



**Universidad
Europea**

UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO

ÁREA INGENIERÍA INDUSTRIAL

Ingeniería en Sistemas Industriales

Mención Mecánica

TRABAJO FIN DE GRADO

**Diseño y Análisis por Elementos Finitos
de una Mano Protésica**

Alumno: D. Saúl Enrique Martínez Nogueira

Director: D. Carlos Castellote Varona

FEBRERO/JUNIO/JULIO 2024

TÍTULO: Diseño y Análisis por Elementos Finitos de una Mano Protésica

AUTOR: Saúl Enrique Martínez Nogueira

DIRECTOR DEL PROYECTO: Carlos Castellote Varona

FECHA: 17 de junio de 2024

Resumen

En este estudio, se presenta un diseño con un análisis estructural de una mano protésica utilizando el método de elementos finitos (MEF). El objetivo principal, es desarrollar una prótesis de mano funcional que realice movimientos y pueda generar fuerzas como una mano humana, optimizando su rendimiento mecánico y su capacidad para soportar cargas diarias.

El diseño comienza con la modelación 3D de la mano protésica, que incluye los dedos, la palma y la muñeca. Se utiliza un software (SolidWorks) para crear un modelo que replica las dimensiones y movimientos de una mano humana. Luego, el modelo es importado en un software que realice el análisis por elementos finitos (ANSYS), donde se emplean los materiales correspondientes, como polímeros de alta resistencia (PLA, Nylon) y el Acero.

Para el análisis, se consideran distintas condiciones de carga y escenarios para el diseño. Se aplican cargas estáticas para simular las fuerzas que actúan sobre la prótesis durante alguna actividad diaria. El análisis por elementos finitos muestra las zonas de mayor tensión y deformación, el cual asegura que el diseño resiste las fuerzas aplicadas sin fallos estructurales.

Los resultados obtenidos indican que, el diseño propuesto es viable y cumple con los requisitos funcionales y de seguridad. Este trabajo enfocado en el diseño y análisis, proporciona una base sólida para futuras investigaciones y mejoras en el desarrollo de prótesis de mano.

Palabras clave: mano protésica, elementos finitos, ANSYS, tensión, deformación, carga.

Abstract

In this study, a design with a structural analysis of a prosthetic hand using the finite element method (FEM) is presented. The main objective is to develop a functional hand prosthesis that performs movements and can generate forces like a human hand, optimizing its mechanical performance and its ability to withstand daily loads.

The design begins with 3D modeling of the prosthetic hand, which includes the fingers, palm, and wrist. Software (SolidWorks) is used to create a model that replicates the dimensions and movements of a human hand. Then, the model is imported into a software that performs finite element analysis (ANSYS), where the corresponding materials are used, such as high resistance polymers (PLA, Nylon) and Steel.

For the analysis, different loading conditions and scenarios are considered for the design. Static loads are applied to simulate the forces acting on the prosthesis during daily activities. The finite element analysis shows the areas of greatest stress and deformation, which ensures that the design resists the applied forces without structural failure.

The results obtained indicate that the proposed design is viable and meets the functional and safety requirements. This work focused on design and analysis provides a solid foundation for future research and improvements in the development of hand prostheses.

Keywords: prosthetic hand, finite elements, ANSYS, stress, deformation, load.

Índice

Capítulo 1 - Introducción	7
1.1 Justificación	7
1.2 Objetivos	7
1.3 Cronograma	9
1.4 Proyecto en que se basa	9
Capítulo 2 - Manos Protésicas	10
2.1 Amputaciones y Malformaciones	10
2.2 Tipos de Manos Protésicas	12
Capítulo 3 – Estudio de la Mano Humana	16
3.1 Anatomía Superficial de la Mano	16
3.2 Músculos de la Mano	20
3.2.1 Músculos Tenares	20
3.2.2 Aductor del Pulgar	21
3.2.3 Músculos hipotenares	22
3.2.4 Músculos Lumbricales	22
3.2.5 Músculos Interóseos	23
3.3 Huesos de la Mano	24
Capítulo 4 – Elasticidad y Resistencia de Materiales	26
4.1 Conceptos Básicos	26
4.2 Formas Básicas de Estructuras	27
4.3 Equilibrio y Tensión	28
4.3.1 Concepto de Equilibrio	28
4.3.2 Concepto de Tensión	28
4.3.3 Tensor de Esfuerzos	29
4.3.4 Direcciones y Tensiones Principales	31
4.4 Elasticidad del Sólido	32
4.4.1 Deformaciones	32
4.4.2 Ensayo de Tracción y Torsión	34
4.5 Ley de Comportamiento Elástico-Lineal	38
4.6 Criterio de Von Mises – Criterio de Plasticidad	39
4.7 Fatiga de Bajos y Altos Ciclos	41
4.7.1 Carga cíclica, tensión media y tensión alternante	41

4.7.2 Curva S-N (Tensión – Vida)	42
4.7.3 Diagrama de Goodman.....	43
4.7.4 Diagrama de Goodman Modificado	43
4.7.5 Diagrama de Soderberg	44
4.7.6 Tensión Alternante Equivalente	44
Capítulo 5 – Características del Prototipo	46
5.1 Condiciones de Diseño.....	46
5.2 Materiales Empleados	47
5.3 Dimensiones del Diseño	49
5.4 Técnicas de Construcción.....	53
5.4.1 El procesamiento digital de luz (DLP)	54
5.4.2 Sinterización selectiva por láser (SLS)	54
5.4.3 Modelado por disposición fundida (FDM).....	55
5.4.4 Amarre de los hilos tensores	56
Capítulo 6 – Programa Empleado y Resultados Obtenidos	57
6.1 Curva S-N empleada	57
6.2 Estructura	59
6.3 Resultados Obtenidos.....	59
6.3.1 Resultados Mano Protésica Caso 1	60
6.3.2 Resultados Mano Protésica Caso 2	64
6.3.3 Resultados del Hilo tensor.....	69
6.3.4 Resultados del Mecanismo de agarre	71
6.3.5 Tabla de resultados.....	74
Capítulo 7 - Presupuesto.....	76
Conclusiones y Futuras Líneas de Trabajo.....	78
Índice de Ilustraciones	79
Índice de Tablas.....	82
ANEXO	83
Bibliografía	95

Capítulo 1 - Introducción

1.1 Justificación

El campo de la biomecánica es una ciencia que está en auge, debido a los constantes desarrollos de diversas prótesis. Estas, permiten ayudar a las personas a que su cuerpo pueda funcionar correctamente cuando carecen de alguna extremidad o tienen una cierta condición motora. Diseñar y elaborar estas prótesis, permiten abrir puertas no solo al campo de la ingeniería, en general, también en la mecánica y medicina.

Debido a esto, se ha decidido realizar el diseño de una prótesis de mano y su comportamiento a condiciones de tensiones y esfuerzos que, permitan garantizar un correcto funcionamiento. Además, este estudio a realizar, puede aportar información útil para futuras prótesis de mano dependiendo de objetivos como: sencillez del diseño, calidad de la prótesis, comodidad de la prótesis, entre otras funciones necesarias para mejorar estas piezas.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto de fin de grado es profundizar en el estudio de las manos protésicas, esto incluye realizar un diseño funcional y el análisis estructural del prototipo, utilizando el método de elementos finitos. Se quiere garantizar que el diseño de prótesis resiste y que no se rompe, deforma o deteriora rápidamente al usarse en distintos tipos de actividades básicas que realiza un ser humano.

Para llegar a este objetivo, se tiene que conocer primero los fundamentos básicos de una prótesis de mano, tanto sus partes, funciones y materiales empleados en este mecanismo para que pueda garantizar un buen funcionamiento como comodidad y confort en los clientes que lo usen. Es importante saber también, que el modelo de prótesis usado es, de una mano protésica con hilos tensores y lograr un buen diseño que cumpla con las funciones mínimas que pueda realizar una mano, como tomar un objeto o material.

Este proyecto utilizará herramientas o softwares potentes como SolidWorks y ANSYS. El primero (SolidWorks) permite realizar diseños de diversas piezas, como también

ensamblajes y generación de planos para su fabricación. Este software lo enfocaremos en la parte de diseño, que es la que destaca esta herramienta. El segundo (ANSYS) Es una herramienta que permite realizar estudios de piezas sometidas a unas condiciones y los efectos que estas generan a la pieza o conjunto de piezas. Esto da como resultado unas representaciones gráficas que permiten estudiar el comportamiento estático y dinámico de la pieza.

Estos softwares son realmente eficientes, por lo que en este proyecto se quiere profundizar y compartir conocimiento en el ámbito de diseño y calculo estructural utilizando conocimiento de disciplinas como elasticidad y resistencia de materiales y CAD aplicados a una prótesis de mano.

Por lo tanto, podremos definir los objetivos del proyecto como los siguientes:

- Estudiar las manos protésicas y sus características.
- Elaborar un estudio actual de la prótesis, enfocado en el diseño de mano protésica con hilos tensores.
- Diseñar una prótesis para la mano que sea funcional y que cumpla con los requerimientos previamente planteados.
- Estudiar los tipos de materiales empleados para la prótesis, enfocado en las propiedades mecánicas y sus usos en el campo de la ingeniería.
- Simulación estructural de la prótesis mediante deformaciones y esfuerzos por elementos finitos para verificar que la mano es funcional y viable para su uso. Así como, obtener datos importantes para futuras simulaciones.
- Estudiar la mano humana para poder realizar un diseño, de una mano protésica, que pueda asemejarse a una mano real y cumpla ciertas características, ya sea en dimensiones como funciones motoras, que permitan un mejor uso.
- Analizar los resultados obtenidos, para verificar y validar que el funcionamiento de la prótesis cumple con lo requerido.

- Señalar unos posibles trabajos futuros a seguir relacionados a este proyecto, para mejorar distintos aspectos.

1.3 Cronograma

Se ha realizado un cronograma, que incluye los meses desde enero hasta la entrega estipulada del documento y dividido por semanas, con las siguientes actividades a cumplir en el plazo establecido.

Actividades	Meses (Semanas)																
	Enero				Febrero				Marzo				Abril			Mayo	
Recolección de Datos																	
Elaboración del Diseño																	
Análisis Estructural																	
Elaboración del Documento																	
Revisión y Elaboración Presentación																	

1.4 Proyecto en que se basa

Este proyecto se basa en la elaboración de un diseño de una prótesis de mano y determinar su funcionalidad respecto a las cargas que pueda soportar y, las actividades o acciones que pueda ejercer dicha prótesis. En este trabajo se explicará detalladamente la elaboración del diseño de la prótesis, como también los cálculos aplicados a esta para verificar y validar que el diseño es funcional.

La teoría aplicada a los cálculos y diseño se explicará de igual manera en este trabajo, facilitando la comprensión de los resultados obtenidos usando los programas fundamentales para este proyecto (SolidWorks y ANSYS). El análisis que se va a utilizar para obtener los cálculos es el análisis de elementos finitos.

Capítulo 2 - Manos Protésicas

2.1 Amputaciones y Malformaciones

Según la Organización Mundial de la Salud, aproximadamente unos tres millones de habitantes han padecido de una amputación de unas de sus extremidades. Esto le implica realizar ciertas labores cotidianas o actividades debido a la limitación que tienen al faltarle una extremidad. Ahora bien, de estas personas que padecen de una amputación, específicamente de una mano, un 65% de las personas del mundo sufren una amputación transradial, y un 31% de la población de los Estados Unidos también lo padece.

Este tipo de amputación transradial (Ilustración 1) es una en la que se remueve la mano y la muñeca, dejando una parte del antebrazo libre. Cabe destacar que también es frecuente la amputación en la zona del brazo o la transhumeral, removiendo casi en su totalidad una de las extremidades superiores. Para poder garantizar una calidad de vida mejor a las personas que padecen esta situación, es necesario utilizar una prótesis de mano.

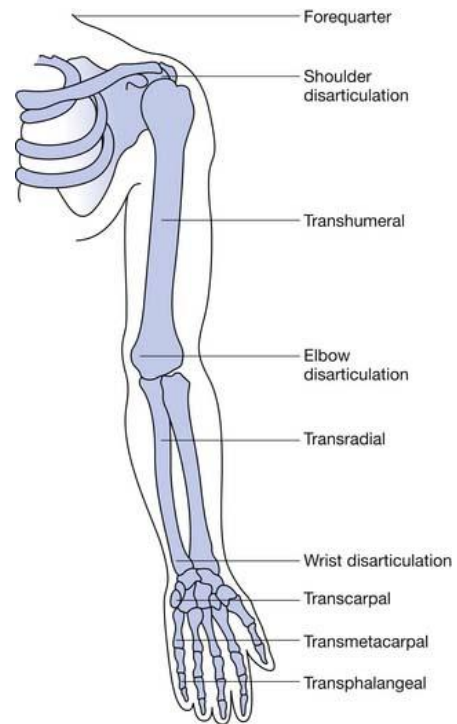


Ilustración 2.1 Tipos de Amputaciones en los brazos [2]

Por otra parte, no solo es necesaria una prótesis para aquellos que padecen una amputación, si no también, los que sufren de alguna malformación o simplemente no tienen la extremidad debido a que nacieron sin ella.

Se tiene entendido que, el 1% o 2% de los niños que nacen con malformación en el mundo, un 10% nace con una malformación de la mano. Según el tipo de malformación, puede ser posible que estas personas tengan los siguientes inconvenientes que enfrentarán a lo largo de su vida:

- Problemas en el desarrollo de habilidades motoras.

- Inconvenientes al realizar actividades cotidianas de la vida diaria.
- Limitarse a no poder realizar algún deporte o actividad física.
- Problemas sociales y psicológicos debido al no tener la misma capacidad y condiciones que la mayoría de personas.

Existen varios tipos de malformaciones que van desde dedos adicionales (polidactilia) a dedos fusionados (sindactilia). Pero una de las malformaciones que más afecta a las personas es la simbraquidactilia, señalada en la Ilustración 2.2.



*Ilustración 2.2 Mano con simbraquidactilia
[4]*

Este tipo de malformación se caracteriza por tener una o dos manos sin desarrollarse por completo. Es decir, no posee dedos o dedos muy pequeños que no pueden cumplir funciones básicas. Esta es una condición que se diagnostica poco después de nacer o después del parto, confirmándose mediante radiografías o un examen físico.

La simbraquidactilia se forma cuando el feto todavía se está desarrollando en el útero de la madre. Cuando se desarrolla las manos del feto, primero, tienen forma de paleta que poco a poco se dividen en dedos. En el caso de la simbraquidactilia, esto no sucede correctamente o el proceso sucede parcialmente.

Para solucionar estos problemas, ya sea una persona que no posee una extremidad como sufrir una malformación, se utiliza unos dispositivos útiles, como una mano protésica. Estas ayudarán y facilitarán la vida de una persona que padece ciertas condiciones, mencionadas anteriormente, ya sea en su vida cotidiana afectando, no solo sus actividades diarias, también en el aspecto psicológico y ánimo del individuo.

2.2 Tipos de Manos Protésicas

Las manos protésicas son dispositivos creados para ayudar a las personas que no tienen la extremidad a realizar actividades básicas. Son utilizadas por personas que han perdido una extremidad por una lesión, accidente o enfermedad o por cierta condición congénita (explicado anteriormente),

Estas prótesis vienen de distintas formas, desde unas sencillas y simples denominadas manos “pasivas” a llegar a manos “biónicas” capaces de recrear distintos movimientos y funciones como una mano real. Esto a su vez, hace que el precio de este tipo de prótesis varíe desde los 4.000\$ hasta 50.000\$, estos precios dependen de la calidad, material y funciones que pueda ejercer la prótesis diseñada. Pero, estos precios pueden ser inasequibles para muchas personas que padezcan de un problema que requiera una prótesis.

Entre los tipos de prótesis encontramos los siguientes:

- **Prótesis Estéticas:** Son prótesis diseñadas solamente para garantizar el aspecto natural de una mano real, ya sea el color de piel, género y características físicas. Estas prótesis estéticas se conforman por un acoplamiento a medida de la amputación de la zona de la persona y una mano interior, la cual le da la forma y estética del miembro. Con este tipo de prótesis, se permite una personalización variada, en cuanto a dimensiones y colores, que genera satisfacción a una gran parte de usuarios que adquieren esta opción.



Ilustración 2.3 Prótesis estética en uso [5]

- **Prótesis de gancho:** Son un tipo de prótesis simple controlada por el brazo, que permite a los usuarios a agarrar o levantar objetos, pudiendo ser objetos de gran peso. Tienen la característica de ser prótesis robustas por su alta durabilidad y resistencia.



Ilustración 2.4 Prótesis de gancho [5]



Ilustración 2.5 Tipo de prótesis mioeléctrica en uso [5]

- **Prótesis Mioeléctricas:** Estos son manos protésicas más desarrolladas y versátiles que los otros tipos de prótesis. Estas manos protésicas están controladas por las señales mioeléctricas generadas por una persona, el cual tiene instalado el dispositivo. Los sensores captan las señales musculares que emite el muñón y permiten el control del dispositivo, ajustándolo a las funciones que posee una mano real.

En resumen, se puede decir que una persona que utilice esta prótesis, podrá mover uno o varios dedos independientemente, debido a los impulsos nerviosos que genera los músculos de su extremidad.

Entre las prótesis mioeléctricas encontramos el siguiente tipo de prótesis: mano protésica con hilos tensores. Este tipo de prótesis permite realizar los movimientos de la mano con una especie de hilos hechos de nylon, que están conectados en las articulaciones de los dedos, realizando así la acción de abrir y cerrar la mano.



Ilustración 2.6 Ejemplo de una mano protésica de hilos tensores [12]

Este tipo de prótesis tiene ciertas ventajas en comparación al resto de prótesis mioeléctricas, siendo principalmente su coste y materiales. Normalmente las prótesis mioeléctricas están hechas de materiales como el titanio y esto, a su vez, cuentan con una gran cantidad de motores, sensores y otras tecnologías que son de un mayor coste.

También este tipo de prótesis no son fabricadas en masa, sino que son personalizadas, ya que dependen mucho de la persona a la que vaya ser implantada este dispositivo. Esto también eleva el coste del producto, lo que hace que sea inaccesible a muchas personas que lo requieran.



*Ilustración 2.7 Mano protésica con los hilos tensores visibles
(color negro y blanco) [12]*

Las prótesis hechas con hilos tensores, están fabricadas por impresoras 3D y usan hilos de nylon para el mecanismo del movimiento de los dedos. Esto permite que el material sea más accesible al momento de fabricarlo. Muchos de estas prótesis utilizan como material principal un polímero conocido como el PLA (ácido poliláctico) que es un material barato en comparación a otros polímeros que se usan en otras prótesis. También, la fabricación por impresoras 3D permite realizar formas complejas, que ayudan a la elaboración de un diseño más único y siendo ideal para prototipos como el proyecto que se está realizando.

También, hay que tener en cuenta que en comparación a otras prótesis mioeléctricas, no dispone de suficientes dispositivos electrónicos, sensores y actuadores, que permitan una infinidad de acciones a realizar, y que no sea capaz de soportar condiciones extremas donde requiera una mejor resistencia y durabilidad el material empleado en la mano.

Muchas prótesis hechas por impresoras 3D garantizan una rápida y menos tediosa fabricación que el resto ya que no se necesita de varios tipos de máquinas para fabricar las piezas requeridas, además del coste que este podría implicar. Asimismo, el tiempo de

fabricación de estas prótesis se reduce considerablemente al ser casi en toda su totalidad del mismo material y con el mismo método de fabricación.

En este proyecto, se quiere intentar diseñar y simular como una prótesis de hilos tensores, hecha con materiales como el PLA, pueda funcionar en la vida real. Se quiere también intentar fabricar este modelo prototipo para ver si el diseño cumple con las expectativas planteadas.

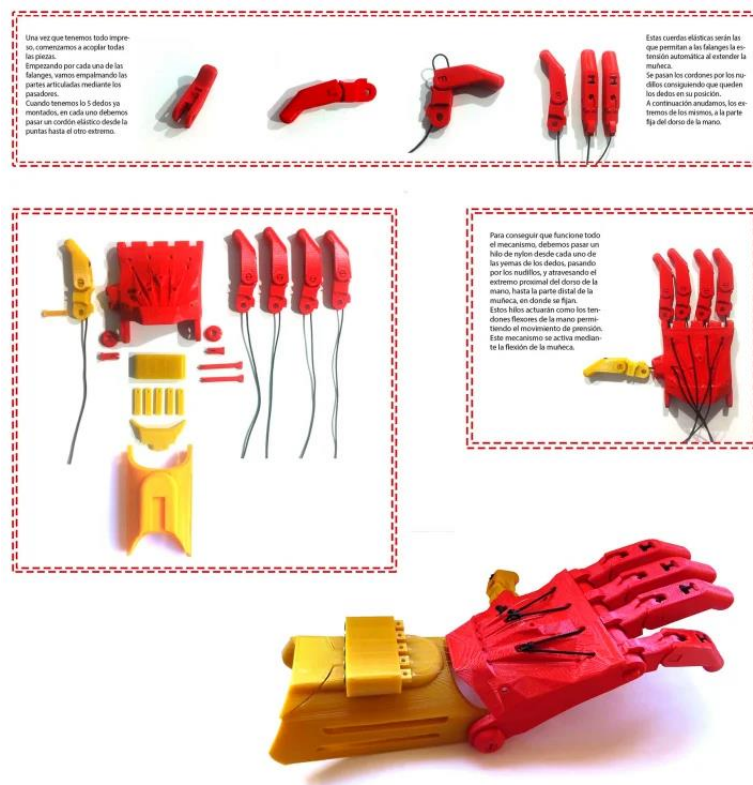


Ilustración 2.8 Ejemplo de un diseño de una prótesis de mano por hilos tensores y las piezas que lo componen, señalando su ensamblaje luego de fabricar las partes que lo componen [13]

Capítulo 3 – Estudio de la Mano Humana

En este capítulo se va a realizar un estudio enfocado a la anatomía y fisiología de la mano humana, como también a los movimientos que realiza la mano para llevar a cabo distintas operaciones. Se incluye también en este capítulo, datos como las fuerzas de agarre de una mano y tensiones ejercidas por la misma, esto va a permitir que se pueda obtener datos esenciales para la elaboración del diseño.

3.1 Anatomía Superficial de la Mano

La mano es una parte del cuerpo humano el cual está unida al antebrazo por la muñeca y comprende desde la muñeca hasta la punta de los dedos. Para los seres humanos es una parte esencial ya que, es una extremidad tan fuerte que permite a los humanos colgarse o sostenerse en situaciones donde se generan muchas tensiones. Además, que también es capaz de ejecutar movimientos finos y precisos, ya sea escribir, dibujar o realizar actividades como las manualidades.

La mano está formada por 27 huesos los que están comprendidos por varios músculos, vasos sanguíneos y nervios que permiten realizar distintos movimientos. Muchos de estos movimientos son posibles gracias a los músculos intrínsecos y extrínsecos.

Los intrínsecos, son encargados de la amplitud del movimiento de la mano. Los extrínsecos, son músculos ubicados en el antebrazo, pero que se insertan en la mano y conectan en las articulaciones de la misma, produciendo movimientos.

Ahora, el esqueleto de la mano se compone de los huesos del carpo, que se ubica en la muñeca; los huesos metacarpianos, en la zona de la propia mano; y las falanges, ubicados en los dedos. Los dedos que componen la mano son cinco, los cuales se empieza por el pulgar, el índice, el medio, el anular y el meñique; ubicados respectivamente en la mano.

La mano tiene dos superficies, la superficie palmar (la de la palma) y la dorsal (parte posterior de la mano). En la cara palmar de la mano, se tiene una segmentación que hace que se diferencie 3 partes: la zona tenar, medio palmar y la hipotenar. El tenar, es la de mayor tamaño que incluye la base del pulgar, la hipotenar, es la más pequeña e incluye la base del dedo meñique. Por último, el medio palmar incluye la zona central de la palma y engloba las bases de los tres dedos restantes (índice, medio y anular).

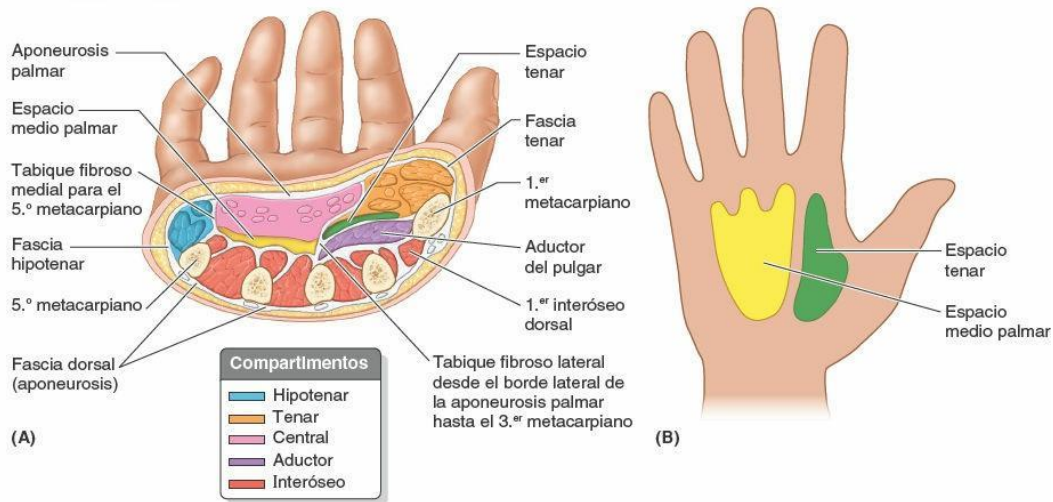


Ilustración 3.1 Espacios y fascias de la palma de la mano. Se puede denotar los diversos espacios tenares y medio palmares que corresponden a las fascias del mismo nombre, siendo las tres (tenar, hipotenar y medio palmar) que cubren en su totalidad la zona de la palma que se está estudiando [14]

En la siguiente imagen (Ilustración 3.2) se puede observar las zonas superficiales de la mano, que incluyen las partes como los dedos; los pliegues de la mano, que permiten que se adopten formas complejas sin que se dañe la piel por excesivo estiramiento; los surcos, que cumplen un papel similar a los pliegues; y las eminencias, las cuales vendrían siendo las zonas anteriormente explicadas.

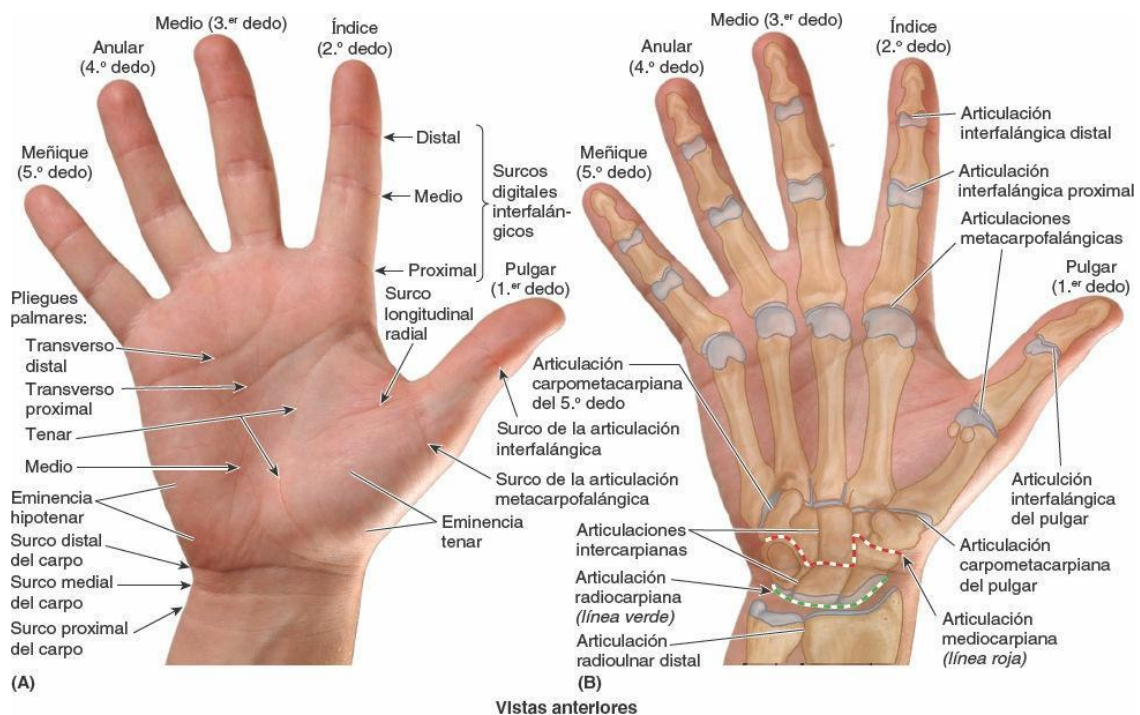


Ilustración 3.2 Partes superficiales de la mano que comprenden los dedos, pliegues, surcos y eminencias que permiten el correcto movimiento de la mano, así como todas las articulaciones que ayudan al desplazamiento de cada parte de los dedos y la muñeca [14]

Por otra parte, es importante conocer las dimensiones de la mano y de sus partes, ya que esto va a influir notablemente en la elaboración del diseño en cuanto a las medidas de cada parte de la prótesis. Estas medidas son tomadas de la norma (Norma DIN 33 402)[16].

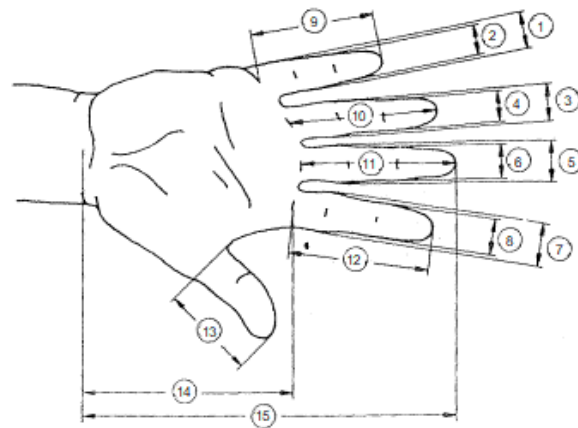


Ilustración 3.3 Medidas de las partes de la mano según la Norma DIN 33 402 [16]

Dimensiones	Hombres (mm)	Mujeres (mm)
1	17	15
2	15	13
3	20	16
4	17	14
5	21	18
6	18	15
7	21	18
8	18	15
9	62	58
10	77	73
11	83	77
12	75	69
13	67	60
14	109	100
15	186	174

Tabla 3.1 Dimensiones de las manos, tanto de hombres como mujeres según la norma DIN 33 402 [16]



Ilustración 3.4 Dimensiones del ancho y grosor de los dedos según la Norma DIN 33 402 [16]

Dimensiones	Hombres (mm)	Mujeres (mm)
1	23	19
2	28	26

Tabla 3.2 Tabla de las dimensiones de la mano referenciadas a la ilustración 3.4 según la Norma DIN 33 402 [16]

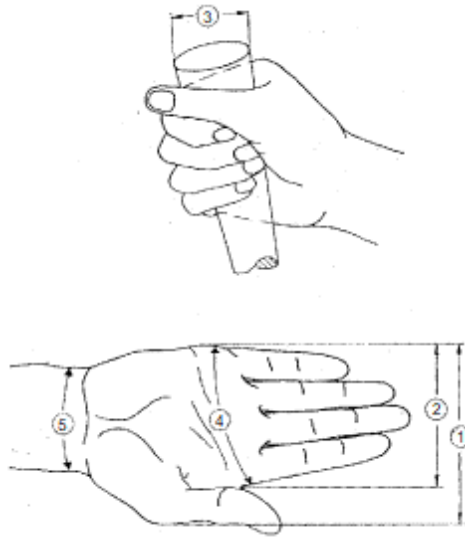


Ilustración 3.5 Dimensiones del ancho de la mano y el grosor de la muñeca, así como el diámetro de agarre según la Norma DIN 33 402 [16]

Dimensiones	Hombres (mm)	Mujeres (mm)
1	107	92
2	85	80
3	138	130
4	210	192
5	176	160

Tabla 3.3 Tabla de las dimensiones de la mano referenciadas a la ilustración 3.5 según la Norma DIN 33 402 [16]

3.2 Músculos de la Mano

Los músculos de la mano se ubican en cinco zonas o compartimentos (Ilustración 3.1) los cuales engloban luego un grupo de pequeños músculos siendo los siguientes: Los músculos tenares en el compartimiento tenar, el aductor del pulgar en el compartimiento aductor, los músculos hipotenares en el compartimiento hipotenar, los músculos lumbricales en el compartimiento central, y los músculos interóseos en el compartimiento interóseo.

3.2.1 Músculos Tenares

Este grupo de músculos componen lo conocido como la eminencia tenar (Ilustración 3.1) ubicado en la zona lateral de la palma que se encargan de los movimientos del pulgar, específicamente la base de este dedo. Gracias a estos músculos se puede lograr movimientos naturales que mantienen la precisión de distintas acciones y un amplio grado de libertad gracias al primer metacarpiano (Ilustración 3.1). Muchos de estos movimientos, que se demuestran a continuación (Ilustración 3.6), son logrados por varios músculos que pertenecen a los músculos tenares (Ilustración 3.7).

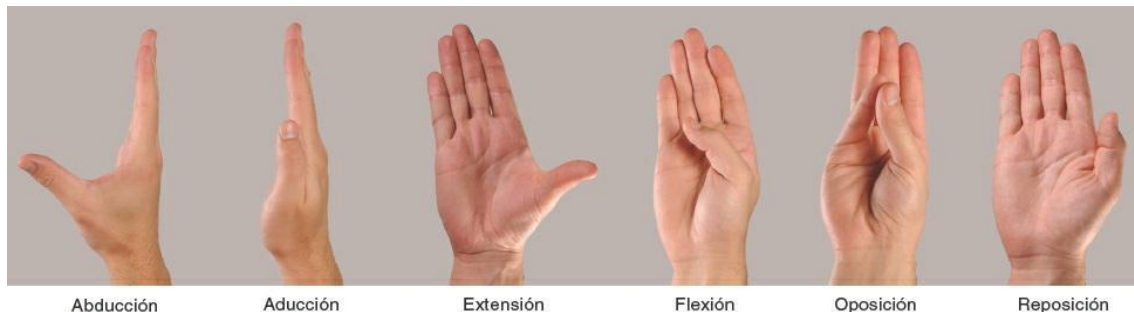


Ilustración 3.6 Distintos tipos de movimiento del pulgar que funcionan con diversos tipos de músculos [14]

Los músculos que influyen (Ilustración 3.7) en cada movimiento mencionado son los siguientes:

- Movimiento de Abducción: Abductor largo del pulgar y abductor corto del pulgar.
- Movimiento de Aducción: Aductor del pulgar y primer interóseo dorsal.
- Movimiento Extensión: Extensor largo del pulgar, extensor corto del pulgar y abductor largo del pulgar.
- Movimiento Flexión: Flexor largo del pulgar y flexor corto del pulgar.
- Movimiento Oposición: Oponente del pulgar.

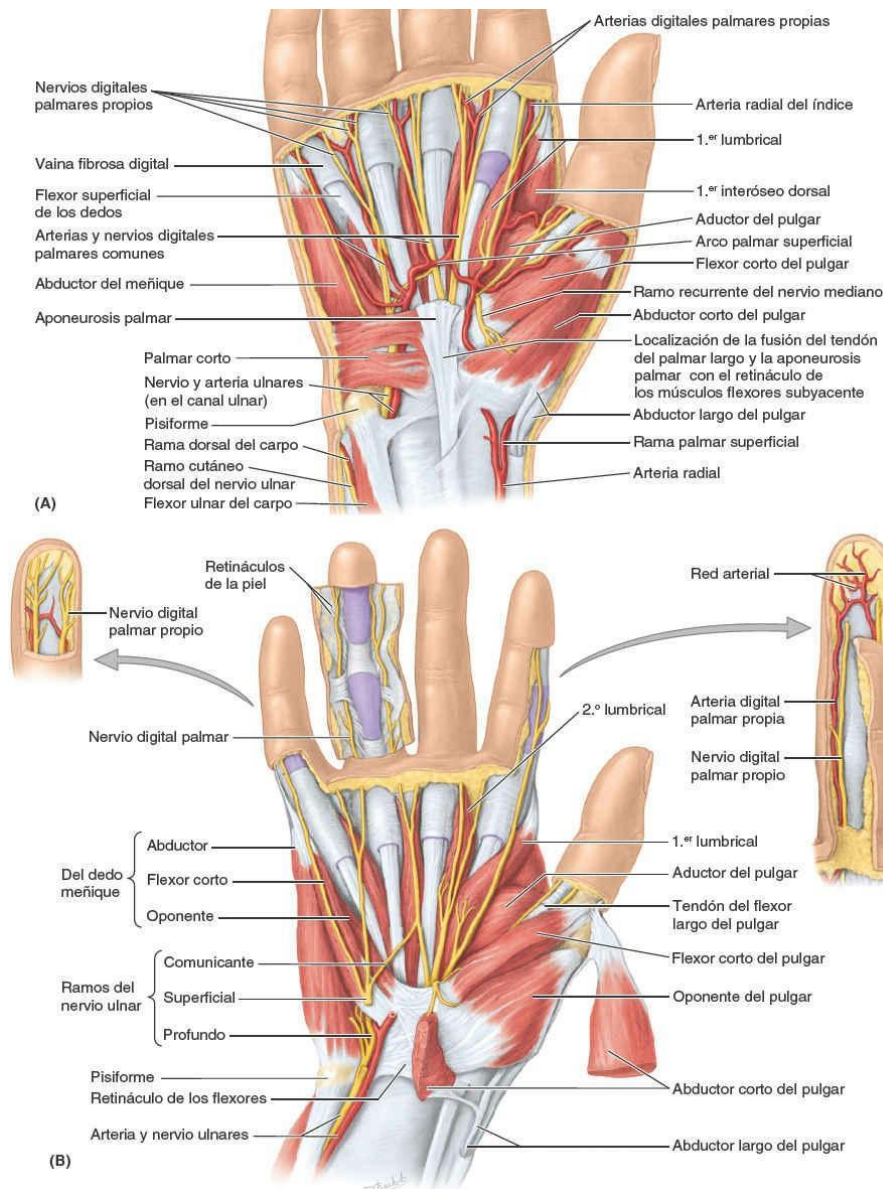


Ilustración 1.7 Músculos que componen gran parte de la mano, mostrando los nombres de no solo los músculos que componen el compartimiento tenar, sino también, los que conforman el compartimiento hipotenar y el aductor [14]

3.2.2 Aductor del Pulgar

El aductor del pulgar (Ilustración 3.1) (Ilustración 3.7) posee dos cabezas separadas por la arteria radial, el cual, al pasar a través de la mano, forma el arco palmar profundo (Ilustración 3.8). El musculo de aductor del pulgar tiene como función aducir el pulgar hacia la palma de la mano para garantizar un mejor agarre (aumenta la fuerza de presión).

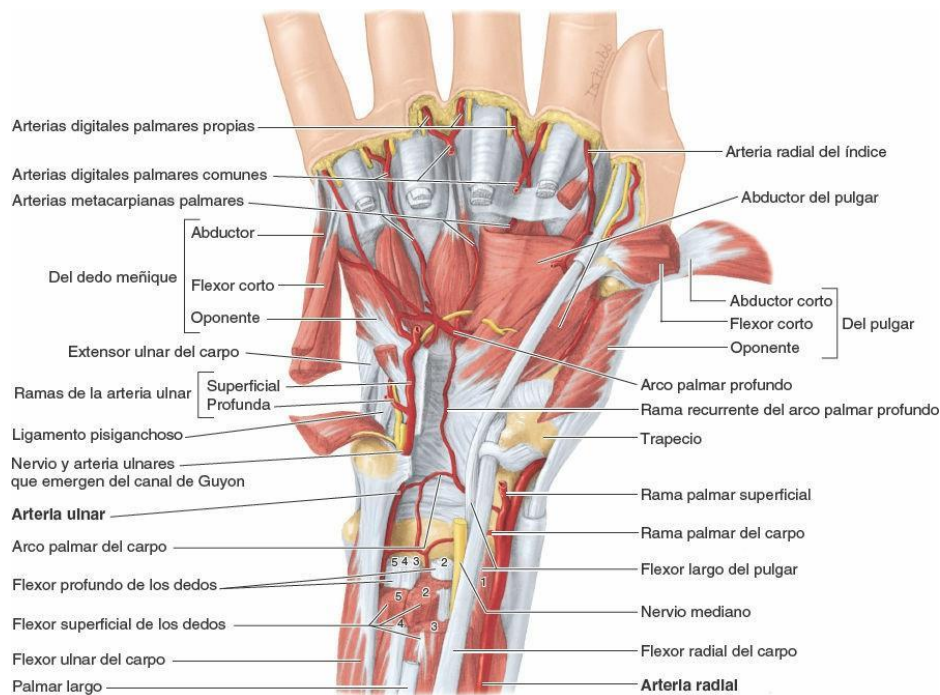


Ilustración 3.8 Músculos y arterias que componen la parte interna de la palma [14]

3.2.3 Músculos hipotenares

Este grupo de músculos son los encargados del movimiento del dedo meñique y se conforman por el abductor, el flexor corto y el musculo oponente (Ilustración 3.7) (Ilustración 3.8). Todos estos músculos se ubican el todo el compartimiento hipotenar.

El abductor viene siendo el más exterior o superficial del resto de músculos y sus funciones son de abducir el meñique y ayudar a flexionar la falange proximal (Ilustración 3.10). El flexor corto se ubica de forma lateral al abductor del meñique y este principalmente hace flexionar la falange proximal. Por último, el oponente el cual tiene forma cuadrada y se encuentra más interno que los otros dos músculos, este cumple con la función de tirar hacia delante el metacarpiano del meñique (Ilustración 3.10) creando una cavidad notable en la palma para darle mayor rango de rotación lateral.

3.2.4 Músculos Lumbricales

Estos músculos se encuentran en la parte central de la palma (Ilustración 3.9). Estos músculos se encargan de flexionar los dedos, actuando en las articulaciones metacarpofalángicas llegando a influir tambien en las articulaciones interfalángicas proximales (Ilustración 3.2). La flexión de los dedos se da, solamente, en los dedos índice, medio, anular y meñique; estos no tienen influencia en el dedo pulgar.

3.2.5 Músculos Interóseos

Estos músculos se localizan en gran parte de los metacarpianos y se dividen en 2 grupos: Los interóseos dorsales, siendo cuatro músculos, que se encuentran en los metacarpianos y los interóseos palmares que se posicionan en la zona palmar junto a los metacarpianos (Ilustración 3.9).

El movimiento que producen estos músculos ocasiona que los dedos hagan un movimiento en Z. Es decir, cuando ambos grupos de músculos (dorsales y palmares) actúan, producen que se flexione las articulaciones meta-carpo falángicas y se extiendan las articulaciones interfalángicas. Debido a esto, los dedos realizan un movimiento horizontal o de lado a lado, llegando a poder juntar los dedos.

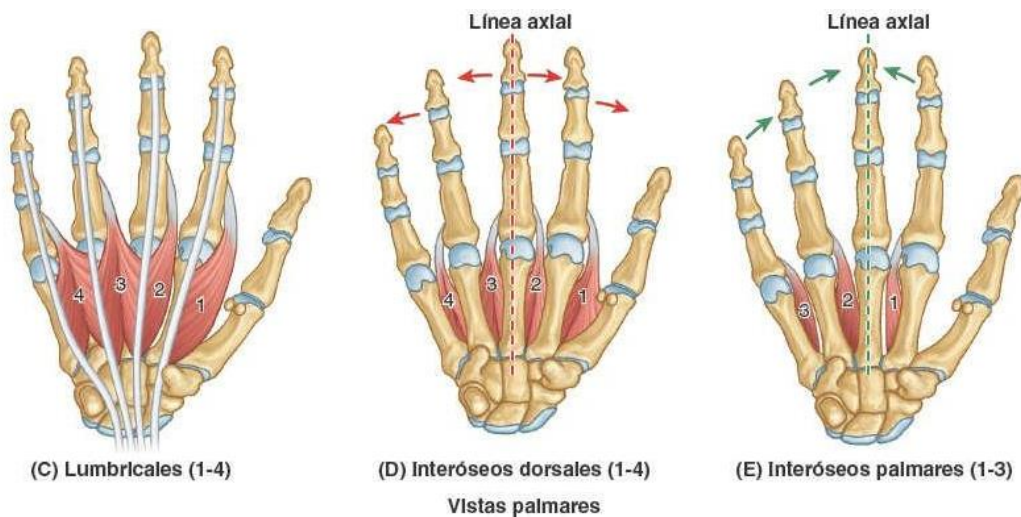


Ilustración 3.9 Inserciones de los músculos lumbricales e interóseos [14]

3.3 Huesos de la Mano

La mano está constituida por 27 huesos, entre estos se dividen en 3 grupos: huesos del carpo, los huesos del metacarpo y las falanges de la mano.

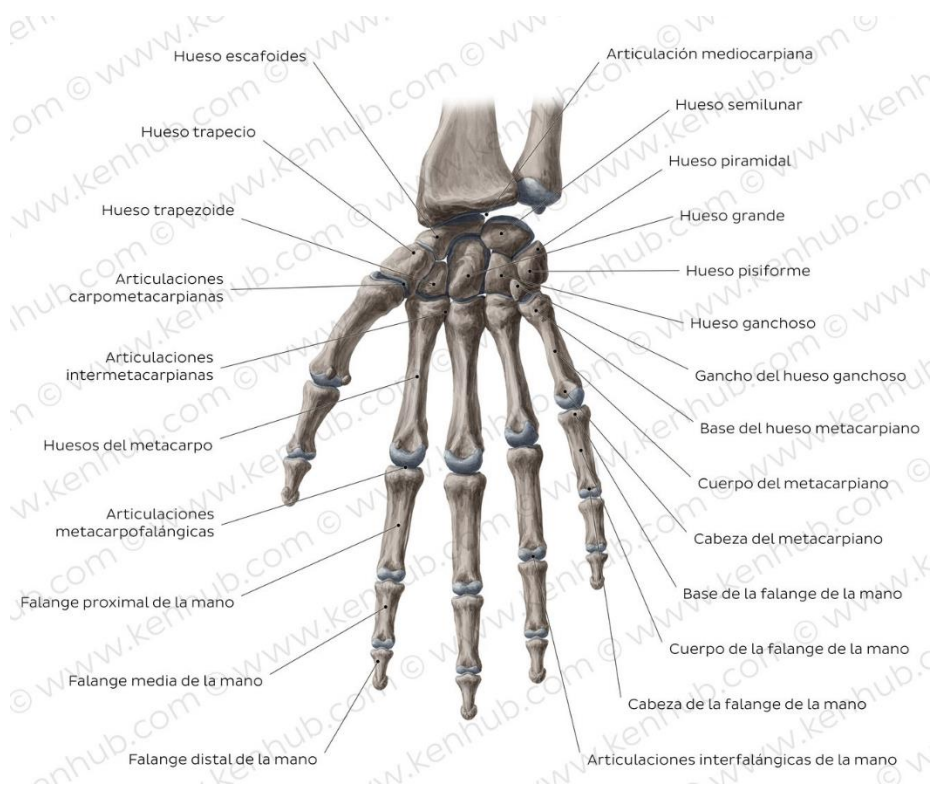


Ilustración 3.10 Huesos que componen la mano y muñeca y nombre de las articulaciones que los unen [15]

Los huesos del carpo, están posicionados en dos filas que constituyen toda la muñeca. Estas filas se componen entre las filas proximales y la fila distal. Los huesos que componen la fila proximal son los escafoides, semilunar, piramidal y pisiforme. Por otra parte, los huesos de la fila distal, se componen de los huesos trapecio, trapezoide, grande y ganchoso. Todos estos huesos se pueden apreciar en la Ilustración 3.10.

Los huesos del metacarpo, son un conjunto de cinco huesos que conforman la base de los dedos ubicados entre las falanges y el carpo (Ilustración 3.11) y limitan o conectan con las articulaciones carpometacarpianas y metacarpofalángicas (Ilustración 3.10). Estos son considerados como huesos largos, a pesar de su tamaño, y funcionan como parte estructural de las falanges.



Ilustración 3.11 Huesos del metacarpo. [15]

Por último, las falanges de la mano, son un grupo de huesos que conforman en su totalidad los dedos. Estos huesos se componen de catorce falanges, y cada dedo se divide en tres falanges (Ilustración 3.12); la falange proximal, que viene siendo la que conecta directamente con los huesos del metacarpo; la falange media y la distal, el cual es la última y la que más distante se encuentra. Cabe destacar que solo el pulgar posee dos falanges (una proximal y una distal), mientras que los otros cuatros dedos restantes si tienen las tres falanges.



Ilustración 3.12 Falanges que componen la mano, se aprecia que el pulgar solo posee una falange proximal y una distal. Tambien, que el tamaño de las falanges proximales es mayor al de las falanges medias y, esta a su vez, es mayor a las distales. [15]

Capítulo 4 – Elasticidad y Resistencia de Materiales

En este capítulo se explicará brevemente los conceptos y teorías aplicadas al proyecto, ya que estas son importantes para entender cómo se verá afectado el diseño y los resultados obtenidos por elementos finitos mediante el software ANSYS.

4.1 Conceptos Básicos

Antes de empezar a analizar el modelo, es importante tener en cuenta ciertos conceptos y teorías, que se explicarán más a fondo, que influyen en el estudio de la mano protésica:

La Resistencia de Materiales, es una disciplina que es importante en los campos de ingeniería mecánica, ingeniería industrial e ingeniería civil. Este estudia el comportamiento y las propiedades mecánicas de un sólido mediante modelos simples.

La resistencia de un objeto se entiende como la capacidad del material a resistir tensiones y fuerzas generadas sobre él y el estado que este se encuentre, ya que se presentan deformaciones y daños a consecuencia de los esfuerzos y fuerzas aplicadas.

La Teoría de Estructuras, el cual estudia el comportamiento de un conjunto de barras conectadas entre ellas.

Por último, la Elasticidad, viene siendo la propiedad física y mecánica, de algún material, al reaccionar a deformaciones y si estos son reversibles o no. Es importante tomar en cuenta que lo que se explicará a continuación, se supondrá que el objeto es homogéneo (propiedades iguales en todos los puntos) e isótropo (no existe dependencia de las propiedades respecto a la dirección de observación). Esto ahorrará mucha teoría que no es relevante para entender lo esencial.

4.2 Formas Básicas de Estructuras

Las formas básicas hacen referencia a la geometría básica de los elementos aplicados en la mano, muchas de estas formas se clasifican de la siguiente manera:

Dimensiones Mayores

Barra Rectas (Vigas, Pilares)

Cables

Dimensiones Menores

Placas

Forma General

Muy empleados en uniones de varios elementos previamente dichos y en varios elementos mecánicos (biela, leva, cigüeñal, etc).

Las barras son una de los elementos más utilizados en cualquier estructura. La geometría de la barra se compone de un perfil o sección, siendo una superficie plana, que se origina al moverse por una recta segmentada perpendicular a este perfil, denominado directriz de la barra. Tomando en cuenta todo esto, cuando se habla de una viga, se refiere a una barra que esta sujeta en uno o varios puntos, que soporta cargas transversales a ella. Por otra parte, el pilar, viene siendo una barra que soporta cargas longitudinales con su eje. En cuanto al caso de este proyecto, hay componentes que actúan como ambos casos, ya que son capaces de soportar ambas cargas, pero uno más que otro.

Los cables son elementos que únicamente soportan cargas longitudinales (tracción) y tienen una geometría adaptada a las cargas aplicadas.

Una placa es como una viga, pero con una dimensión adicional. Tiene propiedades similares a la viga, como resistencias a cargas transversales en distintos puntos.

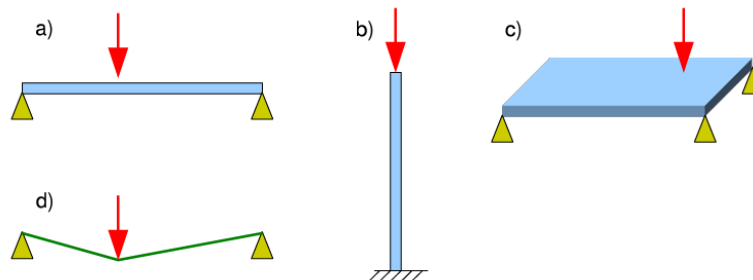


Ilustración 2.1 Ejemplos de las Formas estructurales a) viga b) pilar c) placa d) cable [18]

4.3 Equilibrio y Tensión

4.3.1 Equilibrio

En el análisis de cualquier sólido existente, sea rígido o no (deformable), interactúan un conjunto de fuerzas, actuando como cargas puntuales o distribuidas. Dichas fuerzas expresan que el resultado de la interacción de ambas en un cuerpo es nulo, por lo que su movimiento en cualquier punto también es nulo. Este equilibrio se cumple con las siguientes ecuaciones:

$$\sum \vec{F} = 0 \quad \sum \vec{M} = 0$$

4.3.2 Tensión

La tensión es la fuerza por unidad de área en el entorno de un punto material sobre una superficie, este concepto físico viene siendo uno de los más importantes en términos de mecánica de sólidos.

Estas tensiones se generan debido a la influencia de un sistema de fuerzas sobre un sólido que está en equilibrio. Como estas fuerzas actúan en el sólido como tal, aplican cargas en la superficie del cuerpo, que bien pueden ser cargas puntuales (actúan en un punto de la superficie) o cargas distribuidas (que actúan en un área de la superficie del sólido). También, existen fuerzas de dominio, que son tensiones que actúan dentro del sólido en un volumen determinado.

Si se tiene un sólido con una superficie S (Ilustración 4.2) con un vector adimensional $\mathbf{n}$ con una dirección perpendicular en todos los puntos de la superficie S . Este punto tomado debería de estar en equilibrio, y según, la hipótesis fundamental de la Mecánica de Medios Continuos, estos conjuntos de fuerzas que actúan en cada porción del sólido vienen siendo una distribución continua de fuerzas por unidad de área.

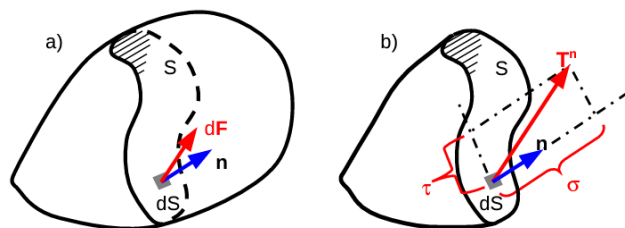


Ilustración 4.2 Partes de un sólido y las magnitudes que actúan en ella [18]

Considerando lo anterior mencionado, en la Ilustración 4.2.a; se tiene que, un diferencial de área dS de una superficie S y con una normal $\mathbf{n}$, actúa un diferencial de fuerza $d\mathbf{F}$, resultado de las tensiones distribuidas que influyen en ese diferencial.

En la Ilustración 4.2.b, existe un vector tensión $\mathbf{T}^n$, con subíndice $\mathbf{n}$ (debido a que hace referenciade un vector tensión en ese punto, ya que en otra sección de superficie que no tenga la normal $\mathbf{n}$, sería distinto) y de la superficie S , sin ser obligatoriamente perpendicular a esta. Esto quiere decir que el vector $\mathbf{T}^n$ no tiene dirección $\mathbf{n}$, pero en la misma dirección actúa un componente llamado tensión normal σ , y otro perpendicular a este siendo la tensión cortante τ , siendo las componentes intrínsecas del vector tensión.

Estas componentes se representan de la siguiente manera:

$$\sigma = \mathbf{T}^n \cdot \mathbf{n} \quad \tau = |\mathbf{T}^n|^2 - \sigma^2 \quad (\text{ecuación 4.1}) [18]$$

La tensión normal σ es consecuencia de un producto escalar y puede ser positivo (si es tracción) y negativo (si es compresión). Por otra parte, la tensión cortante τ tiene esta fórmula debido al aplicar el Teorema de Pitágoras para calcularlo. Esta última tensión no posee signo ya que, es irrelevante su dirección porque no influye entre las infinitas posibilidades. Sin embargo, en la tensión normal si existen dos casos distintos: la tracción (hacia afuera) y la compresión (hacia adentro).

4.3.3 Tensor de Esfuerzos

El vector tensión no es una magnitud que se pueda emplear en algún modelo matemático de sólidos deformables. Esto se debe a que el vector tensor solo se posiciona en un plano de corte, de un mismo punto. Esto se refiere, a que el vector no da suficiente información acerca de las fuerzas que se transmiten alrededor de ese punto y los planos que pasan por este también.

Para resolver este problema, se usa una magnitud llamada tensor de orden dos, el cual se representa por 9 componentes reales. Si se toma un punto $\mathbf{P}$ dentro de un sólido con sus respectivos ejes definidos (x, y, z) , donde se les asigna unos vectores unitarios $(\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z)$. Si tomamos como normal exterior, de una superficie de corte, alguno de esos vectores como el $\mathbf{e}_y$, que es perpendicular al eje “y”, se tiene un vector tensión $\mathbf{T}^{\mathbf{e}_y}$. Para este vector se le agregan sus tres componentes $(\sigma_{yx}, \sigma_{yy}, \sigma_{yz})$ respectivamente

(Ilustración 4.3). Para estos componentes, el primer subíndice se refiere al plano de corte elegido, y el segundo subíndice a las direcciones de cada componente tensor.

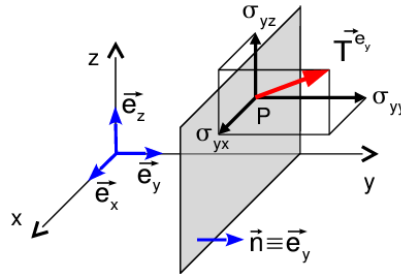


Ilustración 4.3 Componentes que conforman el tensor de tensiones [18]

Ahora bien, si tomamos otra superficie de corte con un vector e_x , se tendría otro vector tensión T^{e_x} de componentes $(\sigma_{xx}, \sigma_{xy}, \sigma_{xz})$. Este sería un caso similar (con los mismos pasos) que el anterior explicado, igual se repetiría con un vector tensión T^{e_z} , con componentes $(\sigma_{zx}, \sigma_{zy}, \sigma_{zz})$. Todos estos vectores al final conforman las nueve componentes del Tensor de Tensiones. Este Tensor se representa con una matriz, ordenado de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (\text{ecuación 4.2}) [18]$$

Con esto, se obtiene que la magnitud σ_{ij} se define de la siguiente manera:

$$\sigma_{ij} = T_i^{e_j} \quad (i, j = x, y, z) \quad (\text{ecuación 4.3}) [18]$$

Ahora para el tema de los signos, se entiende que el componente del tensor es positivo cuando:

- El normal exterior del plano de corte, y la componente de tensión, ambas están en sentido de un eje.
- El normal exterior del plano de corte, y la componente de tensión, ambas están en sentido contrario de un eje.

De no ser así, el resto de casos tendrán un valor negativo de la componente del tensor como se muestra en la Ilustración 4.4.

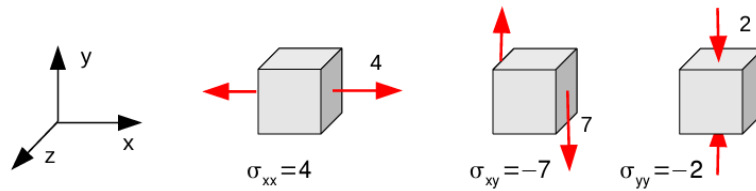


Ilustración 4.4 Ejemplos de los valores que pueden tomar los componentes de tensión dependiendo del sentido [18]

En el caso de la Ilustración 4.4, se entiende que los cubos representan un diferencial de superficie del sólido, siendo estas caras los planos que pasan por dicho punto. El signo se demuestra fácilmente haciendo relación al sistema de coordenadas. Por otra parte, se toma en cuenta que hay dos flechas en un diferencial que una, se debe al principio de acción y reacción, esto significa que se podría decir que se tiene un mismo plano, pero con una normal en sentido contrario.

Por otra parte, con las 9 componentes del tensor se puede obtener el vector tensión $\mathbf{T}^n$ de un plano normal exterior $\mathbf{n}$ cualquiera, con la siguiente formula:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_x^n \\ T_y^n \\ T_z^n \end{bmatrix} \text{ (ecuación 4.3) [18]}$$

4.3.4 Direcciones y Tensiones Principales

Como se explicó anteriormente, el vector tensión no debe ser obligatoriamente perpendicular al plano de corte. Sin embargo, existe la posibilidad de que este vector si fuera perpendicular a este plano, coincidiendo con el vector normal $\mathbf{n}$, el cual ahora si vendría siendo la dirección principal del vector.

En estos casos, solo existiría tensión normal en el sólido, teniendo la tensión cortante igual a $\tau = 0$. Donde ahora las direcciones $\mathbf{n}$ de esos planos se llaman Direcciones Principales. Por lo tanto, las tensiones correspondientes serían Tensiones Principales.

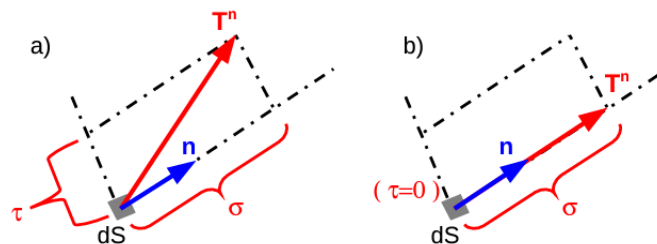


Ilustración 4.3 Casos donde a) $\mathbf{n}$ no es la tensión principal mientras que b) si lo es [18]

Entonces, si es el caso, tanto las direcciones y tensiones principales vendrían siendo los valores y vectores propios. Se establece de la siguiente manera:

Hay tres direcciones principales que son perpendiculares entre sí ($\mathbf{n}^I, \mathbf{n}^{II}, \mathbf{n}^{III}$). De estas direcciones se les asigna unos ejes coordenados que coincidan con ellos. Al final, se muestra las tensiones principales coincidentes a estos planos principales, representados como $(\sigma^I, \sigma^{II}, \sigma^{III})$.

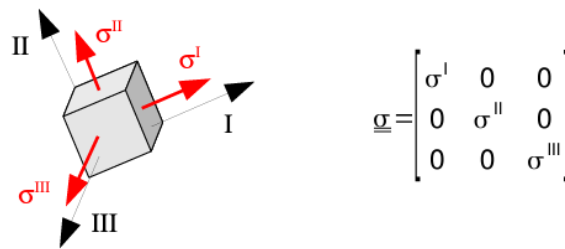


Ilustración 4.4 Tensor de esfuerzos o de tensiones principales [18]

Para los ejes se usa la notación **I, II, III**, en lugar de los del eje a lo que uno está acostumbrado (**x, y, z**). También hay que denotar que en la matriz solo existen los valores de tensiones principales (tensión normal al plano) ya que las cortantes (no perpendiculares al plano de corte) son cero.

4.4 Elasticidad del Sólido

4.4.1 Deformaciones

La deformación es el cambio de forma de un sólido debido a la acción de alguna fuerza o carga sobre él. Los cambios en la forma de un sólido, se debe a un incremento de longitud de cada segmento de un diferencial del sólido. Por lo tanto, se quiere aplicar una magnitud que pudiera darnos información acerca de esos incrementos del entorno del punto.

De igual forma, la deformación de todos estos segmentos, se caracteriza por un tensor simétrico de orden dos. Este se le conoce como “Tensor de Pequeñas Deformaciones” o “Tensor de Cauchy”.

Entonces este tensor de deformaciones es similar al tensor de tensiones. En este tensor se caracteriza con el símbolo ϵ . En este caso igual que con el tensor de tensiones, le asignamos los subíndices ϵ_{ij} , siendo i, j valores correspondientes de cualquier eje **x, y, z**.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \text{ (ecuación 4.4) [18]}$$

Entonces en esta matriz, se tiene que los componentes en diagonal $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$, denominados deformaciones longitudinales, representan los alargamientos de diferenciales que pasan por ese punto que tienen la misma dirección que los ejes x, y, z . Estos pueden tomar valores positivos (alargamiento) y negativos (acortamiento).

Para los componentes ε_{xy} y los demás que no son los diagonales, llamados deformaciones transversales, representan el ángulo entre los segmentos diferenciales que parten en el origen dividido a la mitad. Para los valores positivos (ángulo cierra) y para los valores negativos (ángulo abre).

Es importante destacar que todos estos componentes son adimensionales. Esto se debe a que se representa el incremento dividido entre la longitud inicial, por ejemplo (mm/mm) que al final se simplifican. También, los valores de deformación son sumamente pequeños, y estos normalmente se miden en (mm/mm) o incluso en unidades más pequeñas.

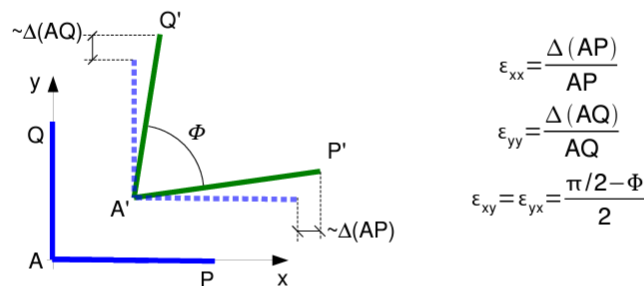


Ilustración 4.5 Representación de las ecuaciones de las deformaciones de los puntos A, P, Q y una representación gráfica de un segmento deformado [18]

Ahora, se puede representar también que el incremento de longitud, de un vector desplazamiento $\mathbf{u}(x, y, z)$ con un segmento $\mathbf{AP}$ coincidente con el eje x , de la siguiente manera:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\Delta(AP)}{AP} = \frac{\partial u_x}{\partial x} \text{ (ecuación 4.5) [18]}$$

4.4.2 Ensayos de Tracción y Torsión

El ensayo de tracción consiste en estirar una probeta, de cualquier material, con una fuerza que aumenta progresivamente, hasta llegar al fallo o rotura del material. Este ensayo resulta en la obtención de una gráfica, en la cual se obtiene información relevante en las propiedades mecánicas de dicho material estudiado.

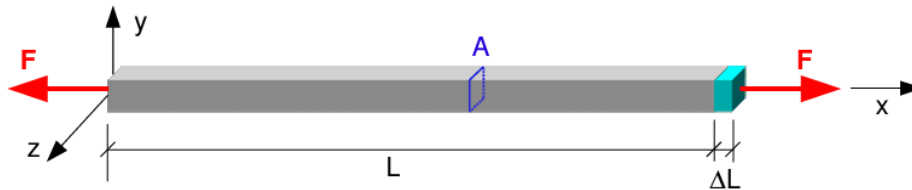


Ilustración 4.6 Magnitudes que actúan en la tracción del material [18]

$$\sigma_{xx} = \frac{F}{A} ; \sigma_{xy} = \sigma_{xz} = \sigma_{yy} = \sigma_{yz} = \sigma_{zz} = 0 \text{ (Ecuación 4.6) [18]}$$

$$\epsilon_{xx} = \frac{\Delta L}{L} ; \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz} \neq 0 ; \epsilon_{xy} = \epsilon_{xz} = \epsilon_{yz} = 0 \text{ (Ecuación 4.7) [18]}$$

En este ensayo se obtuvieron las ecuaciones 4.6 y 4.7, donde señalan que solamente se generan tensiones normales (tracción) en el eje x, es decir, una componente σ_{xx} . Al analizar la ecuación, se entiende que estas tensiones son por unidad de área, por lo que se entiende que es la fuerza entre el área en el que actúa $\sigma_{xx} = F/A$. Las otras componentes son igual a cero ya que no existe fuerza que actúe en esos planos de corte.

Igual forma sucede algo parecido con las deformaciones, en las cuales solo existe deformación en las componentes normales y que las deformaciones transversales son nulas.

Ahora lo mostrado anteriormente sirve para entender el grafico. En el ensayo comienza con una tracción y deformaciones nulas que van progresivamente aumentando hasta que la probeta se rompe. Primero se llega a un punto llamado Límite Elástico σ_e , el cual es la tensión en la cual se produce el fenómeno de fluencia. Es una medida de la resistencia a la deformación.

Por último, la pendiente de la recta hace referencia a otra característica fundamental conocida como Modulo de Young o Modulo de Elasticidad E . Este viene siendo la rigidez

o resistencia de un material a la deformación elástica. Con esto se concluye que en la zona elástica se cumple la siguiente ecuación.

$$\sigma_{xx} = E \cdot \epsilon_{xx} \text{ (Ecuación 4.8) [18]}$$

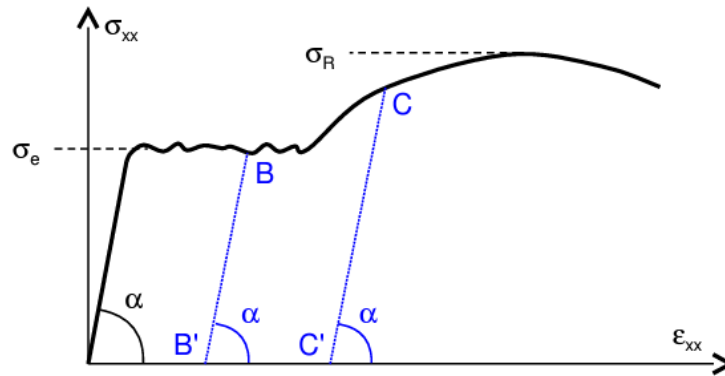


Ilustración 4.7 Grafica de un ensayo a tracción y los elementos principales a tener en cuenta [18]

Cuando se llega al límite elástico, empieza la fluencia del material. Cuando se llega a este punto, el material empieza a deformarse elástica-plásticamente. Esto significa que no es totalmente plástica la deformación y recupera una parte de su forma. Por otra parte, en ese punto empieza a volverse más plástico hasta llegar a la zona donde se presenta una curva.

Los puntos B y C representan casos donde se para el ensayo y su grafica pasa por una recta paralela al del Módulo de Young, quedando con la deformación correspondiente.

Cuando se llega a la curva, ya la deformación es totalmente plástica y no existe manera de que el material recupere su forma inicial. En ese punto el material se empieza a deformar mucho más, hasta llegar a la tensión de rotura σ_R , que es la tensión máxima que puede soportar un material al momento de su ruptura. Luego se nota que la curva disminuye hasta que abruptamente se corta, que significa que ya el material se ha roto.

Para obtener las deformaciones normales en y, z, se aplica la siguiente ecuación, considerando que $\epsilon_{yy} = \epsilon_{zz}$ y que en este cálculo interviene un parámetro característico del material, denominado Coeficiente de Poisson ν . Entonces la ecuación quedaría de la siguiente manera:

$$\epsilon_{yy} = \epsilon_{zz} = -\nu \cdot \epsilon_{xx} \text{ (Ecuación 4.9) [18]}$$

En el ensayo de Torsión se quiere conocer solamente la tensión tangencial σ_{xy} de un diferencial en un cuerpo o material. En este ensayo, se utiliza una probeta maciza con forma de cilindro hueco, en el que se aplica un momento torsor T (momento colineal a la directriz del cilindro) que deforma la barra alrededor de su eje.

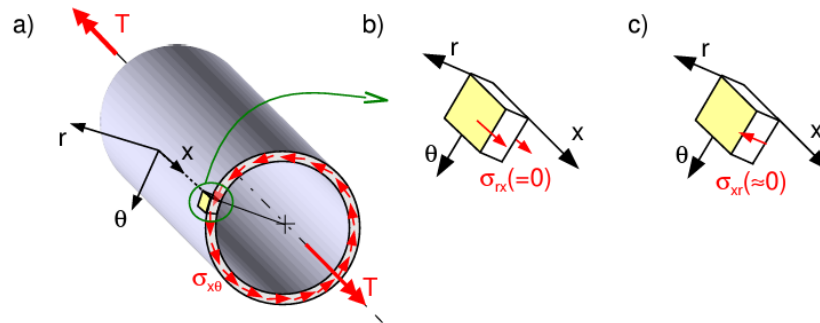


Ilustración 4.8 Ensayo de torsión y distribución de tensiones en la barra [18]

En esta imagen (Ilustración 4.10), se muestra que la barra está sometida a una fuerza T , donde sólo se generan tensiones tangenciales con dirección circunferencial. Ahora agregando unos ejes a un diferencial, donde x sea paralelo al eje, r con dirección al radio y θ con dirección circunferencial. Como se aprecia, se generarían entonces tensiones $\sigma_{x\theta}$ en el sólido. Siendo nulas las tensiones normales σ_{rx} y casi cero las radiales σ_{xr} , siendo esta última también despreciable para el estudio.

Entonces, hay unos puntos importantes a tomar en cuenta en el ensayo: Que la barra se mantiene con longitud constante y sin cambios de sus dimensiones, y que existe una proporción entre el par aplicado y el ángulo de giro entre dos zonas a una distancia determinada.

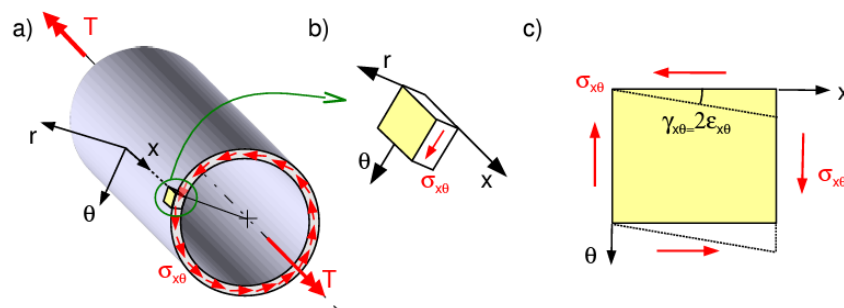


Ilustración 4.9 Deformaciones de un diferencial y Tensiones tangenciales [18]

Como se ve en esta imagen, solo existe tensiones tangenciales en el cilindro y que debe de existir la misma tensión en las otras caras debido al Principio de Reciprocidad de Tensiones Tangenciales. Este establece que en dos planos perpendiculares que pasan por un punto, tienen el mismo valor de tensión (Ilustración 4.12).

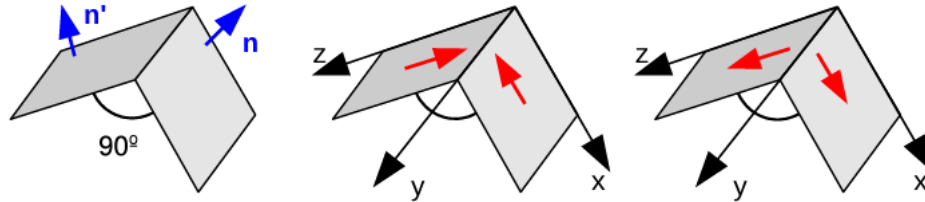


Ilustración 4.10 Simetría de tensiones tangenciales en secciones de un punto [18]

En el otro caso, se dice que existe una proporcionalidad de la tensión $\sigma_{x\theta}$ respecto a T , y el ángulo girado entre las dos secciones respecto al ángulo $\gamma_{x\theta}$. Entonces si se considera un diferencial de área de dimensiones $R \cdot d\theta$, siendo R el radio exterior, y un espesor e , se llega a la siguiente ecuación:

$$\int_0^{2\pi} \sigma_{x\theta} e \cdot R^2 d\theta = T \rightarrow \sigma_{x\theta} = \frac{T}{2\pi R^2 \cdot e} \text{ (Ecuación 4.10) [18]}$$

Por otra parte, teniendo la longitud de la barra dx y el ángulo entre secciones medido en unidad de longitud θ , sabiendo que parte de la barra no gira (izquierda o derecha), será expresada como $\gamma_{x\theta} \cdot dx$, y por otra parte $\theta \cdot dx \cdot R$. La ecuación quedaría expresada como:

$$\gamma_{x\theta} = \theta \cdot R \text{ (Ecuación 4.11) [18]}$$

En la cortadura, se emplea un módulo llamado Módulo de Cortadura G , una magnitud característica del material, y se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{\sigma_{x\theta}}{\gamma_{x\theta}} = G \text{ (Ecuación 4.12) [18]}$$

Por otra parte, se puede calcular este módulo G en base a constantes conocidas como E y ν :

$$G = \frac{E}{2+2\nu} \text{ (Ecuación 4.13) [18]}$$

Cabe destacar que en el ensayo de torsión tiene cierta similitud con el ensayo de cizalla o cortadura. En ese ensayo un material se somete de igual manera a esfuerzos tangenciales, pero en este caso la probeta es sostenida por ambos extremos, mientras se

genera una fuerza perpendicular a la superficie del material, hasta romperlo. El término empleado para la tensión cortante es τ , que siempre actúa tangencialmente al área del material, termino explicado anteriormente en el apartado 4.3.4.

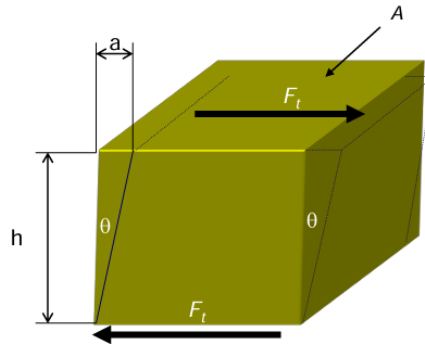


Ilustración 4.11 Representación de los elementos que intervienen en las tensiones cortantes [21]

La ecuación correspondiente a este caso sería el esfuerzo cortante que actúa F_t entre el área o sección de corte del material A quedando como: $\tau = F_t/A$. Ese término sería el mismo que los utilizados en este proyecto como σ_{xy} , σ_{xz} , σ_{yz} .

Esta ecuación tiene similitud a la ecuación 4.10, ya que se habla de tensiones tangenciales, que vienen siendo la misma magnitud solo que en torsión, pueden existir tensiones normales y hay ángulos de giro.

4.5 Ley de Comportamiento Elástico-Lineal

Esta ley refiere a la relación que existe entre las componentes de deformación elástica y las de tensiones generadas en un cuerpo. En esta ley se considera un diferencial de un sólido donde se quiere calcular las todas las deformaciones frente a un estado general de deformación.

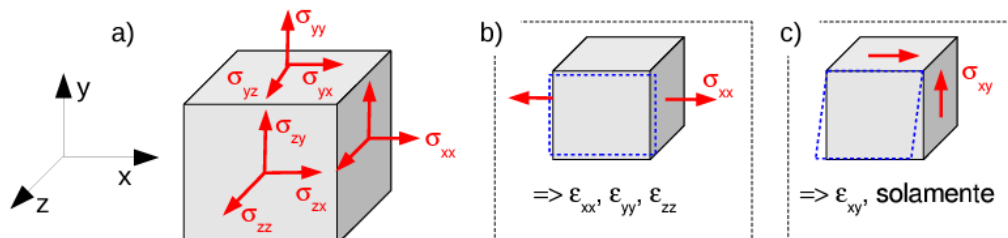


Ilustración 4.12 Distintas componentes de tensión y sus efectos en la deformación respecto a un diferencial [18]

Para calcular la deformación ϵ_{xx} , primero se tiene que aplicar el principio de superposición de efectos debido a que es un problema lineal:

El valor de la deformación de σ_{xx} es σ_{xx}/E obtenido del ensayo de tracción, mientras que la deformación de los componentes σ_{yy} y σ_{zz} son $-\nu \cdot \sigma_{yy}/E$ y $-\nu \cdot \sigma_{zz}/E$, respectivamente que se obtuvieron en los ensayos de torsión.

La deformación ϵ_{xx} es la suma de todas las deformaciones ocurridas en ese mismo plano, quedando como:

$$\epsilon_{xx} = \frac{1}{E} \sigma_{xx} - \frac{\nu}{E} \sigma_{yy} - \frac{\nu}{E} \sigma_{zz} \text{ (Ecuación 4.14) [18]}$$

De igual manera si se hace el mismo planteamiento en las otras secciones, quedaría algo similar:

$$\epsilon_{xx} = \frac{1}{E} \sigma_{xx} - \frac{\nu}{E} \sigma_{yy} - \frac{\nu}{E} \sigma_{zz} \text{ (Ecuación 4.15) [18]}$$

$$\epsilon_{xx} = \frac{1}{E} \sigma_{xx} - \frac{\nu}{E} \sigma_{yy} - \frac{\nu}{E} \sigma_{zz} \text{ (Ecuación 4.16) [18]}$$

Para el resto de componentes tangenciales relacionadas a las tensiones cortantes, se calcula de la siguiente manera:

$$\epsilon_{xy} = \frac{\gamma_{xy}}{2} = \frac{\sigma_{xy}}{2G} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{xy} \text{ (Ecuación 4.17) [18]}$$

$$\epsilon_{xz} = \frac{\gamma_{xz}}{2} = \frac{\sigma_{xz}}{2G} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{xz} \text{ (Ecuación 4.18) [18]}$$

$$\epsilon_{yz} = \frac{\gamma_{yz}}{2} = \frac{\sigma_{yz}}{2G} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{yz} \text{ (Ecuación 4.19) [18]}$$

4.6 Criterio de Von Mises – Criterio de Plasticidad

El Criterio de Von Mises va a ser un concepto muy importante a tomar en cuenta ya que, parte de los cálculos del proyecto, están ligados a los resultados que se van obtener.

El criterio de plasticidad se refiere a aquellas condiciones que se deben cumplir para que el propio material llegue al punto de fluencia, que significa que el material se deforma plásticamente y no elástico. El criterio de elasticidad se puede representar utilizando una

superficie cerrada cilíndrica. Este se le añaden un sistema de coordenadas y que la directriz de este cilindro, pase por el origen de coordenadas (Ilustración 4.14). Entre los distintos experimentos que se hicieron para comprobar y analizar estas condiciones, se destaca el Criterio de Von Mises.

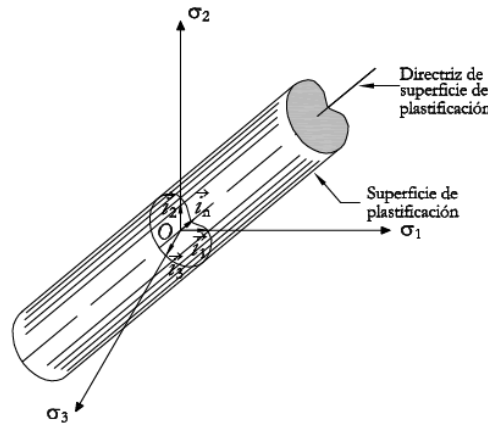


Ilustración 4.13 Superficie de los límites de plastificación de un material isótropo [19]

El criterio de Von Mises es un criterio de plasticidad propuesto en 1913, según el cual, el material no llegará a la fluencia en ese punto cuando la tensión en el punto sea menor a la tensión de la fluencia.

Entonces en el criterio de Von Mises se debe cumplir la siguiente condición:

$$\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 + \sigma_2)^2 + (\sigma_1 + \sigma_3)^2 + (\sigma_2 + \sigma_3)^2]} < \sigma_e \text{ (Ecuación 4.20) [19]}$$

Entonces el término de la izquierda de la ecuación, se refiere a la tensión equivalente de Von Mises, que se puede expresar como σ_{VM} , y σ_e significa el límite de fluencia a tracción. Los términos 1, 2 y 3, refieren al sistema de coordenadas, que bien se puede reescribir la ecuación de la siguiente forma:

$$\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x + \sigma_y)^2 + (\sigma_x + \sigma_z)^2 + (\sigma_y + \sigma_z)^2]} < \sigma_e \text{ (Ecuación 4.21) [19]}$$

En este criterio también se puede calcular el coeficiente de seguridad, el cual es un cociente entre el valor calculado máximo y el valor real sometido. Entonces la ecuación queda de la siguiente forma:

$$F_s = \frac{\sigma_e}{\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x + \sigma_y)^2 + (\sigma_x + \sigma_z)^2 + (\sigma_y + \sigma_z)^2]}} \quad (\text{Ecuación 4.22}) [20]$$

4.7 Fatiga de Bajos y Altos Ciclos

La fatiga es el fallo de un componente a una sollicitación variable en el transcurso del tiempo. Estas sollicitaciones son de magnitudes bajas, que ni llegan a la tensión de rotura. Sin embargo, cuando estas sollicitaciones son repetitivas, ocasionan que el componente falle. Este efecto ocasiona pequeñas grietas que se van haciendo cada vez más grandes con el tiempo de cada ciclo que se aplique una carga, terminando en la rotura total del material.

Las situaciones en las que se puede dar el fallo por fatiga son:

- 1- Un componente estático es sometido a cargas variables con el tiempo.
- 2- Un componente giratorio (eje o árbol) es sometido a cargas constantes con el tiempo.
- 3- Un componente giratorio es sometido a cargas que varían con el tiempo.

4.7.1 Carga cíclica, tensión media y tensión alternante

En la fatiga se generan ciertas tensiones que se repiten en cierto tiempo. En la Ilustración 4.16, se muestra una carga cíclica en tensiones que tiene una amplitud no variable, y esta oscila entre una tensión mínima σ_{min} y máxima $\sigma_{máx}$. También se tiene las ecuaciones fundamentales para obtener o calcular las magnitudes relacionadas a la fatiga.

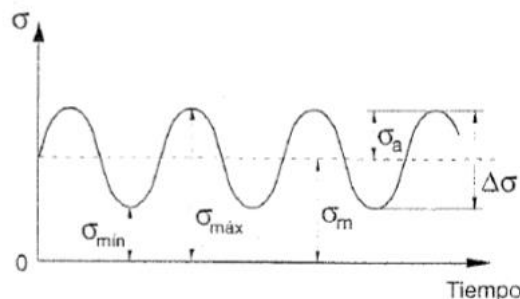


Ilustración 4.14 Ciclos de amplitud constante y tensiones asociadas a la fatiga [42]

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \text{ (Ecuación 4.22) [42]}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \text{ (Ecuación 4.23) [42]} \quad \Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \text{ (Ecuación 4.24) [42]}$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \text{ (Ecuación 4.25) [42]} \quad \sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a \text{ (Ecuación 4.26) [42]}$$

Estas ecuaciones se pueden interpretar también como una analogía a las características de una longitud de onda. Se tiene primero que la tensión media σ_m es, prácticamente, la media de las dos tensiones (máxima y mínima) que se aplican a un material a fatiga; la tensión alternante σ_a es aquella magnitud con cierto valor que alterna respecto a la tensión media. La R es la relación entre tensiones y $\Delta\sigma$ es la diferencia entre las tensiones máxima y mínima.

4.7.2 Curva S-N (Tensión – Vida)

La curva S-N es una gráfica, obtenida en los ensayos de fatiga en probetas, en el que se representa la tensión alternante que causa el fallo, frente al número de ciclos N que producen el fallo.

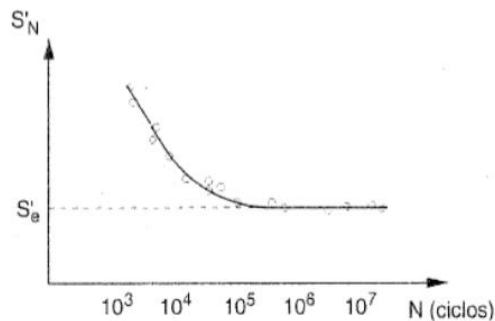


Ilustración 4.15 Curva representativa de las tensiones de fallo a fatiga, frente a los ciclos [42]

Se representan en la gráfica dos magnitudes. La primera, es la tensión de fatiga S_N que es la misma tensión alternante σ_a en la curva S-N, y el límite de fatiga S_e , siendo el límite por el cual el fallo a fatiga no ocurre en condiciones normales.

Cabe destacar que las tensiones medias afectan a la vida o resistencia del material a fatiga. Las tensiones medias a tracción tienden a disminuir esta resistencia, mientras que las tensiones medias a compresión hacen lo contrario, evita que se produzca grietas que generen el fallo.

4.7.3 Diagrama de Goodman

Son diagramas que representan las tensiones alternantes σ_a frente a las tensiones medias σ_m . En estos diagramas, cuando $\sigma_m = 0$ la tensión alternante coincide con la resistencia a fatiga de una cierta vida $\sigma_a = S_N$.

En esta gráfica se tiene una recta de Goodman, donde se inicia en el punto anteriormente mencionado. Cuando las tensiones medias de tracción ($\sigma_m > 0$) se dan, empiezan a disminuir el valor de la resistencia, dando lugar a combinaciones $\sigma_a - \sigma_m$. Al final, cuando se llega al límite, la tensión media coincide con el límite de rotura S_{ut} , dando caso a que no haya tensiones alternantes $\sigma_a = 0$. Las tensiones medias a compresión ($\sigma_m < 0$) no afectan al comportamiento a fatiga, por lo que es una línea horizontal cuando la tensión media es negativa.

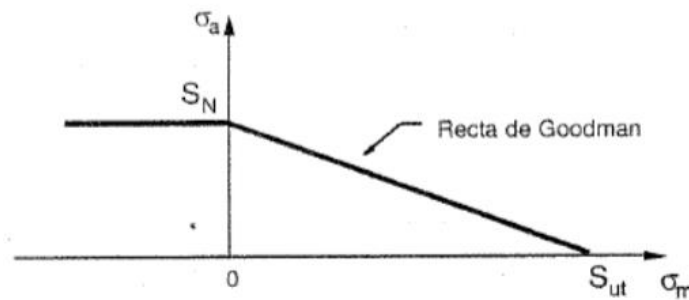


Ilustración 4.16 Diagrama de Goodman y la recta en casos de tensiones medias de tracción [42]

$$\frac{\sigma_a}{S_N} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = 1 \text{ (Ecuación 4.27) [42]}$$

4.7.4 Diagrama de Goodman Modificado

En este diagrama se toma en cuenta el fallo por fluencia cuando la tensión mínima σ_{min} o máxima σ_{max} lleguen al límite de fluencia S_y . Ahora las ecuaciones, tomando en cuenta que el límite de fluencia es igual al de tracción o compresión ($S_{yc} = -S_{yt} = -S_y$).

$$\sigma_{min} = \sigma_m - \sigma_a = -S_y \rightarrow \sigma_a = S_y + \sigma_m \text{ (Ecuación 4.28) [42]}$$

$$\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a = S_y \rightarrow \sigma_a = S_y - \sigma_m \text{ (Ecuación 4.29) [42]}$$

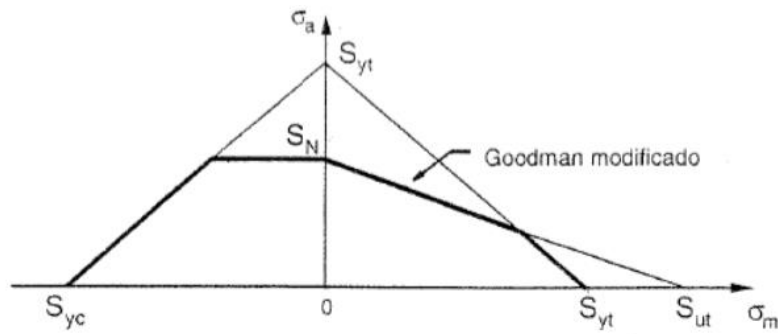


Ilustración 4.17 Criterio de Goodman Modificado [42]

4.7.5 Diagrama de Soderberg

Este criterio es más conservador que el de Goodman y establece que, el fallo de fatiga se da en la línea que pasa por los puntos $(0, S_N)$ y $(S_y, 0)$.

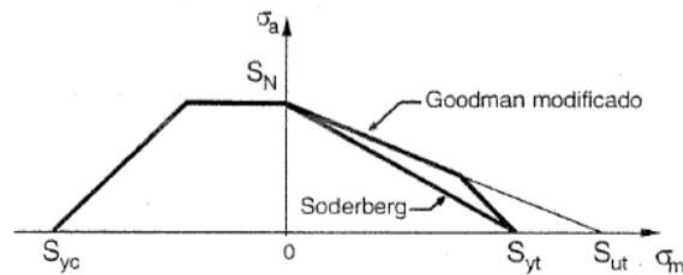


Ilustración 4.18 Criterio de Soderberg [42]

$$\frac{\sigma_a}{S_N} + \frac{\sigma_m}{S_y} = 1 \quad (\text{Ecuación 4.30}) [42]$$

4.7.6 Tensión Alternante Equivalente

Si se tiene un límite de fatiga S_N equivalente a una combinación de tensiones (σ_a, σ_m) , aplicando el criterio de Goodman, se corresponde una recta que pase por un punto, que coincida las dos tensiones (σ_a, σ_m) , y por S_{ut} :

$$S_N^{eq} = \frac{\sigma_a}{1 - \sigma_m/S_{ut}} \quad (\text{Ecuación 4.31}) [42]$$

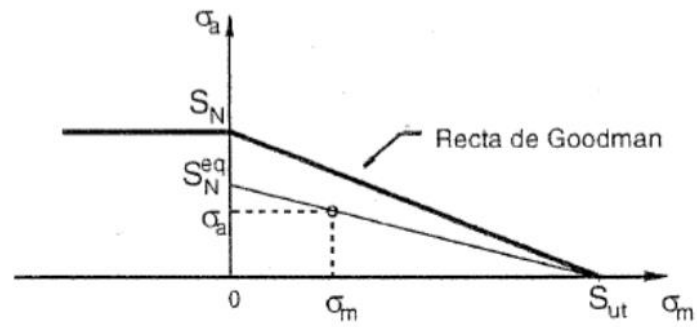


Ilustración 4.19 Representación de la tensión alternante equivalente [42]

Capítulo 5 – Características del Prototipo

En este capítulo se explicará las condiciones de diseño del prototipo, el material utilizado, las distintas dimensiones que debe tener cada componente y su función en base a la teoría ya explicada, para evitar distintos problemas a la hora de fabricar o utilizar la mano protésica. También, en este capítulo se comentará la posible fabricación de las piezas que componen dicha mano.

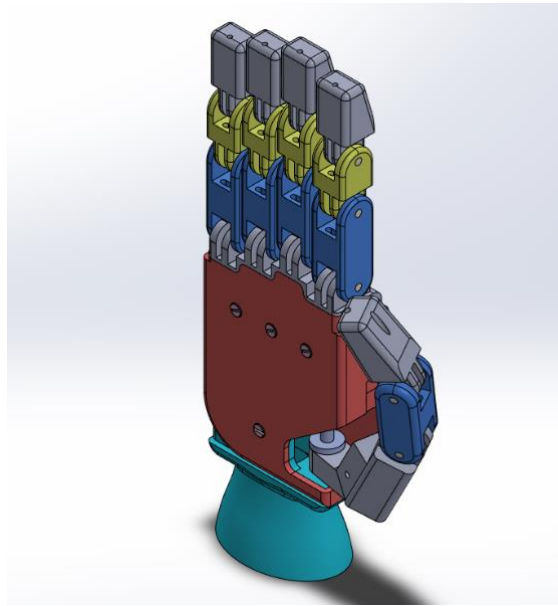


Ilustración 5.1 Diseño del Prototipo [Propio]

5.1 Condiciones de Diseño

Las condiciones que se han establecido a la hora de diseñar la mano protésica son las siguientes:

- La mano solo puede mover todos los dedos y realizar movimientos de flexión y extensión. De igual manera, el pulgar puede flexionar y extender, sin tomar en cuenta los otros movimientos representados en la “Ilustración 3.6”.
- Los dedos no realizan movimientos en Z, explicado en el apartado “3.2.5 Músculos Interóseos”, por lo que se considera que son movimientos no tan relevantes para su función y que simplifica significativamente el diseño de este prototipo.
- Los mecanismos actúan solamente con la acción de hilos tensores que permiten el movimiento general de la mano.

- Al momento de realizar los cálculos, se estudia todo el diseño de la prótesis y aparte los hilos tensores (elástico y no elástico de nylon).
- La mano no dispone de componentes electrónicos y sensores, solo se enfoca en la parte mecánica y diseño de la prótesis.
- Se evalúa, en parte, las acciones sobre los cuatro primeros dedos de la mano (índice, medio, anular y meñique) ya que tienen un impacto mayor en el agarre y aguante al sostener un objeto, que el pulgar.
- No se aplica ninguna carga sobre la palma de la mano.

5.2 Materiales Empleados

Los materiales empleados en la mano protésica de este proyecto, consisten en el PLA y un Acero Estructural, ya que se intenta emplear una menor cantidad de materiales para evitar grandes costes y que el propio diseño tenga las mismas propiedades en cada componente del ensamblaje. Por otro lado, los hilos tensores son de nylon y poliéster.

El PLA o ácido poliláctico es un termoplástico derivado de recursos renovables como la caña de azúcar, almidón de maíz o yuca. El PLA se puede producir utilizando los mismos equipos que los plásticos derivados del petróleo, siendo un material mucho más rentable en los procesos de fabricación. Este material viene siendo uno de los materiales más usados en la fabricación 3D, además de ser el segundo plástico más producido después del almidón termoplástico. También el ácido poliláctico es biodegradable y tiene características de otros polímeros muy usados como son el poliestireno (PS), polietileno (PE) y el polipropileno (PP).



Ilustración 5.2 Hilos hechos con el material PLA [22]

A continuación, se muestran (Tabla 5.1) las propiedades mecánicas del PLA, fundamentales para el análisis por elementos finitos utilizando el software ANSYS como herramienta. No se consideran otras propiedades fuera de las mecánicas, ya que el

objetivo de este diseño es que sea capaz de resistir fuerzas o tensiones que se generen sobre la prótesis sin que llegue a la ruptura.

Properties of Outline Row 3: PLA				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	1,24	g cm ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus an...		
6	Young's Modulus	3450	MPa	
7	Poisson's Ratio	0,39		
8	Bulk Modulus	5,2273E+09	Pa	
9	Shear Modulus	1,241E+09	Pa	
10	S-N Curve	Tabular		
14	Tensile Yield Strength	58,5	MPa	
15	Compressive Yield Strength	76	MPa	
16	Tensile Ultimate Strength	80	MPa	
17	Compressive Ultimate Strength	0	MPa	

Tabla 5.1 Propiedades Mecánicas del PLA hechas en el programa ANSYS [Propio]

El acero estructural es una aleación de hierro y carbono, que principalmente es utilizado en estructuras de construcción, pero también son aplicados para componentes mecánicos. Estos aceros poseen buenas propiedades, ya que son muy tenaces (buena resistencia y ductilidad) y resistentes ante distintos esfuerzos. También, son materiales no contaminantes, siendo muy reciclables y se producen de manera controlada.

A continuación, se presentan las propiedades mecánicas del acero estructural, hay que destacar que estas propiedades del material estaban automáticamente añadidas por el software ANSYS. De igual manera se pudo corroborar que estas propiedades coinciden con un acero S275 según la norma EN1993-1-1 [23].

Properties of Outline Row 4: Structural Steel				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
3	Density	7850	kg m ⁻³	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modulus a...		
8	Young's Modulus	2E+05	MPa	
9	Poisson's Ratio	0,3		
10	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa	
11	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa	
12	Strain-Life Parameters			
20	S-N Curve	Tabular		
24	Tensile Yield Strength	250	MPa	
25	Compressive Yield Strength	250	MPa	
26	Tensile Ultimate Strength	460	MPa	

Tabla 5.2 Propiedades Mecánicas del Acero Estructural dadas por el programa ANSYS [Propio]

El nylon es un polímero sintético, el cual presenta unas propiedades mecánicas particulares, sobre todo en la resistencia y elasticidad, destacando en su gran resistencia a la tracción y larga vida útil. El nylon posee buena estabilidad dimensional y es resistente a cualquier tipo de corrosión. Este material es muy usado en el mundo de la ingeniería, siendo un material capaz de usarse en engranajes, cojinetes de automóviles, etc.

En este proyecto se utilizará hilos de nylon no elástico, que son capaces de resistir cargas a tracción y que su deformación elástica es nula o mínima, como accionador del movimiento de los dedos al momento de generar una tensión sobre estos. A continuación, se muestra una de las propiedades de este material:

Magnitud	Valor	Unidad
Densidad	1,15	g/cm ³
Módulo de Young	2,97	GPa
Coeficiente de Poisson	0,38	
Resistencia a Tracción	72,2	MPa
Resistencia a Tracción Última	75,6	MPa

Tabla 5.3 Propiedades Mecánicas del Nylon [25]

Por último, el material para el hilo elástico es el poliéster, que es un polímero y una de las fibras más utilizadas en el mundo. Este tipo de material se usará como cordón o hilo de poliéster. Este material es muy útil por su resistencia a tracción, elasticidad y el bajo coste, siendo estas propiedades esenciales para agregar el material al proyecto.

5.3 Dimensiones del Diseño

La mano protésica se compone de una variedad de piezas, siendo los dedos, los ejes, tornillos, palma y la muñeca. Cada pieza tiene dimensiones distintas, exceptuando algunas, como la que conforman los dedos índices, medio, anular y meñique, que son completamente iguales. En la siguiente ilustración se muestra algunas dimensiones generales del ensamblaje, siendo estas medidas basadas en lo que se vio en el apartado “3.1 Anatomía Superficial de la Mano”. En el ANEXO se añaden los planos de cada pieza para su fabricación. Toda la elaboración del diseño, incluyendo las piezas, ha sido realizado en el programa SOLIDWORKS.

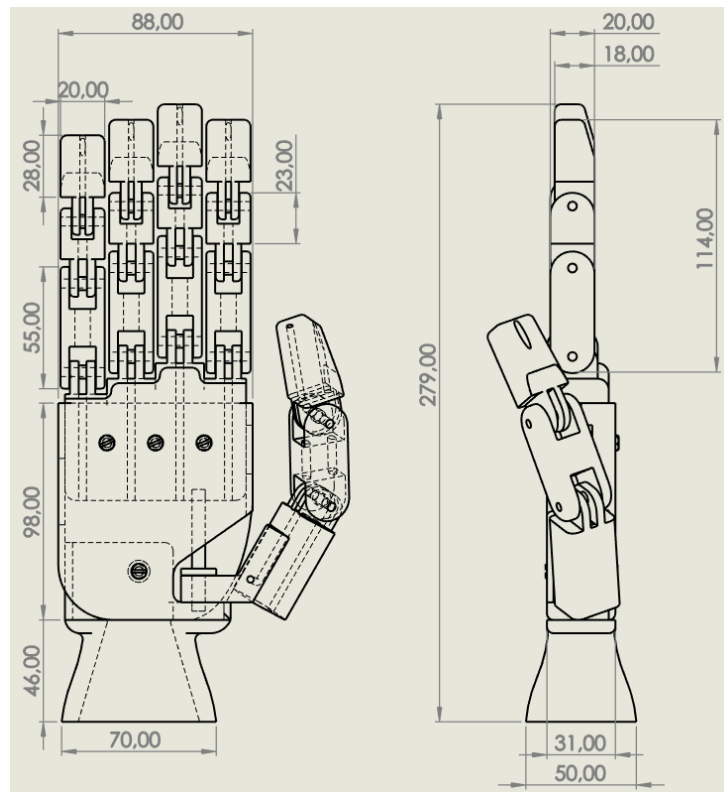


Ilustración 5.3 Vista alzado y perfil, y las dimensiones de algunas partes del ensamblaje expresado en mm [Propio]

En la “Ilustración 5.5” se muestra algunas cotas importantes del ensamblaje en general. Cabe destacar, que no se realiza una acotación de todas las dimensiones, debido a que se proporcionará un plano que abarque todas las piezas. De igual manera, el pulgar está sin acotar por el ángulo y posición respecto a las dos vistas (alzado y perfil), que no permiten que se pueda acotar con facilidad o apreciar las mismas cotas en el dibujo.

Por otra parte, es importante destacar que el ángulo que se puede llegar al momento de flexionar los dedos es de 90° como máximo (Ilustración 5.4 y 5.5). Este ángulo se aplica en los metacarpos, las falanges proximales y distales, incluyendo de igual forma el pulgar. Hay que mencionar que este ángulo no se da en todos los elementos a la vez, debido a la interferencia entre piezas que puede generarse, es decir, si cada componente de un dedo se posiciona a 90°, este generará una colisión con la palma (Ilustración 5.5).

Por otro lado, los ángulos que se generan al extender los mismos dedos pueden ser variables, debido a que se ajustan con los hilos elásticos al conectarlos en los puntos de amarre (Ilustración 5.6).

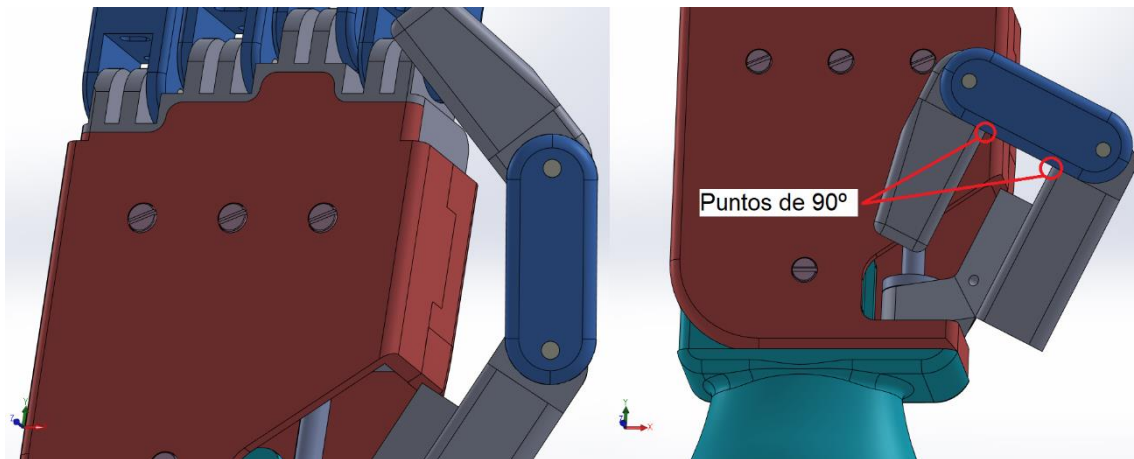


Ilustración 5.4 A la izquierda, posición natural del pulgar en un ángulo arbitrario. A la derecha, el pulgar cuando ambas partes están en un ángulo de 90° [Propio]

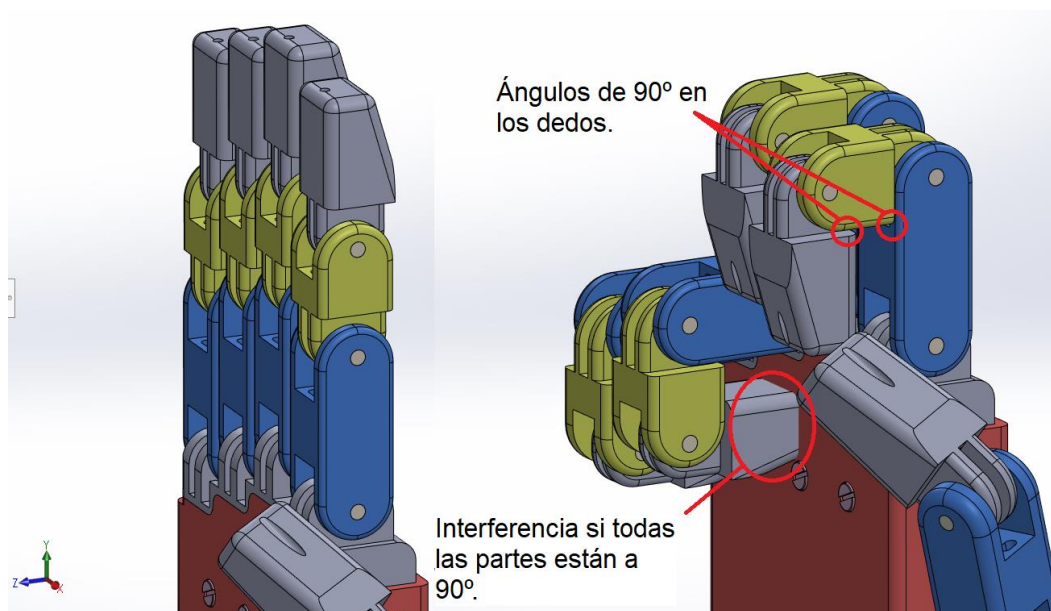


Ilustración 5.5 A la izquierda, posición completamente vertical de los dedos. A la derecha, los ángulos de 90° que pueden formar los dedos y la interferencia generada si todos forman el mismo ángulo [Propio]

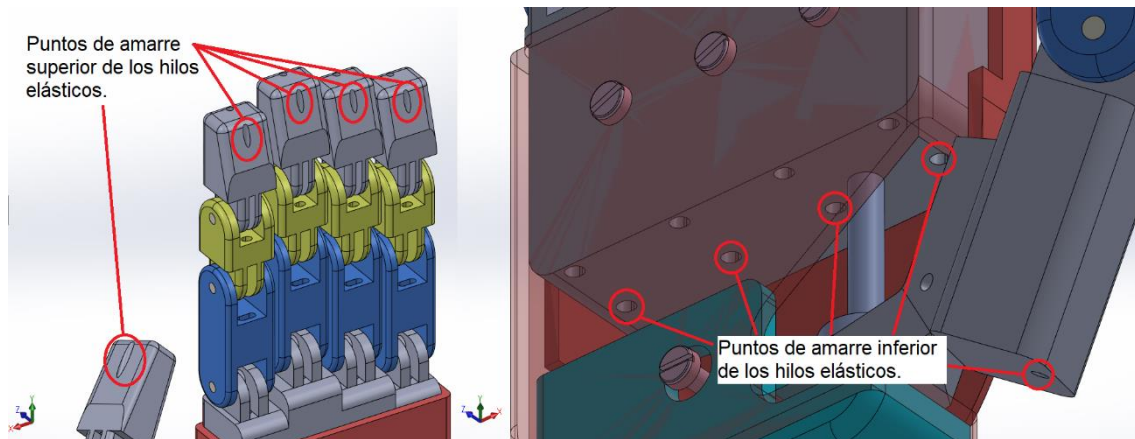


Ilustración 5.6 Puntos de amarre de los hilos elásticos que permiten que la extensión de los dedos [Propio]

Asimismo, los dedos tienen unas guías donde los hilos pasarán para cuando se generen tensiones en ellas y permitan la correcta flexión y extensión. Estas guías tienen suficiente espacio para poder añadir no solo un hilo tensor por dedo, si no también agregar varios hilos en el caso de que un hilo no pueda resistir las cargas suministradas. Los detalles de las dimensiones de estas guías se agregan en el “ANEXO”

Otras de las dimensiones importantes son las de los tornillos y pasadores, que permiten la unión de los componentes y algunos (pasadores) sirven como ejes de rotación de los dedos.

Los tornillos y los pasadores son adquiridos mediante la compra (material acero previamente explicado) debido a que las piezas escogidas están normalizadas en la norma ISO.

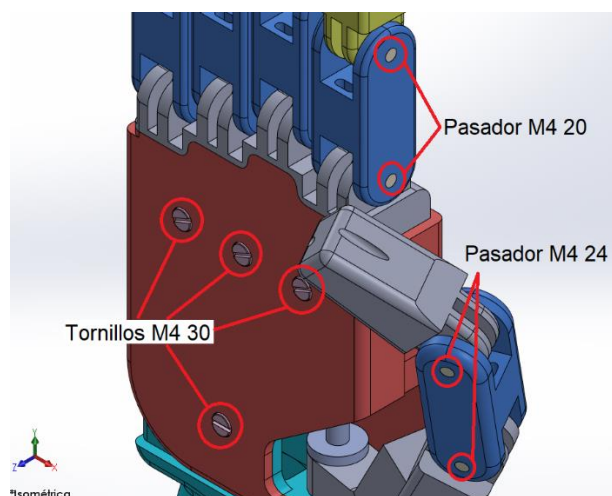


Ilustración 5.7 Elementos de unión de la prótesis y sus dimensiones [Propio]

Los tornillos son del tipo de tornillos de cabeza chata ranurada de dimensiones M4x30 que corresponde al código ISO 1207. Este tipo de tornillo corresponde a un diámetro de rosca métrica M4, que consiste en un paso 0,7mm y de diámetro agujero de broca 3,24mm, con una longitud de 30mm.

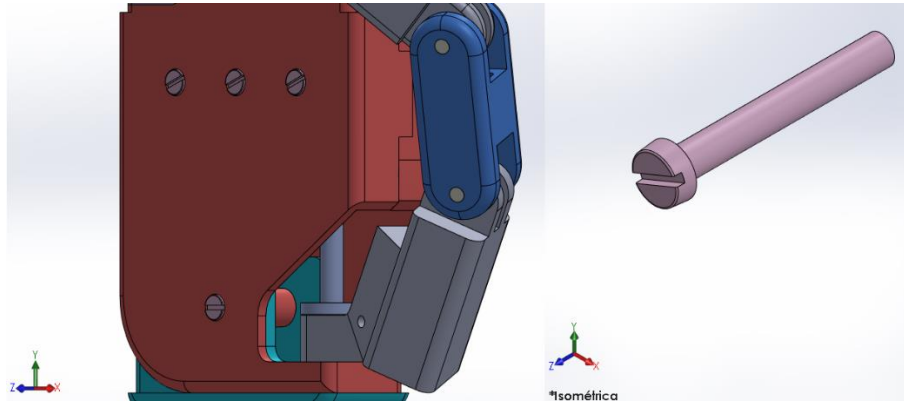


Ilustración 5.8 Diseño y uso de un tornillo ISO 1207 en SOLIDWORKS [Propio]

Por otra parte, los pasadores corresponden al ISO 8734, son dos pasadores de distinta longitud, uno de 20mm de longitud y el otro de 24mm. Pero, ambos poseen un diámetro de 4mm.

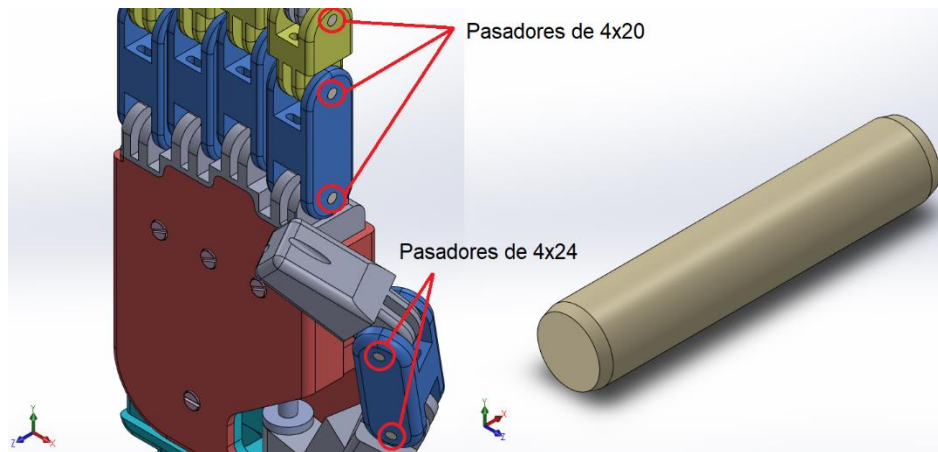


Ilustración 5.9 Diseño y uso de las dos formas de pasadores en SOLIDWORKS [Propio]

5.4 Técnicas de Construcción

La técnica de construcción empleada, para el PLA, es la impresión 3D que se ocupa de la realización de objetos tridimensionales mediante una producción adaptativa empezando por un modelo 3D digital.

La impresión 3D funciona basándose en la polimerización de una sustancia líquida, tras someterla a un tratamiento como temperatura o rayos ultravioleta esta polimeriza, pasando a estado sólido. Si se usa un software se puede manipular esta reacción para crear algún producto deseado.

Existen diferentes métodos de uso, que se explicarán luego, para llevar a cabo la impresión: DLP, FDM, SLS. En estos métodos la mayor parte, se utilizan polímeros que a través de un incremento de temperatura se llegan a moldear para obtener el modelo deseado; al mismo tiempo existen también diferentes materiales, según las características que el producto tiene, en este proyecto se quiere conseguir una elevada resistencia y por lo tanto se ha decidido utilizar el polímero PLA.

5.4.1 El procesamiento digital de luz (DLP)

Este método de fabricación por 3D utiliza un proyector de luz digital que solidifica las resinas, para crear el cuerpo del objeto. Este proyector emite la luz sobre un dispositivo DMD (Digital Micromirror Device) que contiene una gran cantidad de micro espejos, que desvían la luz a otra dirección específica. Este método permite que cada capa de la resina se cure con una rapidez mayor a otras impresoras.

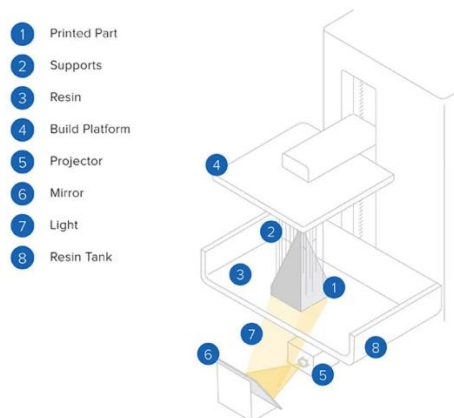


Ilustración 5.10 Partes de una impresora DLP [28]

5.4.2 Sinterización selectiva por láser (SLS)

Esta es una técnica en la que, al añadir un lecho de polvo de pequeñas partículas de plástico, cerámica e incluso metales, en la que un láser de alta potencia (CO2) calienta el lecho de polvo justo debajo del punto de fusión, para que estas partículas se fusionen y

solidifiquen, creando un objeto tridimensional. Estos procesos se hacen en ausencia del oxígeno, ya que puede añadir impurezas al material cuando se está fabricando, creando imperfecciones.

Luego, cuando el objeto final sigue caliente después de su fusión, se deja enfriar la pieza en la maquina antes de retirarlo.

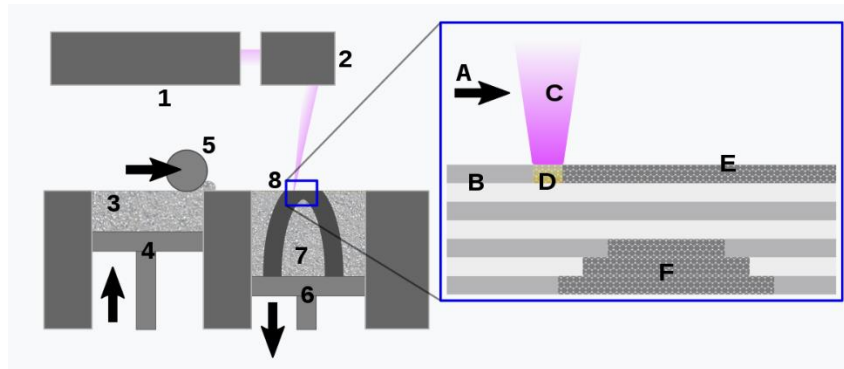


Ilustración 5.11 1- Láser. 2- Sistema Escáner. 3-Sistema dispensadora de polvo. 4-Pistón de dispensación de polvo. 5-Rodillo 6-Pistón para fabricar- 7-Plataforma para lecho de polvo. 8-Objeto fabricándose.

A.- Movimiento del láser. B.- Partículas de polvo curadas. C.- Haz láser. D.- Sinterizado del láser. E.- Partículas de polvo antes del curado. F.- Material sin el curado de otras capas [29]

5.4.3 Modelado por disposición fundida (FDM)

La impresión 3D de FDM es una técnica de fabricación creada por el ingeniero mecánico Scott Crump en 1989. El procedimiento de esta fabricación consiste en filamentos de un termoplástico, que se funden a través de una boquilla. Con el termoplástico fundido se forman capas hasta que se forme la pieza.

Para realizar la impresión, la maquina utiliza un software que le permitirá conocer el diseño que va a imprimir, para realizar las capas correspondientes. Durante esta impresión, los filamentos se funden a una temperatura de 170-240°C que varían según el material, y el movimiento siempre es en los planos XY (horizontal) antes de moverse en el Z (vertical) al terminar una capa.

Normalmente en este tipo de impresión suele dejar acabados rugosos, por lo que hacer procesos de lijado, permite mejorar el acabado superficial y ajustar ciertas dimensiones del modelo.

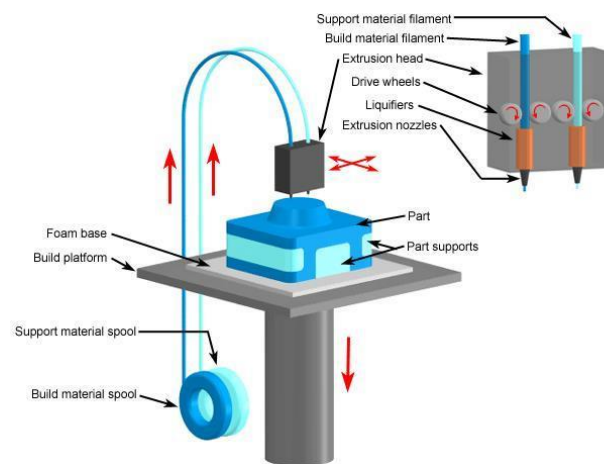


Ilustración 5.12 Partes de la fabricación por FDM [30]

Los materiales más usados en este tipo de impresión es el PLA (poliácido láctico) y el ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno), entre otros termoplásticos y ceras. En este proyecto se optó por usar el PLA y tener como primera opción este tipo de fabricación, debido a que son una de las tecnologías de impresión más comunes y más difundidas. También este tipo de impresión tienen prestigio de ser precisas y muy fiables.

5.4.4 Amarre de los hilos tensores

Es importante saber cómo ajustar los hilos tensores al momento de añadirlo. Primero, los hilos elásticos se amarran en sus extremos como se aprecia en la “Ilustración 5.7” y son ajustados mediante un nudo simple, que sea lo suficientemente grueso para evitar que se desamarre. De igual manera, los hilos no elásticos de nylon se amarran al extremo de los dedos y terminan unidas a un mecanismo de ajuste para cerrar los dedos.

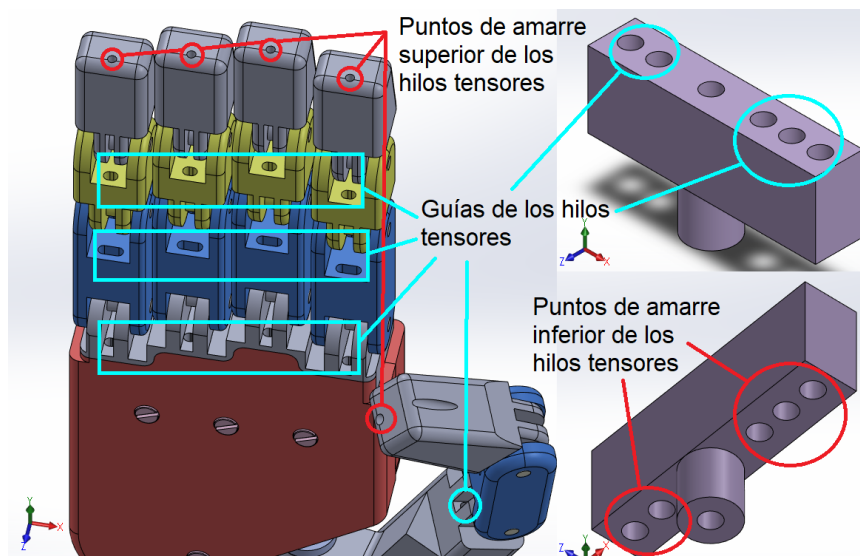


Ilustración 5.13 Puntos de amarre y guías de los hilos tensores [Propio]

Capítulo 6 – Programa Empleado y Resultados Obtenidos

En este capítulo se realizará el estudio por elementos finitos de la mano protésica usando el software ANSYS, donde se analizará dos casos para la prótesis con una misma carga, pero diferente posición de la mano. También, se analiza un solo tipo de hilo tensor, específicamente el no elástico de nylon, ya que estará sometido a unas condiciones más exigentes que el no elástico. El hilo elástico solo se somete a tensión dada por la flexión de los dedos, por lo que no afecta ninguna carga externa que se le aplique. Entonces, se omite estudiar este hilo en este apartado.

6.1 Curva S-N empleada

Para poder permitir la configuración del equipo en las herramientas de análisis, como ANSYS es necesario implementar la curva del material PLA, ya que la curva del acero está introducida en el propio software.

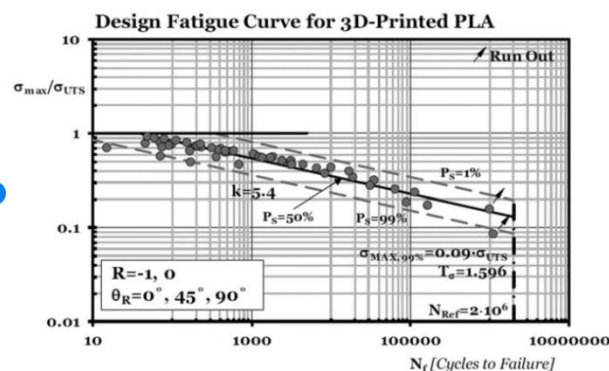


Ilustración 6.1 Curva de fatiga PLA impreso a 3D [36]

Debido a la necesidad de evaluar 12 puntos para conseguir resultados más fiables en el programa de ANSYS, se ha impreso la gráfica y, tras utilizar una escala logarítmica, se han evaluado 20 puntos.

Cabe destacar que la curva que se ha decidido analizar (Ilustración 5.15) y que los valores de fatiga entre 10^4 y 10^5 ciclos empezaban a ser constantes, por lo tanto, desde 10^5 ciclos hasta 10^6 ciclos hay un salto de 8 valores.

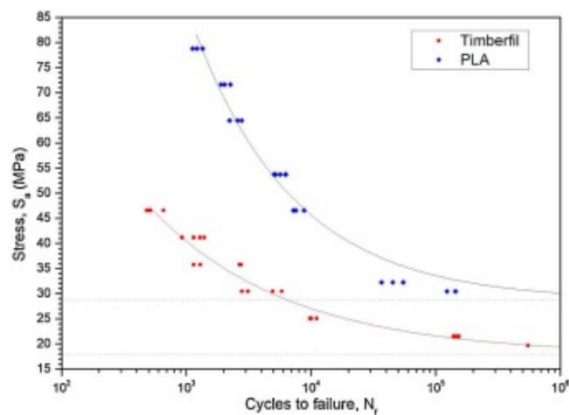


Ilustración 6.2 Curva fatiga con escala logarítmica del PLA [35]

Valores	Nº de Ciclo	Tensión (MPa)
1	1000	81,5
2	2000	70
3	3000	62
4	4000	57
5	5000	53,5
6	6000	51
7	7000	50
8	8000	47,5
9	9000	46
10	10000	45,5
11	20000	40
12	30000	38
13	40000	36,5
14	50000	36
15	60000	35
16	70000	34
17	80000	33,5
18	90000	33
19	100000	32,9
20	1000000	29

Tabla 6.1 Valores a fatiga del PLA con los ciclos y tensiones [35]

6.2 Estructura

La estructura final que se ha analizado ha tenido en cuenta todas aquellas áreas que están constituidas por el material PLA y los de acero, se analiza por partes la mano protésica, el hilo tensor y de último el mecanismo de ajuste; por lo tanto, los diseños que se han analizado son los siguientes:

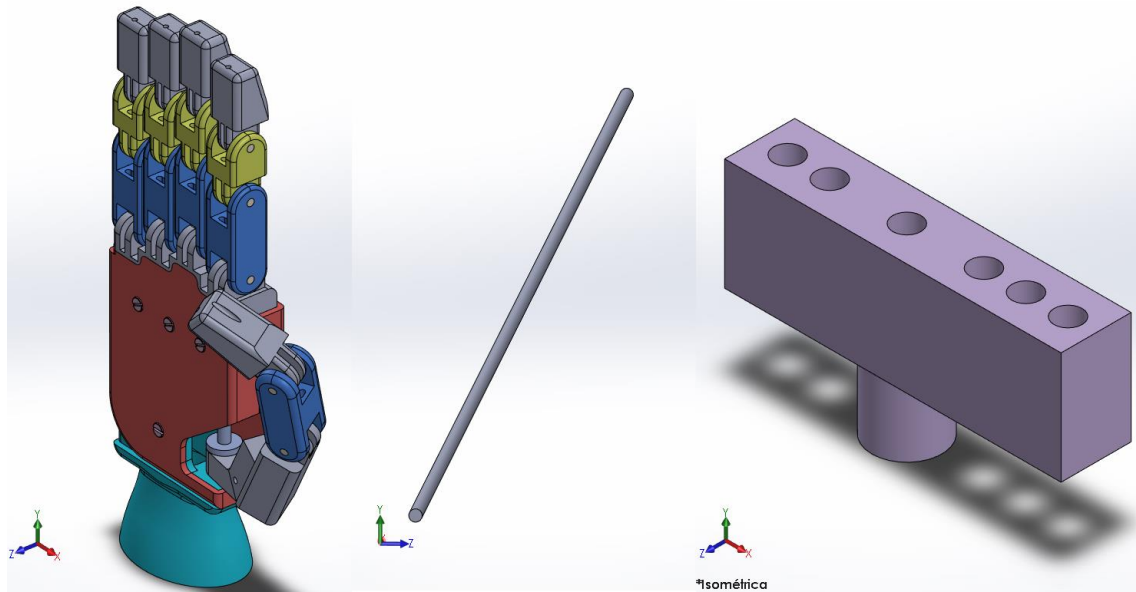


Ilustración 6.3 Los 3 diseños que se analizarán (mano protésica, hilo tensor, mecanismo de agarre) [Propio]

Una vez conseguido el diseño en SolidWorks se ha evaluado la estructura en ANSYS, considerando dos casos para la mano protésica y un caso para el hilo tensor y el mecanismo de ajuste, de cargas producidas por un valor de 50N más la aceleración gravitacional.

6.3 Resultados Obtenidos

En las condiciones, las cargas son prácticamente la misma, solo se genera una fuerza de 50N. Se utiliza este valor debido a que no es una carga muy alta para una prótesis hecha a PLA, pero lo suficiente para que cumpla su función y pueda agarrar una variedad de objetos sin dañarse. También, se agrega la gravedad ya que es un factor que influye en los cálculos y sean casos más acercados a la realidad.

Lo que se obtendrá en los resultados, tanto para el caso 1 como el caso 2, son las tensiones equivalentes (Von Mises), deformaciones y coeficientes de seguridad. Asi

mismo, a fatiga se evalúa las tensiones equivalentes, la vida de la prótesis y el coeficiente de seguridad, aplicando el criterio de Soderberg con base cero.

Para el caso de los hilos se evaluará solo los 3 primeros puntos (tensiones equivalentes, deformaciones y coeficiente de seguridad), lo mismo se aplica para el mecanismo de agarre.

6.3.1 Resultados Mano Protésica Caso 1

El primer caso, se posiciona la mano, en forma de como si estuviera sosteniendo un objeto (bolsa, maleta, cesta, etc.) de manera vertical. Los dedos (índice, medio, anular, meñique) son los que recibirán la carga (fuerza de 50N), por lo que se descarta cargas distribuidas en el pulgar y en la palma, ya que, si se cumple estas condiciones más extremas, la mano soportaría otras condiciones similares.

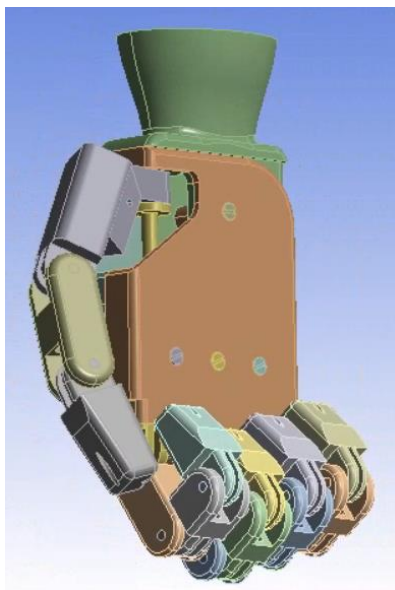


Ilustración 6.4 Posición de la mano caso 1 [Propio]

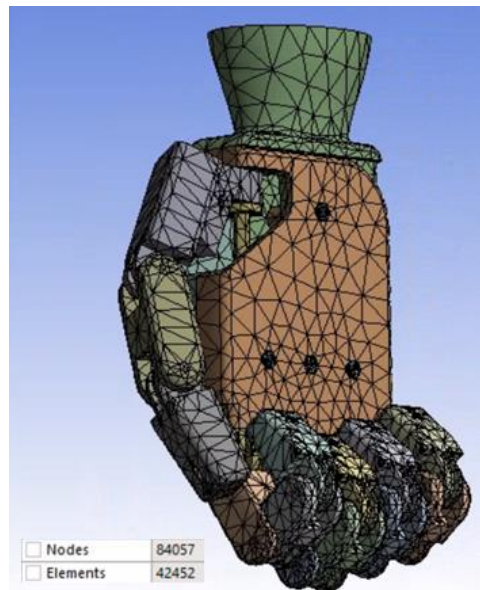


Ilustración 6.5 Numero de nodos y elementos (triángulos) de la malla generada [Propio]

Para analizar la mano, hay que añadir una malla que contiene nodos y elementos, los cuales son los que darán los resultados de este método numérico. Donde la precisión de los resultados es mayor si la cantidad de elementos es alta y son de menor tamaño.

En el caso 1 de la mano protésica, tiene una cantidad de **84057 nodos** y **42452 elementos**.

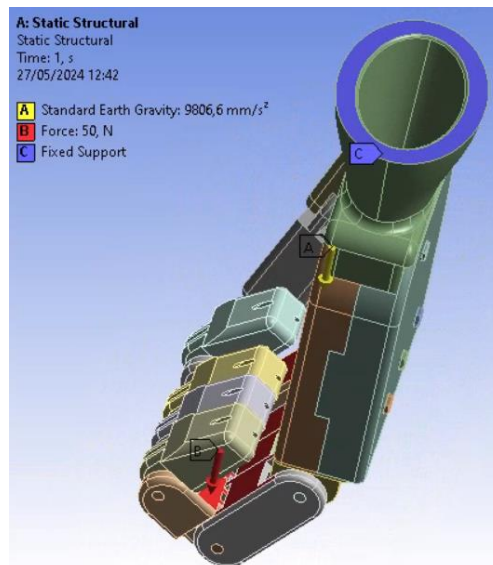


Ilustración 6.6 Condiciones que influyen en el caso 1 [Propio]

Las condiciones a las que estará sometida la mano son: **fuerza** = **50N** sobre la zona palmar de los dedos, **gravedad** = **9,8m/s²** y un empotramiento del extremo de la muñeca.

Los tres primeros resultados a tensión/compresión son los siguientes:

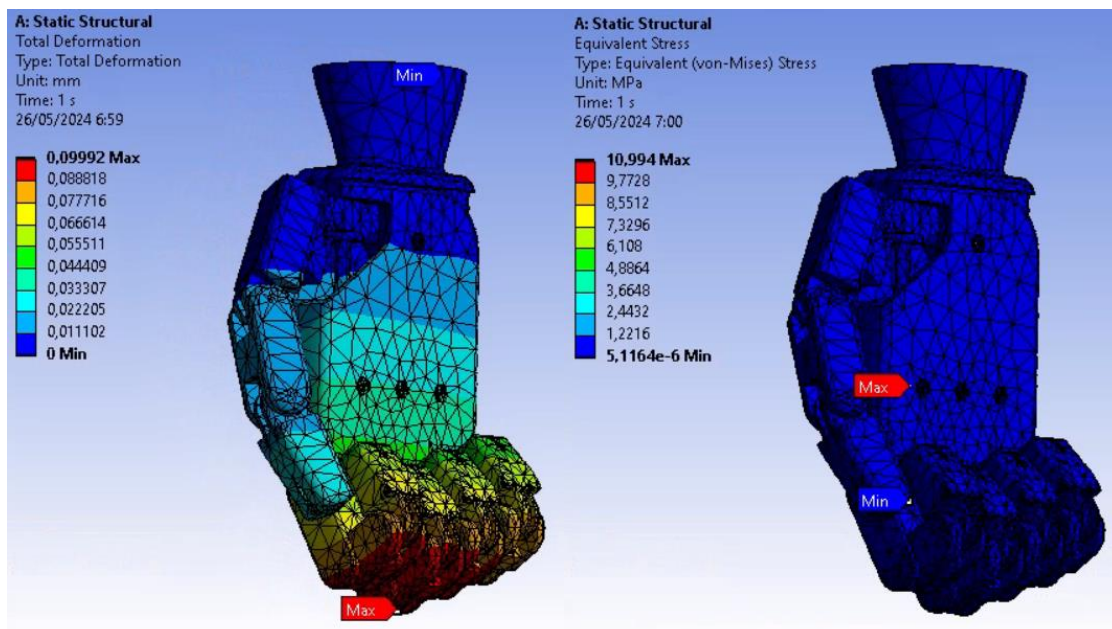


Ilustración 6.7 Deformación (izquierda) y tensión equivalente de von-Mises (derecha) en el caso 1 [Propio]

Se tiene como resultado a la deformación, un valor máximo $\varepsilon = 0,0999mm$ concentrado en las falanges medias y proximales debido a que es el punto donde se

concentran las tensiones. Para la tensión equivalente máxima se tiene $\sigma_{eq} =$
10,994 MPa concentrados en las caras laterales de las tuercas.

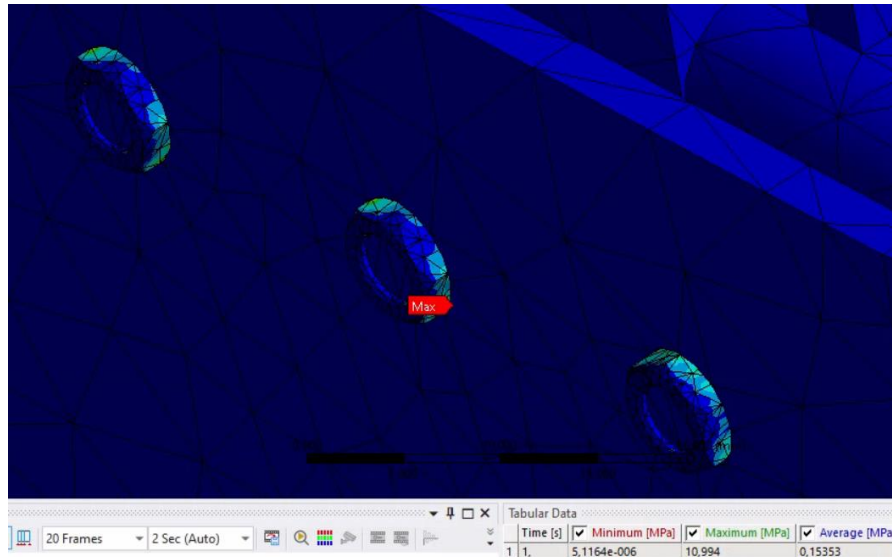


Ilustración 6.8 Tensiones equivalentes máximas en las tuercas caso 1 [Propio]

El coeficiente de seguridad se obtiene el siguiente valor:

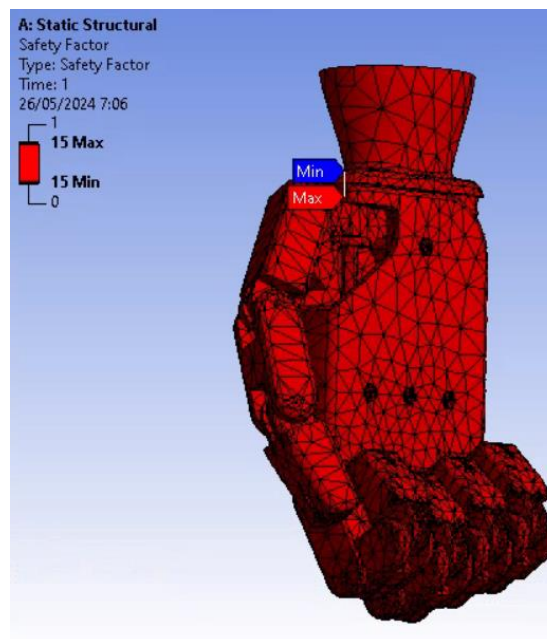


Ilustración 6.9 30 Coeficiente de seguridad mínimo en el caso 2 [Propio]

Coeficiente de seguridad un valor mínimo de $F_S = 15$, que está más que capacitado ya que se tiene que cumplir que $F_S \geq 1$.

Para los cálculos a fatiga se obtuvieron los siguientes resultados:

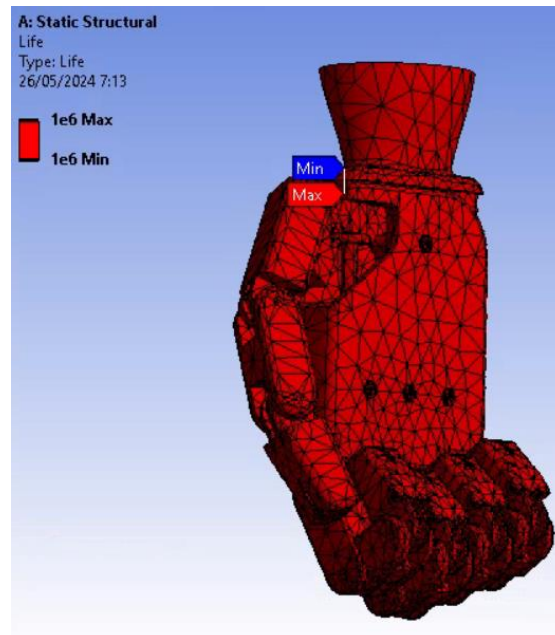


Ilustración 6.10 Vida a fatiga de la mano protésica en caso 1 [Propio]

Se tiene una vida mínima de ***Vida* = 10^6 ciclos**, esto quiere decir que tiene vida infinita y no se rompe a estas condiciones.

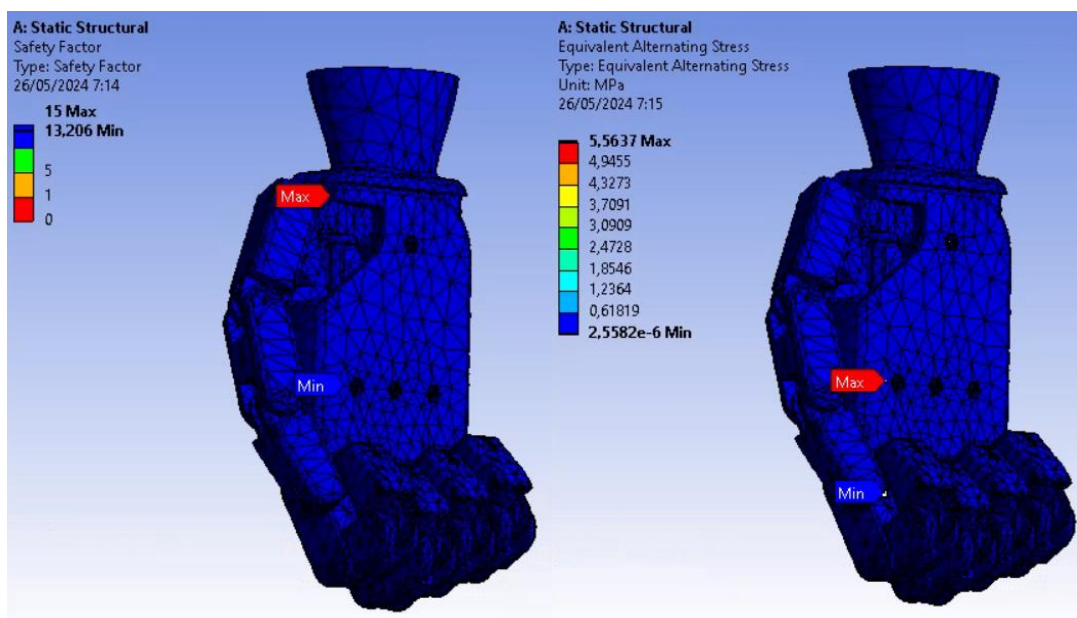


Ilustración 6.11 Coeficiente de seguridad (izquierda) y tensión alternante equivalente (derecha) en el caso 1 [Propio]

Para el coeficiente de seguridad se tiene un valor mínimo de **$F_S = 12,206$** , que está más que capacitado ya que se tiene que cumplir que **$F_S \geq 1$** . La tensión alternante

equivalente máxima da como resultado $S_N^{eq} = 5,5937MPa$. Igual que en el caso a tracción/compresión, se genera estas tensiones en las tuercas.

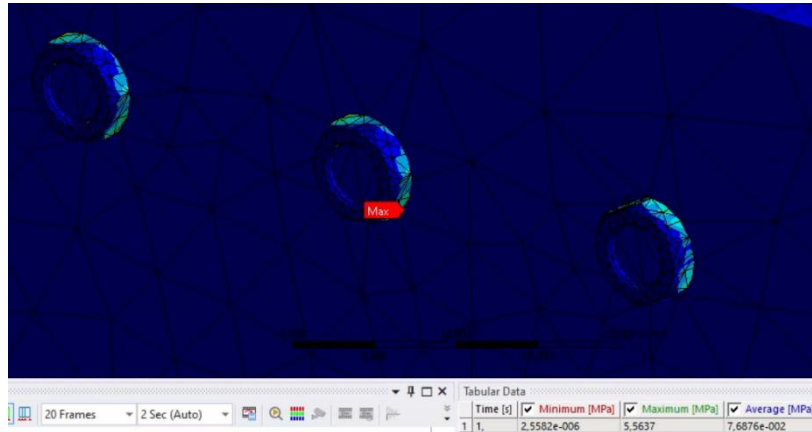


Ilustración 6.12 Tensión alternante equivalente en las tuercas caso 1 [Propio]

6.3.2 Resultados Mano Protésica Caso 2

El segundo caso, se posiciona la mano, en forma de como si estuviera sosteniendo un objeto (vaso, mango de un objeto, etc.), de manera horizontal. Todos los dedos son los que recibirán la carga (fuerza de 50N), por lo que se descarta cargas distribuidas en la palma, ya que, si se cumple estas condiciones más extremas, la mano soportaría otras condiciones similares.

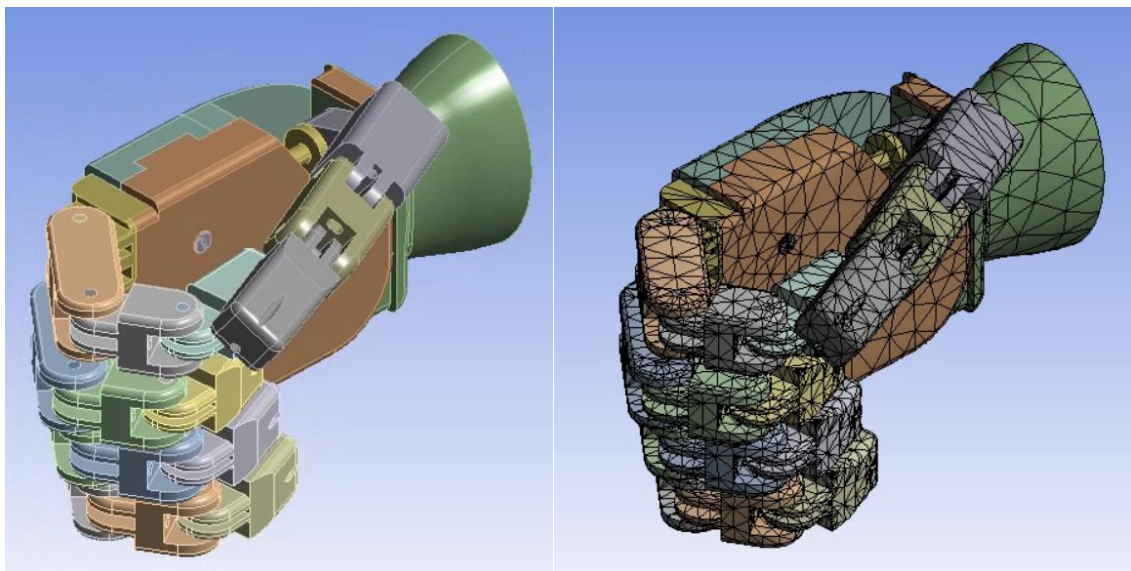


Ilustración 6.13 Posición de la mano caso 2 (izquierda) y nodos y elementos de la malla (derecha) [Propio]

La mano protésica del caso 2, tiene una cantidad de **84742 nodos** y **42801 elementos**.

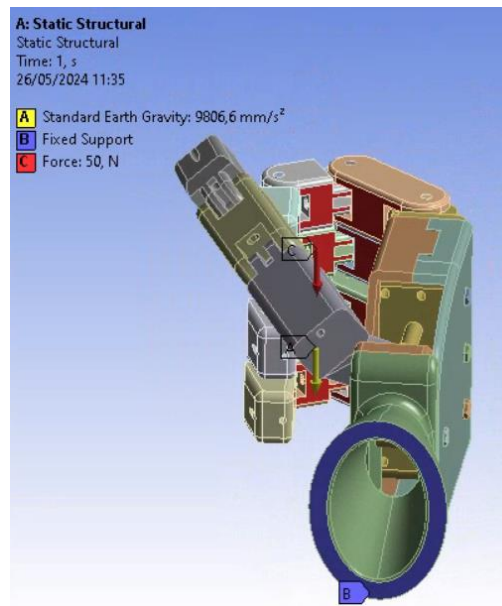


Ilustración 6.14 Condiciones que influyen en el caso 2 [Propio]

Las condiciones a las que estará sometida la mano son: **fuerza** = **50N** sobre la zona palmar de los dedos, **gravedad** = **9,8m/s²** y un empotramiento del extremo de la muñeca.

Los tres primeros resultados a tensión/compresión del caso 2 son los siguientes:

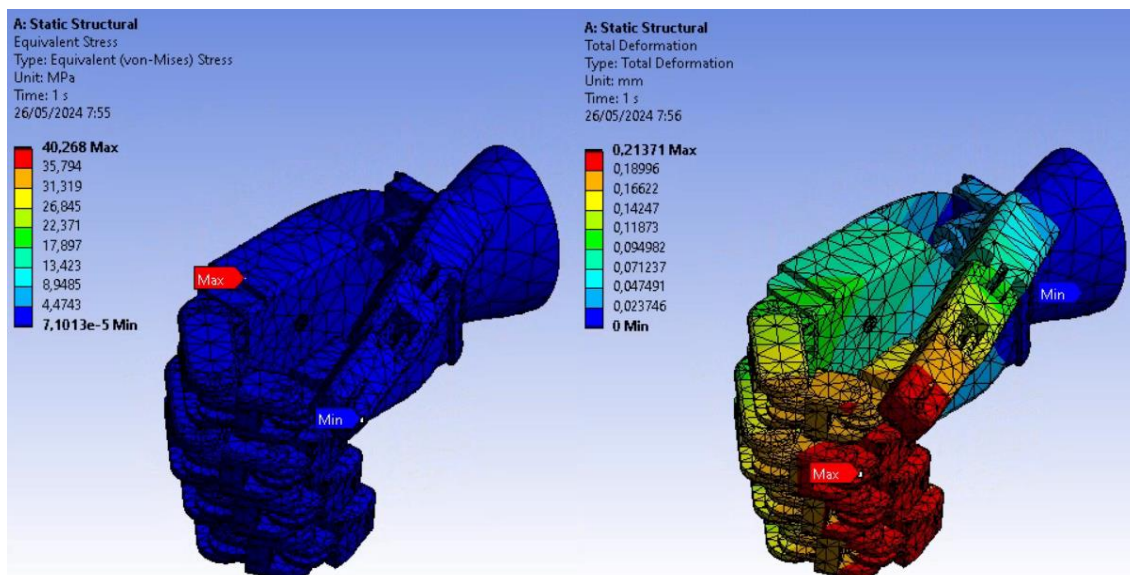


Ilustración 6.15 Tensiones equivalentes de von-Mises (izquierda) y las deformaciones generadas (derecha) caso 2 [Propio]

Se tiene como resultado a la deformación, un valor máximo $\varepsilon = 0,21371mm$ concentrado en las falanges medias y distales. Para la tensión equivalente máxima se tiene $\sigma_{eq} = 40,268 MPa$ concentrados en las caras laterales de las tuercas.

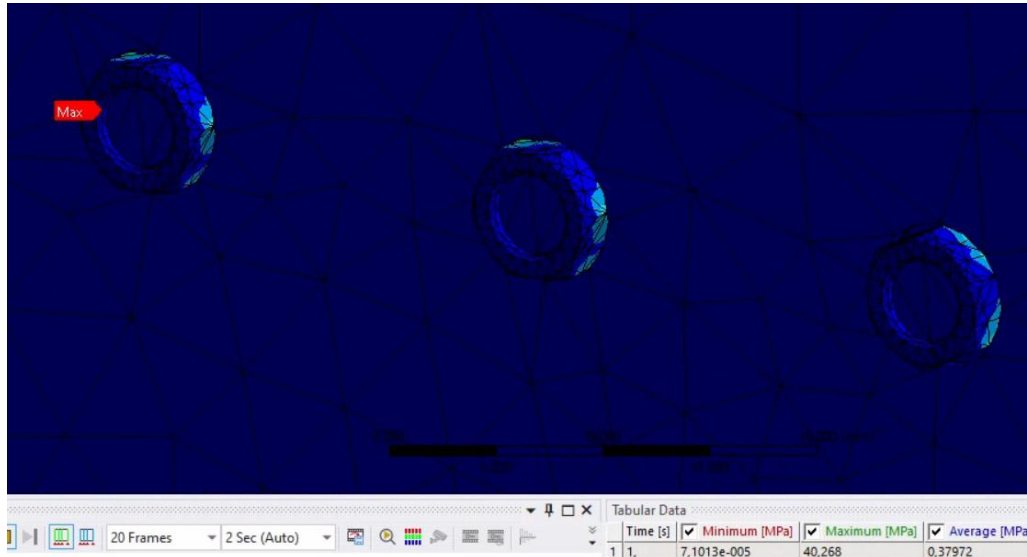


Ilustración 6.16 Tensiones equivalentes máximas en las tuercas caso 2 [Propio]

En el coeficiente de seguridad se obtiene los siguientes resultados:

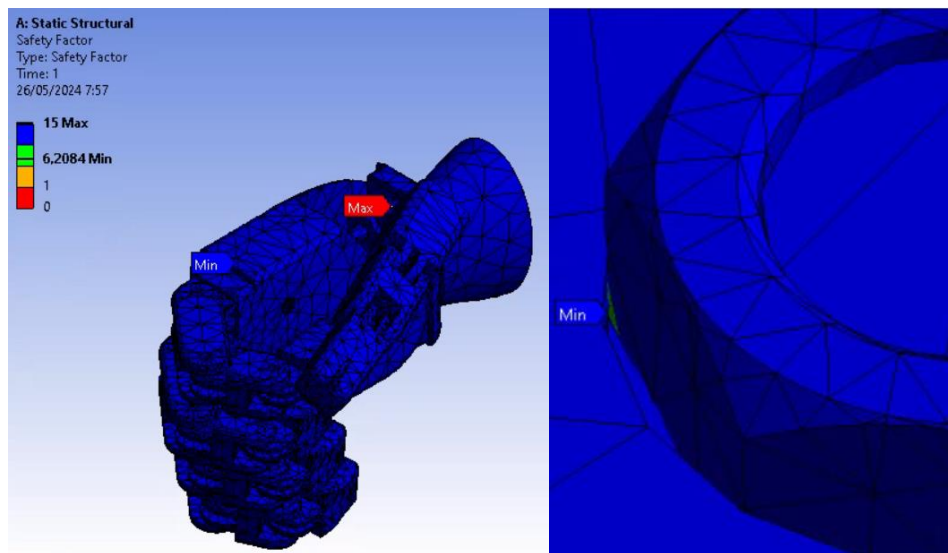


Ilustración 6.17 Coeficiente de seguridad mínimo generado en la tuerca en el caso 2 [Propio]

Coeficiente de seguridad un valor mínimo de $F_S = 6,2084$, que está más que capacitado ya que se tiene que cumplir que $F_S \geq 1$. Ese coeficiente mínimo se da en las aristas inferiores de las caras laterales de la tuerca.

Para los cálculos a fatiga se obtuvieron los siguientes resultados:

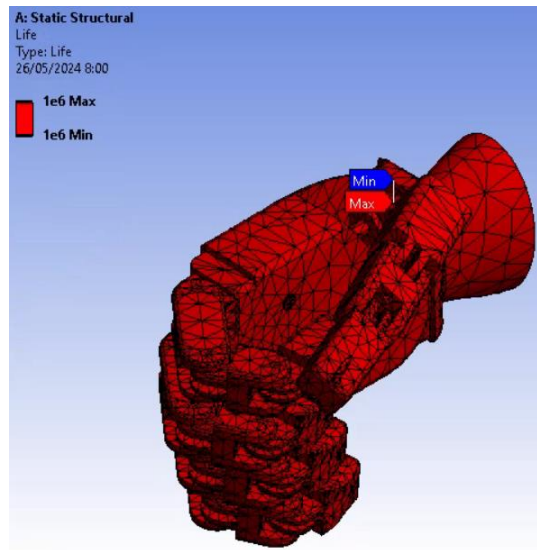


Ilustración 6.18 Vida a fatiga de la mano protésica en caso 2 [Propio]

Se tiene una vida mínima de ***Vida* = 10^6 ciclos**, esto quiere decir que tiene vida infinita y no se rompe a estas condiciones.

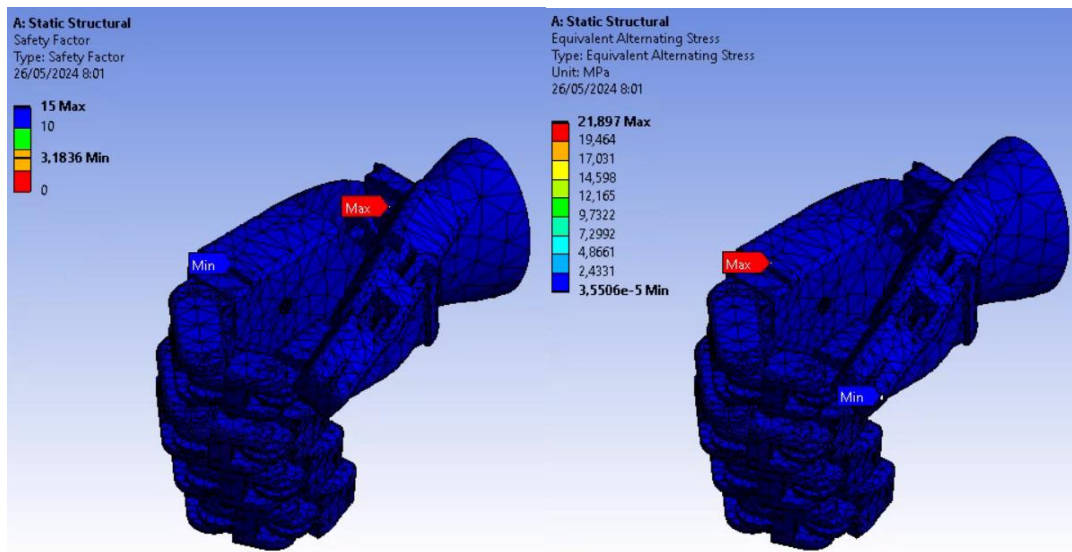


Ilustración 6.19 Coeficiente de seguridad (izquierda) y tensión alternante equivalente (derecha) en el caso 2 [Propio]

Para el coeficiente de seguridad se tiene un valor mínimo de **$F_S = 3,1836$** , que significa que está capacitado, ya que se tiene que cumplir que **$F_S \geq 1$** . La tensión alternante equivalente máxima da como resultado **$S_N^q = 21,897MPa$** . Igual que en el caso a tracción/compresión, se genera estas tensiones en las tuercas.

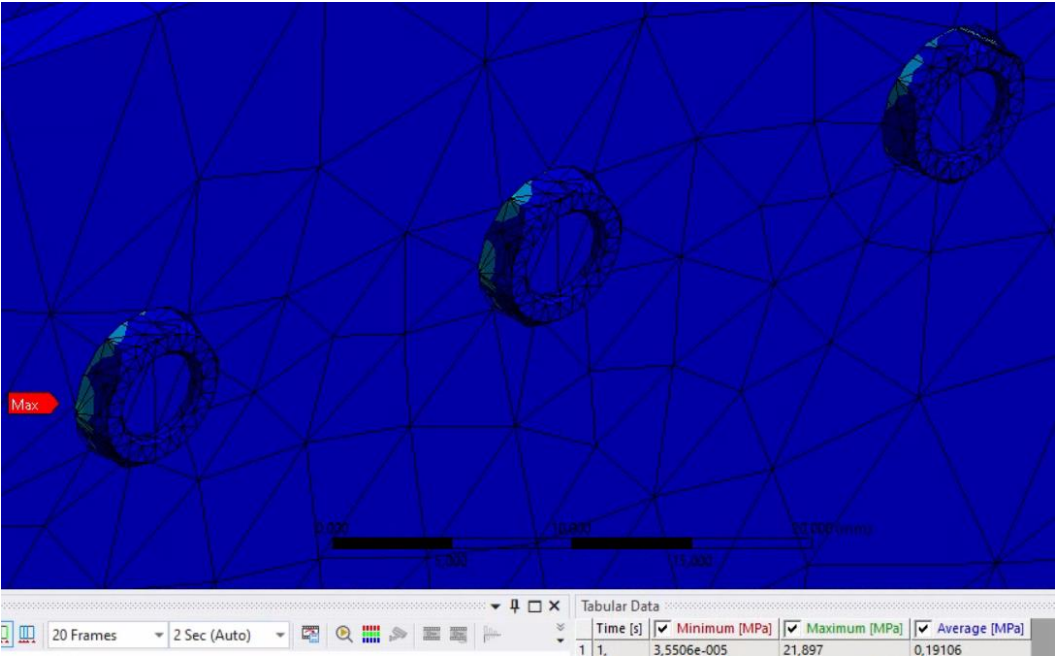


Ilustración 6.20 Tensión alternante equivalente en las tuercas caso 2 [Propio]

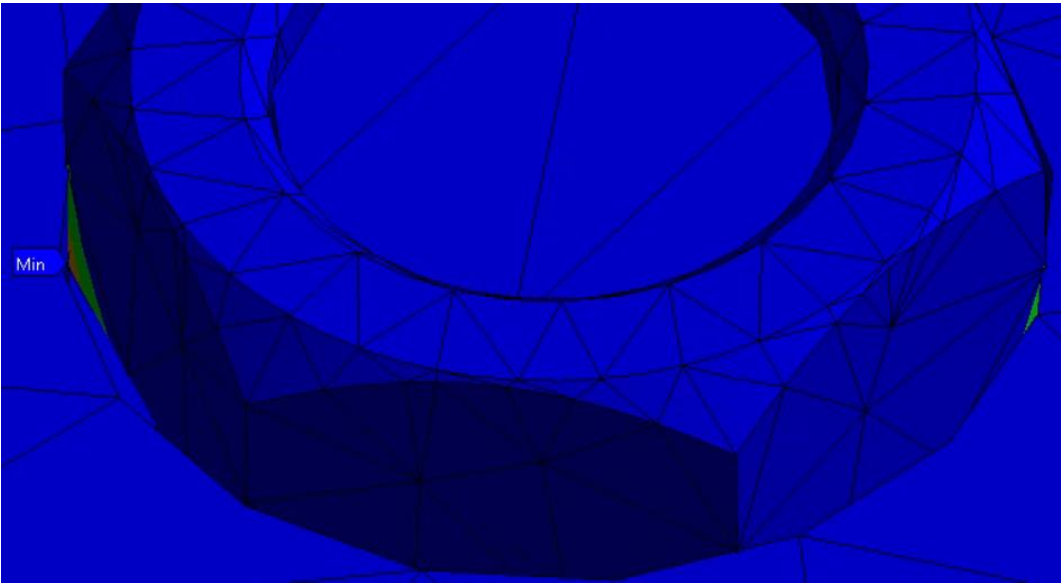


Ilustración 6.21 Coeficiente de seguridad mínimo en las aristas inferiores de las caras de la tuerca en el caso 2 [Propio]

6.3.3 Resultados del Hilo tensor

Para el hilo tensor de nylon solo se evalúa como actuaria ante un esfuerzo a tracción. Tomando en cuenta que el hilo es de 1mm de diámetro y de 200mm de longitud. Los resultados dan de la siguiente forma:



Ilustración 6.22 Nudos y Elementos del hilo tensor [Propio]

Como se muestra el hilo tensor, tiene una cantidad de **2760 nodos** y **1201 elementos**.

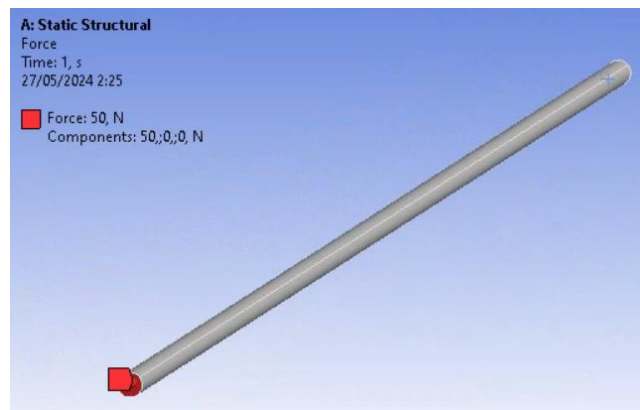


Ilustración 6.23 Condiciones que influyen en el mecanismo de agarre [Propio]

Para las condiciones, se añade una **fuerza = 50N**, igual al de la mano protésica. La fuerza se aplica en los puntos de amarre de los hilos tensores y se agrega un soporte fijo en el otro extremo donde se amarraría el hilo. También, como los anteriores casos se agrega **gravedad = 9,8m/s²**. Entonces, los resultados son los siguientes:

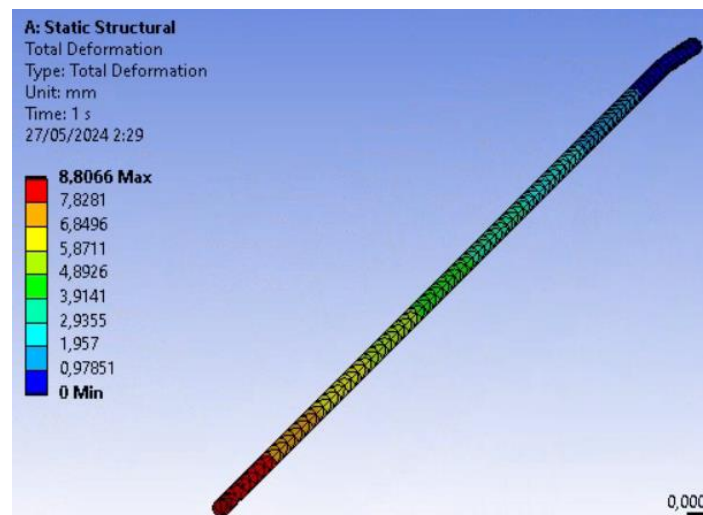


Ilustración 6.24 Deformaciones generadas en el hilo tensor [Propio]

Se tiene como resultado a la deformación, un valor máximo $\varepsilon = 8,8066mm$. Para la tensión equivalente máxima se tiene $\sigma_{eq} = 71,383 MPa$ concentrado en todo el hilo.



Ilustración 6.25 Tensiones equivalentes de von-Mises [Propio]

De igual manera el coeficiente de seguridad mínimo es de $F_S = 1,0114$, que significa que entra justo a lo admisible por que cumple que $F_S \geq 1$.



Ilustración 6.26 Coeficiente de seguridad del mecanismo [Propio]

6.3.4 Resultados del Mecanismo de agarre

Para el mecanismo de agarre se toma en cuenta las fuerzas generadas por todos los hilos sobre el punto de amarre y la del punto de amarre de un hilo que accionará este mecanismo. Por lo que se estudia los esfuerzos a tracción/compresión:

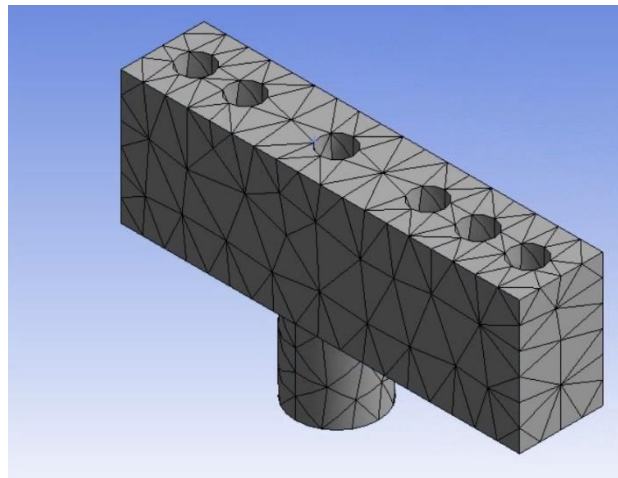


Ilustración 6.27 Nodos y elementos de la malla del mecanismo [Propio]

Como se muestra el mecanismo de agarre, tiene una cantidad de **2926 nodos** y **1535 elementos**.

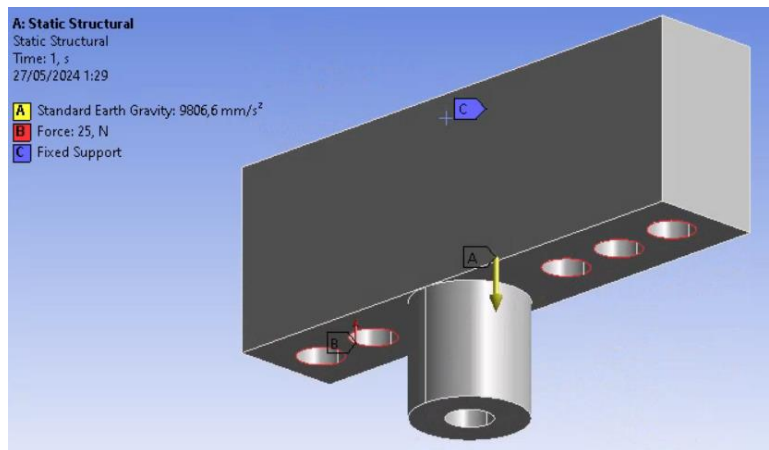


Ilustración 6.28 Condiciones que influyen en el mecanismo de agarre [Propio]

Para las condiciones, se añade una **fuerza** = **25N**, menor al de la mano en general, ya que se trata de una pieza menos maciza y de dimensiones más pequeñas. La fuerza se aplica en los puntos de amarre de los hilos tensores y se agrega un soporte fijo en el punto superior donde se amarra otro hilo que accionará el mecanismo. También, como los anteriores casos se agrega **gravedad** = **9,8m/s²**.

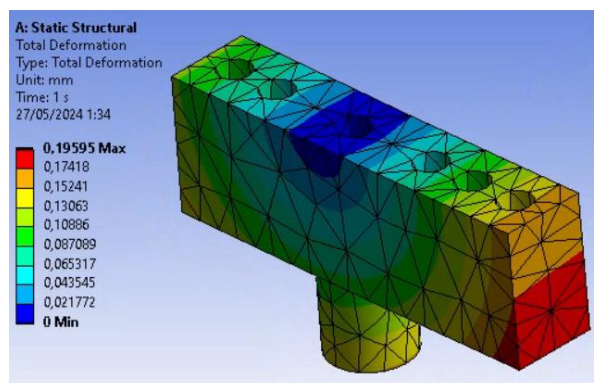


Ilustración 6.29 Deformaciones generadas en el mecanismo de agarre [Propio]

Se tiene como resultado a la deformación, un valor máximo $\varepsilon = 0,19595mm$ concentrado en la cara lateral marcado en rojo, debido a la tensión de 3 hilos. Para la tensión equivalente máxima se tiene $\sigma_{eq} = 31,986 MPa$ concentrados en el punto donde se amarra el hilo que acciona el mecanismo.

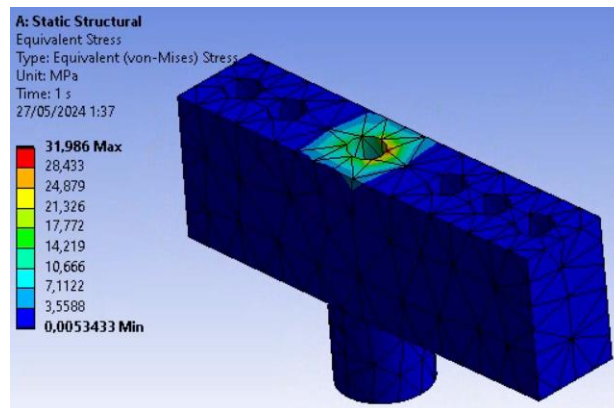


Ilustración 6.30 Tensiones equivalentes de von-Mises [Propio]

De igual manera el coeficiente de seguridad mínimo es de $F_S = 1,8289$, que significa que entra en lo admisible ya que se tiene que cumple que $F_S \geq 1$.

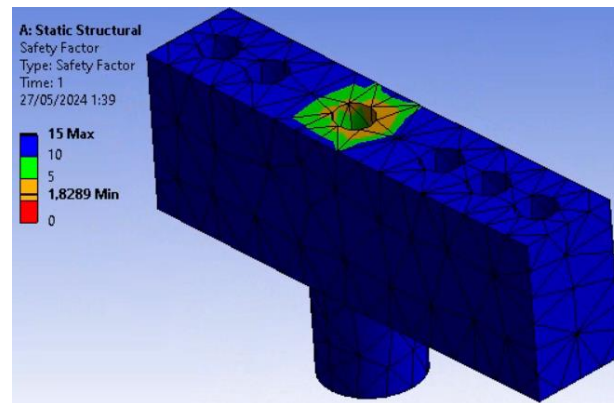


Ilustración 6.31 Coeficiente de seguridad del mecanismo [Propio]

6.3.5 Tabla de resultados

Obteniendo todos los resultados de los anteriores casos se procede a realizar una tabla que englobe todos los valores y que se puede realizar una comparación de manera simple.

	Caso 1	Caso 2	Hilos Tensores	Mecanismo de agarre
Carga	50N	50N	50N	25N
Esfuerzos				
Tensión Equivalente (Von Mises) (máximo)	10,994 MPa	40,268 MPa	71,383 MPa	31,986 MPa
Deformación (máxima)	0,0999 mm	0,21371 mm	8,8066 mm	0,19595 mm
Coefficiente de Seguridad (mínimo)	15	6,2084	1,0114	1,8289
Fatiga				
Vida (mínima)	10 ⁶ ciclos	10 ⁶ ciclos	-	-
Coefficiente de Seguridad (mínimo)	12,206	3,1836	-	-
Tension Alternante equivalente (maximo)	5,5937 MPa	21,897 MPa	-	-

Tabla 6.2 Valores de los resultados de los casos [Propio]

Al obtener estos resultados, se puede concluir que de los 2 casos el segundo es el más desfavorable o donde sufre más la prótesis, se denota que las tensiones son mayores y que se deforma mas que en el primer caso. Asimismo, se puede verificar que ambos casos

cumplen con los coeficientes de seguridad y que tienen una vida infinita, siendo un punto positivo para el diseño.

Los hilos tensores también cumplen con su función, ya que como se evaluó un solo hilo en el programa a esas condiciones, pudiendo soportar cierta tensión y cumpliendo ajustadamente el coeficiente de seguridad. Se entiende que el hilo no estará sometido a 50N (lo mismo que se evaluó los dos primeros casos) si no que, son varios hilos que soportarán esta carga, por lo que se distribuirá los 50N en el resto de hilos, pudiendo soportar dicha carga.

El único que puede generar problemas es el mecanismo de agarre, ya que se evaluó con la mitad de fuerza que el resto. Donde cumple casi el doble de lo requerido en el coeficiente de seguridad, se desconoce si al aplicarle una fuerza de 50N es capaz de soportarlo.

Capítulo 7 - Presupuesto

Es importante conocer el presupuesto total de la prótesis, ya que es una inversión necesaria para poder fabricar y montar totalmente la mano protésica. Como se tienen dos materiales, el PLA y el acero. Es importante tomar en cuenta que el PLA presenta la mayor parte de la prótesis, además que las piezas hechas de acero son adquiridas mediante compra.

Como se mencionó en el “Capítulo 5” el PLA se fabricará utilizando la impresora 3D de Modelado por disposición fundida (FDM). Entonces, los factores que influyen en el costo de la fabricación de un material con PLA son los siguientes:

- Costo del filamento, normalmente este valor ronda los **20 – 30€/kg**. Como se tiene un volumen de **423942.89 mm³** de material de PLA, y conocemos la densidad de este material **1,24g/cm³**, se puede sacar la masa y al final conocer el coste de material.

$$\text{Entonces el coste quedaría: } \frac{25\text{€}}{\text{kg}} * \frac{1240\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,0004\text{m}^3 = 12,4\text{€}$$

- Costo de mano de obra, se supone un coste de mano de obra de **15€/h** y se deduce que los operarios dedican **2 h** en la preparación y supervisión de la impresión.

$$\text{Entonces el coste quedaría: } 15\text{€/h} * 2\text{h} = 30\text{€}$$

- Costo de energía, el consumo de energía cuesta un aproximado de **0,10€/kWh** y se toma en cuenta las horas de trabajo que pueda estar la impresora. Se estima que imprimir todos los componentes de la mano, teniendo en cuenta un buen acabado y capas macizas. Tomaría en total unas **25h** como mucho en imprimir todas las piezas. El coste de consumo de una impresora puede rondar entre **250W** por hora.

$$\text{Entonces el coste quedaría: } 25\text{h} * 250\text{W} = 6,25\text{kWh}$$

$$6,25\text{kWh} * 0,10\text{€/kWh} = 0,625\text{€}$$

El total del coste de fabricación de las piezas de PLA, serán:

$$12,4 + 30 + 0,625 = 43,025\text{€}$$

Para el resto de componentes, como los tornillos, pasadores y las tuercas, se agrega una tabla que contiene los costes de cada componente:

Componente	Precio (€/unidad)	Cantidad (unidades)
Tornillo M4x30 ISO 1207	0,2	4
Pasador 4x24 ISO	0,08	2
Pasador 4x20	0,07	12
Tuerca M4	0,07	4

Tabla 7.1 Precios de los componentes de acero [31,32,37,38,39,40]

Teniendo todos estos datos, el precio resultante de los componentes sería unos:

$$0,2 * 4 + 0,08 * 2 + 0,07 * 12 + 0,07 * 4 = 2,08€$$

Por último, se necesita saber los precios de los hilos tensores. Para el hilo de nylon de 1mm de diámetro con unos 25m de longitud se tiene un valor estimado de **7€**. Para el hilo elástico de 1,5mm de diámetro y de 5m de longitud, el precio ronda unos **4€**.

Para finalizar, sumando todos los precios obtenidos, el total aproximado de la prótesis de mano sería unos:

$$43,025€ + 2,08€ + 7€ + 4€ = 56,105€$$

El precio final de **56,105€**, indica que es un precio relativamente asequible para el proyecto hecho, además que no es un gran importe de dinero para las funciones que pueda generar la mano protésica.

Conclusiones y Futuras Líneas de Trabajo

Se obtuvo un resultado satisfactorio con el proyecto realizado, se comprobó que el diseño cumple sus principales características que eran las de resistir las cargas y cumplir su funcionalidad de flexionar y extender los dedos. Gracias a los estudios de la mano y de la elasticidad y resistencia de materiales, se pudo crear un diseño similar a una mano real, con una apariencia agradable para los usuarios y emplear hilos tensores que actúan como los músculos y tendones de una mano.

Asimismo, el presupuesto realizado muestra que es un diseño completamente accesible y sirve para realizar otro tipo de estudios o para su uso. Los materiales empleados para este proyecto tienen un impacto ambiental positivo, debido a que el PLA es uno de los plásticos menos nocivos para el medio ambiente, tomando en cuenta que presenta como un 85% de la composición del diseño y que el acero es un metal que es duradero y tiene un alto ciclo de vida, por si fuera poco, que es un material altamente reciclable.

Por otra parte, el trabajo realizado puede realizarse futuras líneas de trabajo con el fin de mejorarlo, ya sea empleando un mecanismo mejor que sea capaz de soportar más cargas y un diseño más atractivo que el de los hilos tensores; se puede optimizar el diseño ya los resultados de la mano protésica nos indica que esta mucha más que capacitado de ejercer esas cargas. De igual forma, se puede tomar este proyecto como una base sólida para implementarlo en trabajos que incluyan campos de robótica y electrónica, donde añadan sensores, actuadores y programas que mejoren mucho las funciones de la prótesis.

Índice de Ilustraciones

2.1 Tipos de Amputaciones en los brazos.....	10
2.2 Mano con simbraquidactilia.....	11
2.3 Prótesis estética en uso.....	12
2.4 Prótesis de gancho.....	12
2.5 Tipo de prótesis mioeléctrica en uso.....	13
2.6 Ejemplo de una mano protésica de hilos tensores.....	13
2.7 Mano protésica con los hilos tensores visibles (color negro y blanco).....	14
2.8 Ejemplo de un diseño de una prótesis de mano por hilos tensores y las piezas que lo componen, señalando su ensamblaje luego de fabricar las partes que lo componen.....	15
3.1 Espacios y fascias de la palma de la mano.....	17
3.2 Partes superficiales de la mano que comprenden los dedos, pliegues, surcos y eminencias que permiten el correcto movimiento de la mano, así como todas las articulaciones que ayudan al desplazamiento de cada parte de los dedos y la muñeca.....	17
3.3 Medidas de las partes de la mano según la Norma DIN 33 402.....	18
3.4 Dimensiones del ancho y grosor de los dedos según la Norma DIN 33 402.....	19
3.5 Dimensiones del ancho de la mano y el grosor de la muñeca, así como el diámetro de agarre según la Norma DIN 33 402.....	19
3.6 Distintos tipos de movimiento del pulgar que funcionan con diversos tipos de músculos.....	20
3.7 Músculos que componen gran parte de la mano, mostrando los nombres de no solo los músculos que componen el compartimiento tenar, sino también, los que conforman el compartimiento hipotenar y el aductor.....	21
3.8 Músculos y arterias que componen la parte interna de la palma.....	22
3.9 Inserciones de los músculos lumbricales e interóseos.....	23
3.10 Huesos que componen la mano y muñeca y nombre de las articulaciones que los unen.....	24
3.11 Huesos del metacarpo.....	25
3.12 Falanges que componen la mano, se aprecia que el pulgar solo posee una falange proximal y una distal. También, que el tamaño de las falanges proximales es mayor al de las falanges medias y, esta a su vez, es mayor a las distales.....	25
4.1 Ejemplos de las Formas estructurales a) viga b) pilar c) placa d) cable.....	27
4.2 Partes de un sólido y las magnitudes que actúan en ella.....	28
4.3 Componentes que conforman el tensor de tensiones.....	30
4.4 Ejemplos de los valores que pueden tomar los componentes de tensión dependiendo del sentido.....	31
4.5 Casos donde a) n no es la tensión principal mientras que b) si lo es.....	31

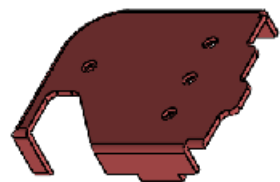
4.6	Tensor de esfuerzos o de tensiones principales.....	32
4.7	Representación de las ecuaciones de las deformaciones de los puntos A, P, Q y una representación gráfica de un segmento deformado.....	33
4.8	Magnitudes que actúan en la tracción del material.....	34
4.9	Grafica de un ensayo a tracción y los elementos principales a tener en cuenta.....	35
4.10	Ensayo de torsión y distribución de tensiones en la barra.....	36
4.11	Deformaciones de un diferencial y Tensiones tangenciales.....	36
4.12	Simetría de tensiones tangenciales en secciones de un punto.....	37
4.13	Representación de los elementos que intervienen en las tensiones cortantes.....	38
4.14	Distintas componentes de tensión y sus efectos en la deformación respecto a un diferencial.....	38
4.15	Superficie de los límites de plastificación de un material isótropo.....	40
4.16	Ciclos de amplitud constante y tensiones asociadas a la fatiga.....	41
4.17	Curva representativa de las tensiones de fallo a fatiga, frente a los ciclos.....	42
4.18	Diagrama de Goodman y la recta en casos de tensiones medias de tracción.....	43
4.19	Criterio de Goodman Modificado.....	44
4.20	Criterio de Soderberg.....	44
4.21	Representación de la tensión alternante equivalente.....	45
5.1	Diseño del Prototipo.....	46
5.2	Hilos hechos con el material PLA.....	47
5.3	Vista alzado y perfil, y las dimensiones de algunas partes del ensamblaje expresado en mm..	50
5.4	A la izquierda, posición natural del pulgar en un ángulo arbitrario. A la derecha, el pulgar cuando ambas partes están en un ángulo de 90°.....	51
5.5	A la izquierda, posición completamente vertical de los dedos. A la derecha, los ángulos de 90° que pueden formar los dedos y la interferencia generada si todos forman el mismo ángulo.....	51
5.6	Puntos de amarre de los hilos elásticos que permiten que la extensión de los dedos.....	52
5.7	Elementos de unión de la prótesis y sus dimensiones.....	52
5.8	Diseño y uso de un tornillo ISO 1207 en SOLIDWORKS.....	53
5.9	Diseño y uso de las dos formas de pasadores en SOLIDWORKS.....	53
5.10	Partes de una impresora DLP.....	54
5.11	1- Laser. 2- Sistema Escáner. 3-Sistema dispensadora de polvo. 4-Pistón de dispensación de polvo. 5-Rodillo 6-Pistón para fabricar- 7-Plataforma para lecho de polvo. 8-Objeto fabricándose.....	55
5.12	Partes de la fabricación por FDM.....	56
5.13	Puntos de amarre y guías de los hilos tensores.....	56
6.1	Curva de fatiga PLA impreso a 3D.....	57

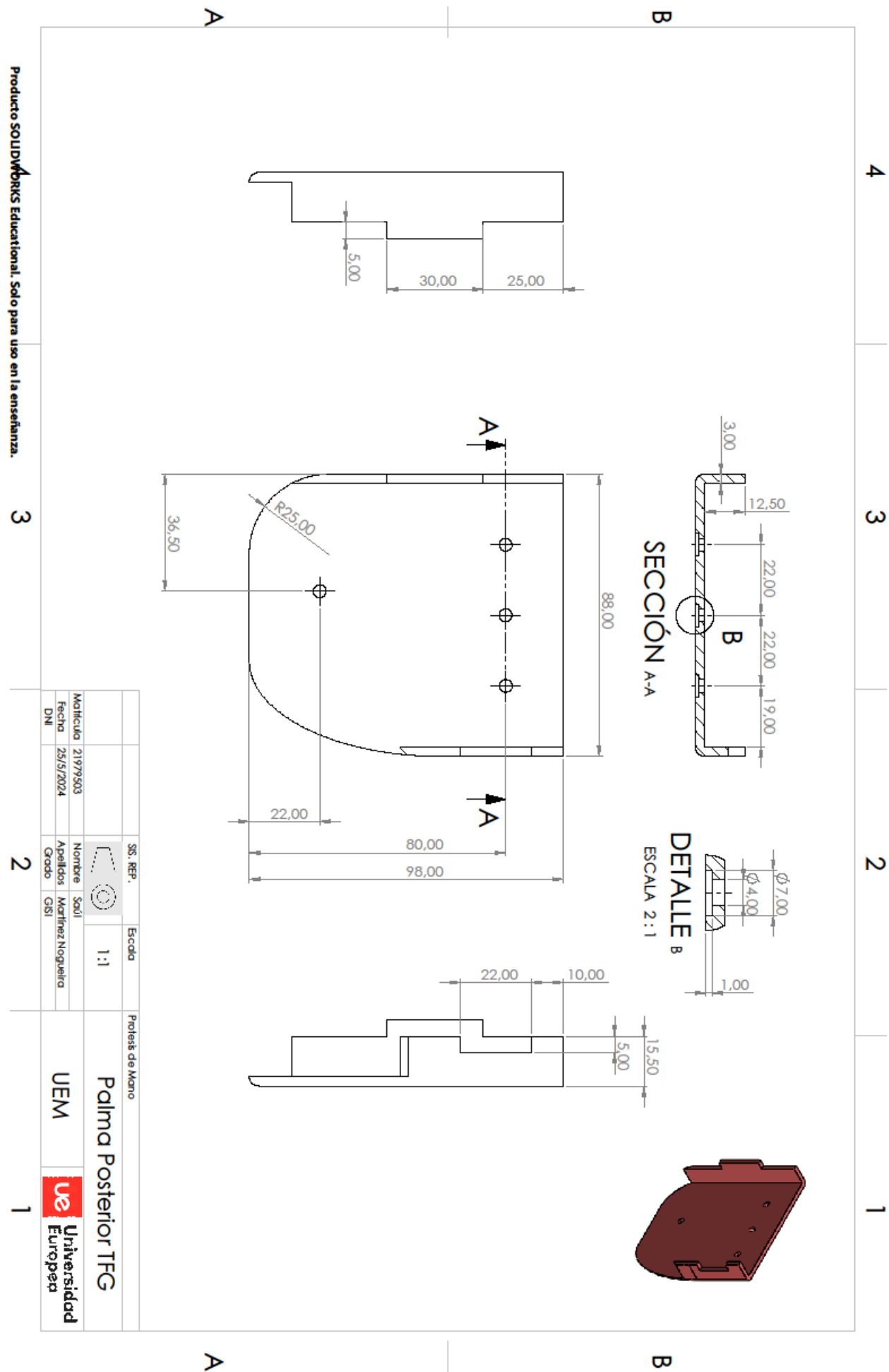
6.2	Curva fatiga con escala logarítmica del PLA.....	58
6.3	Los 3 diseños que se analizarán (mano protésica, hilo tensor, mecanismo de agarre).....	59
6.4	Posición de la mano caso 1.....	60
6.5	Numero de nodos y elementos (triángulos) de la malla generada.....	60
6.6	Condiciones que influyen en el caso 1.....	61
6.7	Deformación (izquierda) y tensión equivalente de von-Mises (derecha) en el caso 1.....	61
6.8	Tensiones equivalentes máximas en las tuercas caso 1.....	62
6.9	30 Coeficiente de seguridad mínimo en el caso 2.....	62
6.10	Vida a fatiga de la mano protésica en caso 1.....	63
6.11	Coeficiente de seguridad (izquierda) y tensión alternante equivalente (derecha) en el caso 1.....	63
6.12	Tensión alternante equivalente en las tuercas caso 1.....	64
6.13	Posición de la mano caso 2 (izquierda) y nodos y elementos de la malla (derecha).....	64
6.14	Condiciones que influyen en el caso 2.....	65
6.15	Tensiones equivalentes de von-Mises (izquierda) y las deformaciones generadas (derecha) caso 2.....	65
6.16	Tensiones equivalentes máximas en las tuercas caso 2.....	66
6.17	Coeficiente de seguridad mínimo generado en la tuerca en el caso 2.....	66
6.18	Vida a fatiga de la mano protésica en caso 2.....	67
6.19	Coeficiente de seguridad (izquierda) y tensión alternante equivalente (derecha) en el caso 2.....	67
6.20	Tensión alternante equivalente en las tuercas caso 2.....	68
6.21	Coeficiente de seguridad mínimo en las aristas inferiores de las caras de la tuerca en el caso 2.....	68
6.22	Nudos y Elementos del hilo tensor.....	69
6.23	Condiciones que influyen en el mecanismo de agarre.....	69
6.24	Deformaciones generadas en el hilo tensor.....	70
6.25	Tensiones equivalentes de von-Mises.....	70
6.26	Coeficiente de seguridad del mecanismo.....	71
6.27	Nodos y elementos de la malla del mecanismo.....	71
6.28	Condiciones que influyen en el mecanismo de agarre.....	72
6.29	Deformaciones generadas en el mecanismo de agarre.....	72
6.30	Tensiones equivalentes de von-Mises.....	73
6.31	Coeficiente de seguridad del mecanismo.....	73

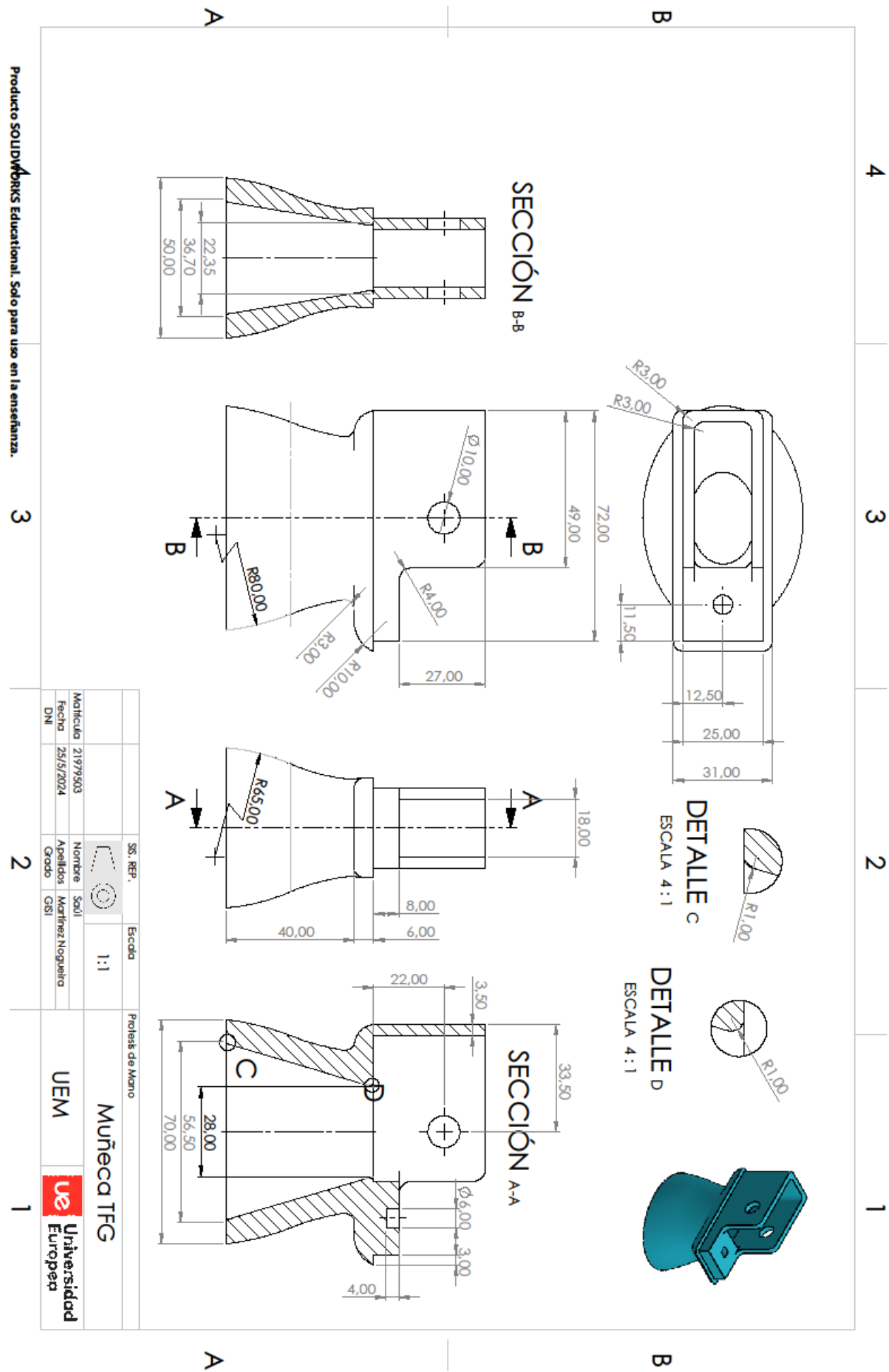
Índice de Tablas

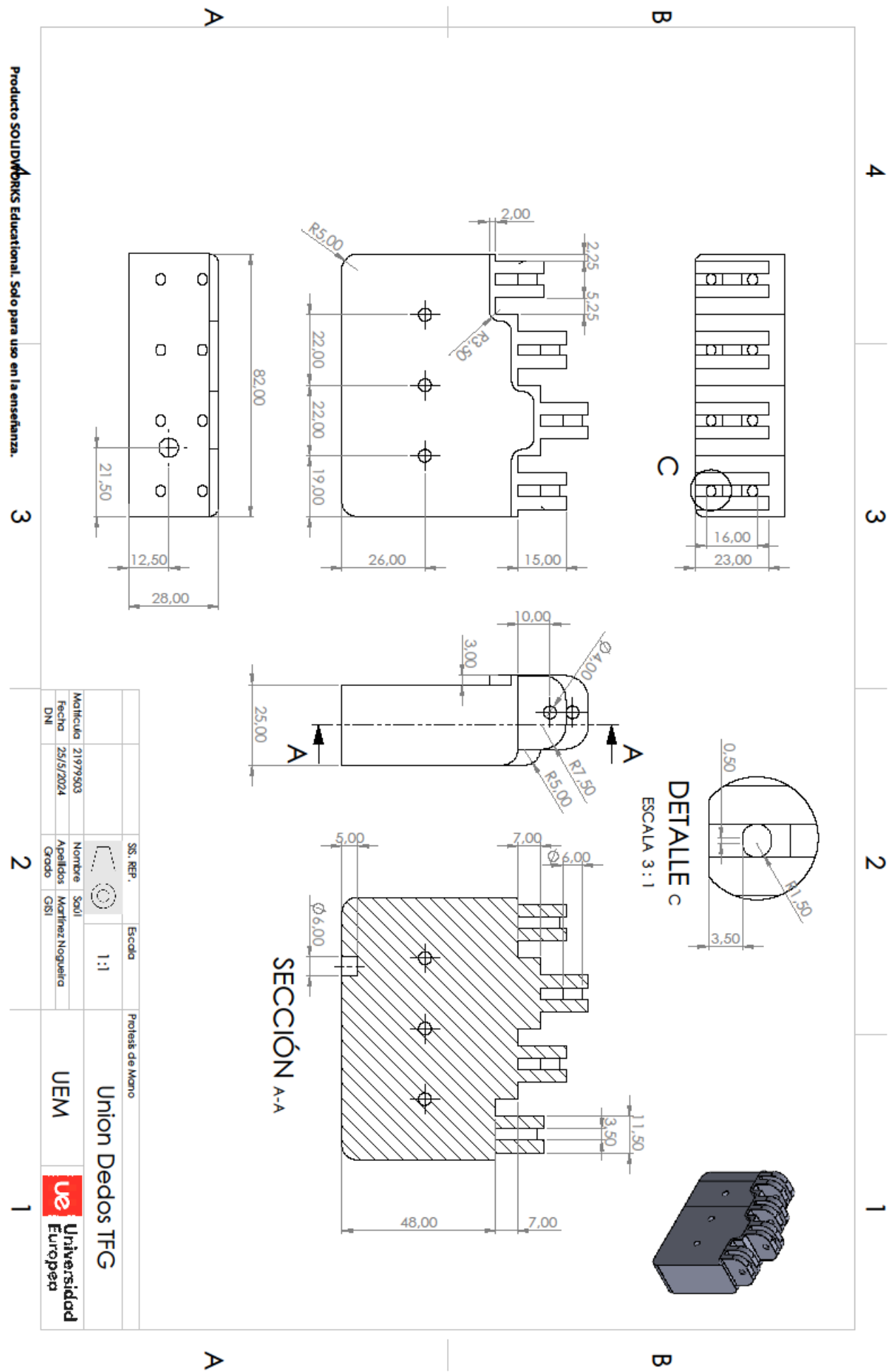
3.1 Dimensiones de las manos, tanto de hombres como mujeres según la norma DIN 33 40....	18
3.2 Tabla de las dimensiones de la mano referenciadas a la ilustración 3.4 según la Norma DIN 33 402.....	19
3.3 Tabla de las dimensiones de la mano referenciadas a la ilustración 3.5 según la Norma DIN 33 402.....	19
5.1 Propiedades Mecánicas del PLA hechas en el programa ANSYS.....	48
5.2 Propiedades Mecánicas del Acero Estructural dadas por el programa ANSYS.....	48
5.3 Propiedades Mecánicas del Nylon.....	49
6.1 Valores a fatiga del PLA con los ciclos y tensiones.....	58
6.2 Valores de los resultados de los casos.....	74
7.1 Precios de los componentes de acero.....	77

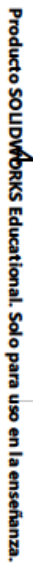
ANEXO









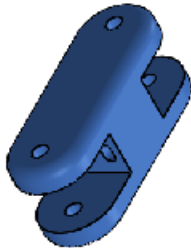


4

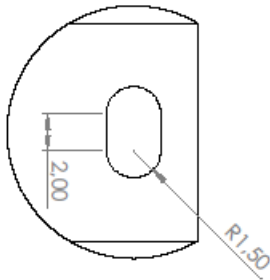
3

2

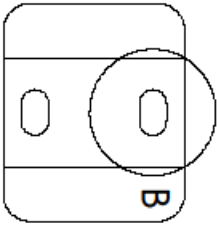
1



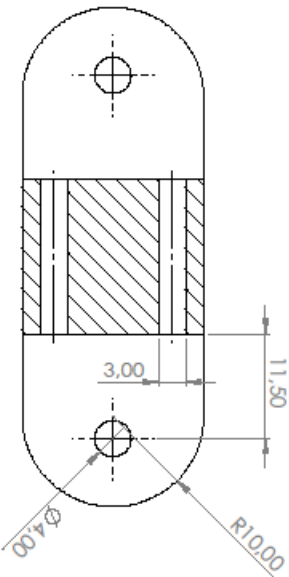
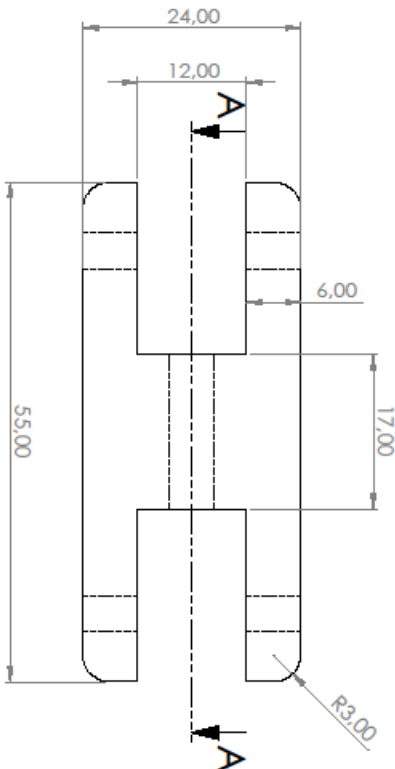
B



DETALLE B
ESCALA 4:1



A



SECCIÓN A-A

A

B

3

2

1

		SS. REP.	Escuela	Protésis de Mano	
			1:1	Falange Proximal Pulgar TFG	
Matrícula	21979503	Nombre	Saúl	UEM	
Fecha	25/5/2024	Apellidos	Martínez Nogueira	 Universidad Europea	
DNI		Grado	GSI		

4

3

2

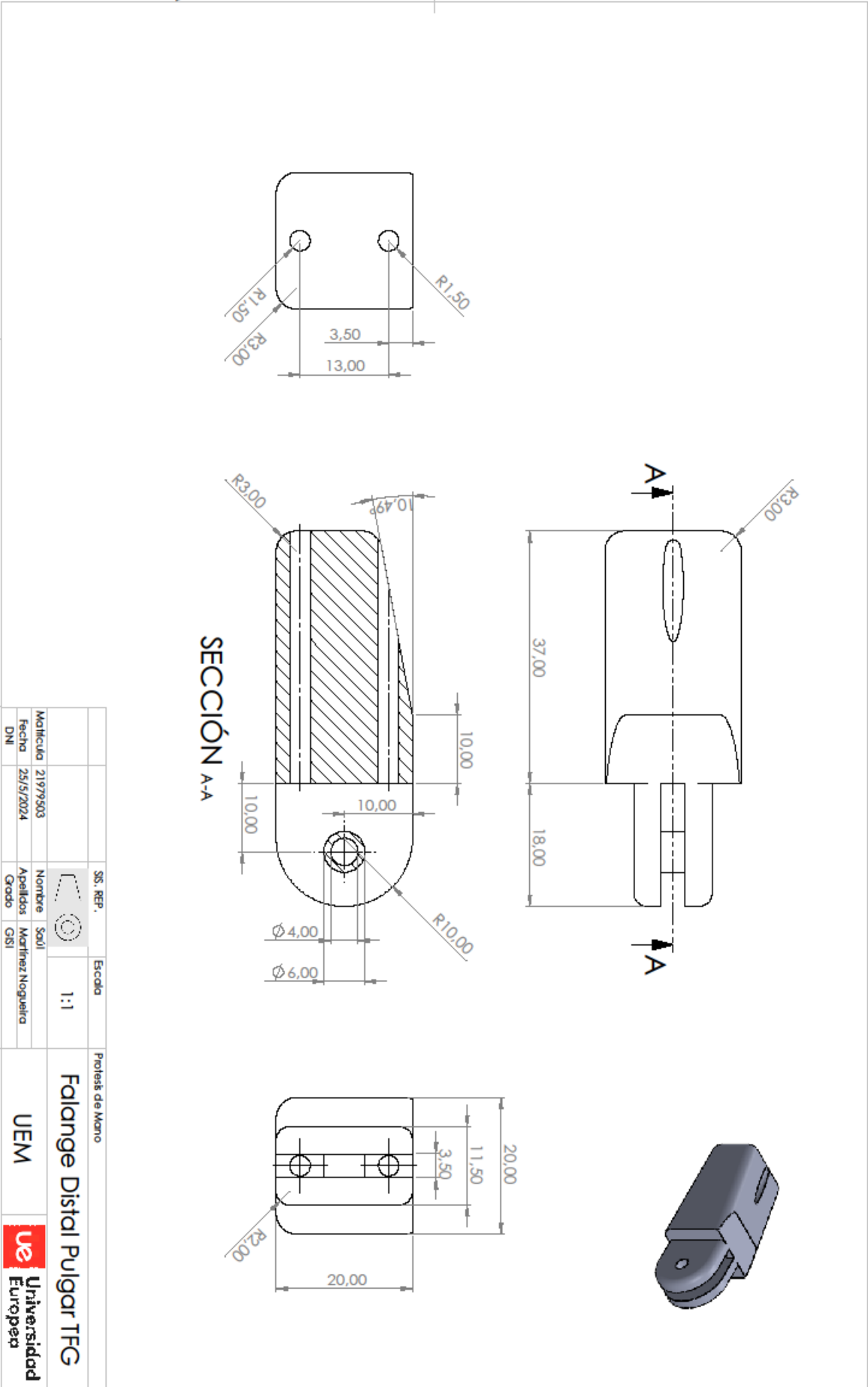
1

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

3

2

1

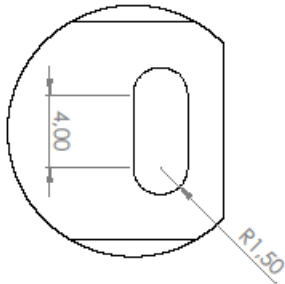
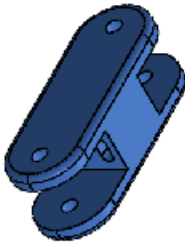


4

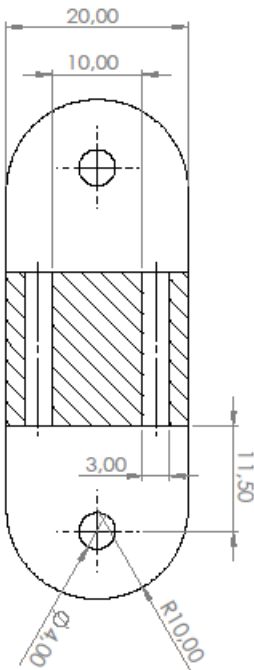
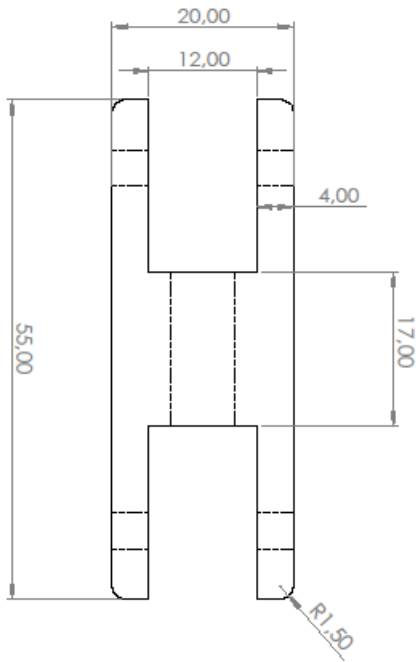
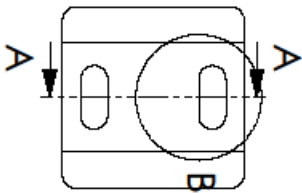
3

2

1



DETALLE B
ESCALA 4 : 1



SECCIÓN A-A

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

3

2

1

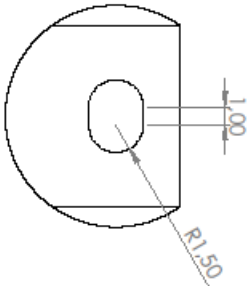
SS. REP.		Escuela		Protésis de Mano	
		1:1		Falange Proximal TFG	
Matrícula	21979503	Nombre	Saúl	UEM	
Fecha	25/5/2024	Apellidos	Martínez Nogueira	 Universidad Europea	
DNI		Grado	GSI		

4

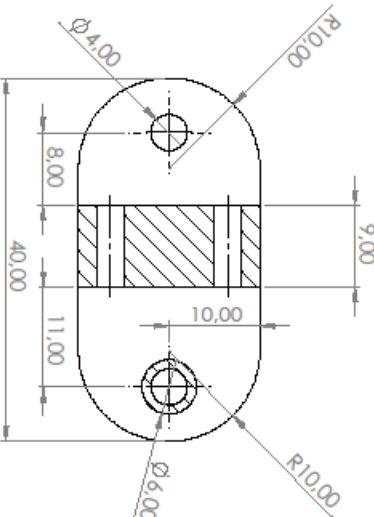
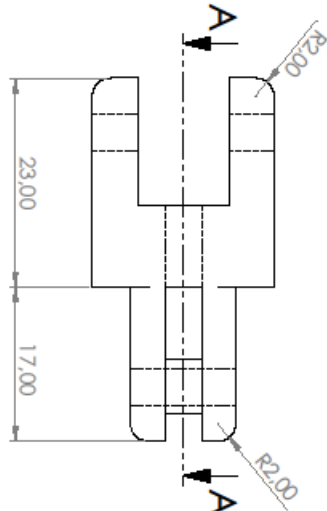
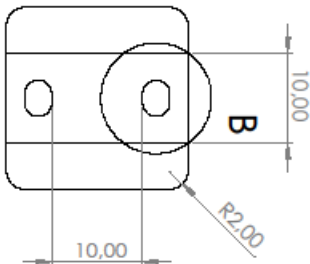
3

2

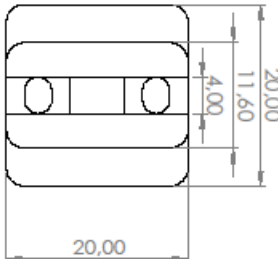
1



DETALLE B
ESCALA 4 : 1



SECCIÓN A-A



Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

3

2

1

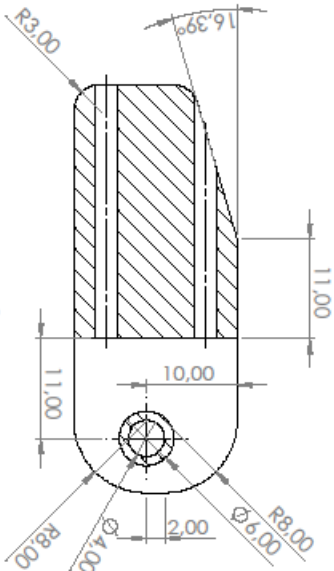
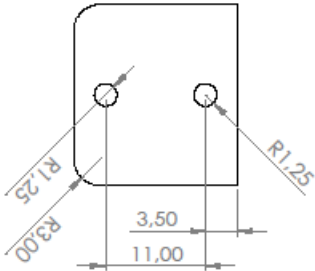
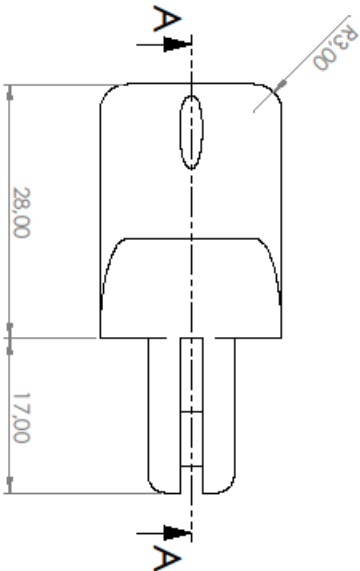
SS. REP.		Escala		Protés de Mano	
		1:1		Falange Media TFG	
Matrícula	21979503	Nombre	Saúl	UEM	
Fecha	25/5/2024	Apellidos	Martínez Nogueira	 Universidad Europea	
DNI		Grado	GSI		

4

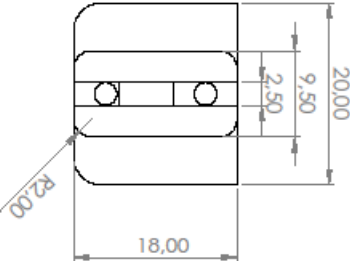
3

2

1



SECCIÓN A-A



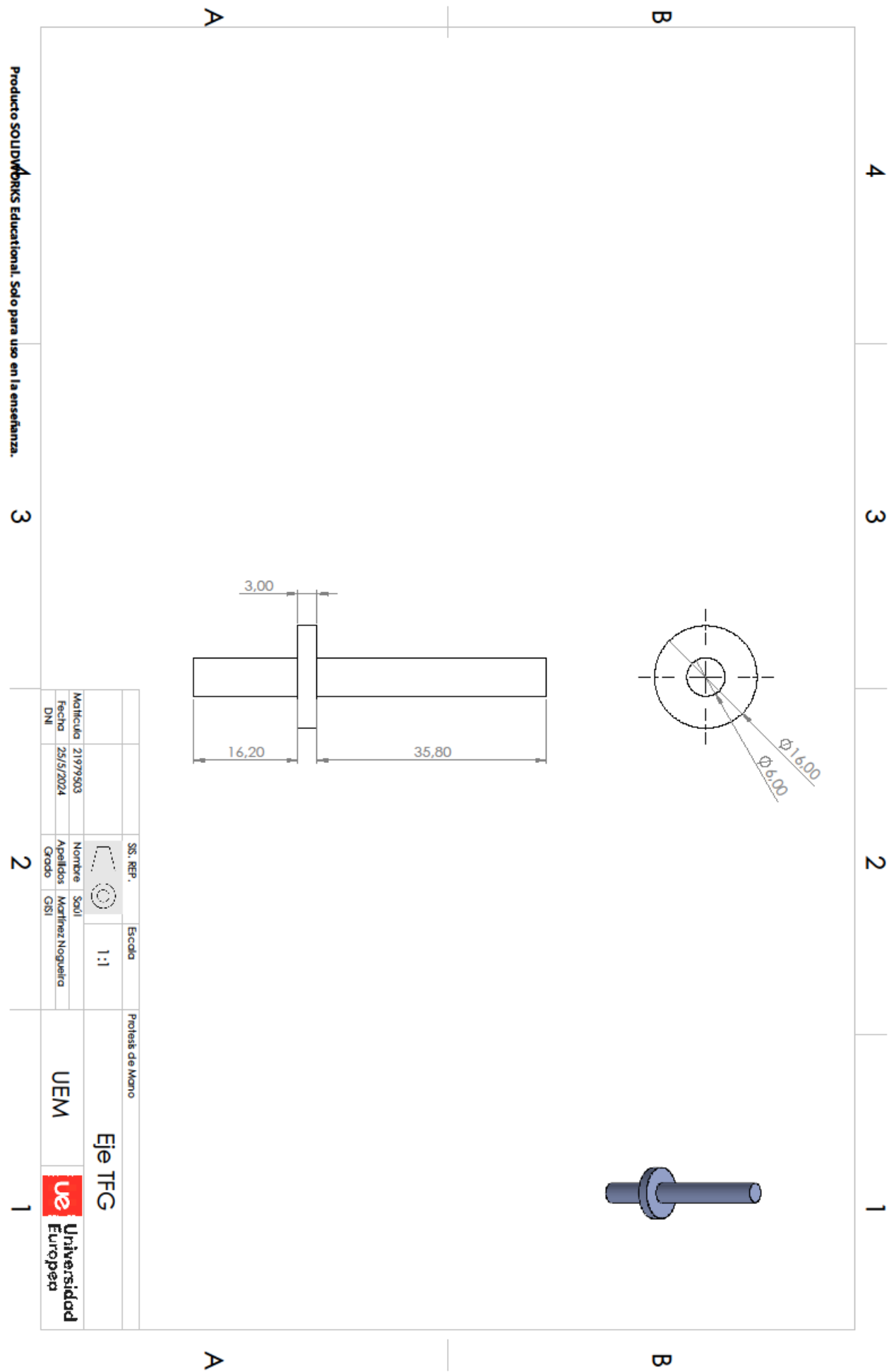
Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

3

2

1

SS. REP.		Escala		Protés de Mano	
		1:1		Falange Distal TFG	
Matrícula	21979503	Nombre	Saúl	UEM	
Fecha	25/5/2024	Apellidos	Martínez Nogueira	 Universidad Europea	
DNI		Grado	GSI		



Bibliografía

- [1] Propiedades del PLA. Políácido Láctico (PLA). [citado 2024 abril 26]. Disponible en: <https://sites.google.com/view/poliacidolactico-coma/poli%C3%A1cido-l%C3%A1ctico/propiedades-del-pla>
- [2] Rehabilitation and prosthetic restoration in upper limb amputation. Musculoskeletal Key. [citado 2024 abril 26]. Disponible en: <https://musculoskeletalkey.com/rehabilitation-and-prosthetic-restoration-in-upper-limb-amputation/>
- [3] Children with congenital hand anomalies (malformations). HealthyChildren.org. [citado 2024 abril 28]. Disponible en: <https://www.healthychildren.org/Spanish/health-issues/conditions/Cleft-Craniofacial/Paginas/children-with-congenital-hand-anomalies-malformations.aspx>
- [4] Malformaciones de mano congénitas. Dr. Piñal y Asociados. [citado 2024 abril 28]. Disponible en: <https://drpinal.com/malformaciones-mano-congenitas-nacimiento-cirugia-sindactilia-dedos-pegados-polidactilia/>
- [5] Lo que debe saber sobre los brazos y manos protésicas. Ottobock. [citado 2024 abril 28]. Disponible en: <https://www.ottobock.com/es-us/lo-que-debe-saber-sobre-los-brazos-y-manos-protesis>
- [6] Prótesis de mano: variantes. KYP Bioingeniería. [citado 2024 mayo 2]. Disponible en: <https://www.kypbioingenieria.com/protesis-de-mano-variantes/>
- [7] Martín Rodríguez Adrián. Simulación mediante el método de los elementos finitos de una estructura metálica. [Trabajo de Fin de Grado]. Universidad Carlos III de Madrid; Noviembre 2010 [citado 2024 mayo 2]. Disponible en: <https://e-archivo.uc3m.es/rest/api/core/bitstreams/a4325d60-fa7d-4f09-a37d-e6509342c29e/content>
- [8] Jiménez García R. Análisis de la incorporación de inteligencia artificial en la cadena de suministro [Trabajo de Fin de Grado]. Repositorio Zaguán. Universidad de Zaragoza; 2020 [citado 2024 mayo 4]. Disponible en: <https://zaguan.unizar.es/record/96606/files/TAZ-TFG-2020-1913.pdf>
- [9] Lopesino Rivera D. Desarrollo de un sistema de navegación autónoma para un vehículo eléctrico [Trabajo de Fin de Grado]. Archivo Digital UPM. Universidad Politécnica de Madrid; 2017 [citado 2024 mayo 4]. Disponible en: https://oa.upm.es/50450/1/TFG_DANIEL_LOPESINO_RIVERA.pdf
- [10] Prótesis mioeléctricas. Mi Prótesis de Pierna. [citado 2024 mayo 5]. Disponible en: <https://miprotesisdepierna.mx/blog/protesis-mioelectricas/>

- [11] Filamento PLA: los pros y los contras de este material básico. BCN3D. [citado 2024 mayo 5]. Disponible en: <https://www.bcn3d.com/es/filamento-pla-los-pros-y-los-contras-de-este-material-basico/>
- [12] Galileo Hand: Prótesis de Mano Impresa en 3D. Instructables. [citado 2024 mayo 5]. Disponible en: <https://www.instructables.com/Galileo-Hand-Protesis-de-Mano-Impresa-en-3D/>
- [13] Fabricación de Prótesis para Niños. FabLab Madrid CEU. [citado 2024 mayo 5]. Disponible en: <https://fablabmadridceu.com/2016/05/17/fabricacion-de-protesis-para-ninos/>
- [14] Miembro superior - Mano. Enfermería.top. [citado 2024 mayo 8]. Disponible en: <https://enfermeria.top/apuntes/anatomia/miembro-superior/mano/#>
- [15] Mano y muñeca. Kenhub. [citado 2024 mayo 8]. Disponible en: <https://www.kenhub.com/es/library/anatomia-es/mano-y-muneca>
- [16] Ergonomía aplicada a las herramientas - 01º Parte. Estrucplan. [citado 2024 mayo 9]. Disponible en: <https://estrucplan.com.ar/ergonomia-aplicada-a-las-herramientas-01o-parte/>
- [17] Resistencia de materiales. Prodel. [citado 2024 mayo 9]. Disponible en: <https://www.prodel.es/subareas/resistencia-de-materiales/>
- [18] Apuntes del Máster en Ingeniería Industrial. Universidad de Valladolid. 2014. [citado 2024 mayo 11]. Disponible en: https://www.eii.uva.es/reic/RMgrado/docs_varios/apuntes_RMgrado.pdf
- [19] Open Course Ware - Universidad Politécnica de Cartagena. Lección 5 Criterios de plasticidad y de rotura. [formato PDF]. [citado 2024 mayo 11]. Disponible en: https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/5470/mod_resource/content/1/T5-criterios-plasticidad-rotura_v1.pdf
- [20] Mecapedia. Criterio de von Mises. Mecapedia - Universitat Jaume I. [citado 2024 mayo 13]. Disponible en: https://www.mecapedia.uji.es/pages/criterio_de_von_Mises.html.
- [21] Universidad de Cantabria. Tema5 Comportamiento Mecánico. Open Course Ware - Universidad de Cantabria. [citado 2023 mayo 14]. Disponible en: <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1874/course/section/1515/Tema5.pdf>
- [22] TWI Ltd. What is PLA? TWI Global. [citado 2024 mayo 14]. Disponible en: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-pla#WhatisitUsedFor>
- [23] EurocodeApplied. Steel design properties. EurocodeApplied. [citado 2024 Mayo 15]. Disponible en: <https://eurocodeapplied.com/design/en1993/steel-design-properties>

- [24] Aceromafe. ¿Qué es el acero estructural? Aceromafe. [citado 2024 mayo 15]. Disponible en: <https://www.aceromafe.com/que-es-el-acero-estructural/>
- [25] MatWeb. Overview of materials for High Density Polyethylene (HDPE), Blow Molding. MatWeb. [citado 2024 mayo 16]. Disponible en: <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=8d78f3cfcb6f49d595896ce6ce6a2ef1>
- [26] Sanmetal. Nylon - Poliamida 6. Sanmetal. [citado 2024 mayo 16]. Disponible en: <https://www.sanmetal.es/productos/termoplasticos/nylon-poliamida-6/9>
- [27] Amazon. Transparente Invisible elástico Decoraciones Manualidades. Amazon. [citado 2024 mayo 18]. Disponible en: <https://www.amazon.es/Transparente-Invisible-el%C3%A1stico-Decoraciones-Manualidades/dp/B00IXNW6YE?th=1>
- [28] Formlabs. Comparación de impresoras 3D de resina SLA vs DLP. Formlabs. [citado 2024 mayo 18]. Disponible en: <https://formlabs.com/es/blog/comparacion-impresoras-3d-resina-sla-dlp/>
- [29] Sinterizado selectivo por láser. Wikipedia. [citado 2024 mayo 19]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Sinterizado_selectivo_por_l%C3%A1ser
- [30] Todo3D. FDM (FFF): Modelado por Deposición Fundida. Todo3D. [citado 2024 mayo 20]. Disponible en: <https://todo-3d.com/fdm-fff-modelado-deposicion-fundida/?v=911e8753d716>
- [31] Fabory. Tornillo cabeza cilíndrica con ranura DIN 84 acero sin revestimiento 4.8 ISO 1207 M4x20. Fabory. [citado 2024 mayo 22]; Disponible en: <https://www.fabory.com/es/tornillo-cabeza-cilindrica-con-ranura-din-84-acero-sin-revestimiento-4-8-iso-1207-m4x20/p/24501040020>
- [32] OPAC. Producto 166 - ISO 8734. OPAC. [citado 2024 mayo 22]; Disponible en: <https://www.opac.net/producto-166-iso-8734>
- [33] Createsse. Cordón elástico poliéster blanco 5 metros. Createsse. [citado 2024 mayo 22]; Disponible en: <https://www.createsse.es/cordon-elastico-poliester-blanco-5-metros-6970.html>
- [34] Amazon. Transparente Invisible elástico Decoraciones Manualidades. Amazon. [citado 2024 mayo 22]; Disponible en: <https://www.amazon.es/Transparente-Invisible-el%C3%A1stico-Decoraciones-Manualidades/dp/B00IXNW6YE?th=1>
- [35] Amazon. Resultados de búsqueda de "filamento 1kg PLA". Amazon. [citado 2024 mayo 22]; Disponible en: https://www.amazon.es/s?k=filamento+1kg+pla&adgrpid=87514852745&hvadid=685473153356&hvdev=c&hvlocphy=1005460&hvnetw=g&hvqmt=e&hvrnd=461777019927977339&hvtargid=kwd-443783371853&hydadcr=17405_2261023&tag=hydes-21&ref=pd_sl_10zu1k1tl9_e

- [36] Eligenio. Cuánto consume una impresora 3D. Eligenio. [citado 2024 mayo 23]; Disponible en: <https://eligenio.com/es/blog/cuanto-consume-impresora-3d/#:~:text=Las%20impresoras%203D%20normales%20consumen,las%20lavadoras%20o%20los%20frigor%C3%ADficos>
- [37] Simiranda. Tornillo inoxidable DIN 84. Simiranda. [citado 2024 mayo 23]; Disponible en: <https://www.simiranda.com/tornillo-inoxidable-din-84-b509d/>
- [38] Cablepelado. Tuerca hexagonal plana M4 diámetro interior 66 uds 4 mm gris. Cablepelado. [citado 2024 mayo 23]; Disponible en: https://www.cablepelado.es/tuerca-hexagonal-plana-m4-diametro-interior-66-uds-4-mm-gris?product_id=5749
- [39] Amazon. Tuercas hexagonales DIN 934 inoxidable. Amazon. [citado 2024 mayo 24]; Disponible en: <https://www.amazon.es/Tuercas-hexagonales-DIN-934-inoxidable/dp/B07JNKHV44?th=1>
- [40] Entaban. Pasador cilíndrico macizo DIN 6325. Entaban. [citado 2024 mayo 24]; Disponible en: https://entaban.es/pasadores/2194-pasador-cilindrico-macizo-din-6325.html#/996-longitud_pasador_mm-24/1009-diametro_pasador_mm-4
- [41] Design fatigue curve for 3D printed polylactide (PLA) obtained by post-processing the. ResearchGate. [citado 2024 mayo 24]; Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Design-fatigue-curve-for-3D-printed-polylactide-PLA-obtained-by-post-processing-the_fig2_330031009
- [42] Besa AJ, Giner E, Ródenas JJ, Tarancón JE, Valero FJ. Componentes de Máquinas Fatiga de alto ciclo. Pearson Educación; 2003. [citado 2024 mayo 24]; Disponible en: <https://es.scribd.com/document/392025259/Componentes-de-Maquinas-FATIGA-r>