



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

**FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE
MANO DE BAJO COSTE**

Autor:

Alonso Carrión, Mónica

Tutor:

**Magdaleno Martín, Jesús
Departamento: Construcciones
Arquitectónicas, I.T. y M.M.C. y
Teoría de Estructuras**

Valladolid, Julio 2018.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres que son quienes han hecho posible que hoy este finalizando mis estudios, gracias por todo el apoyo, esfuerzo y cariño.

A mis hermanos, por toda su ayuda tanto en la carrera como fuera de ella, por confiar siempre en mí y enseñarme a hacerlo yo.

A mis sobrinos, por alegrarme siempre que estoy con ellos y ser la mejor distracción.

A mis cuñadas, por estar siempre ahí.

A mi tutor, Jesús Magdaleno, por todo su apoyo y orientación durante la elaboración del trabajo fin de grado.

A la empresa Newgentechs, por la ayuda que me han ofrecido y por brindarme sus servicios e instalaciones.

A mis amigas, por todos los buenos momentos vividos juntas.

RESUMEN

En el presente proyecto se aborda el estudio de un primer prototipo de prótesis de mano de bajo coste desarrollada con fabricación aditiva.

Para llevar a cabo este proyecto, se realiza en primer lugar, un análisis de la fabricación aditiva, así como un estudio de la mano humana y sus movimientos evaluando las prótesis mecánicas desarrolladas con fabricación aditiva.

A continuación, se lleva a cabo el diseño de la prótesis a través de un programa de CAD. Para validarlo se realiza una simulación por elementos finitos para conocer el comportamiento de la prótesis. Asimismo, se hará un análisis de la fabricación en términos de costes.

Posteriormente, se realiza un ensayo de tracción para caracterizar el material y tras los resultados obtenidos se analizó su microestructura.

Por último, se realiza un estudio económico de la prótesis, finalizando el proyecto plasmando las conclusiones obtenidas y las futuras líneas de trabajo.

PALABRAS CLAVE:

Fabricación aditiva, prótesis, PLA, impresión 3D, diseño

ABSTRACT

This project deals with the study of a first prototype of low-cost hand prosthesis developed with additive manufacturing.

In order to get this project, an analysis of the additive manufacture is carried out first of all, as well as a study of the human hand and its movements evaluating the mechanical prostheses developed with additive manufacture.

The design of the prosthesis has been done by a CAD program. To validate it, a finite element simulation is used to know the behaviour of the prosthesis. An analysis of manufacturing in terms of costs will also be made.

Subsequently, a tensile test is performed to characterize the material and after the results obtained, its microstructure is analyzed.

Finally, an economic study of the prosthesis is described and the project is completed, setting out the conclusions obtained and the future lines of work.

KEYWORDS:

Additive manufacturing, prosthetics, PLA, 3D printing, design

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE FABRICACIÓN ADITIVA SEGÚN LA FORMA DE MATERIAL BASE	7
FIGURA 2. ESQUEMA REPRESENTATIVO DEL PROCESO FFF ^[5]	8
FIGURA 3. ESQUEMA REPRESENTATIVO DEL PROCESO LOM ^[5]	9
FIGURA 4. ESQUEMA REPRESENTATIVO DE LOS PROCESOS SLS/DMLS/SLM ^[7]	11
FIGURA 5. ESQUEMA REPRESENTATIVO DEL PROCESO EBM ^[7]	11
FIGURA 6. ESQUEMA REPRESENTATIVO DEL PROCESO SLA ^[7]	13
FIGURA 7. ESQUEMA REPRESENTATIVO DEL PROCESO DLP ^[7]	13
FIGURA 8. ESQUEMA REPRESENTATIVO DEL PROCESO MJP ^[7]	14
FIGURA 9. ALTURA DE CAPA MENOR QUE EL DIÁMETRO DEL NOZZLE ^[9]	18
FIGURA 10. ALTURA DE CAPA IGUAL QUE EL DIÁMETRO DEL NOZZLE ^[9]	18
FIGURA 11. ALTURA DE CAPA MAYOR QUE EL DIÁMETRO DEL NOZZLE ^[9]	18
FIGURA 12. ESTRUCTURA ÓSEA DE LA MANO ^[14]	29
FIGURA 13. ARTICULACIONES DE LA MANO ^[12]	29
FIGURA 14. MOVIMIENTOS DE LA MUÑECA ^[13]	30
FIGURA 15. MOVIMIENTOS DE LAS ARTICULACIONES METACARPOFALÁNGICAS ^[14]	31
FIGURA 16. MOVIMIENTOS DE LAS ARTICULACIONES INTERFALÁNGICAS PROXIMALES ^[14]	31
FIGURA 17. MOVIMIENTOS DE LAS ARTICULACIONES INTERFALÁNGICAS PROXIMALES ^[14]	32
FIGURA 18. MOVIMIENTO DE LA ARTICULACIÓN METACARPOFALÁNGICA ^[15]	32
FIGURA 19. MOVIMIENTO DE LA ARTICULACIÓN INTERFALÁNGICA ^[15]	33
FIGURA 20. MOVIMIENTO DE LA ARTICULACIÓN CARPOMETACARPAL ^[15]	33
FIGURA 21. PRÓTESIS RAPTOR HAND, SUPERFICIE EXTERNA (A) E INTERNA (B) ^[16]	34
FIGURA 22. PRÓTESIS RAPTOR RELOADED ^[16]	35
FIGURA 23. PRÓTESIS CYBORG BEAST SUPERFICIE EXTERNA (A) E INTERNA (B) ^[16]	36
FIGURA 24. PRÓTESIS TALON HAND 2.0 ^[16]	37
FIGURA 25. PRÓTESIS ODDYSSEUS HAND SUPERFICIE EXTERNA (A) E INTERNA (B) ^[16]	38
FIGURA 26. PRÓTESIS FLEXY HAND, SUPERFICIE EXTERNA (A) E INTERNA (B) ^[16]	39
FIGURA 27. PRÓTESIS DEXTRUS ^[17]	40
FIGURA 28. PRÓTESIS ENSAMBLADA	41
FIGURA 29. VISTA LATERAL FALANGE 1ª	42
FIGURA 30. VISTA ISOMÉTRICA FALANGE 1ª	42
FIGURA 31. VISTA LATERAL FALANGE 2ª-3ª	43
FIGURA 32. VISTAS ISOMÉTRICAS PARTE FRONTAL Y TRASERA FALANGE 2ª-3ª	43
FIGURA 33. VISTA LATERAL FALANGE 1ª DEL PULGAR	44
FIGURA 34. VISTA ISOMÉTRICA FALANGE 1ª DEL PULGAR	44
FIGURA 35. VISTA LATERAL FALANGE 2ª-3ª DEL PULGAR	45
FIGURA 36. VISTAS ISOMÉTRICAS PARTE FRONTAL Y TRASERA FALANGE 2ª-3ª DEL PULGAR	45
FIGURA 37. VISTA LATERAL PALMA DE LA MANO	46
FIGURA 38. VISTA FRONTAL PALMA DE LA MANO	46
FIGURA 39. VISTA INFERIOR PALMA DE LA MANO	47
FIGURA 40. VISTA ISOMÉTRICA PALMA DE LA MANO	47
FIGURA 41. VISTA ISOMÉTRICA DEL ENCAJE	48
FIGURA 42. VISTA ISOMÉTRICA DE LOS TENSORES	49
FIGURA 43. VISTA APOYOS CASO ESTUDIO N°1	50
FIGURA 44. VISTA APLICACIÓN DE LA CARGA	51
FIGURA 45. DESPLAZAMIENTOS CASO ESTUDIO N°1	51

FIGURA 46. TENSIONES VON MISES CASO ESTUDIO N°1.....	52
FIGURA 47. DESPLAZAMIENTOS CASO ESTUDIO N°1 MALLA REFINADA	52
FIGURA 48. TENSIONES VON MISES CASO ESTUDIO N°1 MALLA REFINADA	53
FIGURA 49. VISTA APOYOS CASO ESTUDIO N°2	54
FIGURA 50. VISTA APLICACIÓN DE LA CARGA.....	55
FIGURA 51. DESPLAZAMIENTOS CASO ESTUDIO N°2	56
FIGURA 52. TENSIONES VON MISES CASO ESTUDIO N°2	56
FIGURA 53. DESPLAZAMIENTOS CASO ESTUDIO N°2 MALLA REFINADA	57
FIGURA 54. TENSIONES VON MISES CASO ESTUDIO N°2 MALLA REFINADA	57
FIGURA 55. DIFERENTES POSICIONES DE IMPRESIÓN DE LA FALANGE 1ª	62
FIGURA 56. DIFERENTES POSICIONES DE IMPRESIÓN DE LA FALANGE 2ª-3ª	63
FIGURA 57. DIFERENTES POSICIONES DE IMPRESIÓN DE LA FALANGE 1ª DEL PULGAR	63
FIGURA 58. DIFERENTES POSICIONES DE IMPRESIÓN DE LA FALANGE 2ª-3ª DEL PULGAR.....	64
FIGURA 59. DIFERENTES POSICIONES DE IMPRESIÓN DE LA PALMA DE LA MANO.....	65
FIGURA 60. DIFERENTES POSICIONES DE IMPRESIÓN DEL ENCAJE	65
FIGURA 61. DIFERENTES POSICIONES DE IMPRESIÓN DE LOS TENSORES	66
FIGURA 62. PROBLEMAS PROCESO DE EXTENSIÓN	68
FIGURA 63. RESOLUCIÓN PROBLEMAS DEL PROCESO DE EXTENSIÓN	68
FIGURA 64. COMPARACIÓN FALANGES CONFIGURACIÓN INICIAL Y FINAL.....	69
FIGURA 65. MONTAJE FALANGES.....	69
FIGURA 66. MONTAJE PALMA, ENCAJE Y TENSORES.....	70
FIGURA 67. MONTAJE CABLE DE EXTENSIÓN (A) Y CABLE DE FLEXIÓN (B).....	70
FIGURA 68. PRÓTESIS ENSAMBLADA.....	71
FIGURA 69. GEOMETRÍA DE LA PROBETA SEGÚN LA NORMA UNE-EN ISO 527-2:2012 ^[21]	75
FIGURA 70. PROBETA N°1	75
FIGURA 71 PROBETA N°2	75
FIGURA 72. FACTOR "K _T " DE CONCENTRACIÓN DE TENSIONES PARA PLACA RECTANGULAR CON ENTALLA. CARGA AXIAL ^[22]	76
FIGURA 73. GEOMETRÍA DE LA PROBETA SEGÚN LA NORMA ASTM D638 ^[23]	76
FIGURA 74. PROBETA N°3	77
FIGURA 75. PROBETA N°4	77
FIGURA 76. PROBETA N° 5	77
FIGURA 77. SECCIÓN PROBETA N°1 TRAS SER ENSAYADA	78
FIGURA 78. VISTA SUPERIOR DE LA CURVA DE TRANSICIÓN DE LA PROBETA N°1	79
FIGURA 79. SECCIÓN PROBETA N°2 TRAS SER ENSAYADA	80
FIGURA 80. VISTA SUPERIOR DE LA CURVA DE TRANSICIÓN DE LA PROBETA N°2	80
FIGURA 81. SECCIÓN PROBETA N°3 TRAS SER ENSAYADA, (A) CAPAS INFERIORES, (B) CAPAS SUPERIORES	81
FIGURA 82. SECCIÓN PROBETA N° 4 TRAS SER ENSAYADA	82
FIGURA 83. SECCIÓN PROBETA N°5 TRAS SER ENSAYADA	83
FIGURA 84. ESQUEMA DE GASTOS ASOCIADOS AL COSTE DE UNA MANO PROTÉSICA DE BAJO COSTE.....	86
FIGURA 85. DISTRIBUCIÓN DE COSTES DIRECTOS	89
FIGURA 86. DISTRIBUCIÓN DE COSTES INDIRECTOS.....	90

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. PROPIEDADES FILAMENTOS IMPRESIÓN FFF	28
TABLA 2. CARACTERÍSTICAS DEL PLA	49
TABLA 3. CARACTERÍSTICAS DEL ACERO INOXIDABLE	50
TABLA 4. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA IMPRESORA ULTIMAKER 3 ^[19]	59
TABLA 5. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL MATERIAL PROPORCIONADAS POR EL FABRICANTE ^[19]	60
TABLA 6. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL MATERIAL PROPORCIONADAS POR EL FABRICANTE ^[19]	60
TABLA 7. DIFERENCIAS PERFILES DEL SOFTWARE CURA	61
TABLA 8. CARACTERÍSTICAS DE LAS POSICIONES DE IMPRESIÓN DE LA FALANGE 1ª	62
TABLA 9. CARACTERÍSTICAS DE LAS POSICIONES DE IMPRESIÓN DE LA FALANGE 2ª-3ª	63
TABLA 10. CARACTERÍSTICAS DE LAS POSICIONES DE IMPRESIÓN DE LA FALANGE 1ª DEL PULGAR	64
TABLA 11. CARACTERÍSTICAS DE LAS POSICIONES DE IMPRESIÓN DE LA FALANGE 2ª-3ª DEL PULGAR	64
TABLA 12. CARACTERÍSTICAS DE LAS POSICIONES DE IMPRESIÓN DE LA PALMA DE LA MANO	65
TABLA 13. CARACTERÍSTICAS DE LAS POSICIONES DE IMPRESIÓN DEL ENCAJE	65
TABLA 14. CARACTERÍSTICAS DE LAS POSICIONES DE IMPRESIÓN DE LOS TENSORES	66
TABLA 15. CARACTERÍSTICAS DE LAS POSICIONES DE IMPRESIÓN DE LA PRÓTESIS	67
TABLA 16. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS PROBETAS Nº1 Y Nº2	75
TABLA 17. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS PROBETAS Nº3, Nº4, Nº5	77
TABLA 18. PROPIEDADES IMPRESIÓN PROBETA	78
TABLA 19. PROPIEDADES DE IMPRESIÓN PROBETA Nº2	79
TABLA 20. PROPIEDADES IMPRESIÓN PROBETA Nº3	81
TABLA 21. PROPIEDADES DE IMPRESIÓN PROBETA Nº4	82
TABLA 22. PROPIEDADES IMPRESIÓN PROBETA Nº5	82
TABLA 23. COSTES DIRECTOS DE LA PRÓTESIS	88
TABLA 24. COSTES INDIRECTOS DE LA PRÓTESIS	90
TABLA 25. DISTRIBUCIÓN DE COSTES TOTALES	91

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Justificación	2
1.2. Objetivos	3
2. ESTADO DEL ARTE	5
2.1. Historia y evolución de la impresión 3D	5
2.2. Métodos de impresión 3D	7
2.2.1. Material base: estado sólido	8
2.2.1.1. Fabricación por filamento fundido (FFF).....	8
2.2.1.2. Deposición de capas por laminación (LOM).....	9
2.2.2. Material base: polvo.....	9
2.2.2.1. Tecnologías basadas en el láser (SLS/DMLS/SLM)	10
2.2.2.2. Tecnologías basadas en el haz de electrones (EBM)	11
2.2.3. Material base: estado líquido	12
2.2.3.1. Estereolitografía (SLA).....	12
2.2.3.2. Procesamiento digital de luz (DLP)	13
2.2.3.3. MultiJet (MJP)	13
2.3. Metodología	14
2.4. Parámetros fundamentales de fabricación en tecnología FFF	17
2.4.1. Altura de capa.....	17
2.4.2. Relleno	19
2.4.3. Perímetros laterales.....	20
2.4.4. Velocidad de impresión.....	21
2.4.5. Temperatura de impresión	21
2.4.6. Temperatura de la base de impresión.....	21
2.4.7. Ventilador de capa	21
2.5. Materiales.....	22
2.5.1. PLA	24
2.5.2. ABS	25
2.5.3. Nylon	25
2.5.4. TPU	26

2.5.5.	PETG	26
2.5.6.	PVA	27
2.5.7.	HIPS.....	27
2.6.	Estudio de la mano humana	28
2.6.1.	Anatomía.....	28
2.6.2.	Movimientos	30
2.6.2.1.	Movimientos de la muñeca	30
2.6.2.2.	Movimientos de los dedos.....	31
2.6.2.3.	Movimientos del pulgar.....	32
2.7.	Estudio de fabricación aditiva de prótesis de mano.....	33
2.7.1.	Estudio de mercado de prótesis de mano low cost	33
2.7.1.1.	Raptor Hand.....	34
2.7.1.2.	Raptor Reloaded.....	35
2.7.1.3.	Cyborg Beast.....	36
2.7.1.4.	Talon Hand 2.0.....	37
2.7.1.5.	Oddysseus Hand.....	38
2.7.1.6.	Flexy Hand	39
2.7.1.7.	Dextrus.....	40
3.	DISEÑO Y FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO.....	41
3.1.	Diseño de la prótesis	41
3.1.1.	Falange 1ª.....	42
3.1.2.	Falange 2ª-3ª.....	43
3.1.3.	Falange 1ª del pulgar	44
3.1.4.	Falange 2ª-3ªdel pulgar	45
3.1.5.	Palma de la mano	45
3.1.6.	Encaje	48
3.1.7.	Tensores	48
3.2.	Análisis estático.....	49
3.2.1.	Caso estudio N°1: Falange 1ª – falange 2ª-3ª	50
3.2.2.	Caso estudio N°2: Palma – falanges	53
3.3.	Fabricación prótesis.....	58
3.3.1.	Características de la impresora	58
3.3.2.	Materiales empleados	59

3.3.2.1.	Ultimaker PLA RAL 5002	59
3.3.2.2.	Ultimaker PVA	60
3.3.3.	Parámetros de fabricación	60
3.4.	Post-procesado y puesta a punto de la prótesis	67
3.5.	Montaje y funcionamiento de la prótesis	69
4.	ENSAYOS.....	73
4.1.	Parámetros de impresión	73
4.2.	Ensayo de tracción	74
4.2.1.	Diseño de las probetas	74
4.3.	Microscopio	78
4.3.1.	PROBETA N°1.....	78
4.3.2.	PROBETA N°2.....	79
4.3.3.	PROBETA N°3.....	81
4.3.4.	PROBETA N°4.....	82
4.3.5.	PROBETA N°5.....	82
5.	ESTUDIO ECONÓMICO DEL PROYECTO.....	85
5.1.	Introducción.....	85
5.2.	Costes directos	86
5.2.1.	Coste del filamento	86
5.2.2.	Costes materiales auxiliares.....	87
5.2.3.	Costes de equipos empleados	87
5.2.4.	Coste mano de obra	88
5.2.5.	Costes directos totales	88
5.3.	Costes indirectos.....	89
5.3.1.	Coste por consumo eléctrico	89
5.3.2.	Costes operaciones de post-procesado.....	90
5.3.3.	Costes totales indirectos	90
5.4.	Costes totales del proyecto	91
6.	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....	93
6.1.	Conclusiones generales.....	93
6.2.	Conclusiones específicas sobre la prótesis.....	94
6.3.	Conclusiones específicas sobre los ensayos	95
6.4.	Líneas futuras.....	95

7. BIBLIOGRAFÍA.....	97
----------------------	----

ANEXOS

1. INTRODUCCIÓN

En la época de cambios que vive la sociedad actual, el avance está directamente relacionado con diversos factores entre los que podemos destacar la productividad y la innovación. La innovación, desde un punto de vista muy amplio la podemos definir como “todo cambio que genera valor”, pero es una definición demasiado general, que conviene limitar. Es mucho más preciso dar este nombre al resultado de un proceso complejo que lleva nuevas ideas al mercado en forma de productos o servicios y de sus procesos de producción o provisión, que son nuevos o significativamente mejorados [1].

La innovación tecnológica es la más importante fuente de cambio en la cuota de mercado entre firmas competidoras y el factor más frecuente en la desaparición de las posiciones consolidadas.

Tres características de la innovación [2]:

- La innovación no está restringida a la creación de nuevos productos: una innovación puede también referirse a un nuevo servicio, o a cómo se vende o distribuye un producto.
- La innovación no está restringida a desarrollos tecnológicos: Una innovación puede también obtenerse a través de diferentes estructuras organizativas, de la paquetización de la oferta actual o de una combinación de tecnología y marketing.
- La innovación no está restringida a ideas revolucionarias.

En la actualidad coinciden tres factores importantes que impulsan la innovación tecnológica:

1. Una intensa competencia global creada por la rápida difusión de las capacidades de fabricación a escala mundial.
2. Un cambio radical en los productos y procesos de la manufactura moderna provocado por las tecnologías avanzadas de fabricación.
3. Un número creciente de evidencias empíricas sobre la necesidad de introducir cambios en la gestión y en las prácticas laborales, estructuras organizativas y criterios de decisión para mejorar la eficacia de las operaciones fabriles y proporcionar nuevas fortalezas competitivas e introducir nuevas oportunidades estratégicas.

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 1.- Introducción

La tecnología de diseño tridimensional es una tecnología innovadora que ya está implantada en toda la mayoría de las empresas que desarrollan algún tipo de diseño. Las capacidades técnicas del software 3D actual preparan el terreno para una innovación y crecimiento más rápidos.

El cambio de condiciones de mercado y avances tecnológicos indican que la tecnología de diseño 3D puede vigorizar de nuevo la productividad, aumentar la ventaja competitiva, obtener aún más rendimiento en el diseño de productos y beneficiar a muchos otros aspectos de la fabricación.

En relación con las técnicas del software 3D y en el ámbito de estudio de este proyecto, el sector de la fabricación está experimentando una nueva concepción de obtener productos.

A finales del siglo XX aparece la fabricación aditiva y supone un giro respecto a los procesos de fabricación convencionales, ya que se pasa a fabricar por deposición controlada de material, capa a capa, aportando exclusivamente allí donde es necesario, hasta conseguir la geometría final que se persigue, en lugar de arrancar material o conformar con ayuda de utillajes y moldes (fundición, inyección, plegado...). De esta manera, se pueden clasificar los procesos de fabricación de piezas de la siguiente forma ^[3]:

- Tecnologías conformativas: Utilizan preformas para obtener la geometría requerida (inyección plástico y metales, PIM, sinterizado, colada la vacío, RIM, electroforming...).
- Tecnologías sustractivas: Obtienen la geometría requerida sustrayendo material de una geometría mayor (mecanizado, electroerosión, corte por agua, corte por láser).
- Tecnologías aditivas (AM): Obtienen la geometría añadiendo material a partir de geometría virtual, sin uso de preformas (conformativas) y sin sustraer material (sustractivas).

1.1. Justificación

Este proyecto consiste en un primer paso sobre el estudio y fabricación de prótesis mediante impresión 3D.

Debido al auge de la fabricación aditiva, las prótesis de bajo coste desarrolladas con esta tecnología están evolucionando continuamente para sustituir a las prótesis desarrolladas comercialmente.

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 1.- Introducción

Las prótesis mioeléctricas más avanzadas del mercado cuestan aproximadamente 30.000 euros, precio que está al alcance de pocas personas. A este precio desorbitado hay que añadir que, en el caso de los niños, crecen y necesitan nuevas prótesis que se adapten a su crecimiento. Las prótesis fabricadas mediante impresión 3D ofrecen muchas ventajas como son el coste, la versatilidad, la comodidad o los plazos de entrega.

Por todo ello la motivación de este proyecto ha sido conocer una nueva tecnología con un gran futuro en el mundo de la industria desarrollando un producto que puede ser un primer paso para mejorar la vida de muchas personas.

1.2. Objetivos

El objetivo de este proyecto es la **Fabricación aditiva de prótesis de mano de bajo coste.**

Para ello se ha realizado el diseño de una prótesis, y se han modelado las distintas operaciones para la mejor fabricación.

Para cumplir este objetivo principal se han planteado los siguientes objetivos específicos:

1. Adaptación de diseño de prótesis de mano y estimación de su comportamiento mecánico.
2. Estudio de parámetros para la mejora del proceso de fabricación.
3. Estudio del comportamiento del material usado en la fabricación de la prótesis mediante diferentes ensayos sobre probetas.
4. Estudio económico para un modelo de prótesis de mano de bajo coste mediante la técnica de fabricación por filamento fundido.

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE
CAPÍTULO 1.- Introducción

2. ESTADO DEL ARTE

Hoy en día el término impresión 3D está cada vez más extendido en nuestra sociedad, sin embargo, los conocimientos sobre esta tecnología son muchas veces equívocos y difusos, dado que dentro de este término se recogen diferentes tecnologías y métodos de fabricación.

En este proyecto, se analizará la impresión mediante fabricación por filamento fundido para la obtención de una prótesis de mano. Para aportar valor al trabajo, es importante conocer el inicio y la evolución de esta tecnología para tener un conocimiento previo en cuanto a las soluciones y procesos tecnológicos que han sucedido en su historia.

2.1. Historia y evolución de la impresión 3D

Desde el inicio de la impresión 3D, el mercado mundial se ha caracterizado por la adopción y el desarrollo en paralelo de diferentes aplicaciones, equipos, materiales y soluciones tecnológicas.

Esta tecnología surge con el nombre de “prototipado rápido” (*Rapid Prototyping, RP*) debido a que se concibió con el fin de realizar prototipos físicos partiendo de archivos informáticos de modelos en 3D. A partir de estos conceptos, desde mediados de los años 80 hasta actualmente, esta tecnología se ha desarrollado de forma continúa transformando los términos, los principios de funcionamiento y los campos de aplicación [4].

A continuación, se realiza un breve recorrido sobre los principales hitos que han marcado esta tecnología.

1980 – El Dr. Hideo Kodama del Instituto de Investigación Industrial Municipal de Nagoya, describe un sistema de “prototipado rápido de fotopolímeros”. La idea consistía en utilizar un fotopolímero y exponerlo a la luz ultravioleta para endurecer la pieza. No presentó la patente a tiempo y la idea fue ignorada.

1983 – 1986 - Charles Hull desarrolla la misma idea que Kodama pero basada en la estereolitografía (SLA), impresión en relieve de chorro de tinta mandada por datos digitales en forma de sucesivas capa. En 1986, Charles Hull obtiene una primera patente de esta tecnología, funda 3D Systems Corporation y desarrolla la primera máquina de fabricación aditiva comercial bajo esta tecnología (SLA-1).

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 2.- Estado del arte

1987 - Carl Deckard en la Universidad de Texas expuso una patente para la tecnología de sinterizado selectivo por láser (SLS).

1988 - Scott Crump presento una patente para el modelado por deposición fundida (FDM). Al año siguiente, Crump funda una de las principales empresas de impresión 3D, "Stratasys".

Las tres tecnologías principales de impresión 3D fueron patentadas en menos de diez años.

1999 - Tras una serie de avances en esta tecnología, el instituto de Medicina Regenerativa de la Universidad de Wake Forrest implanta en humanos los primeros órganos modificados por medio de implantes arteriales impresos en 3D.

2002 - El instituto de Medicina Regenerativa de la Universidad de Wake Forrest imprime el primer órgano en 3D: un riñón completamente funcional. Habrá que esperar 13 años para verlo trasplantado a un paciente.

2004 - Inicio del proyecto RepRap, dirigido a crear modelos de impresoras 3D que puedan replicarse a sí mismas. Este proyecto de código abierto condujo a la difusión de las impresoras 3D de sobremesa FDM y a la popularidad de la tecnología en la comunidad de fabricantes. Por razones legales, surge el término *Fused Filament Fabrication (FFF)* como nombre alternativo para el proceso de *FDM*.

2008 - La impresión en 3D alcanzó mayor presencia en los medios debido a otra aplicación médica: la primera prótesis impresa en 3D. Ésta incorporaba todas las partes de un miembro biológico, se imprimía de una sola vez sin necesidad de ningún ensamblaje posterior.

2009 - Las patentes de FDM pasaron a ser de dominio público, abriendo el camino a numerosas innovaciones en las impresoras FDM. La tecnología de escritorio invadió el mercado e hizo que el sector industrial se replanteara la fabricación aditiva como una técnica de producción fiable.

2010 - Kor Ecologic presenta "Urbee", el primer automóvil capaz de contar con la totalidad de su armazón impreso en 3D. Todos los componentes exteriores, incluyendo los prototipos de paneles de vidrio, fueron creados usando impresoras 3D.

2011 - La universidad de Exeter, junto con la universidad de Brunel y el desarrollador de software Delcam, adaptan el sistema de impresión 3D Inkjet para la creación de objetos en chocolate. La universidad de Cornell comienza a construir una impresora 3D para alimentos.

2012 – Se realiza el primer implante de mandíbula inferior del mundo mediante esta tecnología. Fue creado por la firma belga LayerWise y se utilizó para sustituir la mandíbula de una paciente mayor que sufría una infección de hueso crónica.

2013 - La empresa Robohand crea la primera prótesis de mano, capaz de ser distribuida mediante por internet y ser impresa por los usuarios finales.

2014 - La NASA envió a la Estación Espacial Internacional (ISS) la primera impresora 3D, ZeroG, capaz de crear objetos en ausencia de gravedad tal como la conocemos en la tierra.

Hoy en día la impresión en 3D está muy presente en la mente del público en general y en las decisiones de grandes empresas. La tecnología está en constante progreso, al igual que los usos. Cada vez son más las pequeñas y grandes empresas que aprovechan el bajo precio de los prototipos que ofrece la impresión en 3D y los han integrado plenamente en sus procesos de iteración, innovación y producción.

2.2. Métodos de impresión 3D

Hoy en día existen diferentes procesos de impresión 3D, la diferencia entre ellos está en la forma en la que se depositan las capas para crear las piezas.

En el siguiente esquema se recoge una clasificación según la manera en la que se emplea el material base.

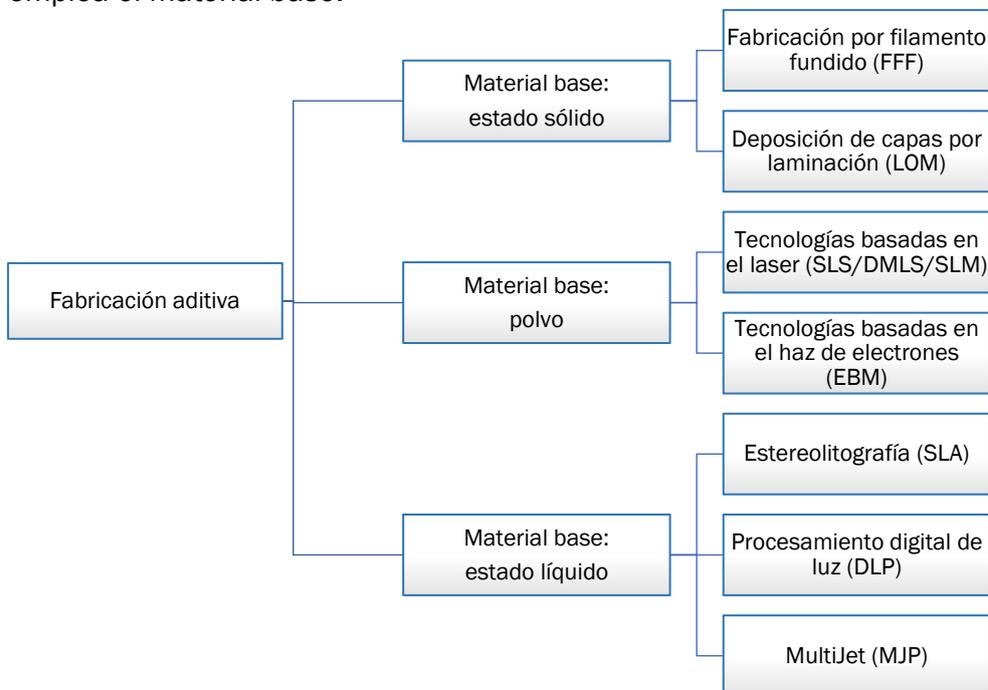


Figura 1. Clasificación de los procesos de fabricación aditiva según la forma de material base

2.2.1. Material base: estado sólido

Las tecnologías que se desarrollan aportando el material en estado sólido someten al material a un proceso de calor para llevarlo a un estado que permita la unión de sucesivas capas. En estas tecnologías trabajan plásticos, vidrios o metales.

2.2.1.1. Fabricación por filamento fundido (FFF)

La tecnología FFF (*Fused Deposition Filament*) consiste en la deposición de capas de plástico fundido sobre otras capas para ir elaborando la pieza.

El filamento de plástico emerge de una de bobina, se hace pasar por un extrusor a una temperatura superior a la de transición vítrea del material, y es extruido a través de una boquilla sobre la plataforma o sobre capas previamente impresas.

La termoplaticidad del material es una propiedad esencial para el correcto funcionamiento de este método ya que por un lado permite primero al filamento fusionarse y luego solidificarse a temperatura ambiente durante la impresión.

El cabezal de la impresora se desplaza según el plano xy a medida que se va construyendo la pieza mientras que la plataforma de trabajo va descendiendo, en el plano z, en pequeños incrementos según la altura de la capa definida.

Para imprimir piezas con formas geoméricamente complicadas se necesitan estructuras de soporte, con el objetivo de mantener la pieza y que ésta no se mueva durante el proceso de impresión. En el proceso de postprocesado, el usuario ha de eliminar el material de soporte generado.

Algunas máquinas poseen un doble extrusor que permite imprimir con dos materiales, el material de la pieza a construir y otro material que, en general, se utiliza para generar los soportes.

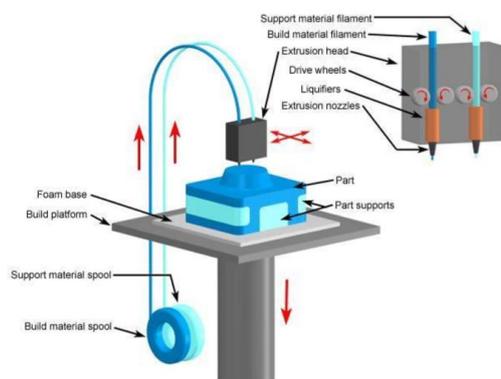


Figura 2. Esquema representativo del proceso FFF [5]

2.2.1.2. Deposición de capas por laminación (LOM)

La tecnología de fabricación mediante laminado de capas se basa en el uso de un material laminar recubierto con un adhesivo, éste se corta con la forma deseada y se presa con un rodillo caliente, quedando adherido a la hoja.

Un láser controlado por ordenador o una cuchilla, corta posteriormente el material con la forma deseada en cada capa. Al finalizar el corte de la capa, la plataforma desciende una profundidad igual al espesor de la chapa, para a continuación colocar otra hoja en la parte superior de las capas previamente depositadas. La plataforma se eleva ligeramente y el rodillo caliente aplica presión para unir la nueva capa. El láser corta el contorno y el proceso se repite hasta que se completa la pieza.

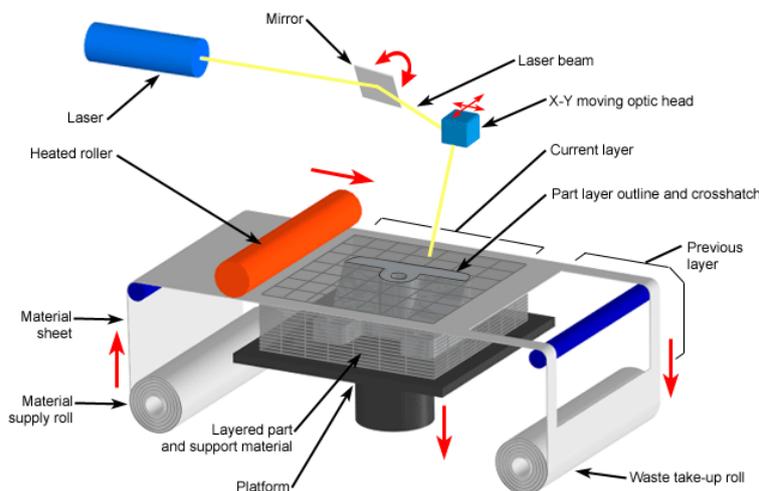


Figura 3. Esquema representativo del proceso LOM [5]

2.2.2. Material base: polvo

En este segundo bloque las tecnologías desarrolladas usan material en base polvo, uniendo las capas mediante fusión o usando algún aglomerante. Los materiales con los que trabajan estas tecnologías abarcan polímeros, cerámicos y metales [6].

Estas tecnologías presentan la ventaja que no es necesario la construcción de material de soporte, debido a que el propio polvo restante ya hace su función.

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 2.- Estado del arte

Los procesos de fusión en lecho de polvo (PBF) son un subconjunto de técnicas de fabricación aditiva que consisten en la deposición de una capa de polvo sobre la plataforma de trabajo para que ésta sea fundida a través de una fuente de energía. Una vez que la capa ha sido fundida, el pistón de la cámara del edificio baja y el pistón de la cámara de polvo sube en función del espesor definido de la capa. El mecanismo de recubrimiento o el rodillo deposita de nuevo polvo a través de la cámara de construcción que es escaneada por la fuente de energía. Este ciclo se repite capa por capa, hasta que se forma la pieza completa. Una vez que la pieza se ha completado se tiene que eliminar el exceso de polvo.

Las tecnologías basadas en fusión en cama de polvo se clasifican según la forma en que se aporte la fuente de energía:

- Fuente de energía: láser
 - Sinterización láser selectiva (SLS)
 - Sinterización láser directa de metal (DMLS)
 - Fusión láser selectiva (SLM)
- Fuente de energía: haz de electrones
 - Fusión por haz de electrones (EBM)

2.2.2.1. Tecnologías basadas en el láser (SLS/DMLS/SLM)

La sinterización selectiva por láser (SLS) puede definirse como el proceso de fusión del lecho de polvo usado para producir objetos a partir de materiales en polvo (materiales plásticos, vidrios y cerámicos) usando uno o más láseres para fusionar o fundir selectivamente las partículas en la superficie, capa por capa, en una cámara cerrada. La sinterización láser de metal directo (DMLS) es un proceso similar al anterior con la única diferencia de que el material que se usa son polvos de aleaciones metálicas.

La fusión selectiva por láser (SLM) difiere de los anteriores en que se logra una fusión completa del material. El polvo en este caso no sólo se funde, sino que se funde en una parte homogénea.

La sinterización se distingue de la fusión en que los procesos de sinterización no funden completamente polvo, sino que lo calientan hasta el punto de que polvo puede fusionarse a nivel molecular. La sinterización cuenta con la ventaja de que se puede controlar la porosidad del material.

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 2.- Estado del arte

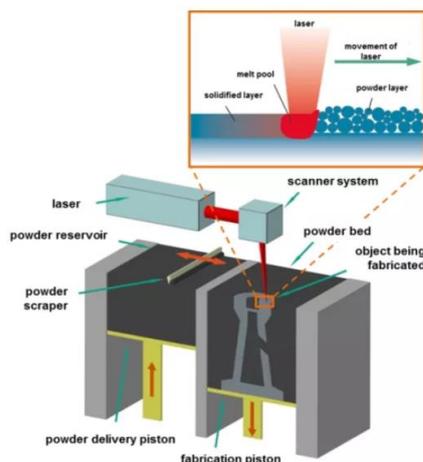


Figura 4. Esquema representativo de los procesos SLS/DMLS/SLM [7]

2.2.2.2. Tecnologías basadas en el haz de electrones (EBM)

La fusión por haz de electrones (EBM) es otro proceso de fabricación aditiva basada en los procesos de fusión en lecho de polvo (PBF).

Se usa un haz de electrones para fusionar selectivamente la capa de lecho de polvo en la cámara de vacío. Esta tecnología es similar a la fusión selectiva por láser (SLM), su única diferencia es que la fuente de energía que se usa en este caso es haz de electrones en vez de láser.

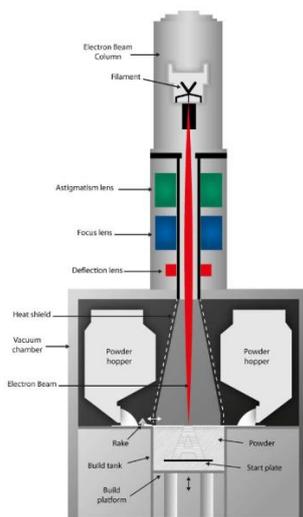


Figura 5. Esquema representativo del proceso EBM [7]

2.2.3. Material base: estado líquido

En estos procesos la pieza se forma mediante la solidificación del material al crear cada capa. El material base que utilizan estos métodos son fotopolímeros (resina líquida), un fotopolímero es una sustancia sintética que sufre un cambio en sus propiedades (polimerización, reticulación o despolimerización) por acción de la luz, generalmente ultravioleta, formando una diferenciación física entre las partes expuestas y no expuestas.

2.2.3.1. Estereolitografía (SLA)

La estereolitografía (SLA) es un proceso de fabricación por adición que emplea resina fotopolimérica que se cura mediante luz ultravioleta en el tanque de impresión, y un láser ultravioleta para construir los objetos ^[7].

Los objetos tridimensionales son obtenidos mediante la adición de capas finas, impresas una encima de otra. Cada capa es una sección transversal del objeto que el láser traza en la superficie de la resina, que es el material consumible. La resina líquida cura y se solidifica mediante la exposición al láser de luz ultravioleta, quedando así la capa recién solidificada pegada a la capa previa que existía debajo de ella. El láser no se aplica directamente sobre la resina sin curar, sino que mediante un juego de espejos el rayo es dirigido hacía la parte del objeto que se debe curar para así crear la figura deseada. Cuando se completa una capa, una cuchilla de nivelación se mueve a través de la superficie de la batea para alisarla antes de depositar la siguiente capa. La cuba de material desciende por una distancia igual al espesor de la capa requerida y una capa posterior se forma en la parte superior de las capas previamente foto-polimerizadas.

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 2.- Estado del arte

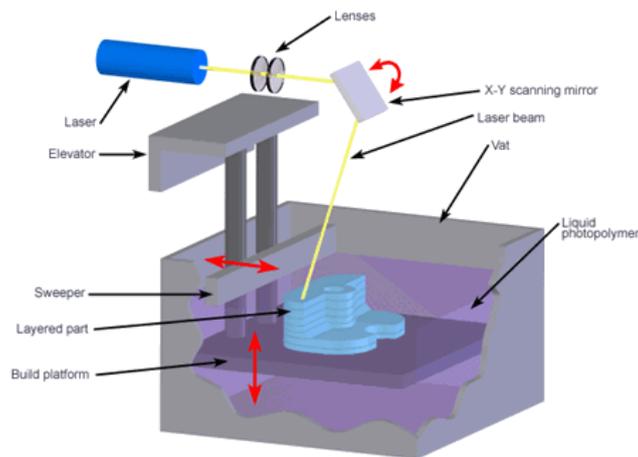


Figura 6. Esquema representativo del proceso SLA [7]

2.2.3.2. Procesamiento digital de luz (DLP)

Es un proceso similar a la estereolitografía, su principal diferencia es la fuente de luz. El sistema DLP utiliza una fuente de luz convencional, tal como una lámpara de arco, con un panel de pantalla de cristal líquido o un dispositivo de espejo deformable, que se aplica sobre la superficie de la cuba de resina de fotopolímero en una sola pasada, por lo que es más rápido que el sistema SLA. Una de las otras ventajas del DLP sobre el sistema SLA, es que se requiere una cuba poco profunda de resina, lo que generalmente da como resultado menos residuos y menores costes de funcionamiento.

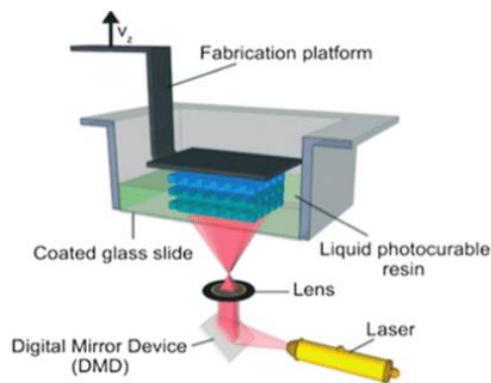


Figura 7. Esquema representativo del proceso DLP [7]

2.2.3.3. MultiJet (MJP)

El concepto de funcionamiento de este tipo de procesos nace de combinar los procesos de la inyección de tinta de impresión 2D convencional y la estereolitografía.

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 2.- Estado del arte

Utiliza una serie de cabezales de impresión de inyección de tinta para depositar pequeñas gotas de material de construcción y material de soporte para formar cada capa de una parte, sobre una bandeja que se desplaza desde arriba hacia abajo sobre el eje "z". El material de construcción es un fotopolímero que se cura por una lámpara de UV una vez depositado en la respectiva capa.

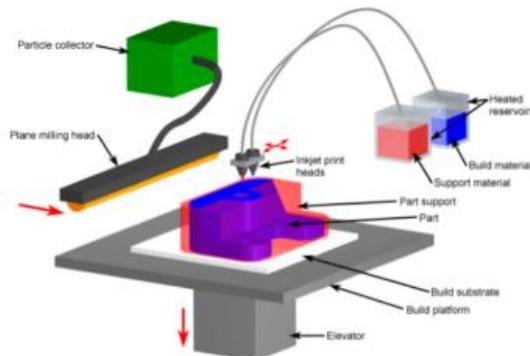


Figura 8. Esquema representativo del proceso MJP [7]

2.3. Metodología

El modelado por deposición fundida requiere en primer lugar de un proceso de diseño y traducción al lenguaje máquina de las piezas que se desean fabricar. Este proceso es similar en todas las técnicas de fabricación aditiva, y las variaciones que puede haber entre unas y otras depende principalmente del software y firmware empleado. El proceso de fabricación mediante tecnologías aditivas de forma genérica se puede dividir en siete etapas, desde su diseño hasta su aplicación final:

Etapas 1: Diseño de la pieza

El primer paso, en cualquier proceso de desarrollo de un producto basado en manufactura aditiva, es tener una idea clara del objeto, en cuanto a su forma y funcionalidad.

El objetivo de esta fase es lograr la pieza de forma virtual, para ello existen tres opciones posibles:

- Diseñar un modelo mediante software de diseño
- Uso de un escáner
- Descarga del diseño en internet

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 2.- Estado del arte

Etapa 2: Conversión a STL

Una vez se ha obtenido el archivo CAD, habrá que convertirlo en un archivo STL. El objeto se transforma en una malla formada por triángulos ajustándose a la geometría de la pieza.

La mayoría de las tecnologías de fabricación aditiva usan el formato de archivo STL, derivado de la técnica de la estereolitografía.

El formato STL integra la historia de modelado, los datos de la construcción del objeto y la aproximación de sus superficies a través de triángulos.

Los archivos basados en el formato STL no representan unidades, colores, materiales o cualquier otro elemento de información. Estas limitaciones han llevado a la reciente aprobación de un nuevo formato de archivo denominado AMF desarrollado en 2012, como un estándar internacional ASTM/ISO, que amplía el formato STL incluyendo dimensiones, color, material, y otras características útiles para la fabricación de los objetos. Este formato de archivo está en desarrollo y aún no se ha dado el paso a la adopción completa de las tecnologías del AMF.

Etapa 3: Transferencia y manipulación de archivos STL

Una vez que el archivo STL ha sido creado no puede ser enviado directamente al equipo de manufactura aditiva, existen una serie de acciones requeridas previas al inicio de la construcción de la pieza.

En primer lugar, se debe verificar que la pieza sea la correcta y que no existan errores en el archivo STL que impidan el correcto rebanado, como que la pieza no esté bien cerrada, que haya intersecciones entre líneas o superposición de triángulos.

En este paso el usuario puede modificar la posición de la pieza o cambiar la orientación de esta para su fabricación en una ubicación específica dentro del equipo.

Etapa 4: Generación del G-code

Una vez se tenga el STL, verificado, la siguiente etapa es la de generación del lenguaje g-code. Las piezas se fabricarán capa a capa hasta alcanzar la geometría final, por lo que es necesario un software de laminación para generar este lenguaje.

Este software dividirá la pieza en diferentes capas a partir del archivo STL, es posible que debido al espesor de la capa se pierda información asociada a la geometría.

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 2.- Estado del arte

En el archivo g-code queda registrada toda la información necesaria para fabricar la pieza (temperaturas, velocidades, espesores, desplazamientos, etc).

Etapa 5: Fabricación de la pieza

El siguiente paso consistiría ya en la fabricación de la pieza. Todos los equipos de manufactura aditiva tienen una secuencia similar de capas, que incluye una plataforma de altura regulable, deposición de material y la formación de la sección transversal.

Etapa 6: Postprocesamiento

El producto final resultante del equipo de manufactura aditiva no está listo para su uso nada más terminar la impresión. Las piezas requieren una cantidad significativa de postprocesamiento, previo a que estén listo para ser utilizadas. En primer lugar, se debe eliminar el exceso de material de construcción que rodea la pieza final.

El postprocesamiento es la etapa de acabado de las piezas, esta fase puede implicar un acabado abrasivo, como un pulido y lijado, o la aplicación de recubrimientos.

Hay piezas que necesitan un alto cuidado para mantener su precisión y acabado y son sometidas a tratamientos químicos o térmicos para lograr mejores propiedades finales. Algunos productos frágiles pueden requerir el uso de revestimientos de infiltración y/o superficie para reforzar la parte final.

Etapa 7: Control de calidad

La fabricación aditiva permite una mayor personalización y un aumento de la complejidad de las piezas lo cual provoca también una mayor acumulación de defectos. Además de posibles defectos de las piezas, el proceso de impresión puede provocar deformaciones debido a procesos de fusión o eliminación de soportes. Estos problemas son cruciales en industrias como la aeroespacial, biosalud, automoción, el petróleo o el ejército, donde las piezas han de cumplir tolerancias estrictas y no poseer defectos.

Para ello, en la última etapa de fabricación se deberá someter a las piezas impresas en 3D a una inspección y validación de la geometría interna.

La tomografía computerizada industrial (CT) es el método de inspección óptimo. Se trata de un ensayo no destructivo (NDT) que utiliza tecnología avanzada de rayos X para la inspección interna en 3D. Permite inspeccionar una amplia gama de materiales, desde polímeros a aleaciones metálicas (aluminio, titanio, Inconel, etc) de diferentes densidades y espesores, en un tiempo de inspección rápido, lo cual hace que sea un método especialmente adecuado para el prototipado rápido [8].

La tomografía computarizada tiene como principales ventajas:

- Identificación precisa de defectos como porosidad, polvos residuales, grietas e impurezas
- Inspección precisa de características internas y externas como espesor de pared y orientación de fibra
- Metrología dimensional para requisitos dimensionales complejos y comparaciones CAD/pieza
- Inspección unitaria de piezas de producción para validar partes críticas en condiciones de funcionamiento

2.4. Parámetros fundamentales de fabricación en tecnología FFF

Los parámetros de impresión están directamente relacionados con las propiedades finales de la pieza impresa y determinarán su resistencia mecánica, tolerancia dimensional, acabado superficial, densidad y masa total de la pieza.

La impresión FFF es una de las tecnologías más versátiles debido a su gran cantidad de parámetros modificables. Dependiendo del software de laminación se tendrá más o menos libertad a la hora de configurar la impresión de una pieza.

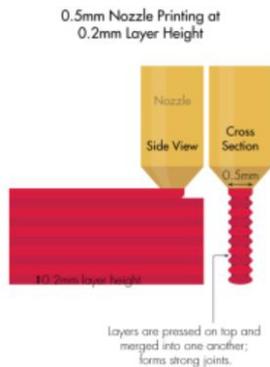
A continuación, se explicarán los parámetros más relevantes para FFF y su efecto durante la impresión:

2.4.1. Altura de capa

La altura de capa es uno de los parámetros más importantes y útiles en el proceso de impresión, dependiendo del valor que se le asigne se obtendrá un mejor o peor acabado superficial en el eje “z”. Además, influirá en el tiempo de impresión, el coste y las propiedades físicas de una pieza impresa.

Este parámetro está directamente relacionado con el diámetro de la boquilla de la impresora. Idealmente, la altura de la capa debe ser alrededor del 80% del diámetro de la boquilla para una impresión con buena resistencia. A modo de ejemplo consideremos las siguientes situaciones:

Caso 1:

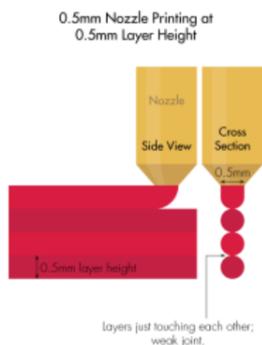


- Altura de capa: 0,2mm
- Diámetro del nozzle: 0,5mm

La impresora tiene que presionar hacia abajo fideos de 0,5 mm a una altura de 0,2 mm, de forma que al depositar una capa presiona a la capa de abajo provocando una mejor adhesión entre las capas.

Figura 9. Altura de capa menor que el diámetro del nozzle [9]

Caso 2:

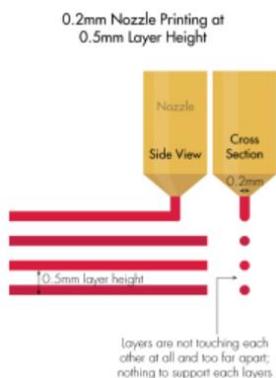


- Altura de capa: 0,5mm
- Diámetro del nozzle: 0,5mm

Si la altura de capa de capa es igual al diámetro del nozzle, existirá un contacto superficial entre las capas, pero éstas no llegarán a adherirse.

Figura 10. Altura de capa igual que el diámetro del nozzle [9]

Caso 3:



- Altura de capa: 0,5mm
- Diámetro del nozzle: 0,2mm

En el caso de que se intente configurar una altura de capa mayor al diámetro del nozzle no será posible la impresión ya que no es posible que llegue a formarse la capa. Las capas no se tocarían entre sí y no hay soporte entre ellas.

Figura 11. Altura de capa mayor que el diámetro del nozzle [9]

Antes de seleccionar una altura de capa habrá que tener tres consideraciones:

1. Geometría de la pieza

El impacto de la altura de capa es más notable en curvas y ángulos y es menos prominente en paredes verticales rectas, debido a la naturaleza capa por capa de la impresión 3D. Si un diseño incluye un número significativo de curvas, ángulos o agujeros utilizando una altura de capa más baja, se obtendrá una pieza más precisa.

En el caso de los agujeros a lo largo de un eje horizontal, el software de la impresora tiene que cortar el agujero circular en múltiples capas y luego apilarlas una encima de otra, creando un borde no liso que parece una escalera. Este efecto de escalonamiento se hace más prominente en superficies con mayor curvatura.

2. Aplicación de la pieza

Si la pieza no es funcional y el aspecto visual es la principal preocupación, entonces la selección de una altura de capa más baja es ideal, ya que resultará en un acabado más suave. Por el contrario, cuando se imprime en 3D una pieza funcional se recomienda utilizar una mayor altura de capa, ya que disminuyen los costes y el tiempo y tendrá según estudios mejores propiedades mecánicas.

3. Postprocesado

Por último, es importante considerar a la hora de elegir la altura de una capa, si las piezas se procesarán posteriormente. Una mayor altura de capa es una mejor opción, si la pieza va a ser lijada, alisada con acetona o pintado.

2.4.2. Relleno

Una de las características de la fabricación aditiva mediante FDM es la posibilidad de fabricar con distintos rellenos, aligerando el interior de la pieza y maximizando la relación resistencia / peso.

La opción de relleno es un parámetro que define la solidez de la pieza. Para determinar qué porcentaje de relleno emplear en una pieza se deben tener en cuenta las fuerzas que deberá soportar el objeto una vez impreso.

Porcentaje de relleno:

La resistencia de una pieza está directamente relacionada con el porcentaje de relleno.

Este parámetro puede tomar valores desde 0 a 100%. Cuando se indica un relleno de 0%, la pieza fabricada solo poseerá una superficie externa, sin material en su interior.

Según la funcionalidad de la pieza se elegirá el porcentaje de relleno, así para figuras decorativas bastará con un relleno de 10-25% mientras que para piezas funcionales y que necesiten aguantar ciertas cargas se ira a rellenos entre 30-70%.

Geometría del relleno:

El entramado es una trama con un patrón predefinido que conforma el relleno de la pieza. Como hay una gran variedad de entramados con distintos patrones, su elección será clave, ya que la forma de cada uno y la densidad de relleno influirán en la resistencia mecánica del objeto impreso. Los más comunes son el rectilíneo, el panel de abeja, el concéntrico y el de rejilla (45°, -45°).

Relacionado con la geometría del relleno está el ángulo de relleno, éste es un factor de gran importancia para el comportamiento mecánico de la pieza ya que dependiendo de cómo vaya a trabajar se necesitará que las fibras estén orientadas de una forma u otra.

2.4.3. Perímetros laterales

Son el número de capas en el exterior de una impresión. Para FFF, son siempre las primeras áreas que se imprimen por capa. A la hora de configurar este parámetro habrá que tener en cuenta varias consideraciones de diseño:

- Conforme aumente el espesor del perímetro aumenta la resistencia de la pieza. Esto permite una impresión más robusta sin tener que aumentar el porcentaje de relleno.
- En piezas que van a ser sometidas a un postprocesado como un lijado o un alisado químico, se deberá aumentar el grosor de las paredes, ya que los métodos de procesamiento posterior disminuyen el grosor de la superficie del modelo.
- El aumento del número de paredes supone un aumento de la cantidad de tiempo y material necesario para imprimir el modelo, lo que aumenta el coste total de las piezas.

2.4.4. Velocidad de impresión

La velocidad de impresión es aquella a la que se mueve el cabezal de extrusión mientras deposita el filamento fundido en la cama de impresión.

Cuanto más rápido se imprime, más fuerza se pone en el extrusor. Cada vez que el extrusor cambia de dirección se produce inercia, que puede causar vibraciones que luego se verán en la pieza impresa como imperfecciones.

La velocidad también aumenta la presión en el extrusor. Esa presión puede generar una sobre extrusión de material en momentos en que el extrusor se detiene o reduce la velocidad para cambiar de dirección.

Determina el tiempo que tiene la última capa solidificar, así una velocidad de impresión baja permite a la última capa impresa que tenga más tiempo para solidificar antes de que se deposite la siguiente capa, por lo cual es un parámetro que influye en la adhesión entre las capas.

2.4.5. Temperatura de impresión

Este es uno de los parámetros más importantes de la parametrización del proceso de extrusión. Define la temperatura del extrusor a la cual se va a fundir el material aportado.

La temperatura se elegirá en función del material y de los requerimientos de la pieza. Una temperatura de impresión demasiado baja provocará que el material no fluya correctamente, provocando obstrucciones en el extrusor, y que las capas no se adhieran entre sí, mientras que una temperatura de impresión muy elevada degrada el filamento y pierde propiedades estructurales.

2.4.6. Temperatura de la base de impresión

La temperatura de la base de la impresión es un parámetro que habrá que tener en consideración para evitar fenómenos como el *warping*, en el que la pieza se levanta de la base en ciertas zonas durante la impresión.

2.4.7. Ventilador de capa

La opción del ventilador de capa es muy importante cuando se imprimen materiales cuya viscosidad a temperatura de fusión es muy baja, ya que es necesario que la

impresión se enfríe y el material se solidifique lo antes posible, de lo contrario puede variar su forma y afectar negativamente a la calidad de la impresión.

2.5. Materiales

La tecnología FFF fabrica piezas mediante la extrusión de un material que luego se solidifica y es capaz de tener más material extruido adherido a él, por lo que cualquier material que pueda fluir y se endurezca posteriormente, puede ser utilizado para crear objetos mediante esta técnica.

Existen una amplia gama de materiales que pueden utilizarse, desde polímeros termoplásticos hasta alimentos para uso en repostería, ceras y colágeno humano cultivado en laboratorio. Actualmente, los materiales más empleados en FFF son los polímeros termoplásticos, por tanto, antes de describir los principales materiales para la fabricación por deposición de filamento fundido, se va a hacer un breve resumen sobre los polímeros ^[10].

De forma general, los polímeros se pueden clasificar en dos categorías: termoplásticos y termoestables. Su diferencia radica en que los termoplásticos son polímeros que, se funden al aumentar la temperatura sin descomponerse y vuelven a solidificar al bajar la temperatura mientras que los polímeros termoestables no funden al aumentar la temperatura, sino que se degradan. Esta característica hace que no puedan utilizarse en FFF.

Los polímeros termoplásticos pueden presentar dos tipos de microestructuras, amorfa y cristalina. Las estructuras amorfas no tienen un orden identificable con respecto a la disposición de las cadenas de polímeros mientras que las regiones cristalinas se producen cuando las cadenas de polímeros están alineadas y empaquetadas. Los polímeros presentan una combinación de regiones amorfas y cristalinas. La microestructura depende de muchos factores como, la química de la unidad de repetición, el peso molecular, los parámetros de procesamiento y la carga. Un polímero presentara estructuras más amorfas cuanto más difícil sea que las cadenas se apilen juntas debido a la presencia por ejemplo de grupos colgantes o cadenas rígidas.

La calidad de la impresión de la pieza y sus propiedades están influenciadas por las propiedades de los polímeros. Entre estas propiedades destacan su temperatura de fusión (T_m), la temperatura de transición vítrea (T_g) y el coeficiente de expansión térmica (CTE). Por un lado, la temperatura de fusión afectará a la temperatura a la que debe encontrarse el extrusor para imprimir mientras que, por otro, la temperatura de transición vítrea y el coeficiente de expansión térmica están relacionados con la cantidad de estrés térmico que se produce y que puede afectar

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 2.- Estado del arte

a la adherencia a la base de la impresora. Un bajo coeficiente de expansión térmica ayudará a reducir las tensiones internas causadas durante el enfriamiento y a mantener la parte final.

Otras propiedades importantes de los polímeros para la impresión 3D son su fragilidad, elasticidad, ductilidad o su resistencia química a los disolventes. Todas estas propiedades dependen de la química y de la microestructura del polímero.

Los polímeros están formados por monómeros, unidades químicas que se repiten para crear cadenas moleculares denominadas macromoléculas. La unidad química base es la unidad de repetición y el número de unidades de repetición en una cadena es el grado de polimerización.

La temperatura de fusión (T_m) y la temperatura de transición vítrea (T_g) están directamente relacionadas con la facilidad con la que las cadenas poliméricas pueden deslizarse entre sí a nivel molecular. La temperatura de transición vítrea es la temperatura de cada plástico a la que aún no se ha fundido, pero a la que se facilita el movimiento de las cadenas de polímeros provocando cambios en sus propiedades. Por encima de T_g el plástico es flexible y dúctil mientras que por debajo el polímero es más rígido y frágil. Para el proceso de impresión 3D, una baja temperatura de transición vítrea hará que la pieza se ablande más rápidamente cuando se calienta, pero también disminuirá cualquier deformación causada durante la impresión, ya que la pieza terminará de enfriarse antes de endurecerse.

Químicamente, los factores que pueden afectar a estas propiedades son la composición de la columna principal de la unidad de repetición, los grupos colgantes y la polaridad de los enlaces. Los grupos colgantes son aquellos grupos químicos que cuelgan de la columna principal de carbono de un polímero, facilitan el enredo de las cadenas de polímeros, lo que restringe el movimiento de las cadenas de polímeros de mayor temperatura de transición vítrea y de fusión. Hacen que los polímeros sean más fuertes y rígidos, pero también más frágiles.

Los enlaces polares son aquellos que se forman cuando los átomos tienen diferentes electronegatividades. Cuantos más enlaces polares estén presentes en la unidad de repetición, más probable es que un polímero absorba agua, lo que puede afectar negativamente en el proceso FFF, así como ablandar o degradar el material. Los grupos polares también influyen en la resistencia de un polímero a los disolventes, los polímeros con más grupos polares son más propensos a disolverse en disolventes polares. En FFF, una forma de crear estructuras de soporte fácilmente removibles es usar como material de soporte uno que sea soluble en un disolvente que no afecte al material de la pieza.

En cuanto a las propiedades de los polímeros su microestructura influirá, así las regiones amorfas tienden a ser más móviles y flexibles permitiendo un aumento de la capacidad de alargamiento del polímero y por el contrario las regiones cristalinas provocan mayor rigidez, un aumento de la densidad y resistencia al disolvente de un polímero, pero disminuye su alargamiento máximo y su transparencia.

Para finalizar esta introducción sobre las características de los materiales plásticos de la técnica FFF, es importante tener en cuenta que los plásticos absorben una cierta cantidad de humedad atmosférica, que puede convertirse en vapor durante la fusión del plástico y causar un comportamiento inconsistente y atascamiento en el extrusor de la impresora. Por lo que es importante mantener secos todos los filamentos de impresión, bien en un espacio deshumidificado o en un armario desecador.

2.5.1. PLA

El ácido poliláctico, PLA, es uno de los materiales más comunes en la tecnología FFF. Se trata de un polímero biodegradable, basado en un monómero natural, el ácido láctico, que puede ser producido a partir de materiales primas renovables no tóxicas. El ácido láctico puede producirse por fermentación de azúcares obtenidos a partir de fuentes renovables como la caña de azúcar o el almidón de maíz.

El PLA presenta en su columna principal enlaces polares de carbono y oxígeno, lo que permite formar una estructura semicristalina. La estructura cristalina y el grupo colgante de metilo (CH_3) otorgan resistencia al polímero, pero también lo hace quebradizo. Los enlaces polares en el PLA pueden hacerlo susceptible a la absorción de agua, lo que puede ser peligroso, ya el agua puede descomponer parcialmente el PLA y hacerlo aún más frágil.

Sus principales ventajas para el uso en la impresión 3D son, además de su biodegradabilidad, el hecho de que no crea gases tóxicos durante la fusión permitiendo que pueda ser impreso sin sistema de ventilación y su baja temperatura de transición vítrea.

A la temperatura de transición vítrea de 60-65 °C, la mayoría de los PLA, se ablandan y el material pierde rápidamente su rigidez. Esta característica es una desventaja en piezas que necesitan permanecer rígidas en ambientes calientes, pero también significa que el PLA una vez extruido tiene más tiempo para relajar cualquier tensión interna a medida que se enfría.

Las piezas PLA pueden imprimirse en una atmósfera no calentada, sin calor en la base y sin adhesivos especiales y no sufrirán deformaciones debido a las tensiones reducidas que retienen de la contracción por enfriamiento.

Su baja resistencia al impacto y su inestabilidad a bajas temperaturas, en comparación con otros plásticos de FFF, hacen que no se considere un buen material estructural.

2.5.2. ABS

El Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) es otro de los materiales poliméricos más utilizados en la impresión 3D.

El ABS debe sus propiedades a la mezcla de tres componentes: acrilonitrilo, butadieno y estireno. Presenta una estructura amorfa debido al grupo colgante de poliestireno, quien a su vez aporta rigidez a través de los enredos. El butadieno añade dureza al material, mientras que el acrilonitrilo otorga resistencia al calor y a la degradación ambiental.

Este material al derretirse produce gases tóxicos provocando un fuerte olor y causando dolores de cabeza rápidamente por lo que siempre se ha de asegurar que su proceso de impresión se realice en un espacio bien ventilado.

Su principal ventaja es su resistencia a temperaturas extremas, a temperaturas bajo cero mientras que otros materiales se fragilizan y pierden su funcionalidad, el ABS presenta una gran tenacidad, dureza y rigidez. Además, sus propiedades reológicas hacen que las superficies de las piezas sean relativamente lisas.

El mayor inconveniente en la impresión de este material es su elevada temperatura de transición vítrea, lo que hace que retenga las tensiones internas de contracción térmica en las primeras etapas de la impresión provocando posibles deformaciones en las piezas y que se despeguen de la base de impresión. Para paliar estos problemas existen varios métodos como el mantener la base a una temperatura elevada, generar balsas y soportes para una mejor adhesión, usar ventiladores para igualar la temperatura del plástico en el punto de deposición o el uso de adhesivos químicos en la base de la impresora.

2.5.3. Nylon

El nylon es un polímero que pertenece al grupo de las poliamidas, polímeros termoplásticos lineales. Su elevada temperatura de procesamiento y su resistencia

se deben a su estructura altamente cristalina. Presenta una temperatura de transición vítrea relativamente baja lo que indica que las regiones amorfas tienen buena movilidad y ayuda a que el material muestre flexibilidad.

Sus principales ventajas para la impresión 3D son su elevada dureza, su flexibilidad en la flexión y rigidez en la tensión, la resistencia al calor y al desgaste, así como la fuerte adhesión que existe entre las capas. Sin embargo, el nylon puede deformarse durante su fabricación debido al elevado coeficiente de expansión térmica, absorbe agua de la atmósfera fácilmente debido a su estructura molecular y su precio es más alto que otros materiales de impresión. Para remediar estos inconvenientes, el material deberá ser deshumidificado antes de imprimir para eliminar el agua absorbida.

2.5.4. TPU

El termoplástico poliuretano es un ejemplo de material flexible imprimible en FFF. El TPU es un bloque de varios monómeros hecho de largas regiones apolares que deslizan fácilmente entre sí, otorgándole flexibilidad y de cortas regiones polares que cristalizan.

Es un material que se deforma y se alarga fácilmente bajo presión a temperatura ambiente mediante el desplazamiento de las cadenas apolares, pero vuelve a su forma mientras las regiones cristalinas permanezcan intactas. El tener regiones moleculares que cambian, pero permanecen organizadas por regiones que no cambian es lo que lo permiten ser un material elastomérico.

El TPU permite utilizarse comúnmente en FFF ya que funde a una temperatura alrededor de los 230 °C y es resistente a la abrasión.

2.5.5. PETG

PETG es una versión modificada con glicol del Tereftalato de Polietileno (PET), el cual es el plástico usado más comúnmente, se utiliza en botellas, envases para alimentación o como tejido de poliéster.

Puede formar una estructura altamente cristalizada, pero los cristales crecen lentamente de forma que cuando se enfría rápidamente se vuelve amorfo y transparente.

Es un material semirrígido con buena resistencia al impacto, pero tiene una superficie ligeramente más suave que lo hace propenso al desgaste. El material

también se beneficia de grandes características térmicas, permitiendo que el plástico se enfríe eficientemente con una deformación casi insignificante.

Presenta una resistencia muy elevada a la absorción de humedad lo que lo permite almacenar para FFF incluso en condiciones de humedad.

2.5.6. PVA

El PVA es un material soluble en agua lo cual hace que sea la mejor opción para piezas que por su geometría o su forma de impresión necesitan un apoyo para sustentarse.

El alcohol polivinílico (PVA) es un polímero artificial compuesto principalmente de acetato de polivinilo por hidrólisis. Su principal característica es que es fácilmente degradable por organismos biológicos y en agua es un polímero de estructura cristalina solubilizado.

Entre sus características destacan su resistencia y flexibilidad, así como que es inodoro y tóxico. Sin embargo, estas propiedades dependen de la humedad, al tratarse de un material hidrosoluble es imprescindible guardar este material en un ambiente seco.

2.5.7. HIPS

El poliestireno de alto impacto (HIPS) se usa en FFF, al igual que el PVA, para la creación de balsas y material de apoyo para la pieza al imprimir. A diferencia del PVA, no se puede disolver en agua, en su lugar se usará limoneno.

Está formado por monómeros de estireno y butadieno, lo que le proporciona cadenas más flexibles para una mayor resistencia al impacto que el poliestireno simple.

El HIPS tiene características muy similares al ABS lo que lo convierte en el material de apoyo ideal para las impresiones con dicho material. Además, presenta una mejor estabilidad dimensional y es más ligero que el ABS, lo que lo convierte en una buena elección para piezas que van a desgastarse fácilmente o para usar en el caso de que se necesite un peso más ligero.

A continuación, se presenta una tabla que resume las propiedades clave de los materiales anteriores para FFF. Como se mencionó anteriormente, hay muchos factores que pueden afectar las propiedades de un polímero, por lo que la obtención

de especificaciones para los materiales suele ser una buena idea si están disponibles.

Propiedades	PLA	ABS	Nylon	TPU	PETG	PVA	HIPS
T. Extrusión (°C)	180-220	220-240	235-270	230- 260	230- 255	185- 200	220- 230
T.Cama, °C	20-55	80-110	60-80	40-60	55-70	45-60	50-60
Tg (°C)	60-65	105-110	47-60	-35	70-78	-	100
CTE(μm/m°C)	85	68-110	80-95	89-170	60-92	-	80-90

Tabla 1. Propiedades filamentos impresión FFF

2.6. Estudio de la mano humana

En este apartado se realizará un estudio de la mano humana, analizando la anatomía, las articulaciones que la forman y los movimientos que es capaz de realizar con el fin de conseguir las especificaciones para el diseño de la prótesis.

2.6.1. Anatomía

Es uno de los órganos más complejos de nuestro cuerpo, contiene una red de huesos, músculos, ligamentos, tendones, vasos sanguíneos y nervios que trabajan juntos para permitir la funcionalidad de esta extremidad.

La mano humana tiene 27 huesos:

- La muñeca está formada por 8 huesos carpianos divididos por la articulación mediocarpiana y se une al antebrazo por la articulación radiocarpiana
- La palma está formada por 5 huesos metacarpianos, que se unen a los dedos y a la muñeca en las articulaciones metacarpofalángica y carpometarcarpiana respectivamente
- Los dedos están formados por 14 falanges (distal, media y proximal)

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 2.- Estado del arte

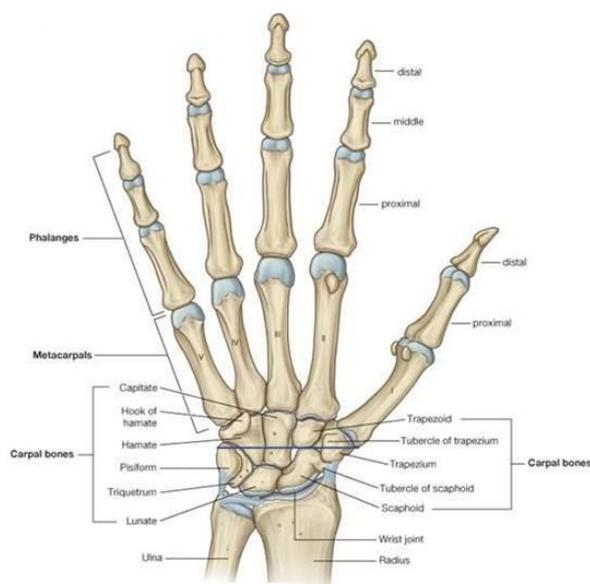


Figura 12. Estructura ósea de la mano [11]

Una comprensión completa de las articulaciones de la mano es esencial para poder conocer posteriormente la funcionalidad de la prótesis. Excepto el pulgar, cada dedo tiene cuatro articulaciones: la articulación interfalángica distal, la articulación interfalángica proximal, la articulación metacarpofalángica y la articulación carpometacarpiana [11].

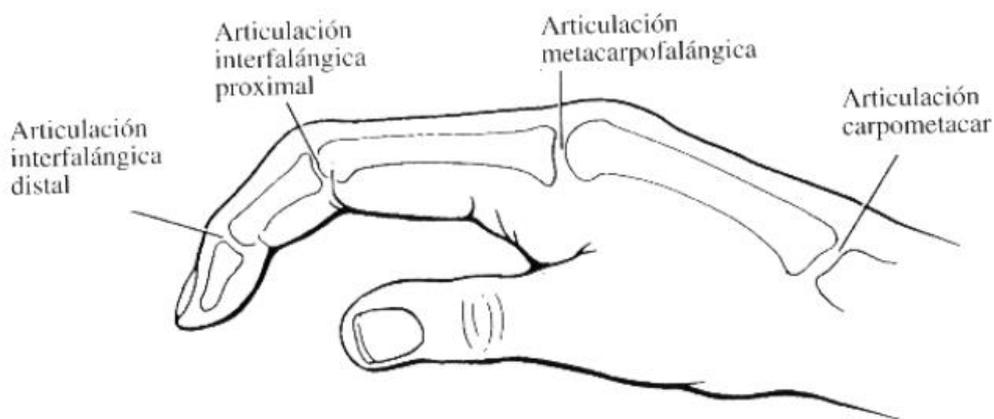


Figura 13. Articulaciones de la mano [12]

- **Articulaciones de bisagra**

Permiten el movimiento sólo hacia atrás y hacia delante (extensión y flexión). Es el caso de las articulaciones interfalángicas de los dedos.

- **Articulaciones condíleas**

Permiten la extensión y la flexión, pero también una ligera desviación lateral. En este grupo están las articulaciones de los nudillos, articulaciones metacarpofalángicas

- **Articulaciones deslizantes**

Se encuentran entre los huesos del carpo (metacarpo-carpo y medio-carpo) y permiten que los huesos de la muñeca se deslicen uno con respecto al otro.

- **Articulaciones de asiento**

Son aquellas que incluyen superficies opuestas que son recíprocamente convexas y cóncavas, como la articulación carpometacarpiana del pulgar. Esta articulación se puede considerar como una articulación de tipo universal ya que permite la articulación en todas las direcciones.

2.6.2. Movimientos

En este apartado se analizarán los movimientos articulatorios de la mano. Los arcos de movilidad de las articulaciones determinan los grados que una articulación puede moverse sin sufrir lesiones.

2.6.2.1. Movimientos de la muñeca

El movimiento de la muñeca se realiza en las articulaciones radiocarpiana y mediocarpiana. Se realiza en el plano de flexión-extensión y desviación radiocubital [13].

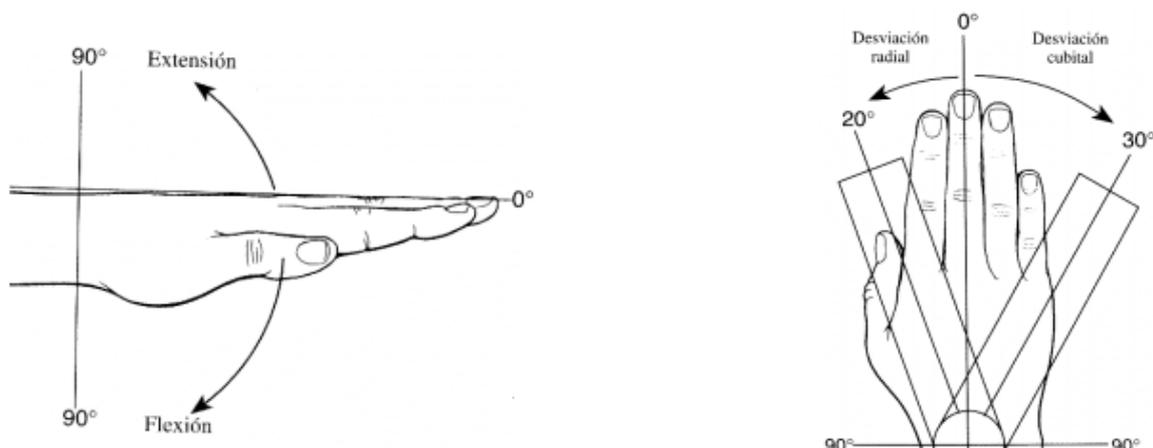


Figura 14. Movimientos de la muñeca [13]

2.6.2.2. Movimientos de los dedos

Se recoge un análisis de los movimientos de los dedos exceptuando el pulgar que se estudiara aparte [14].

- Movimiento de las articulaciones metacarpofalángicas (MCP)
 - Movimientos de flexión y extensión
 - Extensión: 0-40 °
 - Flexión: 85-100 °

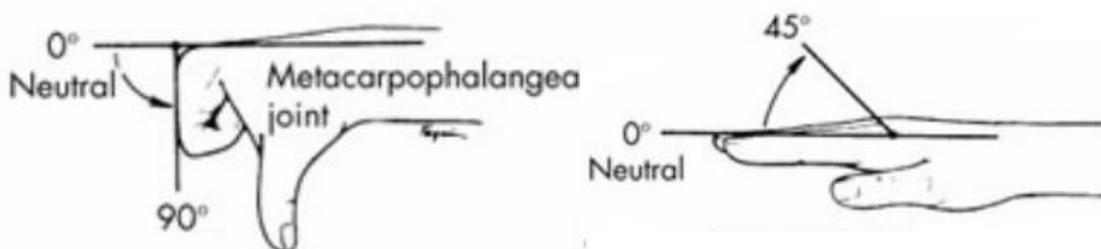


Figura 15. Movimientos de las articulaciones metacarpofalángicas [14]

- Movimiento de las articulaciones interfalángicas proximales (PIP)
 - Movimientos de flexión y extensión
 - Extensión: Total
 - Flexión: 90-120 °

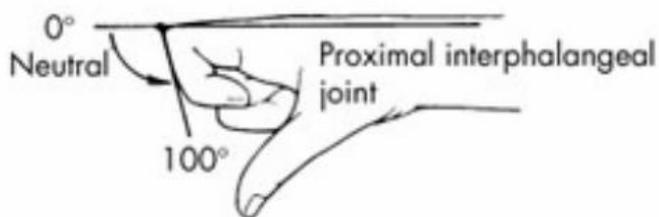


Figura 16. Movimientos de las articulaciones interfalángicas proximales [14]

- Movimiento de las articulaciones interfalángicas distales (DIP)
 - Movimientos de flexión y extensión
 - Extensión: Total
 - Flexión: 80-90°

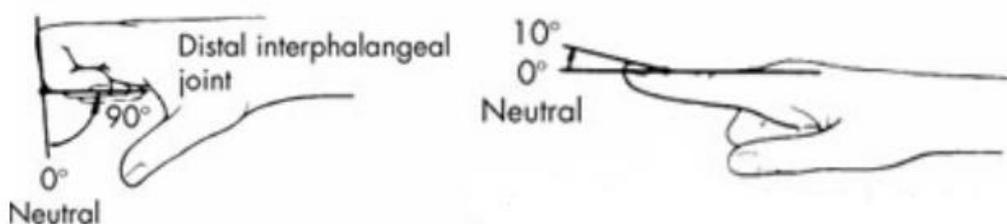


Figura 17. Movimientos de las articulaciones interfalángicas proximales [14]

2.6.2.3. Movimientos del pulgar

Los movimientos del pulgar son complejos y reflejan la importancia general de este en la función de la mano [15].

- Movimiento de la articulación metacarpofalángica (MCP)
 - Movimientos de flexión y extensión
 - Extensión: Total
 - Flexión: 40-90 °

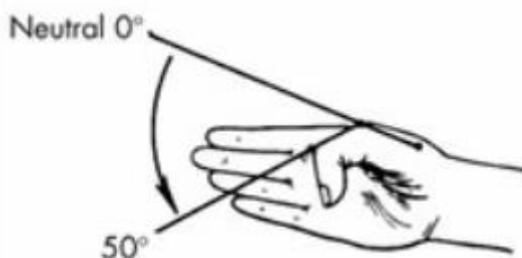


Figura 18. Movimiento de la articulación metacarpofalángica [15]

- Movimiento de la articulación interfalángica (IP)
 - Movimientos de flexión y extensión
 - Extensión: Total

- Flexión: 80-90 °

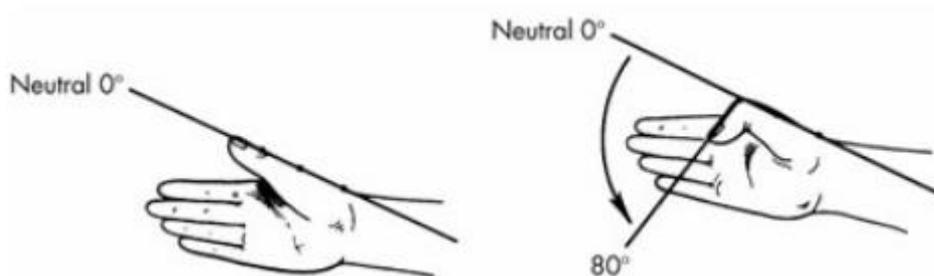


Figura 19. Movimiento de la articulación interfalángica [15]

- Movimiento de la articulación carpometacarpal (CMC)
 - Movimientos de flexión, extensión y abducción del pulgar, que es el movimiento del pulgar en el plano perpendicular al plano de la palma de la mano
 - Extensión: 0-20 °
 - Flexión: 15-45 °
 - Abducción: 50-70 °

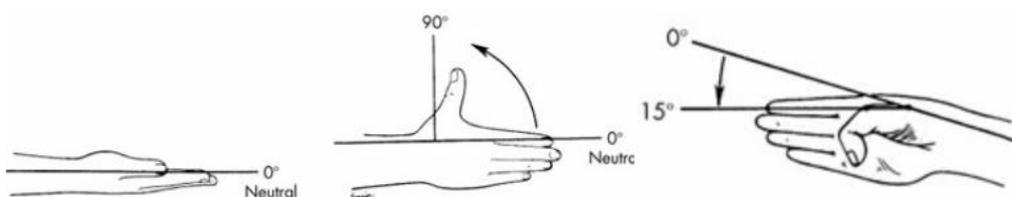


Figura 20. Movimiento de la articulación carpometacarpal [15]

2.7. Estudio de fabricación aditiva de prótesis de mano

Los avances en programas de diseño asistido por ordenador (CAD) y fabricación aditiva ofrecen hoy en día la posibilidad de diseñar e imprimir prótesis con un coste muy inferior al resto de prótesis.

El objetivo de este apartado es conocer lo que ya existe en el mercado para, con las herramientas antes mencionadas, desarrollar un dispositivo propio.

2.7.1. Estudio de mercado de prótesis de mano low cost

En los últimos cinco años se ha producido un desarrollo significativo en la impresión 3D de prótesis de miembros superiores. La mayor parte del desarrollo de las prótesis impresas en 3D comenzó después del establecimiento de la comunidad global e-NABLE. Esta comunidad fue fundada por el profesor Jon Schull del Instituto de Tecnología de Rochester e Ivan Owen.

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 2.- Estado del arte

Se inició a partir de 2011, cuando Ivan Owen diseñó un dispositivo manual mecánico y publicó un video de ello en YouTube. Este vídeo llegó a Richard un carpintero de Sudáfrica que había perdido cuatro de sus dedos en un accidente de carpintería y busco su ayuda.

Ivan desarrolló un par de dedos para Richard basado en un diseño protésico del siglo XIX, y comenzaron a trabajar juntos para mejorar el diseño. Poco después, comenzaron a trabajar en una prótesis para un niño de cinco años llamado Liam, que nació sin pulgar ni dedos en su mano derecha. Cuando Ivan se dio cuenta la necesidad de diseñar un dispositivo que escalara a medida que crecía, inventó la prótesis impresa en 3D para llevar a cabo la tarea.

En 2013, el profesor Jon Schull e Ivan Owen crearon la comunidad e-NABLE con el objetivo de encontrar una solución para aquellas personas, en su mayoría niños, que necesitan una prótesis de mano o brazo, y que disponen de medios muy limitados.

Para desarrollar un diseño, se evaluarán las fortalezas y debilidades de las diferentes prótesis disponibles para imprimir en 3D.

2.7.1.1. Raptor Hand

Este diseño es uno de los más populares pese a que su apariencia es más robusta que otros dispositivos debido al diseño rectangular de la palma.

La unión entre las distintas piezas se realiza mediante la embutición de una en otra. Los únicos tornillos que utiliza son para el sistema de tensado y la sujeción del velcro a la palma de la mano.

Los cables de tensado se localizan en la palma de la mano sobre ella, por lo que no se encuentran protegidos.

El sistema de tensado funciona mediante un soporte deslizante para varias clavijas a las que se atan los cables, se puede atornillar para una tensión adicional.



Figura 21. Prótesis Raptor Hand, superficie externa (a) e interna (b) ^[16]

CARACTERÍSTICAS:

- Especificaciones cinemáticas:
 - Número de articulaciones: 10
 - Actuadores: 1
- Rango de movimiento:
 - MCP: 0-80°
 - PIP: 0-90°
 - DIP: N/A
- Tipo de agarre:
 - Flexión pulgar: 0-70°
 - Cierre pulgar: no es posible
 - Agarre adaptativo: no es posible

2.7.1.2. Raptor Reloaded

Este modelo representa una versión actualizada y mejorada de Raptor Hand. Por un lado, se mejora el diseño de la palma haciéndola menos robusta con un diseño más redondeado y por otro se aumentan los canales empotrados permitiendo que los cables pasen por encima de la mano sin dejar de ser protegido.

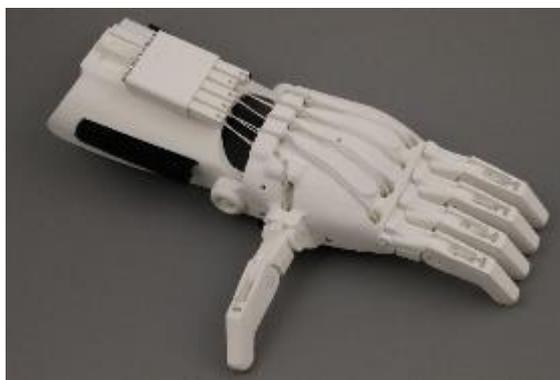


Figura 22. Prótesis Raptor Reloaded [16]

CARACTERÍSTICAS:

- Especificaciones cinemáticas:
 - Número de articulaciones: 10
 - Actuadores: 1

- Rango de movimiento:
 - MCP: 0-80°
 - PIP: 0-90°
 - DIP: N/A
- Tipo de agarre:
 - Flexión pulgar: 0-90°
 - Cierre pulgar: no es posible
 - Agarre adaptativo: no es posible

2.7.1.3. Cyborg Beast

Es una de las manos protésicas impresas en 3D más populares. Fue desarrollada por Jorge Zuñiga y su grupo de investigación de la Universidad de Creighton.

Tiene una apariencia atractiva y natural. Entre sus características están las puntas texturizadas de los dedos para mejorar el agarre, el paso protegido de los cables a través del cuerpo de la palma de la mano y el sistema de tensado integrado en el encaje. Al igual que la mayoría de las prótesis impresas en 3D, el pulgar se fija en un ángulo lo que lo hace mucho más fuerte mientras que limita la variable puños.

Una de las desventajas de esta mano es que se usan sujetadores metálicos para todos los pasadores lo que provoca un aumento del coste, reduce la capacidad de escalar el diseño y los tornillos se pueden aflojar y caer fácilmente.

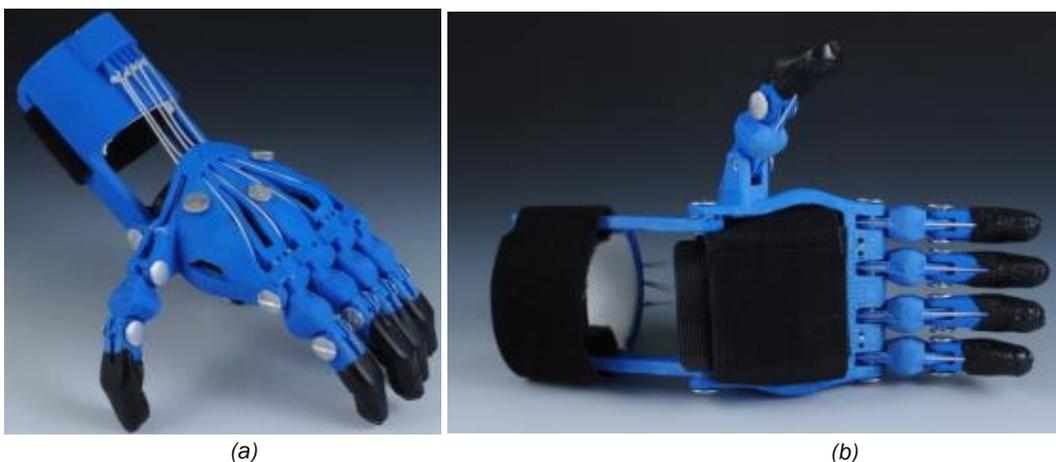


Figura 23. Prótesis Cyborg Beast superficie externa (a) e interna (b) ^[16]

CARACTERÍSTICAS:

- Especificaciones cinemáticas:
 - Número de articulaciones: 10
 - Actuadores: 1
- Rango de movimiento:
 - MCP: 0-45°
 - PIP: 0-60°
 - DIP: N/A
- Tipo de agarre:
 - Flexión pulgar: 0-60°
 - Cierre pulgar: no es posible
 - Agarre adaptativo: no es posible

2.7.1.4. Talon Hand 2.0

Este diseño de prótesis difiere principalmente de los anteriores en que la pieza de encaje con el muñón no está impresa en 3D sino que es una pieza de cuero cortado. Esta característica lo hace más cómodo y atractivo, pero también resulta más cara y usa más de 20 tornillos aumentando el peso de la mano.

El cuero elimina parte de la tensión del plástico, aumentando la vida útil de la prótesis.



Figura 24. Prótesis Talon Hand 2.0 [16]

CARACTERÍSTICAS:

- Especificaciones cinemáticas:
 - Número de articulaciones: 10
 - Actuadores: 1

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 2.- Estado del arte

- Rango de movimiento:
 - MCP: 0-90°
 - PIP: 0-90°
 - DIP: N/A
- Tipo de agarre:
 - Flexión pulgar: 0-90°
 - Cierre pulgar: no es posible
 - Agarre adaptativo: no es posible

2.7.1.5. Odysseus Hand

Es una versión inicial de la mano Talon Hand. Este modelo utiliza solo tres dedos por lo que la fuerza que se necesita para cerrar la mano se reduce en gran medida. A pesar de tener un número reducido de piezas, la forma rectangular de la palma lo hacen un diseño más robusto.



(a)



(b)

Figura 25. Prótesis Odysseus Hand superficie externa (a) e interna (b) ^[16]

CARACTERÍSTICAS:

- Especificaciones cinemáticas:
 - Número de articulaciones: 6
 - Actuadores: 1
- Rango de movimiento:
 - MCP: 0-90°
 - PIP: 0-45°
 - DIP: N/A
- Tipo de agarre:

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 2.- Estado del arte

- Flexión pulgar: 0-45°
- Cierre pulgar: no es posible
- Agarre adaptativo: no es posible

2.7.1.6. Flexy Hand

Es la prótesis de impresión 3D de aspecto más realista disponible actualmente. En este diseño los cables de los dedos, que existían en otros modelos de prótesis para devolver los dedos a su posición extendida se sustituyen por un filamento flexible que proporciona la elasticidad característica de la mano.

La principal desventaja de este diseño de prótesis es que los cables desprotegidos y en contacto directo con el brazo del usuario lo que puede ocasionar molestias en él y que los cables se rompan con más facilidad.



Figura 26. Prótesis Flexy Hand, superficie externa (a) e interna (b) [16]

CARACTERÍSTICAS:

- Especificaciones cinemáticas:
 - Número de articulaciones: 14
 - Actuadores: 1
- Rango de movimiento:
 - MCP: 0-45°
 - PIP: 0-80°
 - DIP: 0-45°
- Tipo de agarre:
 - Flexión pulgar: 0-30°
 - Cierre pulgar: no es posible
 - Agarre adaptativo: no es posible

2.7.1.7. Dextrus

Representa el único modelo cuyo accionamiento es mioeléctrico, sin embargo, al tratarse de un modelo de prótesis de código abierto, se ha decidido incluir en la investigación.



Figura 27. Prótesis Dextrus [17]

CARACTERÍSTICAS:

- Especificaciones cinemáticas:
 - Número de articulaciones: 15
 - Actuadores: 5
- Rango de movimiento:
 - MCP: 0-90°
 - PIP: 0-90°
 - DIP: 0-90°
- Tipo de agarre:
 - Flexión pulgar: 0-90°
 - Cierre pulgar: si
 - Agarre adaptativo: no es posible

3. DISEÑO Y FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO

El estudio anterior llevado a cabo de los diferentes modelos junto con el análisis de la mano humana y la fabricación aditiva permiten en este capítulo el desarrollo, estudio y fabricación mediante fabricación aditiva de una mano protésica.

3.1. Diseño de la prótesis

En este apartado se realizará el análisis de cada una de las piezas que forman la prótesis. Para la creación de ellas se ha utilizado la herramienta de CAD, Autodesk Inventor.

El diseño está inspirado en las prótesis Raptor Reloaded y Cyborg Beast. Las dimensiones fundamentales se han generado a partir de esta última y posteriormente se adaptarán considerando que es para un niño, que posee movilidad de muñeca, de entre 8 y 13 años según la tabla de escalas proporcionada por e-Nable ^[18].

El mecanismo de funcionamiento se basa en el uso de tensores para producir la apertura y cierre de los dedos a través de la fuerza y movimiento de la muñeca del usuario.

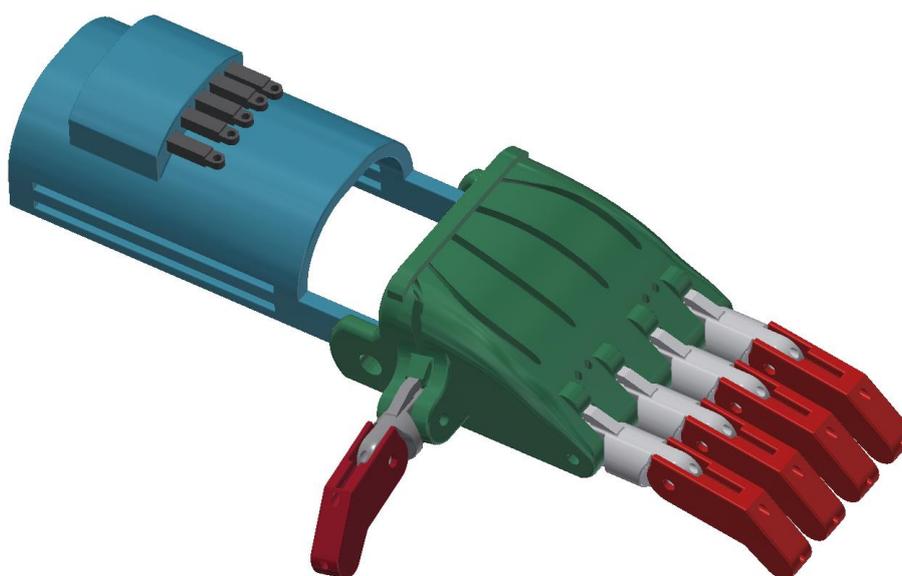


Figura 28. Prótesis ensamblada

3.1.1. Falange 1ª

Esta pieza hace la función de la falange proximal, se ha diseñado de forma cilíndrica con el fin de que se asemeje más a un dedo de la mano humana.

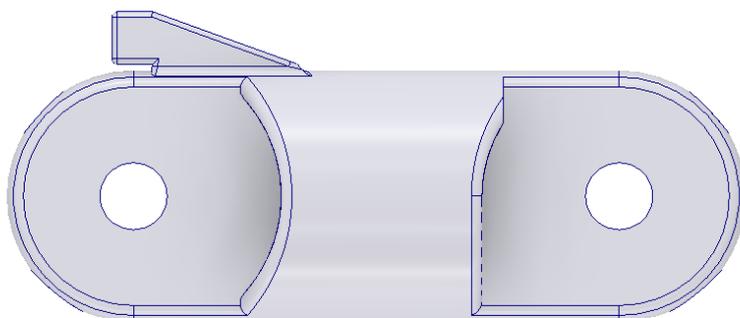


Figura 29. Vista lateral falange 1ª

En la figura 29 se observan dos orificios, el izquierdo se articula con la palma de la mano con un pasador simulando la articulación metacarpofalángica. En el lado derecho se articula con la falange 2ª-3ª mediante otro pasador, formando la articulación interfalángica proximal.

En el medio de la falange hay un saliente cuya función es servir de tope con la primera falange.

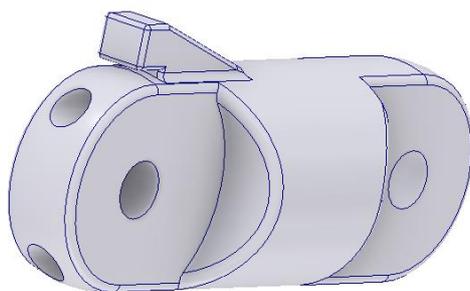


Figura 30. Vista isométrica falange 1ª

En la parte superior de falange se ha diseñado un “nudillo” que servirá para hacer de tope con la pieza de la palma de la mano.

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 3.- Diseño y fabricación aditiva de prótesis de mano

En la cara frontal del dedo se han realizado dos agujeros pasantes para permitir que los cables pasen a través de ellos.

3.1.2. Falange 2ª-3ª

Esta pieza corresponde a la falange distal y a la falange media de una mano humana.

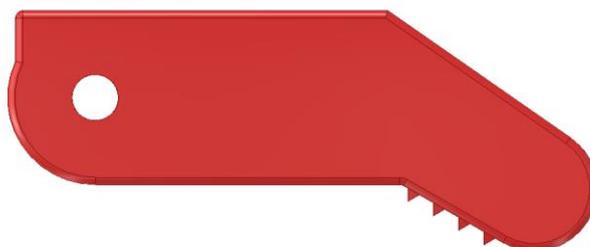


Figura 31. Vista lateral falange 2ª-3ª

En la figura 31 vemos que la pieza dispone de dos zonas diferenciadas, una horizontal que corresponde a la falange media y otra inclinada un ángulo de 35°, que sustituye a la falange distal.

La falange distal se ha diseñado en posición de agarre y con unas pequeñas protuberancias para mejorar la sujeción.

El orificio de la figura corresponde a la unión con la falange 1º que simula la articulación interfalángica proximal.

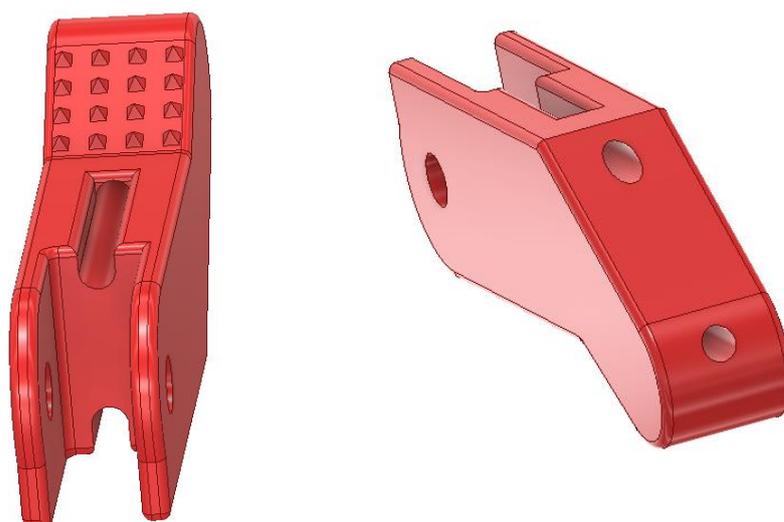


Figura 32. Vistas isométricas parte frontal y trasera falange 2ª-3ª

La sección central dispone de un espacio para encajar la falange 1ª. Al igual que la falange anterior, posee dos agujeros pasantes para permitir el paso de los cables.

3.1.3. Falange 1ª del pulgar

Corresponde a la falange proximal del dedo pulgar. El diseño es similar al de la falange 1ª.

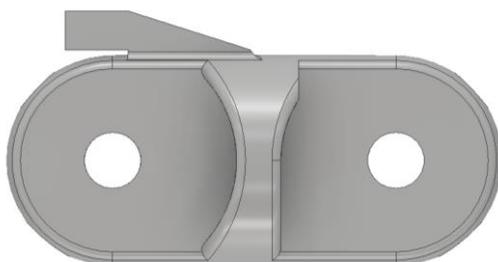


Figura 33. Vista lateral falange 1ª del pulgar

Al igual que la falange 1ª presenta dos orificios, el izquierdo se articula con la palma de la mano con un pasador simulando la articulación metacarpofalángica. En el lado derecho se articula con la falange 2ª-3ª del pulgar mediante otro pasador, formando la articulación interfalángica proximal.

En el medio de la falange hay un saliente cuya función es servir de tope con la falange 2ª-3ª del pulgar.

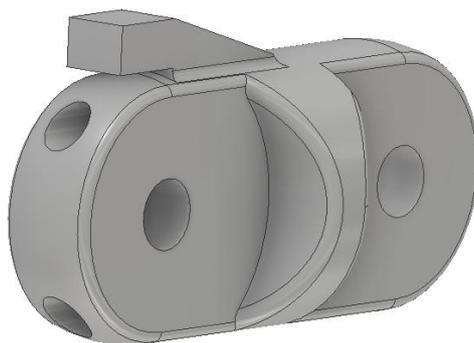


Figura 34. Vista isométrica falange 1ª del pulgar

3.1.4. Falange 2^a-3^a del pulgar

Esta pieza correspondería a la falange distal del dedo pulgar, sin embargo, se ha diseñado con la misma geometría que la falange 2^a-3^a incorporando la falange media.



Figura 35. Vista lateral falange 2^a-3^a del pulgar

El orificio de la figura corresponde a la unión con la falange 1^a del pulgar que simula la articulación interfalángica proximal

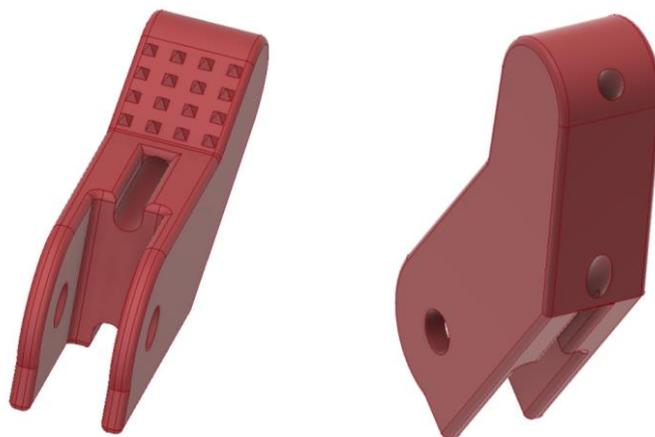


Figura 36. Vistas isométricas parte frontal y trasera falange 2^a-3^a del pulgar

3.1.5. Palma de la mano

Es la pieza con mayor dificultad de diseño y la base para el correcto funcionamiento de la prótesis.

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 3.- Diseño y fabricación aditiva de prótesis de mano

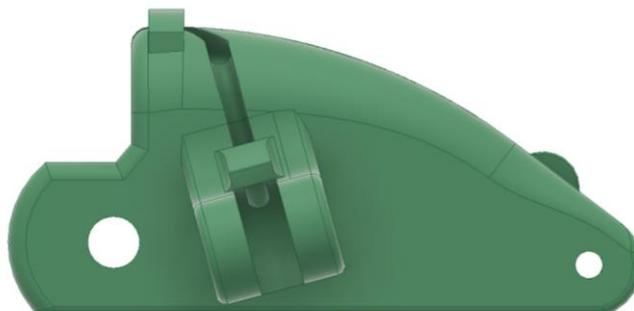


Figura 37. Vista lateral palma de la mano

Se ha diseñado con una cierta curvatura con el fin de emular una mano humana en la posición de agarre.

En su vista lateral se aprecian dos orificios, el situado en el lado derecho permitirá el ensamblaje con las falanges proximales (articulación metacarpofalángica). Mientras que los del lado izquierdo sirven para unir esta pieza con el encaje y formar la articulación carpometarcarpiana.

Uno de los mayores problemas a la hora de diseñar la palma fue el diseño del pulgar, debido al ángulo con el cual que hay que posicionarlo para que este en relación con el resto de los dedos y permita la manipulación de objetos. Para solventar este problema se injertó un cuerpo para la unión entre las falanges del pulgar y el resto de la mano.

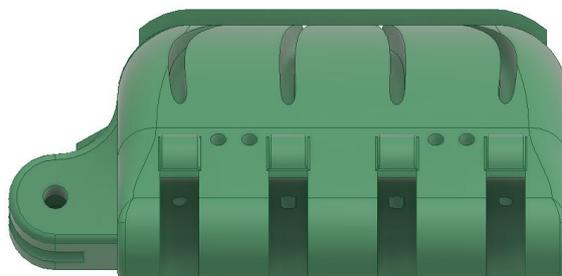


Figura 38. Vista frontal palma de la mano

En la parte frontal de la mano se han dispuesto alojamientos para las falanges 1°. Desde estos parten canales hasta la parte anterior de la palma por donde pasarán los cables que llegan hasta la pieza de encaje y que permiten la extensión de la mano.

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 3.- Diseño y fabricación aditiva de prótesis de mano

Para limitar la rotación de los dedos, se crearon topes entre los espacios de los dedos. Al lado de éstos se localizan dos agujeros pasantes por donde irá uno de los cables y se anudará con el cable del dedo contiguo en la parte inferior de la palma.

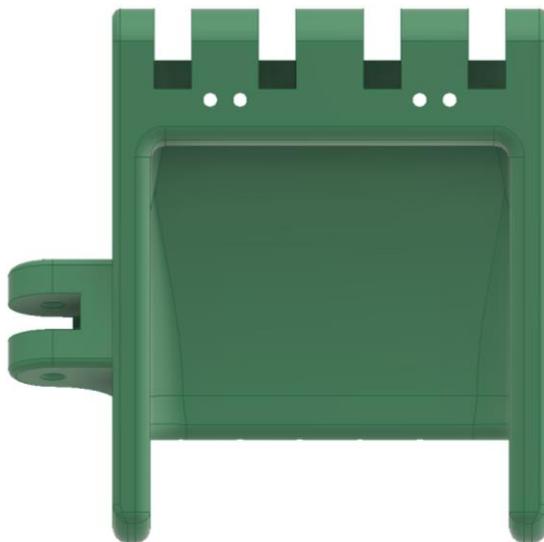


Figura 39. Vista inferior palma de la mano

La parte interior de la mano fue diseñada para tener una curvatura poco profunda, lo que permite una mejor impresión sin soportes.

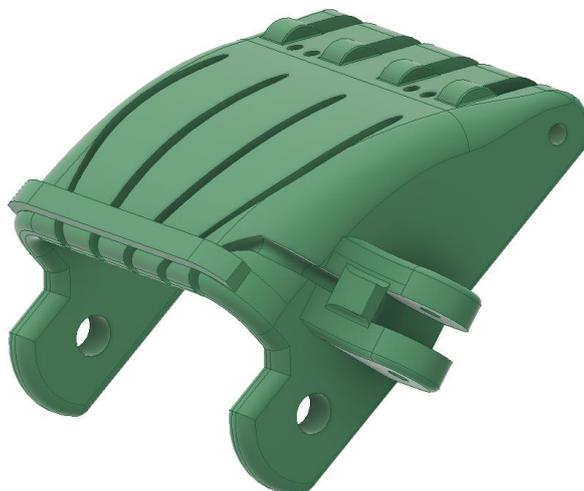


Figura 40. Vista isométrica palma de la mano

3.1.6. Encaje

Es la pieza que está en contacto con el brazo. El diseño se ha realizado con cierta curvatura para facilitar su adaptación al brazo.

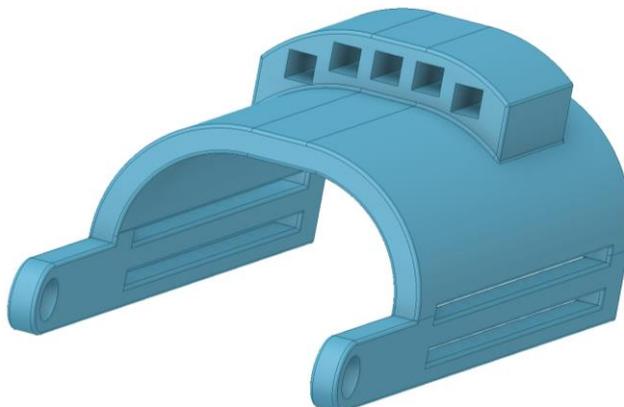


Figura 41. Vista isométrica del encaje

Sobre la parte superior del encaje se realiza un soporte para situar los tensores. Por la parte trasera del soporte se realizan cinco agujeros donde se introducirán unos tornillos, mientras que por la parte delantera se realizarán a la misma altura unas cavidades prismáticas para colocar las piezas que harán la función de tensores. Los tornillos permitirán tensar el hilo dispuesto en las piezas en dirección opuesta a los dedos.

Los extremos cilíndricos del encaje se unen con la palma de la mano, simulando la articulación carpometacarpiana, lo cual permite el movimiento de flexión para poder cerrar y abrir los dedos.

En las caras laterales se realizaron dos ranuras paralelas que servirán de guía para hacer pasar el velcro por ellas y facilitar la sujeción de la prótesis al brazo.

3.1.7. Tensores

Se sitúan en las cavidades dispuestas en la pieza de encaje. En un principio se diseñaron con forma circular pero finalmente se optó por el diseño rectangular para evitar su rotación y desplazamiento dentro de las cavidades.

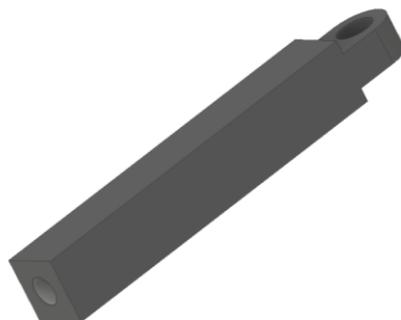


Figura 42. Vista isométrica de los tensores

En la figura 42, se observa un saliente con un agujero donde se atará el cable. Mientras que en el lado opuesto el agujero que existe es para introducir un tornillo que permita tensar el hilo al llevar la pieza en dirección contraria a la dirección de los dedos.

3.2. Análisis estático

A continuación, se realiza un análisis de elementos finitos (FEA), mediante el software Nastran In-CAD, en las piezas que se consideran más susceptibles para detectar fuerzas y deformaciones excesivas.

Los casos que se van a analizar por el método de elementos finitos son:

- Falange 1ª - falange 2ª-3ª
- Palma de la mano – falanges

Antes de comenzar con el proceso de análisis se crea un pasador para articular la unión entre falanges y otro para la unión de la palma con las falanges.

• Materiales

El primer paso en el análisis es la asignación del material a cada componente, tanto la palma como las falanges se fabricarán con material PLA, descrito más adelante, mientras que para los pasadores se elige acero inoxidable.

CARACTERÍSTICAS PLA

Módulo elástico	2346,5 MPa
Límite elástico	49,5 MPa
Límite de tracción	45,6 MPa
Coefficiente de Poisson	0,36
Densidad	1,25 g/cm ³

Tabla 2. Características del PLA

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 3.- Diseño y fabricación aditiva de prótesis de mano

CARACTERÍSTICAS ACERO INOXIDABLE

Módulo elástico	193000 MPa
Límite elástico	540 MPa
Límite de tracción	250 MPa
Coefficiente de Poisson	0,3
Densidad	8 g/cm ³

Tabla 3. Características del acero inoxidable

- **Tipos de elementos**

Una vez se ha asignado el material se ha de caracterizar el tipo de elemento. En este caso todos los cuerpos se tratan de sólidos y la malla que proporciona Nastran es tetraédrica con elementos 3D.

3.2.1. Caso estudio N°1: Falange 1ª – falange 2ª-3ª

- **Objetivo del análisis**

En primer lugar, se hará el estudio de la primera y segunda falange unidas por un pasador.

El objetivo de este análisis es evaluar cómo se comporta la unión entre las falanges y verificar las zonas más débiles.

- **Restricciones**

Se considerará que la falange 1ª esta empotrada en su orificio libre.

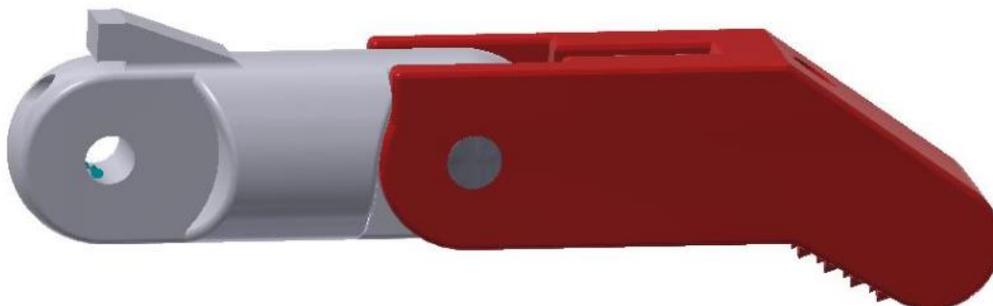


Figura 43. Vista apoyos caso estudio N°1

- **Definición y aplicación de la carga**

Se aplica una carga perpendicular en la punta del dedo ya que será la zona que este en contacto con el objeto. Se elige una carga de 10 N para estudiar el comportamiento de las piezas ante una carga de este tipo y ser un valor exacto para poder extrapolar a otras cargas.

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 3.- Diseño y fabricación aditiva de prótesis de mano

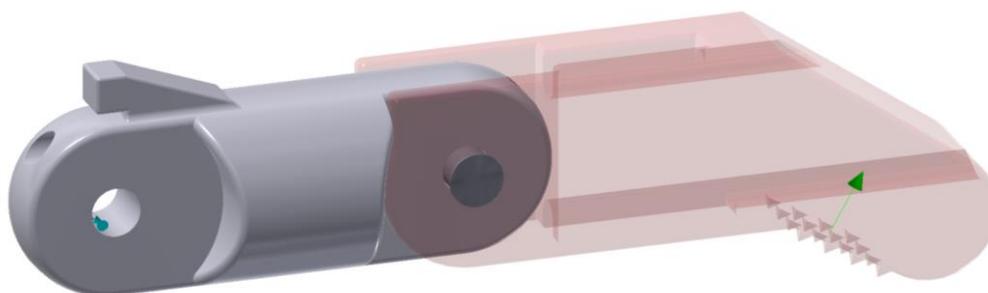


Figura 44. Vista aplicación de la carga

• Contactos

El siguiente paso será definir los contactos que se producen entre las piezas. La unión entre las falanges simula la articulación por lo que se ha de permitir el giro de ambas falanges, se definen tres contactos de esta condición:

- Separación falange 1ª – pasador
- Separación falange 2ª-3ª – pasador
- Separación falange 2ª-3ª – pasador

Las caras laterales planas del saliente de la falange 1ª sirven como tope para la falange 2ª – 3ª, de esta condición se definen los dos últimos contactos:

- Deslizamiento sin separación falange 2ª – 3ª – falange 1ª
- Deslizamiento sin separación falange 2ª – 3ª – falange 1ª

• Análisis

Una vez introducidas las condiciones de contorno y las cargas correspondientes, se procede a realizar el análisis.

DESPLAZAMIENTOS

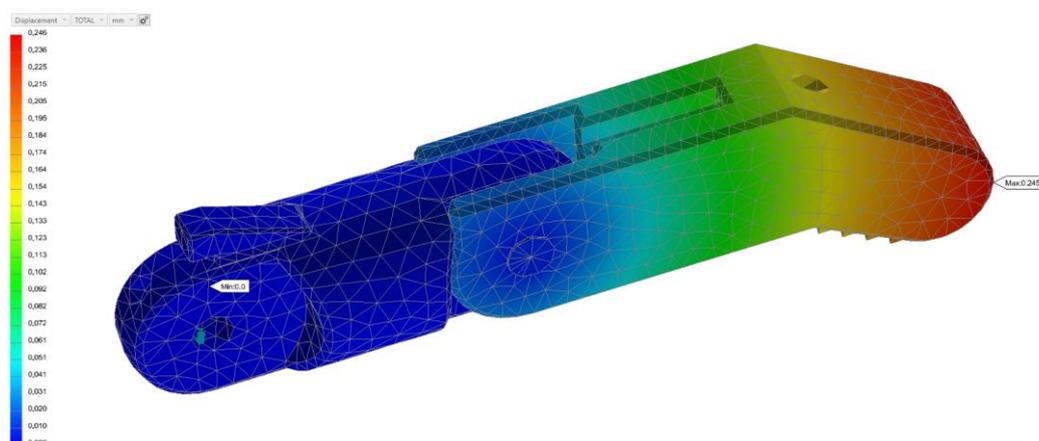


Figura 45. Desplazamientos caso estudio N°1

TENSIONES DE VON MISES

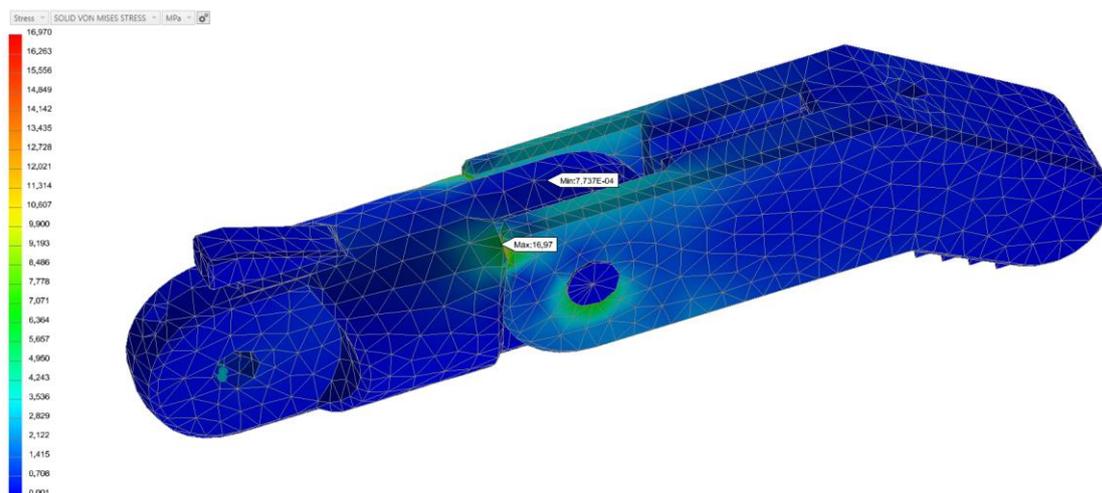


Figura 46. Tensiones Von Mises caso estudio N°1

Los resultados obtenidos son muy satisfactorios: la mayor tensión de Von Mises es de 16,97MPa y el desplazamiento de tan sólo 0,246mm.

El tamaño de malla elegido proporciona 22586 nodos y 13238 elementos. Para asegurar la convergencia de la malla y garantizar los resultados obtenidos se va a refinar la malla y se compararán los resultados obtenidos.

Se obtienen nuevos resultados, más precisos. Sus valores son:

DESPLAZAMIENTOS

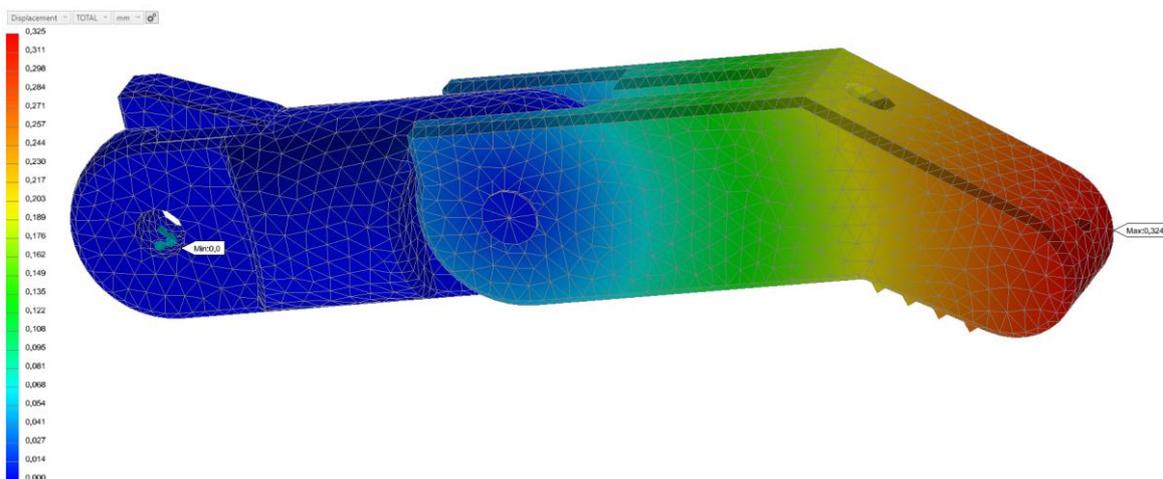


Figura 47. Desplazamientos caso estudio N°1 malla refinada

TENSIONES DE VON MISES

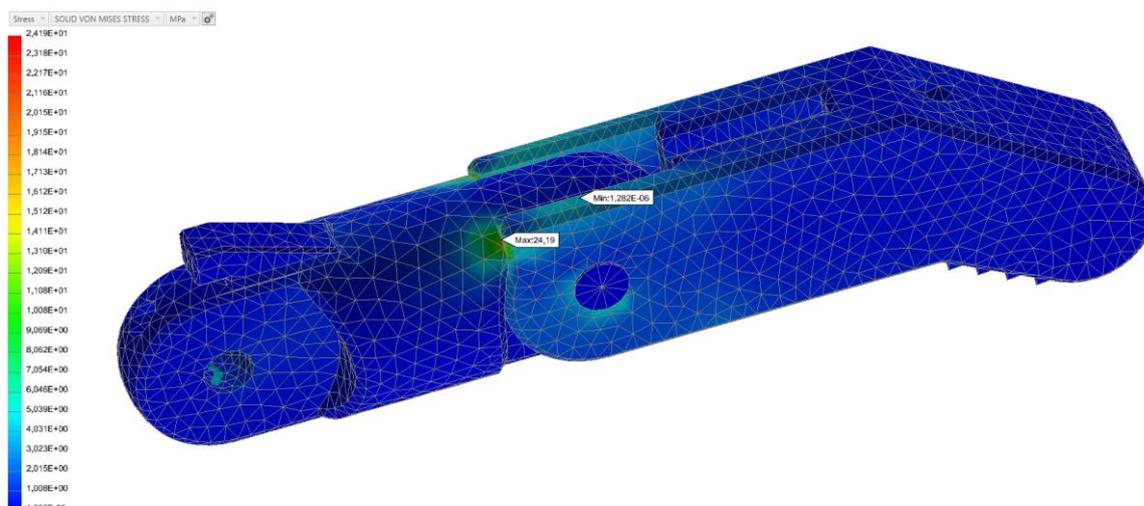


Figura 48. Tensiones Von Mises caso estudio N°1 malla refinada

Este tamaño de malla proporciona 43047 nodos y 25995 elementos. Se han duplicado los nodos y elementos mientras que los resultados apenas han variado por lo que se considera que el tamaño de malla es lo suficientemente discreta como para obtener resultados fiables.

Con este mallado se dan por buenos los resultados y se puede considerar un porcentaje de error menor del 1%.

- **Evaluación de resultados**

Las tensiones más elevadas que se dan son de 24,19MPa, bastante por debajo del límite elástico del material.

El mayor desplazamiento es de tan sólo 0,325mm en la dirección de aplicación de la carga, lo cual se considera un resultado muy satisfactorio dadas las dimensiones de las piezas.

Los resultados obtenidos son los esperados: tensiones y desplazamientos pequeños. Igualmente, la situación de las zonas más desfavorables es lógica ya que las tensiones se obtienen en la zona de contacto siendo además esta área pequeña mientras que el desplazamiento máximo se localiza en el punto de aplicación de la carga.

3.2.2. Caso estudio N°2: Palma – falanges

- **Objetivo del análisis**

El objetivo de este análisis es evaluar cómo se comporta la unión entre la palma y las falanges y verificar las zonas más débiles.

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 3.- Diseño y fabricación aditiva de prótesis de mano

Para estudiar los efectos que se producen en la palma al aplicar una carga en la punta de dedo, se considera que las falanges están totalmente unidas como si fuese una única falange.

- **Restricciones**

Se quiere conocer el comportamiento de la unión por lo que suceda detrás de ella no interesa para este análisis. Se considerará que la cara de la parte trasera de la palma está empotrada.



Figura 49. Vista apoyos caso estudio N°2

- **Definición y aplicación de la carga**

Al igual que en el caso anterior se aplicará una carga de 10 N de forma perpendicular a la punta del dedo.



Figura 50. Vista aplicación de la carga

- **Contactos**

El siguiente paso será definir los contactos que se producen entre las piezas. La unión entre la palma y la falange simula la articulación por lo que se ha de permitir el giro, se definen tres contactos de esta condición:

- Separación falange 1ª – pasador palma
- Separación palma – pasador palma
- Separación palma – pasador palma

El nudillo de la falange 1ª se moverá hasta los topes definidos en la palma de la mano:

- Separación sin deslizamiento palma – falange 1ª

Por último, se define la unión entre las falanges. Se ha considerado que están totalmente unidas.

- **Análisis**

Tras introducir las condiciones de contorno y las cargas correspondientes, se procede a realizar el análisis.

DESPLAZAMIENTOS

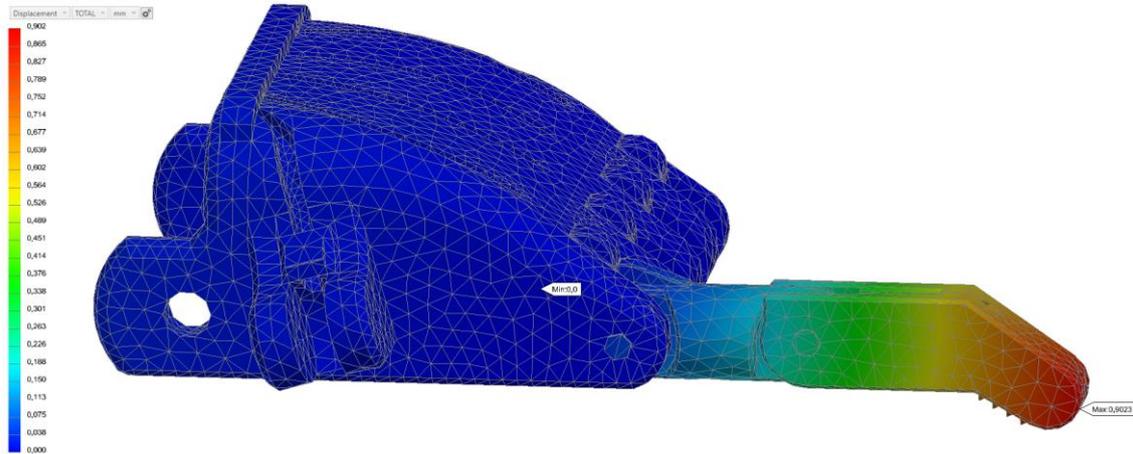


Figura 51. Desplazamientos caso estudio N°2

TENSIONES DE VON MISES

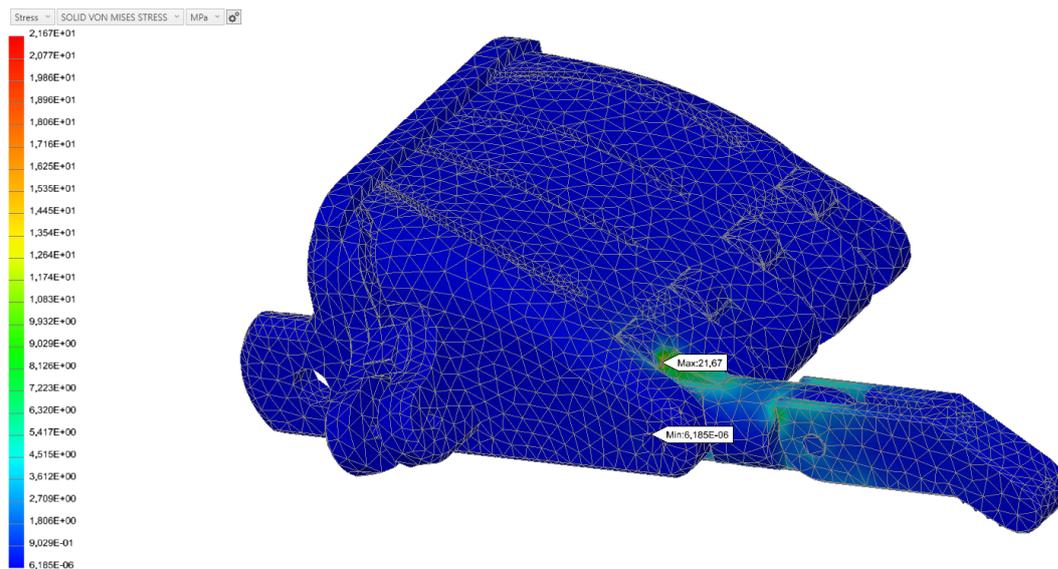


Figura 52. Tensiones Von Mises caso estudio N°2

Los resultados obtenidos son satisfactorios: la mayor tensión de Von Mises es de 21,67MPa y el desplazamiento de 0,902mm.

El tamaño de malla elegido proporciona 83622 nodos y 51067 elementos. Para asegurar la convergencia de la malla y garantizar los resultados obtenidos se va a refinar la malla y se compararán los resultados obtenidos.

Se obtienen nuevos resultados, más precisos. Sus valores son:

DESPLAZAMIENTOS

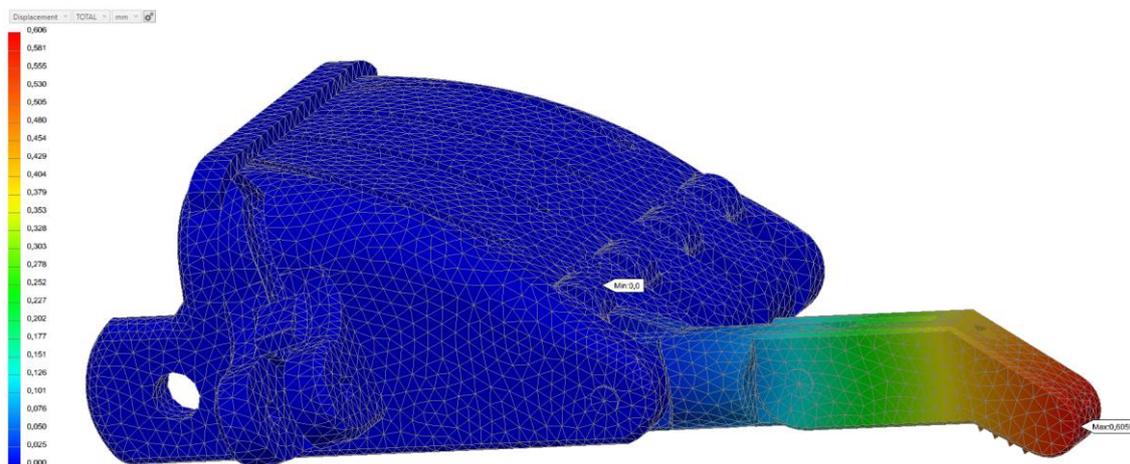


Figura 53. Desplazamientos caso estudio N°2 malla refinada

TENSIONES DE VON MISES

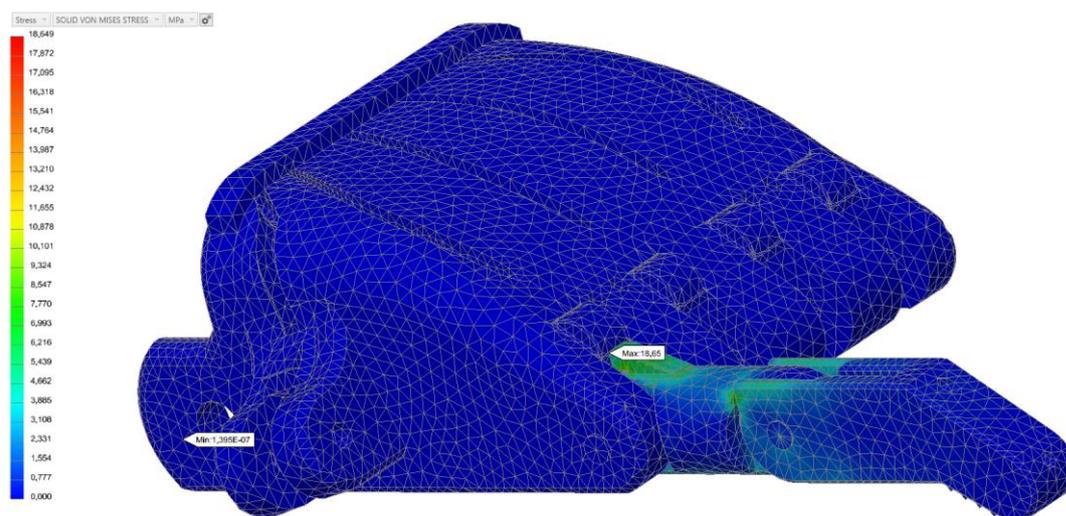


Figura 54. Tensiones Von Mises caso estudio N°2 malla refinada

Este tamaño de malla proporciona 133902 nodos y 82552 elementos. Se ha aumentado considerablemente el número nodos y elementos mientras que los resultados han variado poco por lo que se considera que el tamaño de malla es lo suficientemente discreta como para obtener resultados fiables.

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 3.- Diseño y fabricación aditiva de prótesis de mano

Con este mallado ya se dan por buenos los resultados, aunque el porcentaje de error sea mayor al 10%. Se trata de una pieza de grandes dimensiones y conseguir una malla de mayor precisión requeriría más tiempo de cálculos.

- **Evaluación de resultados**

Las tensiones más elevadas que se dan son de 18,65 MPa, muy por debajo del límite elástico del material.

El mayor desplazamiento es de tan sólo 0,606 mm en la dirección de aplicación de la carga, lo cual se considera un resultado muy satisfactorio.

Los resultados obtenidos son los esperados: tensiones y desplazamientos pequeños. Igualmente, la situación de las zonas más desfavorables es lógica ya que las tensiones se obtienen en la zona de contacto siendo además esta área pequeña mientras que el desplazamiento máximo se localiza en el punto de aplicación de la carga.

3.3. Fabricación prótesis

Una vez realizado el diseño y análisis de la prótesis por ordenador, se realiza la fabricación de la prótesis a partir de la configuración de los parámetros del proceso. Para ello se ha usado el software de laminación Ultimaker Cura 3.2.1 y la impresora Ultimaker 3.

3.3.1. Características de la impresora

Para la fabricación de la prótesis se utilizó la impresora Ultimaker 3. Posee un sistema de extrusión doble lo que permite fabricar la pieza y el soporte con distintos materiales.

En la siguiente tabla se detallan sus características técnicas.

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE
CAPÍTULO 3.- Diseño y fabricación aditiva de prótesis de mano

PROPIEDADES DE IMPRESIÓN	
Diámetro del filamento	2.85 mm
Resolución capas	0.25 mm nozzle: 150 – 60 µm 0.40 mm nozzle: 200 – 20 µm 0.80 mm nozzle: 600 – 20 µm
Precisión	x: 12,5 µm y: 12,5 µm z: 2,5 µm
Velocidad desplazamiento cabezal	30 – 300 mm/s
Temperatura plataforma	20 – 100°C
Materiales	Nylon, PLA, ABS, CPE, PC, TPU, PP, PVA, Breakaway
Diámetro nozzle	0.25 mm, 0.40 mm, 0.80 mm
Temperatura nozzle	180 - 280 °C
Tiempo de calentamiento de la placa	< 4 min
Dimensiones físicas	
Dimensiones	342 x 380 x 389 mm
Peso neto	10,6 kg
Potencia requerida	
Entrada	100 -240 V 4 A, 50 – 60 Hz 221 W max
Salida	24V DC, 9.2A
Condiciones ambientales	
Temperatura ambiente de funcionamiento	15 – 32 °C
Temperatura ambiente no funcionamiento	0 -32 °C
Software	
Software empleado	Cura
Tipos de archivos	STL, OBJ, X3D, 3MF, GCODE, BMP, GIF, JPG, PNG

Tabla 4. Características técnicas de la impresora Ultimaker 3 ^[19]

3.3.2. Materiales empleados

Los materiales que se han escogido para la fabricación de la pieza se han seleccionado en base a su buena relación entre facilidad de impresión y características mecánicas para un primer prototipo de la prótesis.

3.3.2.1. Ultimaker PLA RAL 5002

El material principal que se utilizará para la fabricación de la prótesis es el PLA. Se ha escogido este material ya que es biodegradable y tiene un efecto mínimo sobre el medio ambiente. No es tóxico por lo que lo hace un material adecuado para las prótesis para niños.

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 3.- Diseño y fabricación aditiva de prótesis de mano

Se escoge el PLA entre todos los materiales descritos en el capítulo 2 ya que es el más sencillo de imprimir y el más barato y lo que se busca en este proyecto es un primer prototipo de la prótesis e ir incorporando mejoras.

En concreto la prótesis se fabricó con el PLA RAL 5002 de Ultimaker, se eligió el color rojo para hacerla más atractivo para los niños.

PROPIEDADES MECÁNICAS

Módulo de elasticidad a la tracción	2346,5 MPa
Esfuerzo de tracción a la deformación	49,5 MPa
Esfuerzo de tracción a la rotura	45,6 MPa
Alargamiento a la deformación	3,3 %
Alargamiento a la rotura	5,2 %
Resistencia a la flexión	103,0 MPa
Módulo de flexión	3150,0 MPa
Dureza	83 (Shore D)

Tabla 5. Características técnicas del material proporcionadas por el fabricante ^[19]

3.3.2.2. Ultimaker PVA

La prótesis posee voladizos y cavidades internas por lo que son necesarios soportes para su fabricación. Para ello se ha elegido el PVA ya que es un material soluble en agua, lo que facilita su retirada de la pieza sin provocar daños en ella, y es compatible con el PLA, material de fabricación de la prótesis.

PROPIEDADES MECÁNICAS

Módulo de elasticidad a la tracción	3860 MPa
Esfuerzo de tracción a la rotura	78 MPa
Alargamiento a la rotura	9,90 %

Tabla 6. Características técnicas del material proporcionadas por el fabricante ^[19]

En este caso el fabricante no proporciona datos de cómo se va a comportar el material a flexión ni de su dureza. Pero al ser un material auxiliar que después se eliminara no es de importancia.

3.3.3. Parámetros de fabricación

En este apartado se analizarán la elección de los parámetros de Cura y el posicionamiento de las piezas para su fabricación.

Este proyecto busca un primer prototipo de prótesis impresa en 3D por lo que la elección de los parámetros de fabricación se centrara en optimizar aquellos que

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 3.- Diseño y fabricación aditiva de prótesis de mano

influyen directamente sobre el tiempo de fabricación, teniendo en cuenta también la precisión dimensional y la rugosidad de las piezas.

El software Cura posee una gran cantidad de parámetros a modificar, en este caso debido a la cantidad de piezas que se van a fabricar no se ha realizado un análisis en profundidad sobre los diferentes parámetros. El software tiene cuatro perfiles predefinidos según la calidad que requiere la pieza: extrafino, fino, normal y rápido. La diferencia entre ellos está en la altura de capa, la velocidad de impresión y la velocidad de pared.

Se desea que todas las piezas tengan la misma calidad por lo que se han fabricado con los mismos parámetros de impresión.

	Extrafino	Fino	Normal	Rápido
Altura capa (mm)	0,06	0,1	0,15	0,2
Vel. Impresión (mm/s)	60	70	80	70
Vel. Pared (mm/s)	30	30	40	50

Tabla 7. Diferencias perfiles del software Cura

Entre los cuatro perfiles se selecciona el perfil normal ya que ofrece una calidad media de la pieza en el menor tiempo.

Dentro de este perfil se modifican los siguientes parámetros:

- **Densidad de relleno:** Se ha escogido un relleno del 35% ya que en investigaciones realizadas este valor ofrece buenas características mecánicas. Aumentar más la densidad de relleno supone una mayor resistencia de la pieza, aumentando costes y tiempo.
- **Patrón de relleno:** De entre todas las opciones que dispone Cura se ha escogido el patrón de rejilla. Este tipo de geometría de relleno tiene fuerzas en todas las direcciones y es rápido de imprimir. La impresora realizará una menor cantidad de puentes a través de este patrón de relleno [20].
- **Temperatura de impresión:** El fabricante para el material principal recomienda la impresión de PLA entre 195 – 240 °C mientras que para PVA su impresión es entre 200 – 225 °C. La temperatura de impresión en ambos materiales se fija en 215 °C.
- **Ángulo de soporte:** Es el ángulo máximo para el que no se necesita material de soporte. Se fijará en 45° ya que un ángulo mayor implica una mayor distancia de voladizo lo que puede provocar fallos durante la impresión.
- **Patrón del soporte:** Se ha elegido el mismo patrón que para el relleno de la pieza.

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 3.- Diseño y fabricación aditiva de prótesis de mano

- Densidad del soporte: Para el soporte se ha elegido una densidad del 15%. Su función es de servir de base para la construcción de la pieza por lo que no es necesario que sea muy resistente.
- Sin adherencia: Se recomienda tener activa esta opción en materiales que tengan dificultad de pegado de la primera capa a la placa de impresión. En este caso se ha desactivado la opción de tipo de adherencia a la placa de impresión ya que el PLA es un material que se adhiere sin dificultad. El tener activa esta casilla supone un aumento de material y de tiempo de impresión.

A continuación, se va a analizar cuál es la mejor orientación de impresión para cada pieza. A la hora de posicionar la pieza se buscará situar una cara plana de la pieza junto a la placa de impresión para que la pieza se fabrique con mayor estabilidad. Se elegirá aquella opción que requiera menor tiempo de impresión, menor consumo de material y presente un mejor aspecto.

Falange 1ª

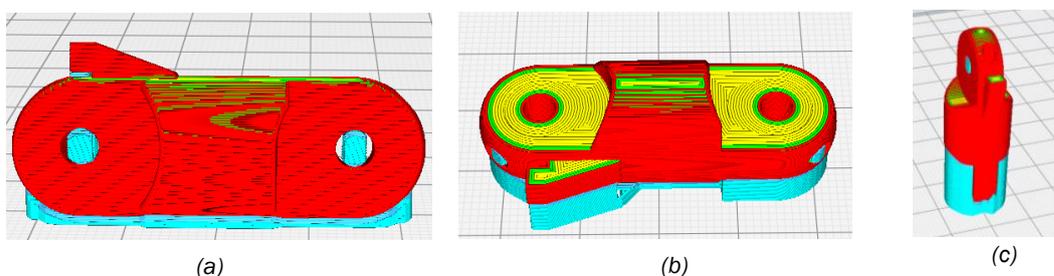


Figura 55. Diferentes posiciones de impresión de la falange 1ª

Posición	Tiempo fabricación	Consumo material	
		PLA	PVA
a	49 min	0,53 m	0,06 m
		4 gr	1 gr
b	53 min	0,53 m	0,13 m
		4 gr	1 gr
b	58 min	0,52 m	0,10 m
		4 gr	1gr

Tabla 8. Características de las posiciones de impresión de la falange 1ª

Se elige la **opción a** ya que presenta un menor tiempo de fabricación y un menor consumo de material. Pese a que la precisión a la hora de realizar los taladros será mejor en la opción c, se realizará un postprocesado en el caso de que sea necesario.

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE
 CAPÍTULO 3.- Diseño y fabricación aditiva de prótesis de mano

Falange 2ª-3ª

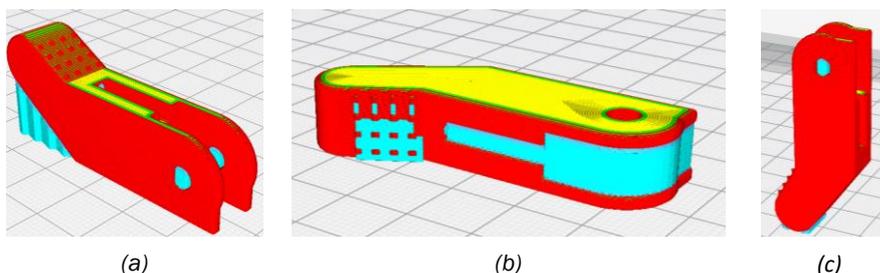


Figura 56. Diferentes posiciones de impresión de la falange 2ª-3ª

Posición	Tiempo fabricación	Consumo material	
		PLA	PVA
a	55 min	0,64 m 5 gr	0,07 m 1 gr
b	55 min	0,64 m 5 gr	0,10 m 1 gr
c	47 min	0,61m 5 gr	0,01 m 0gr

Tabla 9. Características de las posiciones de impresión de la falange 2ª-3ª

Se elige la **opción a**, pese a que la orientación de la posición c se fabricaría en menor tiempo de fabricación y con menor consumo de material se quiere garantizar que la pieza se fabrique con seguridad y calidad y en este caso hay zonas que están en voladizo que pueden provocar fallos en la impresión. En el caso de que se quisiera fabricar con la orientación de la posición c habría que disminuir el ángulo de soporte para garantizar la estabilidad de la pieza lo que ocasionaría un aumento del consumo de material de pva así como de tiempo.

Falange 1ª del pulgar

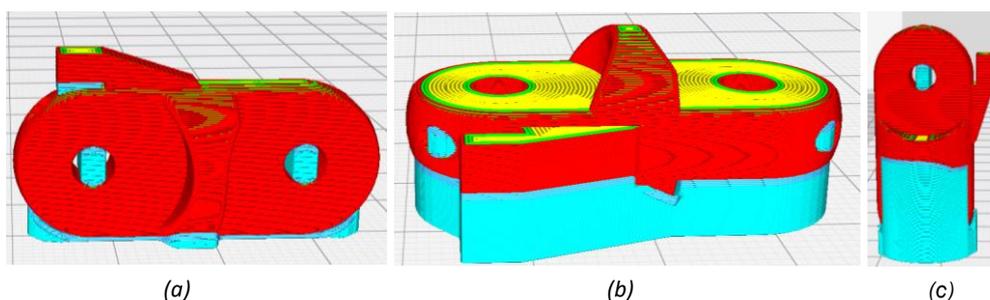


Figura 57. Diferentes posiciones de impresión de la falange 1ª del pulgar

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE
CAPÍTULO 3.- Diseño y fabricación aditiva de prótesis de mano

Posición	Tiempo fabricación	Consumo material	
		PLA	PVA
a	40 min	0,38 m 3 gr	0,05 m 0 gr
b	44 min	0,38 m 3 gr	0,12 m 1 gr
c	50 min	0,38 m 3 gr	0,10 m 1 gr

Tabla 10. Características de las posiciones de impresión de la falange 1ª del pulgar

Se trata de la misma falange 1ª pero más pequeña, por lo que la orientación elegida será la misma, **opción a**, por las razones ya mencionadas anteriormente.

Falange 2ª-3ª del pulgar

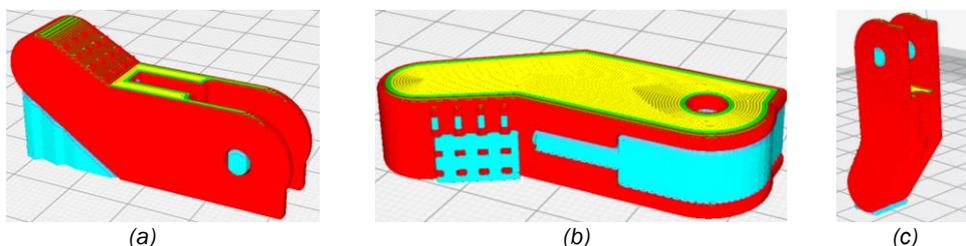


Figura 58. Diferentes posiciones de impresión de la falange 2ª-3ª del pulgar

Posición	Tiempo fabricación	Consumo material	
		PLA	PVA
a	48 min	0,51 m 4 gr	0,01 m 0 gr
b	49 min	0,54 m 4 gr	0,07 m 1 gr
c	40 min	0,51m 4 gr	0,01 m 0gr

Tabla 11. Características de las posiciones de impresión de la falange 2ª-3ª del pulgar

Al igual que en la falange 2ª, se elige la **opción a** ya que es la que mejores características de impresión presenta.

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 3.- Diseño y fabricación aditiva de prótesis de mano

Palma de la mano

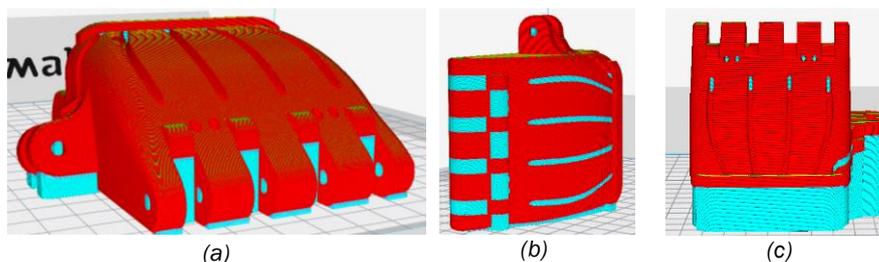


Figura 59. Diferentes posiciones de impresión de la palma de la mano

Posición	Tiempo fabricación	Consumo material	
		PLA	PVA
a	10h 47 min	7,66 m 61 gr	1,76 m 14 gr
b	11h 55min	7,56 m 60 gr	2,47 m 19 gr
c	11h 13min	7,40m 59 gr	2,14 m 17 gr

Tabla 12. Características de las posiciones de impresión de la palma de la mano

La orientación elegida para fabricarse es la de la **figura a**. Con esta posición se asegura una base plana y estable para fabricar la pieza, los agujeros se levantan en z, el eje con mejor tolerancia. Además, es la que se fabrica en menor tiempo y consume menos material.

Encaje

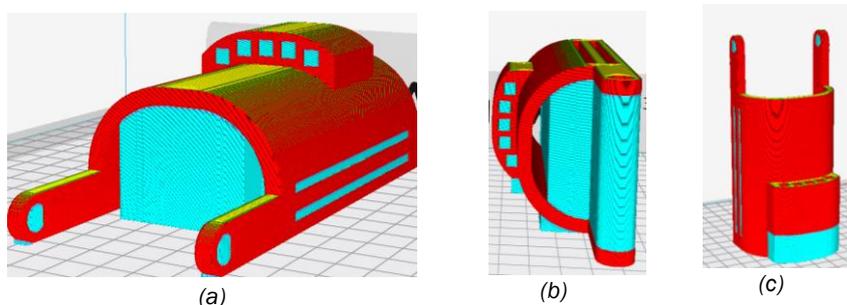


Figura 60. Diferentes posiciones de impresión del encaje

Posición	Tiempo fabricación	Consumo material	
		PLA	PVA
a	10h 26 min	7,05 m 56 gr	2,46 m 19 gr
b	11h 26min	7,04 m 56 gr	3,04 m 24 gr
c	8h 48min	6,83m 54 gr	0,52 m 4 gr

Tabla 13. Características de las posiciones de impresión del encaje

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 3.- Diseño y fabricación aditiva de prótesis de mano

Según se señaló antes de iniciar el análisis se elegiría aquella opción que requiriese menor tiempo de impresión, menor consumo de material y presente un mejor aspecto. En este caso la opción elegida según las características enumeradas debería ser la opción c, sin embargo, se elige la opción ya que por experiencias imprimiendo piezas de grandes dimensiones en el eje z por vibraciones de la máquina se producen desajustes en la pieza. La **opción a** se fabricará con una mayor estabilidad.

Tensores

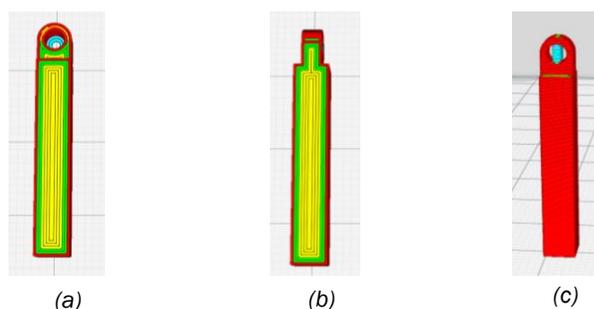


Figura 61. Diferentes posiciones de impresión de los tensores

Posición	Tiempo fabricación	Consumo material	
		PLA	PVA
a	8 min	0,08 m 1 gr	0,01 m 0 gr
b	8 min	0,08 m 1 gr	0,01 m 0 gr
c	20 min	0,07 m 1 gr	0,01 m 0 gr

Tabla 14. Características de las posiciones de impresión de los tensores

Se ha elegido la orientación de la **figura b**, ya que respecto de la opción a que tarda el mismo tiempo y consume el mismo material, los orificios presentaran por su eje de construcción mejor precisión dimensional.

A continuación, se muestra una tabla con cada una de las piezas fabricadas, el tiempo de fabricación de cada una y el consumo de material.

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE
CAPÍTULO 3.- Diseño y fabricación aditiva de prótesis de mano

Nombre	Cantidad	Consumo / ud		Tiempo fabricación por unidad
		PLA	PVA	
Falange 1ª	4	0,53 m 4 gr	0,06 m 1 gr	49 min
Falange 2ª-3ª	4	0,64 m 5gr	0,07 m 1 gr	55 min
Falange 1ª del pulgar	1	0,38 m 3 gr	0,05 m 1 gr	40 min
Falange 2ª-3ª del pulgar	1	0,51 m 4 gr	0,01 m 0 gr	48 min
Palma mano	1	7,88 m 61 gr	1,78 m 14 gr	10 h 47 min
Encaje	1	7,05 m 56 gr	2,46 m 19 gr	10 h 26 min
Tensores	5	0,08 m 1 gr	0,01 m 0 gr	8 min
TOTAL FABRICADO	17	17,07 m 134 gr	4,44 m 36 gr	1 d 8 h 55 min

Tabla 15. Características de las posiciones de impresión de la prótesis

3.4. Post-procesado y puesta a punto de la prótesis

Tras la fabricación de las piezas de la prótesis se procedió al montaje de ella. A continuación, se indicarán las observaciones de este proceso:

- En primer lugar, se procedió a la retirada del material soporte PVA. El PVA se disuelve en agua, para ello se introdujeron todas las piezas en ella templada durante tres horas.
- Al empezar el montaje se percibieron rozamientos entre las caras de las falanges y entre las falanges y el pasador. Estos problemas se corrigieron ajustando caras y ejes mediante un proceso de lijado.
- Se han corregido problemas de funcionamiento durante el proceso de flexión y extensión.
 - Proceso de extensión

Este proceso trata de estirar los dedos tras estar flexionados. En la configuración inicial se han encontrado los siguientes problemas:

- Interferencia de los cables con las falanges 1ª

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 3.- Diseño y fabricación aditiva de prótesis de mano

- Las falanges 1ª no alcanzan la altura deseada, ya que por el diseño no llegan a los topes configurados y no se produce una extensión correcta.



Figura 62. Problemas proceso de extensión

La solución de estos problemas era mejorar el guiado del cable. Para ello se realizó un taladro en el nudillo a la misma altura que los orificios diseñados para asegurar por un lado que no existan interferencias entre cable y falange y por otro permitir subir la falange hasta la posición adecuada.



Figura 63. Resolución problemas del proceso de extensión

En la imagen siguiente se muestra una comparativa de dos dedos con la configuración inicial y de otros dos con la mejora realizada. En esta imagen se aprecia con claridad como ahora los dedos alcanzan una posición de equilibrio.



Figura 64. Comparación falanges configuración inicial y final

3.5. Montaje y funcionamiento de la prótesis

Fase 1: Montaje de las falanges

El montaje comienza con el ensamblaje de una falange 1ª con una falange 2ª-3ª. Para ello se alinean los orificios de ambas falanges y se inserta el tornillo asegurándose de que el extremo plano del tornillo quede a ras con la cara de la falange. Por el otro lado se sujeta con una tuerca autoblocante.

Una vez ha sido ensamblado el primer dedo, los cuatro restantes se montan de igual manera, asegurando que las falanges se mueven libremente en la articulación.



Figura 65. Montaje falanges

Fase 2: Montaje de la palma, encaje y tensores

Montaje de la palma de la mano al encaje mediante un tornillo a cada lado con una tuerca autoblocante. En el encaje se sitúan también las piezas que hacen la función de tensores atornilladas a la parte trasera de esta pieza.



Figura 66. Montaje palma, encaje y tensores

Fase 3: Colocación cables en las falanges

Por sencillez se colocarán los cables en las falanges antes de montarlas a la palma.

En primer lugar, se montarán los cables de retorno, son los que permiten que los dedos vuelvan a su posición normal cuando la mano no está siendo accionada. Se introduce el cable atado a un extremo por el orificio superior de la falange 2ª-3ª hasta el orificio de la parte superior de la falange 1ª. Se repite el mismo proceso para todos los dedos. Una vez se han colocado los cables de retorno se situarán los cables de tensión en las falanges. Se introduce un cable atado a un extremo por el orificio inferior de la falange 2ª-3ª hasta el orificio inferior de la falange 1ª. Se repite el mismo proceso para todos los dedos.

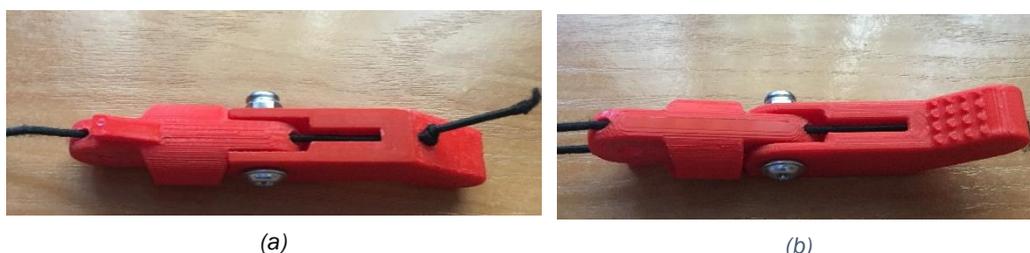


Figura 67. Montaje cable de extensión (a) y cable de flexión (b)

Fase 4: Colocación de las falanges con cables en la palma

Por último, se introducirán los cables de las falanges en la palma de la mano. El cable que realiza el movimiento de extensión se introduce por el orificio superior de la palma para después introducirse en el orificio situado a su lado y descender hasta la parte inferior de la palma. Mientras que el cable que realiza el movimiento de flexión se introduce por el orificio inferior de la palma e irá por los canales hasta anudarse a los tensores situados en el encaje. Al situar todos los cables sobre la palma se coloca un eje para mantener los dedos en la palma con dos tuercas autoblocantes en cada cara de la palma.

Los dedos se sitúan dos a dos, cuando ambos estén colocados se tira firmemente de los cables para tensar los dedos, asegurando que los dedos regresan a la par. No es conveniente atar los nudos demasiado apretados ya que reducirá la capacidad del dedo para regresar suavemente y aumentará la fuerza necesaria para cerrar la mano.



Figura 68. Prótesis ensamblada

La prótesis funciona mediante la tracción de los cables de los dedos para conseguir su flexión y extensión, movimientos que son provocados por el movimiento relativo de la palma de la mano y la pieza de encaje.

La palma y la pieza de encaje se acoplan al muñón de la mano y al antebrazo del paciente respectivamente, la muñeca se encuentra entre ambos y permite el movimiento de la prótesis.

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 3.- Diseño y fabricación aditiva de prótesis de mano

El movimiento de extensión se realiza mediante una cuerda elástica anclada en la palma y en la parte superior del dedo. Con ello se realiza una fuerza que se opone al movimiento de flexión del dedo lo que aumenta el par necesario a realizar con la flexión de la muñeca. Esta fuerza se opone a la flexión del dedo, se puede calcular mediante la ley de Hooke:

$$F = -k * x$$

F corresponde a la fuerza que se opone al desplazamiento, k en este caso es la constante de la cuerda elástica y x es el desplazamiento.

De la expresión anterior se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- A mayor desplazamiento de la cuerda elástica, mayor fuerza se produce
- A mayor grado de flexión del dedo de la prótesis, mayor será la fuerza que se opone a ella

4. ENSAYOS

De forma adicional al diseño y fabricación de la prótesis se quiso realizar la caracterización del material llevando a cabo un ensayo de tracción con los objetivos siguientes:

- Obtener las propiedades mecánicas del PLA
- Analizar la influencia de los parámetros de impresión en las propiedades mecánicas

Posteriormente se realizó un análisis con el microscopio de los resultados obtenidos.

4.1. Parámetros de impresión

A continuación, se describen los parámetros que se buscaban estudiar:

- Posición de impresión: Se quiere conocer cómo influye la posición de impresión en las propiedades de la pieza. En toda impresión el material se deposita de abajo hacia arriba por lo que la orientación de las capas cambiará. Las probetas se imprimirán en posición horizontal (xy) sobre su ancho y en posición de canto (xz) sobre su espesor.
- Altura de capa: Con el estudio de este parámetro se busca conocer su influencia en la adhesión entre las capas y cómo afectará su modificación en la resistencia de la pieza.
- Velocidad de impresión: Se estudia con el objetivo de conocer cómo influye en la adhesión entre las capas y en la resistencia de la pieza.
- Material: El material principal que se utilizó fue el PLA. En un principio se utilizó para el estudio de las probetas el PLA natural, pero este se acabó y se finalizó con PLA rojo. El fabricante proporciona los mismos datos independientemente del color por lo que para este estudio no se considera que sea relevante.

Los parámetros que se describen a continuación son comunes a la impresión de todas las probetas:

- Ancho de capa: 0,2 mm
- Líneas de pared: 1
- Densidad de relleno: 100%
- Patrón de relleno: concéntrico
- Temperatura de impresión: 200°C

4.2. Ensayo de tracción

Se realiza con el objetivo de determinar las propiedades fundamentales del material.

El ensayo de tracción se ha llevado a cabo según la norma **ISO 527-2:2012** para la determinación de las propiedades en tracción. La máquina usada para llevar a cabo el ensayo es una máquina de ensayos universal.

El ensayo se realiza en modo estático aplicando una velocidad de deformación constante se somete a una probeta normalizada a un esfuerzo axial creciente en el tiempo hasta que se produce su rotura. En ese instante, el ensayo finaliza y mediante un software que está vinculado a la máquina se obtienen los datos del elemento analizado.

La norma establece la cantidad de 5 probetas por ensayo para obtener unos resultados óptimos en cuanto a la variabilidad que puede introducir el proceso, sin embargo, en este caso al no considerarse válidos los resultados porque la zona de rotura no estaba dentro de la zona calibrada, se realizarán 2 probetas por cada ensayo.

4.2.1. Diseño de las probetas

El ensayo de tracción recoge una normativa sobre su procedimiento. En España, existen las normas UNE mientras que en América son las normas ASTM.

La normativa española recoge de una forma general el procedimiento de ensayo para determinar las propiedades en tracción para la fabricación aditiva en la norma **UNE 116005**.

Debido a las dimensiones de las probetas recogidas en este ensayo se optó por seguir la norma del procedimiento de ensayo para la determinación de propiedades en tracción para plástico en moldeo y extrusión, **UNE-EN ISO 527-2:2012**.

En la norma se especifica el uso de la probeta de tipo 1A para la realización de los ensayos. Sin embargo, también se definen otros tipos de probetas de menores dimensiones pudiéndose usar en el caso de que la 1A presente dificultades. Se escogió el tipo 5A por disminución de tiempo y de material.

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE
CAPÍTULO 4.- Ensayos

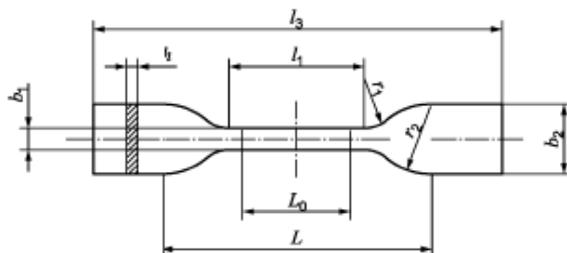


Figura 69. Geometría de la probeta según la norma UNE-EN ISO 527-2:2012 [21]

PROBETA	Longitud total (mm)	Ancho extremos (mm)	Ancho sección estrecha (mm)	Radio curvatura (mm)	Espesor (mm)
Probeta N°1-2	80	12,5	4	8	2

Tabla 16. Características geométricas probetas N°1 y N°2

Al imprimir las primeras probetas, resultó un modelo no válido ya que al elegir una configuración de impresión para las probetas con orientación xy, aparecían huecos en la zona central a lo largo de la curva de transición donde se producía el cambio gradual de sección transversal.

Se realizaron los ensayos de las primeras probetas y se observó que, esos huecos provocaban concentración de tensiones y con ello una rotura en el cambio de geometría. Esto suponía que el ensayo no pudiese ser considerado como válido ya que, por un lado, no se podía conocer con certeza el valor de la sección transversal en el momento de tensión final y por otro, no se obtenían propiedades mecánicas válidas del material.



Figura 70. Probeta N°1



Figura 71 Probeta N°2

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 4.- Ensayos

Se realizó el estudio de la misma probeta con orientación xz y aunque visiblemente no se observaban huecos al realizar el ensayo el fallo seguía existiendo en el mismo lugar.

Tras esto se realizó una investigación en artículos científicos [24], [25], [26], y se comprobó que no es un caso puntual y que es un problema existente en la tecnología FFF para la impresión de probetas con PLA. De la investigación realizada se sacaron las siguientes conclusiones:

- La geometría usada estaba basada en la norma **ASTM: D638**
- La concentración de tensiones se producía en el cambio de sección y éste K_t disminuye si:
 - Aumenta el radio de curvatura
 - Aumenta el ancho de la sección estrecha
 - Aumenta la longitud de la probeta

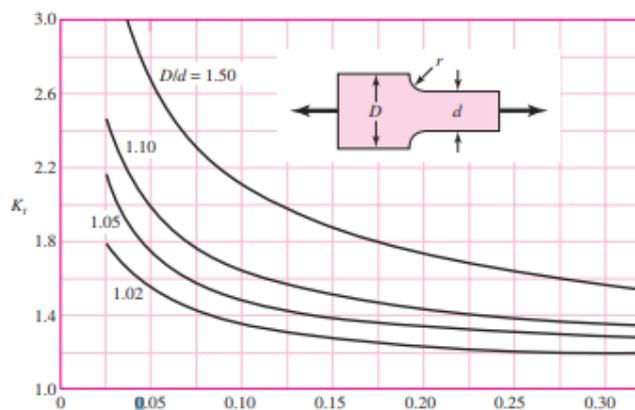


Figura 72. Factor " K_t " de concentración de tensiones para placa rectangular con entalla. Carga axial [22]

A continuación, se modificó la geometría de la probeta y se siguió la norma **ASTM D638**.

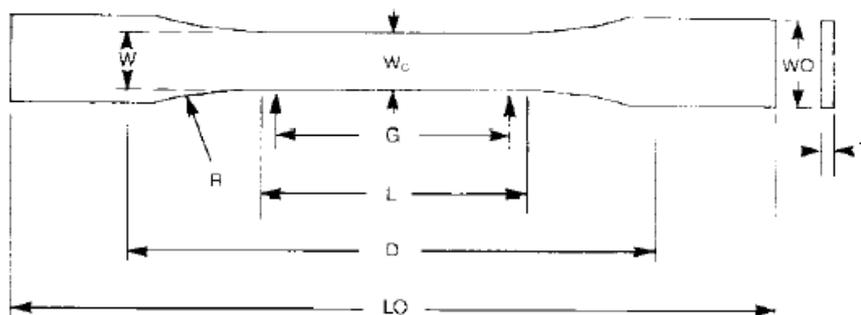


Figura 73. Geometría de la probeta según la norma ASTM D638 [23]

Las dimensiones de las probetas que se estudiaron se muestran en la siguiente tabla:

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE
CAPÍTULO 4.- Ensayos

PROBETA	Longitud total (mm)	Ancho extremos (mm)	Ancho sección estrecha (mm)	Radio curvatura (mm)	Espesor (mm)
Probeta N°3	124	16	8	76	2
Probeta N° 4	124	16	4	76	2
Probeta N° 5	165	20	13	76	2

Tabla 17. Características geométricas probetas N°3, N°4, N°5

De la misma manera, los resultados obtenidos en el ensayo no fueron considerados validos ya que las probetas seguían rompiendo por la misma zona.

Al no conseguir datos válidos de las propiedades mecánicas se analizó con el microscopio cada probeta con el objetivo de poder sacar información de lo sucedido.



Figura 74. Probeta N°3



Figura 75. Probeta N°4



Figura 76. Probeta N° 5

4.3. Microscopio

Se ha realizado una caracterización de las probetas con el microscopio digital USB GT805 5MP.

Mediante su cámara se extraerán fotografías en la sección de corte de las probetas con el objetivo de analizar la adherencia entre las capas, posibles zonas vacías y conocer el resultado del proceso de tracción.

Se tomaron imágenes de cada probeta desde diferentes perspectivas y con diferentes aumentos.

4.3.1. PROBETA N°1

Orientación	xy
Altura de capa (mm)	0,1
Velocidad de impresión (mm/s)	60

Tabla 18. Propiedades impresión probeta

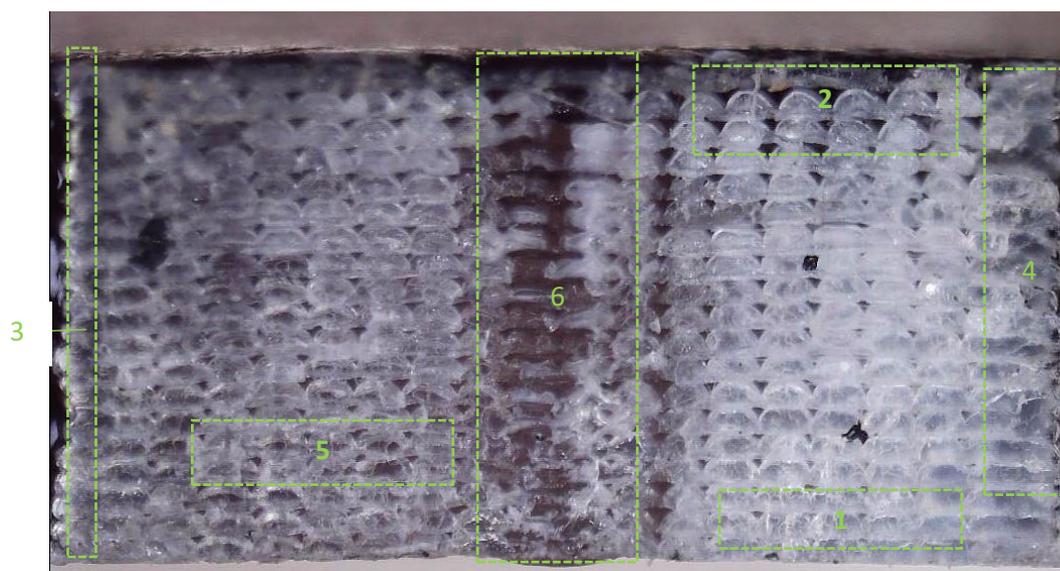


Figura 77. Sección probeta N°1 tras ser ensayada

En la figura 77 se representa la sección de la probeta N°1 una vez ensayada. En (1) se observa como la adhesión entre capas es mejor que en (2) ya que la zona inferior está en contacto con la cama caliente. Conforme las capas se van depositando se alejan de la cama caliente y aparecen más huecos entre capas. (3) y (4) representan la unión del perímetro exterior con en el relleno interior, la fusión entre el perímetro exterior y el relleno, esta es aceptable en la zona 4 ya que apenas existen huecos

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 4.- Ensayos

entre ellos mientras que la fusión de la zona 3 con el resto de la pieza presenta pequeñas discontinuidades. En (5) puede verse como en esa zona el filamento se deposita de forma discontinua. En la zona central (6) puede apreciarse la inexistencia de material. En toda la sección puede observarse la existencia de un gran número de huecos lo que provoca que la probeta sea débil.

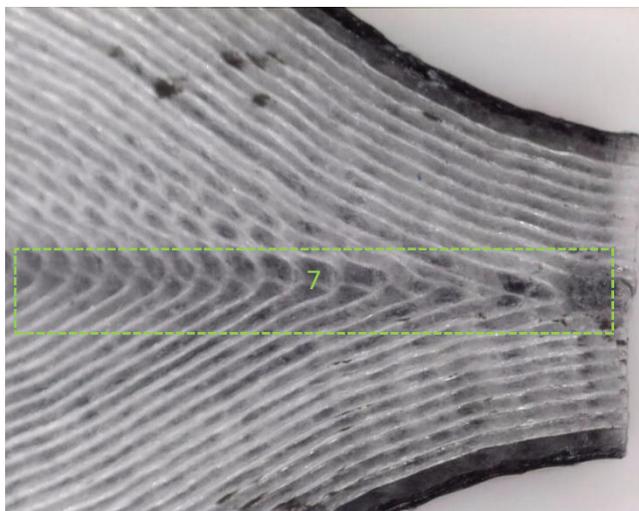


Figura 78. Vista superior de la curva de transición de la probeta N°1

En la figura 78 podemos ver como en la zona central (7) de la probeta a lo largo de la curva de transición existen una acumulación de huecos lo cual puede provocar que al finalizar la curva de transición la probeta rompa.

4.3.2. PROBETA N°2

Orientación	xz
Altura de capa (mm)	0,06
Velocidad de impresión (mm/s)	30

Tabla 19. Propiedades de impresión probeta N°2

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 4.- Ensayos

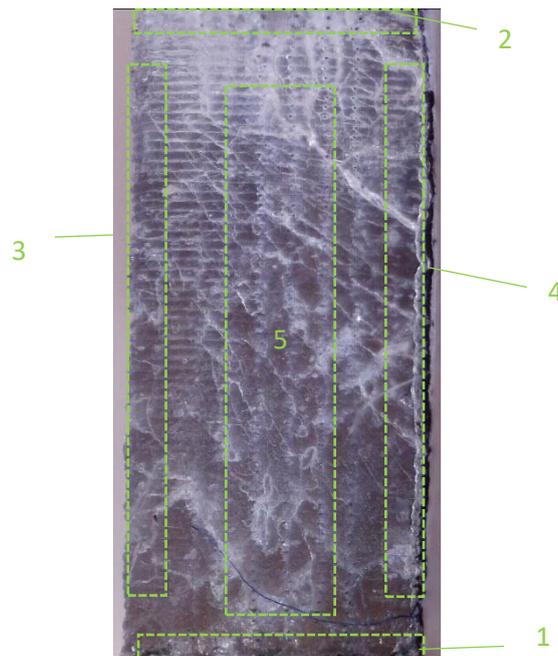


Figura 79. Sección probeta N°2 tras ser ensayada

En la figura 79 se representa la sección de la probeta N°2 una vez ensayada. En (1) se observa como la adhesión entre capas es, al igual que en la probeta anterior, mejor que en (2) ya que la zona inferior está en contacto con la cama caliente, sin embargo, las capas superiores presentan mejor adhesión que la probeta N°1. La unión del perímetro externo con el relleno interior (3) y (4) se considera buena ya que no se aprecian huecos ni discontinuidades del filamento. Es en (5), zona central de la probeta, donde se localizan pequeños huecos a lo largo de toda la probeta.

Respecto a la probeta anterior, ésta presenta una mejor adhesión entre capas y un menor número de huecos.

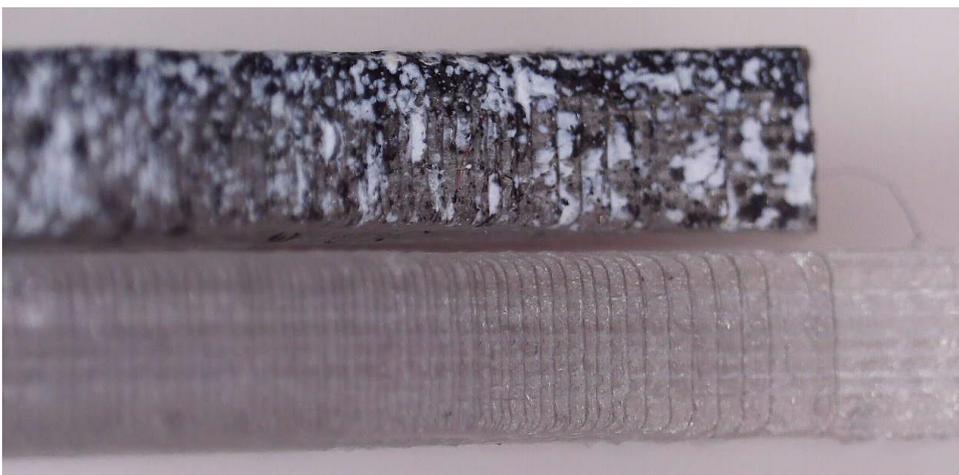


Figura 80. Vista superior de la curva de transición de la probeta N°2

En la figura 80 se muestra la curva de transición de la probeta N°2. Se muestra la probeta sin ensayar y la probeta ensayada. De nuevo, la rotura se produce al finalizar la zona de transición.

4.3.3. PROBETA N°3

Orientación	xz
Altura de capa (mm)	0,1
Velocidad de impresión (mm/s)	60

Tabla 20. Propiedades impresión probeta N°3

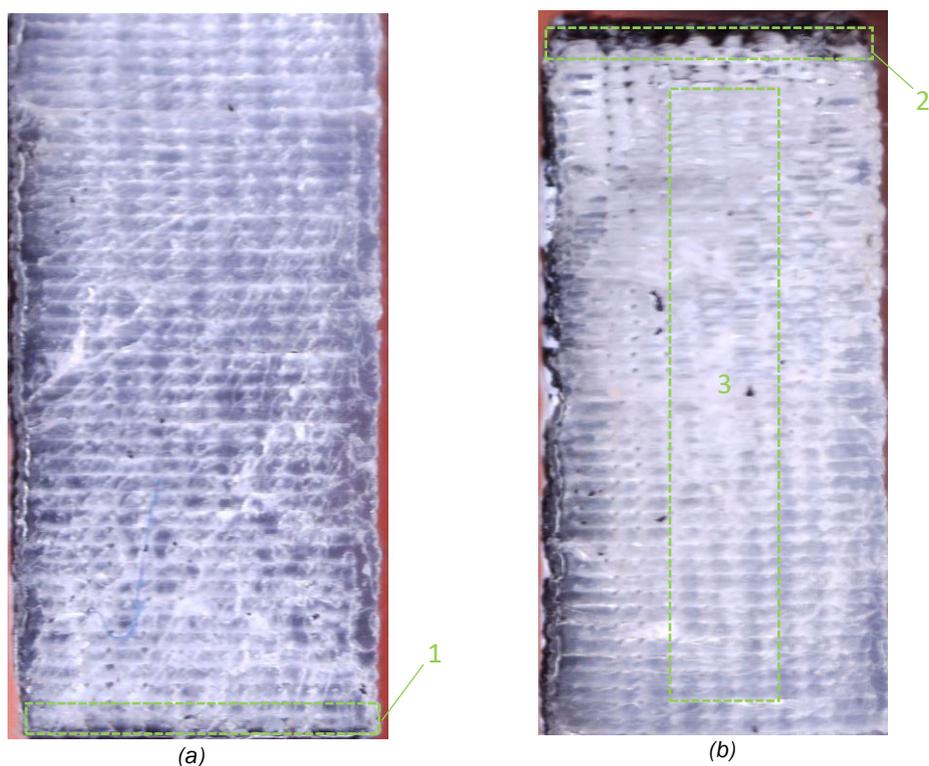


Figura 81. Sección probeta N°3 tras ser ensayada, (a) capas inferiores, (b) capas superiores

En la figura 81 se representa la sección de la probeta N°3 una vez ensayada. En (1) se observa como la adhesión entre capas es, al igual que en los casos anteriores, mejor que en (2). La unión de perímetro y relleno se considera buena ya que existe la fusión de ambas zonas. En (3) se encuentra la zona débil de la probeta, ya que es en esta zona donde se localizan los huecos mientras que a la derecha de esta zona existe una mejor adhesión entre las capas.

4.3.4. PROBETA N°4

Orientación	xz
Altura de capa (mm)	0,1
Velocidad de impresión (mm/s)	30

Tabla 21. Propiedades de impresión probeta N°4



Figura 82. Sección probeta N° 4 tras ser ensayada

En la figura 82 se representa la sección de la probeta N°4 una vez ensayada. En (1) se observa como la adhesión entre capas es, al igual que en los casos anteriores, mejor que en (2). La unión de perímetro y relleno se considera buena ya que existe la fusión de ambas zonas. En (3) se encuentra la zona débil de la probeta, el número de huecos respecto de la zona anterior es mayor.

4.3.5. PROBETA N°5

Orientación	xz
Altura de capa (mm)	0,1
Velocidad de impresión (mm/s)	30

Tabla 22. Propiedades impresión probeta N°5

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 4.- Ensayos



Figura 83. Sección probeta N°5 tras ser ensayada

En la figura 83 se representa la sección de la probeta N°5 una vez ensayada. Los parámetros de estudio para esta probeta son los mismos que para la probeta N°4, repitiéndose los mismos resultados.

Tras el análisis de las fotografías anteriores se pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- Las capas inferiores de la pieza, más cercanas a la cama caliente, presentan mejor fusión que las capas superiores, más alejadas
- La orientación sobre el ancho de la pieza (xy) presenta una estructura con mayores huecos que sobre el espesor (xz)
- A menor altura de capa mejor adherencia entre las capas
- Al aumentar la velocidad de impresión disminuyen los huecos entre capas

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE
CAPÍTULO 4.- Ensayos

5. ESTUDIO ECONÓMICO DEL PROYECTO

5.1. Introducción

A continuación, se realizará el estudio económico relativo al coste de elaboración del presente proyecto, para la elaboración de los cálculos pertinentes, se tienen como referencia los parámetros obtenidos de la condición óptima de procesamiento del modelo.

En primer lugar, se procederá a indicar los costes que se aplicarán:

- **Costes directos:** Son aquellos que se imputan directamente en la elaboración del proyecto:
 - Costes del filamento
 - Costes de material auxiliar
 - Costes de equipos empleados
 - Costes de mano de obra
- **Costes indirectos:** Son los gastos no imputables directamente al proyecto.
 - Costes consumos eléctricos:
 - Costes operaciones post-procesado:

Los costes van a ser calculados asumiendo que se fabricará una única prótesis. En el caso de que se produzca una mayor cantidad de piezas estos costes disminuirían ya que, al existir mayor producción, los costes estarían distribuidos en las distintas piezas fabricadas.

Una vez definidos cada uno de los costes que influirán en el coste total de la pieza, este vendrá dado por el sumatorio tanto de los costes directos como de los costes indirectos:

$$CP = C.Fil + C.Mat\ aux + C.Eq.Empl + C.Man.Obra + C.Con.Elec + C.Post.Pro$$

El objetivo del estudio económico de la prótesis es cuantificar los costes asociados a su fabricación.

Los costes asociados a la mano de obra se recogerán, pero no se tendrán en cuenta en el coste total de la prótesis porque su fabricación busca un fin social.

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 5.- Estudio económico del proyecto

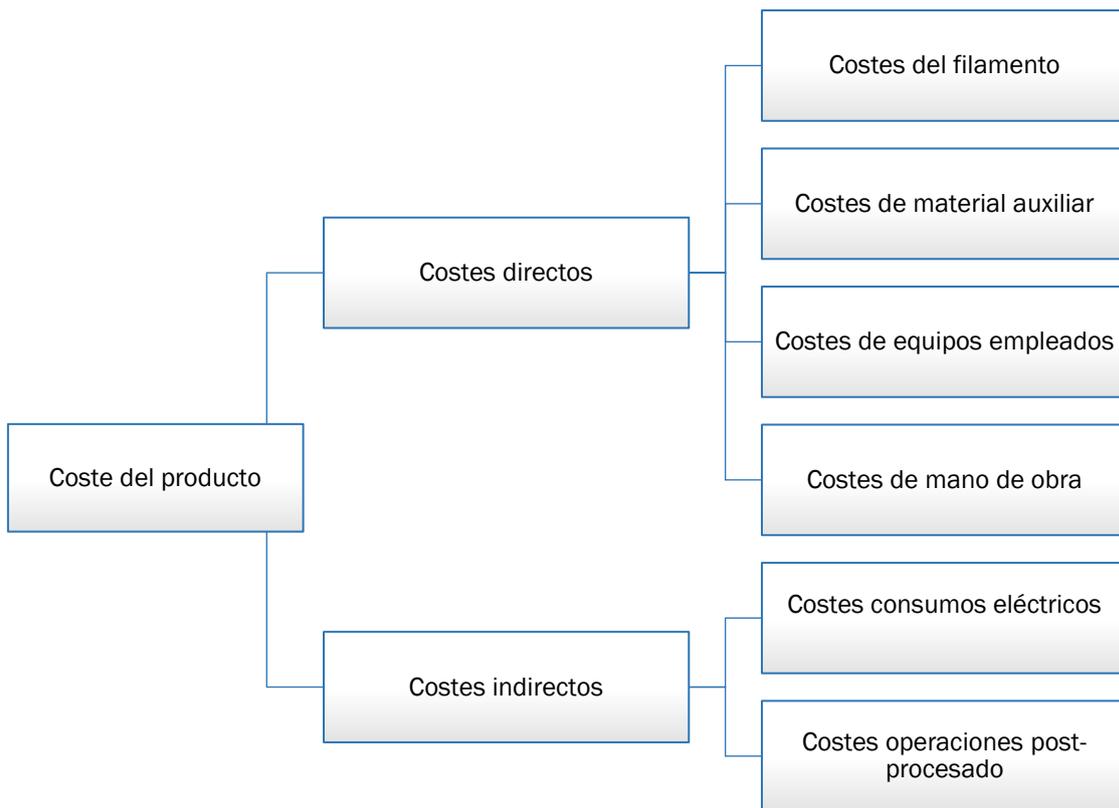


Figura 84. Esquema de gastos asociados al coste de una mano protésica de bajo coste

5.2. Costes directos

5.2.1. Coste del filamento

Es la cantidad de material (filamento) empleado para la fabricación del modelo. Dependerá del peso total de la pieza y del precio del filamento.

- Peso pieza PLA = 134 gr
- Coste del filamento PLA = 53 €/Kg
 - $Coste\ PLA = 0,132 * 53 = 7,10\ €$
- Peso pieza PVA = 36 gr
- Coste del filamento PVA = 113 €/Kg
 - $Coste\ PVA = 0,021 * 113 = 4,07\ €$

Coste total filamento = 11,17€

5.2.2. Costes materiales auxiliares

Son los costes correspondientes a los materiales que permiten el ensamblaje y el funcionamiento de la mano protésica: tornillería, cinta ajustable (velcro), espuma acolchada, cables elásticos y cables no elásticos.

- Velcro = 3,92 €
- Espuma acolchada = 3,65 €
- Hilo goma elástica = 1,25 €
- 15 tornillos = 0,75 €

Coste total materiales auxiliares = 9,57 €

5.2.3. Costes de equipos empleados

En este apartado se considerarán los equipos que se han utilizado para la realización del proyecto. Para su coste total se tendrá en cuenta su coste inicial y el período de amortización de los equipos considerando únicamente los días laborables de ese período de amortización.

- Coste de la impresora Ultimaker 3: 2995 €
- Período de amortización: 24 meses.
- Tiempo de uso de la máquina: El tiempo de fabricación de la prótesis es de 1 día 5 horas 5 minutos, pero debido a fallos durante el período de fabricación el tiempo total de uso de la impresora se consideran son 2 días.

$$\circ \text{ Costes asociados a la impresora} = \frac{2995 \text{ €} * 2 \text{ días}}{503 \text{ días}} = 11,91 \text{ €}$$

- Coste ordenador Lenovo Ideapad 320-15IKBN: 689 €
- Período de amortización: 24 meses.
- Tiempo de uso del ordenador: Se estima un uso de 28 días para el desarrollo de la prótesis.

$$\circ \text{ Costes asociados al ordenador} = \frac{689 \text{ €} * 28 \text{ días}}{503 \text{ días}} = 38,35 \text{ €}$$

Costes de equipos empleados = 50,26 €

5.2.4. Coste mano de obra

Se considerará que es la misma persona la encargada de todo el proceso desde la investigación inicial hasta el acabado final. Se deberá tener en cuenta el salario por hora de la persona y el tiempo efectivo de trabajo.

El salario mínimo en 2018 de un ingeniero en un mes es 994,20 €, por lo que el salario hora es de 6,21 €.

Las horas empleadas en la duración del proyecto, se desglosan para cada etapa:

- Investigación = 65 horas
- Diseño = 130 horas
- Fabricación = 35 horas
- Horas totales = 230 horas

Por lo que el coste imputable al personal será:

$$\circ \text{ Coste personal} = 6,21 \left(\frac{\text{€}}{\text{h}} \right) * 230 \text{ (horas)} = 1428,30 \text{ €}$$

Coste del personal = 1428,30 €

5.2.5. Costes directos totales

Recogiendo los datos de los apartados anteriores se obtienen los costes directos:

	Importe (€)
Coste del filamento	11,17
Costes de materiales auxiliares	9,57
Costes de equipos empleados	50,26
Coste de mano de obra	1428,30
COSTES DIRECTOS TOTALES	1500,30
COSTES DIRECTOS APLICABLES	71

Tabla 23. Costes directos de la prótesis

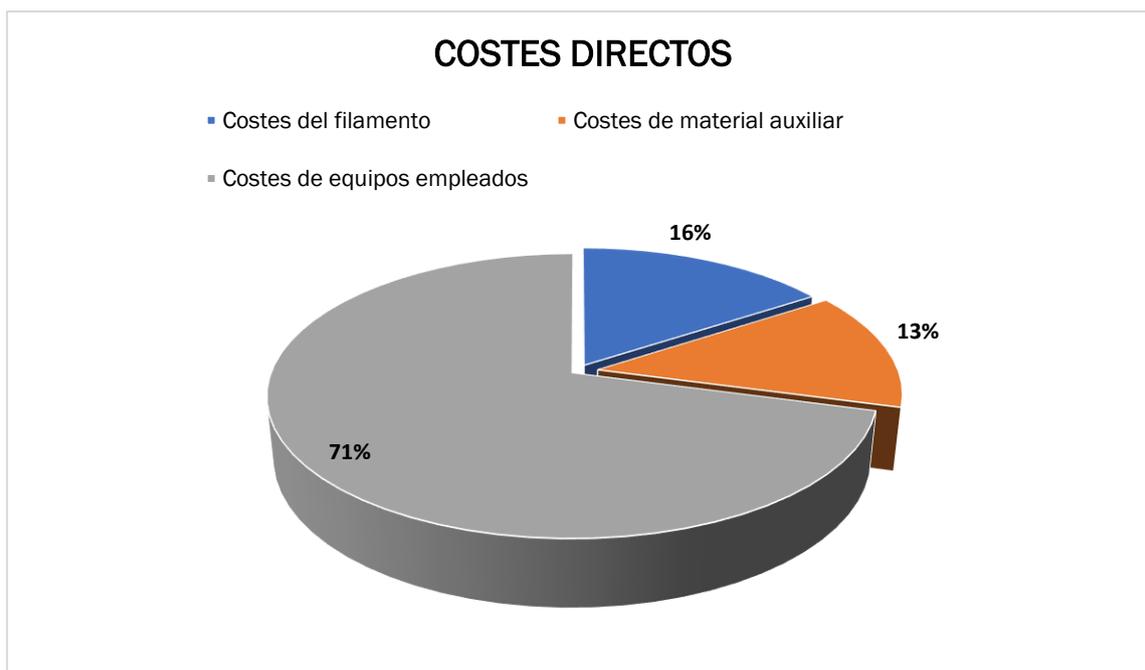


Figura 85. Distribución de costes directos

5.3. Costes indirectos

5.3.1. Coste por consumo eléctrico

El consumo eléctrico será función del coste de energía en España, el consumo de la impresora y el tiempo que se emplee en realizar la impresión.

- Coste de energía en España: 0,13 (€/kWh)

Para el cálculo del coste de energía se ha hecho una media entre el término de consumo de todas las compañías eléctricas.

- Consumo máximo impresora Ultimaker 3: 0,221 kW
- Tiempo de uso de la impresora: Como ya se ha comentado anteriormente, el tiempo de fabricación es de 1 día 5 horas 5 minutos, sin embargo, por fallos durante la impresión se estima un tiempo de uso de 2 días.

$$\circ \text{ Coste consumo eléctrico (€)} = 0,13 \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) * 0,221 (\text{kW}) * 48 (\text{h}) = 1,38 \text{ €}$$

Coste consumo eléctrico = 1,38 €

5.3.2. Costes operaciones de post-procesado

Para este apartado se considerará el salario por hora del operador y el tiempo que se ha empleado en el post-procesamiento y en el ensamblaje de la prótesis para hacerla funcional.

- Salario por hora = 6,21 €/hora
- Tiempo empleado en el post-procesamiento = 1 hora
- Ensamblaje de la prótesis = 2 horas

$$\circ \text{ Coste oper. post. proc} = 6,21 \left(\frac{\text{€}}{\text{h}}\right) * (1 \text{ (h)} + 2 \text{ (h)}) = 24,84 \text{ €}$$

Coste operaciones de post-procesado = 24,84 €

5.3.3. Costes totales indirectos

Recogiendo los datos de los apartados anteriores se recogen los costes indirectos:

	Importe (€)
Coste consumo eléctrico	1,38
Costes operaciones post-procesado	24,84
COSTES INDIRECTOS TOTALES	26,22
COSTES INDIRECTOS APLICABLES	1,38

Tabla 24. Costes indirectos de la prótesis

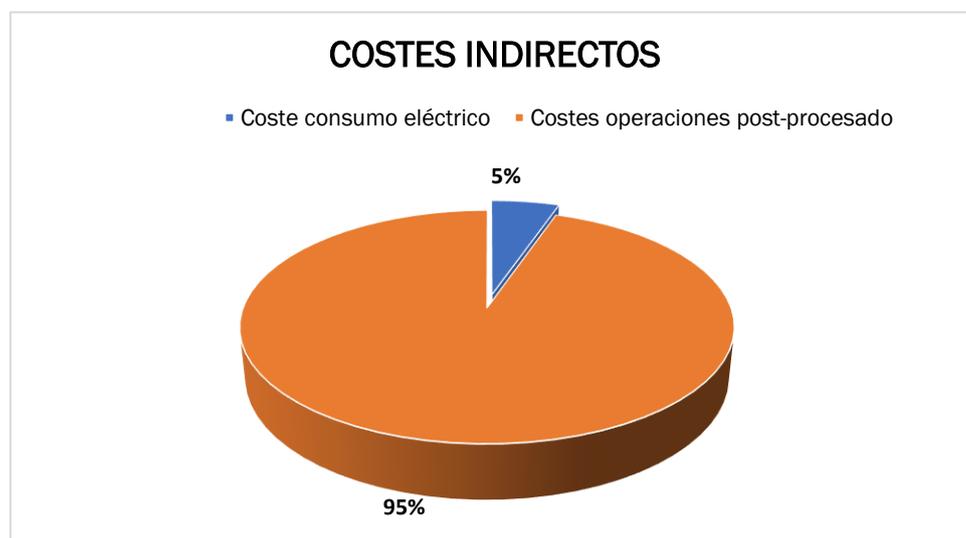


Figura 86. Distribución de costes indirectos

5.4. Costes totales del proyecto

Los costes totales de la prótesis corresponden a la suma de los costes directos e indirectos, calculados en los apartados anteriores.

	Importe (€)
Costes directos	71
Costes indirectos	1,38
COSTES TOTALES DEL PROYECTO	72,38

Tabla 25. Distribución de costes totales

La fabricación de la prótesis no tiene ánimo de lucro por lo que no se aplicará ningún margen adicional teniendo en cuenta el beneficio y el IVA.

Por tanto, el precio final de la prótesis es de **SETENTA Y DOS EUROS CON TREINTA Y OCHO CÉNTIMOS**.

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE
CAPÍTULO 5.- Estudio económico del proyecto

6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

El proyecto **Fabricación aditiva de prótesis de mano de bajo coste** ha logrado el objetivo marcado al comienzo de este, desarrollando las etapas expuestas inicialmente y siguiendo la metodología y herramientas descritas.

6.1. Conclusiones generales

- Se ha comenzado el proyecto con un estudio de la situación del tema a tratar, tanto de la fabricación aditiva como de la anatomía de mano. En base a ello se ha llevado a cabo el diseño pasando por fases como la definición del producto, la selección de materiales y el análisis de la fabricación.
- Se ha realizado una simulación del comportamiento de los elementos más críticos de las prótesis. La validación de estos elementos verifica el cumplimiento del objetivo de seguridad en la prótesis.
- Se ha realizado el montaje de la prótesis una vez fabricada, asegurándose su correcto montaje y funcionalidad. Para ello se ha realizado un postprocesado y puesta a punto de la prótesis identificando problemas y aportando soluciones.
- Se han realizado ensayos sobre probetas para estudiar la influencia de los parámetros de impresión en las propiedades mecánicas. Al no conseguir unos resultados válidos se ha analizado la influencia de estos parámetros en la estructura de la probeta.
- Se consigue una prótesis de bajo coste, consiguiendo uno de los objetivos que se habían marcado inicialmente.
- Se ha llevado a cabo un proyecto que sirve como un primer prototipo para ayudar a pacientes de la comunidad.

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE

CAPÍTULO 6.- Conclusiones y líneas futuras

Este proyecto ha supuesto un progreso a nivel personal en las siguientes áreas:

- Aprendizaje de las tecnologías existentes de fabricación aditiva. Desarrollando un mayor conocimiento en el proceso de fabricación por filamento fundido.
- Aprendizaje de nuevos materiales (PLA y PVA) y de su comportamiento en el proceso de impresión.
- Conocimiento del programa de simulación Nastran, así como también se ha aprendido la utilización del programa Cura, usado para la impresión de la prótesis.
- Se ha conseguido superar los distintos problemas que han surgido durante la realización del proyecto, adquiriendo conocimientos en determinadas áreas de una forma independiente.

6.2. Conclusiones específicas sobre la prótesis

Tras el diseño, simulación, fabricación y montaje de la prótesis se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Se ha diseñado y desarrollado un prototipo funcional de mano articulada. En futuros desarrollos partiendo de los resultados obtenidos se propone mejorar el diseño para lograr mayor grado de adaptación.
- En la simulación se observa que el área de contacto entre las falanges es muy pequeña lo que provoca un gradiente de tensiones elevado. En futuras iteraciones de la prótesis se recomienda aumentar esta área.
- El material elegido, PLA, ha permitido desarrollar una prótesis de forma barata sin conocimientos previos en la fabricación aditiva.
- La prótesis de mano según las orientaciones elegidas posee un tiempo de impresión de 1 día 8 horas y 55 minutos.

6.3. Conclusiones específicas sobre los ensayos

Tras el análisis y discusión de todos los resultados obtenidos, se enuncian las conclusiones deducidas en el análisis experimental de probetas fabricadas con material PLA:

- La sección de cambio de diámetro, en la zona cercana al radio de acuerdo, presenta una zona de concentración de tensiones que provoca la rotura de la probeta.
- La zona de concentración de tensiones se puede reducir suavizando la transición entre los dos diámetros al aumentar el radio de acuerdo.
- Los parámetros más influyentes en las probetas estudiadas, en orden descendente, son: orientación, altura de capa y velocidad de impresión.

6.4. Líneas futuras

- Fabricación con materiales de mayor calidad como ABS o Nylon.
- Rediseño de la prótesis incluyendo las mejoras indicadas. Asimismo, para una mayor similitud con la mano humana se podría modificar la curvatura de la palma de la prótesis, así como incluir el movimiento del dedo pulgar para lograr una mejor adaptabilidad y conseguir un mejor agarre.
- Análisis cinemático de la prótesis de mano.
- Adición de motores, sensores y microcontroladores para lograr un movimiento independiente de los dedos.
- Estudio de las propiedades mecánicas de la prótesis de mano a través de ensayos a tracción, compresión y flexión en una máquina de ensayos universales.
- Aplicar el método Taguchi para analizar la influencia de los parámetros de impresión en la construcción de la prótesis de la mano.

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE
CAPÍTULO 6.- Conclusiones y líneas futuras

7. BIBLIOGRAFÍA

[1] Armenteros Acosta, M.C. (1999). *La innovación tecnológica*. La Habana: Félix Varela

[2] Corma Canós, F. (2013). *Innovación, innovadores y empresa innovadora*. Madrid: Diaz de Santos

[3] Fundación COTEC para la innovación tecnológica. *Documentos COTEC sobre oportunidades tecnológicas: fabricación aditiva*. Disponible en: http://informecotec.es/media/N30_Fabric_Aditiva.pdf [Consulta:5 de Mayo 2018]

[4] Scupteo. *The History of 3D Printing: 3D Printing Technologies from the 80s to Today*. Disponible en: <https://www.sculpteo.com/blog/2016/12/14/the-history-of-3d-printing-3d-printing-technologies-from-the-80s-to-today/> [Consulta:3 de Marzo 2018]

[5] University of twente. *Additive Manufacturing processes*. Disponible en: https://www.utwente.nl/ctw/opm/research/design_engineering/rm/Additive%20Manufacturing/overview-of-additive-manufacturing-processes/ [Consulta: 3 de Marzo 2018]

[6] Ngo, T., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. y Hui, D. (2018). “Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges” en *Elsevier*, vol 143, p. 172-196

[7] Loughborough University. *The 7 categories of Additive Manufacturing | Additive Manufacturing*. Disponible en: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/> [Consulta: 3 de Marzo 2018]

[8] Nort ED. *Los beneficios de la tomografía computerizada industrial (CT) para la Fabricación Aditiva*. Disponible en: <http://nort3d.com/blog/los-beneficios-de-la-tomografia-computarizada-industrial-ct-para-la-fabricacion-aditiva/> [Consulta: 7 de Marzo 2018]

[9] Karwedsky, K y Prendergast, C. (2015) “3D Printing Work Flow” en *blogspot*. Disponible en:

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE
CAPÍTULO 7.- Bibliografía

<http://firsttechchallenge.blogspot.com.es/2015/01/3d-printing-for-first-teams-3-of-8.html> [Consulta: 10 de Marzo 2018]

[10] Bates-Green, K y Howie, T. (2017). “Materials for 3D Printing by Fused Deposition” en *Edmonds Community College*

[11] Lifeinharmony. *Anatomy of hand and wrist bones*. Disponible en: <http://www.lifeinharmony.me/anatomy-of-hand-and-wrist-bones> [Consulta 2 de Febrero 2018]

[12] Juan García, Dr. E.L. *Biomecánica de la Mano*. Disponible en: http://www.traumazaragoza.com/traumazaragoza.com/Documentacion_files/Biomeca%CC%81nica%20de%20la%20Mano.pdf [Consulta 2 de Febrero 2018]

[13] Juan García, Dr. E.L. *Biomecánica de la Muñeca*. Disponible en: http://www.traumazaragoza.com/traumazaragoza.com/Documentacion_files/Biomeca%CC%81nica%20de%20la%20Mun%CC%83eca.pdf [Consulta 2 de Febrero 2018]

[14] Juan García, Dr. E.L. *Biomecánica de los dedos de la mano*. Disponible en: http://www.traumazaragoza.com/traumazaragoza.com/Documentacion_files/Biomeca%CC%81nica%20de%20los%20Dedos%20de%20la%20mano.pdf [Consulta 2 de Febrero 2018]

[15] Juan García, Dr. E.L. *Biomecánica del pulgar*. Disponible en: http://www.traumazaragoza.com/traumazaragoza.com/Documentacion_files/Biomeca%CC%81nica%20del%20Pulgar.pdf [Consulta 2 de Febrero 2018]

[16] Enabling the future. *Wrist powered*. Disponible en: <http://enablingthefuture.org/wrist-powered/> [Consulta 20 de Noviembre de 2017]

[17] Open hand project. *Dextrus*. Disponible en: <http://www.openhandproject.org/> [Consulta 20 de Enero 2018]

[18] Zuñiga, J y Katsavelis, D. (2015). “Cyborg beast: a low-cost 3d-printed prosthetic hand for children with upper-limb differences” en *BMC Research Notes*

[19] Ultimaker. *Products*. Disponible en: <https://ultimaker.com/> [Consulta 20 de Mayo 2018]

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE
CAPÍTULO 7.- Bibliografía

- [20] Redwood, B., Shöffler, F y Gorret, B. (2017). *The 3D Printing Handbook*. 3D Hubs
- [21] AENOR. (2012). *Plásticos. Determinación de las propiedades de tracción. Parte 2: Condiciones de ensayo de plásticos para moldeo y extrusión*. ISO 527-2:2012. Madrid: AENOR
- [22] Shigley, J.E. (1983). *Diseño en ingeniería mecánica*. Madrid: McGraw-Hill
- [23] AENOR. (2007). *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. ASTM D638. United kingdom: AENOR
- [24] Chacón, J.M., Caminero, M.A. García-Plaza, E. y Núñez, P.J. (2017). “Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection” en *Elsevier*, vol 124, p. 143-157
- [25] Shipesh, R y Harshit, K. (2018). “Tensile Properties of 3D Printed PLA under Unidirectional and Bidirectional Raster Angle: A Comparative Study” en *World Academy of Science, Engineering and Technology*.
- [26] Beniak, J., Krizan, P y Matús, M. (2015). “A comparison of the tensile strength of plastic parts produced by a fused deposition modeling device en *ResearchGate*

FABRICACIÓN ADITIVA DE PRÓTESIS DE MANO DE BAJO COSTE
CAPÍTULO 7.- Bibliografía

ANEXOS