



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Alcoy

## DISEÑO Y VALIDACIÓN BAJO EL MARCO SOFT ROBOTIC DE UN PROTOTIPO DEMOSTRADOR DE UNA MUÑEQUERA DE REHABILITACIÓN ELABORADA CON MATERIALES BLANDOS.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería, Procesado y Caracterización de  
Materiales

AUTOR/A: Piquer Martínez, Alejandro

Tutor/a: Montañés Muñoz, Néstor

Cotutor/a: Quiles Carrillo, Luis Jesús

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



# **RESUMEN**

## **DISEÑO Y VALIDACIÓN BAJO EL MARCO SOFT ROBOTIC DE UN PROTOTIPO DEMOSTRADOR DE UNA MUÑEQUERA DE REHABILITACIÓN ELABORADA CON MATERIALES BLANDOS**

La robótica blanda, SOFT ROBOTIC en inglés, es un subcampo de la robótica que concierne al diseño, control y fabricación de robots compuestos de materiales compatibles, en lugar de enlaces rígidos.

Bajo el prisma del SOFT ROBOTIC, en el presente Trabajo fin de Máster (TFM) se pretende diseñar y fabricar un prototipo de muñequera para ser usada en la rehabilitación del movimiento de esta articulación en personas con falta de movilidad.

Para el desarrollo del proyecto, tras realizar un análisis del Estado del Arte con relación a los objetivos que se persiguen, el siguiente paso será la definición de los materiales a utilizar teniendo presente los diferentes procesos y parámetros de fabricación en impresión 3D.

Dicho prototipo constará de una serie de actuadores neumáticos que se encargaran de realizar los movimientos de la articulación. Al mismo tiempo, en el diseño del prototipo se prevé estudiar la posibilidad de incorporar algunos tipos de sensores que ayuden al control de la fuerza.

Así pues, la fase de diseño del prototipo es una etapa compleja, ya que son muchos los factores y restricciones a tener en cuenta, entre los que cabe destacar el problema de combinar la impresión 3D, en la que las piezas presentan por el método de fabricación una porosidad intrínseca, con la neumática, que precisa de vacío en las conducciones de aire para funcionar. En cualquier caso, por la gran versatilidad que proporciona la impresión 3D, siendo que además los productos se pueden adaptar a la perfección a las dimensiones de las personas que los van a utilizar, se considera primordial la utilización de las diferentes tecnologías de fabricación en impresión 3D, siendo uno de los objetivos del proyecto el comparar y definir completamente las técnicas y parámetros de fabricación más adecuados.

Por otra parte, el abanico de los materiales comerciales disponibles para la impresión 3D es limitado, siendo que en el caso de que ninguno de los materiales habituales cumpla con las necesidades del prototipo, se estudiarán las posibilidades de emplear otros materiales o modificar los existentes, aditivándolos con el fin de mejorar sus prestaciones.

Para finalizar se pretende realizar un prototipo funcional que sirva de demostrador para corroborar que se han alcanzado los objetivos propuestos.

El presente TFM tiene un enfoque multidisciplinar siendo que en su realización se van a trabajar y desarrollar diferentes competencias del Máster de Materiales, entre las que cabe destacar las siguientes:

### **Transversales**

**Análisis y resolución de problemas:** Analizar y resolver problemas de forma efectiva, identificando y definiendo los elementos significativos que los constituyen.

**Innovación, creatividad y emprendimiento:** Innovar para responder satisfactoriamente y de forma original a las necesidades y demandas personales, organizativas y sociales con una actitud emprendedora.

**Diseño y proyecto:** Diseñar, dirigir y evaluar una idea de manera eficaz hasta concretarla en un proyecto.

**Conocimiento de problemas contemporáneos:** Identificar e interpretar los problemas contemporáneos en su campo de especialización, así como en otros campos del conocimiento.

### **Generales y específicas del título.**

Capacidades para el diseño y la selección de la tecnología y procesos adecuados a las distintas actividades de fabricación, optimización de los recursos, procesos productivos y capacidad para el análisis tecnológico de procesos de fabricación

Capacidad para entender el conjunto de las estructuras que conforman el sistema músculo-esquelético humano además de comprender las relaciones

geométricas, cinemáticas y dinámicas evaluando las propiedades mecánicas de elementos óseos.



# **SUMMARY**

## **DISSENY VALIDATION UNDER THE SOFT ROBOTIC FRAMEWORK OF A PROTOTYPE DEMONSTRATOR OF A MONYQUERA REHABILITATION MADE WITH BLUE MATERIAL**

SOFT ROBOTICS is a subfield of robotics that comprise the design, control and manufacture of robots composed of compatible material, rather than rigid bonds.

Under the prism of soft robotic, in this Master's degree Final Project (TFM) it is intended to design and manufacture a prototype of bun to be used in the rehabilitation of the movement of this joint in people with lack of mobility.

For the development of the project, after carrying out an analysis of the State of the Art in relation to the objectives pursued, the next step will include the definition of the materials to be used considering the different processes and manufacturing parameters in 3D printing.

This prototype will consist of a series of pneumatic actuators that will be loaded with the movements of the joint. At the same time, in the design of the prototype it is planned to study the possibility of incorporating some types of sensors that help the control of the force.

Likewise, the phase of the design of the prototype is a complex stage, since there are many factors and constraints to have in counter, among which the problem of combining 3D printing, where the pieces present by the manufacturing method an intrinsic porosity, with the pneumatics, that requires the vacuum in the air pipes to work. In any case, due to the great versatility provided by 3D printing, being that sometimes the products that can be perfectly adapted to the dimensions of the people who will use it, the use of the different manufacturing technologies in 3D printing is considered paramount, it is considered one of the objectives of the project to compare and completely define the most appropriate manufacturing techniques and parameters.

On the other hand, the possibilities of the commercial materials available for 3D printing is limited, being in the case that no one of the usual materials meets the needs

of the prototype, the possibilities of using other material or modifying the existing ones will be studied, aditivándolos to improve its performance.

To conclude, it is intended to make a functional prototype that serve as a demonstrator to confirm that the proposed objectives have been achieved.

The present TFM has a multidisciplinary approach knowing that their relationship will be worked on and developed different competences of the Master of Materials, among which none highlight the following:

### **Transversal**

**Analysing and solving problems:** Analyse and solve problems effectively by identifying and defining the significant elements of which they are composed.

**Innovation, creativity and entrepreneurship:** Innovation and entrepreneurship in the form of a satisfactory and original response to personal, organizational and social needs and demands.

**Designs and projects:** Effective design, control, and evaluation of an idea until it becomes a specific project.

**Awareness of contemporary issues:** Identify and interpret contemporary issues both in student's own field, and other fields of knowledge.

### **Generals and specifics of the degree**

Capabilities for the design and selection of technology and processes appropriate to the different manufacturing activities, optimization of resources, production processes and capacity for the technological analysis of manufacturing processes

Ability to understand the set of structures that make up the human musculoskeletal system in addition to understanding the geometric, kinematic and dynamic relationships evaluating the mechanical properties of bone elements.

# RESUM

## DISSENY Y VALIDACIÓ BAIX EL MARC SOFT ROBOTIC DE UN PROTOTIP DEMOSTRADOR D'UNA MONYQUERA DE REHABILITACIÓ ELABORADA AMB MATERIALAS BLANS

La robòtica blana, SOFT ROBOTIC en anglès, es un subcamp de la robòtica que comprenen al disseny, control i fabricació de robots composts de material compatibles, en lloc de enllaços rígids.

Baix el prisma del SOFT ROBOTIC, en el present Treball fi de Màster (TFM) es pretén dissenyar i fabricar un prototip de monyquera per a ser usada en la rehabilitació del moviment de aquesta articulació en persones amb falta de mobilitat.

Per a el desenvolupament del projecte, després de la realització d'un anàlisis del Estat de l'Art amb relació als objectius que es persegueixen, el següent pas comprendrà la definició del materials a utilitzar tenint en comte els diferents processos y paràmetres de fabricació en impressió 3D.

Aquest prototip constarà d'una sèrie de actuadors neumàtics que se'n carregarà de realitzar el moviments de la articulació. Al mateix temps, en el disseny del prototip es preveurà estudiar la possibilitat d'incorporar alguns tipus de sensors que ajuden al control de la força.

Així mateix, la fase del disseny del prototip es una etapa complexa, ja que son molts els factors i restriccions en tindre en conter, entre el que cap destacar el problema de combinar la impressió 3D, a on les peces presenten per el mètode de fabricació una porositat intrínseca, amb la neumàtica, que precisa del buit en les conduccions d'aire per a funcionar. En qualsevol cas, per la gran versatilitat que proporciona la impressió 3D, sent que a més els productes que es poden adaptar a la perfecció a les dimensions de les persones que l'utilitzaran, es considera primordial la utilització de les diferents tecnologies de fabricació en impressió 3D, es considera un del objectius del projecte el comparar y definir completament les tècniques y paràmetres de fabricació mes adequats.

Per altra banda, les possibilitats dels materials comercials disponibles per a la impressió 3D es limitat, sent en el cas de que ningú dels materials habituals complisca amb les necessitats del prototip, s'estudiaran les possibilitats d'emprar altres material o modificar els existents , aditivándolos amb la fi de millorar les seues prestacions.

Per a finalitzar es pretén realitzar un prototip funcional que servisca de demostrador per a corroborar que s'han aconseguit els objectius proposats.

El present TFM te un enfoc multidisciplinari sabent que la seva relació es van a treballar y desenrotllar diferents competències del Màster de Materials, entre els que cap destacar les següents:

### **Transversals**

**Anàlisi i resolució de problemes:** Analitzar i resoldre problemes de forma efectiva, identificant i definint els elements significatius que els constitueixen.

**Innovació, creativitat i emprenedoria:** Innovar per a respondre satisfactòriament i de forma original a les necessitats i demandes personals, organitzatives i socials amb una actitud emprenedora.

**Disseny i projecte:** Dissenyar, dirigir i avaluar una idea de manera eficaç fins a concretar-la en un projecte.

**Coneixement de problemes contemporanis:** Identificar i interpretar els problemes contemporanis en el seu camp d'especialització, així com en altres camps del coneixement.

### **Generals y especificques del títol**

Capacitats per al disseny i la selecció de la tecnologia i processos adequats a les diferents activitats de fabricació, optimització dels recursos, processos productius i capacitat per a l'anàlisi tecnològica de processos de fabricació

Capacitat per a entendre el conjunt de les estructures que conformen el sistema múscul-esquelètic humà a més de comprendre les relacions geomètriques, cinemàtiques i dinàmiques i avaluar les propietats mecàniques d'elements ossis.

# Tabla de Contenidos

RESUMEN.....	2
SUMMARY .....	6
RESUM .....	8
ABREVIATURAS .....	12
LISTADO DE FIGURAS.....	14
LISTADO DE TABLAS .....	18
<b>I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>20</b>
I.1. ANTECEDENTES. ....	22
I.1.1. Fabricación Aditiva. ....	22
<i>I.1.1.1. Tecnologías de impresión 3D.....</i>	<i>24</i>
<i>I.1.1.2. Aplicaciones generales.....</i>	<i>32</i>
I.1.2. Soft Robotic. ....	36
<i>I.1.2.1. Tipos y movimientos de Soft Robotics. ....</i>	<i>38</i>
<i>I.1.2.2. Soft Robotic en impresión 3D.....</i>	<i>43</i>
I.1.3. Lesiones frecuentes que requieren rehabilitación en la muñeca. ....	47
<b>II. OBJETIVOS.....</b>	<b>54</b>
II.1. OBJETIVO GENERAL.....	56
II.2. OBJETIVOS PARTICULARES.....	56
<b>III. EXPERIMENTAL .....</b>	<b>58</b>
III.1. Selección de materiales.....	60
III.1.1. Pruebas de los materiales. ....	60

III.1.1.1. Evaluación de los procesos.....	60
III.1.1.2. Evaluación y selección de los parámetros óptimos de impresión.....	65
III.1.2. Técnicas y ensayos de caracterización.....	68
<b>    III.2. Diseño del prototipo demostrador de Soft Robotic para rehabilitación de lesiones en muñeca.....</b>	<b>75</b>
III.2.1. Diseño conceptual del prototipo.....	75
III.2.2. Pruebas de fabricación de los diseños. ....	76
III.2.2.1. Materiales y procesos para los diseños (FDM, SLA, SLS). ....	76
III.2.2.2. Fabricación, evaluación y selección de los parámetros óptimos de máquina para los materiales utilizados. ....	81
III.2.3. Elementos externos para montaje. ....	88
III.2.3.1. Montaje del prototipo. ....	89
III.2.3.2. Pruebas de campo. ....	93
III.2.4. Plan económico. ....	97
III.2.4.1. Costes de fabricación. ....	97
III.2.4.2. Costes de montaje.....	100
III.2.4.3. Coste total. ....	102
<b>IV. CONCLUSIÓN .....</b>	<b>104</b>
IV.1. Conclusiones.....	106

# ABREVIATURAS

BJ	Inyección de Aglutinante
CAD	Diseño Asistido por Ordenador
CDA	Combustion Driven Actuators
DEA	Dielectric Elastomer Actuators
DLP	Procesamiento de Luz Digital
DMLS	Sinterizado Directo de Metal por Láser
EBM	Fusión por Haz de Electrones
EIA	Elastic Inflatable Actuator
FDM	Modelado por Deposición Fundida
LOM	Fabricación mediante Laminado de Objetos
LCE	Elastómeros Cristalinos Líquidos
MFC	Controladores Flujo de Masa
MJ	Inyección de Material
NASA	Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio
PBAT	Poli-Butilén Adipato-co-Tereftalato
PDMS	Polidimetilsiloxano
PLC	Controlador Lógico Programable
SLA	Estereolitografía
SLM	Fusión Selectiva por Láser
SLS	Sinterización Selectiva por Láser
TPE	Elastómero Termoplástico

TPU          Poliuretano Termoplástico

UV          Ultravioleta

# LISTADO DE FIGURAS

Figura I. 1. Esquema gráfico de las revoluciones industriales a lo largo de los siglos. 22	22
Figura I. 2. Esquema de las partes del equipo de fabricación aditiva FDM. .... 25	25
Figura I. 3. Esquema de las partes del equipo de fabricación aditiva SLA. .... 26	26
Figura I. 4. Esquema de las partes del equipo de fabricación aditiva DLP. .... 26	26
Figura I. 5. Esquema de las partes del equipo de fabricación aditiva SLS. .... 27	27
Figura I. 6. Esquema de las partes del equipo de fabricación aditiva SLM. .... 28	28
Figura I. 7. Esquema de las partes del equipo de fabricación aditiva EBM. .... 29	29
Figura I. 8. Esquema de las partes del equipo de fabricación aditiva LOM. .... 30	30
Figura I. 9. Esquema de las partes del equipo de fabricación aditiva BJ. .... 31	31
Figura I. 10. Esquema de las partes del equipo de fabricación aditiva MJ. .... 32	32
Figura I. 11. Imágenes de diferentes aplicaciones de la fabricación aditiva en el sector de la medicina. .... 33	33
Figura I. 12. Imágenes de las aplicaciones para la fabricación aditiva en el sector del transporte. .... 33	33
Figura I. 13. Imágenes de las aplicaciones de la fabricación aditiva en el sector de la arquitectura. .... 34	34
Figura I. 14. Imágenes de las aplicaciones de la fabricación aditiva en el sector del arte y el diseño. .... 35	35
Figura I. 15. Imágenes de las aplicaciones de la fabricación aditiva en los sectores de la robótica, del deporte y de las mascotas. .... 36	36
Figura I. 16. Posibles movimientos de EIA como expansión, contracción, torcedura y flexión. .... 39	39
Figura I. 17. Posibles geometrías y utilidades de los EIA como multi-material, corrugado y ecocéntrico. .... 39	39
Figura I. 18. Ejemplo del movimiento de los materiales LCE, mediante temperatura y luz. .... 40	40
Figura I. 19. Forma básica de utilización de los DEA y sus partes. .... 41	41

Figura I. 20. Ejemplo del movimiento expansivo de los actuadores CDA y prototipo Octobot.....	42
Figura I. 21. Imagen de la mano derecha con los huesos que forman la muñeca. ....	47
Figura I. 22. Imagen de la mano derecha con tipos de esguinces de la muñeca.....	48
Figura I. 23. Imagen de la mano derecha de las dos posibles fracturas de la muñeca. ....	48
Figura I. 24. Imagen del movimiento de rehabilitación de curvatura de la muñeca.....	51
Figura I. 25. Imagen del movimiento de rehabilitación lateral de la muñeca.....	51
Figura I. 26. Imagen del movimiento de rehabilitación flexiones de muñeca. ....	51
Figura I. 27. Visualización de los diferentes movimientos de la muñeca. ....	52
Figura III. 1. Probeta de tracción según normativa ISO 527-3 tipo 5 con espesor 1,5mm. ....	69
Figura III. 2. Probetas impresas para cada uno de los materiales; a) FilaFlex 70 <sup>a</sup> BQ; b) FilaFlex 60 <sup>a</sup> BQ; c) Conductive FilaFlex; d) Elastic 50 <sup>a</sup> ; e) Flexa Grey; f) FilaFlex 70A JCR .....	70
Figura III. 3. Multímetro Keithley 2000 6 <sup>1/2</sup> -Digit-Multimeter equipo utilizado en las pruebas de conductividad. ....	72
Figura III. 4. Muestras de las geometrías; 1) Escalera; 2) Serpentina dos materiales; 3) Serpentina 1mm; 4) Serpentina 2,5 mm; 5) En U con carril; 6) En U; 7) En U con dos materiales; 8) Sandwich.....	73
Figura III. 5. Diferencia de variación de resistencia conductiva para cada una de las muestras propuestas. ....	73
Figura III. 6. Modelo inicial para impresión SLA. ....	77
Figura III. 7. Modelo inicial para impresión SLS. ....	78
Figura III. 8. Modelo inicial para impresión FDM. ....	79
Figura III. 9. Esfuerzo de empuje de las cámaras. ....	80
Figura III. 10. Incorporación de la geometría “U” de material conductor en la base del actuador.....	81

Figura III. 11. Pruebas iniciales de la fabricación del actuador en FDM con material FilaFlex 70A.....	82
Figura III. 12. Primer modelo fabricado con resina elástica 50 A en SLA. ....	82
Figura III. 13. Primer modelo fabricado con filamento Filaflex 70A en FDM. ....	83
Figura III. 14. Segundo modelo fabricado con polvo Flexa Grey en SLS.....	83
Figura III. 15. Segundo modelo fabricado con filamento Filaflex 70A en FDM.....	84
Figura III. 16. Modelo final fabricado con filamento Filaflex 70A en FDM. ....	84
Figura III. 17. Comprobación de ángulo de flexión entre los dos tipos de actuadores funcionales. ....	85
Figura III. 18. Prototipo demostrador completamente funcional con la integración del material conductor. ....	88
Figura III. 19. Materiales utilizados para el montaje del demostrador de soft robotics. ....	89
Figura III. 20. Aplicación de cianoacrilato y masilla de sellado para la conexión del actuador y el tubo neumático. ....	90
Figura III. 21. Colocación y fijación del cableado con el actuador. ....	90
Figura III. 22. Unión del velcro con la muñequera y el actuador mediante cola de contacto. ....	91
Figura III. 23. Prototipo demostrador completamente finalizado su montaje. ....	92
Figura III. 24. Compresor y válvula de cierre para aplicar presión al actuador. ....	92
Figura III. 25. Demostrador colocado en la muñeca derecha de una persona física. ..	93
Figura III. 26. Demostrador por la parte superior de la muñeca colocado en una persona física. ....	93
Figura III. 27. Demostrador por la parte inferior de la muñeca colocado en una persona física. ....	94
Figura III. 28. Demostrador en funcionamiento. ....	94
Figura III. 29. Flexión del del prototipo demostrador del actuador superior. ....	95
Figura III. 30. Flexión del del prototipo demostrador del actuador inferior. ....	96
Figura III. 31. Demostrador en funcionamiento conectado al multímetro observando la variación de resistencia. ....	97



## LISTADO DE TABLAS

Tabla III. 1. Especificaciones técnicas del equipo de fabricación aditiva de FDM, de la marca Sicnova, modelo JCR 600.....	61
Tabla III. 2. Especificaciones técnicas del equipo de fabricación aditiva de FDM, de la marca BQ, modelo Witbox 2. ....	61
Tabla III. 3. Especificaciones técnicas del equipo de fabricación aditiva de FDM, de la marca Formlabs, modelo Form 2. ....	62
Tabla III. 4. Especificaciones técnicas del equipo de fabricación aditiva de FDM, de la marca Sinterit, modelo Lisa.....	63
Tabla III. 5. Recomendaciones de impresión 3D en FDM por el fabricante Recreus del material FilaFlex 70A. ....	64
Tabla III. 6. Recomendaciones de impresión 3D en FDM por el fabricante Recreus del material FilaFlex 60A. ....	64
Tabla III. 7. Recomendaciones de impresión 3D en FDM por el fabricante Recreus del material Conductive FilaFlex.....	65
Tabla III. 8. Parámetros de impresión del software Cura para cada material utilizado en la impresión. ....	66
Tabla III. 9. Parámetros de impresión del software Simplify para cada material utilizado en la impresión. ....	67
Tabla III. 10. Parámetros de impresión de los softwares PreForm y Sinterit Studio para cada material utilizado en la impresión. ....	68
Tabla III. 11. Características del ensayo de tracción. ....	69
Tabla III. 12. Leyenda de probeta de tracción. ....	69
Tabla III. 13. Resultados obtenidos tras el ensayo de tracción.....	70
Tabla III. 14. Resultados obtenidos tras el ensayo de dureza shore. ....	71
Tabla III. 15. Muestras de diferentes geometrías y espesores para comprobar la resistencia conductiva y la variación de ella con un movimiento de flexión. ....	72
Tabla III. 16. Parámetros de impresión para el demostrador final en el software Simplify. ....	86

Tabla III. 17. Tabla de obtención de costes de materiales para la fabricación.....	98
Tabla III. 18. Tabla de coste de máquina para la fabricación de un actuador. ....	98
Tabla III. 19. Tabla de costes de mano de obra para la fabricación de un actuador. ....	98
Tabla III. 20. Tabla de costes variables y únicos para la fabricación del actuador.....	99
Tabla III. 21. Tabla de costes de consumibles para la fabricación del actuador. ....	99
Tabla III. 22. Tabla de coste de lote para la fabricación del actuador.....	100
Tabla III. 23. Tabla de costes de materiales para el montaje. ....	101
Tabla III. 24. Tabla de costes de mano de obra para el montaje. ....	101
Tabla III. 25. Tabla de costes totales para el montaje de uno y más demostradores.	102
Tabla III. 26. Tabla de costes totales para un demostrador.....	102
Tabla III. 27. Tabla de coste total para un lote de demostradores.....	103

# **I. INTRODUCCIÓN**

## **INTRODUCCIÓN**



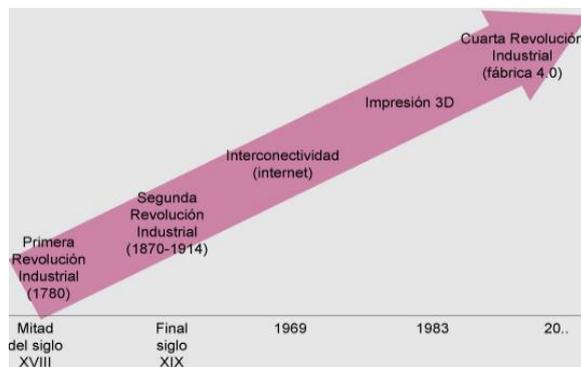
# I. Introducción

---

## I.1. ANTECEDENTES.

### I.1.1. Fabricación Aditiva.

Actualmente la fabricación aditiva es uno de los pilares de la llamada cuarta revolución industrial, denominada la industria 4.0 ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.. La fabricación aditiva es una tecnología que permite convertir los modelos digitales en objetos tridimensionales sólidos mediante la impresión 3D, sin ninguna necesidad de moldes o utillajes.



**Figura I. 1.** Esquema gráfico de las revoluciones industriales a lo largo de los siglos.

La fabricación aditiva, es una nueva modalidad de producción industrial en la cual el material, tanto el plástico o metal, es ubicado capa por capa de manera controlada donde es necesario. Esta técnica es conocida más vulgarmente como impresión 3D [3], tiene un amplio abanico de producir formar geométricas tanto sencillas como complejas completamente personalizadas en función de las necesidades del sector al cual está dirigido.

El inicio del proceso de la fabricación aditiva comienza con un boceto CAD. Se leen los datos del archivo digital y el equipo va agregando material en capas sucesivas una detrás de la otra, llamado deposición capa a capa, finalmente obteniendo un objeto 3D [2].

La fabricación aditiva en comparación con otras fabricaciones industriales tradicionales reduce procesos intermedios como la producción de utillajes. Esto permite

# I. Introducción

---

una mayor velocidad de producción de piezas, hasta un 90% más rápido. Otro punto importante en la fabricación aditiva es que en su fabricación no se generan residuos, siendo así más respetuosos con el medio ambiente y además reduciendo el coste de los componentes.

La fabricación aditiva se remonta al concepto de una técnica de prototipado rápido de un objeto capa por capa, durante la década de los 80 del Dr. Kodama del instituto Municipal de Investigación Industrial de Nagoya. Un equipo de investigadores franceses fue el primero en presentar una patente en 1984, pero finalmente fue abandonada unos años más tarde. Chuck Hull finalmente presentó la primera patente comercial en 1986 por una técnica llamada “Estereolitografía”, fue el futuro fundador de una de las empresas más importante en fabricación aditiva “3D Systems”.

Este proceso, estereolitografía (SLA), utiliza como material de impresión una resina líquida que se solidifica bajo el efecto de la luz ultravioleta (UV). Fue el primer avance que dio pie a nuevas técnicas de fabricación aditiva. En 1988, se presentó una patente de Sinterización Selectiva por Láser (SLS) por el profesor Carl Deckard de la Universidad de Texas, consiste en la fusión de un polvo de plástico con un láser. A la vez Scott Crump, fundador de otra de las empresas más importantes “Stratasys”, desarrolló la impresora 3D mediante extrusión de filamento de plástico, llamado FDM (Fused Deposition Modeling). Es una de las tecnologías de impresión más populares por su sencillez de manejo y a un coste relativamente bajo.

A partir de la década de los 90, la fabricación aditiva empezó a tener un auge con la llegada de las tecnologías innovadoras. Entre ellas se encuentra la Inyección de aglutinantes (Binder Jetting) desarrollada por ZCorp, las cuales utiliza tintas de polvo mineral, en la capa intermedia y de color. Otra tecnología es las PolyJet o material jetting desarrollada por la empresa israelí Object, consiste en proyectar miles de gotitas finas de polímero solidificadas bajo el efecto de un destello de luz. La fabricación aditiva de SLS ha dado un salto más en su tecnología en compañía de la fabricación aditiva de metal, con la sinterización de metal por láser directo, comercializado por empresas como Phoenix Systems, SLM Solutions y Concept Laser. También se encuentra la tecnología de fusión de haz de electrones (E-BEAM), desarrollado por la empresa sueca Arcam en la década de los 2000.

# I. Introducción

---

Tras el desarrollo de la tecnología de fabricación aditiva también ha ido de la mano del desarrollo de los materiales de impresión 3D obteniendo una gran variedad de ellos durante los años. Empezando con polímeros, pasando por los metales e incluso materiales que sorprendentemente pueden llegar a ser comestibles.

Cada uno de los materiales utilizados en las diferentes tecnologías de fabricación aditiva se presenta en diferentes maneras, así como filamentos para tecnologías FDM, resinas para tecnologías DLP y SLA o polvos metálicos para tecnologías DMLS. Se desarrollan nuevas maneras y nuevos materiales cada día permitiendo nuevos modelos 3D con una mayor calidad de impresión o con mejores propiedades dependiendo del sector.

En la actualidad el mercado de los materiales de Impresión 3D tiene un amplio abanico que todavía sigue creciendo cada día más. Las empresas apuestan por el desarrollo de los materiales y de tecnologías 3D apropiadas a su sector.

## I.1.1.1. Tecnologías de impresión 3D.

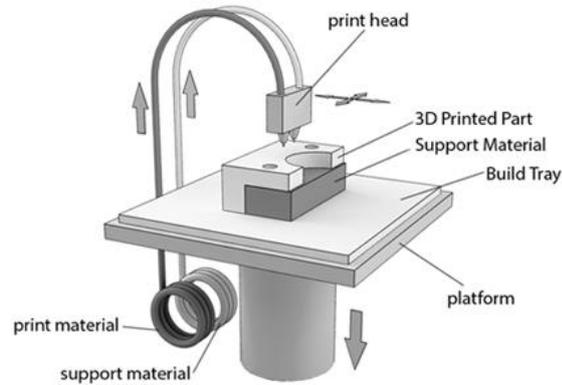
- **Modelado por deposición fundida (FDM)**

Primeramente, cabe destacar que esta tecnología es la más común mayoritariamente utilizadas como impresoras 3D de escritorio. Esta tecnología, su función básica es que un filamento termoplástico bobinado el cual se calienta y se extruye mediante coordenadas X e Y mediante un cabezal de extrusión[4]. Mientras que el extrusor se va moviendo, la superficie de impresión, también conocida como cama de impresión o placa de impresión, se moverá en dirección del eje Z, de manera que el objeto que se desea se va formando capa a capa de abajo hacia arriba.

Teniendo en cuenta que el modelo del objeto que se desea tuviese partes que sobresalgan, en voladizo, será necesario generar soportes. Generalmente estos soportes se imprimen de un material más blando que el material base o el mismo material, ya que una vez finalizado el proceso se deberán quitar esos soportes. Cabe destacar que hay una variedad de soporte sencillos de eliminación, entre ellos se encuentra los materiales que son solubles con el agua.

# I. Introducción

---



**Figura I. 2.** Esquema de las partes del equipo de fabricación aditiva FDM.

- **Estereolitografía (SLA)**

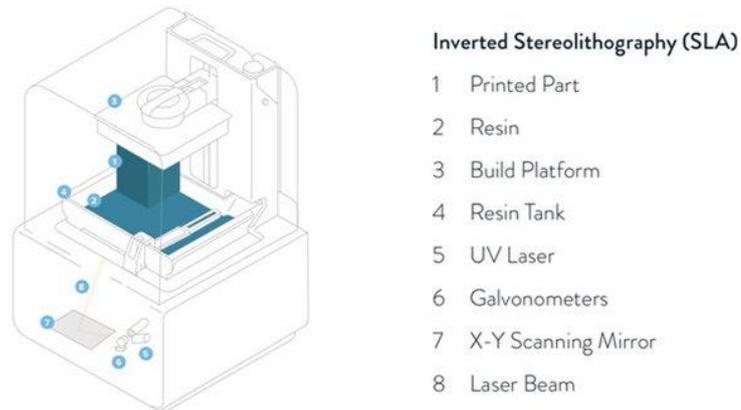
Como se comentó anteriormente la estereolitografía fue desarrollada por Chuck Hull, siendo la primera tecnología comercial de la impresión 3D. La técnica de SLA en su fabricación, la plataforma de fabricación se sumerge en un tanque de resina líquida fotosensible y se expone a un rayo láser ultravioleta, de tal manera que la capa agregada se endurece y se solidifica. Una vez se haya endurecido la capa, la plataforma de impresión pasa a la siguiente capa y el láser comienza a formar la siguiente capa [5].

Este tipo de impresión tiene el mismo problema que la impresión FDM con los objetos con partes en voladizo. Se generarán soportes, pero serán del mismo material base. Tras haber acabado la impresión el material deberá tener un lavado en disolvente. Dependiendo del material utilizado será necesario también un postprocesado en un horno ultravioleta para la correcta curación del material.

Esta tecnología es cada vez más popular en sectores como la joyería y la odontología debido a que uno de los beneficios de esta tecnología es el detalle de los objetos, además de superficies planas.

# I. Introducción

---



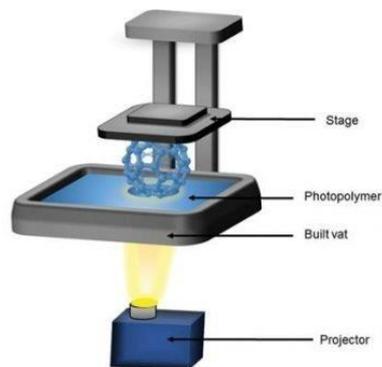
**Figura I. 3.** Esquema de las partes del equipo de fabricación aditiva SLA.

- **Procesamiento digital de luz (DLP)**

Este tipo de tecnología utiliza material de fotopolímeros líquidos, como en SLA, para la fabricación del objeto. También se utilizan resinas que se endurecen al aplicar luz mediante un proyector especial [6].

La tecnología DLP usa una red eléctrica de microespejos controlados por ordenador colocados en un molde sobre un chip semiconductor. Los microespejos se inclinan hacia adelante o hacia atrás, cuando se inclina a un lado refleja la luz, convirtiéndose un píxel brillante, mientras que, si el microespejo se inclina hacia otro lado, el píxel se oscurece.

Esta tecnología de impresoras 3D se suele utilizar principalmente áreas profesionales, permitiendo fabricar objetos robustos con muy buena resolución.



**Figura I. 4.** Esquema de las partes del equipo de fabricación aditiva DLP.

# I. Introducción

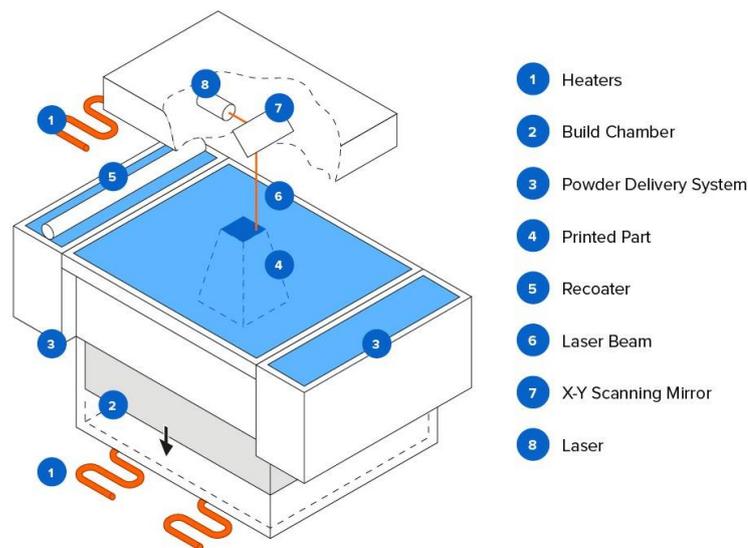
---

- **Sinterizado selectivo por láser (SLS)**

Esta tecnología también es muy parecida a la impresión de SLA, por el contrario, en vez de utilizar resina utiliza un material en polvo llenando toda el área de impresión de este material. Esta tecnología une cada capa de granos de polvo utilizando un láser para sinterizar el material creando un objeto sólido [7][5].

La tecnología SLS suele ser utilizada para el desarrollo de productos y rápida creación de prototipos para industrias comerciales, a la vez se utiliza para productos de uso limitado. En cuestión de los materiales utilizados varían entre diversos polímeros, cerámica, vidrio hasta materiales metálicos como el acero o el aluminio.

La desventaja que tendría esta tecnología de impresión 3D es que requiere de láser de alta potencia bastante costosos, alejando esta tecnología del consumidor promedio.



**Figura I. 5.** Esquema de las partes del equipo de fabricación aditiva SLS.

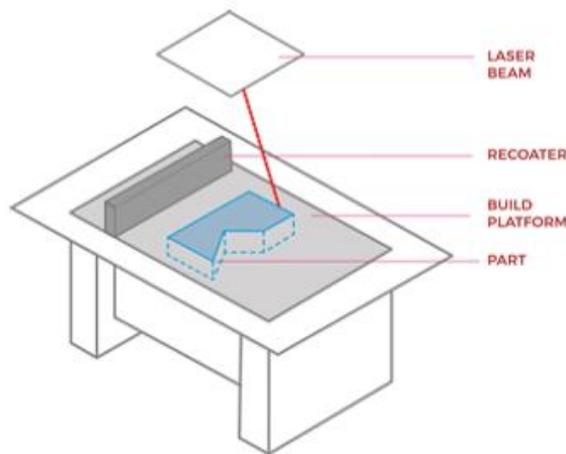
# I. Introducción

---

- **Fusión selectiva por láser (SLM)**

La fusión selectiva por láser es una tecnología que se suele considerar como una subcategoría de la impresión 3D de SLS. Esta tecnología utiliza un rayo láser de alta potencia donde funde polvos metálicos transformándolos en objetos sólidos [8].

La tecnología SLM suele utilizar metales, tales como, aluminio, acero inoxidable, titanio o cromo-cobalto. Esta tecnología es bastante específica utilizada en sectores punteros como la industria aeroespacial o la ortopedia, por la creación de geometrías complejas, paredes delgadas e incluso con canales ocultos.



Esquema de máquina SLM

**Figura I. 6.** Esquema de las partes del equipo de fabricación aditiva SLM.

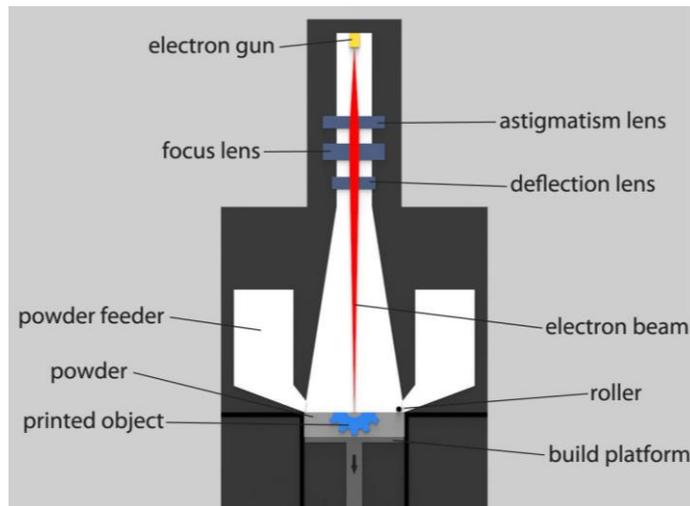
- **Fusión por haz de electrones (EBM)**

Esta tecnología consiste en fundir polvo metálico con una alta presión en vacío y también usando altas temperaturas que pueden llegar hasta 1000°C. La tecnología EBM utiliza un haz de electrones para la impresión [9].

Esta tecnología de impresión 3D puede llegar a imprimir materiales como el titanio puro. Aunque es una tecnología prometedora en la actualidad es excesivamente lenta en comparación a las demás tecnologías, además de ser demasiado costosa.

# I. Introducción

---



**Figura I. 7.** Esquema de las partes del equipo de fabricación aditiva EBM.

- **Fabricación mediante laminado de objetos (LOM)**

Esta tecnología utiliza materiales en forma de lámina muy fina las cuales se funden bajo el calor y la presión, y luego se cortan con un láser o una cuchilla controlados por ordenador. Esta tecnología sigue teniendo el mismo sistema de impresión, capa a capa. Los materiales entre los que se suelen utilizar se encuentran: capas de papel, capas de plásticos y laminados metálicos recubiertos con adhesivos [31].

Las impresiones con LOM en comparación con SLA o SLS, disminuye su precisión, sin embargo, es uno de los métodos de impresión 3D más rápidos y económicos de creación de piezas relativamente grandes.

# I. Introducción

---

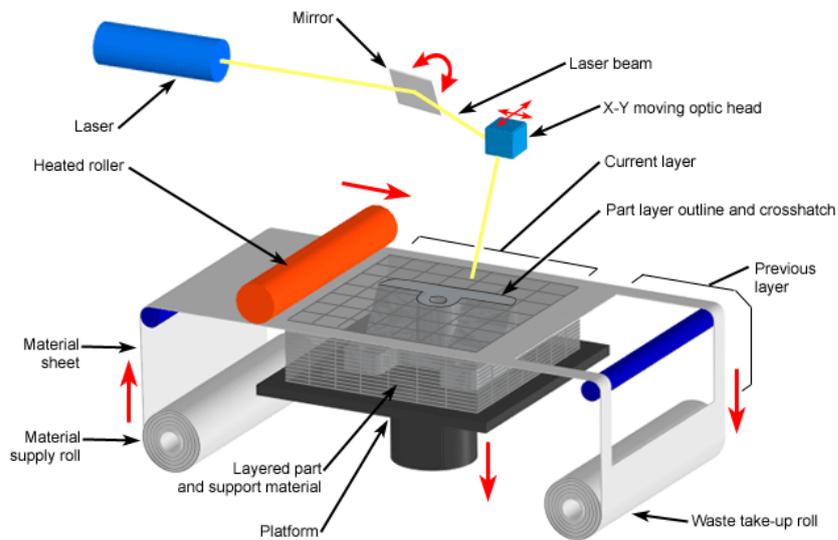


Figura I. 8. Esquema de las partes del equipo de fabricación aditiva LOM.

- **Inyección de aglutinante (BJ)**

Las impresoras 3D de inyección de aglutinante utiliza dos materiales, uno como base en forma de polvo y el otro es un agente adhesivo haciendo que se unan las capas de polvo. El aglutinante, generalmente se extruye de forma líquida como el mismo sistema de impresión de las impresoras 2D. Tras acabar la impresión de la capa, la superficie de impresión se desplaza hacia abajo y así repitiendo el proceso [11].

Esta tecnología tiene la ventaja de poder tener una amplia variedad de utilización de materiales en polvo como cerámica, plásticos, arena o metales. A esto se le puede añadir otra ventaja ya que se puede imprimir con cualquier tipo de color de una manera sencilla, agregando pigmentos al aglutinante. Por el contrario, el inconveniente que presenta es que pelagra la integridad estructural de los objetos, provocando que no se obtengan impresiones de alta resolución y resistentes. Se está intentado avanzar en esta tecnología con la “Multijet Fusion”, la cual pretende llevar al siguiente nivel la tecnología de inyección de aglutinante.

# I. Introducción

---

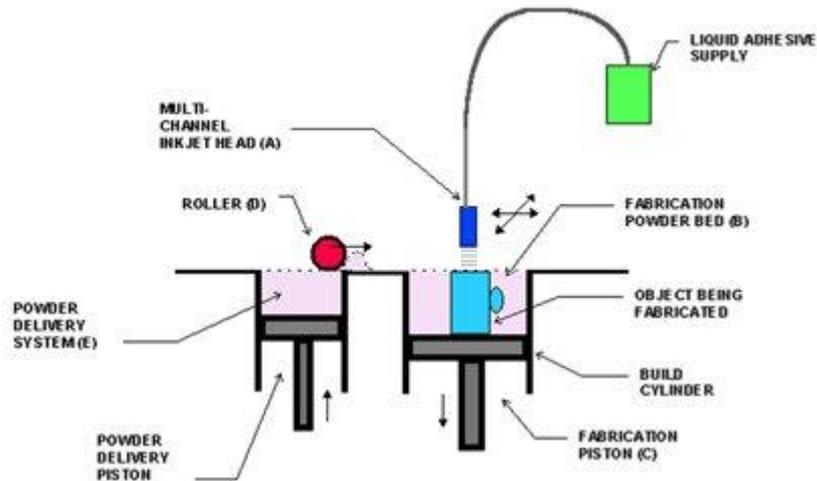


Figura I. 9. Esquema de las partes del equipo de fabricación aditiva BJ.

- **Inyección de material (MJ)/Moldeo a la cera perdida**

La tecnología de moldeo a la cera perdida es una técnica muy utilizada en el sector de la joyería, donde se permite fabricar joyas personalizables de muy alta calidad con diversos metales. Avanzar en esta tecnología con la impresión 3D para automatizar el proceso ha supuesto una gran ayuda para el sector [13].

Esta tecnología tiene un proceso sencillo, utilizando cera se va depositando sobre una plataforma de aluminio en capas, mediante varias boquillas recorriendo el área de fabricación. Al ser la cera un material con una temperatura de fusión baja, cuando se deposita en la superficie de impresión rápidamente se solidifica. La cera actuará como soportes de material que sobresalga. Una vez finalizada la impresión se colocará en un baño caliente para eliminar el soporte.

# I. Introducción

---

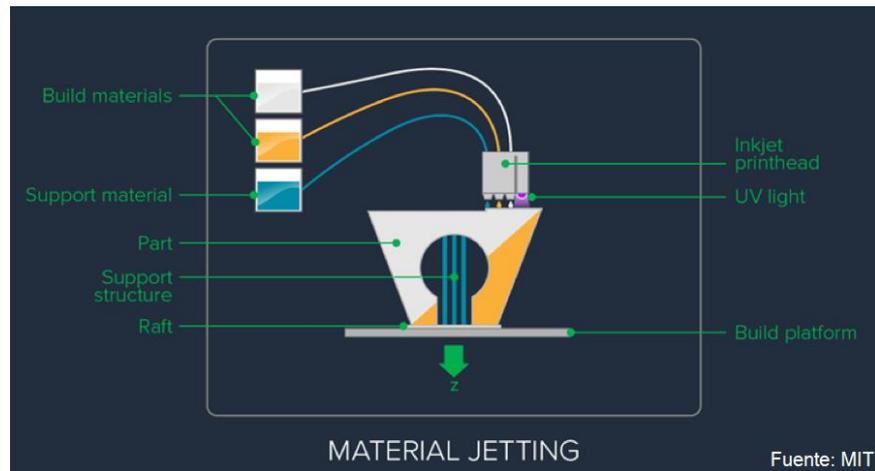


Figura I. 10. Esquema de las partes del equipo de fabricación aditiva MJ.

## I.1.1.2. Aplicaciones generales

### Fabricación aditiva en el sector médico

La fabricación aditiva empezó en los 90 con la bioimpresión, llegando a imprimir un hígado humano en 3D en 1999. Esta hazaña interesó a muchas compañías por la gran oportunidad de desarrollo, como Organovo [13].

Otra aplicación en el sector médico se puede destacar el desarrollo de las prótesis 3D, ortesis e implantes. Por la fácil personalización que tienen las impresoras 3D, ha tenido un gran impacto en el sector médico ayudado a la rapidez de obtener esas piezas exclusivas. Muchos hospitales se plantean obtener impresoras en sus instalaciones, para que sea aún más eficiente la obtención de esas piezas [14].



# I. Introducción

---



**Figura I. 11.** Imágenes de diferentes aplicaciones de la fabricación aditiva en el sector de la medicina.

## Fabricación aditiva en los transportes

Uno de los sectores donde también está creciendo de una forma exponencial es el sector del transporte, como los subsectores de automotriz, marítima, aeronáutica y aeroespacial.

En el sector aeroespacial cabe destacar que la reducción de peso es esencial por ello la impresión aditiva es una técnica muy satisfactoria para el sector. En los sectores automotriz y marítimo ya se utilizan en muchos proyectos, hasta el punto de hacer barcos y coches completamente en impresión 3D [15][31].



**Figura I. 12.** Imágenes de las aplicaciones para la fabricación aditiva en el sector del transporte.

# I. Introducción

---

## Fabricación aditiva en la arquitectura

En el sector de la arquitectura ya se utilizaban los programas de diseño asistidos por ordenador (CAD) para el diseño de los edificios antes del auge de la impresión 3D. Gracias a esto ha facilitado que muchos arquitectos investiguen con esta tecnología en su sector.

Se puede comprobar la utilización de la fabricación aditiva, con la impresión de una casa en 24 horas, con la ayuda de un banco desmontable capaz de extruir hormigón. Pero no solo se extruye con hormigón, sino que se utilizan muchos otros materiales de construcción como metales[17].

Este sector también sirve de apoyo en el sector de aeroespacial, debido a que la NASA está investigando en la construcción estaciones para el desarrollo de aldeas en otros planetas, gracias a la fabricación aditiva[31].



**Figura I. 13.** Imágenes de las aplicaciones de la fabricación aditiva en el sector de la arquitectura.

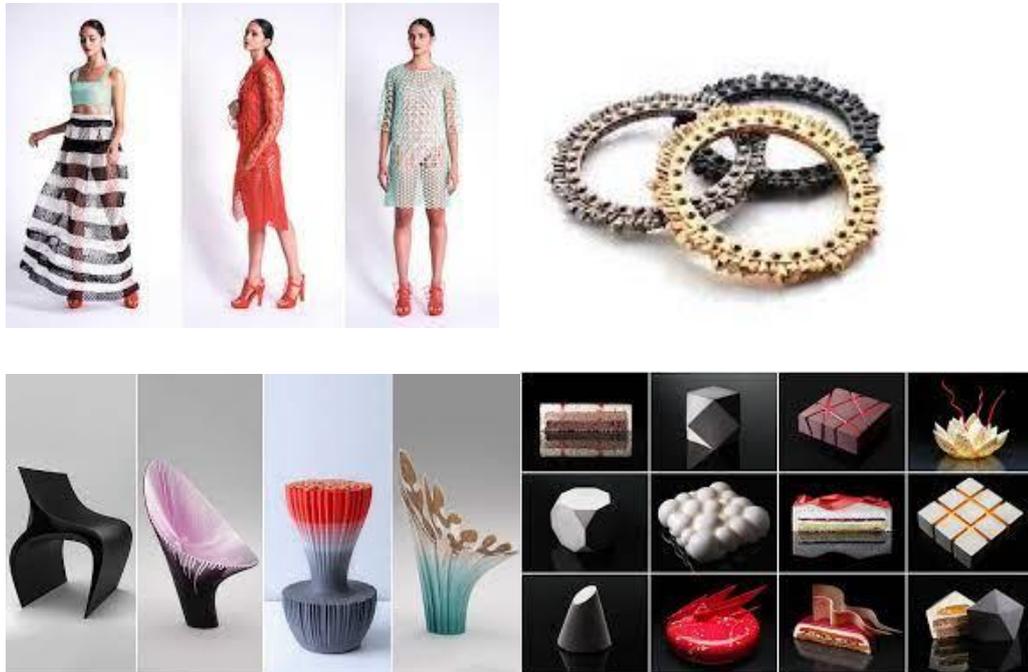
# I. Introducción

---

## Fabricación aditiva en el arte y el diseño

La personalización de la tecnología de fabricación aditiva ha impulsado a ciertos artistas y diseñadores a la utilización de la impresión 3D en sus obras. Han llegado a surgir proyectos en diseños de moda, como la colección de ropa 3D de Danit Peleg [19].

Se pueden nombrar a más artistas de otro tipo de sectores como la joyería con impresión 3D de Diana Law, estructuras impresionantes de Zaha Hadid, e incluso en la se ha introducido en la cocina con la repostería de Dinara Kaskpo[31]. Y se espera un aumento de artista que utilicen este tipo de tecnologías.



**Figura I. 14.** Imágenes de las aplicaciones de la fabricación aditiva en el sector del arte y el diseño.

## Otros sectores en la fabricación aditiva

La fabricación aditiva es una tecnología en aumento y no solo los sectores que se ha mencionado están aplicando esta tecnología, la personalización hace que se puede incluir en más sectores.

# I. Introducción

---

El sector de la robótica cada vez encuentra mejores resultados, eficientes y realistas. También en el sector deportivo con las suelas de las zapatillas[21], e incluso en el sector de las mascotas con las diferentes aplicaciones aportadas. La fabricación aditiva se encuentra en varias capas ayudando al crecimiento de la innovación en todo el mundo.



**Figura I. 15.** Imágenes de las aplicaciones de la fabricación aditiva en los sectores de la robótica, del deporte y de las mascotas.

## I.1.2. Soft Robotic.

Soft Robotics es un subcampo específico de la robótica el cual se ocupa de construir robots a partir de materiales blandos compatibles y similares a los que se puedan encontrar en un organismo vivo.

La robótica suave, traducido del inglés, se basa en imitar como se mueven y adaptan en el entorno los organismos vivos. Se diferencia de los robots con materiales rígidos en permitir una mayor flexibilidad y adaptabilidad para hacer tareas, incluyendo además que son más seguros al trabajar con personas[22].

# I. Introducción

---

Este campo en la actualidad está más enfocado en el diseño y construcción de robots hechos completamente con materiales compatibles similar a invertebrados como pulpos y gusanos. El movimiento de estos robots es complejo de modelar, debido que utilizan la mecánica continua.

La finalidad aplicada a la industria de los robots suaves consiste en agarrar y manipular objetos, ya que tiene la ventaja de ejercer una fuerza baja siendo buena para sostener objetos delicados sin romperlos. El mejor ejemplo sería en la industria alimentaria donde una garra agarrando un producto de bollería. También se pueden encontrar robots híbridos “suave-rígido”, siendo su interior rígido y su exterior blando. El exterior tiene doble funcionalidad, como actuador y como relleno en caso de colisión.

La presión es el actuador deseable para la robótica blanda ya que tiene un comportamiento de adaptabilidad con los materiales mediante el uso de flujo de fluidos. Este principio se ha utilizado para los sistemas desarrollados que están compuestos de resinas blandas, aunque se está investigando con otros tipos de materiales. Los sistemas contienen sacos de fluidos con membranas semipermeables completamente herméticos. Combinando el transporte de los fluidos y la generación que provocan con presión se llega a los cambios de forma y presión tan deseados[23].

En cuestión a las desventajas se puede observar que la robótica suave es un campo que sigue siendo emergente sin que haya dado un paso definitivo para consolidarse. De momento solo hay proyectos de prototipos, casi sin recambios o robots suaves comerciales.

Otra de las desventajas es la de que al utilizar materiales blandos su comportamiento es más complejo por lo cual más difícil de manejar y controlar. También hay que tener en cuenta que los materiales suaves son vulnerables a agresiones externas.

Para las ventajas cabe destacar que las estructuras deformables que tiene un robot suave hacen que se adapten mejor a las circunstancias o tareas dinámicas, incluso adaptándose al entorno desconocido e irregular. **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

# I. Introducción

---

El avance de los elastómeros y la fabricación aditiva ha ayudado a que este campo se desarrolle más rápido, debido a que abre la puerta a nuevos materiales flexibles y maleables con la fabricación más personalizada y adaptativa.

Muchos de los materiales utilizados tienen una ventaja que los diferencia, la cual es posible la reparación después de haber sido desgarrado, perforado o dañado. Esto es muy satisfactorio para la reparación de órganos, siendo comparable con la auto-reparación de las células. Esto se ha podido demostrar que tras la reparación o curado del elastómero, un sistema robótico flexible neumático, sigue con su funcionamiento.

Como última ventaja muchas veces la robótica suave es mucho menos costosa que partes difíciles de los robots tradicionales.

## I.1.2.1. Tipos y movimientos de Soft Robotics.

### - Actuación Neumática (PneuNets)

La actuación neumática es la más común para los robots blandos. El material blando, los elastómeros, y los fluidos que hacen presión a través de canales y cámaras internas ha facilitado este método. Para accionar el movimiento se presuriza el sistema, así el fluido del interior genera tensiones en el material. Para poder controlar el movimiento generado se modifica la geometría y las propiedades de los materiales.

Un robot suave dependerá de su geometría para el movimiento, cuando está completamente compuesto por un único material elastómero, la expansión que produce la presión se producirá mayormente en las paredes delgadas de la estructura. En cambio, cuando se utilizan materiales elastómeros de diferentes comportamientos se obtiene un mayor control en el comportamiento del movimiento[25].

A continuación, se puede observar en la *Figura 16* algunos de los movimientos que tiene los EIA (Elastic Inflatable Actuator). Los movimientos de EIA expansivos, contracción, torcedura y flexión.

# I. Introducción

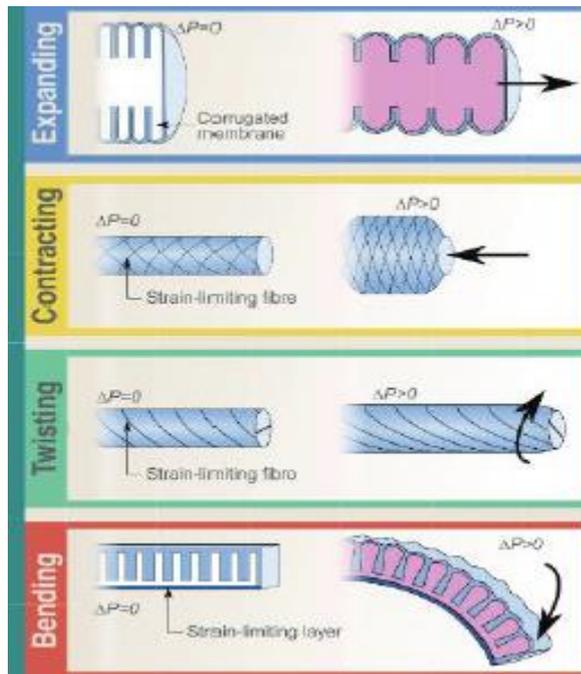


Figura I. 16. Posibles movimientos de EIA como expansión, contracción, torcedura y flexión.

Para este TFM se utilizará un movimiento flexible con actuador neumático por lo que se mostrará, en la *Figura 17*, los PneuNets flexibles con sus diferentes utilizaciones, como multi-material además de una geometría cilíndrica, también corrugado y ecocéntrico.

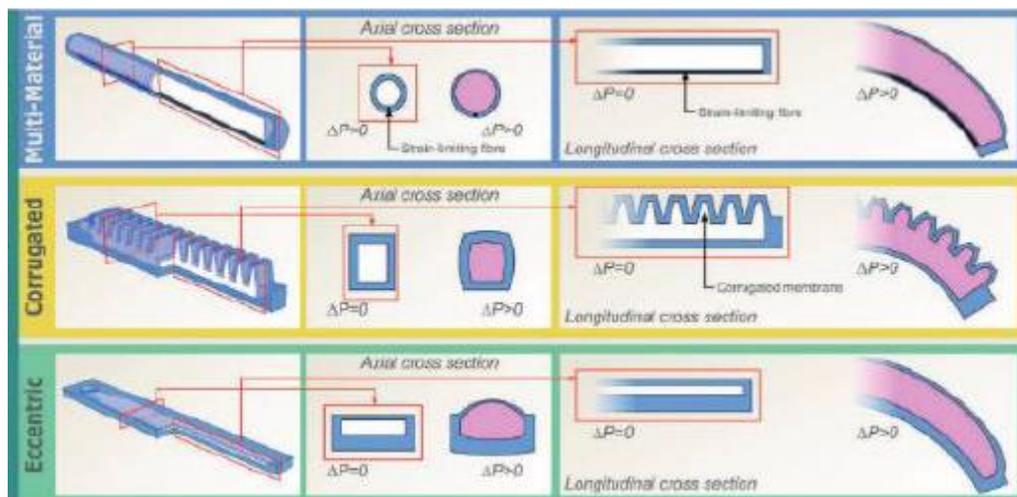


Figura I. 17. Posibles geometrías y utilizaciones de los EIA como multi-material, corrugado y ecocéntrico.

# I. Introducción

---

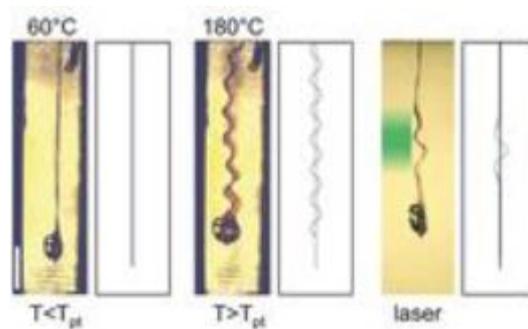
## - Fotosensible

Los actuadores fotosensibles utilizan materiales elastómeros cristalinos líquidos (LCE) este material es inteligente ya que puede exhibir grandes cambios de su forma proyectando iluminación al material con luz visible.

Se desarrolló este proyecto en el instituto LENS de Florida, un micro-robot bioinspirado en imitar el movimiento de una oruga. Este robot blando recoge energía de una luz verde que es controlada por un rayo láser modulado espacialmente.

Los elastómeros cristalinos líquidos son redes de polímeros cristalinos líquidos ligeramente reticulados. Los materiales LCE combinan la elasticidad entrópica del elastómero y la organización de la fase cristalina líquida. La luz permite que la estructura tridimensional de los LCE pueda realizar acciones complejas sin casi actuadores discretos.

Estos robots suaves bajo estímulos de calor pueden realizar un cambio de forma, además de inducir una luz verde, siendo la manera más efectiva para controlar los movimientos del material; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**



**Figura I. 18.** Ejemplo del movimiento de los materiales LCE, mediante temperatura y luz verde.

# I. Introducción

---

## - Dieléctricos

Estos actuadores son una clase de polímeros electroactivos. Funcionan basándose en la inducción de deformaciones con un campo eléctrico, son llamados DEA (Dielectric Elastomer Actuators). El diseño más común es donde se intercala una membrana elastómera aislante entre dos electrodos compatibles. Una vez se les aplica voltaje a los electrodos, el campo eléctrico provoca una disminución del grosor y a la vez un aumento del área de la membrana; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Los DEA se comportan como condensadores deformables que se puede utilizar para generar energía, pero son muy útiles como si fueran músculos creando dispositivos como un dirigible en forma de pez o un actuador lineal.

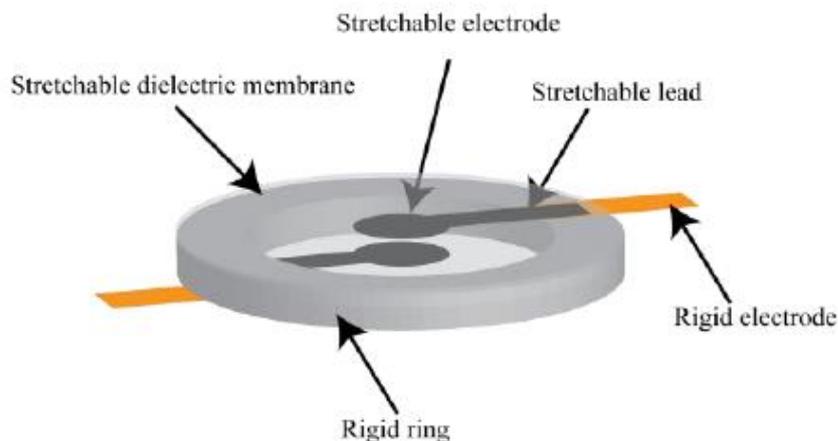


Figura I. 19. Forma básica de utilización de los DEA y sus partes.

## - Combustión

Los CDA (Combustion driven actuators) son los actuadores impulsados por combustión los cuales utilizan la explosión de mezclas de combustibles para impulsar el movimiento del actuador. El funcionamiento de estos actuadores es similar a los actuadores neumáticos, sin embargo, utilizan gas a presión. Este gas es una mezcla de aire y metano dentro de los conductos del robot suave; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

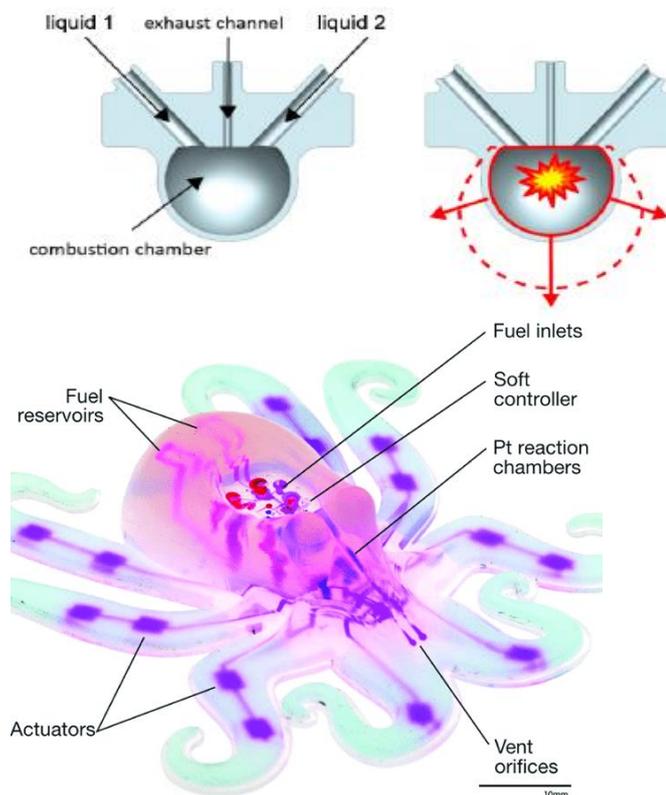
# I. Introducción

---

La combustión del proceso genera gases con una alta energía obligando a las paredes del actuador a expandirse. El volumen del CDA puede incrementar hasta ampliarse varias veces su tamaño natural.

Controlar el movimiento del actuador no es fácil ya que la expansión de los gases tiene que ser muy específico para generar el movimiento deseado. Como en los actuadores neumáticos para controlar el movimiento hay que tener en cuenta las mismas variables geometría, espesor y material.

Los CDA se activan con una configuración de control simple, donde se incluye un controlador lógico programable (PLC), unos controladores de flujo de masa (MFC) y un transformador de chispa.



**Figura I. 20.** Ejemplo del movimiento expansivo de los actuadores CDA y prototipo Octobot.

# **I. Introducción**

---

## **I.1.2.2. Soft Robotic en impresión 3D.**

### **I.1.2.2.1. Técnicas de impresión 3D.**

En la actualidad una de las técnicas más utilizada para prototipos es el moldeo con siliconas. Es un proceso laborioso ya que se debe de hacer un molde con el diseño que se desea, normalmente con FDM ya que son los más rápido de fabricar. La problemática es si los moldes son demasiado complicados, cuando la silicona este curada es muy posible que el molde se rompa. Por tanto, si cada vez que se obtiene un accionador de robótica suave hay que volver a fabricar el molde y además del tiempo de espera del curado de la silicona el proceso de elaboración y deposición se hace pesado.

Por ello hay que tener en cuenta el proceso de moldeo de siliconas es bastante favorable, aunque la actual investigación para soft robotics está en FDM, SLA y SLS.

### **FDM**

La técnica de fabricación aditiva de FDM en soft robotics tiene su complejidad, debido a que hay que fabricar el objeto con túneles y cámaras, y está a la vez han de ser completamente estancas. El FDM al ser extruido por filamento haciendo el recorrido de cada capa, hay que tener muy encuneta todos los parámetros a la hora de fabricar, pudiendo provocar porosidades. Si la estructura es demasiado gruesa el objeto será menos flexible.

Otra inconveniente de las FDM es la extrusión del material, al utilizar materiales blandos para poder flexionar las paredes de la estructura. El material flexible es más complicado que se extruya correctamente con la misma fluidez durante la fabricación, debido a rozamientos del material que hace que se estire llegando a romperse el filamento. La dureza máxima que se ha llegado a imprimir en FDM ha sido de Shore 60 A.

Lo bueno que tiene el FDM, es que es una técnica muy común ya que hay un montón de impresoras de escritorio, si se llegara a desarrollar mejor este tipo de

# I. Introducción

---

proyectos de soft robotics en la impresión se daría un gran avance con mucha más rapidez en el sector.

## **SLA**

La técnica de fabricación aditiva de SLA en soft robotics, es mucho más sencillo que en FDM, aunque también tiene sus inconvenientes. Primeramente, la calidad de fabricación de los robots suaves es mejor, llegando incluso al detalle. Al ser una resina líquida el material que se utiliza, una vez sinterizado y curado, hay una gran variedad de materiales blandos, incluso llegando a durezas Shore A menores que en FDM.

El interior del robot genera perfectamente los canales y cámaras, pero debido a que se van fabricando capa a capa, al final se acaba sellando esos huecos con resina líquida en su interior. Esto hace que sea compleja la limpieza del interior del robot suave por todos los rincones de las cámaras.

## **SLS**

La técnica de fabricación aditiva de SLS en soft robotics, también tiene sus inconvenientes. La fabricación es mucho más lenta, además de la preparación como la limpieza que se hace mucho más complicada, dado que los canales y las cámaras están llenas de polvo es muy complicado extraerlo por completo.

El principal inconveniente de esta técnica es que al ser fabricada con sinterización láser de partículas de polvo el objeto no es completamente estanco, creando micro fugas por todo el objeto. Los materiales blandos son un poco más escasos con mucha menos variedad en comparación a las demás técnicas. Pero cabe destacar que la impresión en 3D es una calidad muy buena.

# I. Introducción

---

## I.1.2.2.2. Materiales que se suelen utilizar.

### Elastómeros

- **PBAT:** (Poli-Butilén Adipato-co-Tereftalato) Es un elastómero, el cual se ha utilizado para prototipos para la impresión 3D. Siendo un material relativamente flexible, llegando a una dureza Shore D de 30-40. Esto hace que el objeto sea más rígido y que se necesite más presión para generar una curvatura en los actuadores.
- **TPE (TPU):** Elastómeros Termoplásticos, los TPE no precisan vulcanización y pueden ser procesados con métodos convencionales. Este tipo de polímeros son moldeables bajo la influencia del calor y vuelven a mostrar un comportamiento elástico al enfriarse. Hay siete clases de TPE, clasificados por el material de adición. Entre ellos encontramos el TPU un material que se está utilizando mucho en soft robotics por tener una escala amplia en su dureza, desde lo más bajo de Shore A, hasta lo más alto de Shore D. Este material será primordial en este TFM.

### Resinas

- **Flexibles:** Las resinas Flexibles, pertenecen a una familia de resinas que simulan la flexibilidad del caucho o del TPU, alrededor de una dureza Shore 80 A, tienen una recuperación elástica lenta y como pueden soportar esfuerzos a flexión y compresión, hace que las resinas sean un buen material para soft robotics.

# I. Introducción

---

- **Elásticas:** Las resinas elásticas, también pertenece a la familia de resinas parecidas al caucho, pero al ser más ciertamente un poco más blandas tiene una similitud a las siliconas. Se suelen utilizar para piezas que se doblen, estiren o compriman. Su dureza esta alrededor de Shore 50A, haciendo este tipo de resinas muy buena para soft robotis más blandos.

## **Siliconas**

- **PDMS:** (Polidimetilsiloxano), es un polímero de la familia de los polisilixanos (Siliconas). Es un material transparente con buena estabilidad térmica y oxidativa, permeabilidad, hidrofobicidad y un excelente dieléctrico. Este material no es utilizado en la impresión 3D, sin embargo, es muy utilizado en soft robotics. Para su fabricación hay que hacer una mezcla con aditivos y verterlo en un molde y esperar a que cure el material. Es muy bueno para formar geometrías complejas.

# I. Introducción

---

## I.1.3. Lesiones frecuentes que requieren rehabilitación en la muñeca.

Hay muchos tipos de lesiones que hace que la muñeca este restringiendo su movilidad. Dado que en este TFM consiste en una muñequera de rehabilitación, es necesario tener en cuenta las posibles lesiones en la muñeca y su rehabilitación con los movimientos.

La muñeca está formada por dos huesos del antebrazo, cubito y radio, y ocho pequeños huesos en la base de la mano llamados huesos del carpo, estos se encuentran entre los huesos de la mano y los del antebrazo[29].



**Figura I. 21.** Imagen de la mano derecha con los huesos que forman la muñeca.

### Esguinces

Una de las principales lesiones en la muñeca son los esguinces. Es una lesión de los ligamentos que unen los huesos situados en la mano entre sí, como el carpo, el radio, el cúbito o los metacarpianos. Existen tres tipos de grados de esguince, en función de la gravedad de la lesión. Los síntomas que provocan esta lesión son dolor en la zona afectada, hinchazón, hematoma y pérdida de fuerza. No se suele incapacitar con esta lesión, pero sí que dificulta la actividad diaria.

# I. Introducción

---

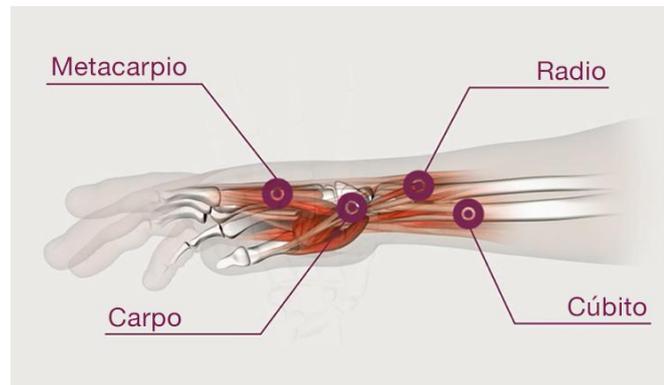


Figura I. 22. Imagen de la mano derecha con tipos de esquinces de la muñeca.

## Fracturas

En cuestión de las lesiones de fractura de muñeca se encuentra dos tipos facturas de la extremidad distal del antebrazo y fracturas del escafoides.

Las fracturas de la extremidad distal del antebrazo por lo general implican a los huesos del radio y el cubito. Estas fracturas suelen producirse por una caída sobre la mano extendida. Los síntomas son hinchazón, dolor en la muñeca y sensible al tacto, puede llegar a volverse rígida y muy dolorosa.

En este tipo de fracturas hay dos formas típicas de fracturarse la muñeca. La fractura de Colles, cuando la caída con la mano extendida la muñeca esta doblada hacia atrás, esto hace que el radio se fracture cerca de la muñeca haciendo que su extremo se desplace hacia arriba. La fractura Smith, cuando la caída con la mano doblada hacia adelante, esto hace que el extremo roto del radio se desplace hacia abajo.

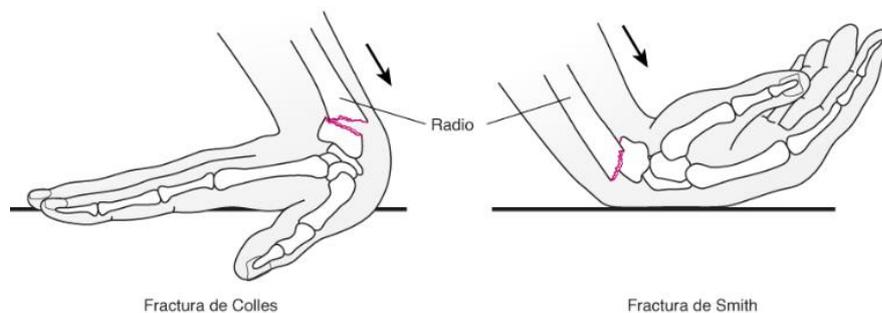


Figura I. 23. Imagen de la mano derecha de las dos posibles fracturas de la muñeca.

# I. Introducción

---

Las fracturas del escafoides suelen afectar a uno de los huesos de la muñeca situados cerca de la base del pulgar. Estas fracturas también suelen producirse por una caída con la mano extendida. La fractura puede interrumpir el flujo sanguíneo, causando artrosis y pérdida de funcionalidad, también la parte de la muñeca situada debajo del pulgar causa dolor y se inflama, haciendo particularmente dolorosa la rotación de la muñeca.

## **Artrosis**

La artrosis de muñeca se produce un deterioro del cartílago de una o más articulaciones que compone la muñeca. La muñeca está compuesta por varias articulaciones que son nombradas con los huesos que interactúan entre ellas. Existen diversos tipos de artrosis en la muñeca.

- **Artrosis postraumática de la muñeca.**

Artrosis radiocarpiana, secuelas de fracturas articulares del radio distal.

Artrosis tras una fractura de escafoides.

Artrosis tras un esguince grave escafosemilunar.

- **Artrosis de la muñeca degenerativa.**

Artrosis del semilunar en los conflictos cubital-carpo.

Artrosis peri-trapecio, escafo-trapecio-trapezoidal y trapecio-metacarpiana.

Artrosis como consecuencia de una enfermedad de Kienbock o necrosis aséptica.

- **Artrosis reumática como consecuencia de una artritis evolutiva de la muñeca.**

Artritis microcristalina.

Artritis autoinmune.

# I. Introducción

---

La artrosis de muñeca tiene los síntomas de un dolor progresivo en la zona afectada, hinchazón, chasquidos con el movimiento y restricción del movimiento de muñeca.

## **Accidente cerebrovascular con falta de movilidad**

El accidente cerebrovascular o ictus es una interrupción brusca del aporte de sangre a una región del cerebro que provoca una alteración en su funcionamiento. Uno de los síntomas frecuentes tras sufrir un ictus es el dolor provocando un alto grado de discapacidad, uno de estos cuadros dolorosas es el Síndrome Hombro Mano.

El síndrome Hombro Mano aparece en un 12,5 – 27% de los pacientes con ictus. Este síndrome parece ser consecuencia de alteraciones a distintos niveles del sistema nervio medidas por el sistema nervioso central, aunque ni su etiología ni su fisiopatología están claras. Suele aparecer entre uno y seis meses tras el ictus, aunque es raro que ocurra a partir del quinto mes. El Síndrome Hombro Mano se divide en tres fases:

- **Fase 1. Aguda o hiperémica:**

Aparece edema en el dorso de la mano y los dedos, con la movilización aumenta el dolor y el calor. Es característico el dolor ante la compresión de las articulaciones metacarpofalángicas. Puede durar hasta 3 meses.

- **Fase 2. Distrófica:**

Aumenta la intensidad del dolor y la rigidez, aparece sudoración y piel fría.

- **Fase 3. Atrófica:**

Disminuye el dolor y la piel se vuelve fina, pálida y brillante. Se acentúa la rigidez y la limitación articular.

Para prevenir este síndrome se intentará evitar o minimizar el riesgo de lesiones microscópicas de partes blandas del miembro superior. Las medidas para prevenir son: evitar la flexión pasiva de dedos y muñeca por parte del propio paciente, la movilización pasiva de cada articulación aislada, procurar el recentraje articular del humero, o el empleo de ortesis coapradoras, electroestimulación[30].

# I. Introducción

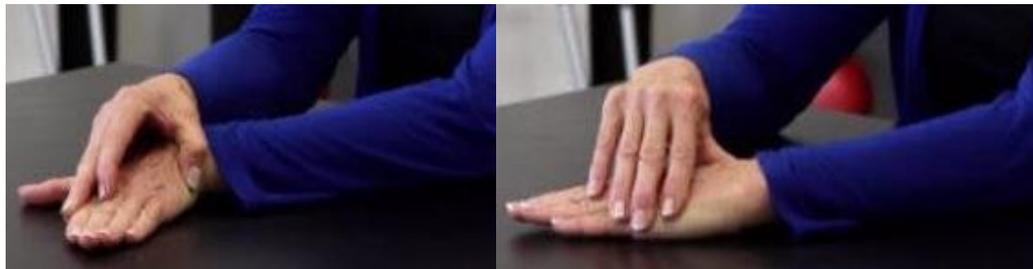
---

Aunque se tenga que evitar los movimientos pasivos del paciente, cuando el síndrome está más avanzado se necesita ejercitar con movimientos con ayuda. Estos movimientos pueden ser ejecutados por ejemplo con robots suaves.

La propuesta de TFM es una muñequera de rehabilitación con soft robotics[34], aquí se muestran ejemplos de los movimientos de la rehabilitación tras un accidente cerebrovascular:



**Figura I. 24.** Imagen del movimiento de rehabilitación de curvatura de la muñeca.



**Figura I. 25.** Imagen del movimiento de rehabilitación lateral de la muñeca.

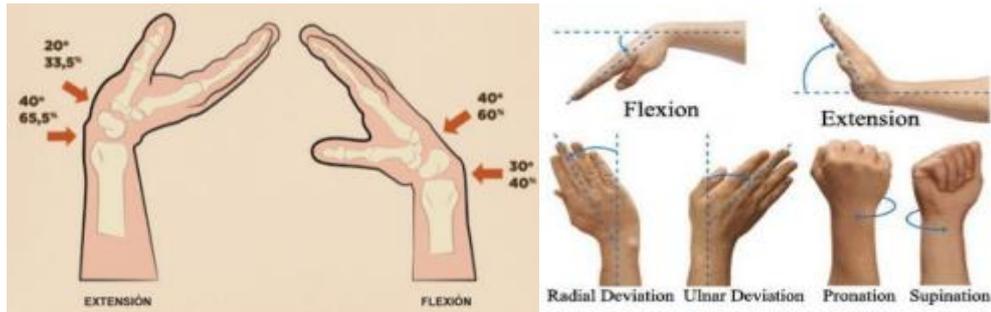


**Figura I. 26.** Imagen del movimiento de rehabilitación flexiones de muñeca.

# I. Introducción

---

Los movimientos que se ejercen en la muñeca son flexión extensión del antebrazo con respecto la palma de la mano este movimiento es el más importante en este TFM. Otros movimientos son desviación radial y ulnar, y por último el movimiento de rotación pronación y supinación (*Figura 27*)**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**



**Figura I. 27.** Visualización de los diferentes movimientos de la muñeca



## **II. OBJETIVOS**

# OBJETIVOS



## **II. Objetivos**

---

### **II.1. OBJETIVO GENERAL.**

El objetivo general de este TFM es un prototipo demostrador de una muñequera de rehabilitación con soft robotics. La fabricación del demostrador se hará con fabricación aditiva y se comprobará que materiales pueden ser los mejores adaptativos para el demostrador. Este trabajo servirá de base para definir el potencial que tiene la fabricación aditiva y los nuevos materiales para la robótica blanda en el sector de la medicina.

### **II.2. OBJETIVOS PARTICULARES.**

Tras la definición del objetivo general, se destacan una serie de objetivos secundarios o particulares de gran importancia, sobre todo para abordar este trabajo de fin de máster. En primer lugar, se debe de tener conocimientos de fabricación aditiva y sus posibilidades con los diferentes materiales. También se debe de tener conocimientos del funcionamiento de la robótica blanda para poder ejecutar correctamente el movimiento que se desea.

Los materiales es uno de los factores más importantes de este trabajo ya que debe de tener ciertas características específicas para la robótica suave, además de ser compatibles con la fabricación aditiva. Teniendo en cuenta la flexibilidad, dureza, conductividad y que sea completamente hermético son las características iniciales para la búsqueda de materiales adecuados.

Otra etapa importante del desarrollo del TFM se centra en el diseño geométrico del demostrador en NX para diferentes tipos de fabricaciones con distintos materiales y poder validar los parámetros de fabricación y la utilidad del material.

Como objetivo con importancia, que el demostrador sea funcional y cumpla los movimientos para la rehabilitación de la muñeca con respecto la enfermedad que el paciente tenga.



# **III. EXPERIMENTAL**

# **EXPERIMENTAL**



## **III. Experimental**

---

### **III.1. Selección de materiales.**

En este TFM los materiales tienen un papel muy importante por las características que se desean conseguir en el prototipo. Primeramente, se hará una búsqueda de materiales comerciales que tenga un comportamiento adecuado para la fabricación aditiva y para la utilización en robótica blanda. Seguidamente se comprobará el comportamiento de los materiales a la hora de ser impresos con las diferentes técnicas de fabricación aditiva. Una vez comprobados se evaluará y seleccionará los parámetros de maquina óptimos para su fabricación. Y por último se procederá a técnicas y ensayos de caracterización de probetas fabricadas con los materiales seleccionados y sus parámetros óptimos, se efectuarán ensayos mecánicos y de resistencia eléctrica. Todos los equipos utilizados son de la empresa colaboradora Almplas.

#### **III.1.1. Pruebas de los materiales.**

##### **III.1.1.1. Evaluación de los procesos.**

La fabricación de soft robotics en fabricación aditiva como anteriormente se ha comentado se suelen utilizar tres técnicas FDM, SLA, SLS. Por ello se va a evaluar los procesos de fabricación para los materiales con semejantes comportamientos en cada una de estas técnicas.

En la evaluación se van a utilizar los siguientes equipos de fabricación aditiva para poder obtener una comparativa de cada una de ellas.

### III. Experimental

#### FDM

- **Sicnova JCR 600**

**Tabla III. 1. Especificaciones técnicas del equipo de fabricación aditiva de FDM, de la marca Sicnova, modelo JCR 600.**

Especificaciones	
Volumen de Impresión	520 x 400 x 500 mm con doble material
Altura de capa mínima	0,1 mm
Precisión motores ejes X/Y	15 micras
Precisión motor eje Z	15 micras
Número de cabezales	2
Diámetros de extrusor	Intercambiable: 0,4/0,6/0,8 mm
Filamento	1,75 mm +- 0,05 mm
Ti máx. del extrusor	230 °C
T° máx. de la bandeja	55 °C
Software d	Simplify 3D
Dimensiones	1050 x 800 x 1430 mm
Peso	160 kg
Conectividad	Wi-Fi; Ethernet red; USB



- **BQ Witbox 2**

**Tabla III. 2. Especificaciones técnicas del equipo de fabricación aditiva de FDM, de la marca BQ, modelo Witbox 2.**

Especificaciones	
Extrusor	Double Drive Gear
Auto nivelado	Sí
Controladora	BQ Zum CNC
Pantalla	LCD
Velocidad	Hasta 200 mm/s
Volumen de impresión	297x210x200 mm.
Filamentos	1,75 mm.
Boquilla	0,4 mm.
Base fría	Cristal
Termistor	100k en Hot-End
Software	Cura
Archivos	.gcode
Lector	SD
USB	Tipo B



### III. Experimental

---

#### SLA

- **Formlabs form 2**

**Tabla III. 3. Especificaciones técnicas del equipo de fabricación aditiva de FDM, de la marca Formlabs, modelo Form 2.**

	<b>Especificaciones</b>
Dimensiones	35 × 33 × 52 cm
Peso	13 kg
Temperatura de funcionamiento	Auto. a 35 ° C
Temperatura tanque de resina	Auto calentado
Requisitos de alimentación	100–240 V; 1,5 A 50/60 Hz;
Especificaciones láser	405nm láser violeta 250mW láser
Conectividad	Wifi, Ethernet y USB
Pantalla	Táctil interactiva con pulsador
Mecanismo de peeling	Proceso de peeling deslizante con sistema de llenado de resina de limpiaparabrisas
Volumen de compilación	145 × 145 × 175 mm
Espesor de capa	25, 50, 100 micras
Tamaño del punto láser (FWHM)	140 micras



### III. Experimental

---

#### SLS

- Sinterit lisa

**Tabla III. 4. Especificaciones técnicas del equipo de fabricación aditiva de FDM, de la marca Sinterit, modelo Lisa.**

Especificaciones	
Volumen máximo de impresión	150 x 200 x 150 mm
Láser	Diodo de 5 W con emisión en 808 nm
Advertencias de precaución y seguridad	Producto láser clase 4
Resolución de posicionamiento (XY)	0.05 mm
Espesor de capa	0.075 - 0.175 mm
Espesor mín. de pared	0,4 mm
Tamaño mín. de detalles	0,1 mm
Tamaño mín. de orificios	0,5 mm
Separación mín. entre partes móviles	0,2 mm
Calentamiento de la cámara	En 4 zonas independientes: pistón, cilindro, alimentador y base de impresión.
Temperatura máxima	190 °C
Volumen máximo de polvo	6 L
Software	Sinterit Studio
Archivos compatibles	STL, OBJ, 3DS, FBX, DAE, 3MF
Conectividad	Wifi, puerto USB
Pantalla	Táctil resistiva en color de 4"
Dimensiones de la impresora	620 x 400 x 660 mm
Peso de la impresora	41,0 kg



Teniendo en cuenta las limitaciones y las características de los equipos que se van a utilizar, algunos de los materiales comerciales dependerán de la exclusividad del equipo, siendo de la propia casa del equipo.

### III. Experimental

---

Se hizo de una búsqueda de materiales comerciales del sector de fabricación aditiva en las que caben destacar NinjaTek, Recreus, Utimeker, 3Dfils, Sinterit y FormLabs.

Los materiales que serán evaluados para FDM son: FilaFlex 70A, FilaFlex 60A, FilaFlex Conductor, todos ellos de la empresa española Recreus. Para los materiales que serán evaluados para SLA y SLS, al utilizar equipos que tienen exclusividad de utilización de sus propios materiales, como materiales Elastic 50A de la empresa Formlabs para SLA y Flexa Grey de la empresa Sinterit para SLS.

Parámetros principales recomendados por los fabricantes de los materiales.

**Tabla III. 5. Recomendaciones de impresión 3D en FDM por el fabricante Recreus del material FilaFlex 70A.**

FilaFlex 70 A	
Propiedades de impresión	Recomendado
Temperaturas de impresión	215-235°C
Velocidad de impresión	20-40 mm/s
Temperatura de la cama caliente	0-40°C
Altura de capa óptima	0,2 mm
Diámetro mínimo de la boquilla	0,4mm de alto
Parámetros de retracción	3,5-6,5 mm (velocidad 20-160 mm/s)

**Tabla III. 6. Recomendaciones de impresión 3D en FDM por el fabricante Recreus del material FilaFlex 60A.**

FilaFlex 60 A	
Propiedades de impresión	Recomendado
Temperaturas de impresión	215-235°C
Velocidad de impresión	20-30 mm/s
Temperatura de la cama caliente	21°C
Altura de capa óptima	0,2 mm
Diámetro mínimo de la boquilla	0,4mm de alto
Parámetros de retracción	3,5-6,5 mm (velocidad 20-160 mm/s)

### III. Experimental

---

*Tabla III. 7. Recomendaciones de impresión 3D en FDM por el fabricante Recreus del material Conductive FilaFlex.*

Conductive FilaFlex	
Propiedades de impresión	Recomendado
Temperaturas de impresión	245-250°C
Velocidad de impresión	20 mm/s
Temperatura de la cama caliente	50-60°C
Retracción	2-3 mm/s a 40 mm/s

En el caso de los materiales Elastic 50 A y Flexa Grey, al ser específicos de las de las propias marcas sus programas de software tienen restringidos cambios de parámetros, por tanto, solo indicando el material que se va a utilizar en la impresión ya puedes ejecutar el proceso.

#### **III.1.1.2. Evaluación y selección de los parámetros óptimos de impresión.**

La selección de los parámetros óptimos de impresión para cada uno de los materiales es diferente según el tipo de software de impresión que se utilice. Cada equipo utilizará un software distinto, esto dificultará una comparativa de parámetros entre equipos, aunque si es posible la comparativa de los diferentes materiales en un mismo equipo.

Para FDM se utilizarán dos tipos de software de impresión uno para cada equipo que se utilice. En el equipo Sicnova JCR 600 se empleará el software Simplify, en cambio en el equipo BQ Witbox 2 será el software Cura, este es el más habitual para las impresoras de escritorio por su compatibilidad por ser un software libre.

En SLA se utilizará el software de la propia marca para obtener mejores resultados de impresión, este será PreForm. En SLS se gastará Sinterit Studio, también el software de la propia marca. Las marcas de estos equipos solo permiten la utilización de sus propios softwares.

### III. Experimental

Tabla III. 8. Parámetros de impresión del software Cura para cada material utilizado en la impresión.

<b>Cura</b>			
<b>Parámetros de impresión</b>	<b>FilaFlex 70 A</b>	<b>FilaFlex 60 A</b>	<b>Conductive FilaFlex</b>
<b>Calidad</b>			
Altura de capa	0,1 mm	0,1 mm	0,1 mm
Ancho de línea	0,40 mm	0,40 mm	0,40 mm
Ancho de línea de la capa inicial	120%	120%	120%
<b>Perímetro</b>			
Grosor de la pared	2	2	2
Grosor superior/inferior	5	5	5
<b>Relleno</b>			
Densidad del relleno	100%	100%	100%
Patrón del relleno	Zig-Zag	Zig-Zag	Zig-Zag
% de superposición del relleno	30%	30%	30%
<b>Material</b>			
Temperatura de impresión	230	230	230
Flujo	120%	120%	120%
<b>Velocidad</b>			
Velocidad de impresión	20 mm/s	20 mm/s	20 mm/s
Velocidad de relleno	20 mm/s	20 mm/s	20 mm/s
Velocidad de pared	20 mm/s	20 mm/s	20 mm/s
Velocidad de desplazamiento	100 mm/s	100 mm/s	100 mm/s
Velocidad de capa inicial	20 mm/s	20 mm/s	20 mm/s
Velocidad de salto Z	16,7 mm/s	16,7 mm/s	16,7 mm/s
<b>Desplazamiento</b>			
Habilitar retracción	√	√	√
Distancia retracción	2	2	2
Velocidad de retracción	30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s
Evitar parte impresas al desplazarse	√	√	√
Distancia para evitar al desplazarse	5 mm	5 mm	5 mm
Salto en Z en la retracción	√	√	√
<b>Refrigeración y Soporte</b>			
	X	X	X
<b>Falda</b>			
	√	√	√

### III. Experimental

---

Tabla III. 9. Parámetros de impresión del software Simplify para cada material utilizado en la impresión.

Parámetros de impresión	FilaFlex 70 A	FilaFlex 60 A	Conductive FilaFlex
<b>Extrusor</b>			
Diámetro de la boquilla	0,6 mm	0,6 mm	0,6 mm
Multiplicador de extrusión	1,2	1,2	1,2
Ancho de extrusión	0,6 mm	0,6 mm	0,6 mm
Distancia de navegación	2 mm	2 mm	2 mm
<b>Capa</b>			
Altura de la capa	0,1 mm	0,1 mm	0,1 mm
Capas sólidas superiores	2	2	2
Capas sólidas inferiores	2	2	2
Contorno/perímetro de capa	2	2	2
Dirección de contorno	Inside-out	Inside-out	Inside-out
Altura de la primera capa	100%	100%	100%
Ancho de la primera capa	120%	120%	120%
Velocidad de la primera capa	100%	100%	100%
<b>Relleno</b>			
Patrón de relleno interno	Rectilínea	Rectilínea	Rectilínea
Patrón de relleno externo	Rectilínea	Rectilínea	Rectilínea
Porcentaje de relleno interior	1	1	1
Superposición de contornos	0,2	0,2	0,2
Ancho de extrusión de relleno	1	1	1
<b>Temperatura</b>			
Extrusora	230 °C	230 °C	230 °C
Velocidad del ventilador	X	X	X
<b>Otro</b>			
Velocidad de impresión predeterminada	20.0 mm/s	20.0 mm/s	20.0 mm/s
Esquema de baja velocidad	0,5	0,5	0,5
Bajo velocidad de relleno sólido	0,6	0,6	0,6
Velocidad de movimiento del eje X/Y	200 mm/s	200 mm/s	200 mm/s
Velocidad de movimiento del eje Z	16,7 mm/s	16,7 mm/s	16,7 mm/s
<b>Avanzado</b>			
Evite cruzar el contorno; factor de desvío	50.0	50.0	50.0

### III. Experimental

---

*Tabla III. 10. Parámetros de impresión de los softwares PreForm y Sinterit Studio para cada material utilizado en la impresión.*

PreForm / Sinterit Studio		
Parámetros de impresión	Elastic 50 A	Flexa Grey
Altura de capa	0,1 mm	0,1 mm

Todos estos parámetros para la máquina son los que se han considerado los óptimos para hacer probetas básicas, sin tener en cuenta problemas del diseño que más adelante se evaluarán.

### III.1.2. Técnicas y ensayos de caracterización.

Este apartado se contemplará la forma en que trabaja el material desde un punto de vista mecánico. Se estimarán los niveles de tensión a tracción, dureza y conductividad eléctrica. Este tipo de ensayos darán a conocer las propiedades mecánicas de los materiales utilizados para la impresión 3D.

- **Caracterización mecánica**

#### Ensayo a tracción

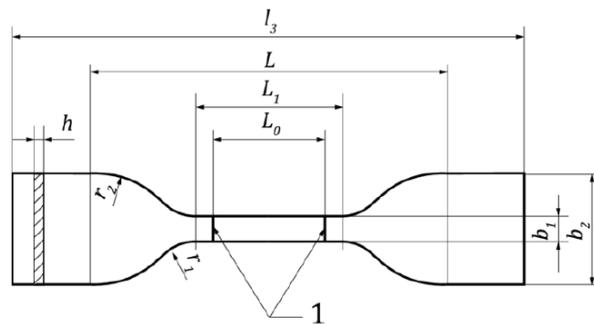
Este ensayo se realiza según la normativa ISO 527-3 y se ha utilizado el tipo de probeta 5 con un espesor de 1,5 mm aproximadamente. De los resultados obtenidos cabe resaltar los datos de esfuerzo a la rotura, deformación en la rotura y la resistencia máxima. Para conseguir dichos resultados, el ensayo tiene que realizarse hasta la rotura. Si hay algún dato que destaque sobre los demás, este será descartado por su elevada desviación y será remplazado por otro ensayo.

### III. Experimental

**Tabla III. 11. Características del ensayo de tracción.**

Ensayo	Probeta	Condiciones Ambientales Previos
- Velocidad de ensayo: 100 mm/min	- Tipo de probeta: tipo 5	- 16 horas
- Distancia entre mordazas ( $L$ ): 80 mm	- Preparación de probetas: impresión 3D	- $23 \pm 2$ °C
- Longitud de referencia ( $L_0$ ): 25 mm	- Número de probetas: 5	- $50 \pm 5$ %HR
- Célula de carga: 2 KN		
- Tipo de mordazas: neumáticas		
- Fuerza (según ISO 7500): Clase 0,5		
- Indicador de desplazamiento: extensómetro óptico		

En las muestras que se tiene fluencia se calcula el valor de deformación nominal en el punto de rotura sin extensómetro, solo con travesaño.

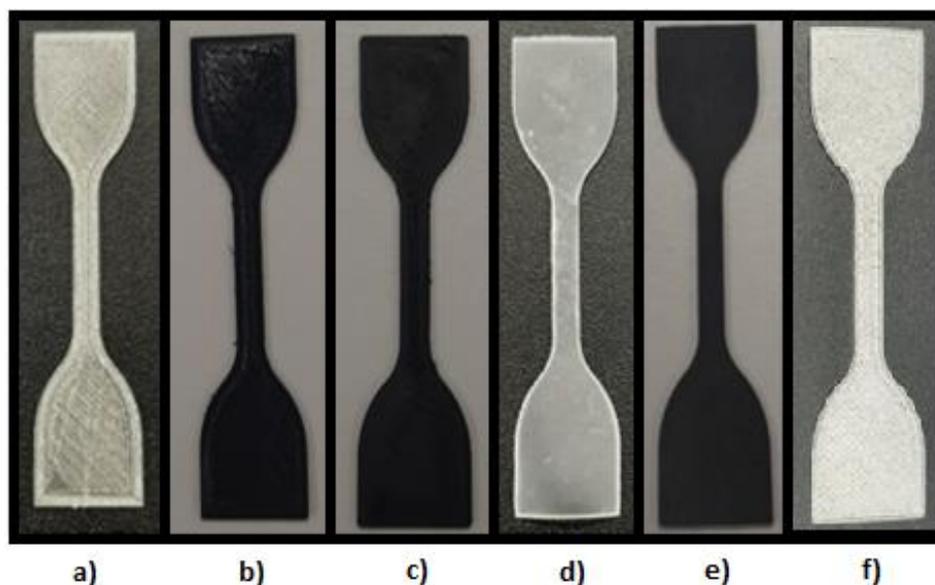


**Figura III. 1.** Probeta de tracción según normativa ISO 527-3 tipo 5 con espesor 1,5mm.

**Tabla III. 12. Leyenda de probeta de tracción.**

<b>1</b>	Marcas
<b><math>b_1</math></b>	Anchura de la parte estrecha: $6 \text{ mm} \pm 0,4 \text{ mm}$
<b><math>b_2</math></b>	Anchura en los extremos: $25 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$
<b><math>h</math></b>	Espesor: $\leq 1,5 \text{ mm}$
<b><math>L_0</math></b>	Distancia entre marcas: $25 \text{ mm} \pm 0,25 \text{ mm}$
<b><math>L_1</math></b>	Longitud de la parte estrecha. $33 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$
<b><math>L</math></b>	Distancia inicial entre Mordazas: $80 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$
<b><math>L_3</math></b>	Longitud total: $\geq 115 \text{ mm}$
<b><math>r_1</math></b>	Radio menor: $14 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$
<b><math>r_2</math></b>	Radio mayor: $25 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$

### III. Experimental



**Figura III. 2.** Probetas impresas para cada uno de los materiales; a) FilaFlex 70<sup>a</sup> BQ; b) FilaFlex 60<sup>a</sup> BQ; c) Conductive FilaFlex; d) Elastic 50<sup>a</sup>; e) Flexa Grey; f) FilaFlex 70A JCR

Tras la preparación del instrumental a utilizar, el tipo de probeta de ensayo y la condiciones y características de este mismo se obtienen los resultados (*Tabla 13*) para cada uno de los materiales comerciales.

**Tabla III. 13. Resultados obtenidos tras el ensayo de tracción.**

Nº Muestra	Resistencia	$\sigma$	Deformación en la resistencia	$\sigma$	Esfuerzo punto de rotura	$\sigma$	Deformación punto de rotura	$\sigma$
	MPa		%		MPa		%	
FilaFlex 70A BQ	2,56	0,12	75	8	19,9	0,80	-	-
FilaFlex 70A JCR	2,59	0,17	77	6	20,2	1,10	-	-
FilaFlex 60A BQ	11,10	0,90	800	32	10,9	1,00	800	32
FilaFlex Conductive	7,57	0,20	88	4	6,7	0,23	120	7
Flexa Grey	2,03	0,13	88	8	2,0	0,11	88	8
Elastic 50A	1,31	0,07	76	3	1,31	0,07	76	3

Nº Muestra	Esfuerzo fluencia	$\sigma$	Deformación en el punto de fluencia	$\sigma$	Deformación nominal en el punto de rotura	$\sigma$
	MPa		%		MPa	
FilaFlex 70A BQ	2,56	0,12	75	8	720	16
FilaFlex 70A JCR	2,59	0,17	77	6	730	13

### III. Experimental

---

#### Dureza

La técnica de dureza utiliza dos escalas diferentes para medir los materiales, Shore A y Shore D. La dureza Shore es una medida de la resistencia de un material a la perforación bajo la fuerza del resorte aplicada. Los valores obtenidos se representan en una escala con un número del 0 al 100 en la escala A o D. A mayor valor, mayor será la dureza del material. La letra A se utiliza para fuentes flexibles y la letra D para fuentes duras. Sin embargo, los rangos se superponen en los límites.

En el presente caso se utilizó la escala Shore D. Lo que se hizo fue tomar algunas muestras obtenidas mediante fabricación aditiva y medir los valores de dureza en las regiones centrales. De este modo se consigue obtener el valor que presenta la zona. Finalmente se genera un valor medio y se toma este dato como la dureza del material. Si aparece algún valor muy diferente al resto, este es descartado debido a su elevada desviación y se reemplaza con otro valor obtenido con el ensayo.

Para este ensayo, se ha seguido la norma UNE-EN ISO 868: Plásticos y ebonita. Determinación de la dureza de indentación por medio de un durómetro (dureza Shore). Obteniendo los siguientes resultados en el ensayo (*Tabla 14*).

**Tabla III. 14. Resultados obtenidos tras el ensayo de dureza shore.**

<b>Nº Muestra</b>	<b>Dureza Shore A</b>	<b><math>\sigma</math></b>
FilaFlex 70A BQ	89,9	1,6
FilaFlex 70A JCR	57,1	5,8
FilaFlex 60A BQ	50,6	3,1
FilaFlex Conductive	56,6	2,5
Flexa Grey	67,5	2,3
Elastic 50A	48,6	1,1

#### Conductividad eléctrica

Para comprobar la resistencia conductiva del material se utilizarán dos multímetros. Un multímetro portátil para comprobar que es conductor el material y más adelante en otras pruebas de geometrías y espesores se utilizará un multímetro de banco mucho más preciso.

### III. Experimental

El incremento de resistencia indicara cual es la mejor propuesta para la geometría, el espesor indicara principalmente la flexibilidad del actuador por eso es un valor importante. Este proceso será medido con el equipo multímetro Keithley 2000 6<sup>12</sup> -Digit-Multimeter.

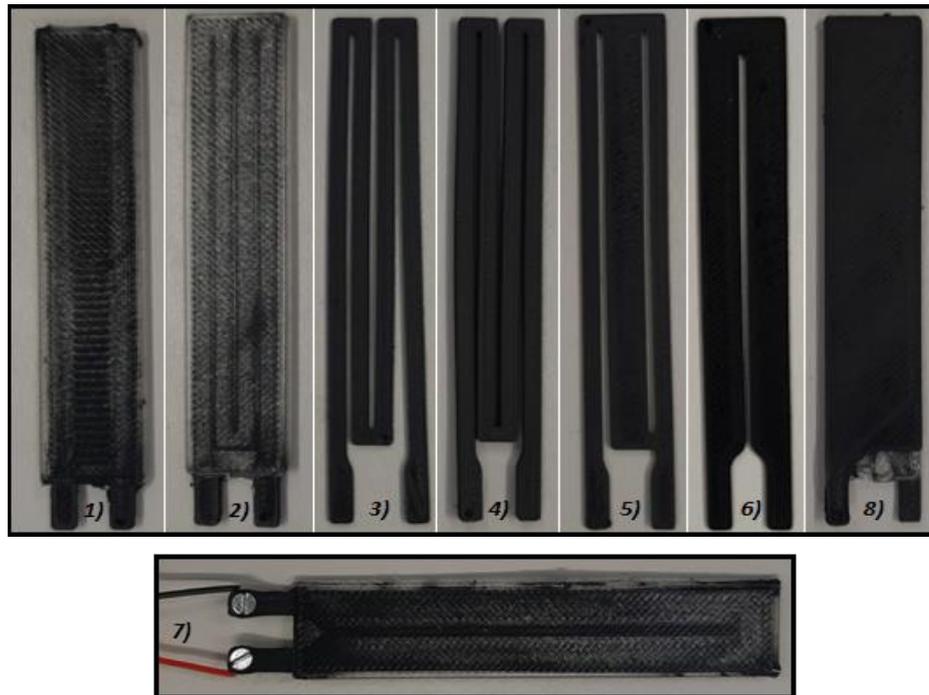


**Figura III. 3. Multímetro Keithley 2000 6<sup>12</sup> -Digit-Multimeter equipo utilizado en las pruebas de conductividad.**

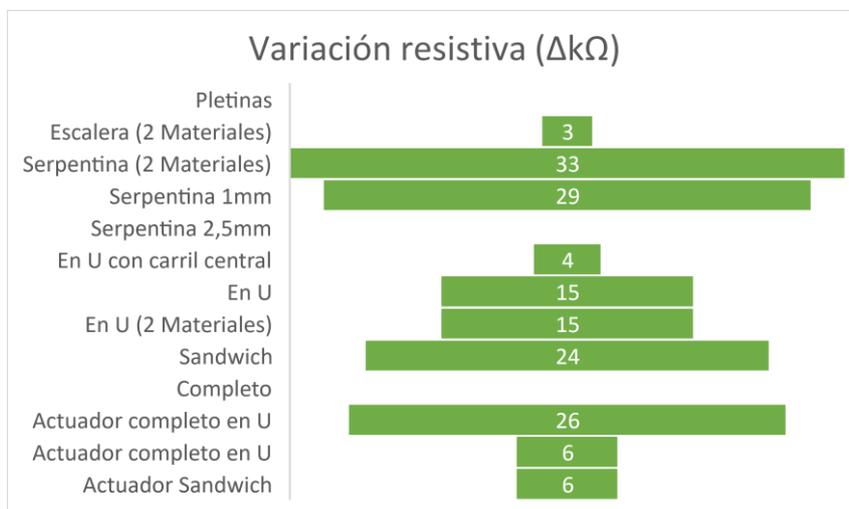
**Tabla III. 15. Muestras de diferentes geometrías y espesores para comprobar la resistencia conductiva y la variación de ella con un movimiento de flexión.**

Muestra	Geometría	Espesor (mm)		Resistencia conductiva (k $\Omega$ )	Variación ( $\Delta$ k $\Omega$ )
		No conductor	Conductor		
<b>Pletinas</b>					
1	Escalera (2 Materiales)	0,75	1	11	3
2	Serpentina (2 Materiales)	0,75	1	185	33
3	Serpentina 1mm	-	1	241	29
4	Serpentina 2,5mm	-	2,5	140	Indeter.
5	En U con carril central	-	1	82	4
6	En U	-	1	45	15
7	En U (2 Materiales)	0,75	1	87	15
8	Sándwich	0,5	1	46	24
<b>Completo</b>					
9	Actuador completo en U	0,75	1	92	26
10	Actuador completo en U	Relleno	2,5	38	6
11	Actuador sándwich	0,5	1	40	6

### III. Experimental



**Figura III. 4.** Muestras de las geometrías; 1) Escalera; 2) Serpentina dos materiales; 3) Serpentina 1mm; 4) Serpentina 2,5 mm; 5) En U con carril; 6) En U; 7) En U con dos materiales; 8) Sandwich.



**Figura III. 5.** Diferencia de variación de resistencia conductiva para cada una de las muestras propuestas.

### **III. Experimental**

---

Como se puede observar en la tabla de la variación de la resistencia la geometría con más variación una vez se ejecuta la flexión es la de forma en serpentina, por contraposición esta geometría hace que se rigidicé mucho el actuador por lo que se comparará con las dos geometrías con más variación, que son en U y sándwich.

Primeramente, haciendo una comparativa entre la rigidez que provoca cada una de las geometrías. Se observa que la geometría en U es la más flexible. La geometría de sándwich se comprobó en dos condiciones con la pletina y con un actuador al completo y se observó que en la pletina tiene una buena variación a la resistencia, pero con el actuador su variación disminuye mucho. La mejor opción por la cual se ha optado es la geometría en U de 1 mm de espesor, por tener un buen rango de variación resistiva y una mejor flexibilidad.

## **III. Experimental**

---

### **III.2. Diseño del prototipo demostrador de Soft Robotic para rehabilitación de lesiones en muñeca.**

#### **III.2.1. Diseño conceptual del prototipo.**

Teniendo en cuenta los problemas de los métodos de fabricación aditiva y los requisitos y características de la robótica blanda, es necesario que el diseño pueda ejercer sin problema el funcionamiento que se desea.

El primer requisito para el funcionamiento del actuador es el movimiento en la dirección deseada, dado que el movimiento de la muñeca es multidireccional es complejo poder hacer un robot blando que cumpla con todos los movimientos de la muñeca. El movimiento del actuador solo será una flexión sobre un eje (si se posicionará la palma de la mano hacia abajo, eje "vertical), por eso se diseñará un actuador que corresponda a ese movimiento.

Una vez claro cuál será el movimiento se seleccionará el modelo de actuadores neumáticos "PeuNet", ya que los EIA son los mejores en representar el movimiento deseado. También se desea que en el actuador sea posible sensorizar su movimiento, por tanto, se tendrá que introducir un material conductor o semiconductor eléctrico en el actuador PeuNet.

En este TFM será utilizado un EIA con movimiento de flexión mediante un corrugado y también multi-material. El corrugado tendrá una superficie lisa lo suficientemente gruesa para poder introducir un material conductor eléctrico y que además sea lo suficientemente flexible. En la parte superior de la superficie habrá una línea de conductos que estarán completamente conectados con las cámaras huecas del corrugado, haciendo posible que la neumática actúe expandiendo las cámaras provocando el movimiento de flexión.

### **III. Experimental**

---

Tras tener clara cómo será el EIA, se diseñará un prototipo que cumpla los requisitos anteriores y que sea posible su fabricación con las técnicas de fabricación aditiva actuales.

Uno de los inconvenientes del diseño es el interior de la cámara, ya que cuando se hace una impresión 3D es necesario hacer transiciones circulares para no generar soportes, cosa que si se generan dentro de las cámaras sería completamente contraproducente, impidiendo la expansión de ellas.

#### **III.2.2. Pruebas de fabricación de los diseños.**

La fabricación del actuador tiene que pasar por un desarrollo de diseño. Sabiendo que cada tecnología de fabricación aditiva tiene sus limitaciones, esto podría llegar a que el diseño sea modificado varias veces durante este proceso.

Para el diseño se ha utilizado el software de Siemens NX. Se ha creado desde cero inspirándose en diseños ya utilizados en otros actuadores de presión neumática. Dando lugar a las siguientes pruebas de fabricación.

##### **III.2.2.1. Materiales y procesos para los diseños (FDM, SLA, SLS).**

Tras las observaciones de los materiales elegidos para la posible fabricación del prototipo, se tendrán en cuenta los principales inconvenientes que tienen la impresión 3D. Para obtener la suficiente flexibilidad en las cámaras de las paredes como en la superficie plana del diseño hay que tener en cuenta el espesor. La dureza del material tendrá un factor determinante en el prototipo.

La prioridad del objetivo es hacer este prototipo completamente hermético sin que se produzcan fugas de aire.

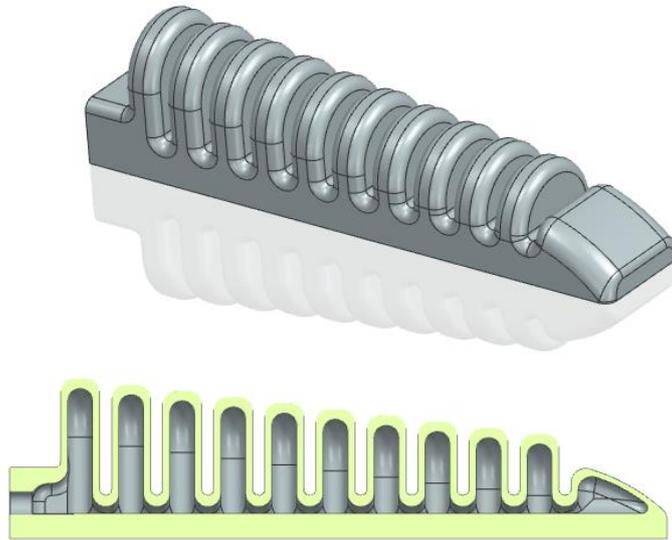
Una vez comprobados los diseños con cada tipo de fabricación aditiva se puede observar aciertos y fallos de fabricación en el actuador.

### III. Experimental

---

En la fabricación de SLA se han obtenido muy buenos resultados en cuanto a la calidad, aunque se observan ciertos inconvenientes. Uno de ellos es que al formar huecos de las cámaras y conductos la resina del material se queda dentro del actuador haciendo muy dificultoso la extracción al completo de la resina, con posibilidad de que se quede dentro un poco de resina y a la hora de curar el material tapone algún conducto haciendo ineficiente el actuador.

Otro problema principalmente es por el material es su comportamiento a fatiga o presión del aire, provocando fisuras de escape de aire. Es posible su reparación añadiendo un poco de resina en la fisura y volviendo a curar el material, pero provocando que se rigidice el actuador siendo más propenso a más fisuras.



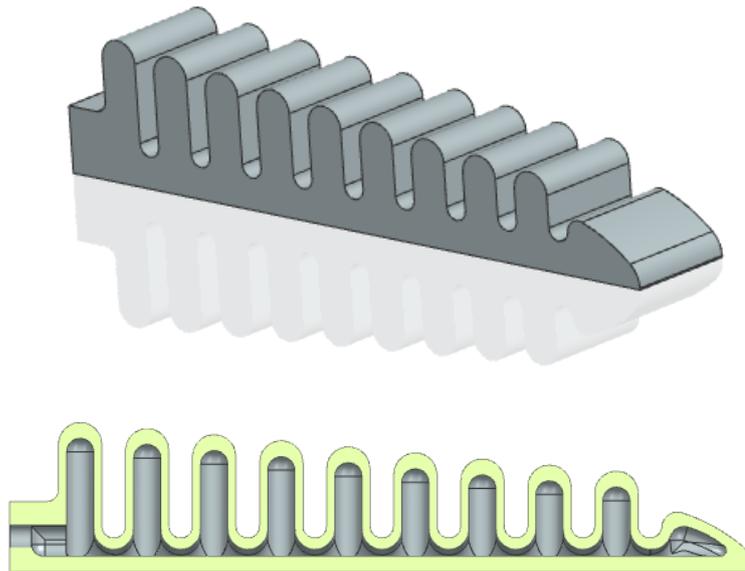
**Figura III. 6.** Modelo inicial para impresión SLA.

En la fabricación en SLS ha tenido muy buenos resultados en el acabado y también en la flexibilidad del material, pero solo flexionando manualmente. Debido a que SLS es una impresión 3D en polvo sinterizado por láser es prácticamente imposible crear un vacío dentro del actuador es por todas las micro fugas que se pueden encontrar en el actuador. Solo aplicando un recubrimiento es posible que pueda tapar las micro fugas para su funcionamiento, aunque el recubrimiento no implica el sellado completo de todas ellas.

### III. Experimental

---

Otro inconveniente de la fabricación de SLS es la lenta preparación del material de polvo en el equipo, además de la utilización de EPI's como protección de gafas, guantes y mascarilla mínimo FFP2, debido a las micropartículas de polvo que se disipan en el ambiente. El proceso de la fabricación es bastante lento. Además de la limpieza de las piezas que hace muy compleja quitar todo el polvo no sinterizado restante de los huecos generados en las cámaras.



**Figura III. 7.** Modelo inicial para impresión SLS.

Para FDM también ha habido inconvenientes a la hora de fabricar el actuador, pero ha sido posible que el actuador funcione como desea con una calidad buena.

Primeramente, la transición con las curvas para no generar soportes innecesarios dentro del actuador, hablado anteriormente de ello, y seguidamente el espesor de las paredes es de una gran importancia para la fabricación de robots blandos en FDM.

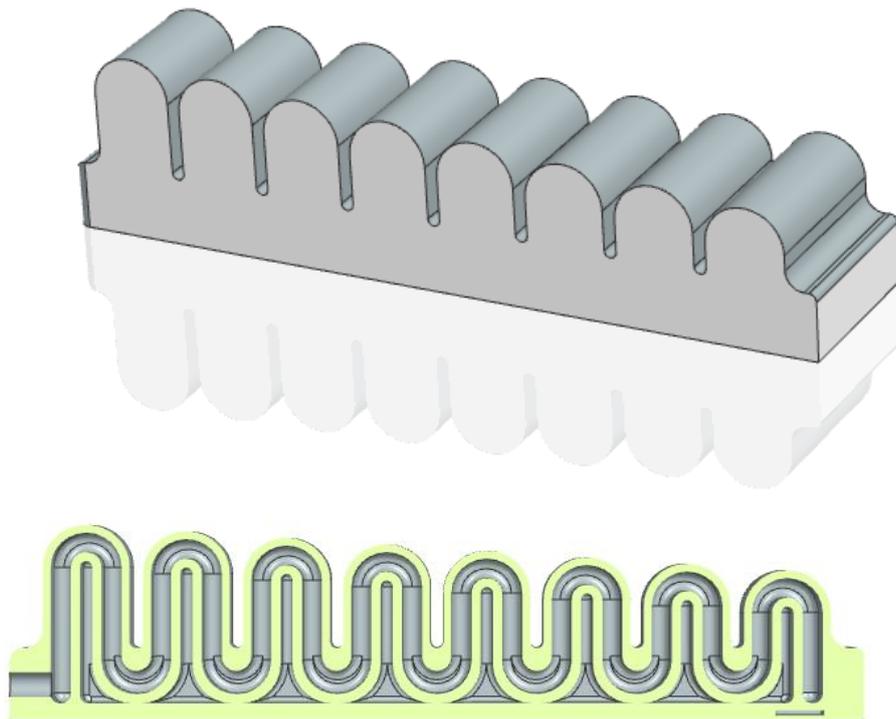
Dependiendo del diámetro de la boquilla con la que se extruya, las paredes podrán tener un mínimo de espesor. Para este TFM se han utilizado dos tipos de boquillas una de 0,4 mm de diámetro utilizada para el equipo de BQ Witbox 2 y otra de 0,6 mm de diámetro para el equipo de Sicnova JCR 600. Tras observar y analizar artículos de impresión 3D para robótica blanda, no es nada recomendable que el

### III. Experimental

---

espesor de las paredes sea menor de 1 mm[32]. Debido a todas estas características que se presentan se ha decidido hacer que el espesor de las paredes de las cámaras sea de 1,2 mm, ya que es el mínimo común múltiplo mayor a 1 mm entre las dos boquillas, utilizadas 0,4 mm y 0.6 mm.

El diámetro de las boquillas determinará el espesor de material que se deposita en la pieza fabricada por lo que en con la boquilla de 0,6 mm el máximo de contornos es de 2. Los contornos son la zona más crítica donde se pueden encontrar fugas de aire, por lo que hay que bajar la velocidad de deposición y colocar una superposición de material al 120%, y asegurarse una buena adherencia entre contornos. Además, hay tener en cuenta la importancia del relleno en FDM, porque depende del patrón que se genere tendrá mejor adhesión interior, sin escapes de aire.



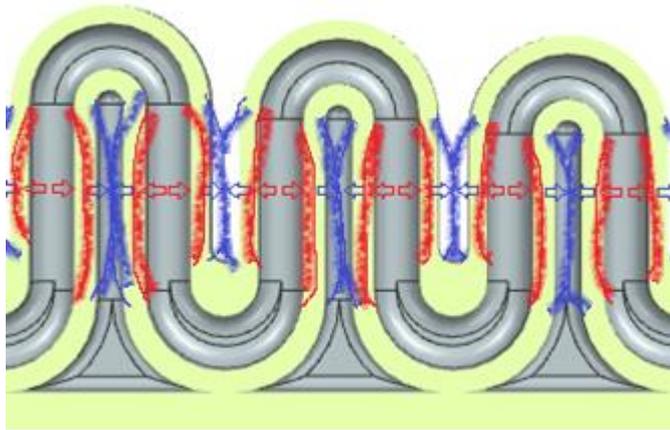
**Figura III. 8.** Modelo inicial para impresión FDM.

Tras las pruebas iniciales de diseño se han observado fallos y características de los diseños se han ido modificando hasta llegar al modelo de la *Figura 8*.

### III. Experimental

---

Este modelo a continuado con un descenso de altura de las cámaras del inicio al extremo final. A parte de la altura también se ha ensanchado de un extremo a otro, gracias a esto en el extremo hay mayor superficie y se adapta con mayor facilidad a la palma de la mano. Un cambio bastante significativo de actuador es el interior de las cámaras, se ha formado un conducto de guía alrededor de la superficie interior de las cámaras como si fuera una serpiente. Esta modificación de diseño ha supuesto para el actuador una mayor inclinación con menor presión en su interior. Es debido a que el empuje de esfuerzos de la presión ya no se genera solo entre cámaras, sino que también dentro de ellas mismas (*Figura 9*).



**Figura III. 9.** Esfuerzo de empuje de las cámaras.

Otro factor para tener en cuenta en el diseño es la conductividad del material conductor, por lo que se han probado diferentes geometrías con diferentes espesores para saber cuál es el óptimo para el prototipo en los ensayos anteriores. Teniendo en cuenta la resistencia generada cuando el actuador está en reposo y la diferencia entre la resistencia generada cuando se flexiona el actuador, finalmente se escogió la geometría en “U” con un 1 mm de espesor.

En la siguiente figura se muestra la incorporación de material conductor al diseño del actuador, en la base de este.

### III. Experimental

---



*Figura III. 10. Incorporación de la geometría "U" de material conductor en la base del actuador.*

#### **III.2.2.2. Fabricación, evaluación y selección de los parámetros óptimos de máquina para los materiales utilizados.**

La evaluación de los parámetros para los equipos y sus materiales, empezaron tras una búsqueda de parámetros a utilizar en impresión 3D de FDM en diferentes artículos relacionados con robótica blanda. A partir de esta información inicial de los artículos en la fabricación de actuadores en las tecnologías se han probado diferentes parámetros para poder encontrar los óptimos para el actuador.

Las pruebas de fabricación de los actuadores prácticamente han sido consecutivas unos detrás de otras, probando a la vez los diseños de SLA y SLS para FDM.

Primeramente, se hicieron unas pruebas en FDM con material FilaFlex 70 A de un diseño inicial, con unos parámetros iniciales. Tras varias pruebas sin obtener buenos resultados de impresión, como se muestra en la *Figura 11*, se observó que la deposición del material no era continua en toda su trayectoria dejando huecos en el material. Otro problema observado es que es un material con facilidad que se obstruya en la boquilla provocado que se queme (zonas amarillentas) y al final deposite gotas grandes en este. Al ser un material flexible el recorrido del filamento de la bobina al extrusor puede encontrar diferentes obstáculos friccionando el filamento, haciendo que se estire hasta que se suelte del cabezal sin poder depositar más material durante la fabricación.

### III. Experimental

---



**Figura III. 11.** Pruebas iniciales de la fabricación del actuador en FDM con material FilaFlex 70A.

La siguiente prueba de fabricación se decidió hacer para SLA, encontrado los problemas comentados en el anterior apartado, el sellado de las cámaras con material sin curar en su interior haciendo muy dificultosa su extracción. Al ser un material sin muy buen comportamiento a la fatiga de deformación elástica, finalmente se producirán fisuras en el actuador dejándolo completamente inutilizable (*Figura 12*).



**Figura III. 12.** Primer modelo fabricado con resina elástica 50 A en SLA.

Tras comprobar si es posible el funcionamiento del primer modelo, se comprobó la posibilidad de la fabricación de este modelo para FDM con unos parámetros de impresión iniciales recomendados [33]. Esta primera prueba fue efectuada en el equipo de BQ Witbox 2, obteniendo un resultado desfavorable por los huecos generados por donde fuga el aire comprimido (*Figura 13*).

### III. Experimental

---



**Figura III. 13.** Primer modelo fabricado con filamento Filaflex 70A en FDM.

Para solucionar los problemas de huecos en el actuador se diseñó un modelo más sencillo para poder ser fabricado con facilidad con otras tecnologías de fabricación aditiva. Se procedió con una fabricación simultánea con SLS y FDM dando lugar unos resultados buenos y funcionales (*Figura 14 y 15*).

El actuador fabricado en SLS tiene muy buen detalle. Se comentó en apartado anterior la dificultad de la limpieza del interior de las cámaras del polvo, siendo una dificultad añadida. El problema principal de este proceso la sinterización del polvo no es completamente estanca, provocando micro agujeros por todo el actuador. Por lo que deja completamente descartado este material y fabricación.



**Figura III. 14.** Segundo modelo fabricado con polvo Flexa Grey en SLS.

Mientras el actuador fabricado en FDM tiene una funcionalidad completamente deseada. En esta fabricación del actuador no comenzó la impresión desde la base sino desde uno de sus laterales, facilitando la deposición del material siendo completamente estanco. También hubo un cambio de equipo utilizando Sicnova JCR 600, ya que en la caracterización de las probetas se observó una mejor calidad de deposición del material. En la *Figura 15* se observa la mejora de calidad del actuador fabricado, aunque tiene la funcionalidad deseada se observaron posibles mejoras como una ampliación de las

### III. Experimental

---

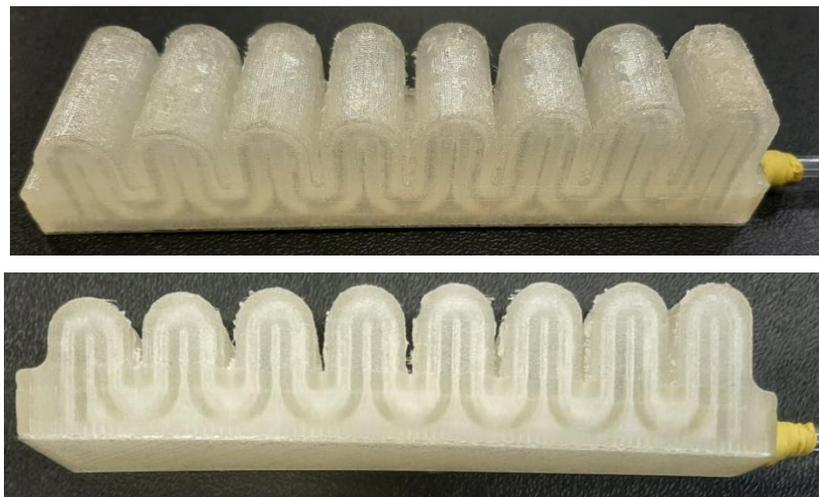
cámaras además de un diseño más cómodo para la adaptación palma, muñeca y antebrazo de una persona[34].

El problema de la fabricación desde uno de los laterales del actuador es la incorporación del material semiconductor, ya que sería una deposición del material en vertical y no en horizontal. Esta disposición hace una estructura lineal con mayor facilidad a la rotura.



*Figura III. 15. Segundo modelo fabricado con filamento Filaflex 70A en FDM.*

Finalmente, tras hacer las modificaciones pensadas para la mejora de comportamiento del actuador se consiguió fabricar un prototipo deseado en los equipos de FDM dando como resultado *Figura 16*. Este actuador tiene una ampliación de las cámaras, pero a la vez un canal de guía recorriendo cada una de ellas como se comentó en el apartado anterior. También se hizo uno de sus extremos más amplio para que pueda adaptarse a la palma de la mano teniendo más superficie para el empuje del actuador cuando este cumpla su funcionamiento.



*Figura III. 16. Modelo final fabricado con filamento Filaflex 70A en FDM.*

### III. Experimental

---

Se ha efectuado un experimental del comportamiento de flexión al introducir presión en el actuador comparando los dos modelos funcionales. Como se muestran en (Figuras 17) se observa que el comportamiento del segundo modelo y del modelo final en pleno funcionamiento. Se han colocado los actuadores en una plantilla cuadrículada para poder observar la inclinación con la misma presión, 23 PSI (1,58 Bar). Dando un resultado de casi 20° de diferencia.



**Figura III. 17.** Comprobación de ángulo de flexión entre los dos tipos de actuadores funcionales.

Se ha observado que el material tiene un comportamiento deseable para el actuador, además de ser lo suficientemente flexible. Pero tras este primer proceso de evaluación del material no conductor, todavía hay que introducir en la superficie plana del actuador el material semiconductor con la geometría óptima para poder obtener los datos de resistencia del actuador en su pleno funcionamiento.

Los parámetros finales de impresión 3D son los siguientes debido a las características empleadas:

### III. Experimental

---

Tabla III. 16. Parámetros de impresión para el demostrador final en el software Simplify.

Parámetros de impresión	FilaFlex 60 A	FilaFlex Conductor
<b>Extrusor</b>		
Diámetro de la boquilla	0,6 mm	0,6 mm
Multiplicador de extrusión	1,2	1,2
Ancho de extrusión	0,6 mm	0,6 mm
Distancia de navegación	2 mm	2 mm
<b>Capa</b>		
Altura de la capa	0,1 mm	0,1 mm
Capas sólidas superiores	5	5
Capas sólidas inferiores	5	5
Contorno/perímetro de capa	2	2
Dirección de contorno	Inside-out	Inside-out
Altura de la primera capa	100%	100%
Ancho de la primera capa	120%	120%
Velocidad de la primera capa	100%	100%
<b>Relleno</b>		
Patrón de relleno interno	Rectilínea	Rectilínea
Patrón de relleno externo	Rectilínea	Rectilínea
Porcentaje de relleno interior	100 %	100 %
Superposición de contornos	120 %	120 %
Ancho de extrusión de relleno	1	1
<b>Temperatura</b>		
Extrusor	230 °C	230°C
Velocidad del ventilador	X	X
<b>Otro</b>		
Velocidad de impresión predeterminada	15 mm/s	15 mm/s
Contorno de baja velocidad	80 %	80%
Bajo velocidad de relleno sólido	100 %	100 %
Velocidad de movimiento del eje X/Y	200 mm/s	200 mm/s
Velocidad de movimiento del eje Z	16,7 mm/s	16,7 mm/s
<b>Avanzado</b>		
Evite cruzar el contorno; factor de desvío	50.0	50.0

Los parámetros de fabricación del actuador, aunque no se han reflejado grandes cambios, muchos de ellos eran imprescindibles para que pueda ser fabricado en FDM. Los parámetros se encuentran relacionados entre ellos, que si se hiciera un cambio en ellos la fabricación no sería satisfactoria.

### III. Experimental

---

En el extrusor encontramos los parámetros de diámetro de boquilla, multiplicador de extrusión y ancho de extrusor. Estos parámetros van ligados ya que el diámetro de boquilla y ancho de extrusor tiene que ser el mismo. El multiplicador de extrusión además de ir ligado a los otros dos parámetros también se debe de tener en cuenta el ancho de las paredes del actuador ya que el mínimo utilizado en el actuador es de 1,2 mm, esto determina las pasadas de la boquilla a dos.

En cuanto a los parámetros de las capas cabe destacar la altura de capa ya que si se aumenta en el proceso de fabricación se formarán micro agujeros por donde escapara el aire. Además, también tiene su importancia las capas solidas inferiores y superiores ya que son las capas que harán de un mejor sellado. La dirección de contorno también tiene su importancia, siendo de dentro hacia fuera su deposición para que no se encuentren fallos en el interior de la capa ya que es crítico que se produzcan fugas en las paredes más estrechas.

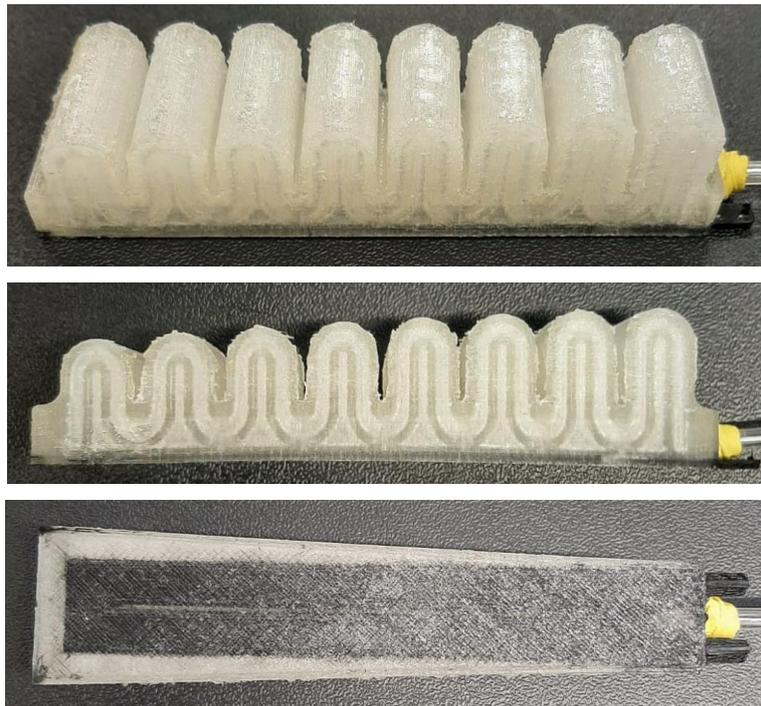
Los parámetros de relleno también tienen su importancia siendo este uno de los más importantes, como el porcentaje de relleno ya que debe de ser 100% para eliminar posibles fugas que se hayan podido generar en los perímetros. Otro importante, es la forma en la que se va a hacer el relleno, siendo en este caso rectilíneo y en cada cambio de capa cambia la orientación en 45°, sellando por completo todo el relleno. Además, otro parámetro es la superposición de contorno, haciendo que la pasada de la boquilla deje un poco más de material para que haya una mejor unión entre sí.

La temperatura y la velocidad de impresión son los dos parámetros más importantes en esta fabricación. Si la temperatura de la boquilla no es la adecuada la deposición del material no será buena. Mientras que si la velocidad a la que se fabrica es demasiado baja en cada capa depositará demasiado material, mientras que si la velocidad es demasiado alta no depositará el suficiente creando fugas, el término medio está en 15 mm/s y 20 mm/s siendo este último el utilizado en actuador final.

Uno factor menos destacable, pero al igual de importante en cuestión a la calidad final del actuador es el factor de desvío. El factor de desvío hace que en una capa cuando tiene que hacer saltos de un lado a otro de la pieza, deba hacer los desplazamientos por dentro de los rellenos de la pieza, esto hace que no haya hilos de retracción por toda la pieza dejando una mejor calidad final. Finalmente se obtuvo como resultado la *Figura 18*.

### III. Experimental

---



*Figura III. 18 Prototipo demostrador completamente funcional con la integración del material conductor.*

Para hacer funcional del demostrador necesitara elementos externos de fabricación, montaje y unas pruebas de funcionamiento que cumpla con el objetivo deseado.

#### **III.2.3. Elementos externos para montaje.**

Los elementos externos para el montaje, aunque son sencillos son primordiales para que produzca el funcionamiento del actuador entre todos ellos se encuentran los siguientes:

Muñequera flexible, tubos neumáticos de 4 mm, cianoacrilato (Loctite), masilla de sellado, tornillos cortos y tuercas de 2,5 mm, válvula de cierre, compresor, cable de conexión, tubo termorretráctil, cola de contacto y velcro.

### III. Experimental

---



*Figura III. 19. Materiales utilizados para el montaje del demostrador de soft robotics.*

#### III.2.3.1. Montaje del prototipo.

Tras la fabricación del actuador se procede al montaje del demostrador y comprobar su funcionamiento real.

Para comenzar hay que conectar el tubo neumático al actuador. Después de muchas pruebas de sellado entre los dos elementos, la mejor solución fue añadir dos adhesivos. Primeramente, el cianoacrilato entre el hueco del actuador y el tubo, esto hace que haya una mejor adhesión entre la masilla de sellado y el TPU sin que se produzcan fugas (*Figura 20*).

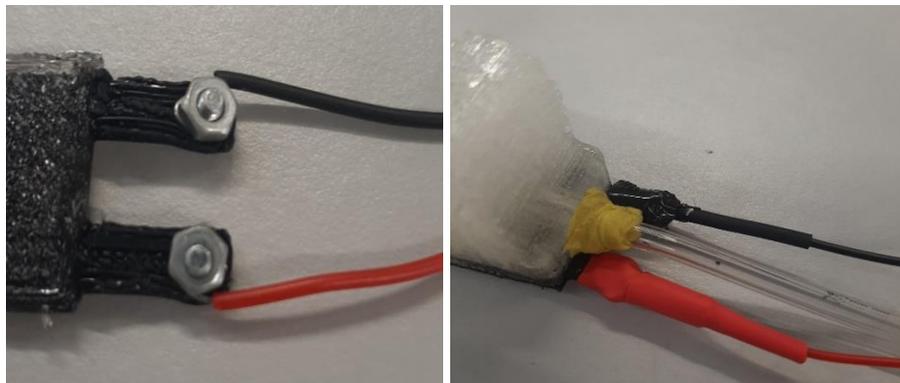
### III. Experimental

---



**Figura III. 20.** Aplicación de cianoacrilato y masilla de sellado para la conexión del actuador y el tubo neumático.

Seguidamente se procede a colocar las conexiones fijas del cableado en el actuador. Para ello se utilizarán dos tornillos y tuercas que se unirán a las patillas que sobresalen del actuador haciendo que el cableado este fijo y siempre mantenga la conexión. Una vez todo bien sujeto se añadirán tubos termoretráctiles en las conexiones para que no se produzcan interferencias (*Figura 21*).



**Figura III. 21.** Colocación y fijación del cableado con el actuador.

Una vez están colocadas todas las conexiones y el actuador está completamente sellado se procede al montaje en la muñequera. Primeramente, para tener una mayor facilidad de acoplamiento se ha pensado en la unión del actuador con la muñequera con velcro. Esto hará que sea más adaptable a cualquier muñeca y la posibilidad de lavado de la muñequera sin los actuadores.

### III. Experimental

---

Para la fijación del velcro con la muñequera se utilizará cola de contacto, siendo una solución muy sencilla y rápida. Tras comprobar que su funcionamiento es correcto se aplicará el mismo método para el actuador y el velcro. Véase en *Figura 22*. Para que la cola de contacto haga su funcionamiento una vez aplicado donde se desea se espera entre 10 y 15 minutos para que se seque. Una vez seca se unen las dos partes donde se ha aplicado la cola y se le aplica presión durante unos minutos, y ya se puede poner en uso.

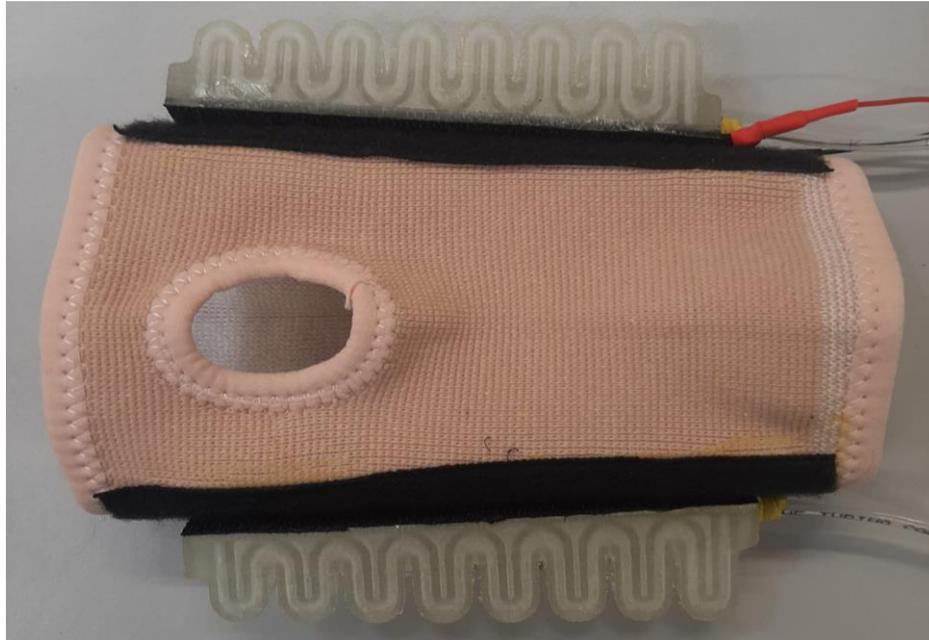


**Figura III. 22.** Unión del velcro con la muñequera y el actuador mediante cola de contacto.

Una vez todos los elementos listos se pueden unir los actuadores a la muñequera dando un resultado final como se muestra en la *Figura 23*. Para su funcionamiento los tubos neumáticos se unirán al compresor con la válvula para poder añadir la presión necesaria en su funcionamiento, *Figura 24*.

### III. Experimental

---



*Figura III. 23. Prototipo demostrador completamente finalizado su montaje.*



*Figura III. 24. Compresor y válvula de cierre para aplicar presión al actuador.*

## III. Experimental

---

### III.2.3.2. Pruebas de campo.

Para finalizar se harán pruebas de funcionamiento con el actuador colocado en una persona física. Se comprobará el funcionamiento de flexión de la muñeca tanto hacia arriba como hacia abajo. Y se observará la resistencia eléctrica del actuador de la parte superior para un posible sensado para el movimiento de flexión.



*Figura III. 25. Demostrador colocado en la muñeca derecha de una persona física.*



*Figura III. 26. Demostrador por la parte superior de la muñeca colocado en una persona física.*

### III. Experimental

---



**Figura III. 27.** Demostrador por la parte inferior de la muñeca colocado en una persona física.

El demostrador se comporta de tal manera que sin que se aplique fuerza en la mano, únicamente dejando la mano en reposo, al introducir presión de aire los actuadores se flexionan acorde al movimiento de la muñeca, como se puede observar en las *Figura 28*.



**Figura III. 28.** Demostrador en funcionamiento.

### III. Experimental

---

Para tener una mejor referencia del movimiento de flexión en pleno uso, se comprobará la inclinación del demostrador ya que al añadir nuevos elementos que oponen resistencia a la flexión, como el velcro de la muñequera y la rigidez de la mano.

Primeramente, se colocó la mano en posición paralela a una cuadrícula y se puso en funcionamiento el actuador para poder observar los grados de flexión estimados con la misma presión de 1.51 Bar. Se puede visualizar que el ángulo de la mano es de aproximadamente de  $30^{\circ}$  para la flexión del actuador de la parte superior (*Figura 29*). Mientras que para el actuador de la parte inferior se observa una flexión de  $20-25^{\circ}$  (*Figura 30*). El recorrido total del demostrador es de un  $50-55^{\circ}$  aproximadamente.



*Figura III. 29. Flexión del del prototipo demostrador del actuador superior.*

### III. Experimental

---



*Figura III. 30. Flexión del del prototipo demostrador del actuador inferior.*

La variación de resistencia también se comprobó dando un resultado similar a los ensayos de resistencia eléctricas de las geometrías en la base del actuador. Como se puede observar en la *Figura 31*, la resistencia aumento considerablemente, pero todavía es posible su sensado. Este cambio de resistencia ha supuesto un cambio de variación, aunque sin llegar a dificultar su sensado. El sensado debería de recalibrarse cada vez que se accionará el movimiento, dado que la recuperación del material semiconductor no será la misma que al inicio por la deformación de la estructura interna del material.

### III. Experimental

---



*Figura III. 31. Demostrador en funcionamiento conectado al multímetro observando la variación de resistencia.*

#### III.2.4. Plan económico.

El plan económico de este prototipo demostrador de rehabilitación de muñeca se ha dividido en dos estudios económicos. El primero en los costes de fabricación de los actuadores y el mantenimiento que conlleva todos los equipos y los materiales utilizados. El segundo consiste en los costes del montaje de prototipo de todos los materiales utilizados y su mano de obra.

##### III.2.4.1. Costes de fabricación.

En los costes de fabricación se van a considerar los costes de material, coste de consumibles y utilización de equipos y costes de mano de obra.

Para la obtención del coste de material se ha utilizado en el software Simplify para saber el tiempo de empleado en la fabricación del actuador y la cantidad de material que se va a utilizar en el proceso. En la *Tabla 17* se puede observar costes de la cantidad de material que se va a utilizar.

### III. Experimental

---

**Tabla III. 17.** Tabla de obtención de costes de materiales para la fabricación.

Material	Precio bobina (€)	€/m	Cantidad de material	
			utilizado (m)	Coste actuador (€)
Fila Flex 70 A	45,86	0,95	19,1428	18,26
Fila Flex Conductive	70,90	1,47	0,7793	1,14
Total	116,76	23,35	19,9221	19,41

Los costes de maquinaria se han calculado a partir del tiempo empleado para la impresión, indicado en el software Simplify. El coste por hora de fabricación es estimado por la empresa colaborada Aimplas.

**Tabla III. 18.** Tabla de coste de máquina para la fabricación de un actuador.

Tiempo de fabricación en FDM	Tiempo en horas	€/hora fabricación	Coste actuador (€)
15h 6 min	15,10	8,00	120,80

También se han estimado los costes de mano de obra de un operario. En estos costes se ha estipulado costes empelados en la generación de archivos de impresión con el software, la preparación de la impresión y costes del postprocesado.

**Tabla III. 19.** Tabla de costes de mano de obra para la fabricación de un actuador.

Operación	Tiempo empleado por el operario	€/hora de operario	Coste actuador (€)
Generación de archivos de fabricación	0,30	66	19,80
Preparación de impresora	0,75	66	49,50
Postprocesado	0,50	66	33,00
Total	1,55		102,30

En los costes anteriores hay que destacar, que se encuentran costes variables y costes únicos, como la preparación del archivo de impresión que únicamente se generaran para la primera fabricación del actuador.

### III. Experimental

---

*Tabla III. 20. Tabla de costes variables y únicos para la fabricación del actuador.*

<b>Coste variable del actuador (€)</b>	209,51
<b>Coste único del actuador (€)</b>	19,80

Por último, se han considerado también los costes en referencia a los consumibles por mantenimiento. Entre ellos el desgaste de la espátula, compra de pegamento, desgastes de boquillas de equipos, acetona, papel, etc. Este coste se ha considerado como un porcentaje del coste variable.

*Tabla III. 21. Tabla de costes de consumibles para la fabricación del actuador.*

<b>Coste variable del actuador (€)</b>	209,51
<b>Costes consumibles (3% costes variables por actuador) (€)</b>	6,28

De este modo se ha obtenido el coste de fabricación de un actuador siendo, de 235.59 €. Si se desea hacer un lote de actuadores en vez de un único actuador únicamente se debe de sumar el coste variable por cada actuador que se deseé (*Tabla 22*). Ya que el coste único solo se efectúa para la primera fabricación.

### III. Experimental

---

*Tabla III. 22. Tabla de coste de lote para la fabricación del actuador.*

<b>Nº de actuadores</b>	<b>Coste (€)</b>
1	235,59 €
2	451,39 €
3	667,18 €
4	882,98 €
5	1.098,77 €
6	1.314,57 €
7	1.530,36 €
8	1.746,16 €
9	1.961,95 €
10	2.177,75 €

#### **III.2.4.2. Costes de montaje.**

En el montaje se contemplan unos costes de materiales y costes de mano de obra del montaje.

Para obtener los costes de los materiales que se han utilizado en el montaje se han sumado todos los materiales que son necesarios para el montaje y su funcionamiento. Cabe destacar que algunos materiales para un solo actuador serán utilizados un trozo o un poco de la cantidad de material que se ha comprado, por eso se procederá a un precio estimado para un único montaje. Se debe destacar que el compresor es un elemento fundamental pero únicamente se considera coste único, a no ser que se desee el conjunto completo.

### III. Experimental

---

**Tabla III. 23.** Tabla de costes de materiales para el montaje.

<b>Material</b>	<b>Precio (€)</b>	<b>Coste (€) /und.</b>
Loctite	7,98	0,11
Masilla de sellado	15,70	0,26
Cola de contacto	7,49	0,15
Velcro	10,99	2,20
Tubo neumático	19,20	0,51
Tornillos y turcas	7,49	0,37
Cable	22,99	0,09
Tubo termorretráctil	8,99	0,02
Muñequera	12,99	12,99
Compresor	39,99	39,99
<b>Total</b>	<b>153,81</b>	<b>56,70</b>

A los costes de montaje se tiene que añadir el coste de mano de obra del montaje del operario, únicamente es el tiempo que se tarda en montar todo más los tiempos de espera de secado de los adhesivos.

**Tabla III. 24.** Tabla de costes de mano de obra para el montaje.

<b>Operación</b>	<b>Tiempo empleado por el operario</b>	<b>€/hora de operario</b>	<b>Coste montaje (€)</b>
Fijación de tubo neumático al actuador	0,30	66	19,80
Colocación de cables en las patillas	0,75	66	49,50
Fijación de cola de pegado para el velcro	1,00	66	66
<b>Total</b>	<b>2,05</b>		<b>135,30</b>

Para finalizar el coste total del montaje se hace la suma de los costes de material del montaje y los costes de mano de obra del montaje teniendo un total de 192.00 €.

### III. Experimental

---

*Tabla III. 25. Tabla de costes totales para el montaje de uno y más demostradores.*

	Montaje de 1 demostrador	Montaje de 2 o más demostradores
<b>Costes materiales del montaje (€)</b>	56,70	16,71
<b>Coste mano de obra del montaje (€)</b>	135,30	135,30
<b>Coste total del montaje (€)</b>	192,00	152,01

#### III.2.4.3. Coste total.

Para concluir el coste final del actuador demostrador de soft robotic, se procede al sumatorio de costes de fabricación y a los costes de montaje (*Tabla 26*). Para saber el coste de un lote de diez unidades se hace el sumatorio de los costes de fabricación y los costes de montaje del coste de la segunda unidad de demostrador. Como se observa en (*Tabla 27*).

*Tabla III. 26. Tabla de costes totales para un demostrador.*

<b>Costes totales de fabricación para demostrador (€)</b>	235,59
<b>Coste total del montaje para demostrador (€)</b>	192,00
<b>Coste total para demostrador (€)</b>	427,59

### III. Experimental

---

*Tabla III. 27. Tabla de coste total para un lote de demostradores.*

<b>Nº de demostradores</b>	<b>Coste (€)</b>
1	427,59 €
2	795,40 €
3	1.163,21 €
4	1.531,01 €
5	1.898,82 €
6	2.266,62 €
7	2.634,43 €
8	3.002,23 €
9	3.370,04 €
10	3.737,84 €

# **IV. CONCLUSIÓN**

# CONCLUSIÓN

## **IV. Conclusiones**

---

## **IV. Conclusiones**

---

### **IV.1. Conclusiones.**

El prototipo demostrador una vez montado y cumpliendo su funcionamiento, se pueden obtener conclusiones de él.

Primeramente, se ha observado las tecnologías de fabricación aditiva y sus posibles resultados para materiales flexibles. Tras observar se destacó la fabricación con FDM, SLA y SLS eran las que mejor resultado iban a dar. Por lo tanto, se hizo una búsqueda de materiales flexibles comerciales para esas tecnologías.

Los materiales utilizados se observaron que el mejor comportamiento para el actuador fueron los filamentos de Recreus (FilaFlex 70 A, FilaFlex 60 A y Filaflex Conductive) para FDM y los materiales propios de las marcas FormLabs y Sinterit, en SLA y SLS respectivamente. Se descartó el FilaFlex 60 A, no por sus propiedades que eran más compatibles para el actuador, sino por la dificultad de fabricación en FDM.

El siguiente paso fue la fabricación de los primeros diseños en las diferentes tecnologías, descartando finalmente SLA y SLS por complicaciones de limpieza, poca resistencia a fatiga y porosidades por donde fuga el aire.

Se hicieron diferentes diseños en FDM, primeramente, comprobando su funcionamiento y más tarde mejorando su flexibilidad con la misma presión, dando un resultado de casi 30° de inclinación de diferencia, llegando así al diseño final en FDM para el material FilaFlex 70 A.

Al diseño final había que incorporarle una geometría con material semiconductor con la mayor variación de resistencia eléctrica posible sin llegar a rigidizar demasiado el actuador. Llegando al resultado de una geometría en forma de "U" de 1 mm de espesor que se introducirá en la base del actuador.

Un inconveniente que se encontró para poder hacer un sensado del actuador es que el material FilaFlex Conductive es una mezcla de TPU aditivado con materiales conductores para que sea semiconductor. Por ello el comportamiento del material con respecto la resistencia eléctrica tiene buena variación.

## **IV. Conclusiones**

---

Para que sea posible el sensado es necesario que cada vez que se introduce presión se deba de recalibrar la resistencia inicial. Esto es debido a que el material en su interior una vez se deforma nunca llega a posicionarse en la misma posición interna, por lo que la resistencia eléctrica siempre estará variando, provocando la dificultad de su sensado.

Tras acabar los procesos de fabricación se procedió al montaje del demostrador, haciendo que sea sencillo. Cabe destacar que la utilización para fijación de los actuadores en la muñequera con velcro facilita una colocación adaptativa a la muñeca de cada persona. Además de la posibilidad de que la muñequera pueda ser lavada tras el uso diario, con facilidad de quitar los actuadores.

Para concluir este prototipo demostrador en soft robotics ha demostrado que las tecnologías de fabricación aditiva están teniendo un gran avance en la industria, ayudado en fabricación de objetos más personalizables y con propuestas diferentes. Todavía queda dar algún paso más. Esta tecnología tiene limitaciones en fabricación y materiales, pero cada vez está más cerca de ser indispensable en todos los sectores. Cada día hay más investigaciones de nuevos materiales y sus posibles procesamientos con esta tecnología que hará todo más eficiente y sencillo.

El demostrador cumple con las expectativas deseadas, aunque en hay una gran mejoría con respecto la adaptabilidad de movimientos para sea más fluidos para la ayuda de la movilidad de los actuadores en respecto al sector médico de la rehabilitación. Entre las que cabría destacar un diseño menos rígido y adaptativo, además de la incorporación de nuevos materiales semiconductores más estables internamente para sea más sencillo sensar.

### Referencias

- [1].Marcillo, K., Mero, E., & Ortiz M. (2021). *Impresión 3D como eje de desarrollo en la industria 4.0*.
- [2].3Dnatives. *Impresión 3D e impresoras 3D: Noticias, Comparativas, Mejor precio*. . . <https://www.3dnatives.com/es/>
- [3].Zahera, M., & Fundación Cotec (2012). *La fabricación aditiva, tecnología avanzada para el diseño y desarrollo de productos*. XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos, Valencia.
- [4].Mohamed, O. A., Masood, S. H., & Bhowmik, J. L. (2015). Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. *Advances in Manufacturing*, 3(1), 42–53. <https://doi.org/10.1007/s40436-014-0097-7>
- [5].Schmidleithner, C., & Kalaskar, D. M. (2018). Stereolithography. *3D Printing*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.78147>
- [6].Kadry, H., Wadnap, S., Xu, C., & Ahsan, F. (2019). Digital light processing (DLP) 3D-printing technology and photoreactive polymers in fabrication of modified-release tablets. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 135, 60–67. <https://doi.org/10.1016/j.ejps.2019.05.008>
- [7].Gueche, Y. A., Sanchez-Ballester, N. M., Cailleaux, S., Bataille, B., & Soulairol, I. (2021). Selective Laser Sintering (SLS), a New Chapter in the Production of Solid Oral Forms (SOFs) by 3D Printing. *Pharmaceutics*, 13(8), 1212. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13081212>
- [8].Razavykia, A., Brusa, E., Delprete, C., & Yavari, R. (2020). An Overview of Additive Manufacturing Technologies—A Review to Technical Synthesis in Numerical Study of Selective Laser Melting. *Materials*, 13(17), 3895. <https://doi.org/10.3390/ma13173895>
- [9].Zhang, L., Liu, Y., Li, S., & Hao, Y. (2017). Additive Manufacturing of Titanium Alloys by Electron Beam Melting: A Review. *Advanced Engineering Materials*, 20(5), 1700842. <https://doi.org/10.1002/adem.201700842>
- [10].Dermeik, B., & Travitzky, N. (2020). Laminated Object Manufacturing of Ceramic-Based Materials. *Advanced Engineering Materials*, 22(9), 2000256. <https://doi.org/10.1002/adem.202000256>
- [11].Ziaee, M., & Crane, N. B. (2019). Binder jetting: A review of process, materials, and methods. *Additive Manufacturing*, 28, 781–801. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.031>
- [12].Chung, C., Chen, Y. J., Chen, P. C., & Chen, C. Y. (2015). Fabrication of PDMS passive micromixer by lost-wax casting. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 16(9), 2033–2039. <https://doi.org/10.1007/s12541-015-0264-1>
- [13].*3D Technology Platform*. (2020, 15 septiembre). Organovo, Inc. <https://organovo.com/technology-platform/>

## REFERENCIAS

---

- [14].Giannatsis, J., & Dedoussis, V. (2007). Additive fabrication technologies applied to medicine and health care: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40(1–2), 116–127. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1308-1>
- [15].C., L. (2020, 20 febrero). *3Dirigo, el barco impreso en 3D más grande del mundo*. 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/3dirigo-barco-impreso-en-3d-181020192/>
- [16].C., L. (2018, 18 enero). *Videos 3D: Coches impresos en 3D, el futuro de la carretera*. 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/videos-coches-impresos-en-3d-210120182/>
- [17].M., A. (2021, 22 julio). *El puente de metal impreso en 3D por MX3D ya se ha instalado en el centro de Ámsterdam*. 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/puente-3d-metal-amsterdam-260720212/>
- [18].G., M. (2022, 21 abril). *¡Descubre los mejores proyectos de impresión 3D para una colonización espacial!* 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-para-colonizar-el-espacio-210420222/>
- [19].C., L. (2020b, julio 17). *Las aplicaciones de la impresión 3D en el mundo de la moda*. 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-en-la-moda-150620172/>
- [20].C., L. (2021, 8 octubre). *Chocolates impresos en 3D con formas únicas*. 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/chocolates-impresos-en-3d-011120182/>
- [21].C., L. (2021b, octubre 8). *Fick, las zapatillas impresas en 3D creadas en España*. 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/fick-zapatillas-impresas-3d-051220182/>
- [22].Gorissen, B., Reynaerts, D., Konishi, S., Yoshida, K., Kim, J. W., & de Volder, M. (2017). Elastic Inflatable Actuators for Soft Robotic Applications. *Advanced Materials*, 29(43), 1604977. <https://doi.org/10.1002/adma.201604977>
- [23].Rus, D., & Tolley, M. T. (2015). Design, fabrication and control of soft robots. *Nature*, 521(7553), 467–475. <https://doi.org/10.1038/nature14543>
- [24].Cianchetti, M., Laschi, C., Menciassi, A., & Dario, P. (2018). Biomedical applications of soft robotics. *Nature Reviews Materials*, 3(6), 143–153. <https://doi.org/10.1038/s41578-018-0022-y>
- [25].Manns, M., Morales, J., & Frohn, P. (2018). Additive manufacturing of silicon based PneuNets as soft robotic actuators. *Procedia CIRP*, 72, 328–333. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.186>
- [26].Rogóż, M., Zeng, H., Xuan, C., Wiersma, D. S., & Wasylczyk, P. (2016). Light-Driven Soft Robot Mimics Caterpillar Locomotion in Natural Scale. *Advanced Optical Materials*, 4(11), 1689–1694. <https://doi.org/10.1002/adom.201600503>
- [27].Youn, J. H., Jeong, S. M., Hwang, G., Kim, H., Hyeon, K., Park, J., & Kyung, K. U. (2020). Dielectric Elastomer Actuator for Soft Robotics Applications and Challenges. *Applied Sciences*, 10(2), 640. <https://doi.org/10.3390/app10020640>

## REFERENCIAS

---

- [28].Wehner, M., Truby, R. L., Fitzgerald, D. J., Mosadegh, B., Whitesides, G. M., Lewis, J. A., & Wood, R. J. (2016). An integrated design and fabrication strategy for entirely soft, autonomous robots. *Nature*, 536(7617), 451–455. <https://doi.org/10.1038/nature19100>
- [29].Salvà, G. (2013). Valoración de la discapacidad en las lesiones de muñeca. *Medicina Balear*, 28(3), 15–23.
- [30].Guisasola Lerma, E., & Lucas Garcia, F. J. (2019). Tratamiento rehabilitador en las inestabilidades mediocarpianas palmares. *Revista Iberoamericana de Cirugía de la Mano*, 47(02), 124–130. <https://doi.org/10.1055/s-0039-3399517>
- [31].Maciejasz, P., Eschweiler, J., Gerlach-Hahn, K., Jansen-Troy, A., & Leonhardt, S. (2014). A survey on robotic devices for upper limb rehabilitation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/1743-0003-11-3>
- [32].Tawk, C., in het Panhuis, M., Spinks, G. M., & Alici, G. (2018). Bioinspired 3D Printable Soft Vacuum Actuators for Locomotion Robots, Grippers and Artificial Muscles. *Soft Robotics*, 5(6), 685–694. <https://doi.org/10.1089/soro.2018.0021>
- [33].Yap, H. K., Ng, H. Y., & Yeow, C. H. (2016). High-Force Soft Printable Pneumatics for Soft Robotic Applications. *Soft Robotics*, 3(3), 144–158. <https://doi.org/10.1089/soro.2016.0030>
- [34].Liu, S., Fang, Z., Liu, J., Tang, K., Luo, J., Yi, J., Hu, X., & Wang, Z. (2021). A Compact Soft Robotic Wrist Brace with Origami Actuators. *Frontiers in Robotics and AI*, 8. <https://doi.org/10.3389/frobt.2021.614623>
- [35].Benjamin, W. K., & Chen-Hua Yeow. (2019). Design and Characterization of a 3D Printed Soft Robotic Wrist Sleeve with 2 DoF for Stroke Rehabilitation\*. *2nd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, 577–582.

## Anexos



### TECHNICAL DATA SHEET

#### FILAFLEX 70A ULTRA-SOFT

##### Description

Filaflex is a Thermoplastic Polyether-Polyurethane elastomer with additives that allow high printability in FDM printers. Filaflex® has a remarkable abrasion resistance, higher tolerance to hydrolysis failure, high resistance to bacteria and

Physical properties	Value	Unit	Test method according to
Material density	1.08	g/cm <sup>3</sup>	DIN EN ISO 1183-1-A

Mechanical properties	Value	Unit	Test method according to
Hardness	70	Shore A	DIN ISO 7619-1 (3s)
Tensile strength	32	MPa	DIN 53504-S2
Elongation at break	900	%	DIN 53504-S2
Stress at 20% elongation	1.7	MPa	DIN 53504-S2
Stress at 100% elongation	3.6	MPa	DIN 53504-S2
Stress at 300% elongation	6.6	MPa	DIN 53504-S2
Tear strength	47	N/mm	DIN ISO 34-1Bb
Abrasion loss	46	mm <sup>3</sup>	DIN ISO 4649-A
Compression set 23°C / 72 hours	22	%	DIN ISO 815
Compression set 70°C / 24 hours	39	%	DIN ISO 815
Tensile strength after storage in water at 80°C for 42 days	20	MPa	DIN 53504-S2
Elongation at break after storage in water at 80°C for 42 days	900	%	DIN 53504-S2
Notched impact strength (Charpy) at +23°C	nb	kJ/m <sup>2</sup>	DIN EN ISO 179-1

Printing properties	Recommended
Printing temperatures	215 - 235°C
Printing speed	20 - 40 mm/s
Hot-bed temperature	0-40°C
Optimal layer height	0.2 mm
Minimal nozzle diameter	0.4 mm or higher
Retraction parameters	3.5 - 6.5 mm (speed 20 - 160 mm/s)

RECREUS INDUSTRIES S.L. VAT: ESB54876479  
C/Ei Envelope, F13-F14, Pol. Ind. Finca Lacy  
03600, Elda (Alicante) - SPAIN

(0034) 865 777 966  
info@recreus.com  
www.recreus.com

RECREUS INDUSTRIES S.L. Safety Data Sheet according to Regulation (EC) No. 1907/2006 as amended from time to time.  
Date / Revised: 02.12.20 (REF: 16.04.2018)  
Product: Filaflex 70A Ultra-Soft



## TECHNICAL DATA SHEET

### FILAFLEX 70A ULTRA-SOFT

#### Description

Filaflex is a Thermoplastic Polyether-Polyurethane elastomer with additives that allow high printability in FDM printers. Filaflex® has a remarkable abrasion resistance, higher tolerance to hydrolysis failure, high resistance to bacteria and

Physical properties	Value	Unit	Test method according to
Material density	1.08	g/cm <sup>3</sup>	DIN EN ISO 1183-1-A

Mechanical properties	Value	Unit	Test method according to
Hardness	70	Shore A	DIN ISO 7619-1 (3s)
Tensile strength	32	MPa	DIN 53504-S2
Elongation at break	900	%	DIN 53504-S2
Stress at 20% elongation	1.7	MPa	DIN 53504-S2
Stress at 100% elongation	3.6	MPa	DIN 53504-S2
Stress at 300% elongation	6.6	MPa	DIN 53504-S2
Tear strength	47	N/mm	DIN ISO 34-1Bb
Abrasion loss	46	mm <sup>3</sup>	DIN ISO 4649-A
Compression set 23°C / 72 hours	22	%	DIN ISO 815
Compression set 70°C / 24 hours	39	%	DIN ISO 815
Tensile strength after storage in water at 80°C for 42 days	20	MPa	DIN 53504-S2
Elongation at break after storage in water at 80°C for 42 days	900	%	DIN 53504-S2
Notched impact strength (Charpy) at +23°C	nb	kJ/m <sup>2</sup>	DIN EN ISO 179-1

Printing properties	Recommended
Printing temperatures	215 - 235°C
Printing speed	20 - 40 mm/s
Hot-bed temperature	0-40°C
Optimal layer height	0.2 mm
Minimal nozzle diameter	0.4 mm or higher
Retraction parameters	3.5 - 6.5 mm (speed 20 - 160 mm/s)

RECREUS INDUSTRIES S.L. VAT: ESB54876479  
C/El Envelope, F13-F14, Pol. Ind. Finca Lacy  
03600, Elda (Alicante) - SPAIN

(0034) 865 777 966  
info@recreus.com  
www.recreus.com

RECREUS INDUSTRIES S.L. Safety Data Sheet according to Regulation (EC) No. 1907/2006 as amended from time to time.  
Date / Revised: 02.12.20 (REF: 16.04.2018)  
Product: Filaflex 70A Ultra-Soft



## TECHNICAL DATA SHEET

### CONDUCTIVE FILAFLEX

#### Description

CONDUCTIVE FILAFLEX is a Thermoplastic Polyurethane elastomer electrically conductive which makes it suitable for wearable devices and other flexible electronics applications.

Physical properties	Value	Unit	Test method according to
---------------------	-------	------	--------------------------

<u>Material density</u>	1.35	g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183
-------------------------	------	-------------------	----------

Mechanical properties	Value	Unit	Test method according to
-----------------------	-------	------	--------------------------

<u>Hardness</u>	92	Shore A	DIN 53505 – ISO 868
-----------------	----	---------	---------------------

<u>Tensile modulus (Young)</u>	90	MPa	ISO 527
--------------------------------	----	-----	---------

<u>Notched impact strength (Charpy) at +23°C</u>	NB	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179
--	----	-------------------	---------

<u>Elongation at break</u>	>100	%	ISO 527
----------------------------	------	---	---------

Electrical properties	Value	Unit	Test method according to
-----------------------	-------	------	--------------------------

<u>Electrical Resistivity surface</u>	<1E1	ohm	ASTM D 257
---------------------------------------	------	-----	------------

<u>Electrical Resistivity</u>	3.9	Ω-cm	Approx.
-------------------------------	-----	------	---------

Printing properties	Recommended
---------------------	-------------

<u>Printing temperatures</u>	245-250°C
------------------------------	-----------

<u>Printing speed</u>	20 mm/s
-----------------------	---------

<u>Hot-bed temperature</u>	50-60°C
----------------------------	---------

<u>Retractions</u>	2-3 mm/s to 40 mm/s
--------------------	---------------------

**Printing speed** should be lower as recommended to get a perfect printing. After each change of material the extruder must be cleaned.

The information provided here is for reference only because the raw materials are from different sources. We request that customers inspect and test our products before using them to satisfy themselves as to contents and suitability.

RECREUS INDUSTRIES S.L. VAT: ESB54876479  
C/El Envelope, F13-F14, Pol. Ind. Finca Lacy  
03600, Elda (Alicante) - SPAIN

(0034) 865 777 966  
info@recreus.com  
www.recreus.com

RECREUS INDUSTRIES S.L. Safety Data Sheet according to Regulation (EC) No.1907/2006 as amended from time to time.  
Date / Revised: 15.01.2018  
Product: Conductive Filaflex

### FICHA DE DATOS DEL MATERIAL

# Elastic 50A

## Elastic 50A Resin para piezas blandas y flexibles

Este material de dureza Shore 50A es nuestra resina para ingeniería más blanda, adecuada para realizar prototipos fabricados normalmente con silicona. Elige Elastic 50A Resin para piezas que deban doblarse, estirarse, comprimirse y resistir una gran cantidad de ciclos sin desgarrarse.

Prototipos de tecnología ponible  
y bienes de consumo

Objetos y maquetas para efectos especiales

Características compatibles  
para robótica

Modelos y dispositivos médicos



FLELCL01

formlabs 

Redactado 07/ 01/ 2019  
Rev 01 07/ 01/ 2019

A nuestro saber y entender, la información contenida en este documento es precisa. No obstante, Formlabs Inc. no ofrece ninguna garantía, expresa o implícita, con respecto a la exactitud de los resultados derivados del uso de estos productos.



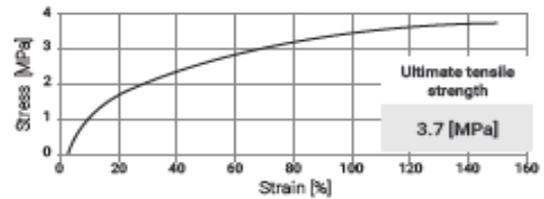
## Flexa Grey

Functional flexibility

Flexible prints with increased extensibility | Adjustable hardness | 100% reusable



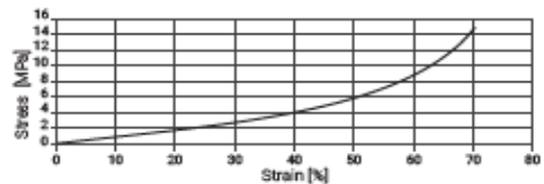
### Tensile testing



While the tensile stress does not exceed 1.8 [MPa], after load release, the test specimens retain their shape, with no external damage observed (e.g. fractures). The test specimens fracture when max tensile stress of 3.7 [MPa] is applied.



### Compression testing



While the compressive stress does not exceed 3.5 [MPa], after load release, the test specimens retain their shape, with no external damage observed (e.g. fractures).

After applying max compressive stress of 14.65 [MPa] and releasing the compressive load, the test specimens irreversibly change their volume from: 14.50 [mm] x 14.50 [mm] x 15.30 [mm] to: 14.85 [mm] x 14.85 [mm] x 14.85 [mm].



General information	Method
Material type	TPU
Granulation	20 - 105 [µm]
Color	Grey
Material refreshing ratio <sup>1</sup>	0 [%]
Compatible with <sup>2</sup>	Lisa & Lisa Pro

Parameters		
Tensile Strength	3.7 [MPa]	PN-EN ISO 37:2007
Elongation at Break	136 [%]	PN-EN ISO 37:2007
Shore hardness in type A scale	70 / 90 <sup>3</sup>	PN-EN ISO 868:2005

Thermal properties		
Softening point (Vicat method type A50)	67.6 [°C]	PN-EN ISO 306:2014-02
Melting point	160 [°C]	Internal procedure
Printout density	0.74 [g/cm³]	PN-EN ISO 845:2010
Printout water absorption	9.1 [%]	PN-EN ISO 62:2008

### Applications

Easy elastic parts, vibration dampers, general prototyping of elastic parts.

### Functions

Easy to process rubber, adjustable hardness (set up in Sinterit Studio).

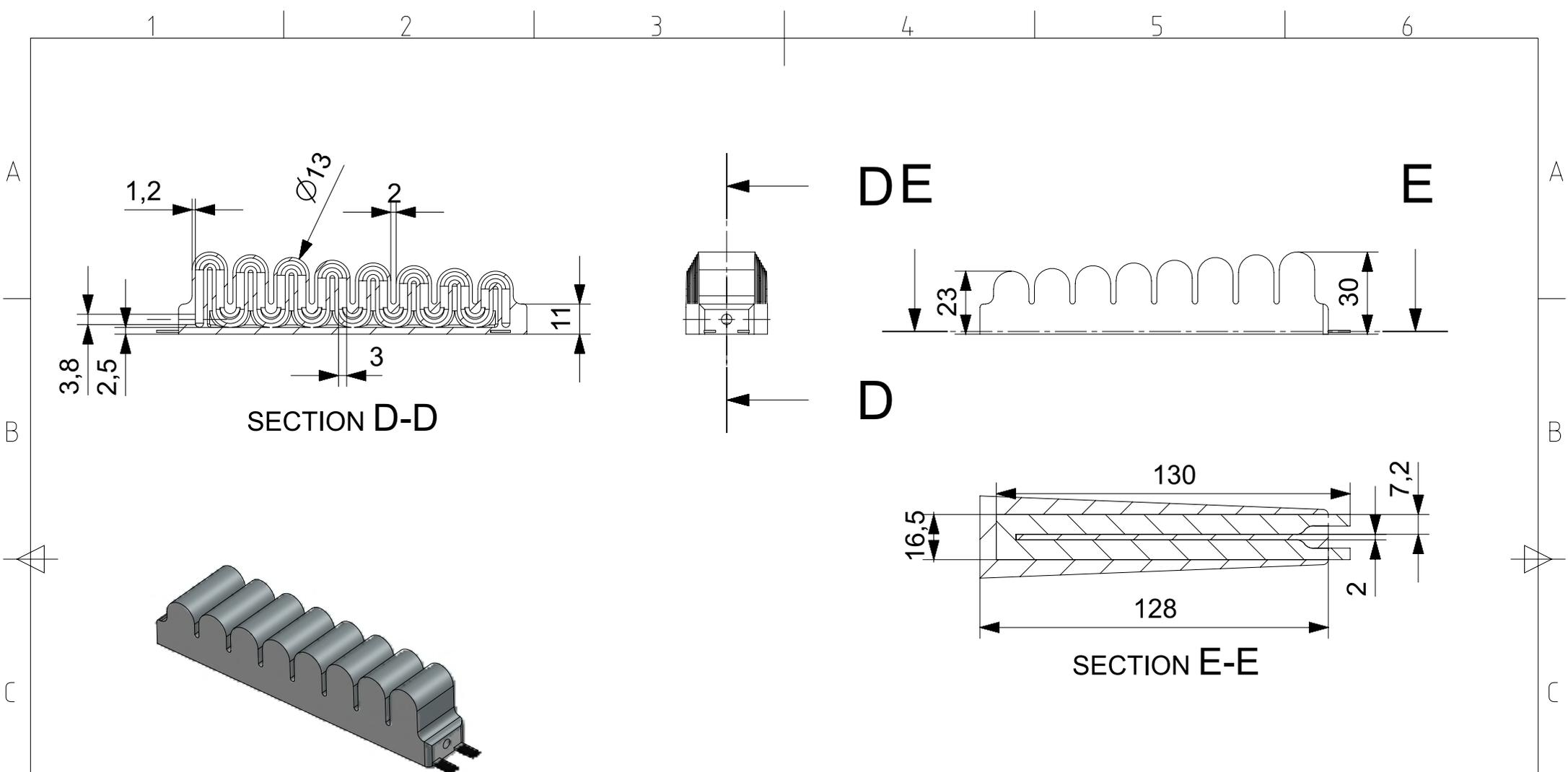
<sup>1</sup> Material refreshing ratio - percent of Fresh powder which has to be mixed with Used (unsintered) powder - to be reused during next print.

FLEXA has 100 [%] of usability. Although to keep the parameters of printouts as high as it is possible, we recommend adding 10% of fresh powder each time.

<sup>2</sup> Available as part of the appropriate profile purchased.

<sup>3</sup> Depending on printing settings.

Information provided within this document are average values for reference and comparison only. Parameters presented in this specification are subject to change. Final part properties may vary based on printed part design and print orientation.



	FECHA	NOMBRE	TITULO		REFERENCIA		
DIBUJADO	00/00/00	Alejandro	Actuador muñeca conductor		000-000		
COMPROBADO	00/00/00	--	DESCRIPCION		REVISION	HOJA	
APROBADO	00/00/00	--			V1	1/1	
	DIN A4	ESCALA 1:2	UNIDADES mm	MATERIAL			
		OBSERVACIONES --				PESO (PZA.)	