



**COMILLAS**

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA  
DE TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE IMPRESIÓN  
3D, CONTINUOUS FIBER REINFORCEMENT (CFR)  
DE MARKFORGED, EN COMPONENTES  
DISEÑADOS CON CRITERIOS DE OPTIMIZACIÓN  
TOPOLÓGICA. CARACTERIZACIÓN DE  
MATERIALES

Autor: Ana Maria Llorente Areses

Director: Mariano Jiménez Calzado

Co-Director: Mauro Medici Paneiva

Marzo de 2024

## *Índice de la memoria*

<i>Capítulo 1. Introducción .....</i>	<i>2</i>
<i>Capítulo 2. Estado de la Cuestión .....</i>	<i>3</i>
<i>Capítulo 3. Motivación .....</i>	<i>5</i>
<i>Capítulo 4. Objetivos.....</i>	<i>6</i>
<i>Capítulo 5. Metodología .....</i>	<i>7</i>
<i>Capítulo 6. Recursos.....</i>	<i>8</i>
<i>Capítulo 7. Objetivos de desarrollo sostenible.....</i>	<i>9</i>
<i>Capítulo 8. Bibliografía.....</i>	<i>10</i>

# Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

En el actual panorama tecnológico industrial, la impresión 3D está cogiendo cada vez más protagonismo [1]. Es una tecnología en desarrollo que está revolucionando la manera en que concebimos y fabricamos componentes en diversos sectores. Entre las distintas tecnologías de impresión 3D, la conocida como CFR (Continuous Fiber Reinforcement), supone una innovación prometedora. Utiliza un refuerzo de fibra continua que mejora las propiedades mecánicas de las piezas creadas y aumenta, en gran medida, su resistencia.

El presente TFG, trabajo de fin de grado, trata de estudiar y analizar la aplicación de la tecnología CFR utilizando los sistemas de impresión de Markforged. Empresa fundada en 2013, con sede en Massachussets y pionera en la impresión con refuerzo de fibra continua. Esta empresa tiene una amplia gama de clientes, pero está enfocada principalmente en las aplicaciones industriales para industrias donde las piezas con alta resistencia y calidad son críticas.

Además, se usarán criterios de optimización topológica en componentes, de forma que se ahorre tiempo, material y dinero. Para conseguirlo, estos criterios buscan minimizar el peso y maximizar la eficiencia estructural mediante la redistribución del material, para lo que sirve de gran ayuda el refuerzo de fibra continua a introducir en cualquier área específica de la pieza. Sin dejar de lado, la caracterización de materiales, analizando sus propiedades y, escogiendo el más óptimo para la pieza a fabricar.

El objetivo de esta investigación es, contribuir al avance del conocimiento en el campo de la fabricación aditiva, proporcionando una comprensión más profunda de las capacidades y limitaciones de la tecnología CFR de Markforged, así como su integración, con estrategias de diseño avanzadas como la optimización topológica.

## **Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN**

El mercado de impresión 3D ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años, con rápidos avances en composición de materiales; disminución de precios de las máquinas; la inversión de los gobiernos de todo el mundo en I+D en impresión 3D; el aumento de su demanda debido a la pandemia; ... [2]

La impresión 3D ha revolucionado el sector de la fabricación al permitir la producción de componentes complejos de manera rápida y económica. Además, ciertas tecnologías permiten acercarse a las propiedades mecánicas de las piezas industriales, se trata de la tecnología CFR (Continuous Fiber Reinforcement) de MarkForged, que consiste en la impresión con inclusión de refuerzos de fibra continua en las zonas que se especifiquen.

En cuanto a que, una de las grandes limitaciones de esta tecnología es el tiempo y el coste en ciertas ocasiones. Cobra protagonismo la Optimización Topológica, que rediseña y elimina material innecesario reduciendo el peso, sin comprometer la resistencia estructural [3]. Se trata de geometrías complejas que no se habían presentado previamente por la imposibilidad y complejidad de su fabricación. La impresión 3D permite imprimir estas geometrías. Esta combinación ha generado un especial interés creciente en la industria, especialmente en sectores como la automoción, la aeroespacial y la biomecánica.

La tecnología CFR de Markforged ha ampliado las capacidades de la impresión 3D al permitir la incorporación de fibras continuas de alta resistencia, como fibra de carbono, fibra de vidrio y fibra de kevlar, en piezas impresas. Esto resulta en componentes con propiedades mecánicas mejoradas, incluida una mayor resistencia a la tracción, rigidez y resistencia a la fatiga. La capacidad de la tecnología CFR para producir piezas con

***APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE IMPRESIÓN 3D, CONTINUOUS FIBER REINFORCEMENT (CFR) DE MARKFORGED, EN COMPONENTES DISEÑADOS CON CRITERIOS DE OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES***

---

refuerzos unidireccionales y bidireccionales ha ampliado las aplicaciones potenciales en una amplia variedad de sectores.

Otro aspecto de gran importancia es el material a escoger, es crucial a la hora de garantizar su idoneidad en aplicaciones específicas. A la hora de realizar una caracterización de materiales, es importante la evaluación de las propiedades mecánicas: resistencia, rigidez, tenacidad y durabilidad, así como la comprensión de su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga y ambientales

El continuo desarrollo de la combinación de la tecnología CFR con herramientas de optimización topológica tiene un futuro prometedor para la fabricación de componentes avanzados. Los campos de esta impresión de los que se esperan mejoras, y están en desarrollo e investigación son: la precisión de la impresión, la ampliación de la gama de materiales compatibles y la optimización del post-procesado. La investigación adicional en la caracterización de materiales también será fundamental para garantizar el rendimiento y la fiabilidad de los componentes impresos en 3D con CFR.

## Capítulo 3. MOTIVACIÓN

El mundo de las tecnologías de impresión 3D está revolucionando las formas de fabricación tradicionales, que llevan instauradas mucho tiempo. Se encuentra en continuo desarrollo y en continuo descubrimiento de su alcance, casi cada día aparecen nuevas aplicaciones y nuevas tecnologías. Su futuro es prometedor y desafiante.

La combinación de la impresión 3D con refuerzos de fibra de carbono y los criterios de optimización topológica, junto con una caracterización de materiales, nos ofrece una fabricación especialmente eficiente con ahorros de material y coste, respecto a las piezas tradicionales. Se complementan de forma excepcional, puesto que, la optimización topológica solo es posible con tecnologías de impresión 3D, y conseguir las propiedades mecánicas de las piezas industriales será posible con el refuerzo continuo de fibra.

El sector de la fabricación siempre me ha parecido realmente interesante, he tenido la oportunidad de empezar a trabajar en uno de los mayores distribuidores de impresoras 3D del territorio Europeo [4]. Me encuentro en un aprendizaje continuo de la impresión 3D y, por ello, quise escoger este tema. En el que puedo aplicar los conocimientos que estoy aprendiendo, además de investigar sobre un tema tan interesante como la Optimización Topológica.

## **Capítulo 4. OBJETIVOS**

Se presentan diversos objetivos principales. En primer lugar, el rediseño de un par de piezas industriales utilizando criterios de optimización topológica con SolidEdge. Además, este Software, nos va a permitir la realización de simulaciones de los diseños 3D de las piezas, lo que nos va a permitir evaluar el rendimiento mediante análisis de tensiones, deformaciones, vibraciones y factores de seguridad.

En segundo lugar, la aplicación de la tecnología de impresión 3D, CFR. Desde SolidEdge, se exportará el archivo como “.stl” y se importará a Eiger, donde se evaluarán los criterios de impresión para hacerlo de forma más eficiente, además de especificar las zonas que incluirán refuerzo de fibra de carbono.

Por último, se procederá a comparar ambos procesos de fabricación, el tradicional y el estudiado. Se van a estudiar los costes de fabricación, el consumo energético, la cantidad de materia prima utilizada y las emisiones.

## Capítulo 5. METODOLOGÍA

Este proyecto cuenta con distintas etapas principales:

1. Elección de las componentes industriales a trabajar y análisis de su aplicación
2. Diseño CAD de las piezas y Optimización Topológica con Solid Edge
3. Simulaciones de las piezas con Solid Edge
4. Caracterización de materiales a utilizar
5. Impresión 3D mediante CFR, usando el software Eiger
6. Ensayos de las piezas en el laboratorio de ICAI
7. Comparativa entre la pieza industrial y la impresa con CFR (coste, emisiones, energía y tiempo)

Tarea	Abril	Mayo	Junio
<b>Anexo B</b>			
Entrega			
<b>Diseño Piezas</b>			
Compra de piezas			
Diseño Solid Edge			
Optimización Topológica			
Simulaciones con Solid Edge			
<b>Impresión Piezas</b>			
<b>Ensayos Laboratorio ICAI</b>			
<b>Análisis de resultados</b>			



## **Capítulo 6. RECURSOS**

Los recursos que se emplearán durante la realización del Trabajo de Fin de Grado serán los siguientes. Solid Edge para el diseño 3D, la optimización topológica, y las simulaciones. Eiger para la impresión de las piezas, además, de la impresora de CFR de MarkForged del laboratorio de ICAI, y la Mark Two ubicada en mi empresa. Se hará uso de ambos softwares desde un ordenador MSI con 16 GB de RAM.

Una vez impresas las piezas, para la realización de los ensayos requeridos, se hará uso del laboratorio de materiales de ICAI con sus máquinas y softwares.

## **Capítulo 7. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE**

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible, ODS, son 17 metas globales establecidas por las Naciones Unidas en el año 2015. Su objetivos son erradicar la pobreza, proteger el planeta y garantizar la prosperidad para todos. Recorren una gran variedad de temáticas: la salud, la educación, la igualdad de género, el cambio climático y la paz y la justicia. La fecha objetivo para los ODS es 2030, buscan la colaboración de gobiernos, empresas, sociedad civil y ciudadanos de todo el mundo.

Este trabajo de fin de grado se alinea con el objetivo 12 principalmente, “Producción y Consumo Responsables”. En los objetivos principales del proyecto se encuentra la reducción de la utilización de materia prima y consumo energético en la etapa de fabricación de las piezas.

Asimismo, tiene impacto en el objetivo 9 de la ODS: “Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación”. Fomentar la innovación analizando el impacto de la industria en la vida y el bienestar de las personas, invirtiendo en prácticas y procesos más sostenibles.

Al mismo tiempo, el proyecto favorece a la consecución del objetivo 13 “Acción por el clima”. La optimización topológica reduce en gran medida las emisiones de los medios de transporte al aumentar su eficiencia energética.

## Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ¿Cómo afecta el constante crecimiento de la impresión 3D a las empresas del sector? -  
3Dnatives - <https://www.3dnatives.com/es/crecimiento-impresion-3d-empresas-220220212/#!>
- [2] Mercado de impresión 3D - Tamaño, tendencias de la industria, crecimiento y pronóstico  
(mordorintelligence.com) - <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/3d-printing-market>
- [3] Página 4 –  
<https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/56441/3560900267445UTFSM.pdf?sequence=1>
- [4] Página Web 3DZ - <https://3dz.es/>