24 \approx 3.85$ días

También se pueden observar claros cuellos de botella en el proceso. Claramente, el "Secado del molde" (2880') y la "Impresión del modelo" (1680') son las actividades que consumen la mayor parte del tiempo. Cualquier mejora en estas etapas tendrá un impacto significativo en el tiempo total del proceso como, por ejemplo: Cambiar a un revestimiento cerámico de secado más rápido, emplear impresoras de mayor velocidad que permitan acabar antes las piezas, disminuir el material de soporte o realizar tapas modulares -explicado en ideas para futuros

4.2 CALCULO COSTES MODELO ORIGINAL

La viabilidad económica es una de las partes críticas de la viabilidad de un proceso productivo. Para ello, realizaremos un presupuesto de la mangueta original mediante mecanizado CNC y otro de la mangueta optimizada mediante FA.

Solicitamos un presupuesto desde la plataforma de Xometry [53] para mecanizado de la pieza original.

Proceso de fabricación / Material

Cant.: 1

Tecnología:

Mecanizado CNC

Material:

Aluminio 7075 / 3.4365 / Al-Zn6MgCu

Características avanzadas

Acabado:

Estándar

La tolerancia más estrecha:

ISO 2768 - medium

Roscas y taladros roscados

0

Insertos

0

Estándar 13 días laborables

702,45 €
por unidad 702,45 €

Exprés 9 días laborables

1.123,92 €
por unidad 1.123,92 €

Esquinas internas

Recomendación: Las esquinas internas afiladas se procesarán con un radio de 2 mm. Especifique cualquier requisito diferente en la sección Requisitos adicionales de producción.

187.4mm × 149.3mm × 48.3mm

Suelte los archivos adicionales aquí o Navegar

Ilustración 76: Presupuesto del modelo original mecanizado(Fuente: Xometry)

4.3 CALCULO COSTES MODELO OPTIMIZADO

Haremos un primer calculo para prototipado no funcional en plástico y posteriormente calcularemos los presupuestos de prototipado funcional de FA en metal y la alternativa estudiada -para después poder compararlos-.

4.3.1 Impresión 3D en plástico para prototipado

En un primer lugar realizaremos un presupuestado de la etapa de impresión 3D para prototipado. El prototipado es imprescindible y habitual dentro de sectores industriales como el aeronáutico o la defensa, donde los pequeños tamaños de lotes no justifican la fabricación de piezas metálicas funcionales para realizar comprobaciones de ensamblaje o verificaciones dimensionales. [54]

Este presupuesto mide lo que cuesta realizar un prototipo rápido para validar un diseño sin necesidad de incurrir en los costes y plazos asociados a la fabricación metálica.

Se empleará un modelo de presupuesto proporcionado por el *Departamento de Fabricación de ICAI* y se hará este cálculo para cada una de las tres impresoras propuestas:

- **DT600 en PLA**

ANÁLISIS DE COSTES PIEZAS EN IMPRESORA DT600 (FDM)	
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA	
Precio máquina (€)	38750
Coste mantenimiento anual (€)	3875
Años de amortización	5
Días laborables/año	223
Horas de impresión/día	12
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	3.76
DATOS COSTE MATERIAL	
Coste material modelo (€/kg)	20
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA	
Coste técnico analista del modelo €/h)	20

CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (g)	166	3.3 €
Tiempo impresión modelo (h)	11.5	64.9 €
Tiempo técnico - inc. preparación y posprocesamiento- (h)	1	20 €
Coste total (€) + IVA	98.2 €	

Tabla 16: Costes impresión mangueta en DT600 (Fuente: Departamento fabricación ICAI)

- **Flashforge en Moldlay (60€ por 750 gramos de material [55])**

ANÁLISIS DE COSTES PIEZAS EN IMPRESORA FLASHFORGE (FDM)	
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA	
Precio máquina (€)	430
Coste mantenimiento anual (€)	43
Años de amortización	5
Días laborables/año	223
Horas de impresión/día	12

ANÁLISIS DE TÉCNICO Y DE COSTES

Precio Hora máquina-amortización (€/h)	0.042
DATOS COSTE MATERIAL	
Coste material modelo (€/kg)	80
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA	
Coste técnico analista del modelo €/h)	20

CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (g)	136.2	10.9 €
Tiempo impresión modelo (h)	9.5	0.6 €
Tiempo técnico - inc. preparación y posprocesamiento- (h)	1	20 €
Coste total (€) + IVA	31.5 €	

Tabla 17: Costes impresión mangueta en Flashforge (Fuente Departamento fabricación ICAI)

- **Form 3L y Castable Wax 40 Resine (300€ el litro de resina [56])**

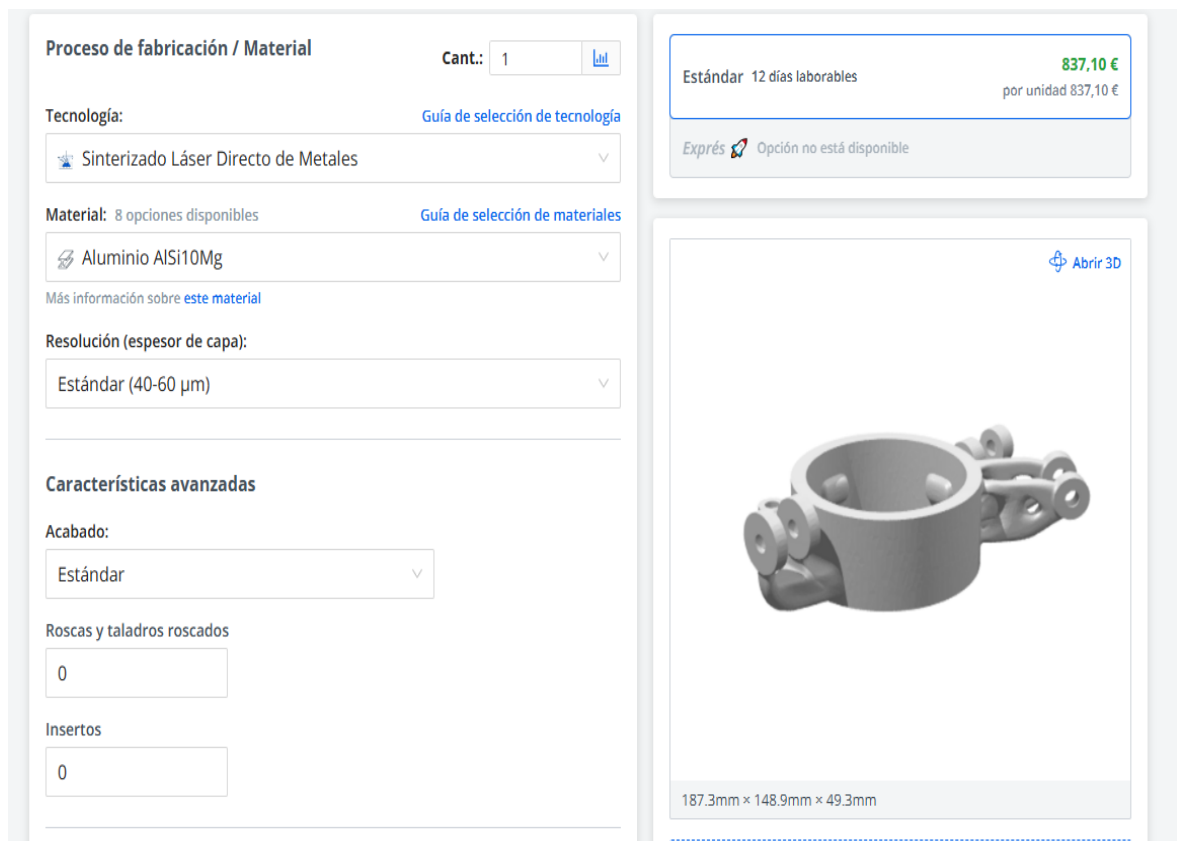
ANALISIS DE COSTES DE PIEZAS EN IMPRESORA FORM3L (SLA)	
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA	
Precio máquina (€)	20000
Coste mantenimiento anual (€)	2000
Años de amortización	5
Días laborables/año	223
Horas de impresión/día	12
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	1.94
DATOS COSTE MATERIAL	
Coste material modelo (€/l)	300
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA	
Coste técnico analista del modelo €/h)	20

CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (ml)	170	51.0 €
Tiempo impresión modelo (h)	15	29.1 €
Tiempo técnico - inc. preparación y posprocesamiento - (h)	1.5	30 €
Coste total (€) + IVA	110.1 €	

Tabla 18: Costes impresión mangueta en FORM3L (Fuente: Departamento fabricación ICAI)

4.3.2 Impresión 3D en metal (DMLS) para prototipo funcional

Al igual que antes para la pieza original, desde la plataforma de Xometry [53] solicitamos un presupuesto para nuestra pieza optimizada. Pero esta vez empleando la tecnología de *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS). Es un proceso de impresión 3D que utiliza un rayo láser de alta potencia y precisión para fundir y fusionar capas de polvo metálico [57]. Al no haber aluminios de la serie 7000, se elige para presupuestar la pieza un aluminio AlSi10Mg de límite elástico 360 MPa.



Proceso de fabricación / Material Cant.: 1

Tecnología: Sinterizado Láser Directo de Metales

Material: 8 opciones disponibles Aluminio AlSi10Mg

Resolución (espesor de capa): Estándar (40-60 µm)

Características avanzadas

Acabado: Estándar

Roscas y taladros roscados: 0

Insertos: 0

Pricing: Estándar 12 días laborables 837,10 € por unidad 837,10 €

Exprés: Opción no está disponible

3D Model: 187.3mm x 148.9mm x 49.3mm

Ilustración 77: Presupuesto de impresión 3D en metal (Fuente: Xometry)

4.3.3 Fundición al modelo en 3D perdido para prototipado funcional

Para evaluar la viabilidad económica de proceso de fabricación planteado, se hará un análisis más exhaustivo de los costes. Se han separado los costes asociados a la fabricación en dos grandes categorías: costes fijos y costes variables. Esta clasificación permite analizar la rentabilidad del proceso en función del tamaño de lote a producir. Dicho análisis permitirá extraer conclusiones sobre los tipos de sectores de la industria en los que esta técnica de fabricación es aplicable y en cuáles desde el punto de vista económico no es viable.

Para el presupuestado de este proceso tendremos en cuenta los precios obtenidos con la *Flashforge Adventurer* y el filamento *Moldlay*, puesto que tras la impresión de los modelos ha sido la elegida como la alternativa de mejor relación fiabilidad-precio de las planteadas en el proyecto.

- **Costes variables:** aquellos que dependen directamente del número de unidades producidas. Cada pieza del lote fabricada tendrá imputado estos gastos.

Concepto	Coste unitario (€/unid)	Observaciones
Coste de la impresión del modelo	23,9	Calculado anteriormente (<i>Sección 4.3.1: Impresión 3D en plástico para prototipado</i>)
Revestimiento cerámico	19,2	7.5 kg de revestimiento cerámico <i>SatinCast 20</i>
Preparación del molde	7,5	30 minutos de técnico a 15 €/h
Fundición y limpieza	15,0	1 hora de técnico a 15 €/h

Material aluminio	4,9	0,337 dm ³ de Aluminio A356 (La cotización del aluminio 99,5% puro en mayo de 2025 es de 2,17 €/kg o 5,86 €/ dm ³ [58]. Entonces el Aluminio A356 que suele comercializarse en torno al x2.5 sobre el valor del aluminio puro tendrá un valor de 14,64 €/ dm ³)
Total Costes Variables	70,5 €/unid	

Tabla 19: Costes variables del proceso de fabricación de fundición al modelo 3D perdido (Fuente: Elaboración propia)

- **Costes fijos:** aquellos que no dependen del tamaño de lote a fabricar. Se incurre una vez en ellos y a partir de ahí comienzan a amortizarse, por lo que, a mayor tamaño de lote menor es el impacto sobre el coste unitario final de la pieza. [59]

Concepto	Coste (€)	Observaciones
Utillaje y herramientas de fundición	400,0	Se incluyen hornos, pinzas, jaulas de chapa de acero
Diseño CAD del modelo	60,0	3 h de ingeniero a 20,0 €/h (44000 €/año según los datos de 2025 de la web de <i>glassdoor</i> [60])
Licencia de Solid Edge X Advanced	5,7	3 h de software a 1,9 €/h (3429 €/año de acuerdo con la página oficial de <i>Siemens</i> [61])
Fabricación de la placa base reutilizable	14,2	Impresión en Flashforge en PLA (180 gramos sin soportes y 11.5 horas de impresión)
8 iteraciones hasta concretar diseño final	8x70,5=564,0	Pese a la existencia de softwares de simulación de colada como <i>MagmaSoft</i> o <i>SolidCast</i> . Se debe incluir sobre los costes fijos un nº de piezas significativo, tal que refleje los intentos

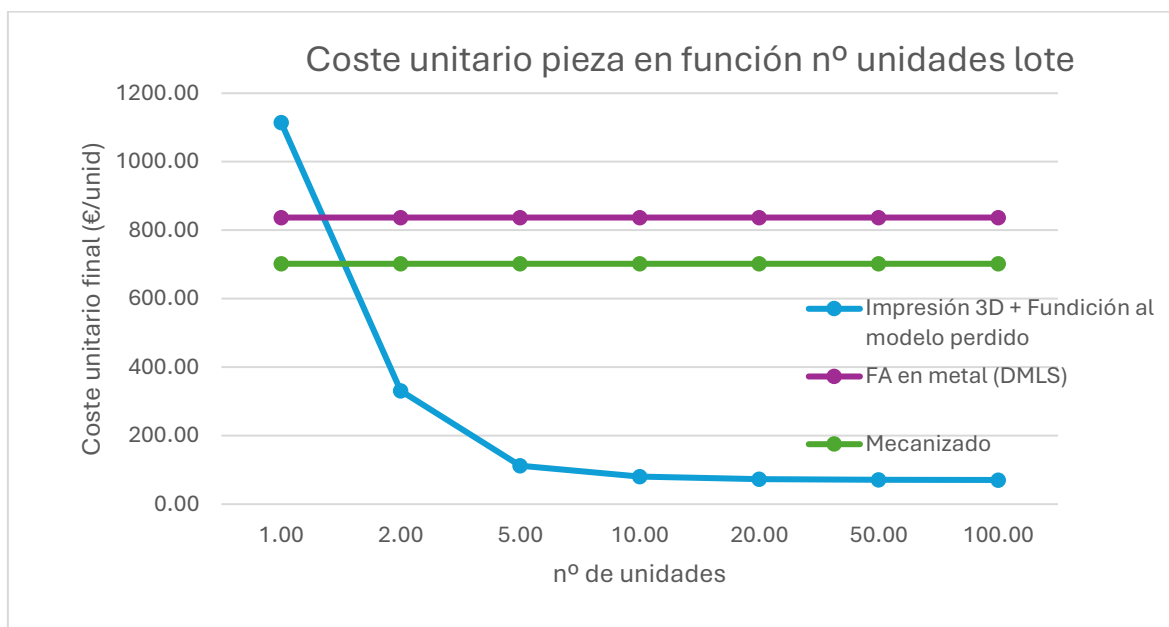
		realizados hasta dar con una fundición exitosa. Conocidos trabajos anteriores se fija este valor en 8 iteraciones [48]
Total Costes Fijos	1043,9 €	

Tabla 20: Costes fijos del proceso de fabricación de fundición al modelo 3D perdido (Fuente: Elaboración propia)

El coste total por unidad puede calcularse según la siguiente fórmula:

$$\text{Coste unitario} = \frac{\text{Costes Fijos Totales}}{\text{Nº de unidades lote}} + \text{Coste Variable Unitario}$$

A continuación, se presenta la gráfica que muestra la evolución de los costes unitarios en función del número de unidades fabricadas:



Gráfica 4: Comparativa del coste unitario por pieza en función nº piezas fabricadas en el lote, entre la fabricación aditiva en metal y la impresión de modelo 3D para fundición al modelo perdido (Fuente: Elaboración propia)

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se presentarán y explicarán las conclusiones extraídas a lo largo del desarrollo del proyecto, organizadas según las distintas fases abordadas en el proyecto. Además, se plantearán una serie de líneas de mejora y propuestas para futuros proyectos que permitan ampliar el estudio y la comprensión de la técnica de fundición al modelo 3D perdido, como alternativa a la FA en metal u otras técnicas de fabricación tradicionales.

5.1 CONCLUSIONES

Diseño:

- Simplificar la geometría del diseño original (plano de diseño brindado por el ISC) no incluyendo redondeos y chaflanes en el diseño 3D. Los redondeos y chaflanes dan problema en etapas posteriores de simulación y optimización.

Simulación y Optimización:

- Si el software de simulación seleccionado es el *Solid Edge* hay que simular y optimizar siempre la pieza individualmente (*.par*) nunca trabajar con el ensamblaje (*.asm*). *Solid Edge* no dispone de entorno de optimización para ensamblajes, por lo que carecería simular la mangueta como pieza de conjunto -con los pernos, rotulas, etc- y luego optimizarla por separado.
- Al tener que trabajar con la pieza individualmente, hay que estudiar como trasladadas las cargas del conjunto a tu pieza por separado. En el caso de la mangueta, las fuerzas de las barras de suspensión están aplicadas sobre unos pernos anclados a la pieza, por ello hay que estudiar como se trasladan dichas fuerzas sobre las caras en las que se apoyan dichos pernos para poder simular correctamente la pieza.

- En la etapa de optimización, el apartado de preservar regiones es crítico realizarlo varias veces e ir corrigiendo errores. Un error muy frecuente al no preservar una región fundamental es que el software retire material de la pieza hasta dividirla en trozos. Estos softwares retiran material en función de esfuerzo que se soportan en dicho punto, no comprenden cual es la utilidad o funcionalidad de la pieza. Por ello, es importante realizar numerosas pruebas hasta encontrar la combinación de regiones preservadas que te permita optimizar la pieza, pero no la estropee.
- En el software de *Altair Inspire* al suavizar la geometría optimizada generando una *PolyNURBS* hay que probar numerosas veces el cómo suavizas la geometría, hasta encontrar un resultado óptimo. Además, hay que tratar y trabajar un poco sobre la malla de superficie para arreglar pequeños defectos (salientes o agujeros) que no han sido suavizados por la *PolyNURBS*.
- En cuanto al diseño del sistema de alimentación se ha puesto en el foco 2 ideas: hacer los bebederos del mayor diámetro posible y colocarlos directamente sobre la pieza, sin canal de ataque. Esto ha ayudado a que los resultados hayan sido tan satisfactorios.

Impresión 3D:

- A pesar de que es fundamental aligerar al máximo el peso de las piezas impresas, para tener que evacuar el mínimo material posible en la volatilización del modelo. En este proyecto, frente a otros anteriores, se ha necesitado cambiar algo los parámetros de impresión para poder imprimir con éxito las piezas. Por ejemplo, el nº de capas superiores e inferiores se ha aumentado de 2 a 4, dada la complejidad de la pieza.
- Pese a ver realizado únicamente una prueba de fundición, se ha observado que el filamento *Moldlay* (especializado para fundición) ha dado muy buen resultado en comparación con antiguos trabajos en *PLA*. En ocasiones, estos últimos mostraban

problemas de evacuación del material o una gran fragilidad que suponían que los modelo se rompiesen al verter el revestimiento cerámico.

Fundición:

- El secado de los moldes está estipulado de acuerdo con el fabricante del revestimiento cerámico, en nuestro caso dadas las grandes dimensiones del molde se ha dejado secando durante 48 horas.
- Se ha cambiado la secuencia de quemado del molde frente a anteriores trabajos, se ha añadido una última etapa (800°C y 120') y se ha mantenido el resto de las etapas. Y los resultados son satisfactorios, ya que a la vista de los resultados obtenidos se ha evacuado todo el material del modelo.
- Antes de realizar la colada del aluminio sobre el molde se ha soplado por uno de los bebederos con una pistola de aire comprimido. Se ha observado como ha salido algún resto de material como alguna fractura del molde cerámico e incluso material del modelo.
- Dado que nuestro molde era tan grande y solo hay un solo horno en el laboratorio, hemos tenido que hacer en dos etapas el quemado del modelo y la fusión del aluminio. Primero se ha quemado el modelo y luego de quemarlo se ha sacado el molde del horno para meter el aluminio. Durante este rato (unos 30 minutos) hasta que el aluminio funde, el molde se va enfriando y empeoraría el choque térmico. En el caso de este proyecto, una vez fundido el aluminio se realizó la colada y a pesar de haber estado fuera, el molde no se fracturó por el choque térmico.

5.2 IDEAS PARA TRABAJOS FUTUROS

- Se recomienda comprobar un nuevo sistema de alimentación, que incluya los respiraderos en las zonas de anclaje de la pinza de freno y el nuevo canal de colada. Para comprobar que el sistema está bien diseñado, antes de realizar la colada real, se recomienda emplear software de simulación de colada como *MagmaSoft* o *SolidCast*.
- En este trabajo y todos los anteriores previos se ha realizado la fabricación de una tapa de molde cerámico que se adaptaba al sistema de alimentación propuesto, es decir, si el sistema de alimentación se cambiaba había que cambiar también a la tapa del molde para asegurar su compatibilidad. Se sugiere el desarrollo de una tapa con una filosofía de diseño similar a una mesa modular de soldadura o mecanizado. De esta forma, que se facilite el ajuste del sistema de alimentación y se reduzcan tiempos en la etapa inicial de comprobación de sistemas de alimentación.
- Con la creciente importancia de la sostenibilidad de la fabricación, se recomienda desarrollar un método fiable que cuantifique la huella de carbono de esta tecnología. Esto podría incluir desde la fusión del aluminio (horno) o la fabricación de los materiales de impresión 3D, entre otras ideas. Con este dato se podría comparar esta tecnología con la FA en metal, que presenta una gran huella de carbono en sus piezas fabricadas.
- Realizar ensayos no destructivos para seguir descubriendo el alcance de esta tecnología.
- Se recomienda pulir el cálculo del presupuesto de las piezas obtenidas con la tecnología de fundición al modelo 3D perdido, para mostrar un presupuesto todavía más realista. Se deberían incluir costes variables como por ejemplo el mecanizado posterior de las piezas – en una máquina CNC de 3 ejes – u otros tratamientos superficiales, entre otros.

- Se recomienda probar el alcance de la tecnología SLA, que en este proyecto no se ha podido comprobar. Dado que, hasta ahora la tecnología SLA no podía imprimir geometrías huecas, lo cual suponía traía problemas a la hora de evacuar y quemar el material. Sin embargo, con la nueva herramienta “ahuecar” de *Preform* y en paralelo a las resinas especializadas para fundición (resinas calcinables), se abre una nueva posibilidad para obtener resultados gratificantes y poder compararlos.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Industria Aeroespacial», DELTECO. Accedido: 9 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://delteco.com/fabricacion-aditiva/industria-aeroespacial/>
- [2] J. D, «The Metal 3D Printer Manufacturers From Around the World», 3Dnatives. Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/en/metal-3d-printer-manufacturers/>
- [3] «Advantages and disadvantages of different additive manufacturing...», ResearchGate. Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Advantages-and-disadvantages-of-different-additive-manufacturing-Technologies-4-6_tbl1_355601884
- [4] «(PDF) COMPARING ENVIRONMENTAL IMPACTS OF METAL ADDITIVE MANUFACTURING TO CONVENTIONAL MANUFACTURING», *ResearchGate*, oct. 2024, doi: 10.1017/pds.2021.67.
- [5] «Fundición a la cera perdida: una guía completa para la fabricación de precisión». Accedido: 15 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.easiahome.com/es/investment-casting-a-comprehensive-guide-to-precision-manufacturing/>
- [6] M. P. Bendsoe y O. Sigmund, *Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [7] «The History of the Topology Optimisation», The History of the Topology Optimisation. Accedido: 11 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://phelipecostapde.blogspot.com/2018/04/the-history-of-topology-optimisation.html>
- [8] «Schematic representation of the performed tests: a circumferential... | Download Scientific Diagram». Accedido: 11 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-the-performed-tests-a-circumferential-shear-test-b-radial_fig3_365414478
- [9] «Fig. 2: The topology optimization gives the “0-1” material distribution...», ResearchGate. Accedido: 11 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/The-topology-optimization-gives-the-0-1-material-distribution-interpreted-as-the_fig3_250437627
- [10] «(PDF) TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OF THE FORMULA STUDENT BELL CRANK», *ResearchGate*, doi: 10.17973/MMSJ.2019_10_201893.
- [11] «Introduction to Fused Deposition Modeling (FDM) - University of Maryland». Accedido: 12 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://dozuki.umd.edu/Wiki/Introduction_to_Fused_Deposition_Modeling_%28FDM%29
- [12] L. C, «Reporte Gartner 2019: La impresión 4D comienza su ascenso», 3Dnatives. Accedido: 12 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/gartner-2019-impresion-4d-140120192/>
- [13] kbbuzztech, «An introduction to 3D Printing», Technorphosis. Accedido: 12 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://technorphosis.wordpress.com/2014/04/30/an-introduction-to-3d-printing/>

-
- [14] «Parámetros básicos de laminado», Filament2Print. Accedido: 12 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://filament2print.com/es/blog/filament2print.com/es/blog/parametros-basicos-laminado?slug=parametros-basicos-laminado&module=smartblog>
 - [15] «Tipos de slicers existen para la impresion 3d», ESAINE. Accedido: 12 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.esaine.com/blog/tipos-de-slicers-existen-para-la-impresion-3d>
 - [16] «Parámetros básicos de laminado», Filament2Print. Accedido: 6 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://filament2print.com/es/blog/filament2print.com/es/blog/parametros-basicos-laminado>
 - [17] «Tipos de impresoras y sus diferencias. | Prusa Knowledge Base». Accedido: 12 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://help.prusa3d.com/es/article/tipos-de-impresoras-y-sus-diferencias-112464>
 - [18] «Creality Ender 3 V3 SE Review with Test Prints - Outstanding Value». Accedido: 12 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://howtomechatronics.com/tools/reviews/creality-ender-3-v3-se-review-with-test-prints-outstanding-value/>
 - [19] «How to Use a Temp Tower in Cura – Simply Explained», All3DP. Accedido: 12 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://all3dp.com/2/temp-tower-cura-tutorial/>
 - [20] «Ajustes de impresión 3D que afectan a la resistencia de las piezas». Accedido: 6 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://markforged.com/es/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-plastics-composites/understanding-3d-printing-strength/3d-printing-settings-impacting-part-strength>
 - [21] I. 3DGuías10 minutos de lectura, «Guía de materiales de impresión 3D: Tipos, aplicaciones y propiedades», Formlabs. Accedido: 6 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://formlabs.com/es/blog/materiales-impresion-3d/?srsltid=AfmBOoryLNSBTD39GPPRJSGd3-CUEwS4HkFkrTHL_Sbyk7au4RyTrVTN
 - [22] «Lati UK Ltd | 3D Printing Materials | PlastikCity». Accedido: 12 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.plastikcity.co.uk/plastic-additive-manufacturing/3d-printing-filament-pellet-powders/lati-uk-ltd>
 - [23] «Materiales de impresión 3D». Accedido: 12 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://markforged.com/es/resources/learn/3d-printing-basics/how-do-3d-printers-work/3d-printing-materials>
 - [24] I. 3DGuías32 minutos de lectura, «Guía sobre impresión 3D por estereolitografía (SLA)», Formlabs. Accedido: 6 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://formlabs.com/es/blog/guia-definitiva-estereolitografia-sla-impresion-3d/?srsltid=AfmBOoq-7nw_QuvdcrMy2L2pyV-kQIG0J0r418owDph-qDUwoMAIJ8pd
 - [25] A. M, «Los diferentes tipos de resinas que existen para la impresión 3D», 3Dnatives. Accedido: 6 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/tipos-resinas-impresion-3d-201220222/>
-

-
- [26] «3D Printing Carbon Fiber and Other Composites». Accedido: 12 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://markforged.com/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-plastics-composites/understanding-3d-printing-strength/3d-printing-carbon-fiber-and-other-composites>
- [27] «TÍTULO DE LA PRESENTACIÓN». Accedido: 6 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://sifo.comillas.edu/pluginfile.php/4611343/mod_resource/content/0/Temas%207-Fabricaci%C3%B3n%20Aditiva-vMJC01-OK-2122.pdf
- [28] «parte del extrusor de una impresora 3d - Buscar con Google». Accedido: 13 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.google.com/search?sca_esv=f23382da9093ac5f&rlz=1C1ONGR_esES968ES969&sxsrf=AE3TifPRECWUEfwDyhO2H_Lk1_DEVSKVVw:1752425193668&udm=2&fbs=AlljpHx4nJjfGoiPVHhEACUHPiMQht6_BFq6vBIoFFRK7qchKEWEvuc0Hbw31oEI7c8o3y7MrLg-jw2yvRwO426LiZnY1W0Dx5SV02EXRv2YI8gZbLWa2FkeB-2F2WkkcUsiL2dzs5hj5ZaxpJeA0iRL9AVdPFkmz5z-5GT0CpfyHnDJYV3G2AYuQI35iduaXqF37RGVNGRZtjdaG0v4W-ffvnKXgHxGEA&q=parte+del+extrusor+de+una+impresora+3d&sa=X&ved=2ahUKEwiw5KfJpLqOAxUaU6QEHUzLG1UQtKgLegQIDhAB&biw=1920&bih=919&pr=1#vhid=eZkh1HkYzertvM&vssid=mosaic
- [29] «La importancia de la isotropía en la impresión 3D», Filament2Print. Accedido: 13 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://filament2print.com/es/blog/filament2print.com/es/blog/isotropia-impresion-3d?slug=isotropia-impresion-3d&module=smartblog>
- [30] «Validación de la isotropía en la impresión 3D por estereolitografía (SLA) | Formlabs». Accedido: 13 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://formlabs.com/es/blog/isotropia-impresion-3D-estereolitografia-sla/?srsltid=AfmBOoocDB9DARCj4GrK5xgqGGtIpuiLWIdnB3i4riiEvfKM0wyF0AY>
- [31] «Conozca la resolución de la impresora 3D fdm: de la base a la mejora». Accedido: 13 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.hp3d.com/blog/Understanding-FDM-3D-Printer-Resolution-From-Basics-to-Improvements.html>
- [32] «Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing | Formlabs». Accedido: 13 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/?srsltid=AfmBOor5ICLNf0pjc78HICjqrj1SRtDe87cGfKUoiGGdMa08h7Hp atKv>
- [33] «What is SLA printing? The original resin 3D print method», Protolabs Network. Accedido: 13 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sla-3d-printing/>
- [34] «Guide to Post-Processing and Finishing SLA Resin 3D Prints | Formlabs». Accedido: 13 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://formlabs.com/blog/post-processing-and-finishing-sla-prints/?srsltid=AfmBOopPPan61chvXK3kQ_xrJDxy7WjUmr5WlpydK52bZHHT0FS3kByl
-

-
- [35] «Qué es la Impresión 3D Multi Jet Fusion (MJF): Tecnología y Ventajas». Accedido: 13 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.weerg.com/es/guias/multi-jet-fusion-mjf-3d-que-es-y-como-funciona>
 - [36] «MJF Multi Jet Fusion, ¿cómo funciona? | Dassault Systèmes®». Accedido: 13 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.3ds.com/es/make/service/3d-printing-service/mjf-multi-jet-fusion>
 - [37] «¿Qué es la fundición de metales y cuáles son sus tipos? – ScrapAd». Accedido: 12 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://scrapad.com/blog/que-es-la-fundicion-de-metales/>
 - [38] «Carcasa del motor», Ningbo Yinzhou Kuangda Trading Co., Ltd. Accedido: 12 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://es.metallecas.com/motor-housing.html>
 - [39] I. 3DGuías17 minutos de lectura, «Introducción a la fundición de metal y formas de combinar la impresión 3D con los procesos de trabajo de fundición», Formlabs. Accedido: 12 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://formlabs.com/es/blog/metal-casting/?srsltid=AfmBOorq3wDPyetuixTlhYzFOumk-n3ujvPFVpuRjY2DGKDNeCConAaP>
 - [40] i.materialise, «Lost Wax Printing & Casting | 3D Printing Technology | i.materialise». Accedido: 12 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://i.materialise.com/en/3d-printing-technologies/lost-wax-printing-casting>
 - [41] G. Prieto, «Los sistemas de dirección y suspensión de los vehículos», Teknia. Accedido: 13 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.tekniagroup.com/es/como-trabajan-los-sistemas-de-direccion-y-suspension-del-vehiculo/>
 - [42] admin, «¿Cuáles son los tipos de suspensión más comunes?», ASOPARTES. Accedido: 13 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://asopartes.com/cuales-son-los-tipos-de-suspension-mas-comunes/>
 - [43] «Modelo de cuarto de carro. | Download Scientific Diagram». Accedido: 13 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/figura-1-Modelo-de-cuarto-de-carro_fig1_277263174
 - [44] «DISEÑO PASO A PASO DE UN RACE CAR-2: TRANSFERENCIAS DE PESOS EN LAS 4 RUEDAS CON CUALQUIER ACELERACIÓN», Graining F1. Accedido: 13 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.grainingf1.com/disenopaso-a-paso-de-un-race-car-2-transferencias-de-pesos-en-las-4-ruedas-con-cualquier-aceleracion/>
 - [45] Í. Manrique Bautista, «Diseño de una mangueta de dirección para un prototipo FSAE. Simulación del comportamiento mediante análisis FEM», 2023, Accedido: 13 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/75428>
 - [46] «Servicio en línea de mecanizado CNC de aluminio | Piezas a medida». Accedido: 25 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.weerg.com/es/mechanizado-cnc-materiales/aluminio>
 - [47] «JiayinChen_01_Memoria».
-

-
- [48] P. Z. Martínez-Pita y M. J. Calzado, «Optimización del proceso de fundición de componentes diseñados con criterios de diseño generativo. Aplicación del test de colabilidad.».
- [49] «MoldLay», Filament2Print. Accedido: 2 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://filament2print.com/es/castables/645-moldlay.html>
- [50] «Formlabs Customer Support», Formlabs Customer Support. Accedido: 29 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://support.formlabs.com/>
- [51] «Casting Tolerances - Castings PLC». Accedido: 14 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://castings.plc.uk/company/technical-assistance/casting-tolerances/>
- [52] «SatinCast 20 | Shor International». Accedido: 9 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ishor.com/satincast-20>
- [53] «Homepage», Xometry Europe. Accedido: 9 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://xometry.eu/es/>
- [54] «Prototipado rápido con la impresión 3D». Accedido: 9 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://markforged.com/es/resources/blog/understanding-rapid-prototyping-with-3d-printing>
- [55] «MoldLay», Filament2Print. Accedido: 7 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://filament2print.com/es/castables/645-moldlay.html>
- [56] «Comprar Cestable Wax 40 Resin Cartridge de Formlabs | Tienda Sicnova», Sicnova 3D. Accedido: 7 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://tienda.sicnova3d.com/formlabs-materiales/8608-castable-wax-40-formlabs-resina-para-impresora-3d?utm_campaign=shopping&utm_source=googleads&utm_medium=cpc&utm_content=22548283407&gad_source=1&gad_campaignid=22548283407&gbraid=0AAAAACanBzXWaGsflBpwpMWhKW5azNazv&gclid=CjwKCAjw4K3DBhBqEiwAYtG_9KN8moVgePs1jdI3bTnLESnosHfsrRtfvLwTNo94PuKbQvJhHnUzjxoCWH8QAvD_BwE
- [57] «Sinterizado directo de metal por láser | 3D | Protolabs». Accedido: 4 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.protolabs.com/es-es/servicios/impresion-3d/sinterizado-directo-de-metal-por-laser/>
- [58] «Precio Aluminio 99.5% pureza minima LME spot price, precio por tonelada métrica 2025 | Datosmacro.com». Accedido: 9 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://datosmacro.expansion.com/materias-primas/aluminio?anio=2025>
- [59] administrador, «Costes fijos y variables, y fórmulas del Punto de Equilibrio». Accedido: 9 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mba-madrid.com/empresas/costes-fijos-variables-punto-equilibrio/>
- [60] «Sueldo: Ingeniero De Diseno en España 2025», Glassdoor. Accedido: 9 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.glassdoor.es/Sueldos/ingeniero-de-diseno-sueldo-SRCH_KO0,19.htm
- [61] «Solid Edge pricing | Siemens Software», Siemens Digital Industries Software. Accedido: 9 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/solid-edge/pricing/>

7. ANEXO I

Ficha técnica Prusa i3+:

Ficha técnica Prusa i3+:

PRUSA I3KS – MK3S+



PARÁMETROS TÉCNICOS

Volumen de Impresión	25×21×21 cm (9.84"×8.3"×8.3")
Altura de capa	0.05 - 0.35 mm
Nozzle	0.4mm por defecto, amplia gama de otros diámetros/boquillas compatibles
Diámetro del filamento	1.75 mm
Materiales compatibles	Amplia gama de termoplásticos, incluyendo PLA, PETG, ASA, ABS, PC (Policarbonato), CPE, PVA/BVOH, PVB, HIPS, PP (Polipropileno), Flex, nGen, Nylon, Carbon filled, Woodfill y otros materiales rellenos.
Velocidad máxima de desplazamiento	200+ mm/s
Temperatura máxima de la boquilla	300 °C / 572 °F
Temperatura máxima de la base	120 °C / 248 °F
Extrusor	Accionamiento directo, engranajes Bondtech, hotend E3D V6
Superficie de impresión	Láminas de acero magnético desmontables(*) con diferentes acabados de superficie, base calefactable con compensación de esquinas frías
Dimensiones de la impresora (sin bobina)	7 kg, 50×55×40 cm; 19.6×21.6×15.7 in (X×Y×Z)
Consumo de energía	Ajustes PLA: 80W / Ajustes ABS: 120W

Ficha técnica DT600:

DYNAMICAL TOOLS DT600+



Dynamical Tools
Impresión 3D



ESPECIFICACIONES DT 600



Electrónica

Alimentación	240V, 50-60Hz
Máximo consumo de energía	30W/h
Conectividad	WiFi, Ethernet, Hot Spot, Mobile phone interface
Tipo de Drivers	Industrial Stepper Driver
Tipo de Motor	Industrial Stepper motor
Interfaz	7" Touch Screen LCD
Procesador	QuadCore 1,6 GHz



Datos de impresión

Norma de fabricación	Standard ISO 2676-1
Diámetro del filamento	1,75mm
Software	Simplify 3D
Tipos de archivos	STL/OBJ/AMF
Diámetro de cabezal	0,4
*Otros diámetros opcionales	0,2, 0,6, 0,8, 1,0, 1,2
Extrusor	Doble cabezal independiente
Modos de impresión	Twin Mode - Dual Mode - Single Mode
Materiales	Materiales técnicos como ABS, ASA, HIPS, PC, PP, EP, Wood, Filw, Fibra de carbono, conductivos o magnéticos.



Mecánica

Temperatura máxima de superficie de impresión	150° c
Temperatura máxima de extrusor	500° c
Estructura de aluminio anodizado	
Sistema de extracción rápida de la superficie de impresión	
Ejes X/Y antibalbalá	
Husillos de bolas con tuerca flotante	
Sistema de guiado lineal de alta precisión	
Asistente de alineación de cabezales	
Sistema de fabricación modular para un bajo mantenimiento	



Dimensiones

Tamaño de impresora	1145X700X930 mm.
Volumen de construcción	600X450X450 mm.

Hotend con separación térmica de filamento
Entorno calefactado - Temperatura interior controlada.


WiFi


Protección de potencia


Procesador 1,6 GHz


Hot End hasta 500°


Doble cabezal independiente


Fabricación híbrida


Cámara de monitorización


Sistema modular


Nivelación automática


Entorno calefactado & HE


Notificación PDSH


Mantenimiento de precisión

Ficha técnica Form 3L:

FORMLABS – FORM 3 – 3L

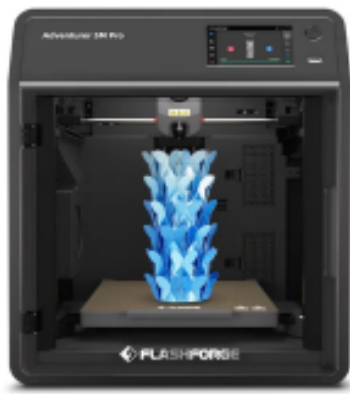


Tech Specs	Form 3	Form 3L
TECHNOLOGY	Low Force Stereolithography (LFS) [™]	
BUILD VOLUME W x D x H		
LAYER THICKNESS	25 - 300 microns (0.001 - 0.012 in)	
LASER POWER	1x 250 mW laser	2x 250 mW laser
LASER SPOT SIZE	85 microns	
WARRANTY AND SERVICE	One Year Warranty included, Extended Warranty, Pro Service, and Enterprise Plan available.	One Year Warranty included. Additional service options available once shipping.
SOFTWARE COMPATIBILITY	Windows 7 and up // Mac OSX 10.6.8 and up	
FILE TYPE	STL or OBJ	

Ficha técnica Flashforge Adventurer 5M Pro:



Ficha Técnica



ADVENTURER 5M PRO

FLASHFORGE

Incluye: Capacitación virtual de 3 horas y 24 meses de garantía

Volumen de impresión	220 x 220 x 220 mm
Resolución de Capa	0.10-0.40 mm
Velocidad Máxima	600 mm/s
Tecnología	FDM
Tipo de Extrusor	Directo
Diámetro de Boquilla	0.4mm

Comprar por Whatsapp

Especificaciones Técnicas

Volumen de impresión 220 x 220 x 220 mm	Resolución de Capa 0.10-0.40 mm	Velocidad Máxima 600 mm/s	Tecnología FDM
Tipo de Extrusor Directo	Diámetro de Boquilla 0.4mm	Firmware N.A.	Temp. Máx. de Extruso... 280 °C
Temp. Máx. de Platafo... 110 °C	Materiales Compatibles PLA, PETG, PLA-CF, T...	Diámetro de Filamento 1.75 mm	Conectividad USB, WIFI, Ethernet
Software Compatibles FlashPrint 5, Prusa ...	Formatos Compatibles 3MF, STL, OBJ, FPP, ...	Dimensiones del Produc... 363 x 402 x 448 mm	Peso del Producto 10,8 kg
Tipo de pantalla Táctil de 4.3"	Consumo Eléctrico 350W	Tipo de Impresora Core XY	Retomar Impresión Si
Sensor de Filamento Si	Tipo de Plataforma Magnética PEI	Sistema de Extrusión Único	Dimensiones de la Caja 440 x 440 x 490 mm

Ficha Técnica PLA básico:



Ficha Técnica

El filamento Control 3D BASICO es un filamento PLA diseñado para impresoras 3D FDM / FFF. Este filamento destaca por su buena adhesión a la cama y bajo efecto 'warping', además de tener una muy buena adhesión entre capas, buena resistencia mecánica y baja retracción y emisión de olores. ¡Un material idóneo especialmente para aquellos que se están iniciando en el mundo de la Impresión 3D!

Este filamento de PLA está fabricado y empaquetado en España.

ESPECIFICACIONES FILAMENTO	UNIDAD	VALOR
Diámetro	mm	1.75±0.05/2.85±0.05
Desviación redondez máxima	mm	0.05
Peso neto	g	1,000/500/250

PROPIEDADES FÍSICAS	NORMA	UNIDAD	VALOR
Peso específico	ASTM D792	g/cm³	1.24
PROPIEDADES MECÁNICAS	NORMA	UNIDAD	VALOR
Resistencia a tracción	ISO 527-1	MPa	45
Módulo de tracción	ISO 527-1	MPa	3500
Elongación a rotura	ISO 527-1	%	5
Resistencia al impacto Izod con entalla	ISO 179-1eA	J/m	118
PROPIEDADES TÉRMICAS	NORMA	UNIDAD	VALOR
Temperatura de flexión bajo carga	ISO 527-1	°C	60

PARÁMETROS DE IMPRESIÓN	UNIDAD	VALOR
Temperatura de la boquilla	°C	190-220
Temperatura de la cama	°C	No es necesario (60° opcional)
Modificación de la cama	-	--
Velocidad del ventilador	%	100
Altura de capa	mm	0.1-0.3
Espesor de pared	mm	1.2
Velocidad de impresión	mm/s	Hasta 120 mm/s

Certificaciones

El filamento Control 3D BASICO no está certificado para su uso en productos que vayan a estar en contacto con alimentos o para aplicaciones médicas.

Consideraciones de seguridad

Se recomienda un lugar de trabajo con una buena ventilación.

Cláusula de ausencia de garantía y responsabilidades

Los datos facilitados son meramente informativos y han sido obtenidos por nuestro proveedor. En ningún caso constituyen garantía jurídica en cuanto a propiedades y/o funcionalidad de la aplicación del material.

Ficha técnica del *Moldlay* filament:

General information

Material	PLA
Format	50 g / 250 g / 750 g
Density	1.18 g/cm ³
Filament diameter	1.75 / 2.85 mm
Filament tolerance	± 0.1 mm
Filament length	(Ø1.75 mm, 0.25 kg) ±88.1 m / (Ø2.85 mm, 0.25 kg) ±33.2 m / (Ø1.75 mm, 0.75 kg) ±264.2 m / (Ø2.85 mm, 0.75 kg) ±99.6

Printing properties

Printing temperature	200 - 220 °C
Print bed temperature	20 °C
Chamber temperature	X
Cooling fan	✓
Recommended printing speed	- mm/s

Mechanical properties

Elongation at break	20 %
Tensile strength	42 MPa
Tensile modulus	1950 MPa
Flexural strength	- MPa
Flexural modulus	- MPa
Surface hardness	-

Thermal properties

Melting temperature	170 °C
Softening temperature	- °C
Softening temperature	55 °C

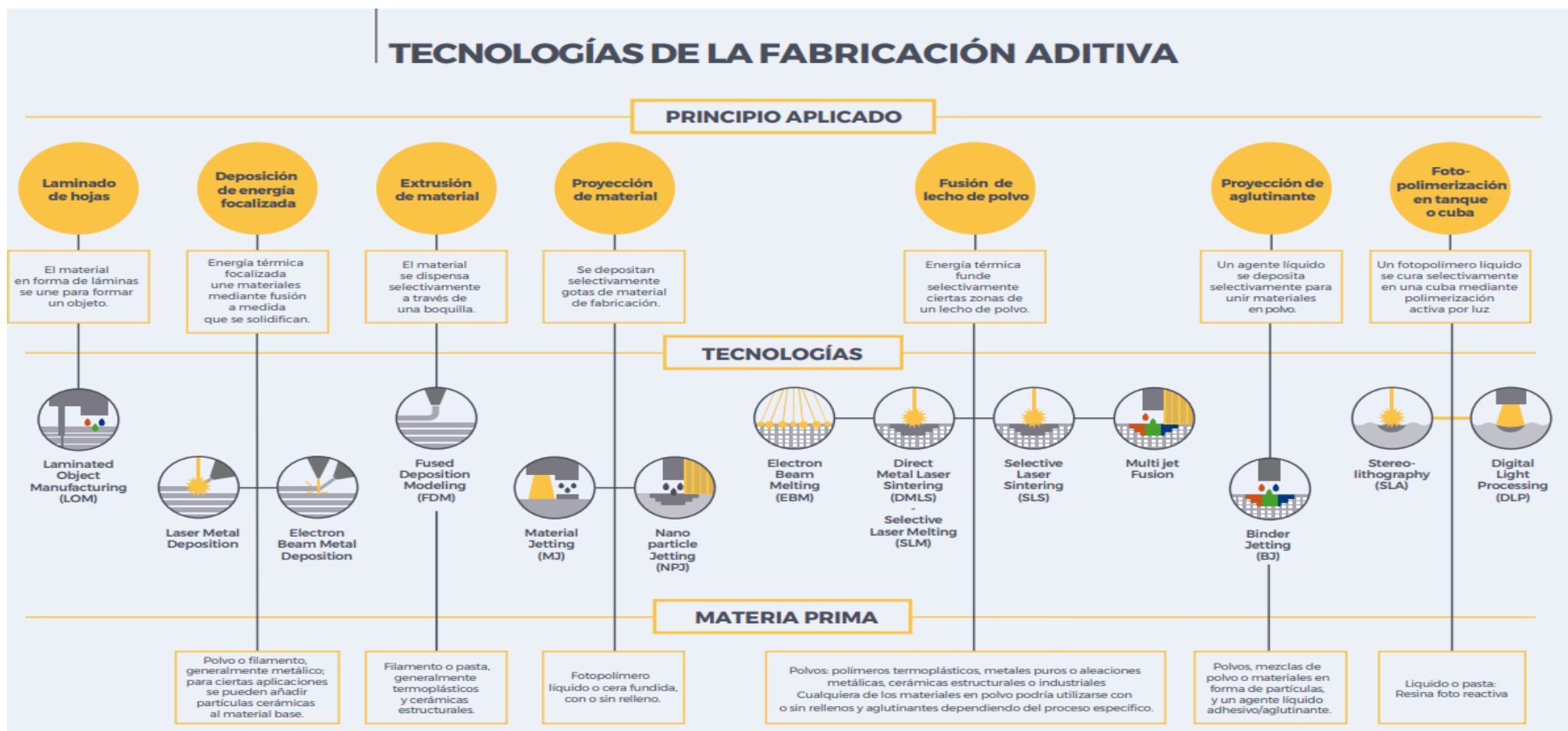
Specific properties

Transparency	X
--------------	---

Other

HS Code	3916.9
Spool diameter (outer)	200 mm
Spool diameter (inner hole)	125 mm
Spool width	30 mm

Norma UNE-EN ISO/ASTM 5290:



Plano de la mangueta original IFS-06:

