



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS  
INDUSTRIALES

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Análisis económico y medida del aumento de la eficiencia  
de un taller de fabricación mecánica mediante la  
utilización de la impresión 3D

Autor: M<sup>a</sup> Victòria Llorach Ferrando

Director: Mariano Jiménez Calzado

Madrid

Junio de 2025



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
“ ANÁLISIS ECONÓMICO Y MEDIDA DEL AUMENTO DE LA EFICIENCIA DE UN  
TALLER DE FABRICACIÓN MECÁNICA MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE LA  
IMPRESIÓN 3D ”

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.: María Victoria Llorach Ferrando

Fecha: 22 / 07 /2025

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Mariano Jiménez Calzado

Fecha: 22 / 07 /2025

EL CODIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Javier Manini Gumz

Fecha: 22 / 07 /2025



# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Análisis económico y medida del aumento de la eficiencia  
de un taller de fabricación mecánica mediante la  
utilización de la impresión 3D

Autor: M<sup>a</sup> Victòria Llorach Ferrando

Director: Mariano Jiménez Calzado

Madrid



## Agradecimientos

A mi hermano Miquel, por su ayuda siempre y por ser mi ejemplo a seguir.

Al resto de mi familia por su apoyo incondicional durante todo este tiempo.

A Mariano Jiménez, por su colaboración y orientación durante todo el transcurso de este proyecto.



# ANÁLISIS ECONÓMICO Y MEDIDA DEL AUMENTO DE LA EFICIENCIA DE UN TALLER DE FABRICACIÓN MECÁNICA MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE LA IMPRESIÓN 3D

**Autor:** Llorach Ferrando, Maria Victòria.

Director: Jiménez Calzado, Mariano.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

## RESUMEN DEL PROYECTO

**Palabras clave:** Impresión 3D, Fabricación aditiva, Utillaje, Eficiencia, Coste, Taller mecánico.

### 1. Introducción

La fabricación aditiva, ha transformado los modelos tradicionales de producción, especialmente en entornos como los talleres mecánicos. En 2024, el mercado de la impresión 3D alcanzó un valor aproximado de 20,60 mil millones de USD. Se estima que crecerá a una tasa compuesta anual (CAGR) del 22,1% entre 2025 y 2034, proyectando un valor de 124,24 mil millones de USD para 2034 [1], cosa que lo hace un mercado muy atractivo.

Este proyecto analiza su impacto económico y funcional al diseñar e imprimir en 3D un utillaje de sujeción para soldadura.

### 2. Definición del proyecto

Se diseñó un utillaje de sujeción mecánica destinado a facilitar distintas posiciones de soldadura (a tope, en solape y en T). Este diseño iteró y optimizó a través de varias versiones hasta alcanzar una configuración final funcional. La pieza se imprimió con Onyx (nylon con fibras de carbono) en una Markforged X7, y se calculó coste de fabricación.

### 3. Descripción de la herramienta

El sistema diseñado se apoya sobre una placa de acero inoxidable de 300x300 mm, unida a una base de aluminio ranurada. La figura 1 muestra el diseño modular final del utillaje:



*Figura 1: Arquitectura de la herramienta: utillaje de sujeción para 3 posiciones de soldadura.  
Fuente: elaboración propia.*

#### 4. Resultados

- Se fabricó una única pieza con una masa de 91,36 g y un tiempo de impresión de 8 horas y 34 minutos, que costó 88,80€.

#### 5. Conclusiones

- Tras la fabricación del prototipo y su prueba en el laboratorio, las conclusiones que se pudieron obtener fueron que la pieza es completamente funcional para realizar el punteo previo a la soldadura de dos placas de aluminio o de acero.



*Figura 2: Resultado punteado en posición de solape. Fuente: Elaboración propia.*

- Para realizar soldaduras continuas se identificaron limitaciones significativas ya que, en este tipo de operaciones, el calor generado es más persistente y debido a la dispersión térmica la transmisión de calor a lo largo de las placas metálicas fundía el utillaje.



*Figura 3: Resultado soldadura continua en posición de solape. Fuente: Elaboración propia.*

## 6. Referencias

- [1] «Estudio del Mercado de Impresión 3D, Informe 2025-2034». Accedido: 25 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en:  
<https://www.informesdeexpertos.com/informes/mercado-de-impresion-3d>

# **ECONOMIC ANALYSIS AND MEASUREMENT OF EFFICIENCY IMPROVEMENT IN A MECHANICAL WORKSHOP THROUGH THE USE OF 3D PRINTING**

**Author: Llorach Ferrando, Maria Victoria.**

Supervisor: Jiménez Calzado, Mariano.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

## **ABSTRACT**

**Keywords:** 3D Printing, Additive Manufacturing, Tooling, Efficiency, Cost, Mechanical Workshop.

### **1. Introduction**

Additive manufacturing has transformed traditional production models, particularly in environments such as mechanical workshops. In 2024, the global 3D printing market reached an approximate value of USD 20.60 billion. It is projected to grow at a compound annual growth rate (CAGR) of 22.1% between 2025 and 2034, reaching an estimated USD 124.24 billion by 2034 [1], making it a highly attractive market.

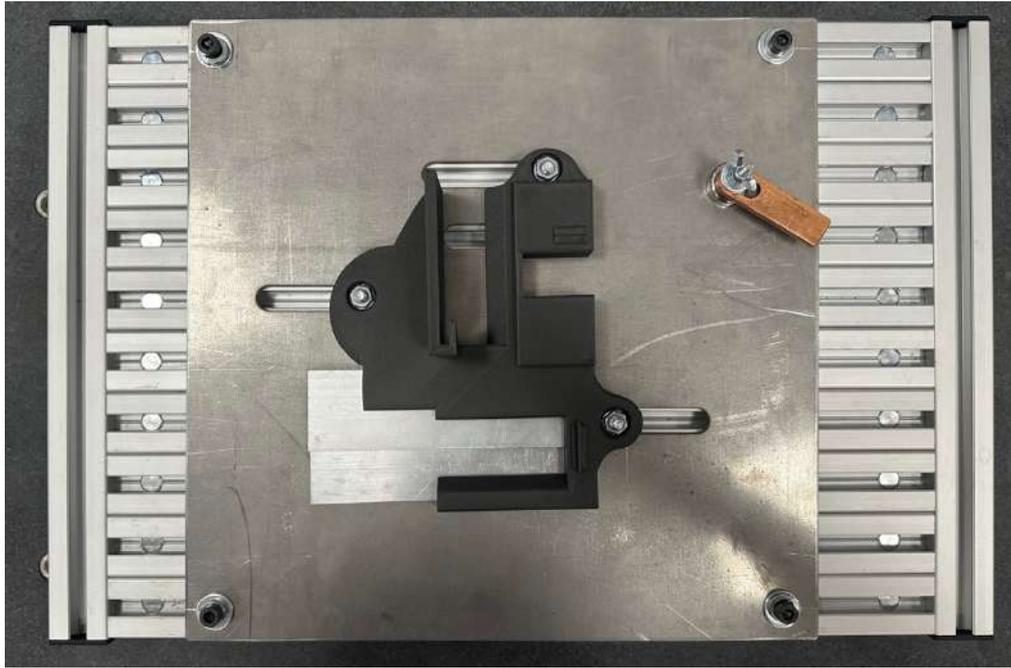
This project analyzes the economic and functional impact of designing and 3D-printing a custom welding clamping fixture.

### **2. Project definition**

A mechanical clamping fixture was designed to enable various welding positions (butt, lap, and T-joint). The design went through several iterations until a functional final version was achieved. The part was printed in Onyx (nylon reinforced with carbon fiber) using a Markforged X7, and its manufacturing cost was calculated.

### **3. Tool description**

The system is mounted on a 300x300 mm stainless steel plate, fixed to a slotted aluminum base.



*Figura 4: Tool architecture: clamping fixture for 3 welding positions.  
Source: Own elaboration.*

#### 4. Results

A single piece was fabricated using the Markforged X7 printer with Onyx material. It had a mass of 91.36 g, a print time of 8 hours and 34 minutes, and a total cost of €88.80.

#### 5. Conclusions

- After fabrication and laboratory testing, it was concluded that the part is fully functional for tack welding aluminum or steel plates.



*Figura 5: Tack welding result in lap joint position.  
Source: own elaboration.*

- For continuous welding, significant limitations were identified, as the sustained heat generated in these operations, along with thermal dispersion through the metal plates, caused the fixture to melt.



*Figura 6: Continuous weld result in lap joint position.*  
Source: Own elaboration.

## 6. References

- [1] “3D Printing Market Study, Report 2025–2034.” Accessed: March 25, 2025. Available at: <https://www.informesdeexpertos.com/informes/mercado-de-impresion-3d>

## Contenido

Capítulo 1. Introducción .....	19
1.1. Motivación del proyecto .....	19
1.2. Objetivo del trabajo .....	20
1.3. Alineación con los ODS .....	21
Capítulo 2. Estado del arte.....	23
2.1. Conceptos fundamentales .....	23
2.1.1. Historia y precedentes de la I3D.....	23
2.1.2. Tecnologías más comunes .....	25
2.1.3. Materiales más comunes.....	34
2.2. Eficiencia Operativa en Talleres Mecánicos .....	38
2.2.1. Factores clave que afectan la eficiencia en talleres mecánicos .....	38
2.2.2. Papel de la I3D en la optimización de procesos y la mejora de la eficiencia de un taller	39
2.2.3. Impresión 3D de utillaje .....	40
2.3. Impacto Económico de la Impresión 3D .....	47
2.3.1. Reducción de costos en la producción.....	48
2.3.2. Optimización de tiempos en la fabricación .....	48
2.3.3. Análisis de la rentabilidad de la I3D.....	51
2.3.4. Casos de estudio: Implementación de impresión 3D en talleres .....	52
2.4. Impacto Medioambiental y Sostenibilidad .....	57
2.4.1. Reducción de residuos y uso eficiente de materiales.....	57
2.4.2. Ahorro energético en comparación con métodos tradicionales .....	58
2.4.3. Impresión 3D y economía circular .....	59
2.4.4. Sostenibilidad e I3D: BOEING .....	61
2.5. Limitaciones y Retos de la Impresión 3D .....	62
2.5.1. Limitaciones técnicas y operativas .....	63
2.5.2. Inversión inicial y curva de aprendizaje .....	63
2.6. Tendencias Futuras de la Fabricación Aditiva en Talleres Mecánicos .....	64
Capítulo 3. Metodología.....	66
3.1. Planificación .....	66
3.2. Recursos a emplear.....	67

3.3. Entorno de soldadura del laboratorio.....	67
3.3.1. Soldadura TIG .....	67
3.3.2. Soldadura MIG.....	69
Capítulo 4. Desarrollo .....	72
4.1. Diseño.....	72
4.1.1. Primera versión del utillaje .....	72
4.1.2. Segunda versión utillaje .....	74
4.1.3. Tercera versión del utillaje.....	75
4.1.4. Cuarta versión del utillaje .....	76
4.1.5. Futuras versiones y mejoras .....	76
4.1.6. Diseño y disposición de ranuras en la placa de acero .....	78
4.2. Pinza de masa magnética.....	81
4.3. Material de impresión.....	81
4.4. Impresión.....	82
4.4.1. Primera impresión .....	82
4.4.2. Segunda impresión .....	83
Capítulo 5. Análisis de Resultados.....	84
5.1. Análisis técnico .....	84
5.1.1. Pieza final.....	84
5.1.2. Prueba del utillaje.....	86
5.2. Análisis económico .....	88
5.2.1 Costes del servicio.....	88
5.2.2 Costes del pedido y parámetros de impresión.....	89
5.3. Simulación de impresión metálica.....	90
Capítulo 6. Conclusiones y Trabajos Futuros.....	92
Bibliografía.....	94
Anexos.....	96
Anexo A: Planos.....	96
Anexo B: Ficha técnica impresora MarkForged X7.....	98
Anexo C: Material: ONYX .....	99
Anexo D: Imágenes cámara térmica soldadura .....	101



## Índice de Figuras

Figura 1: Arquitectura de la herramienta: utillaje de sujeción para 3 posiciones de soldadura. ....	8
Figura 2: Resultado punteado en posición de solape. Fuente: Elaboración propia. ....	8
Figura 3: Resultado soldadura continua en posición de solape. Fuente: Elaboración propia. ....	9
Figura 4: Tool architecture: clamping fixture for 3 welding positions.....	11
Figura 5: Tack welding result in lap joint position.....	11
Figura 6: Continuous weld result in lap joint position. Source: Own elaboration. ....	12
Figura 7: ODS 8.....	21
Figura 8: ODS 9.....	22
Figura 9: ODS 12.....	22
Figura 10: Seis grados de libertad de una pieza [8].....	41
Figura 11: Guía de broca de Formlabs [8].....	43
Figura 12: Moldes impresos en 3D para fundición de XometryPro.....	43
Figura 13: Mordaza de agarre metálica de Markforged [9].....	44
Figura 14: Mordaza de agarre Onyx de Markforged [9]. ....	44
Figura 15: Utillaje de comprobación de iMES3D.....	44
Figura 16: Utillaje de montaje de iMES3D.....	45
Figura 17: Herramienta de mantenimiento, reparación y revisión de Siemens Energy [9].....	45
Figura 18: Herramienta de inspección de MarkForged. ....	45
Figura 19: Tiempos y costes de utillaje rápido I3D vs mecanizado [10]. ....	46
Figura 20: Polaridad de la soldadura. ....	47
Figura 21: Coste unitario vs Volumen de producción.....	51
Figura 22: Logo silam. ....	52
Figura 23: Ejemplos de prototipos impresos en 3D para SILAM. ....	53
Figura 24: Logo Brose.....	53
Figura 25: Base de suspensión de asiento con piezas fabricadas mediante SLA y SLS. ....	54
Figura 26: Versión de uso final. ....	55
Figura 27: Acoplamiento de araña impreso en 3D para una máquina de AM Tool.....	56
Figura 28: Uso de la I3D en Boeing. ....	61
Figura 29: Cronograma TFG.....	67
Figura 30: Esquema soldadura TIG.....	68
Figura 31: Soldadura TIG.....	68
Figura 32: Esquema soldadura MIG.....	70
Figura 33: Soldadura MIG.....	71

Figura 34: Posiciones de soldadura. ....	72
Figura 35: Aproximación utillaje soldadura a tope. ....	73
Figura 36: Aproximación utillaje soldadura en solape. ....	73
Figura 37: Aproximación utillaje soldadura en “T”. ....	73
Figura 38: Primera versión del utillaje de sujeción. ....	74
Figura 39: Diseño final 2.1. ....	75
Figura 40: Diseño final con vaciado 2.2. ....	75
Figura 41: Espacio insuficiente para soldadura en solape. ....	76
Figura 42: Posiciones de soldadura. ....	76
Figura 43: Propuesta diseño para 5 posiciones de soldadura (1). ....	77
Figura 44: Propuesta diseño para 5 posiciones de soldadura (2). ....	78
Figura 45: Propuesta diseño para 5 posiciones de soldadura con vaciado hexagonal. ....	78
Figura 46: Diseño ranuras y agujeros placa metal. ....	79
Figura 47: Proceso de corte por chorro de agua. ....	80
Figura 48: Configuración final placas. ....	80
Figura 49: Pinza magnética. ....	81
Figura 50: Filamento de Onyx de Markforged. ....	82
Figura 51: Infill del proceso de impresión del utillaje. ....	83
Figura 52: Montaje final para soldadura en solape. ....	84
Figura 53: Montaje final para soldadura a tope. ....	85
Figura 54: Montaje final para soldadura en “T”. ....	85
Figura 55: Resultado punteo a tope. ....	86
Figura 56: Resultado punteo en solape. ....	86
Figura 57: Resultado punteo en “T”. ....	87
Figura 58: Resultado soldadura a tope. ....	87
Figura 59: Resultado soldadura en solape. ....	87
Figura 60: Resultado soldadura en “T”. ....	88

## Índice de Tablas

Tabla 1: Tecnologías de la I3D.....	34
Tabla 2: Tipos de materiales de impresión 3D.....	38
Tabla 3: Tiempos I3D y mecanizado de utillaje rápido [8].....	49
Tabla 4: Tabla comparativa de tiempos y perdidas [8]. ....	50
Tabla 5: Tiempos y costes I3D vs CNC sujeción con guía personalizada [8].....	50
Tabla 6: Datos del servicio de impresión. ....	89
Tabla 7: Costes del servicio de impresión.....	89
Tabla 8: Datos y costes del pedido.....	90

## Capítulo 1. Introducción

### 1.1. Motivación del proyecto

La fabricación aditiva, más conocida como impresión 3D, ha supuesto una auténtica revolución en el campo de la ingeniería y la manufactura. Esta tecnología, que permite la creación de piezas y componentes capa a capa a partir de un modelo digital, no solo está transformando los métodos tradicionales de producción, sino que también está generando nuevas oportunidades para optimizar los recursos y aumentar la eficiencia en los procesos industriales.

En el caso específico de un taller de fabricación mecánica, la adopción de la impresión 3D implica beneficios económicos significativos y una mejora en la productividad. Por un lado, la fabricación aditiva reduce considerablemente el desperdicio de material al trabajar únicamente con el volumen estrictamente necesario para la pieza final, en contraposición a métodos tradicionales como el mecanizado, donde el material sobrante puede ser considerable. Por otro lado, esta tecnología elimina la necesidad de recurrir a terceros para la fabricación de componentes específicos, reduciendo los gastos asociados al transporte, las comunicaciones entre empresas externas y los tiempos de espera, al posibilitar la producción directa y bajo demanda en las instalaciones propias.

Además, la fabricación aditiva no solo optimiza procesos internos, sino que también permite innovar en el diseño de productos. Las piezas complejas que antes eran imposibles o extremadamente costosas de producir ahora pueden fabricarse con facilidad, lo que abre la puerta a nuevas aplicaciones y diseños más eficientes.

En este contexto, analizar el impacto económico y medir el aumento de la eficiencia derivado de la implementación de la impresión 3D en un taller de fabricación mecánica resulta fundamental. Este análisis no solo evidencia los beneficios inmediatos en términos de costos y productividad, sino que también sirve como modelo para promover la adopción de tecnologías avanzadas en otras áreas industriales.

La propuesta de este Trabajo de Fin de Grado (en adelante TFG) consiste en analizar el ahorro que se consigue aplicando la fabricación aditiva en un taller de fabricación mecánica, concretamente en los procesos en que se necesita un utillaje de sujeción específico. Para ello, se diseñará y se imprimirá una pieza del laboratorio y se analizarán sus costes. Se comparará con lo que costaría pedir la pieza a un proveedor externo que ha sido fabricada mediante métodos convencionales. Se calculará también el punto de equilibrio en el cual es rentable hacer una inversión en una impresora 3D.

La fabricación mecánica se enfrenta constantemente al desafío de mejorar la eficiencia de sus procesos, reducir costos operativos y adaptarse a las demandas de un mercado en constante evolución. En este contexto, la incorporación de tecnologías innovadoras como la impresión 3D, también conocida como fabricación aditiva, representa una oportunidad única para transformar los talleres mecánicos.

La impresión 3D no solo permite optimizar los recursos materiales al reducir el desperdicio en comparación con métodos tradicionales, sino que también elimina la dependencia de herramientas específicas o de proveedores externos para la creación de piezas complejas o personalizadas. Este avance tecnológico tiene el potencial de disminuir significativamente los costes iniciales, los tiempos de producción y los gastos logísticos, ofreciendo una solución más sostenible y eficiente.

Además, la capacidad de esta tecnología para producir geometrías complejas y ligeras, imposibles de lograr con métodos tradicionales, abre nuevas posibilidades para diseñar y fabricar piezas con un rendimiento optimizado. Estas características no solo impactan positivamente en los costos y la productividad, sino que también promueven la innovación en los procesos de diseño y fabricación.

El análisis económico del impacto de la impresión 3D en un taller de fabricación mecánica resulta esencial para entender cómo esta tecnología puede contribuir al crecimiento competitivo de la industria. Asimismo, medir el aumento de la eficiencia operativa permitirá cuantificar los beneficios de su implementación, generando una base sólida para promover su adopción a gran escala.

Este tema no solo es relevante desde el punto de vista técnico y económico, sino que también tiene implicaciones importantes en la sostenibilidad y en la transición hacia modelos de producción más inteligentes, flexibles y responsables.

## **1.2. Objetivo del trabajo**

En el siguiente TFG se pretende realizar el análisis detallado de costes de fabricación de un utillaje de sujeción fabricado mediante la impresión 3D y un utillaje fabricado por un proveedor externo mediante el método convencional CNC.

- a. Se analizarán con detalle las fases de concepción, diseño y fabricación, de distintos utillajes de sujeción de cara a su posterior optimización mediante la utilización de tecnologías de ingeniería inversa e impresión 3D. Se realizarán pruebas reales con los recursos disponibles en los laboratorios de fabricación aditiva.

- b. Se diseñará un tornillo de banco universal y los utillajes de sujeción para una estación de soldadura.
- c. Selección del material de impresión: existen varias alternativas dependiendo de las propiedades físicas y térmicas. Se elegirá el material más adecuado para este ensayo.
- d. Mejora del proceso: una vez obtenido un primero prototipo se repetirá el proceso hasta que se encuentre el mejor resultado.
- e. Análisis de costes de la operación, así como el punto de equilibrio
- f. Evaluación del impacto ambiental de los materiales usados en la fabricación del utillaje de sujeción.

### 1.3. Alineación con los ODS

La implementación de tecnologías innovadoras como la impresión 3D en talleres de fabricación mecánica no solo contribuye a la mejora de la eficiencia y la competitividad empresarial, sino que también está alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) promovidos por la ONU. Este enfoque permite abordar desafíos globales como el crecimiento económico inclusivo, la sostenibilidad en los procesos productivos y la construcción de infraestructuras resilientes. A continuación, se detalla cómo este análisis se relaciona con los ODS 8, 9 y 12, destacando su relevancia para fomentar un desarrollo equilibrado y sostenible.<sup>1</sup>



Figura 7: ODS 8.

Fuente:

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

La adopción de la impresión 3D fomenta el crecimiento económico al optimizar los procesos productivos, reducir costos y aumentar la competitividad de los talleres de fabricación mecánica. Además, impulsa la creación de empleo en sectores relacionados con tecnologías avanzadas, promoviendo la capacitación de los trabajadores y mejorando sus condiciones laborales. Al reducir tiempos de producción y eliminar la dependencia de proveedores externos, las empresas pueden generar valor agregado y estimular el desarrollo económico local.

---

<sup>1</sup> [1]



Figura 8: ODS 9.  
Fuente:

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

La impresión 3D impulsa la innovación al permitir la creación de productos más complejos, ligeros y personalizados que serían imposibles de fabricar mediante métodos tradicionales. Esta tecnología refuerza la industria de la fabricación, promoviendo infraestructuras más eficientes, adaptables y sostenibles. Asimismo, al reducir el consumo de materiales y energía, contribuye a la transición hacia modelos de producción más avanzados y responsables, alineados con las demandas de la industria 4.0.



Figura 9: ODS 12.  
Fuente:

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

La fabricación aditiva promueve un uso más eficiente de los recursos al minimizar el desperdicio de materiales y optimizar los procesos de producción. Esto contribuye a una economía más circular, donde los insumos se aprovechan al máximo y los residuos se reducen significativamente. Además, la posibilidad de fabricar piezas bajo demanda elimina la necesidad de grandes inventarios y reduce los costos asociados al transporte y almacenamiento, fomentando patrones de consumo y producción más responsables y sostenibles y reduciendo la huella de carbono que generan otros métodos de fabricación convencional.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> [2]

## Capítulo 2. Estado del arte

### 2.1. Conceptos fundamentales

#### 2.1.1. Historia y precedentes de la I3D

La historia de la impresión 3D se origina en 1976, año en que se creó la impresora de inyección de tinta. Es en este momento en el que varios cambios y progresos en la idea de la inyección de tinta revolucionan la tecnología de impresión con tinta hacia la impresión con materiales.

En la década de los 1980s, un equipo francés de ingenieros, Alain Le Méhauté, Olivier de Witte y Jean-Claude André, se interesan por la tecnología de fabricación mediante solidificación de resinas fotosensibles curadas con luz UV. El proyecto fue presentado al Centro Nacional de Investigación Científica de Francia (CNRS), pero finalmente no se aprobó, debido, entre otras cosas, a la aparente falta de áreas de aplicación.

Fue en 1984 que todo cambió, Charles Hull, inventa la estereolitografía, un proceso de impresión que utiliza la tecnología para crear un modelo 3D a partir de una imagen y permite que los usuarios prueben un diseño antes de que se invierta en la fabricación del modelo definitivo. Este modelo se imprime mediante la estratificación de resina gracias a un láser de luz UV. Obtiene una patente por su creación y funda la compañía 3D Systems en 1986.

Unos años más tarde, en 1987, aparece el Sinterizado selectivo por láser o SLS gracias a los profesores norteamericanos Carl Deckard y Joe Beaman. También funciona con un láser para solidificar un polvo de plástico, metal o cerámica, creando capas transversales.

Más adelante, en 1988 surge la que es ahora la técnica más utilizada, la Deposición de Filamento Fundido o FDM. Sus creadores, Scott y Lisa Crump, luego fundaron Stratasys, una de las empresas más importantes del sector. Esta impresión 3D usa una máquina que calienta un filamento que pasa por una boquilla y se va depositando capa por capa en una cama.

Cuando analizamos las perspectivas de la fabricación aditiva en los años 80, encontramos 4 etapas asociadas con su uso: prototipado rápido, reducción de gastos, creación digital directa y fabricación in situ. En la práctica, esto se traduce en la interpretación del diseño por parte de la impresora 3D, permitiendo realizar distintas pruebas para obtener el objeto deseado.

La introducción de tecnologías como la estereolitografía (SLA), modelado por deposición fundida (FDM), sinterizado selectivo por láser (SLS) y fabricación de objetos laminados (LOM), hizo esto posible. Las mejoras en los productos y en la producción a baja escala repercutió

significativamente sobre las pequeñas y medianas empresas, impulsando otras innovaciones para el servicio de impresión 3D en los años 90.

En vista del ahorro de costos, eliminación de moldes y elaboración de piezas con mayor calidad para las industrias tradicionales, surgió la fabricación digital directa (DDM) en la década del 2000. Por otra parte, la disponibilidad de archivos CAD online facilitó que el usuario final pudiera crear sus propios diseños. Semejante a los sitios “peer to peer” (P2P), las personas comparten esta información para crear sus propios modelos en casa.

Lo más importante en cuanto al diseño y distribución, es la incorporación de un nuevo paradigma de fabricación. Mediante una mayor personalización, ajustes puntuales, procesos simplificados e infraestructura menor, existen ventajas innegables. Además de hacer más eficiente la cadena de suministro, las empresas fabrican lo que quieren, cuando quieren y sin importar su ubicación.

En 2024, el mercado de la impresión 3D alcanzó un valor aproximado de 20,60 mil millones de USD. Se estima que crecerá a una tasa compuesta anual (CAGR) del 22,1% entre 2025 y 2034, proyectando un valor de 124,24 mil millones de USD para 2034. [3] Este aumento se ve impulsado por la adopción de la tecnología en sectores emergentes como la moda, la arquitectura, la alimentación y el arte, donde las empresas buscan crear productos personalizados, reducir residuos y mejorar los tiempos de producción [4].

En el ámbito de la atención sanitaria, la impresión 3D ha transformado la atención al paciente al permitir la producción de dispositivos médicos personalizados, implantes y modelos anatómicos adaptados a cada individuo. Los cirujanos utilizan modelos impresos en 3D para la planificación quirúrgica, lo que permite procedimientos más precisos y eficaces con menos riesgos. Además, las técnicas de bioimpresión son prometedoras para la ingeniería de tejidos y la medicina regenerativa, explorando la posibilidad de imprimir órganos y tejidos para trasplantes [5]

La industria de la impresión también está evolucionando hacia la sostenibilidad y la economía circular. El compromiso con la sostenibilidad sigue siendo fundamental, impulsando el uso de materiales reciclables, biodegradables y energías renovables. Las tintas ecológicas, los papeles reciclados y los procesos de producción eficientes en recursos están marcando la diferencia para las empresas que buscan destacarse como responsables y alineadas con los objetivos ambientales globales.

En el sector de la construcción, la impresión 3D está revolucionando la edificación de viviendas, ofreciendo reducciones en los tiempos de construcción de hasta un 70% y en los costos de alrededor del 25%, además de proporcionar una gran libertad de diseño. Empresas en España,

como Evocons y Be More 3D, están desarrollando sistemas innovadores para imprimir edificios de varias alturas, contribuyendo a enfrentar la crisis global de vivienda mediante soluciones más rápidas y económicas [6].

A pesar de los desafíos relacionados con los costos iniciales y la escalabilidad, la impresión 3D está ganando interés gracias a su potencial para mejorar la eficiencia y reducir el impacto ambiental en diversos sectores. La capacidad de producir piezas detalladas y personalizadas con formas complejas la convierte en el método preferido para fabricar componentes precisos y especializados [3].

A medida que la tecnología se hace más accesible, la fabricación aditiva se hace más viable económicamente. El avance en materiales de impresión como plásticos, maderas, metales, poliácido láctico o incluso hormigón, sigue ampliando la versatilidad de estos sistemas. Ya existen las RepRaps, máquinas autorreplicables de uso personal y otros sistemas que se verán a continuación.

Sumado a esto, el mayor impacto económico de la incorporación del servicio de impresión 3D está relacionado con el diseño. Para lotes pequeños, el prototipado rápido favorece la funcionalidad y mayor complejidad sin aumentar gastos. Con moldes tradicionales, los cambios son más difíciles y consumen más tiempo, incidiendo en el costo final. Se analizará en este trabajo el primer caso, en concreto el prototipado de utillajes de sujeción para una estación de soldadura y un sistema de sujeción universal.

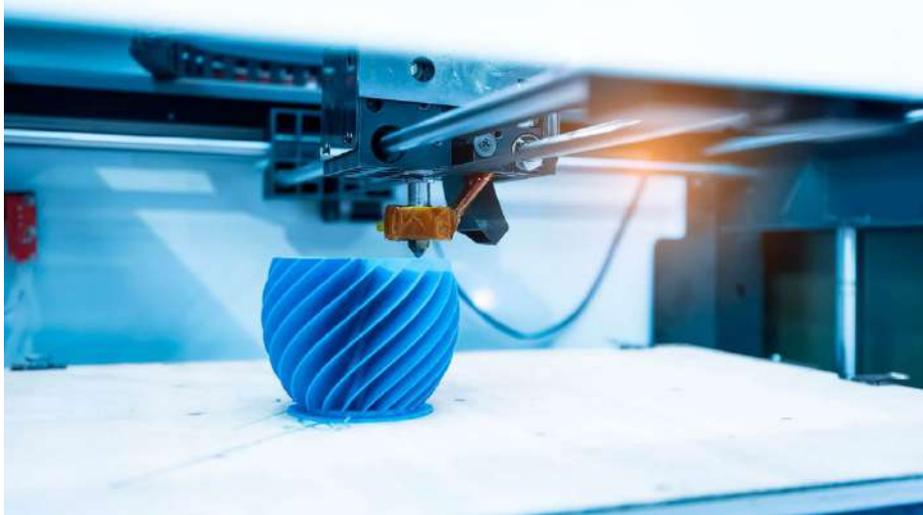
### **2.1.2. Tecnologías más comunes**

La impresión 3D ha ido evolucionando desde sus inicios y ahora permite trabajar con una amplia variedad de materiales, que se clasifican según sus propiedades físicas, químicas y aplicaciones. La diversidad de materiales para impresión 3D permite cubrir un amplio rango de necesidades, desde prototipos básicos hasta piezas funcionales en sectores como la medicina, la industria automotriz, la aeroespacial y la arquitectura. La elección del material depende de las propiedades mecánicas, térmicas y estéticas requeridas por el proyecto.

Entre las más avanzadas destacan el Modelado por Deposición Fundida (FDM), la Estereolitografía (SLA), la Sinterización Selectiva por Láser (SLS) y la tecnología CFR (Continuous Fiber Reinforcement), un proceso que permite reforzar piezas impresas con fibras continuas. También cabe resaltar la tecnología HP Multi Jet Fusion, conocida por su capacidad para imprimir piezas sin necesidad de soportes y con una precisión excepcional.

a. Modelado por Deposición Fundida (FDM) o Fabricación por Fusión de Filamento (FFF):

La distinción principal entre FDM y FFF radica en su procedencia. FDM es una tecnología registrada por Stratasys, mientras que FFF es un término más general empleado para describir métodos similares de impresión 3D. Debido a que FDM es una tecnología patentada, únicamente las impresoras 3D desarrolladas por Stratasys pueden emplear esta denominación para referirse a su proceso de fabricación. En cambio, otras compañías utilizan el término FFF para referirse a técnicas equivalentes sin infringir derechos de propiedad intelectual.



*Figura 10: Impresión 3D FDM.*

*Fuente: <https://innovacion-tecnologia.com/fabricacion-aditiva/fdm-modelado-por-deposicion-fundida/>*

Tanto las impresoras FDM como las FFF pueden trabajar con diversos materiales termoplásticos, como PLA, ABS, PETG y nylon, entre otros. No obstante, la diferencia radica en la compatibilidad con materiales específicos, la cual puede variar según la marca y el modelo de la impresora. En términos generales, las impresoras 3D FDM suelen ofrecer una mayor precisión y mejor calidad de superficie que las FFF. Esto se debe a la tecnología patentada y los estándares de fabricación de FDM, que contribuyen a una mejor resolución y un acabado más detallado en las piezas.

Las impresoras 3D FDM son compatibles con una amplia gama de termoplásticos, incluidos materiales de alto rendimiento como PLA, ABS, PETG, nylon y policarbonato. Gracias a esta versatilidad, los usuarios pueden imprimir objetos con propiedades específicas, como resistencia térmica, flexibilidad o tolerancia a sustancias químicas. Muchas impresoras FDM cuentan con cámaras cerradas y sistemas avanzados de control de temperatura, lo que proporciona mayor estabilidad térmica durante la impresión. Esto es particularmente útil para materiales sensibles al calor, como el ABS, que pueden deformarse si la temperatura del entorno no se mantiene constante.

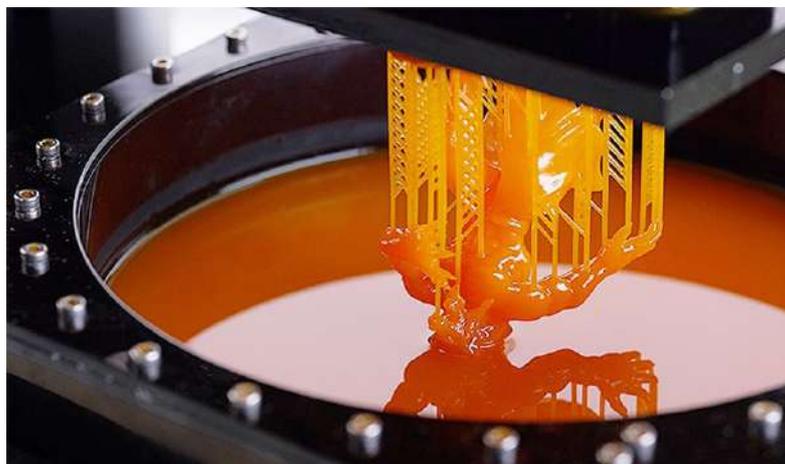
Esta tecnología se basa en calentar un material termoplástico y extruirlo capa por capa para crear un objeto en 3D. Para ello se usa un software CAD para crear el modelo y luego se convierte el archivo en un STL que procesa el modelo con un software de corte (*slicing*) que divide el modelo en capas y genera el código para la impresora. La impresora calienta la boquilla extrusora y deposita el material fundido capa por capa sobre la base de impresión. A medida que el material enfría, se solidifica y se fusiona con la capa anterior. Se pueden realizar operaciones adicionales como lijado, pintado o eliminación de soportes si el diseño lo requiere.

Las ventajas son el coste accesible en comparación con otras tecnologías de impresión. Es fácil de usar y con una amplia variedad de materiales. Además, es adecuada para prototipos, modelos funcionales y piezas de uso final.

Sin embargo, las desventajas del FDM es que puede presentar líneas visibles entre capas, afectando al acabado superficial. De ello resulta una menor precisión y resolución en comparación con la SLA o SLS. Algunas piezas requieren de soportes para imprimir correctamente por lo que luego necesitan un post procesamiento para llegar al acabado final.

#### b. Estereolitografía (SLA)

La estereolitografía (SLA) es una de las tecnologías de impresión 3D más comunes. Funciona mediante el curado de una resina fotosensible líquida utilizando un láser ultravioleta (UV), lo que permite la fabricación de objetos con alta resolución y detalles finos. Se ha vuelto muy popular por su capacidad de producir prototipos y piezas de uso final de alta precisión, isotrópicos y estancos. Las impresoras 3D SLA producen piezas con diversas propiedades avanzadas de los materiales, acabados de la superficie de gran calidad y detalles precisos.



*Figura 11: Impresión 3D SLA.*

*Fuente: <https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-por-estereolitografia-les-explicamos-todo/>*

Como en el caso anterior se diseña un modelo 3D en software CAD y se convierte en un archivo STL. Se pasa por un software de corte y se generan las instrucciones para la impresora.

Las impresoras 3D SLA utilizan luz para curar materiales termoendurecibles reactivos a la luz, a los que denominamos "resinas". Un tanque contiene resina líquida fotosensible y un láser UV solidifica selectivamente la resina en la forma deseada, capa por capa. Cuando se exponen las resinas de SLA a determinadas longitudes de onda de luz, se produce la unión de cadenas moleculares cortas, con lo que los monómeros y oligómeros se polimerizan en geometrías rígidas o flexibles solidificadas. La pieza terminada se retira del tanque y se limpia con alcohol isopropílico para eliminar el exceso de resina.

Las ventajas de este método son la alta precisión y resolución, que la hace ideal para modelos detallados y piezas pequeñas. Tiene también un muy buen acabado superficial en comparación con FDM y las piezas SLA requieren menos postprocesado. Además, cuentan con un gran nivel de detalle, por ello es excelente para aplicaciones como joyería, odontología y prototipos funcionales. En cuanto a los materiales posibles a usar para este método, existe una gran versatilidad: se pueden usar resinas estándar, flexibles, biocompatibles y resistentes al calor.

No obstante, también existen varias desventajas. Una de ellas es el costo elevado, tanto las impresoras como las resinas suelen ser más caras que en el método anterior. En cuanto a las piezas fabricadas, un problema es la fragilidad de estas. Algunos materiales SLA pueden ser más quebradizos en comparación con termoplásticos. Por otro lado, el proceso de postacabado en este método es necesario, pues las piezas deben limpiarse y curarse antes de su uso final. Otra limitación es la sensibilidad a la luz ultravioleta. Las piezas pueden degradarse con el tiempo si están expuestas prolongadamente a la luz solar.

Sus principales ámbitos de aplicación son la odontología y la medicina, con la producción de modelos dentales, prótesis y guías quirúrgicas. Otra industria de aplicación es la de la joyería con la creación de modelos para fundición de piezas detalladas. Para la Ingeniería y prototipado también es útil cuando se requiere la fabricación de piezas de alta precisión para pruebas y validaciones. Finalmente, también es aplicable a la industria aeroespacial y automotriz para la producción de componentes complejos para pruebas funcionales.

La impresión SLA es una excelente opción cuando se necesita una calidad superior y un alto nivel de detalle, aunque con un costo más alto y un proceso de postprocesado necesario.

c. Sinterización Selectiva por Láser (SLS)

La sinterización selectiva por láser (SLS) es una tecnología de impresión 3D que utiliza un láser de alta potencia para fusionar partículas de polvo y formar objetos sólidos capa por capa. Es una de las técnicas más avanzadas y se usa principalmente en aplicaciones industriales debido a su resistencia mecánica y libertad de diseño.

En este caso lo que se hace es una sinterización capa por capa. Un rodillo extiende una capa delgada de polvo en la plataforma de construcción y posteriormente un láser de CO<sub>2</sub> o fibra escanea selectivamente la capa y sinteriza (funde parcialmente) las partículas de polvo, formando la estructura deseada. La plataforma baja y se repite el proceso con una nueva capa de polvo hasta completar la pieza. Una vez terminada la impresión, la pieza se deja enfriar dentro del polvo sinterizado para evitar deformaciones. Luego, se extrae y se limpia con aire comprimido o medios abrasivos para eliminar el exceso de polvo. Se pueden realizar tratamientos adicionales, como teñido, recubrimiento o pulido, para mejorar la apariencia y propiedades mecánicas.



Figura 12: Resultados de la impresión SLS.

Fuente: [https://formlabs.com/es/blog/que-es-sinterizado-selectivo-laser/?srsltid=AfmBOooNYqC2MgYzdyJ0Zljj8Wzg7i3c8\\_Dd4IGhFno7\\_0efz30YewP5](https://formlabs.com/es/blog/que-es-sinterizado-selectivo-laser/?srsltid=AfmBOooNYqC2MgYzdyJ0Zljj8Wzg7i3c8_Dd4IGhFno7_0efz30YewP5)

Este método ofrece una serie de ventajas como son que no necesita soportes, pues como la pieza está rodeada de polvo sinterizado, no requiere estructuras de soporte adicionales. Por otro lado, en cuanto a sus propiedades, ofrece una alta resistencia mecánica; se producen piezas duraderas, resistentes al impacto y al calor. Por lo que respecta a la geometría, este método puede imprimir geometrías complejas permitiendo fabricar estructuras intrincadas y diseños imposibles de lograr con otros métodos. Los materiales de impresión en este método son muy variados, se pueden utilizar polvos de polímeros (como nylon), metales y cerámicas. en cuanto al volumen de

producción, se puede fabricar en lote debido a que este proceso es ideal para fabricar varias piezas a la vez en el mismo proceso de impresión.

Como desventajas está el costo elevado de, tanto las impresoras, como de los materiales, que son más caros que en FDM o SLA. Además, se añade el coste de equipos especializados debido a que la manipulación del polvo y el postprocesado necesitan herramientas específicas. El acabado final de la pieza es rugoso; las piezas suelen tener una textura granular debido al proceso de sinterización. Por otro lado, para evitar deformaciones, las piezas deben enfriarse dentro del polvo durante varias horas.

Este método se usa en la industria aeroespacial y automotriz para la producción de piezas funcionales resistentes y ligeras. También es aplicable en el campo de la medicina y ortopedia en los procesos de fabricación de prótesis personalizadas y dispositivos médicos. También es útil en los procesos de prototipado y manufactura en serie por su ventaja de poder crear piezas finales sin necesidad de moldes. Finalmente, y de nuestro interés, en el campo del diseño e ingeniería tiene una amplia aplicación ya que este método permite fabricar de piezas complejas con gran precisión y durabilidad.

La impresión SLS es ideal para la producción de piezas industriales de alta calidad, especialmente cuando se necesita resistencia mecánica y libertad de diseño sin la necesidad de estructuras de soporte.

#### d. HP Multi Jet Fusion

La impresión 3D Multi Jet Fusion (MJF en adelante), desarrollada por HP, es una tecnología avanzada de fabricación aditiva que utiliza un agente de fusión y un agente de detalle para producir piezas con alta precisión, rapidez y resistencia mecánica. A diferencia de la sinterización selectiva por láser (SLS), MJF no emplea un láser, sino que usa inyección de agentes químicos y calor para fusionar el material en polvo.

Se diseña el objeto en software CAD y se convierte en un archivo 3D estándar como STL, del mismo modo que en los casos anteriores, un software de corte (*slicing*) genera las capas y define la trayectoria de impresión.

El proceso de impresión consiste en extender una capa de polvo de polímero (generalmente nylon) sobre la plataforma de construcción. Seguidamente un cabezal de impresión similar al de una impresora de inyección de tinta deposita dos tipos de agentes líquidos. Por un lado, un agente de fusión que se aplica en las áreas donde el polvo debe fusionarse. Por otro lado, se deposita un

agente de detalle que se usa en los bordes de la pieza para mejorar la precisión y el acabado. A continuación, una lámpara térmica pasa sobre la capa, activando los agentes y fusionando el material en las zonas deseadas. La plataforma baja y el proceso se repite hasta completar la pieza. Tras la impresión, el conjunto de piezas se deja enfriar dentro del polvo restante para evitar deformaciones. En el proceso de postacabado, se extraen las piezas y se limpian con aire comprimido o medios abrasivos. Opcionalmente, las piezas pueden someterse a teñido, recubrimiento o pulido para mejorar su apariencia.

Este método ofrece una serie de ventajas, entre ellas se encuentra la alta velocidad de impresión; la MJF es más rápida que SLS, lo que la hace ideal para producción en serie. Por otro lado, ofrece una alta precisión y atención al detalle gracias al agente de detalle que permite obtener piezas con bordes definidos y una resolución superior. Otra ventaja de este método de impresión es que no requiere soportes; el polvo circundante sostiene las piezas durante la impresión, eliminando la necesidad de estructuras de soporte como en el método SLS. En cuanto a los materiales usados en este método suelen ser resistentes y funcionales, por lo que se producen piezas con propiedades mecánicas similares a las de inyección de plástico. Además, se puede reciclar hasta el 80% del polvo no fusionado dando lugar a una mayor eficiencia en el uso del material.



*Figura 13: Resultados de la impresión con la HP MJF.*  
*Fuente: <https://www.3dnatives.com/es/guia-completa-multi-jet-fusion/>*

Sin embargo, esta tecnología no es accesible para uso doméstico, pues requiere de equipos industriales. también tiene el inconveniente del coste elevado de la tecnología y de los materiales, que son más caros que en FDM o SLA. Siguiendo con los materiales, existe una limitación de la variedad de materiales que se pueden usar. Actualmente, MJF se usa principalmente con nylon y poliuretanos. Como para la impresión SLA y SLS requiere de postprocesado; las piezas requieren limpieza y a veces teñido para mejorar su acabado.

Entre las áreas de aplicación de este método se encuentran la automotriz y aeroespacial que la usan para la creación de componentes funcionales y ligeros. También se usa en la industria media y ortopédica para la producción de prótesis y soportes personalizados. En cuanto al mundo de la ingeniería de diseño y prototipado, se usa para la creación de modelos con alto nivel de detalle, precisión y para la producción en serie, ya que permite fabricar de piezas finales con rapidez y sin necesidad de moldes.

La tecnología HP Multi Jet Fusion es una opción ideal para la producción eficiente y precisa de piezas funcionales, ofreciendo ventajas significativas en velocidad y calidad en comparación con otras técnicas de impresión 3D.

e. CFR (Continuous Fiber Reinforcement)

La impresión 3D CFR es un método avanzado de fabricación aditiva que combina polímeros con fibras de refuerzo continuas para producir piezas extremadamente resistentes y ligeras. Se utiliza principalmente en aplicaciones industriales, como la aeroespacial, automotriz y manufactura, donde se requieren materiales con alta resistencia mecánica y bajo peso.

El proceso de impresión CFR es similar al modelado por deposición fundida (FDM), pero con una diferencia clave. En este caso se utilizan dos materiales simultáneamente:

- Filamento base: Un polímero termoplástico como nylon, PETG o PEEK.
- Fibra de refuerzo: Puede ser fibra de carbono, vidrio o kevlar, que se deposita de manera continua dentro de la matriz plástica.

Para el diseño del modelo se hace exactamente lo mismo que para los métodos anteriores. Se crea el diseño 3D en software CAD y se convierte en un archivo STL. Luego, un software de corte (*slicing*) determina cómo se integrarán las fibras en la estructura de la pieza.

El método de impresión consiste en depositar el material base en capas, como en FDM. Simultáneamente, un segundo extrusor coloca las fibras continuas en zonas estratégicas, aumentando la resistencia de la pieza. Una vez impresa, la pieza puede requerir lijado, recubrimiento o perforado según su aplicación.

Como ventajas este método ofrece una alta resistencia mecánica gracias a las fibras continuas, las piezas pueden ser tan fuertes como el aluminio, pero mucho más ligeras, otra ventaja de este método, el bajo peso. Las fibras de carbono reducen el peso sin sacrificar rigidez o durabilidad. La pieza final depende del material base, pero por lo general las piezas pueden soportar altas temperaturas y agentes corrosivos. También permite optimizar los diseños y fabricar geometrías

complejas con refuerzos internos estratégicos. Cosa que da lugar a otra ventaja, un menor desperdicio de material, en comparación con los métodos tradicionales como el mecanizado.

El inconveniente de este método es su elevado precio tanto para las impresoras como para los materiales de fibra continua. La velocidad de impresión también es más lenta debido a la necesidad de colocar las fibras con precisión. Además, las opciones de materiales son más limitadas; aunque crece la variedad, la tecnología está mayormente enfocada en nylon y polímeros de alto rendimiento.

Este proceso de impresión 3D se encuentra en la industria aeroespacial y automotriz; para la producción de piezas estructurales resistentes y ligeras. También tiene uso en la manufactura industrial para la fabricación de herramientas, plantillas y piezas de maquinaria. Se puede hallar en el mundo de los deportes y rendimiento, pues es útil para la producción de bicicletas, cascos y equipos de alto rendimiento. Finalmente, es aplicable en la medicina para prótesis y exoesqueletos ya que permite crear dispositivos médicos ligeros y resistentes.

La impresión CFR es una excelente opción cuando se requiere combinar la flexibilidad del diseño aditivo con la resistencia de los materiales compuestos, ofreciendo soluciones innovadoras para la industria moderna.

A continuación, se muestra una tabla comparativa entre los métodos explicados anteriormente para ilustrar de manera clara para qué se usa cada método de impresión aditiva.

<b>Tecnología</b>	<b>Aplicaciones</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Limitaciones</b>
<b>FDM o FFF</b>	Prototipos básicos, piezas funcionales de bajo coste.	Bajo coste, amplia variedad de materiales, fácil de usar.	Baja resolución y acabado superficial, limitada a plásticos termoplásticos.
<b>SLA</b>	Prototipos de alta precisión, aplicaciones médicas y dentales.	Alta resolución y detalles finos, excelente acabado superficial.	Materiales frágiles, costo más elevado, limitado a resinas.
<b>SLS</b>	Piezas funcionales, prototipos complejos e industriales.	No requiere soportes, piezas fuertes y funcionales.	Alto coste, requiere equipamiento especializado.
<b>HP Multi Jet Fusion</b>	Producción en serie, piezas funcionales, prototipos avanzados.	Alta velocidad, precisión excepcional, piezas sin	Limitado a materiales en polvo, requiere

		soportes, permite series pequeñas y personalizadas.	inversión inicial elevada.
CFR	Herramientas y plantillas de ensamblaje personalizadas. Reemplazo de piezas metálicas en maquinaria.	Mayor resistencia mecánica, similar a la del aluminio. Reducción de peso en comparación con metales tradicionales. Ideal para aplicaciones industriales, aeroespaciales y automotrices. Piezas funcionales listas para uso final con propiedades avanzadas.	Alto coste, tiempo de impresión, complejidad en el diseño (no todas las geometrías son compatibles). Equipos especializados.

Tabla 1: Tecnologías de la I3D.

Fuente: Elaboración propia.

### 2.1.3. Materiales más comunes

La variedad de materiales disponibles para la impresión 3D se ha expandido significativamente desde los inicios de esta tecnología. La elección del material adecuado es un factor clave, ya que determina las propiedades mecánicas, estéticas y funcionales de las piezas impresas. Desde plásticos como PLA y ABS hasta metales, cerámicas e incluso materiales biocompatibles, cada tipo de insumo ofrece características específicas que se adaptan a distintas aplicaciones industriales y comerciales.

En este apartado, se explorarán los principales materiales utilizados en la impresión 3D, sus ventajas y limitaciones, así como los sectores en los que cada uno es más utilizado. Además, se analizarán las innovaciones recientes en materiales avanzados, que están permitiendo nuevas posibilidades en ámbitos como la medicina, la ingeniería y la fabricación personalizada.

#### a. Termoplásticos: Estándar, de ingeniería y de alto rendimiento

Los termoplásticos son algunos de los materiales más comunes en la fabricación aditiva. Se trata de materiales plásticos que pueden fundirse y solidificarse repetidamente sin perder sus propiedades. Los procesos de impresión 3D termoplástica implican el calentamiento de un material plástico hasta que es semiformal para crear una forma. Los termoplásticos comunes

suelen ser resistentes y se deforman en lugar de fracturarse bajo tensión, pero tienen un punto de fusión relativamente bajo y baja resistencia química y a la abrasión.

Podemos clasificar los termoplásticos de impresión 3D en tres tipos principales:

- Estándar
- De ingeniería o rendimiento
- De alto rendimiento

Tanto los aficionados como los profesionales suelen utilizar plásticos estándar. Entre ellos están el PLA y el ABS, que son fáciles de imprimir en 3D.

Como el Nylon o el PETG, los plásticos de ingeniería son más difíciles de imprimir, ya que requieren temperaturas de extrusión más altas y, normalmente, un marco cerrado para protegerlos de las corrientes de aire o los cambios de temperatura.

Los polímeros de alto rendimiento, como el PEEK, son privilegiados cuando las piezas deben soportar altas temperaturas, productos químicos, humedad, etc. Estos materiales de impresión 3D cuestan más y requieren una impresora 3D de alta temperatura.

Se utilizan en métodos como FFF y SLS para la impresión de este tipo de materiales.

#### b. Materiales compuestos de impresión 3D

Tradicionalmente, los materiales compuestos son muy valiosos debido a sus propiedades. Se trata de materiales que combinan una matriz polimérica con fibras de refuerzo (como carbono, vidrio o Kevlar) para beneficiarse de las diversas ventajas que ofrecen los distintos tipos de materiales y mejorar la resistencia mecánica.

Compuestos conocidos y ampliamente utilizados, como la fibra de carbono, ofrecen una alta relación resistencia-peso en las industrias automotriz y aeroespacial. Con la reciente innovación de la impresión 3D de materiales compuestos, se pueden fabricar piezas lo suficientemente resistentes para su uso en aplicaciones de ingeniería donde las propiedades de los métodos de impresión más comunes no serían suficientes. En la impresión 3D, los materiales compuestos pueden reemplazar eficazmente los componentes de aluminio mecanizados tradicionalmente, ya que combinan la resistencia y la rigidez del metal con la facilidad de la fabricación aditiva.

Los materiales compuestos pueden incluir elementos básicos como el PLA relleno de madera, pero también pueden contener materiales muy fuertes y resistentes como el Nylon relleno de fibra de carbono o el PEEK. Incluso es posible depositar largas hebras de fibra directamente durante el proceso de impresión 3D con el equipo adecuado.

---

c. Fotopolímeros

Los fotopolímeros son polímeros líquidos que cambian de estructura al exponerse a una fuente de luz. Al ser catalizados con radiación UV, estas resinas líquidas se solidifican. A diferencia de los termoplásticos, los fotopolímeros no se pueden fundir, ya que el proceso de polimerización es un cambio molecular. Debido a las propiedades específicas que permiten la fotopolimerización, las resinas suelen ser frágiles y no tan duraderas como los termoplásticos, ya que se degradan con el tiempo debido a la exposición continua a los rayos UV.

Se utilizan en la impresión SLA.

Ejemplos: Resinas estándar, flexibles, resistentes al impacto y biocompatibles.

d. Metales y cerámica

La impresión 3D de metal ha sido un objetivo recurrente en la fabricación aditiva, pero hasta hace poco se ha visto limitada por el coste, la complejidad y las limitaciones de material. Cada vez más fabricantes del ecosistema de impresión 3D están desarrollando soluciones para imprimir metales y cerámicas en 3D.

Los metales no se extruyen con la misma facilidad que los termoplásticos y requieren altas temperaturas y potencia para alcanzar un estado moldeable. Para implementar la fabricación aditiva de metal, la mayoría de las soluciones parten del metal en polvo y utilizan diversas técnicas de calentamiento para fusionarlo. Muchos métodos de impresión de metal incluyen etapas de posprocesamiento para reforzar o acabar completamente las piezas impresas.

Los métodos de impresión de metal son ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing) y SLM (Selective Laser Melting).

El primer método combina lo mejor de la manufactura aditiva con principios de la metalurgia en polvo. Es un proceso de extremo a extremo que comienza con un polvo metálico unido a plástico al que se le da una forma 3D, una capa a la vez. Después de la impresión, la pieza se lava con una solución desaglutinante y se sinteriza en un horno. El paso de sinterización quema el aglutinante de plástico y hace que el polvo metálico se difunda.

Por otro lado el SLM se trata de un método igual que el SLS con la diferencia de que el SLM usa un rayo láser para fundir el polvo metálico por completo formando piezas metálicas completamente densas, mientras que el SLS, explicado anteriormente, usa un láser para sinterizar

o fusionar partículas de polvo sin fundir por completo el material, ya que el plástico solo hace falta calentarlo hasta que alcanza el punto de fusión.

Metales populares para su impresión en 3D:

- El titanio es ligero y tiene excelentes características mecánicas. Es fuerte, duro y muy resistente al calor, la oxidación y el ácido.
- El acero inoxidable tiene mucha tenacidad, posee una gran ductilidad y es resistente a la corrosión.
- El aluminio es ligero, duradero, resistente y tiene buenas propiedades térmicas.
- El acero para herramientas es un material duro y resistente a los arañazos que puedes usar para imprimir herramientas de uso final y otras piezas que requieran una gran resistencia.
- Las aleaciones de níquel tienen una resistencia elevada a la tracción, la fluencia, y la rotura. También son resistentes al calor y a la corrosión.

A continuación, se presenta una tabla comparativa entre las distintas categorías de materiales presentados anteriormente.

<b>Material</b>	<b>Propiedades</b>	<b>Resistencia Mecánica</b>	<b>Peso</b>	<b>Costo</b>	<b>Métodos de Impresión</b>	<b>Aplicaciones</b>
<b>Termoplásticos</b>	Fácil de imprimir, reciclable	Moderada	Ligero	Bajo	FFF, SLS	Prototipos, piezas funcionales de baja carga
<b>Compuestos</b>	Alta rigidez, reforzado con fibra	Alta	Ligero	Medio-alto	FFF, CFF	Ustillaje, piezas estructurales, industria aeroespacial
<b>Fotopolímeros</b>	Gran detalle, frágiles sin postprocesado	Baja a moderada	Ligero	Medio	SLA	Prototipos detallados, odontología, joyería

<b>Metales</b>	Alta resistencia térmica y mecánica	Muy alta	Pesado	Alto	ADAM, SLM	Industria automotriz, aeroespacial, médica
----------------	-------------------------------------	----------	--------	------	-----------	--------------------------------------------

Tabla 2: Tipos de materiales de impresión 3D.

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de este trabajo se va a profundizar en los materiales compuestos, pues son los más indicados para la impresión de utillaje de sujeción.

## 2.2. Eficiencia Operativa en Talleres Mecánicos

La eficiencia operativa en talleres mecánicos es un aspecto crucial para garantizar la productividad, la calidad del servicio y la rentabilidad del negocio. En un entorno altamente competitivo, donde los tiempos de entrega y la satisfacción del cliente marcan la diferencia, optimizar los procesos internos se convierte en una prioridad estratégica. Esta sección analiza los factores clave que impactan la eficiencia en los talleres mecánicos con la incorporación de tecnologías avanzadas como la impresión 3D. Al identificar y aplicar buenas prácticas, los talleres pueden mejorar su capacidad de respuesta, reducir costes, minimizar tiempos improductivos y, en última instancia, consolidar una posición de liderazgo en el mercado.

### 2.2.1. Factores clave que afectan la eficiencia en talleres mecánicos

La eficiencia operativa de un taller mecánico depende de múltiples factores que, si se gestionan adecuadamente, pueden optimizarse mediante la implementación de tecnologías como la impresión 3D. A continuación, se destacan algunos de estos factores y cómo la impresión 3D puede contribuir a su mejora:

- **Tiempos de espera por piezas:** La falta de disponibilidad inmediata de componentes puede retrasar significativamente las reparaciones. La impresión 3D permite la fabricación in situ de piezas específicas en cuestión de horas, eliminando la dependencia de proveedores externos y reduciendo los tiempos de espera.
- **Mantenimiento de máquinas y herramientas:** El desgaste o la rotura de herramientas especializadas puede interrumpir las operaciones. Con la impresión 3D, es posible producir rápidamente repuestos o herramientas personalizadas, garantizando la continuidad del trabajo y reduciendo el tiempo de inactividad.

- **Organización y gestión del espacio de trabajo:** Un taller bien organizado mejora la productividad. La impresión 3D facilita la creación de soportes, organizadores y dispositivos personalizados que optimizan el espacio y el flujo de trabajo.
- **Capacitación y especialización del personal:** La adopción de tecnologías avanzadas, como la impresión 3D, requiere formación continua. Esto no solo mejora las habilidades del equipo, sino que también aumenta la capacidad del taller para ofrecer servicios innovadores y de alta calidad.
- **Planificación y gestión del tiempo:** La capacidad de producir piezas y herramientas bajo demanda mediante impresión 3D mejora la planificación de las tareas y reduce los tiempos muertos, lo que se traduce en una mayor eficiencia operativa.

La integración de la impresión 3D en talleres mecánicos no solo aborda desafíos tradicionales, sino que también abre nuevas oportunidades para innovar y mejorar la competitividad en el mercado actual.

### 2.2.2. Papel de la I3D en la optimización de procesos y la mejora de la eficiencia de un taller

Los métodos tradicionales de fabricación, como el moldeo por inyección, el termoformado o la fundición, requieren la creación de herramientas personalizadas para producir piezas finales. No obstante, la fabricación de este utillaje implica costos iniciales elevados y largos tiempos de espera hasta que son entregados por los proveedores, lo que retrasa significativamente el desarrollo de productos y extiende el tiempo necesario para lanzarlos al mercado. El utillaje tradicional generalmente se produce a partir de metales duraderos, a través de tecnologías avanzadas como la maquinaria y la fabricación de metales. No obstante, estos procedimientos son costosos y suelen ser más extensos idóneos para ciclos productivos de gran magnitud. Si se emplean para llevar a cabo iteraciones o para la producción de utillaje que se utilizará exclusivamente para la fabricación de lotes pequeños de componentes, los gastos aumentan y los tiempos de producción se extienden de manera significativa. Es por eso es que existe el denominado utillaje rápido, usado en el proceso de desarrollo de productos que posibilita que los fabricantes puedan utilizar rápidamente sus recursos comprobación del diseño y las elecciones relacionadas con el material antes de avanzar hacia la producción en serie, para agilizar la creación de productos, ejecutar iteraciones de manera rápida y transportar productos superiores en el mercado. El utillaje rápido proporciona a los ingenieros la habilidad para emplear materiales auténticos. fabricación para determinar el comportamiento de las piezas en usos reales y producir existencias restringidas de productos para la etapa beta y los experimentos de validación. El

utillaje rápido también puede contribuir a solucionar los inconvenientes del proceso de producción antes de hacer inversiones en él utillaje productivo que puede ser costoso [7].

En un taller de fabricación mecánica la búsqueda constante de la mejora de la eficacia de los procesos es fundamental para ahorrar tanto material como tiempo y costes. Es por ello que la integración de herramientas rápidas en el proceso de desarrollo, como moldes, patrones y troqueles fabricados mediante impresión 3D, ofrece a las empresas la posibilidad de validar tanto el diseño como los materiales seleccionados antes de iniciar la producción en masa. Esta tecnología también proporciona una solución económica para producir series personalizadas o limitadas de piezas finales.

De entre los diferentes métodos de impresión aditiva la SLA es la que ofrece soluciones más variadas para el utillaje ya que las impresoras 3D SLA son precisas, con bordes nítidos y tienen un acabado liso de la superficie que es perfecto para moldes y la reproducción de detalles pequeños y complejos.

Los principales factores de eficacia que se ven mejorados mediante la impresión 3D son:

- Reducción de costos: Fabricar utillajes mediante impresión 3D puede ser hasta un 90% más barato que los métodos convencionales, eliminando la necesidad de mecanizados complejos y costosos.
- Menor tiempo de producción: Se pueden fabricar herramientas en cuestión de horas o días, en lugar de semanas, acelerando los procesos de producción.
- Personalización y diseño optimizado: La impresión 3D permite crear utillajes completamente adaptados a cada aplicación, con geometrías complejas que serían imposibles de fabricar con métodos tradicionales.
- Reducción de peso: Utilizando materiales avanzados como compuestos de fibra de carbono o polímeros de alta resistencia, se pueden producir herramientas más ligeras y ergonómicas.
- Menos desperdicio de material: A diferencia del mecanizado tradicional, que genera gran cantidad de residuos, la fabricación aditiva utiliza solo el material necesario.

### 2.2.3. Impresión 3D de utillaje

En su forma más básica, las fijaciones mantienen una pieza en una posición concreta mientras soportan fuerzas de una operación secundaria, sin que la parte fijada sufra un grado inaceptable de flexión, movimiento o rotación. Para comprender cómo se consigue esto, antes hay que comprender cómo funcionan los grados de libertad. Un cuerpo rígido en el espacio tiene seis

grados de libertad: movimiento arriba/abajo, izquierda/ derecha, adelante/atrás y la capacidad de rotar en torno a uno más ejes, denominados ejes de cabeceo, balanceo y guiñada.

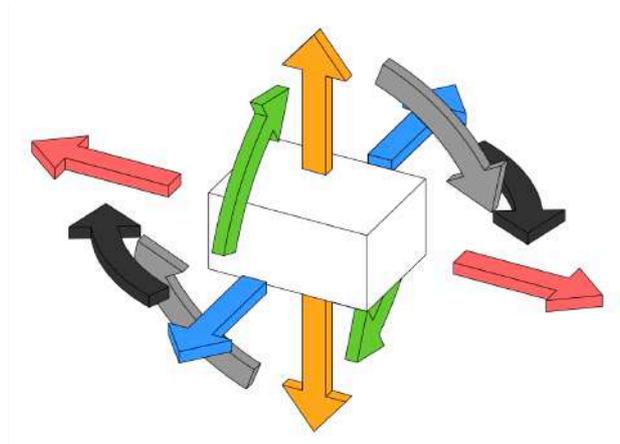


Figura 14: Seis grados de libertad de una pieza [8].

Los principios del buen diseño de las fijaciones requieren que se restrinjan lo máximo posible esos grados de libertad para asegurar una ubicación precisa y la seguridad de las operaciones secundarias. Es igual de importante no imponer restricciones excesivas a la pieza. Las restricciones excesivas provocan fuerzas innecesarias y problemas de precisión que requieren una mayor precisión en la fijación o la sujeción con guía. Para comprender este principio, se pone de ejemplo un un taburete. Un taburete con tres patas tiene el grado de restricción justo, pues cuando se carga con peso desde su superficie superior, el taburete no puede moverse verticalmente. La fricción impide que el taburete se deslice en ninguna dirección y cada pata está restringida por las demás para impedir la rotación de una de las patas o de todo el taburete.

- a. Restricción exacta: cuando hay una restricción por cada grado de libertad necesario para un funcionamiento correcto.
- b. Infrarrestricción: tiene lugar cuando una pieza tiene libertad para rotar, desplazarse o deslizarse en una o más direcciones o siguiendo uno o más ejes. A la hora de elaborar fijaciones, la infrarrestricción de una pieza impide el correcto funcionamiento de la misma y puede suponer un peligro considerable para los operarios de la maquinaria y el equipo. Sin embargo, según la aplicación deseada, hay tareas que pueden requerir infrarrestricción. Por ejemplo, un tablón de madera con libertad para moverse a través de una máquina cepilladora.
- c. Piezas con escaso soporte: tienen suficientes restricciones para impedir el desplazamiento y la rotación del objeto, pero no cuentan con el suficiente soporte para evitar que la pieza

sufra una desviación considerable durante operaciones secundarias como el fresado y la perforación.

- d. Sobrerrestricción: tiene lugar cuando una estructura tiene restricciones redundantes. Una forma de verlo es que cuando múltiples fuerzas realizan exactamente el mismo trabajo, dichas fuerzas entran en conflicto. Siempre habrá una de ellas que "gane" y realice el trabajo deseado. En el mejor de los casos, las fuerzas redundantes no harán nada. En el peor de los casos, perjudicarán al funcionamiento básico de la estructura, lo que provocará que las piezas sean de mala calidad y que haya un mayor riesgo para el operario.

En la práctica, hay ocasiones en las que es necesario usar "demasiadas" restricciones. Una silla de cuatro patas es un ejemplo de un diseño con sobrerrestricción. La cuarta pata es redundante e introduce un nuevo problema de balanceo si la silla reposa sobre una superficie con una mínima irregularidad. Lo que se obtiene a cambio de este requisito de un suelo más plano es una mayor estabilidad general. Lo que esto supone en un contexto de fabricación es que un diseño de fijación más permisivo (con menos restricciones) es útil para trabajar con piezas que tienen una mayor variación (como las realizadas mediante fundición), mientras que una fijación más restrictiva funcionará mejor con piezas con superficies más precisas (piezas mecanizadas o moldeadas por inyección).

Las herramientas de diseño avanzadas han permitido a los ingenieros crear productos muy optimizados para su uso final, pero esa misma libertad de diseño y esa mayor complejidad de las piezas hacen que construir sujeciones con guía y fijaciones para operaciones secundarias sea más difícil. Los sistemas de sujeción tradicionales como los tornillos de banco y las abrazaderas no pueden sujetar y dar soporte a elementos amorfos o piezas con detalles muy precisos. La impresión 3D permite a los ingenieros crear objetos sin limitaciones como el acceso a las herramientas y el desgaste que implica el mecanizado. Fabricar sujeciones con guía y fijaciones mediante un proceso aditivo supone un ahorro considerable de tiempo y dinero, al eliminar las intervenciones de personal especializado que requieren el mecanizado a partir de palanquillas o la fabricación de herramientas a partir de tubos y chapas de metal. Incluso si las fijaciones de uso final requieren componentes de metal, el carácter accesible y asequible de la impresión 3D permite a los ingenieros de fabricación someter a ensayo esos conceptos antes de comprometerse a mecanizar componentes más duraderos. Especialmente en el caso de piezas con superficies curvas o complejas, la fabricación mediante impresión 3D en tu propia empresa cuesta mucho menos que externalizar el fresado, incluso con plásticos de bajo coste como el polietileno de alta densidad (PEAD).

La impresión 3D ha demostrado ser una herramienta clave en la fabricación de utillajes (herramientas, soportes, plantillas y accesorios utilizados en procesos industriales). Gracias a su flexibilidad, rapidez y bajo costo en comparación con los métodos tradicionales, muchas empresas han comenzado a adoptar esta tecnología para optimizar sus operaciones.

Aplicaciones del utillaje impreso en 3D:

- Soportes y fijaciones: Para ensamblajes de piezas en líneas de producción.



Figura 15: Guía de broca de Formlabs [8]

- Moldes y plantillas: En sectores como la automoción y la aeronáutica, para la fabricación y verificación de piezas.

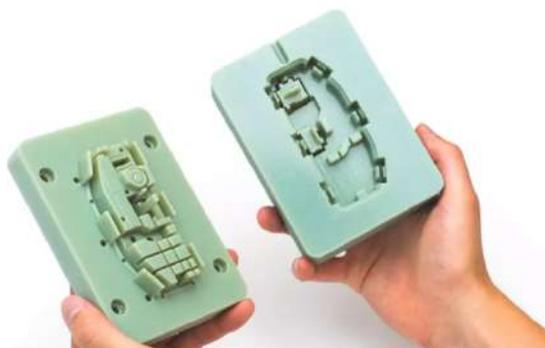


Figura 16: Moldes impresos en 3D para fundición de XometryPro.

Fuente: <https://xometry.pro/es/articulos/moldes-impresos-en-3d-para-fundicion/>

- Herramientas personalizadas: Llaves, pinzas y accesorios diseñados para tareas específicas.

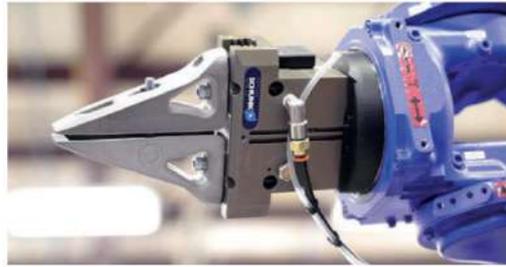


Figura 17: Mordaza de agarre metálica de Markforged [9].



Figura 18: Mordaza de agarre Onyx de Markforged [9].

- Dispositivos de medición y calibración: Piezas especializadas para control de calidad y montajes.

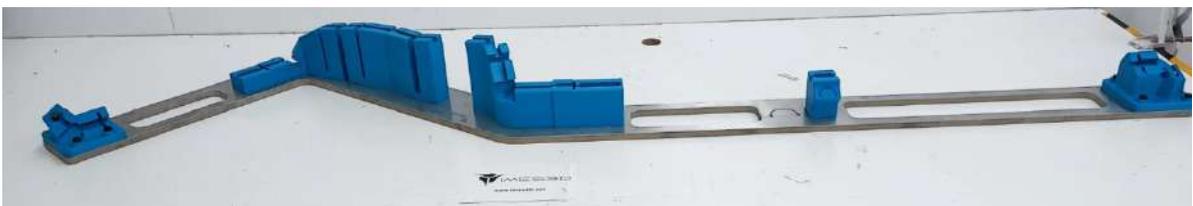


Figura 19: Utillaje de comprobación de iMES3D.

Fuente: <https://imes3d.net/utillajes-en-impresion-3d/>



Figura 20: Utillaje de montaje de iMES3D.

Fuente: <https://imes3d.net/utillajes-en-impresion-3d/>



Figura 21: Herramienta de mantenimiento, reparación y revisión de Siemens Energy [9].



Figura 22: Herramienta de inspección de MarkForged.

Fuente: <https://markforged.com/es/resources/blog/inspection-fixtures>

#### 2.2.4. Impresión 3D de fijaciones de soldadura

Para lograr una soldadura exitosa, además de contar con un buen soldador, es fundamental disponer de fijaciones adecuadas. En soldaduras más complejas que la simple unión de superficies planas, las fijaciones garantizan que las piezas se mantengan en la posición correcta. Sin embargo, las fijaciones tradicionales presentan ciertas limitaciones: las mecanizadas ofrecen gran precisión, pero son costosas, las modulares son económicas pero difíciles de ensamblar, y las soluciones improvisadas suelen generar soldaduras defectuosas.

La impresión 3D industrial ofrece una alternativa que combina la precisión y facilidad de uso de las fijaciones mecanizadas con la accesibilidad y rapidez de producción de las modulares. Las piezas fabricadas con la tecnología adecuada son suficientemente resistentes al calor para sostener la mayoría de las estructuras soldadas y pueden incorporar elementos metálicos para mejorar la protección térmica si es necesario. Además, la impresión 3D permite diseñar fijaciones personalizadas que sujetan de manera precisa piezas complejas, y en caso de modificaciones en el diseño, se pueden fabricar nuevas fijaciones de forma rápida y económica.



	Time	Cost
Traditional	156 hrs	\$800
Markforged	12 hrs	\$10
<b>Savings</b>	<b>93%</b>	<b>99%</b>

Figura 23: Tiempos y costes de utillaje rápido I3D vs mecanizado [10].

El utillaje de soldadura, además de ofrecer un sistema de sujeción posicionamiento y alineación de las piezas durante el proceso de soldadura para garantizar la precisión, repetibilidad y seguridad de la operación, debe tener en cuenta también la polaridad en la soldadura, es decir, la dirección del flujo eléctrico entre el electrodo (positivo/negativo) y la pieza a soldar (generalmente conectada a tierra).

La polaridad afecta la penetración, velocidad de fusión y estabilidad del arco eléctrico. Por ejemplo:

- DCEN (Direct Current Electrode Negative): más calor en la pieza (penetración).
- DCEP (Direct Current Electrode Positive): más calor en el electrodo (fusión superficial).

Aunque el utillaje no tiene una polaridad activa (no forma parte del circuito eléctrico), es importante que:

- Sea eléctricamente aislante o conectado correctamente a tierra si es metálico.
- Tenga un diseño que no interfiera con el flujo eléctrico.

Si está hecho de materiales conductores, no debe permitir corrientes parásitas que podrían afectar la calidad de la soldadura.

Así pues, el utillaje de soldadura no tiene "polaridad" propia, pero debe estar adecuadamente diseñado para trabajar con el tipo de polaridad de la soldadura que se va a realizar. Su función principal es garantizar la posición y estabilidad de las piezas durante el proceso.

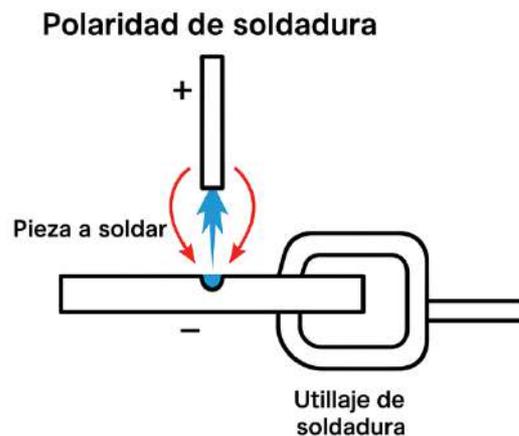


Figura 24: Polaridad de la soldadura.

Fuente: Elaboración propia.

### 2.3. Impacto Económico de la Impresión 3D

La impresión 3D ha revolucionado los procesos de fabricación al introducir un modelo de producción más flexible, eficiente y accesible. Su impacto económico es significativo, ya que permite reducir costos de producción, optimizar el uso de materiales y disminuir los tiempos de desarrollo de productos. Empresas de distintos sectores han comenzado a adoptar esta tecnología no solo para fabricar prototipos, sino también para producir componentes finales, lo que ha impulsado nuevas oportunidades de negocio y ha redefinido las cadenas de suministro.

En este apartado, se analizarán los principales efectos económicos de la impresión 3D, incluyendo su influencia en la reducción de costos, el ahorro en logística y almacenamiento, y la optimización de la producción. También se abordarán los desafíos económicos que enfrenta su implementación, así como casos de éxito que evidencian su potencial en la transformación de la industria.

### **2.3.1. Reducción de costos en la producción**

La fabricación aditiva disminuye la necesidad de moldes y herramientas costosas, permitiendo la producción directa de piezas a partir de modelos digitales. Esto reduce gastos en mano de obra y materiales. Además, los costos de producción no aumentan proporcionalmente con la complejidad del diseño, a diferencia de los métodos tradicionales.

Por otra parte, inversión inicial para la impresión 3D es relativamente baja, incluye la adquisición de la impresora y el material de impresión, a diferencia del CNC, que implica la compra de máquinas, herramientas y la configuración inicial. Esta diferencia hace que la impresión 3D sea más accesible para pequeñas empresas y proyectos con presupuestos ajustados.

En términos de costes de producción por unidad, la impresión 3D mantiene un coste constante y predecible, ideal para la fabricación de piezas únicas o en baja cantidad. Por el contrario, el CNC reduce el coste por unidad a medida que aumenta el volumen de producción, lo que lo hace más adecuado para grandes series.

Desde el punto de vista de materiales, la impresión 3D es una tecnología aditiva, que utiliza solo el material necesario y genera muy poco desperdicio. El coste de los materiales para la impresión 3D depende del material elegido. En gran medida, la calidad del material de impresión determina cómo quedará el modelo 3D. En cambio, el CNC es un proceso sustractivo que produce virutas y recortes, lo que implica un mayor consumo de material y costos asociados al manejo de residuos.

Finalmente, la impresión 3D destaca por su flexibilidad y capacidad de personalización. Modificar un diseño no supone un incremento significativo en costes, lo que permite iteraciones rápidas y adaptaciones. En el CNC, cualquier cambio puede implicar la necesidad de reprogramar máquinas, adquirir nuevos utillajes o herramientas, lo que encarece el proceso.

### **2.3.2. Optimización de tiempos en la fabricación**

Por un lado, se tienen que tener en cuenta los tiempos de modelado e impresión de las piezas que se diseñen en el taller, así como el tiempo que lleva completar el modelado 3D. Puede ser complicado al principio, pero a medida que se implementa la técnica en una empresa y se usa la impresión 3D, el ingeniero se vuelve más hábil en hacer estimaciones de diseño. Además, a

medida que se usa la impresión 3D, aumenta el portafolio de elementos y piezas diseñadas, muy útil para aplicar ingeniería inversa y facilitar la creación de nuevas piezas.

Es fundamental también tener en cuenta el tiempo necesario para importar el modelo en el cortador y ajustar configuraciones y parámetros. Por último, es imperativo que se estime el tiempo de impresión, que varía para cada pieza dependiendo del material utilizado y su complejidad.

Incluso cuando la impresora ha terminado, el proyecto sigue incompleto, hay que contar con el tiempo de postprocesamiento, pues en la mayoría de los casos hay que eliminar soportes, pintar o lijar.

Es por ello que detectamos distintos tiempos en la fabricación de un utillaje y el análisis de su impresión en 3D:

- Tiempo de diseño.
- Tiempo de corte (programación).
- Tiempo de impresión.
- Tiempo de postprocesamiento.

Por otro lado, todo este proceso anteriormente descrito es mucho más rápido que el método convencional de creación de piezas y el de pedir a proveedores externos. Según un estudio de mercado de la empresa Formlabs, mostramos a continuación una tabla en la que se detallan los ahorros de tiempo que proporciona la impresión 3D para el caso del utillaje rápido.

	Utillaje rápido impreso en 3D	Utillaje rápido mecanizado
<b>Plazo de producción hasta las piezas finales</b>	De uno a tres días	De una a cuatro semanas
<b>Tiempo de espera</b>	15h 30min para 16 piezas con dos impresoras	3-4 semanas

*Tabla 3: Tiempos 3D y mecanizado de utillaje rápido [8].*

Si la reparación o la pieza necesaria es externalizada aumentan los tiempos de espera y por ende, los las pérdidas por inactividad. Tenemos como ejemplo el caso de la empresa americana productora de elementos personalizados de plástico termoformado, Productive Plastics.

Productive Plastics trabaja con seis células de fabricación para que múltiples proyectos puedan avanzar al mismo tiempo. Cada célula está equipada con una termoformadora industrial, una máquina de fresado CNC, una zona de ensamblaje y un sistema informático para organizar y monitorizar las operaciones.

El problema al que se enfrentó Productive Plastics cuando consideró la impresión 3D residía en una avería en el ventilador de refrigeración de la bomba de vacío industrial para termoformado, provocando la parada de toda una célula de trabajo. La empresa se enfrentaba a un tiempo de espera para recibir la pieza de recambio de seis a ocho semanas. Este periodo se traducían en pérdidas de hasta 30.000\$, puesto que el ritmo de producción de una célula de fabricación es de mínimo 40 piezas al día. Con una parada de como mínimo 6 semanas de inactividad se dejaban de fabricar más de 1200 piezas. Estimando un coste medio de 25\$ por pieza, la pérdida ascendía a 30.00\$. Se propuso entonces imprimir una pieza de recambio provisional de Nylon en 3D mediante SolidWorks.

A continuación, se muestra la tabla comparativa de tiempos y pérdidas entre el rotor impreso en 3D y la pieza pedida aun proveedor externo.

	Piezas impresas en 3D <i>in situ</i>	Pieza de reparación externalizada
<b>Tiempo de espera</b>	1 día	6-8 semanas
<b>Pérdidas debidas a la inactividad</b>	1000 \$	30 000 \$

*Tabla 4: Tabla comparativa de tiempos y pérdidas [8].*

Claramente las pérdidas disminuían significativamente al imprimir la pieza en 3D, acelerando el proceso y solo perdiendo un día de producción.

Otro ejemplo de la reducción de tiempos es la del proveedor automovilístico Prankl Racing Systems. empresa austríaca especializada en fabricación y prueba de mecanismos de manivela, pistones, bielas y cigüeñales. Su situación implicaba la necesidad de una pieza de sujeción con guía personalizada. A continuación, se muestra la diferencia de ahorro de tiempo y coste entre el mecanizado convencional y la impresión 3D.

Sujeción con guía personalizada	Impresión en 3D	Mecanizado CNC
<b>Plazo de producción</b>	5-9 horas	2-3 semanas
<b>Coste</b>	9-28 \$	45-340

*Tabla 5: Tiempos y costes I3D vs CNC sujeción con guía personalizada [8].*

### 2.3.3. Análisis de la rentabilidad de la I3D

Al realizar un proyecto de ingeniería hay que estudiar su viabilidad económica pues si el proyecto no es rentable, por mucho que técnicamente sea viable, no vale la pena plantarlo.

Cuando no se dispone de una impresora 3D tiene que tenerse en cuenta su amortización y los costes aumentan mucho en comparación con un análisis económico en el que en el escenario inicial no se tiene en cuenta el coste inicial de una impresora. Luego, el coste de imprimir una pieza de utillaje en este caso se mantiene estable independientemente del número de utillajes impresos. Gracias a la impresión 3D, las empresas pueden evitar la necesidad de producir grandes volúmenes para lograr rentabilidad. Esta tecnología hace posible fabricar piezas únicas o de baja tirada, lo que supone una opción menos arriesgada para startups y pymes que buscan explorar nuevos mercados [11].

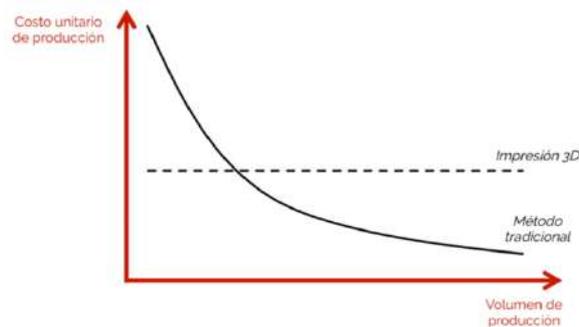


Figura 25: Coste unitario vs Volumen de producción.

Fuente: <https://www.3dnatives.com/es/por-que-la-impresion-3d-230720182/>

Para hacer los análisis económicos teniendo en cuenta la amortización de una impresora se tiene que tener en cuenta los siguientes factores y sus costes:

- Coste de la impresora: depende de la impresora
- Periodo de amortización de 4 años
- Horas de uso por día laborable de la impresora: 8h
- El coste de la luz de abril según Red Eléctrica: 47,25 €/MWh
- Coste por hora de personal: 20€/h
- Coste por hora de preparación/postprocesado: 20€

Estos precios estándares en la industria son los que se usarán en el proyecto para hacer el análisis económico de la pieza a diseñar.

#### 2.3.4. Casos de estudio: Implementación de impresión 3D en talleres

##### a. SILAM

Desde su fundación en 1964, Silam se ha consolidado como uno de los referentes más importantes de Europa en el tratamiento de silicona HTV, una clase de elastómero vulcanizable en caliente. La empresa ha construido su reputación sobre un principio clave: la capacidad de adaptarse a las necesidades específicas de cada cliente, ofreciendo soluciones personalizadas. Su catálogo abarca desde aditivos, mezclas de silicona y bases preparadas hasta productos técnicos fabricados en silicona sólida o esponjosa.



*Figura 26: Logo silam.*

*Fuente: <https://www.silam.com/>*

Con el objetivo de perfeccionar su capacidad de respuesta y adaptarse a nuevos retos, Silam ha decidido integrar la tecnología de impresión 3D en sus procesos productivos y de prototipado. Este paso estratégico les permitirá reducir los tiempos de desarrollo y mejorar los resultados.

Roberto Gamazo, Director Industrial de Silam, destaca que la incorporación de una impresora 3D UltiMaker les ha abierto un abanico de oportunidades que antes no contemplaban [12]. Esta tecnología les permite fabricar prototipos de utillajes de forma sencilla y rápida, utilizando una amplia gama de materiales y obteniendo piezas funcionales reales. Esta capacidad les facilita la realización de controles dimensionales precisos sobre los prototipos antes de pasar a la producción masiva.

El gran desafío al que se enfrentaba Silam era encontrar una forma de fabricar prototipos de utillaje de forma más eficiente y con tiempos más cortos. Hasta entonces, la fase de prototipado suponía un cuello de botella en sus procesos de producción. La adopción de la impresión 3D les ha permitido acortar significativamente este tiempo, consiguiendo validar el diseño y adaptarlo antes de producir grandes series. Esto se traduce en un mayor control sobre los costes, especialmente en proyectos de tiradas pequeñas, donde antes era más difícil ajustar los presupuestos por consumo de materiales y mermas.

La solución de impresión 3D que Silam ha implementado les permite producir internamente piezas prototipo funcionales, explorando nuevas aplicaciones y materiales. Con el modelo UltiMaker S3, la empresa ha logrado crear componentes personalizados en plazos récord y a un

coste reducido. Este avance no solo mejora su eficiencia operativa, sino que también refuerza su capacidad para afrontar proyectos innovadores y adaptarse a las demandas del mercado.



Figura 27: Ejemplos de prototipos impresos en 3D para SILAM.

Fuente: <https://intech3d.es/caso-de-exito-silam/>

Los resultados son claros: mayor productividad, reducción de tiempos y menor coste de producción. La impresión 3D ha permitido a Silam acortar el tiempo entre diseño, prototipado y producción final, fortaleciendo su apuesta por la digitalización y las tecnologías 4.0. Además, esta herramienta se alinea perfectamente con su filosofía de flexibilidad y personalización, eliminando muchas de las limitaciones de los métodos tradicionales de fabricación y permitiéndoles ofrecer soluciones más competitivas y adaptadas a cada cliente.

En definitiva, la experiencia de Silam demuestra cómo la fabricación aditiva puede transformar la operativa de una empresa, reduciendo riesgos, costes y tiempos de fabricación, mientras se mantiene una alta capacidad de personalización y respuesta a las necesidades del mercado.

#### b. BROSE

La empresa Brose, uno de los mayores fabricantes y proveedores del sector automotriz a nivel global (Germany, s. f.)[13], ha transformado significativamente sus procesos productivos gracias a la adopción de las tecnologías de impresión 3D SLA (estereolitografía) y SLS (sinterizado selectivo por láser) desarrolladas por Formlabs. Este cambio ha permitido a la compañía mejorar su capacidad de respuesta, reducir costes y acelerar el desarrollo de nuevos productos, en un sector cada vez más competitivo y exigente [14].



Figura 28: Logo Brose.

Fuente: <https://www.brose.com/de-en/>

En el pasado, la creación de prototipos funcionales y componentes de prueba dentro de la industria automotriz implicaba altos costes, largos tiempos de producción y una fuerte dependencia de proveedores externos. Esto ralentizaba el ciclo de desarrollo y limitaba la flexibilidad de las empresas para realizar iteraciones rápidas y adaptarse a los cambios en los requisitos de diseño. Sin embargo, Brose encontró en la fabricación aditiva una solución innovadora y rentable.

La impresión 3D con tecnología SLA ofrece a Brose la posibilidad de producir piezas con una calidad superficial excepcional y un alto nivel de detalle, para crear prototipos funcionales que se beneficien de la producción rápida y en Nylon 12, que ofrece propiedades parecidas a las de sus actuales materiales de producción [15]. Esta capacidad es esencial en un sector donde la estética y la funcionalidad van de la mano, ya que permite evaluar aspectos de diseño, realizar pruebas de ajuste y validar conceptos antes de comprometer recursos significativos en moldes o utillajes.

Por otro lado, la tecnología SLS permite fabricar componentes robustos y resistentes, capaces de soportar condiciones reales de funcionamiento. Esto resulta crucial para Brose, ya que pueden producir piezas funcionales para pruebas mecánicas y validar su rendimiento antes de lanzarlas a producción en serie. Además, la impresión SLS no requiere estructuras de soporte, lo que simplifica el posprocesado y reduce aún más los tiempos de entrega.

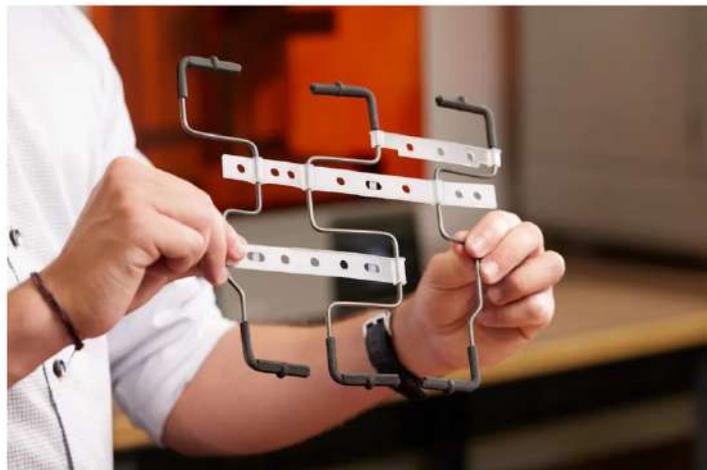


Figura 29: Base de suspensión de asiento con piezas fabricadas mediante SLA y SLS.

Fuente: [https://formlabs.com/es/blog/brose-sla-sls-bolster-automotive-production/?srsltid=AfmBOoq58ZIZPfc-mgSdOTH2FKIUBIUzXoUaml8l8IW\\_nSnMhV4VxrCo](https://formlabs.com/es/blog/brose-sla-sls-bolster-automotive-production/?srsltid=AfmBOoq58ZIZPfc-mgSdOTH2FKIUBIUzXoUaml8l8IW_nSnMhV4VxrCo)



*Figura 30: Versión de uso final.*

Fuente: [https://formlabs.com/es/blog/brose-sla-sls-bolster-automotive-production/?srsltid=AfmBOoq58ZIZPfc-mgSdOTH2FKIUBIUzXoUaml8l8lW\\_nSnMhV4VxrCo](https://formlabs.com/es/blog/brose-sla-sls-bolster-automotive-production/?srsltid=AfmBOoq58ZIZPfc-mgSdOTH2FKIUBIUzXoUaml8l8lW_nSnMhV4VxrCo)

La combinación de ambas tecnologías —SLA y SLS— ha permitido a Brose agilizar sus procesos de I+D y producción. Ahora, pueden fabricar internamente prototipos y utillajes personalizados, reduciendo su dependencia de proveedores externos y evitando los largos plazos asociados a los métodos tradicionales. Esto ha llevado a una mejora significativa en su eficiencia operativa y les ha permitido responder más rápidamente a las demandas del mercado y a los cambios en los requisitos del cliente.

Además, la incorporación de la impresión 3D ha proporcionado a Brose una ventaja competitiva clave: la posibilidad de ofrecer soluciones personalizadas y producción bajo demanda. Esto no solo mejora la satisfacción del cliente, sino que también reduce el riesgo asociado a grandes inversiones iniciales en herramientas o moldes, especialmente en proyectos de baja o media tirada. Gracias a la fabricación aditiva, pueden producir piezas exactamente cuando se necesitan, minimizando costes de almacenamiento y stock.

En resumen, Brose ha adoptado la impresión 3D SLA y SLS no solo como una herramienta complementaria a sus procesos de fabricación tradicionales, sino como un pilar estratégico para acelerar la innovación, reducir costes y ofrecer productos de alta calidad en plazos más ajustados. Este caso demuestra cómo la impresión 3D puede transformar la forma en que operan las empresas automotrices, marcando el camino hacia una producción más flexible, ágil y eficiente, adaptada a las exigencias de la industria 4.0.

c. AM TOOL

AM Tool and Design, fundada en 1948 como un taller familiar dedicado a la maquinaria, ha evolucionado notablemente desde entonces. Aunque su descripción original aún es válida, hoy la empresa ha progresado significativamente. Además de contar con expertos altamente capacitados operando fresadoras CNC Bridgeport, también dispone de centros de mecanizado avanzados que funcionan de manera continua y sin necesidad de supervisión.

AM Tool ha adoptado la tecnología de impresión 3D en su taller de maquinaria para optimizar su productividad y flexibilidad. Antes, su trabajo dependía por completo de métodos tradicionales como el mecanizado CNC y el fresado, lo que implicaba altos costes y tiempos prolongados para la fabricación de piezas. Con la integración de la impresión 3D, AM Tool ha logrado fabricar prototipos funcionales, utillajes personalizados y piezas finales con mayor rapidez y menor coste [16].

Además, esta tecnología les ha permitido responder mejor a las necesidades específicas de sus clientes, reduciendo plazos de entrega y minimizando el riesgo asociado a errores de diseño. La capacidad de producir internamente, sin depender de proveedores externos, también ha mejorado su competitividad y ha abierto nuevas oportunidades de negocio. En resumen, la fabricación aditiva se ha convertido en un recurso estratégico para AM Tool, impulsando su transición hacia un taller de maquinaria más eficiente, flexible y preparado para los retos del futuro.



*Figura 31: Acoplamiento de araña impreso en 3D para una máquina de AM Tool.*

*Fuente: <https://formlabs.com/es/blog/incorporar-impresion-3d-taller-maquinaria-am-tool/?srsltid=AfmBOooc3v7l1myy8C2KTd6toWzVNwxurCL0PUmjCkjLm8Gg0HOK6cn>*

## 2.4. Impacto Medioambiental y Sostenibilidad

La impresión 3D (i3D) no solo está transformando los procesos de producción, sino que también está desempeñando un papel crucial en el camino hacia un modelo industrial más sostenible. A diferencia de los métodos tradicionales, que suelen generar grandes cantidades de residuos y requieren un consumo intensivo de energía y recursos, la fabricación aditiva permite reducir el desperdicio de material, optimizar el uso de materias primas y minimizar la huella ambiental. Este apartado analiza el impacto medioambiental y las oportunidades de sostenibilidad que ofrece la impresión 3D, destacando cómo esta tecnología puede contribuir a la eficiencia energética, a la circularidad y a un menor impacto ecológico en la producción global.

Según el Centro para Soluciones Climáticas y Energéticas, la fabricación representa el 12% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero. Actualmente, la impresión 3D se presenta como una manera de reducir el impacto ambiental de la fabricación y desarrollar productos más sostenibles. La impresión 3D puede ser más sostenible que las tecnologías tradicionales porque utiliza menos material, requiere menos operaciones de mecanizado y genera menos residuos. Sus diseños, más ligeros y geoméricamente flexibles, facilitan innovaciones responsables en sectores como la aeronáutica, dispositivos médicos y artículos deportivos [17].

### 2.4.1. Reducción de residuos y uso eficiente de materiales

La impresión 3D representa un avance significativo hacia una producción más sostenible gracias a su capacidad para minimizar los residuos y maximizar el aprovechamiento de los materiales. A diferencia de los procesos tradicionales de fabricación sustractiva, como el mecanizado CNC, que una gran parte del material inicial se convierte en desecho en forma de virutas y recortes, la impresión 3D permite construir piezas capa por capa mediante un proceso aditivo. Esto significa que el material se deposita solo donde es necesario, eliminando gran parte del desperdicio habitual. Según Peng et al. (2018), esta tecnología puede reducir el consumo de materia prima en la cadena de suministro hasta en un 97%, y minimizar los residuos generados en comparación con los procesos tradicionales [18]

Además, la flexibilidad del diseño que permite la i3D facilita la optimización de geometrías para reducir el consumo de material, lo que también se traduce en un menor peso de las piezas finales. Esta eficiencia no solo tiene un impacto positivo en la reducción del uso de recursos naturales, sino que también contribuye a la disminución de los costes de producción y transporte. Esta característica es especialmente relevante en sectores como la automoción y la aeronáutica, donde la reducción del peso es sinónimo de menor consumo energético y menor impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida [18].

La AM también abre la puerta a la producción bajo demanda, fabricando solo las piezas necesarias, lo que evita la sobreproducción y reduce los costes de almacenamiento y el desperdicio asociado. Si bien la impresión 3D no está exenta de generar residuos, como soportes no reciclables o defectos de impresión, la cantidad de desperdicio generado es significativamente menor que en los procesos tradicionales. Además, algunos estudios destacan que hasta un 95% del material no utilizado durante la impresión puede ser recuperado y reutilizado, aunque esto depende de la tecnología y del material empleado [18].

La capacidad de producir solo lo necesario y justo a tiempo también reduce los residuos generados por sobreproducción y almacenamiento, contribuyendo a una cadena de suministro más ágil y sostenible. En resumen, la impresión 3D no solo revoluciona la forma de producir, sino que también abre la puerta a una industria más consciente con el medio ambiente y eficiente en el uso de materiales

#### **2.4.2. Ahorro energético en comparación con métodos tradicionales**

La industria consume aproximadamente un 40% de la electricidad mundial generada [19]. La impresión 3D (3DP) representa una alternativa sostenible a los métodos de manufactura tradicionales, destacándose especialmente en la reducción del consumo energético a lo largo del ciclo de vida de los productos. A diferencia de los procesos sustractivos, que implican grandes cantidades de desperdicio y consumo de energía por operaciones adicionales como el mecanizado, la fabricación aditiva emplea únicamente el material necesario para crear la pieza, capa por capa, reduciendo significativamente el uso de recursos y energía [20].

Según las proyecciones para 2025, la impresión 3D podría ahorrar entre 2,54 y 9,30 exajulios (EJ) de energía primaria total (TPES) a nivel global. Estos ahorros se distribuyen en toda la cadena: aproximadamente un tercio corresponde a la fase de producción, mientras que entre un 55% y 60% del ahorro se logra en la fase de uso gracias a diseños más ligeros que reducen el consumo energético en sectores como la aviación. Incluso la fase de deconstrucción (fin de vida) contribuye con un 8% de ahorro [20].

Las cifras muestran que la impresión 3D puede reducir entre un 1,2% y 4,1% la intensidad energética por unidad de PIB (TPES/GDP) de la industria, dependiendo del escenario. Aunque en 2025 esta tecnología aún es considerada de nicho en mercados masivos como productos de consumo y automoción, su impacto es significativo en sectores como aeroespacial, fabricación de componentes médicos y herramientas, donde se destaca el potencial de reducción de peso, menor uso de material y ciclos de producción más cortos [20].

Además, la impresión 3D elimina la necesidad de muchos recursos auxiliares como refrigerantes y lubricantes, y permite reutilizar hasta un 95–98% del material no fundido en algunos procesos (excepto FDM). Esto contribuye a una eficiencia energética notable frente a los métodos tradicionales (Gebler et al., 2014).

Según un estudio realizado por la Universidad de Loughborough (Reino Unido) [21] donde se evaluaron diversas tecnologías de impresión aditiva se encontró que la energía consumida por kilogramo de material depositado varía significativamente según la tecnología y el nivel de utilización de la capacidad. Pero, en general, una mayor utilización de la capacidad reduce el consumo energético específico por kg de material producido. Por ejemplo, el LS mostró un ahorro energético del 97,79% cuando se operó a plena capacidad, mientras que FDM solo mostró un ahorro del 3,17%.

Se realizaron experimentos con piezas estándar para evaluar el consumo energético en distintas configuraciones: producción de una única pieza frente a producción completa con el volumen máximo. El consumo energético se midió en MJ/kg de material depositado, mostrando que las tecnologías que requieren calentamiento y enfriamiento prolongado (como LS y EBM) se benefician enormemente de operar a plena capacidad. Se identificó que FDM puede operar de manera eficiente incluso con baja capacidad, dado que su consumo no incluye grandes ciclos de calentamiento y enfriamiento.

La eficiencia energética está directamente relacionada con la productividad de la máquina, lo que sugiere que operar a plena capacidad es clave para minimizar el impacto ambiental de la fabricación aditiva. Es decir, el consumo energético de la impresión 3D depende no solo del tipo de tecnología utilizada, sino también de cuánto se aprovecha la capacidad de la máquina. Si una máquina opera solo con una pieza a la vez, consumirá prácticamente la misma cantidad de energía que al producir múltiples piezas, pero con menor eficiencia. Esto es especialmente evidente en sistemas que requieren tiempo y energía para calentar, enfriar y mantener condiciones especiales (por ejemplo, atmósferas controladas).

La FDM es menos sensible a esta variación porque sus ciclos de preparación son cortos y puede funcionar de forma continua sin necesidad de largos tiempos de inactividad. En cambio, tecnologías como LS y EBM muestran una gran diferencia, y operar a baja capacidad puede aumentar drásticamente el consumo energético por pieza.

#### **2.4.3. Impresión 3D y economía circular**

La economía circular es un enfoque innovador de producción y consumo que busca optimizar el uso de los recursos y reducir al mínimo la generación de residuos. Este modelo económico se basa

---

en la sostenibilidad, promoviendo prácticas como el reciclaje y la reutilización de productos y materiales. En otras palabras, tal y como se define en el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia del Gobierno de España, la economía circular es un modelo centrado en maximizar los recursos disponibles para que estos permanezcan el mayor tiempo posible en el ciclo productivo [22].

El propósito principal es minimizar al máximo la cantidad de residuos generados, y, cuando estos son inevitables, asegurarse de aprovecharlos al máximo. La economía circular abarca tanto los ciclos biológicos (por ejemplo, aprovechamiento de nutrientes) como los tecnológicos (recuperación y reintegración de materiales). De esta manera, se extraen materias primas, se transforman en productos, y, una vez que estos llegan al final de su vida útil, se recuperan componentes y materiales que pueden reincorporarse a los procesos productivos de forma segura para las personas y el medio ambiente.

La impresión 3D está profundamente vinculada con los principios de la economía circular, un modelo que busca minimizar los residuos y maximizar el aprovechamiento de los recursos. A diferencia de los métodos tradicionales, que suelen implicar procesos lineales de "extraer, fabricar, desechar", la impresión 3D introduce oportunidades para crear ciclos de producción cerrados y más sostenibles [20].

El uso eficiente de materiales es uno de sus principales beneficios. La fabricación aditiva emplea únicamente el material necesario para crear la pieza, reduciendo significativamente el desperdicio. Además, materiales no fundidos pueden recuperarse y reutilizarse, disminuyendo aún más la demanda de recursos primarios y los residuos asociados.

La reparación y re-fabricación es otra ventaja destacable. Gracias a la capacidad de producir piezas bajo demanda, se puede reparar productos existentes en lugar de desecharlos, extendiendo así su vida útil [7]. Este proceso reduce la necesidad de fabricar nuevos productos y disminuye la generación de residuos.

Otro aspecto relevante es la producción local y bajo demanda, que disminuye la dependencia de cadenas de suministro globales, reduce el transporte y, por lo tanto, las emisiones de carbono [3]. Esto también permite reducir inventarios y evita la sobreproducción.

Por último, la investigación y desarrollo en materiales sostenibles es clave. Se están desarrollando filamentos reciclables y biodegradables, así como materiales de origen biológico como PLA, derivado del maíz o caña de azúcar, que refuerzan el papel de la impresión 3D en la economía circular.

En resumen, la impresión 3D es una herramienta clave para avanzar hacia una economía circular, al reducir residuos, maximizar el aprovechamiento de los recursos y fomentar modelos de producción más sostenibles, adaptados a las necesidades locales y globales.

#### 2.4.4. Sostenibilidad e I3D: BOEING

En la industria aeronáutica, se están implementando evaluaciones del ciclo de vida para comprender el impacto ambiental de los productos, desde la extracción de materias primas hasta el final de su vida útil.

En el marco del compromiso de Boeing con la sostenibilidad, se ha llevado a cabo una evaluación integral del impacto ambiental de sus aviones, considerando todo el ciclo de vida, desde la obtención de materiales hasta el retiro del servicio. Un ejemplo destacado es la fabricación de más de mil soportes para las cocinas del modelo 787 Dreamliner mediante impresión 3D, logrando así una reducción significativa del 30% al 39% en emisiones de carbono, desechos y consumo de agua y energía. En lugar del enfoque tradicional de mecanizar bloques de metal, se utilizó un proceso más eficiente que funde y deposita alambre de titanio capa por capa, lo cual redujo el uso de recursos y lubricantes [3].



*Figura 32: Uso de la I3D en Boeing.*

*Fuente:*

Otro caso ilustrativo se observa en la construcción de cargas útiles para satélites. Gracias a la fusión láser de lecho de polvo, Boeing consiguió eliminar miles de sujetadores secundarios y soldaduras propensas a fallos, reduciendo así emisiones y residuos asociados a la fabricación y el montaje.

La impresión 3D también ha permitido avanzar hacia innovaciones sostenibles, como se demuestra con un soporte para detector de incendios del avión EcoDemonstrator, que, tras ser optimizado mediante impresión 3D, consiguió una reducción del 31% en peso y del 19% en el consumo de combustible y las emisiones durante toda la vida útil del avión, a pesar de que su fabricación inicial generó una huella de carbono ligeramente mayor que los métodos tradicionales. Esta tecnología ha eliminado soldaduras defectuosas y ha mejorado la calidad del producto final, superando los problemas que anteriormente se generaban con procesos como laminado, corte y soldadura en múltiples puntos.

Sin embargo, la vicepresidenta de Fabricación Aditiva de Boeing señala que la fabricación aditiva no siempre garantiza una reducción inmediata del impacto ambiental dentro de la planta de producción. Es por ello que se deben identificar y aprovechar las oportunidades de rediseño que ofrece la impresión 3D, lo que permitirá lograr procesos más ecológicos y productos de mayor durabilidad y rendimiento.

Finalmente, la Dra. Melissa Orme destaca que estamos apenas explorando el potencial completo de la impresión 3D para impulsar una era industrial más limpia y sostenible. Esta tecnología promete hacer posible la fabricación de aeronaves más ligeras, aerodinámicas y eficientes, al mismo tiempo que introduce materiales reciclados y nuevos, que demandan menos recursos ambientales para su procesamiento. Ampliar el uso de la impresión 3D en sectores como la aeronáutica y otras industrias será crucial para reducir el impacto ambiental de la fabricación, contribuyendo así a mitigar los desafíos climáticos actuales mediante la creación de productos e innovaciones sostenibles.

## **2.5. Limitaciones y Retos de la Impresión 3D**

A pesar de las numerosas ventajas que la impresión 3D ofrece en términos de personalización, reducción de tiempos de fabricación y optimización de materiales, esta tecnología emergente no está exenta de limitaciones y desafíos que condicionan su adopción generalizada en distintas industrias. La comprensión de estos obstáculos es fundamental para identificar áreas de mejora, promover avances tecnológicos y evaluar de manera crítica el potencial real de la fabricación aditiva. En este apartado se analizarán los principales retos técnicos, económicos, medioambientales y regulatorios asociados a la impresión 3D, con el fin de ofrecer una visión equilibrada de su impacto y perspectivas futuras.

### 2.5.1. Limitaciones técnicas y operativas

A pesar del progreso significativo en las tecnologías de impresión 3D, persisten diversas limitaciones técnicas y operativas que dificultan su aplicación masiva y eficiente en muchos sectores. Estas limitaciones incluyen:

- **Velocidad de producción:** La impresión 3D, especialmente en procesos como el sinterizado selectivo por láser (SLS) o la estereolitografía (SLA), suele ser más lenta que los métodos tradicionales de fabricación en serie). Esto hace que su uso en la producción a gran escala sea, por ahora, inviable en términos de tiempo y coste.
- **Limitaciones en los materiales:** Aunque se están desarrollando constantemente nuevos materiales compatibles con la impresión 3D, muchos materiales utilizados presentan propiedades mecánicas, térmicas o químicas inferiores a las de los materiales tradicionales, lo que restringe su uso en aplicaciones exigentes [23].
- **Tamaño de construcción limitado:** La capacidad de fabricación de muchas impresoras está restringida por el tamaño de la cámara de impresión, lo que obliga a fabricar grandes componentes por partes y ensamblarlos posteriormente, afectando la integridad estructural y aumentando los costes.

Estas limitaciones técnicas y operativas subrayan la necesidad de avances tanto en las tecnologías de impresión como en los materiales empleados, además de adaptaciones en los procesos de diseño y producción.

La impresión 3D también se está utilizando para la construcción de diseños arquitectónicos de cemento (3DPC), sin embargo, este tipo de impresión requiere un enfoque diferente al de las prácticas tradicionales. Por ejemplo, el diseño debe tener en cuenta la incorporación de servicios de construcción (como tuberías y cableado) durante el proceso de impresión, ya que la mayoría de los sistemas de impresión 3D no los contemplan explícitamente. En este contexto, es necesario desarrollar códigos y normas que aborden tanto el proceso como el rendimiento de los sistemas impresos en 3D. A pesar de estos obstáculos, la impresión 3D promete revolucionar la construcción gracias a una mayor personalización y eficiencia [24].

### 2.5.2. Inversión inicial y curva de aprendizaje

La inversión inicial que rodea al sector de la fabricación aditiva no es barata. El conjunto de costes necesarios para implementar esta tecnología de impresión en un entorno productivo incluye el coste de adquisición de la impresora, que es muy variable según el tipo de impresión que se requiera pero que suele rondar los 2.500€ hasta los 25.000€. Por otro lado también se tiene que proveer al ingeniero con un software de diseño y slicing, las licencias de CAD tienen un rango de

precios de unos 4.000-6.000€ anuales dependiendo del pack de herramientas que se requiera para el diseño. La formación del personal técnico también es algo a tener en cuenta, así como el coste de los materiales iniciales. Estos costes pueden suponer una barrera importante para pymes y pequeñas empresas con márgenes pequeños.

La curva de aprendizaje describe la mejora progresiva en el uso eficiente de la tecnología conforma se acumula experiencia.

- Reducción de errores de impresión: mejor calibración, elección adecuada de parámetros y orientación de piezas.
- Optimización del diseño para impresión (DfAM): piezas rediseñadas para aprovechar geometrías complejas sin necesidad de soportes o mecanizados.
- Aprovechamiento del material: menor desperdicio y uso eficiente del volumen de construcción.
- Menores tiempos de post procesado: mejor planificación del flujo de trabajo.
- Mayor fiabilidad y repetibilidad: reducción de piezas fallidas y costes asociados.

Cuanto más complejo el proceso (por ejemplo, DMLS o SLS), más pronunciada es la curva de aprendizaje.

La impresión 3D requiere una inversión inicial elevada, especialmente en aplicaciones industriales, pero una vez superada la curva de aprendizaje, permite fabricación flexible, rápida y con menor coste por unidad en series cortas o personalizadas.

## **2.6. Tendencias Futuras de la Fabricación Aditiva en Talleres Mecánicos**

Aunque su adopción ha sido inicialmente limitada por factores como los costes, la curva de aprendizaje o la resistencia al cambio tecnológico, su evolución constante está generando un creciente interés en el sector. En este apartado se analizan las principales tendencias que marcarán el futuro de la impresión 3D en los entornos de fabricación transformando los talleres mecánicos tradicionales hacia entornos más versátiles, digitales y personalizados.

Las siguientes tendencias destacan cómo esta tecnología seguirá impactando en los próximos años:

- Descentralización y personalización de la fabricación: Con la proliferación de impresoras 3D de bajo coste y mayor capacidad, cada vez más talleres podrán fabricar componentes directamente in situ, reduciendo tiempos de espera y dependencia de proveedores

externos, potenciando la producción bajo demanda y personalizada, ajustada a las necesidades de cada cliente o reparación concreta.

- Nuevos modelos de negocio: La impresión 3D no solo facilitará la producción interna de utillaje, prototipos o piezas finales, sino que permitirá a los talleres ofrecer servicios de diseño y fabricación digital a terceros. Esto transformará algunos talleres tradicionales en microfábricas digitales con capacidad de producción autónoma y flexible [25]. Además, se requerirá una modernización del perfil profesional del técnico de taller. Se valorarán habilidades en diseño asistido por ordenador (CAD), manejo de software de impresión y conocimientos básicos en materiales y post procesado.
- Uso de nuevos materiales: Se espera una expansión en el uso de materiales técnicos (polímeros de ingeniería, composites y metales) en equipos asequibles. Esto permitirá imprimir no solo prototipos, sino también componentes funcionales resistentes al calor, la fricción o el desgaste.

En conjunto, estas tendencias posicionan a la i3D como una herramienta estratégica para modernizar los talleres mecánicos, haciéndolos más ágiles, competitivos y conectados con las demandas de la industria 4.0.

Un ejemplo de lo anterior son los catalizadores en el entorno de fabricación. Los catalizadores juegan un papel fundamental en la industria moderna. Hoy, los catalizadores están involucrados en la producción de más del 80% de todos los productos manufacturados, además, aproximadamente el 90% de todos los productos químicos industriales producidos en el mundo utilizan catalizadores dentro del proceso de fabricación [26].

Un nuevo estudio muestra cómo los catalizadores 3D revolucionan el proceso al ofrecer mayor área superficial, mejor transferencia de calor y masa, y una mayor estabilidad estructural. Con la fabricación avanzada que ofrece la impresión 3D, se logran geometrías optimizadas, porosidad controlada y estructuras resistentes [27].

## **Capítulo 3. Metodología**

### **3.1. Planificación**

En primer lugar, se llevará a cabo una investigación en profundidad sobre los procesos de fabricación aditiva desde su aparición hasta la actualidad evaluando las distintas técnicas. Para esta búsqueda de información se examinarán tanto estudios previos como artículos académicos como webs de empresas del sector. Se explorarán también los principales materiales de impresión 3D y sus características. Para el análisis de costes se visitarán webs donde se venden impresoras 3D para empresas y donde se nos ofrecen tablas comparativas de ahorro de tiempo, material y dinero entre métodos convencionales de fabricación y métodos de fabricación aditiva. Se explorarán distintos casos de estudio donde la implementación de la fabricación aditiva en un taller ha sido un éxito.

Por otra parte, se analizará el impacto medioambiental de la impresión 3D. Con este método se eluden varios pasos de la cadena de suministro al dejar de depender de proveedores externos, ahorrando no solo tiempo y dinero sino energía y transporte. También se hará un estudio de las limitaciones técnicas y operativas y del punto de equilibrio en el cual es rentable que un taller haga una inversión en una impresora 3D.

Para terminar el marco teórico se propondrán las tendencias e innovaciones futuras de la fabricación aditiva, así como su crecimiento en el sector industrial.

El marco práctico del trabajo analizará en detalle todo el proceso de fabricación de un utillaje de sujeción para un taller. Se diseñará, se hará una selección de material para el cual el propósito y la estética queden alineados, se imprimirá y se usará en el laboratorio. Se buscará esa misma pieza de un proveedor externo y fabricado mediante control numérico computarizado. Se compararán las ventajas que proporciona la impresión 3D, así como el ahorro en costes, energía, tiempo, material.

Se extraerán conclusiones de todo lo estudiado y se presentarán a un comité de profesores para su evaluación.

A continuación, se muestra un cronograma detallado del proceso de elaboración del TFG.

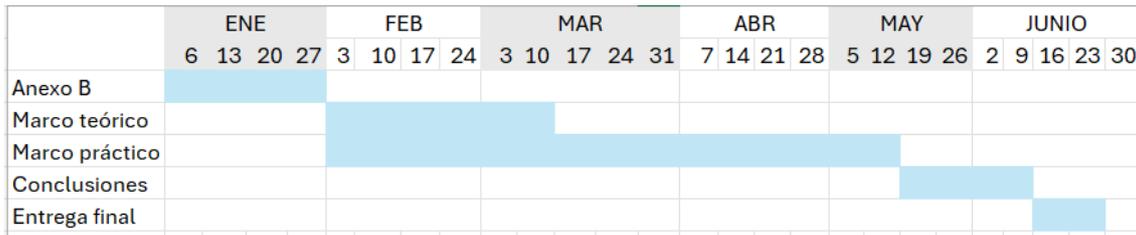


Figura 33: Cronograma TFG.

Fuente: Elaboración propia

### 3.2. Recursos a emplear

Para la reacción del TFG se usarán bibliotecas académicas como el repositorio de Comillas así como Google Scholar o Research Gate.

Para la fabricación del prototipo del utillaje se sujeción se dispondrá del programa Solid Works y del laboratorio de la escuela ICAI.

Por último, para la redacción del trabajo se recurrirá a Microsoft Word junto con la ayuda de Zotero para la gestión de la bibliografía y las referencias citadas en dicho trabajo.

### 3.3. Entorno de soldadura del laboratorio

Los tipos de soldadura de los que se dispone en el laboratorio de ICAI y que se van a emplear en este trabajo para la prueba final del utillaje son TIG y MIG.

#### 3.3.1. Soldadura TIG

La soldadura TIG (del inglés *Tungsten Inert Gas*) también conocida como GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*), es un proceso de soldadura por arco que utiliza un electrodo de tungsteno no consumible y un gas inerte (normalmente argón o helio) para proteger la zona de soldadura de la contaminación atmosférica. El arco voltaico generado entre el electrodo y la pieza alcanza temperaturas de hasta 4500 °C, permitiendo la fusión del metal base. Este proceso puede realizarse con corriente alterna, especialmente para el aluminio, o con corriente continua de polaridad directa para el resto de los metales.

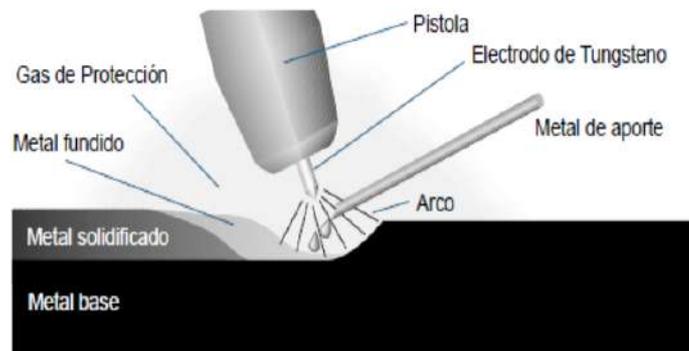


Figura 34: Esquema soldadura TIG.

Fuente: *Apuntes de Tecnologías de fabricación y producción. Conformado por Soldadura.*

Se trata de un proceso predominantemente manual, que exige mantener con precisión la distancia entre el electrodo y la pieza, así como la aplicación del material de aporte, que también se realiza manualmente. Aunque existen instalaciones semiautomáticas, la técnica TIG es especialmente valorada por su precisión en trabajos de alta calidad sobre espesores finos (entre 1 y 6 mm). Es adecuada para prácticamente todos los metales empleados en la industria mecánica, salvo el zinc, el berilio y sus aleaciones, siendo habitual en la fabricación y reparación de chapas, depósitos, tuberías y soldaduras de aceros aleados.

El aporte de material, para espesores finos de chapa no es necesario, para espesores similares al diámetro de la varilla se añade material de aportación.



Figura 35: Soldadura TIG.

Fuente: <https://www.trgsl.es>

La soldadura TIG presenta numerosas ventajas que la convierten en una de las técnicas más valoradas en aplicaciones que exigen alta calidad. En primer lugar, permite obtener cordones de soldadura más resistentes, dúctiles y con menor sensibilidad a la corrosión, ya que el gas protector evita el contacto del oxígeno atmosférico con el baño de fusión. Esta atmósfera inerte también

reduce significativamente la generación de humos y proyecciones, lo que, unido a la visibilidad clara del arco, permite al operario realizar soldaduras limpias, uniformes y con un excelente acabado superficial. Además, la zona adyacente al cordón sufre menores deformaciones térmicas, y al no circular metal de aporte a través del arco, se eliminan las salpicaduras, chispas y emisiones.

Otra ventaja destacable es su capacidad para generar soldaduras de alta calidad en todas las posiciones, incluso en lugares de difícil acceso. El proceso TIG puede automatizarse, controlando mecánicamente tanto la antorcha como el aporte de material, lo que mejora la repetibilidad y reduce errores. Además, resulta especialmente adecuada para soldaduras de responsabilidad como los pases de raíz, donde se requiere precisión y fiabilidad. Esta técnica es versátil, ya que permite soldar prácticamente todos los metales utilizados en la industria, con resultados claros, brillantes y resistentes, sin necesidad de productos de limpieza ni acabados posteriores, lo que reduce costes de fabricación.

No obstante, la soldadura TIG también presenta ciertos inconvenientes. Requiere un suministro continuo de gas protector, lo que implica disponer de bombonas, tuberías e instalaciones adicionales que encarecen el proceso. A ello se suma la necesidad de personal altamente cualificado, ya que se trata de una técnica que exige destreza, precisión y experiencia, lo que incrementa aún más los costes operativos [28].

### 3.3.2. Soldadura MIG

El proceso de soldadura MIG (Metal Inert Gas), se basa en la formación de un arco voltaico entre un hilo electrodo y la pieza a soldar, alcanzando temperaturas en torno a los 4500 °C. Se emplea corriente continua con polaridad inversa, lo que favorece la transferencia del material de aporte al baño de fusión. Este proceso admite tanto ejecución manual como mecánica o semiautomática, con la posibilidad de realizar el aporte en forma de gotas o en vuelo libre gracias a la generación continua de corriente.

La protección del arco se lleva a cabo mediante gases: argón puro en el caso del proceso MIG (gas inerte) y mezclas de argón con dióxido de carbono en el proceso MAG (gas activo). Esta tecnología es especialmente adecuada para la soldadura de espesores medios y gruesos, siendo ampliamente utilizada en aceros al carbono, inoxidable y aluminio. Por su versatilidad y capacidad de automatización, es habitual en aplicaciones estructurales y de cerrajería, donde se requiere una unión homogénea y resistente.

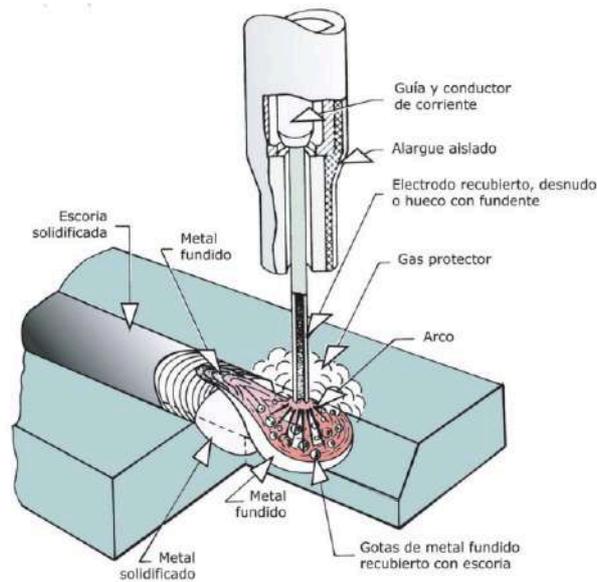


Figura 36: Esquema soldadura MIG.

Fuente: Apuntes de Tecnologías de fabricación y producción. Conformado por Soldadura.

La soldadura MIG (Metal Inert Gas) ofrece múltiples ventajas que la convierten en una técnica eficiente y versátil para numerosas aplicaciones industriales. Una de sus principales virtudes es que la superficie soldada queda limpia y libre de escoria, lo que evita trabajos de limpieza posteriores. Esta técnica permite soldar con gran facilidad materiales de pequeño espesor y ofrece buena visibilidad del arco, facilitando su uso en cualquier posición. Además, el material de aporte se mantiene concentrado al pasar directamente a través del arco, lo que mejora la precisión del proceso. La velocidad de fusión es muy alta, lo que reduce la distorsión del material y permite la ejecución de cordones largos y continuos sin interrupciones.

La soldadura MIG también destaca por su elevada densidad de corriente y una penetración superior respecto a otros métodos. En uniones en V, permite emplear chaflanes más pequeños que los requeridos con el electrodo revestido, lo que reduce tanto la cantidad de material de aporte necesario como el calentamiento de la pieza. Su eficiencia también es notable, con un aprovechamiento del electrodo cercano al 98 % y una notable reducción de empalmes y salpicaduras en cordones largos.

No obstante, este proceso presenta ciertos inconvenientes. El costo del equipo es más elevado en comparación con otros métodos de soldadura, y la distancia entre la fuente de energía y el punto de trabajo está limitada por el sistema de alimentación de hilo y gas. Asimismo, la soldadura MIG no es ideal para trabajos al aire libre, ya que el viento puede dispersar el gas protector, comprometiendo la calidad de la unión. Además, el enfriamiento de la soldadura es más rápido, lo que puede afectar a la microestructura en ciertas aplicaciones, y la geometría del equipo

dificulta su uso en espacios reducidos. Por último, aunque más sencilla que la TIG, esta técnica aún requiere operarios con cierto grado de especialización.



*Figura 37: Soldadura MIG.*

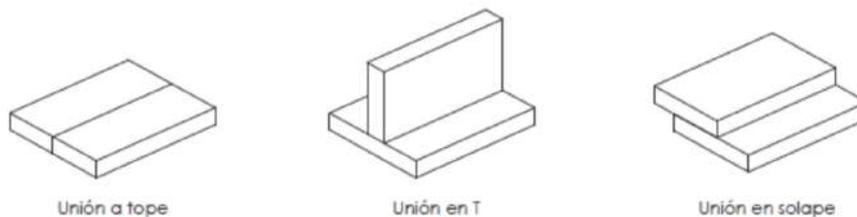
*Fuente: <https://www.codinter.com/es/soldadura-mig-una-guia-completa/>*

## Capítulo 4. Desarrollo

En este apartado del TFG se presenta el diseño propio de un utillaje de sujeción mecánica para soldadura, desarrollada mediante el software de modelado CAD SolidWorks. Se detallarán los principales criterios de diseño empleados, incluyendo la elección del método de impresión y del material seleccionado. Por último, se abordará el aspecto económico, analizando tanto el coste de fabricación como una comparativa con otras herramientas similares disponibles en el mercado actual.

### 4.1. Diseño

El diseño de este utillaje de sujeción se basó en sujetar dos placas de las mismas dimensiones (40x140x4 mm) para poderlas soldar en distintas posiciones. Dichas posiciones de soldadura eran:



*Figura 38: Posiciones de soldadura.*

*Fuente: Apuntes de Tecnologías de fabricación y producción. Conformado por Soldadura.*

#### 4.1.1. Primera versión del utillaje

La primera versión del diseño optimizaba mucho más el material y trataba de ser un diseño modular y flexible. Esta modularidad permitía que cada sección pudiera ser modificada, reemplazada o actualizada sin necesidad de rediseñar todo el sistema. Por otro lado, la flexibilidad implicaba que el diseño pudiera adaptarse a distintas necesidades o condiciones de uso, facilitando su personalización y escalabilidad. Para ello se pensó primero de todo un utillaje de sujeción lo más simple posible para cada posición de soldadura y después se fueron añadiendo entre ellas para crear un único útil de sujeción.

A continuación, se presenta el diseño del ensamblaje a tope. En este sistema, las dos piezas a unir se colocan en posición horizontal, apoyadas sobre el suelo y sujetas por el propio utillaje. Aproximadamente 40 mm de cada pieza quedan insertados en el utillaje, lo cual proporciona un soporte adecuado para mantenerlas estables durante el proceso de soldadura. Se previó un espacio intermedio que permite al operario realizar los cordones de soldadura sin que la antorcha entre en contacto con el utillaje de plástico, evitando así posibles daños causados por las altas temperaturas propias del proceso de soldadura.

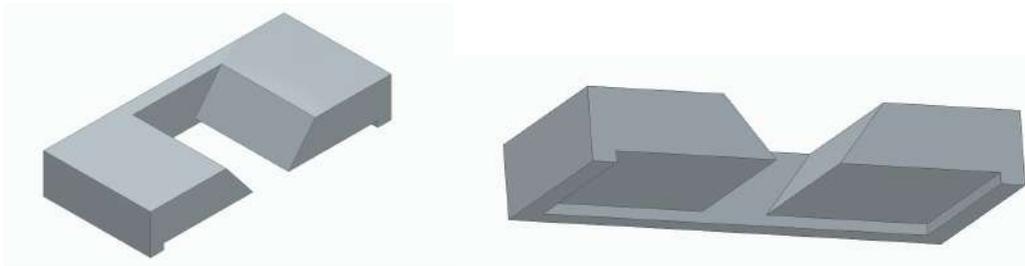


Figura 39: Aproximación utillaje soldadura a tope.

Fuente: Elaboración propia.

Para la sujeción en solape se pensó un utillaje similar, contando con el apoyo del suelo y haciendo una ranura por la que cabe una de las piezas pudiendo así colocar una encima de la otra.

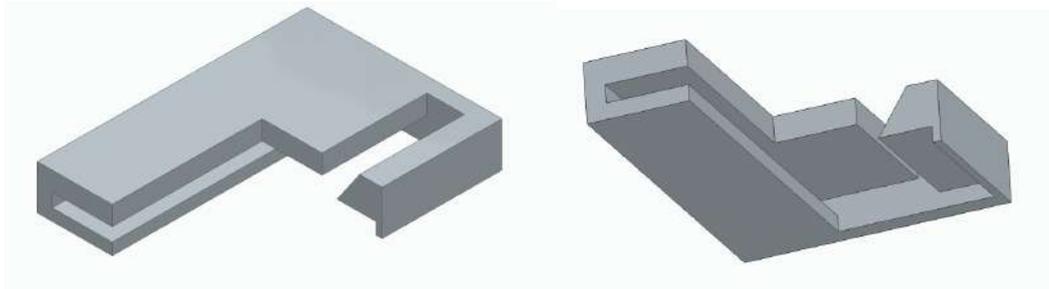


Figura 40: Aproximación utillaje soldadura en solape.

Fuente: Elaboración propia.

En último lugar, se diseñó el utillaje para la soldadura de 'T'. en este caso, una pieza quedaba sujeta con el utillaje y el apoyo del suelo, y la otra, gracias a una pared y una pestaña se sujetaba encima. Se dejó también un espacio intermedio para que el soldador pueda tirar los cordones de soldadura sin alcanzar el utillaje.

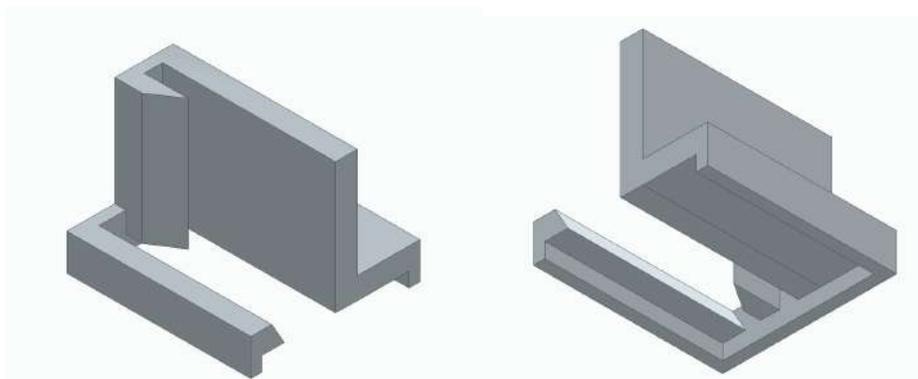


Figura 41: Aproximación utillaje soldadura en "T".

Fuente: Elaboración propia.

Incorporando los tres utillajes en un solo dispositivo se llegó a la primera versión del utillaje final.

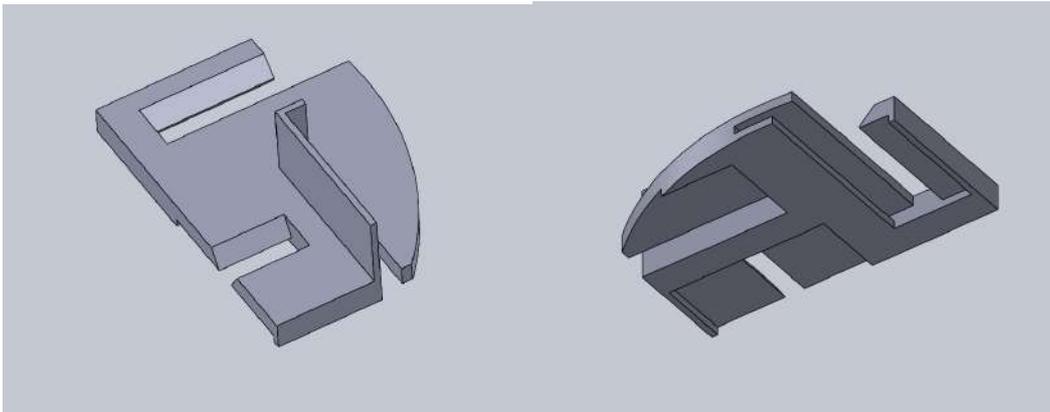


Figura 42: Primera versión del utillaje de sujeción.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.2. Segunda versión utillaje

Para la segunda versión del utillaje se tuvo en cuenta que este va fijado sobre una placa de acero inoxidable de dimensiones 300x300 mm y de 3mm de espesor con tornillos de métrica 6. A su vez esta placa se sujeta a una plancha de aluminio de dimensiones 300x400x100 mm con unas ranuras de 1mm separadas 2 mm entre ellas.

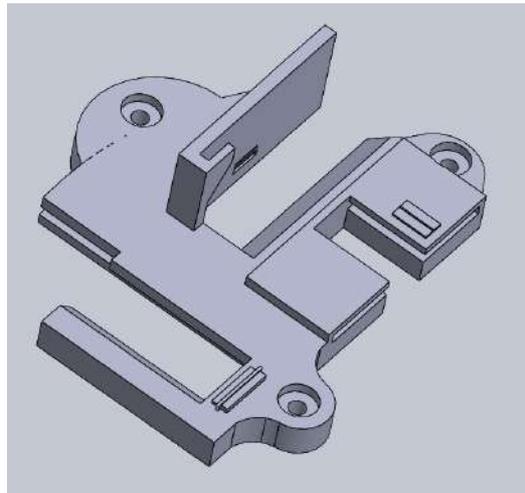
Es por ello que, al utillaje, en la segunda versión, se le añadieron tres fijaciones en puntos estratégicos para poder unir el utillaje a la placa de acero y a su vez a la plancha de aluminio con un tornillo M6.

Esta posterior versión del diseño tenía en cuenta que la soldadura se produce a temperaturas muy elevadas por lo que el plástico debe estar alejado de los puntos de soldadura. El espacio inicial que se había dejado para que el soldador tirase el cordón se consideró insuficiente. Para ello, se amplió el espacio entre piezas a como mínimo 20 mm.

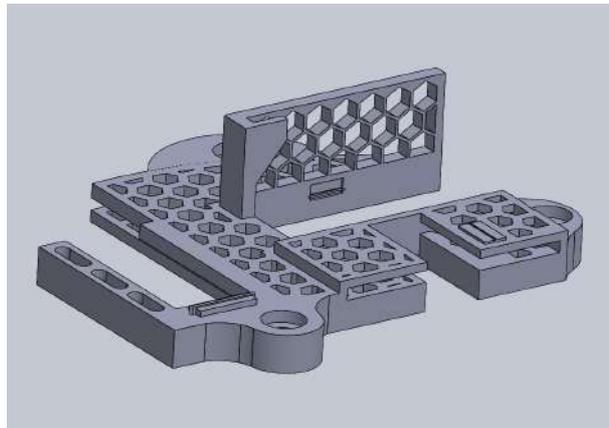
Además, teniendo en cuenta que existía el riesgo de que el metal depositado al soldar se pegase a la placa de acero, se elevó la parte del utillaje para soldar a tope dejándolo en voladizo. Se añadió también más juego a las ranuras del utillaje donde tenían que encajar las piezas.

Ante la dificultad identificada por los usuarios para determinar qué parte del utillaje correspondía a cada posición específica de soldadura, se incorporaron ilustraciones descriptivas en cada componente. Estas representaciones visuales facilitan la correcta identificación y utilización del utillaje en función de la posición requerida durante el proceso de soldadura.

Se hicieron dos versiones de este diseño: la versión 2.1 sin vaciado y la versión 2.2 a la cual se le añadió un vaciado para optimizar el material con una estructura de hexágonos dispuestos a 1.1 mm entre ellos con un diámetro de circunferencia de 9mm.



*Figura 43: Diseño final 2.1.  
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 44: Diseño final con vaciado 2.2.  
Fuente: Elaboración propia.*

#### **4.1.3. Tercera versión del utillaje**

En esta versión final del utillaje se modificó el espacio para soldar a solape, pues, aunque en la versión anterior hubiese 20mm de separación, este espacio no estaba bien distribuido y abarcaba la mayoría de la pieza superior, dejando muy poco espacio en el punto de unión donde hay que soldar. En la figura 45 se muestra el problema.



Figura 45: Espacio insuficiente para soldadura en solape.  
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.4. Cuarta versión del utillaje

Para el último diseño se amplió el espacio para poner las placas de metal para que cupiesen tanto las placas de acero como las de aluminio, luego en el laboratorio de IACI, para las prácticas de soldadura de la asignatura de Tecnologías de Fabricación y Producción, se realizan prácticas con ambos tipos de placas.

El espacio se amplió a 4,1 mm para tener 0,1mm de tolerancia ante posibles variaciones del espesor de las placas.

#### 4.1.5. Futuras versiones y mejoras

Para futuras ideas de mejora del utillaje se plantea incluir las dos posiciones de soldadura básicas que faltan, en borde y en ángulo con el siguiente diseño.

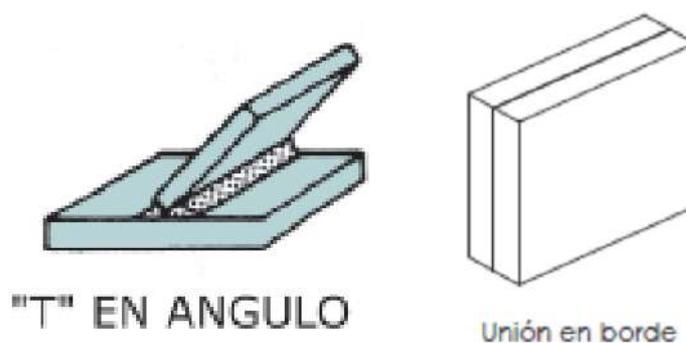
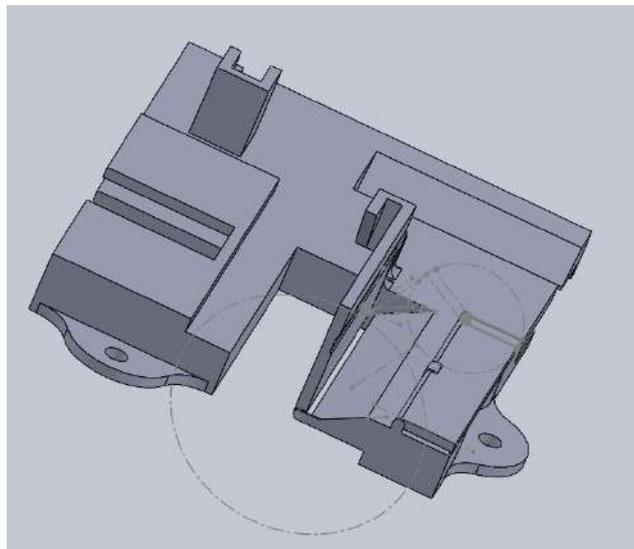


Figura 46: Posiciones de soldadura.  
Fuente: Apuntes de Tecnologías de fabricación y producción. Conformado por Soldadura.

Se ha desarrollado un primer diseño conceptual de una posible versión futura del utillaje, con el objetivo de incorporar las dos posiciones de soldadura que permanecían pendientes. En esta iteración preliminar, se han introducido varias mejoras funcionales orientadas a la versatilidad y ergonomía del sistema:

- Desmontaje modular: Se ha añadido un pasador en la estructura vertical que permite desmontar dicha parte de manera rápida y segura, facilitando el cambio o ajuste del utillaje en función de la operación a realizar.
- Inclinación ajustable: Se ha incorporado una pared adicional dotada de un sistema de bisagra, lo que permite modificar su ángulo según las necesidades de la posición de soldadura específica.

En las imágenes adjuntas se observa una vista isométrica del nuevo diseño. Se aprecian claramente las distintas cavidades y superficies de apoyo que permiten alojar la pieza a soldar en múltiples orientaciones, así como los mecanismos mencionados que dotan al utillaje de mayor flexibilidad operativa. Este planteamiento busca anticipar las futuras necesidades del proceso y mejorar la adaptabilidad del sistema en entornos de fabricación variables.



*Figura 47: Propuesta diseño para 5 posiciones de soldadura (1).  
Fuente: Elaboración propia.*

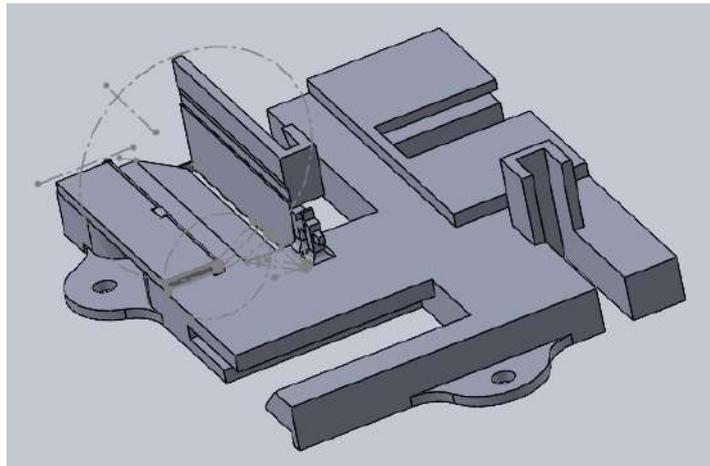


Figura 48: Propuesta diseño para 5 posiciones de soldadura (2).  
Fuente: Elaboración propia.

La misma versión se presenta con un vaciado de hexágonos de 9mm de diámetro con una separación de 1,1mm entre ellos.

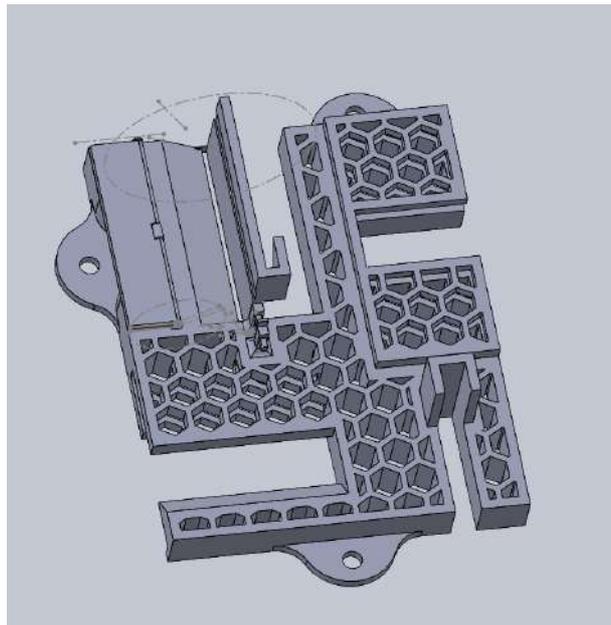
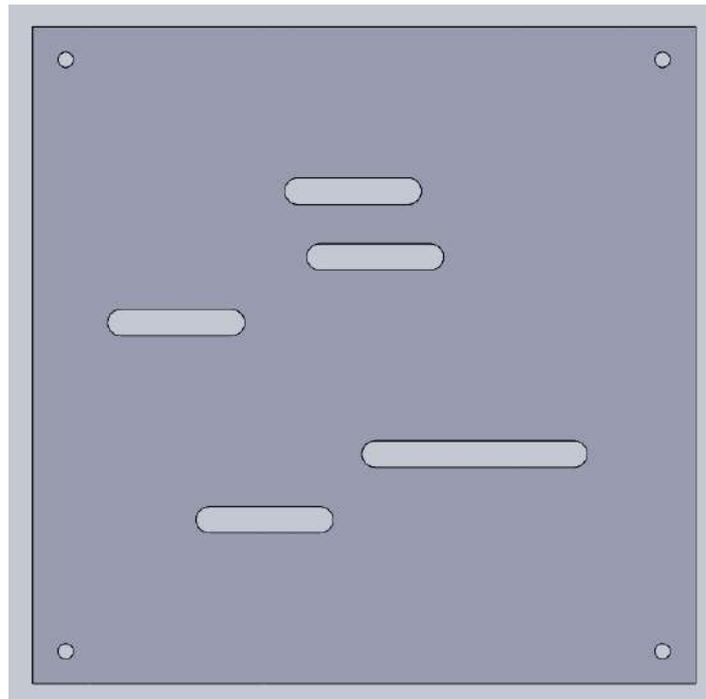


Figura 49: Propuesta diseño para 5 posiciones de soldadura con vaciado hexagonal.  
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.6. Diseño y disposición de ranuras en la placa de acero

Para poder usar la placa de acero inoxidable de 300x300 mm con 0,3 mm de espesor se tuvo que perforar en lugares estratégicos para que coincidieran con las ranuras de la plancha de aluminio y a su vez con los agujeros del utillaje diseñado.

Se midió donde dónde debían ir las ranuras en la placa de acero y se creó en Solid Works un modelo de la pieza. Aunque las ranuras de la plancha de aluminio eran de 1mm de ancho, se diseñaron en la aplaca de acero con un ancho de 12mm para tener cierto margen. Por otro lado, se hicieron unos agujeros en las esquinas para fijar la placa de acero a la plancha ranurada de aluminio.



*Figura 50: Diseño ranuras y agujeros placa metal.  
Fuente: Elaboración propia.*

El corte de la placa de acero inoxidable se realizó mediante tecnología de chorro de agua a alta presión, una técnica especialmente adecuada para este tipo de material. Esta elección se fundamenta en la capacidad del corte por chorro de agua para realizar cortes precisos sin generar zonas afectadas térmicamente, lo cual es especialmente beneficioso en el caso del acero inoxidable, preservando sus propiedades mecánicas y su integridad superficial. Antes del corte, la superficie de la placa fue limpiada con agua para eliminar posibles residuos de aceites u otros contaminantes que pudieran interferir con la precisión del proceso.

La placa se posicionó en la máquina de corte Protomax, diseñada para operaciones de corte por chorro de agua a pequeña escala. El archivo de diseño, en formato .dxf, fue importado al software Protomax Layout, encargado de controlar y generar la trayectoria de corte.

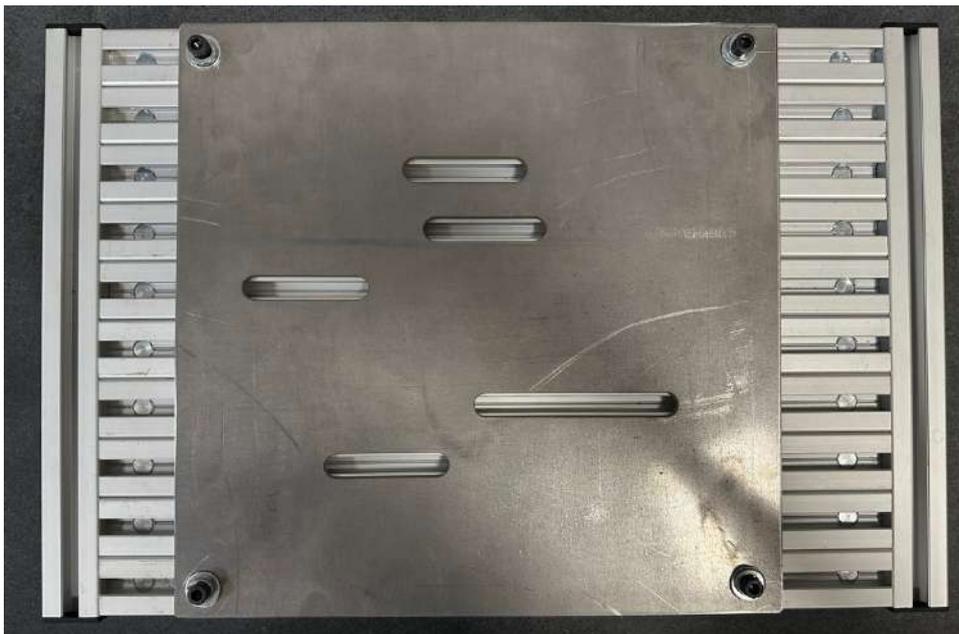
Para esta prueba, se configuró un nivel de calidad de corte 3, correspondiente a un equilibrio entre precisión y velocidad. Según la estimación del software, se requirieron aproximadamente 2 kg de

material abrasivo y un tiempo de corte estimado de 10 minutos para completar la trayectoria programada.



*Figura 51: Proceso de corte por chorro de agua.  
Fuente: Elaboración propia.*

En la figura 52 se muestra el resultado final del corte la placa de acero cortada y fijada a la plancha de aluminio con una configuración de tornillos y arandelas M6.



*Figura 52: Configuración final placas.*

*Fuente: Elaboración propia.*

#### 4.2. Pinza de masa magnética

Se creó también, a partir de un imán, un tornillo y un conjunto de tuercas y arandelas, así como un brazo de conducción de cobre, una pinza de masa magnética para soldadura eléctrica con la función principal de establecer un punto de conexión a tierra (masa) de manera rápida y segura durante el proceso de soldadura.

Esta pinza magnética se puso en contacto con la placa de acero para las soldaduras en solape y en t, ya que, en estos casos, como mínimo, una de las placas a soldar está en contacto con la plancha de acero, por lo que la conexión a tierra se asegura colocando simplemente en contacto la pinza magnética con la placa de acero.

Para la soldadura a tope, se aseguró que la pinza magnética cupiese por debajo de las placas que quedaban en voladizo tomando contacto con la plancha de acero y con las piezas a soldar, haciendo también de soporte para la parte final de las placas.



*Figura 53: Pinza magnética.  
Fuente: Elaboración propia.*

#### 4.3. Material de impresión

Para la realización del utillaje que se va a imprimir se ha elegido como material de impresión el Onyx.

El Onyx es un material compuesto especialmente diseñado para la impresión 3D de alta resistencia. Se trata de una mezcla de nylon (poliamida) reforzado con fibras de carbono cortas, lo que le otorga una combinación única de rigidez, durabilidad y ligereza [29]. Este material es comercializado principalmente por la empresa Markforged, destacándose por su versatilidad y rendimiento en aplicaciones industriales.



Figura 54: Filamento de Onyx de Markforged.

Fuente: <https://markforged.com/es/materials/plastics/onyx>

A diferencia de otros materiales de impresión 3D como el PLA, ABS o PETG, el Onyx destaca por su resistencia mecánica comparable a ciertos metales, a la vez que mantiene un peso reducido. Su uso se ha popularizado en sectores como automoción, aeroespacial, ingeniería y robótica, donde se requiere la producción de piezas funcionales y duraderas. Además, ofrece un acabado superficial liso y mate, eliminando en muchos casos la necesidad de procesos de postproducción.

Desde el punto de vista económico, aunque el coste de Onyx es más elevado que el de materiales básicos de impresión 3D, como el PLA o el ABS, resulta mucho más económico y rápido que el mecanizado CNC o la inyección de plásticos para la producción de series cortas y prototipos. El tiempo de producción y la reducción de procesos intermedios lo convierten en una alternativa atractiva para las empresas.

En resumen, Onyx es la elección ideal cuando se necesita un material que combine ligereza, alta resistencia, calidad estética y un costo razonable, situándose como un punto intermedio entre los plásticos convencionales y el mecanizado de metales.

#### 4.4. Impresión

##### 4.4.1. Primera impresión

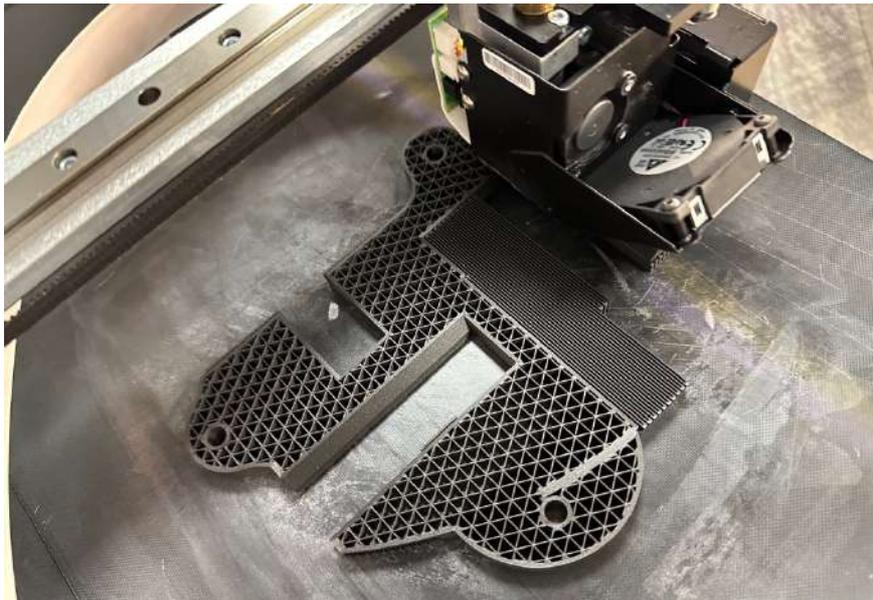
Para la impresión del primer prototipo del utillaje se usó la segunda versión sin el vaciado interno, es decir, la versión 2.1 del diseño. La impresión se llevó a cabo con el método FDM mediante la impresora industrial Markforged X7, empleando material Onyx (nylon reforzado con microfibras de carbono) de la misma marca. En concreto, se utilizó una bobina de 800 cm<sup>3</sup> como fuente de material.

Para ello, en primer lugar, se realizó la conversión del archivo. SLDPRT (formato nativo de piezas en SolidWorks, que contiene el modelo paramétrico en 3D) al formato. STL, el cual es

ampliamente utilizado en impresión 3D. Este formato representa la geometría superficial del modelo mediante una malla de triángulos, sin incluir información relativa a color, texturas ni propiedades del material. Durante el proceso de exportación, se estableció una tolerancia de 1 mm y un ángulo de desviación de 1° para el mallado.

Posteriormente, el archivo STL fue procesado mediante el software de laminado Eiger.io, desarrollado por Markforged. Dado que se trataba de un primer prototipo, se seleccionó un patrón de relleno triangular con una densidad de relleno del 28%, tres capas para el techo y el suelo (roof and floor layers), y tres capas de pared (wall layers). Además, se especificó una altura de capa de 0,2 mm en los ajustes de impresión.

El resultado final del procesado arrojó una pieza con dimensiones de 145,1 mm × 164,2 mm × 44,0 mm, un tiempo estimado de impresión de 8 horas y 34 minutos, y una masa total de 91,36 g, correspondiente a un volumen de material plástico de 88,34 cm<sup>3</sup>.



*Figura 55: Infill del proceso de impresión del utillaje.  
Fuente: Elaboración propia.*

#### **4.4.2. Segunda impresión**

Para esta impresión se usó la versión 3 del diseño, con el espacio para soldar aumentado. Se establecieron las mismas tolerancias y los mismos parámetros de impresión que en el apartado anterior. En este caso, el tiempo de impresión fue de 8 horas y 35 minutos, dando como resultado una pieza de 92,8g con un volumen de plástico de 89,05cm<sup>3</sup>.

## Capítulo 5. Análisis de Resultados

### 5.1. Análisis técnico

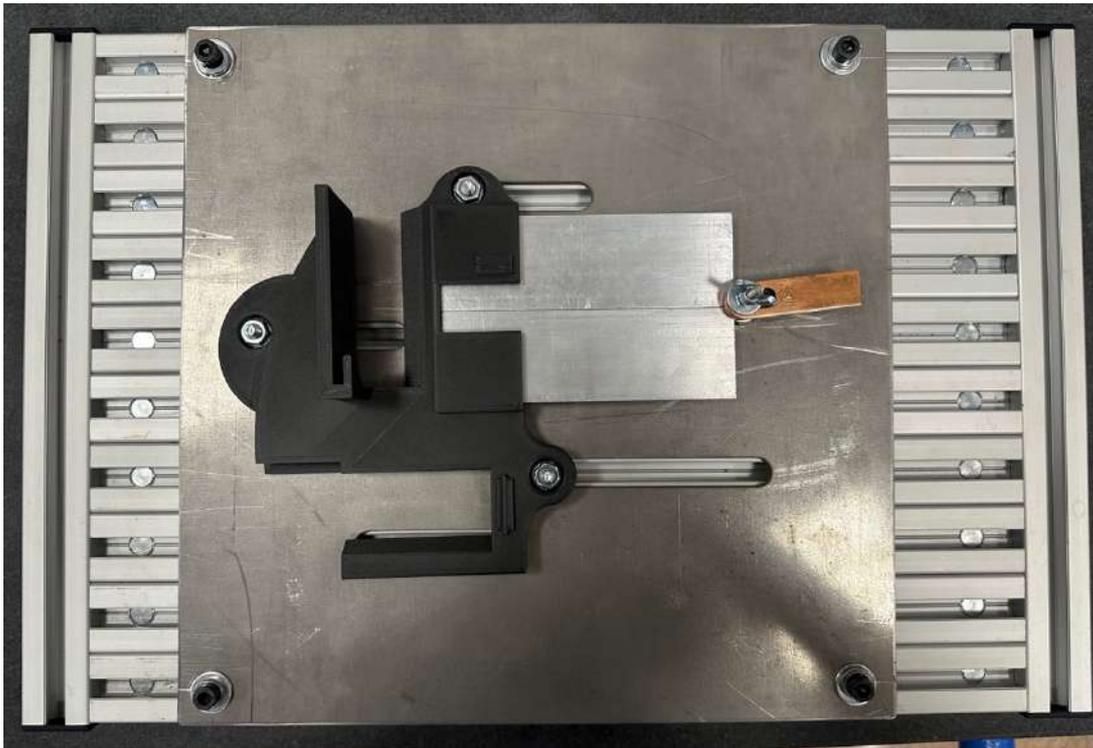
El presente apartado tiene como objetivo evaluar y analizar los resultados obtenidos a lo largo del proceso de diseño, fabricación y validación del utillaje desarrollado. Se examinan aquí los aspectos clave relacionados con el comportamiento técnico del sistema, su viabilidad funcional, la calidad del prototipo fabricado y la adecuación a los requerimientos definidos inicialmente.

#### 5.1.1. Pieza final

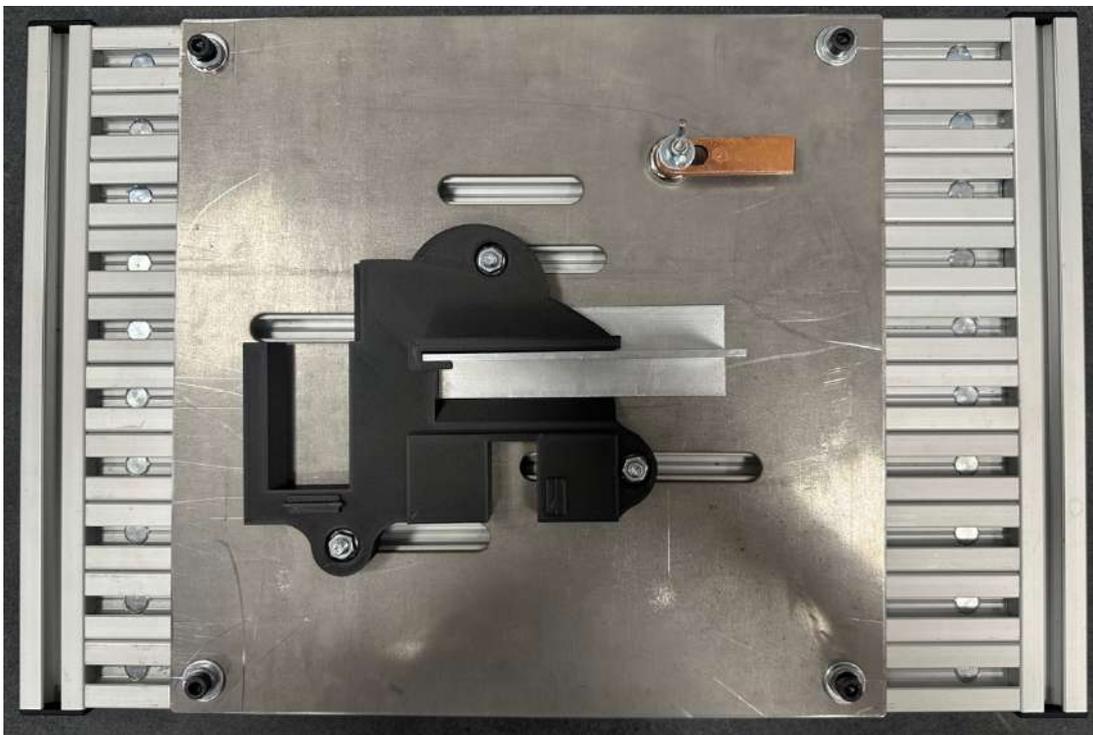
Se muestra a continuación el montaje final del proyecto en las tres posiciones de soldadura.



*Figura 56: Montaje final para soldadura en solape.  
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 57: Montaje final para soldadura a tope.  
Fuente: Elaboración propia.*

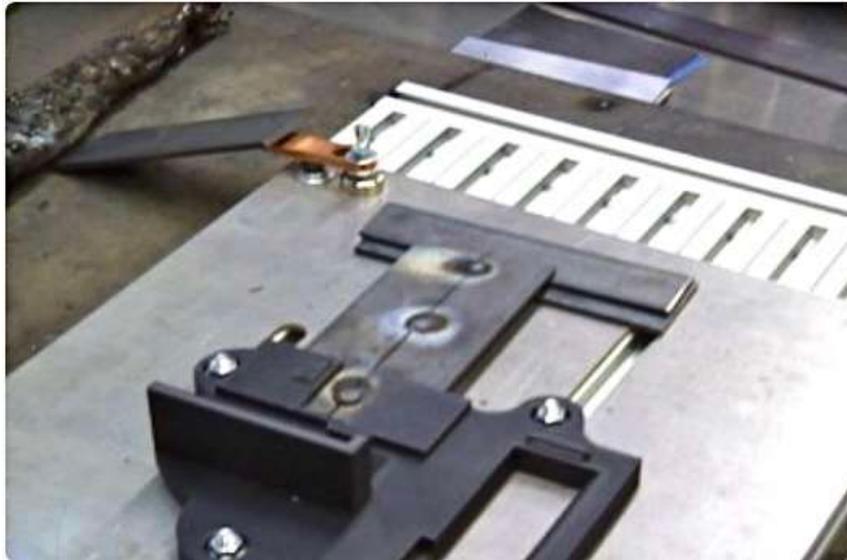


*Figura 58: Montaje final para soldadura en "T".  
Fuente: Elaboración propia.*

### 5.1.2. Prueba del utillaje

Se probó la pieza final en el laboratorio, para soldar con soldadura MIG dos placas de acero.

A continuación, se muestran las imágenes para el proceso de puntear para las tres posiciones.



*Figura 59: Resultado punteo a tope.  
Fuente: Elaboración propia.*

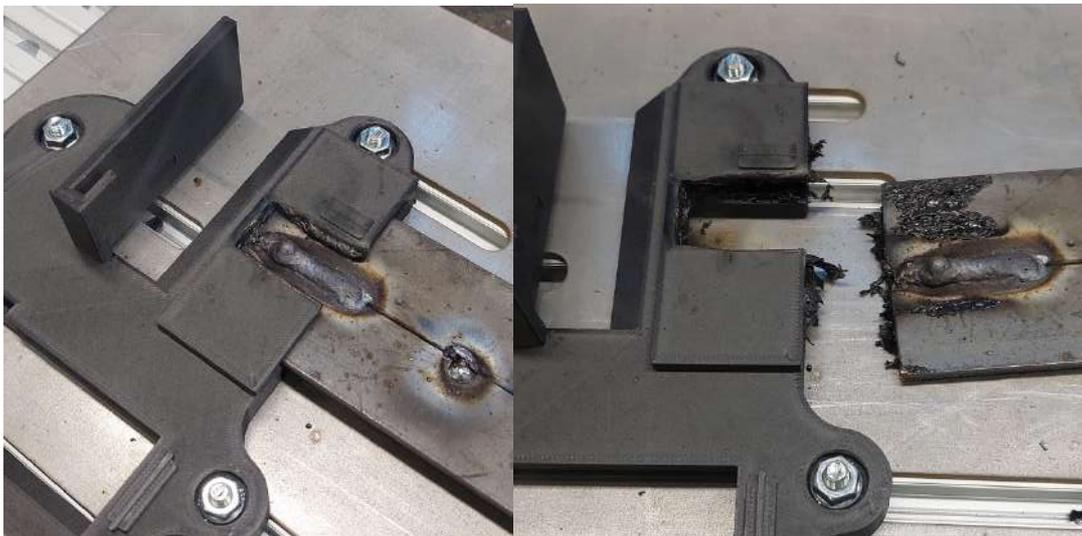


*Figura 60: Resultado punteo en solape.  
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 61: Resultado punteo en "T".  
Fuente: Elaboración propia.*

A continuación, se muestran los resultados para los procesos de soldadura en las tres posiciones.



*Figura 62: Resultado soldadura a tope.  
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 63: Resultado soldadura en solape.  
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 64: Resultado soldadura en "T".  
Fuente: Elaboración propia.*

## 5.2. Análisis económico

Con el objetivo de estimar de forma precisa el coste asociado a la fabricación de la pieza mediante impresión 3D, se ha llevado a cabo un análisis detallado considerando tanto los costes fijos del servicio como los variables de la pieza.

### 5.2.1 Costes del servicio

El equipo utilizado para la fabricación fue una impresora industrial cuyo coste de adquisición asciende a 66.500 €, con un periodo de amortización estimado en 4 años y un régimen de funcionamiento de 8 horas por jornada laboral.

En cuanto al consumo energético, se ha considerado un precio de electricidad de 47,25 €/MWh [30] y una potencia media de funcionamiento de la impresora de 0,15 kW, lo que resulta en un coste de 0,01 €/h por consumo eléctrico.

El coste del material por kilo se ha calculado sabiendo que una bobina de 800cc cuesta 190€. Sabiendo que la densidad del Onyx es de 1,2g/cm<sup>3</sup> con un simple factor de conversión se llega al precio por kilo del Onyx que son casi 198€/kg. A continuación, se muestra una tabla con los datos.

Datos del servicio		
Coste de la impresora	66.500,00	[€]
Periodo de amortización	4	[años]
Horas de uso por día laborable de la impresora	8	[h]
Coste luz	0,05	[€/kWh]
Potencia media de la impresora	0,15	[kW]
Coste de material	197,92	[€/kg]
Coste por hora de personal	20	[€/h]

Tabla 6: Datos del servicio de impresión.  
Fuente: Elaboración propia.

Cálculo de los costes del servicio		
<b>Costes pedido</b>		
Coste por hora preparación/postprocesado	20	[€]
<b>Costes por hora de impresión</b>		
Coste de amortización de la impresora	8,31	[€/h]
Coste de la electricidad	0,01	[€/h]
Coste por hora total	8,32	[€/h]
<b>Costes de consumibles</b>		
Coste de material	197,92	[€/kg]

Tabla 7: Costes del servicio de impresión.  
Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.2 Costes del pedido y parámetros de impresión

Para el caso concreto analizado, se fabricó una única pieza con una masa de 91,36 g y un tiempo de impresión de 8 horas y 34 minutos. Asimismo, se dedicaron 10 minutos adicionales a tareas de preparación y postprocesado, necesarias para completar el pedido. A continuación, se muestran los costes de la fabricación de la pieza.

<b>Datos del pedido</b>	
Tiempo de preparación/postprocesado	0,17 [h]
<b>Datos de la pieza</b>	
Tiempo de impresión	8,5 [h]
Masa	0,09136 [kg]
Cantidad	1 [u]
<b>Coste de pedido</b>	
<b>Costes de pedido</b>	
Preparación/postprocesado del pedido	3,33 [€]
<b>Coste de la pieza</b>	
Material	18,08 [€/u]
Horas de impresión	70,72 [€/u]
Coste por pieza	88,80 [€/u]
Coste de todas las piezas	88,80 [€]
<b>Costes totales del pedido</b>	
Coste total del pedido	92,13 [€]
Cada unidad adicional	88,80 [€]

*Tabla 8: Datos y costes del pedido.  
Fuente: Elaboración propia.*

### 5.3. Simulación de impresión metálica

Se ha hecho uso de el simulador de Xometry para ver qué es lo que costaría la impresión en metal del utillaje diseñado.

En esta simulación de coste de fabricación, se ha seleccionado la tecnología de Sinterizado Láser Directo de Metales (DMLS) para la producción de una pieza, empleando como material acero para herramientas 1.2709 / MS1. La resolución elegida para la impresión corresponde a un acabado económico, con un espesor de capa superior a 60 µm.

Entre las características avanzadas, se especifica un acabado estándar y se indican 3 roscas o taladros roscados en la pieza. El sistema estima un precio de 1.085,93 € por unidad, con un plazo de entrega estándar de 14 días laborables. La opción exprés no está disponible para esta configuración.

La opción más económica es la impresión en aluminio AlSi10Mg, con las mismas especificaciones que la simulación anterior, Xometry calcula un coste de fabricación de 646,40€ y 12 días laborables para la entrega estándar.

## Capítulo 6. Conclusiones y Trabajos Futuros

La incorporación de la impresión 3D en un taller de fabricación mecánica supone una transformación significativa tanto en términos económicos como operativos. A lo largo de este trabajo se ha demostrado que la fabricación aditiva no solo permite una reducción considerable de costes y tiempos de producción, sino que también incrementa la flexibilidad y la autonomía del taller al eliminar la dependencia de proveedores externos.

El análisis detallado de la fabricación de un utillaje impreso en 3D ha puesto en evidencia los beneficios cuantificables que ofrece esta tecnología, especialmente en la producción de herramientas personalizadas y de bajo volumen.

Se ha comprobado que el utillaje diseñado resulta idóneo para la realización de puntos de soldadura en las tres posiciones básicas, cumpliendo adecuadamente su función en operaciones de punteado. No obstante, se han identificado limitaciones significativas al emplearlo en soldaduras continuas. En este tipo de operaciones, el calor generado es más persistente y deja de concentrarse en un único punto, tal y como evidencia las imágenes térmicas capturadas durante el proceso adjuntas en el Anexo D. Esta dispersión térmica provoca una transmisión de calor a lo largo de las placas metálicas, lo que conlleva un aumento sostenido de la temperatura que acaba afectando negativamente al utillaje, llegando a fundirlo. En consecuencia, se concluye que el utillaje es técnicamente adecuado para aplicaciones de punteado, pero no apto para la ejecución de cordones de soldadura continuos.

Por ello, se propone como línea de desarrollo futuro la fabricación del utillaje mediante impresión 3D utilizando materiales compuestos de mayor resistencia térmica. En concreto, se plantea la experimentación con refuerzos de fibra de vidrio y fibra de carbono Kevlar, con el objetivo de mejorar la estabilidad térmica y mecánica del conjunto. Asimismo, se considera el uso de materiales específicamente diseñados para aplicaciones a altas temperaturas, como la resina High Temperature de Formlabs, que ofrece un excelente comportamiento bajo sollicitaciones térmicas prolongadas.

Otra línea para desarrollos futuros de este trabajo sería la impresión y la prueba del prototipo del diseño que incorpora las 5 posiciones básicas de soldadura.

Además, se ha destacado el impacto positivo de esta tecnología en la sostenibilidad industrial. La fabricación aditiva permite un uso más eficiente de los recursos, una reducción de residuos y una mejora en la eficiencia energética, lo que alinea esta solución con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente con los ODS 8, 9 y 12.

En definitiva, la impresión 3D representa una herramienta poderosa para mejorar la competitividad, eficiencia y sostenibilidad de los procesos industriales. Su integración adecuada y estratégica puede suponer una ventaja diferencial clave en el actual entorno de transformación tecnológica de la industria manufacturera.

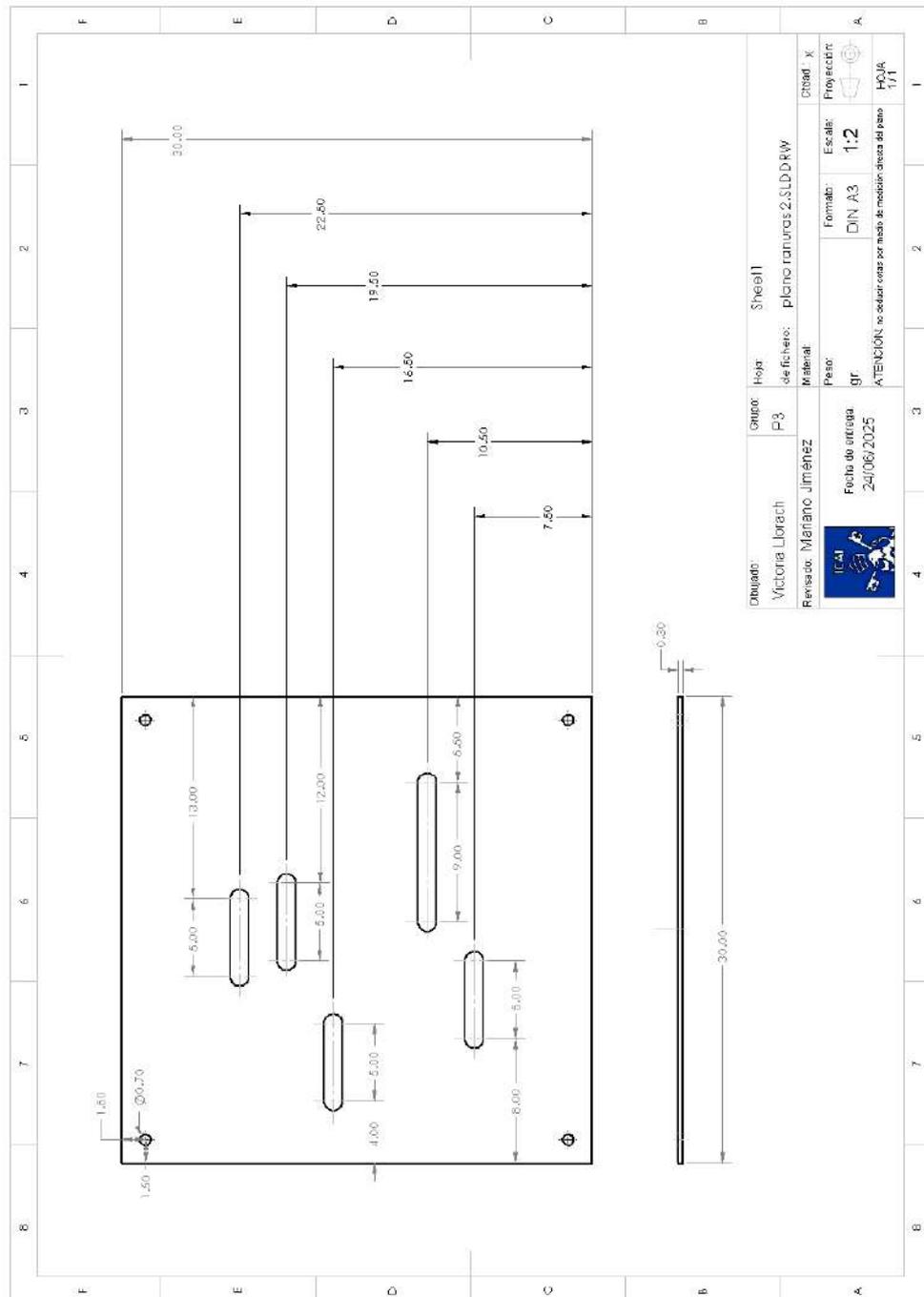
## Bibliografía

- [1] M. J. Gamez, «Objetivos y metas de desarrollo sostenible», Desarrollo Sostenible. Accedido: 27 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [2] «La impresión 3D y el impacto medioambiental de la fabricación». Accedido: 2 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://markforged.com/es/resources/blog/3d-printing-and-the-environmental-impact-of-manufacturing>
- [3] «Estudio del Mercado de Impresión 3D, Informe 2025-2034». Accedido: 25 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.informesdeexpertos.com/informes/mercado-de-impresion-3d>
- [4] S. García, «Tendencias en impresión 3D para 2025», MIOTI. Accedido: 25 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://mioti.es/es/blog-tendencias-en-impresion-3d-para-2025/>
- [5] «Pronóstico Del Mercado De Impresión 3d, Participación, Estrategias, Alcance, Visión General.» Accedido: 26 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.databridgemarketresearch.com/es/reports/global-3d-printing-market>
- [6] «Mi casa la construye una impresora 3D | Negocios | EL PAÍS». Accedido: 26 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://elpais.com/economia/negocios/2024-10-05/mi-casa-la-construye-una-impresora-3d.html?utm\\_source=chatgpt.com](https://elpais.com/economia/negocios/2024-10-05/mi-casa-la-construye-una-impresora-3d.html?utm_source=chatgpt.com)
- [7] «Aplicaciones de impresión 3D: Utillaje rápido», Formlabs. Accedido: 2 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://formlabs.com/es/applications/rapid-tooling/>
- [8] «WP-ES-Diseno-de-sujecciones-con-guia-y-fijaciones-impresas-en-3D.pdf». Accedido: 16 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://3d.formlabs.com/rs/060-UIG-504/images/WP-ES-Diseno-de-sujecciones-con-guia-y-fijaciones-impresas-en-3D.pdf?mkt\\_tok=MDYwLVVJRy01MDQAAAGXxc\\_TyQjG21Z0u7Tf7w150BQODW D- GIH6BFk8JM-Iq3fx8Y8h1BwOWP-5729QrM-ac450pBpzpyVvDfes6ssOQ1hm4XVNnSK8c\\_oJJyfTCLwFA](https://3d.formlabs.com/rs/060-UIG-504/images/WP-ES-Diseno-de-sujecciones-con-guia-y-fijaciones-impresas-en-3D.pdf?mkt_tok=MDYwLVVJRy01MDQAAAGXxc_TyQjG21Z0u7Tf7w150BQODW D- GIH6BFk8JM-Iq3fx8Y8h1BwOWP-5729QrM-ac450pBpzpyVvDfes6ssOQ1hm4XVNnSK8c_oJJyfTCLwFA)
- [9] «00 Markforged-3DZ\_E-book-Markforged\_SPA-Taller eficiente».
- [10] «SDHQ+Welding+Fixture+OP».
- [11] L. C, «¿Por qué utilizar la impresión 3D?», 3Dnatives. Accedido: 28 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/por-que-la-impresion-3d-230720182/>
- [12] INTECH3D, «CASO DE ÉXITO: SILAM | INTECH3D», intech-3d. Accedido: 2 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://intech3d.es/caso-de-exito-silam/>
- [13] B. F. S. & C. K. Germany Coburg, «Company». Accedido: 29 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.brose.com/de-en/company/>
- [14] «Cómo Brose usa la tecnología SLA y SLS para potenciar la producción automovilística», Formlabs. Accedido: 22 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://formlabs.com/es/blog/brose-sla-sls-bolster-automotive-production/>
- [15] «Brose, utiliza la impresión 3D SLS para producir piezas de uso final para autos. - Shift 3D». Accedido: 29 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://shift3d.com.mx/industrias/automotriz/casos-de-exito/brose-utiliza-la-impresion-3d-sls-para-producir-piezas-de-uso-final-para-autos>
- [16] «Incorporar la impresión 3D a un taller de maquinaria: Lo que hemos aprendido de A&M Tool», Formlabs. Accedido: 2 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://formlabs.com/es/blog/incorporar-impresion-3d-taller-maquinaria-am-tool/?srsltid=AfmBOoqgbv8oJdneM9\\_F2FWrj3EdzptBqjaFft2ovO-aEOs7LiMoMhkp&utm\\_source=chatgpt.com](https://formlabs.com/es/blog/incorporar-impresion-3d-taller-maquinaria-am-tool/?srsltid=AfmBOoqgbv8oJdneM9_F2FWrj3EdzptBqjaFft2ovO-aEOs7LiMoMhkp&utm_source=chatgpt.com)
- [17] «How 3D printing helps accelerate sustainable manufacturing», World Economic Forum. Accedido: 2 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.weforum.org/stories/2023/06/how-3d-printing-helps-accelerate-sustainable-manufacturing/>

- [18] T. Peng, K. Kellens, R. Tang, C. Chen, y G. Chen, «Sustainability of additive manufacturing: An overview on its energy demand and environmental impact», *Addit. Manuf.*, vol. 21, pp. 694-704, may 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.04.022.
- [19] «El gasto energético en la industria», Drives. Accedido: 2 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://new.abb.com/drives/es/eficiencia-energetica/gasto-energetico-industria>
- [20] M. Gebler, A. J. M. Schoot Uiterkamp, y C. Visser, «A global sustainability perspective on 3D printing technologies», *Energy Policy*, vol. 74, pp. 158-167, nov. 2014, doi: 10.1016/j.enpol.2014.08.033.
- [21] M. Baumers, C. Tuck, R. Wildman, I. Ashcroft, y R. Hague, «ENERGY INPUTS TO ADDITIVE MANUFACTURING: DOES CAPACITY UTILIZATION MATTER?».
- [22] «¿Qué es la economía circular? | Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia Gobierno de España.» Accedido: 2 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://planderecuperacion.gob.es/noticias/que-es-la-economia-circular-prtr>
- [23] I. Gibson, D. Rosen, y B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. New York, NY: Springer New York, 2015. doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3.
- [24] O. Mohamed, A. Mishra, y F. Isam, «An overview of 3D printed concrete for building structures: Material properties, sustainability, future opportunities, and challenges», *Structures*, vol. 78, p. 109284, ago. 2025, doi: 10.1016/j.istruc.2025.109284.
- [25] B. Berman, «3-D printing: The new industrial revolution», *Bus. Horiz.*, vol. 55, n.º 2, pp. 155-162, mar. 2012, doi: 10.1016/j.bushor.2011.11.003.
- [26] C. D. Millholland, «Uso industrial de catalizadores», *Ciencia Acelerada*. Accedido: 3 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.thermofisher.com/blog/cienciaacelerada/materiales/uso-industrial-de-catalizadores/>
- [27] S. Samidin *et al.*, «Advancing CO2 methanation with 3D-engineered catalysts: Innovations, challenges, and future prospects», *J. Alloys Compd.*, vol. 1028, p. 180766, may 2025, doi: 10.1016/j.jallcom.2025.180766.
- [28] M. J. Calzado, «TEMA 6: CONFORMADO POR SOLDADURA».
- [29] «Onyx - Composite 3D Printing Material». Accedido: 28 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://markforged.com/materials/plastics/onyx>
- [30] «Red Eléctrica Boletín mensual Abril 2025».



Plano placa acero inoxidable



## Anexo B: Ficha técnica impresora MarkForged X7



Escuela Técnica Superior de Ingeniería - I.C.A.I.

### MARKFORGED X7



<b>Propiedades de la impresora</b>	<b>Proceso</b>	Fabricación con filamento fundido, fabricación con filamento continuo
	<b>Volumen de construcción</b>	330 x 270 x 200 mm
	<b>Peso</b>	48 kg
	<b>Tamaño de la máquina</b>	584 x 483 x 914 mm
	<b>Lecho de impresión</b>	Acoplamiento cinemático, plano con una precisión de 80 µm
	<b>Láser</b>	Inspección durante el proceso, calibración de la impresión activa, nivelación del lecho
	<b>Sistema de extrusión</b>	Extrusor de segunda generación, detección de falta de plástico y fibra
	<b>Alimentación</b>	100-240 V CA, 150 W (pico 2 A)
	<b>Módulo de RF</b>	Banda de frecuencias 2,4 GHz, estándar Wi-Fi 802.11 b/g/n
<b>Materiales</b>	<b>Plásticos disponibles</b>	Onyx, Onyx retardante de llama (FR), Onyx ESD, Nylon White, P-PLA, S-TPU 95A**
	<b>Fibras disponibles</b>	Fibra de carbono, fibra de carbono retardante de llama (FR), fibra de vidrio, fibra de aramida (Kevlar®), fibra de vidrio HSHT
	<b>Resistencia a la tracción</b>	800 MPa (25,8 veces más que el ABS, 2,6 veces más que el aluminio 6061-T6)*
	<b>Módulo de elasticidad a la tracción</b>	60 GPa (26,9 veces más que el ABS, 0,87 veces más que el aluminio 6061-T6)*
<b>Propiedades de las piezas</b>	<b>Altura de capa</b>	100 µm predeterminada, 50 µm mínima, 250 µm máxima
	<b>Relleno</b>	Relleno de celdas cerradas: varias geometrías disponibles
<b>Software</b>	<b>Eiger Cloud</b>	Laminador, gestión de piezas/lotes (más opciones disponibles a un coste adicional)
	<b>Seguridad</b>	Autenticación de dos factores, acceso del administrador de la organización, inicio de sesión único
	<b>Blacksmith</b>	Plataforma de fabricación adaptativa (a un coste adicional)

#### SOFTWARE

Con el control automático de versiones, la gestión automática de múltiples impresoras y la infraestructura de colaboración basada en la nube, Eiger es el software de impresión 3D más avanzado del mundo, diseñado para que la producción sea lo más sencilla posible, Eiger le permite imprimir materiales plásticos, metálicos y compuestos directamente desde su navegador.

Anexo C: Material: ONYX

MATERIAL DATASHEET



# Composites

Composite Base	Test (ASTM)	Onyx	Onyx FR	Onyx ESD	Nylon
Tensile Modulus (GPa)	D638	2.4	3.0	4.2	1.7
Tensile Stress at Yield (MPa)	D638	40	41	52	51
Tensile Stress at Break (MPa)	D638	37	40	50	36
Tensile Strain at Break (%)	D638	25	18	25	150
Flexural Strength (MPa)	D790 <sup>1</sup>	71	71	83	50
Flexural Modulus (GPa)	D790 <sup>1</sup>	3.0	3.6	3.7	1.4
Heat Deflection Temp (°C)	D648 B	145	145	139	41
Flame Resistance	UL94	—	V-0 <sup>2</sup>	—	—
Izod Impact - notched (J/m)	D256-10 A	330	—	44	110
Surface Resistance (Ω)	ANSI/ESD STM11.11 <sup>3</sup>	—	—	10 <sup>1</sup> - 10 <sup>2</sup>	—
Density (g/cm <sup>3</sup> )	—	1.2	1.2	1.2	1.1

Markforged parts are primarily composed of Composite Base materials. Users may reinforce parts with one type of Continuous Fiber.

Dimensions and construction of test specimens:

- Tensile: ASTM D638 type I or IV beams
- Flexural: 3-pt. Bending, 4.5 in (L) x 0.4 in (W) x 0.12 in (H)
- Heat-deflection temperature at 0.45 MPa, 66 psi (ASTM D648-07 Method B)

1. Measured by a method similar to ASTM D790. Composite Base-only parts do not break before end of flexural test.

2. Onyx FR is UL94 V-0 Blue Card certified down to a thickness of 3mm.

3. Surface resistance measured on multiple part surfaces using recommended print settings by an accredited third party test facility. See Onyx ESD technical data sheet for more details.

Continuous Fiber	Test (ASTM)	Carbon	Carbon FR	Kevlar®	Fiberglass	HSHT FG
Tensile Strength (MPa)	D3039	800	760	610	590	600
Tensile Modulus (GPa)	D3039	60	57	27	21	21
Tensile Strain at Break (%)	D3039	1.5	1.6	2.7	3.6	3.9
Flexural Strength (MPa)	D790 <sup>1</sup>	540	540	240	200	420
Flexural Modulus (GPa)	D790 <sup>1</sup>	51	50	26	22	21
Flexural Strain at Break (%)	D790 <sup>1</sup>	1.2	1.6	2.1	1.1	2.2
Compressive Strength (MPa)	D6641	420	300	130	180	216
Compressive Modulus (GPa)	D6641	62	59	25	24	21
Compressive Strain at Break (%)	D6641	0.7	0.5	1.5	—	0.8
Heat Deflection Temp (°C)	D648 B	105	105	105	105	150
Izod Impact - notched (J/m)	D256-10 A	960	810	2000	2600	3100
Density (g/cm <sup>3</sup> )	—	1.4	1.4	1.2	1.5	1.5

Dimensions and Construction of Fiber Composite Test Specimens:

- Test plaques used in these data are fiber reinforced unidirectionally (0° Filies)
- Tensile test specimens: 9.8 in (L) x 0.5 in (H) x 0.048 in (W) (CF composites), 9.8 in (L) x 0.5 in (H) x 0.08 in (W) (GF and Kevlar® composites)
- Compressive test specimens: 5.5 in (L) x 0.5 in (H) x 0.085 in (W) (CF composites), 5.5 in (L) x 0.5 in (H) x 0.12 in (W) (Kevlar® and FG composites)
- Flexure/1 test specimens: 3-pt. Bending, 4.5 in (L) x 0.4 in (W) x 0.12 in (H)
- Heat-deflection temperature at 0.45 MPa, 66 psi (ASTM D648-07 Method B)

Tensile, Compressive, Strain at Break, and Heat Deflection Temperature data were provided by an accredited 3rd party test facility. Flexural data was prepared by Markforged, Inc. These represent typical values.

Markforged test plaques are uniquely designed to maximize test performance. Fiber test plaques are fully filled with unidirectional fiber and printed without walls. Plastic test plaques are printed with full infill. To learn more about specific testing conditions or to request test parts for internal testing, contact a Markforged representative. All customer parts should be tested in accordance to customer's specifications.

Part and material performance will vary by fiber layout design, part

design, specific load conditions, test conditions, build conditions, and the like.

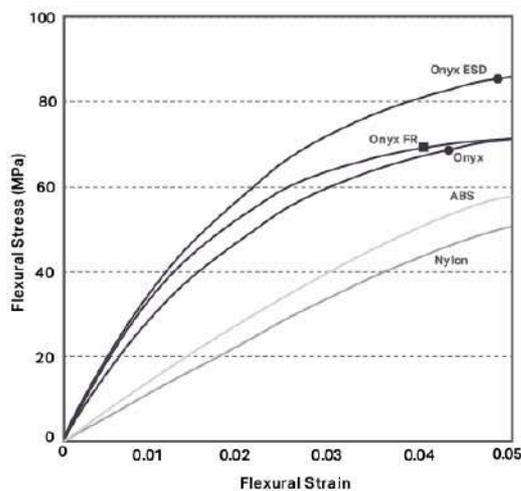
This representative data were tested, measured, or calculated using standard methods and are subject to change without notice. Markforged makes no warranties of any kind, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability, fitness for a particular use, or warranty against patent infringement; and assumes no liability in connection with the use of this information. The data listed here should not be used to establish design, quality control, or specification limits, and are not intended to substitute for your own testing to determine suitability for your particular application. Nothing in this sheet is to be construed as a license to operate under or a recommendation to infringe upon any intellectual property right.

MATERIAL DATASHEET

Markforged composite printers are capable of Continuous Fiber Reinforcement (CFR) — a unique process that reinforces FFF parts with high-strength continuous fibers. A CFR capable machine uses two extrusion systems: one that extrudes Composite Base material in a standard FFF process, and a second for long strand continuous fibers that are laid down in-layer, replacing FFF infill.

### Composite Base

Markforged Composite Base materials print like conventional FFF thermoplastics. They can be printed by themselves, or reinforced with any of our continuous fibers, including Carbon Fiber, Kevlar, and Fiberglass.



**● Onyx** Flexural Strength: 71 MPa  
Onyx is a micro carbon fiber filled nylon. It's 1.4 times stronger and stiffer than ABS and can be reinforced with any continuous fiber. Onyx sets the bar for surface finish, chemical resistivity, and heat tolerance.

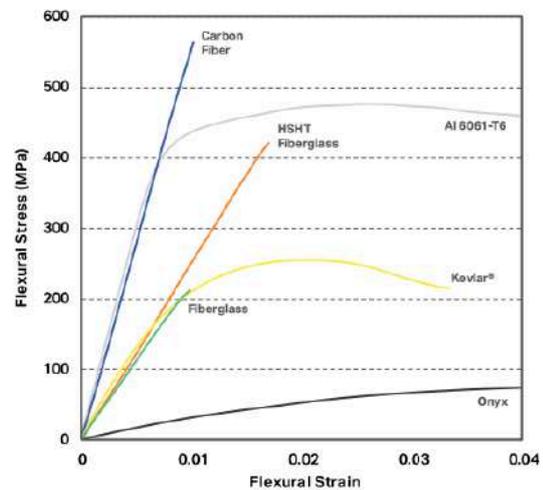
**■ Onyx FR** Flexural Strength: 71 MPa  
Onyx FR is a Blue Card certified UL94 V-0 material that possesses similar mechanical properties to Onyx. It's best for applications in which flame retardancy, light weight, and strength are required.

**◆ Onyx ESD** Flexural Strength: 83 MPa  
Onyx ESD is a static dissipative safe variant of Onyx — meeting stringent ESD safety requirements while offering excellent strength, stiffness, and surface finish. It's best used in applications that require ESD safe materials.

**● Nylon** Flexural Strength: 50 MPa  
Nylon White parts are smooth, non-abrasive, and easily painted. They can be reinforced with any continuous fiber and work best for non-marring work holding, repeated handling, and cosmetic parts.

### Continuous Fiber

Continuous Fibers are laid down on the inside of parts through a second fiber nozzle. They cannot be printed by themselves — instead, they are used to reinforce parts printed out of a composite base material like Onyx.



**● Carbon Fiber** Flexural Strength: 540 MPa  
Carbon Fiber has the highest strength-to-weight ratio of our reinforcing fibers. Six times stronger and eighteen times stiffer than Onyx, Carbon Fiber reinforcement is commonly used for parts that replace machined aluminum.

**● Fiberglass** Flexural Strength: 200 MPa  
Fiberglass is our entry level continuous fiber, providing high strength at an accessible price. 2.5 times stronger and eight times stiffer than Onyx, Fiberglass reinforcement results in strong, robust tools.

**● Kevlar®** Flexural Strength: 240 MPa  
Kevlar® possesses excellent durability, making it optimal for parts that experience repeated and sudden loading. As stiff as fiberglass and much more ductile, it can be used for a wide variety of applications.

**● HSHF Fiberglass** Flexural Strength: 420 MPa  
High Strength High Temperature (HSHF) Fiberglass exhibits aluminum strength and high heat tolerance. Five times as strong and seven times as stiff as Onyx, it's best used for parts loaded in high operating temperatures.

**Anexo D: Imágenes cámara térmica soldadura**

