



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**DISEÑO, ESTUDIO Y FABRICACION CON  
IMPRESIÓN 3D DE FÉRULAS PERSONALIZADAS  
PARA EL TRATAMIENTO DE FRACTURAS DE  
MIEMBRO SUPERIOR**

**Camilo Alexander Molina Gómez**

**Universidad de Antioquia**

**Facultad de ingeniería**

**Medellín, Colombia**

**2021**



Diseño, estudio y fabricación con impresión 3D de férulas personalizadas para el  
tratamiento de fracturas de miembro superior

**Camilo Alexander Molina Gómez**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título  
de:

**Bioingeniero**

Asesores (a):

Juliana Uribe Pérez Bioingeniera Ph.D

Línea de Investigación:

Biomecánica

Universidad de Antioquia

Facultad de ingeniería.

Medellín, Colombia

2021

*A mis padres y maestros que fueron un pilar  
fundamental para alcanzar este logro.*

## CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Planteamiento del problema .....	3
1.2. Objetivos .....	5
1.2.1. Objetivo general .....	5
1.2.2. Objetivos específicos .....	5
2. MARCO TEORICO .....	6
2.1. Impresión 3D .....	6
2.1.1. Procesamiento .....	8
2.1.2. Tecnologías de impresión 3D .....	9
2.1.3. Materiales en impresión 3D .....	14
2.2. Escaneado 3D .....	17
2.2.1. Tipos de escáner 3D .....	18
2.3. Diseño asistido por computadora (CAD) .....	24
2.4. Optimización topológica .....	25
2.5. Articulación de la muñeca .....	26
2.5.1. Fractura de muñeca .....	27
2.6. Ortesis de miembros superiores .....	29
2.6.1. Ortesis estáticas .....	30

	5
2.6.2. Ortesis dinámicas .....	31
3. METODOLOGÍA .....	32
3.1. Escaneado 3D .....	34
3.2. Meshmixer.....	36
3.3. Diseño CAD .....	39
3.4. Simulación.....	47
3.5. Impresión 3D.....	50
4. RESULTADOS .....	52
4.1 Primeros prototipos .....	52
4.2. Optimización topológica. ....	54
4.3. Análisis de elementos finitos .....	58
4.4. Impresión 3D.....	63
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	67
6. REFERENCIAS.....	68
ANEXOS .....	72

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros de impresión.....	50
Tabla 2. Puntuaciones encuesta .....	66

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de impresión 3D.....	7
Figura 2. Diferencia entre STL y CAD.....	8
Figura 3. Modelo de capas.....	9
Figura 4. Impresión de estereolitografía.....	10
Figura 5. Impresión FDM.....	13
Figura 6. Pieza sin soportes.....	14
Figura 7. Propiedades del PLA.....	15
Figura 8. Proceso de digitalización de un objeto.....	17
Figura 9. Tecnología de luz estructurada.....	20
Figura 10. Tecnología de triangulación.....	22
Figura 11. Modelo 3D por fotogrametría.....	23
Figura 12. Optimización topológica de un diseño.....	26
Figura 13. Componentes de la articulación de la muñeca.....	27
Figura 14. Férula de yeso.....	30
Figura 15. Ortesis dinámica.....	31
Figura 16. Diagrama de flujo metodología.....	32
Figura 17. Marcado de la zona de escaneo.....	35
Figura 18. Resultado de escaneo 3D.....	35
Figura 19. Modelo 3D exportado en meshmixer.....	36
Figura 20. Modelo 3D recortado.....	37
Figura 21. Reparación del modelo 3D.....	38

Figura 22. Inconsistencia en el modelo 3D.....	38
Figura 23. Modelo 3D utilizable para diseño .....	39
Figura 24. Archivo STL en fusion 360.....	40
Figura 25. Contornos .....	41
Figura 26. Contorno que permite dibujar la geometría de la mano .....	42
Figura 27. Partes de malla obtenidos de los contornos.....	43
Figura 28. Unión de las partes de la malla.....	44
Figura 29. Offset a la malla generada .....	45
Figura 30. Malla completamente definida .....	45
Figura 31. Diseño cierre circular. ....	46
Figura 32. Bloqueo del cierre circular .....	47
Figura 33. Restricción en la férula.....	48
Figura 34. Fuerzas aplicadas a la férula.....	49
Figura 35. Pieza en el software rebanador .....	51
Figura 36. Prototipos impresos .....	52
Figura 37. Parámetros de optimización .....	55
Figura 38. Topología optimizada.....	56
Figura 39. Férula optimizada .....	57
Figura 40. Calidad de la malla .....	59
Figura 41. Relación de aspecto .....	60
Figura 42. Skewness .....	61
Figura 43. Valores de Skewness .....	61
Figura 44. Esfuerzos de Von Misses .....	62
Figura 45. Férula optimizada impresa .....	64



## GLOSARIO

ANSYS: Está desarrollado para funcionar bajo la teoría de elemento finito para estructuras y volúmenes finitos

Biocompatible: Que es compatible con el organismo humano

CAD: *computer-aided design*, Diseño por computadora

Diseño CAD: uso de programas de ordenador para crear, modificar, analizar y documentar representaciones gráficas bidimensionales o tridimensionales

Escayola: vendaje duro que impide que se mueva una parte del cuerpo para que se pueda curar.

Esfuerzos de von Mises: es una magnitud física proporcional a la energía de distorsión

FDM: *Fused Deposition Modeling*, Modelado por deposición fundida.

Férula: dispositivo o estructura de metal, madera, yeso, cartón, tela o termoplástico que se aplica con fines generalmente terapéuticos

Filamento: Material en forma de hilo muy fino.

Infill: Relleno de una pieza de impresión 3D. Podemos ajustar su patrón y densidad

Lesión: alteración o daño que se produce en alguna parte del cuerpo a causa de un golpe

Modelado 3D: proceso de desarrollo de una representación matemática de cualquier objeto tridimensional a través de un software especializado

Ortesis: Dispositivo de apoyo para modificar aspectos de función o estructura del cuerpo

PLA: ácido poliláctico

Polímero: unión de un gran número de moléculas de bajo peso molecular, denominadas monómeros. Los plásticos son ejemplo de polímeros

Raft: técnica para evitar el despegado de las piezas, consiste en crear una superficie debajo de la pieza para que quede adherida a la base y, en caso de existir un problema, sea ésta la que lo sufra y no se altere el objeto

Relleno: Es el material que ocupa el interior de las piezas impresas en 3D. Según el porcentaje de relleno que se defina desde el software, una pieza podrá ser hueca o maciza.

Skewness: indicadores que permiten establecer el grado de simetría que presenta una distribución.

Simulación CAD: técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital

Soportes: En inglés se les dice “supports”. En impresoras 3D por FDM, son estructuras que se crean para servir de soporte en ciertos lugares de la pieza que se está imprimiendo para evitar que se desmorone el plástico fundido cuando se deposita

STL: *STereoLithography*, formato de transmisión de datos.

## RESUMEN

Las fracturas de miembro superior, específicamente las de muñeca, han sido un problema demandante representando un 70% de las lesiones. El tratamiento más común es el uso de un yeso o escayola, el cual que se elabora a medida. Este tratamiento es fiable, sencillo y económico, pero presenta varios inconvenientes o desventajas como son: su peso, la pérdida de masa muscular, entre otras. Para mejorar y prevenir las anteriores limitaciones del tratamiento, se planteó realizar una férula fabricada mediante impresión 3D.

Inicialmente se determinaron los requerimientos de diseño mediante encuestas a las personas de la organización Humanos3D. Posteriormente se utilizó escaneado 3D y software CAD con el fin de obtener un diseño inicial a la medida del usuario. Posteriormente se llevó a cabo un estudio de optimización topológica acompañado de modelado por elementos finitos, con lo cual se logró disminuir el peso de la férula al tiempo que se mantuvieron los requisitos de resistencia mecánica del diseño. Finalmente, se fabricó en impresión 3D la férula y se evaluó su funcionalidad en el usuario.

**Palabras clave:** Férula, Escáner 3D, Diseño CAD, Impresión 3D, Optimización Topológica

## **ABSTRACT**

Upper limb fractures, specifically wrist fractures, have been a demanding problem accounting for 70% of injuries. The most common treatment is the use of a plaster or cast, which is made to measure. This treatment is reliable, simple and economical, but it has several drawbacks or disadvantages such as: its weight, the loss of muscle mass, among others. To improve and prevent the previous limitations of treatment, it was proposed to make a splint manufactured by 3D printing.

Initially, the design requirements were determined through surveys of people in the organization Humanos3D. Subsequently, 3D scanning and CAD software were used in order to obtain an initial design tailored to the user. Subsequently, a topological optimization study was carried out accompanied by finite element modeling, which allowed the weight of the splint to be reduced while maintaining the mechanical strength requirements of the design. Finally, the splint was manufactured in 3D printing and its functionality was evaluated in the user.

**Keywords:** Cast, 3D scanner, CAD design, 3D print, Topological optimization

## 1. INTRODUCCIÓN

Con el crecimiento poblacional se ha visto un incremento de lesiones y los accidentes con traumas, En 1990 el 15% de los problemas de salud en el mundo correspondían a los traumatismos, ahora la Organización Mundial de la Salud (OMS) advierte que esta cifra para el año 2020 aumentara hasta el 20% (Gosselin et al., 2009), en Colombia para este mismo año los lesionados en accidentes automovilísticos son aproximadamente 1361(Adriana Cristina Zapata Guzman, Marcela Quintero Ospina, Diego Alexis Zapata Rivera, Laura Isaza Morales, n.d.), aunque no todas estas lesiones requieren de hospitalización o rehabilitación con diferentes tipos de ortesis, es evidente que en este tipo de accidentes alguna parte del cuerpo resulte afectada y requiera de un tratamiento más específico, el cual, depende de la severidad de la lesión (fractura abierta, completa, en varias partes del hueso, fisura), el lugar en el cual se encuentra la misma. Un ejemplo es que no se puede tratar una fractura de cráneo como una fractura de dedo o de brazo, así con las demás lesiones.

Generalmente los traumas más comunes son las fracturas de diferentes huesos del cuerpo; todas estas lesiones deben ser tratadas y corregidas a tiempo para no generar aún más daño al paciente, usualmente estas fractura o traumas son tratadas con una ortesis de yeso más conocida como escayola, el cual un dispositivo bastante eficiente para el tratamiento de la lesión. A pesar de esto, la ortesis tiene algunas desventajas o inconvenientes al momento de usarlas algunas de estas desventajas son por ejemplo (Herrera Gil, 2019, p. 13):

- Son pesados, lo cual genera un peso adicional haciéndola poco maniobrable e incómoda
- Al ser más gruesa, no se adapta bien a las prendas de vestir
- No se pueden mojar porque no son sumergibles, lo cual le impide al paciente nadar, o incluso bañarse tranquilamente, esto puede conllevar un problema de higiene
- No son cómodas, lo cual hace que el paciente no pueda realizar algunas actividades básicas

Por todo lo mencionado anteriormente los servicios de salud se han visto en la necesidad de innovar y desarrollar nuevos modelos de estas ortesis, ya sea fabricándolas en otro material que no sea yeso, reduciendo el tamaño o incluso para que se vea mejor añadiéndole diseños personalizados.

Con la ayuda de la tecnología de impresión 3D, escáneres y softwares de diseño CAD es posible diseñar, desarrollar y fabricar férulas personalizadas con materiales mucho más livianos y perfectamente adaptable al miembro que ha sido afectado, algunas de las ventajas de estas modificaciones son:

- Se mejora la calidad de vida del paciente en el tiempo que dura la rehabilitación.

- Proporcionaría más independencia al permitirle realizar más actividades.
- Se reduce el peso adicional sobre el brazo al estar fabricadas en un material más liviano.

El propósito de este proyecto está basado en la utilización de estas dos tecnologías, el escaneo 3D y la impresión 3D, todo esto para poder fabricar una férula totalmente personalizada, es decir combinando la medicina con los avances tecnológicos que proporciona la ingeniería, esto permitirá a los pacientes contar con ortesis mucho más prácticas, económicas, adaptables y reduciendo la mayoría de los inconvenientes que traen las férulas de yeso permitiendo ampliar el panorama que actualmente tiene Humano3D, dándole la posibilidad de ayudar a otro tipo de población y no solo limitarse a beneficiarios con amputaciones de miembro superior sino también a población que se encuentren en un proceso de rehabilitación, obteniendo los mismos o incluso mejores resultados al momento de generar la rehabilitación del miembro donde se encuentra la fractura.

### **1.1. Planteamiento del problema**

Las fracturas de miembro superior, específicamente las de muñeca han sido un problema recurrente en los centros de asistencia y hospitales de todo el mundo, representando el 70% de las fracturas de miembro superior, en la actualidad 1 de entre 500 personas sufren de este tipo de lesión (Medina et al., 2016) la cual debe ser tratada en el menor tiempo posible con

algún dispositivo de inmovilización como una escayola hecha de yeso en los casos más leves y cirugía en los casos con una fractura más grave y compleja, las escayolas a lo largo de la historia han sido los dispositivos que comúnmente se utilizan para la rehabilitación de la fractura, a pesar de los resultados positivos que muestra durante el periodo de inmovilización, también genera una serie de inconvenientes y molestias para el usuario, el problema más visible es la pérdida de masa muscular por una inmovilización prolongada sin algún tipo de terapia, la cual no se puede realizar debido a que el dispositivo no se puede quitar sin romperlo, también genera molestias como picazón e irritación de la zona inmovilizada debido al material con la que está fabricada, por todo esto y conforme avanza la tecnología los investigadores han estudiado el desarrollo de un dispositivo que tenga la misma eficacia que una férula de yeso disminuyendo o eliminando por completo los inconvenientes que este acarrea (Buonamici et al., 2018)

En la actualidad aprovechando el avance de la tecnología de impresión 3D así mismo como el escaneo 3D en diversos países se están desarrollando un tipo de férulas por medio de software CAD se realiza el diseño que con diferentes análisis puede ser optimizado y posteriormente impreso con un material mucho más liviano al yeso como los termoplásticos, además al ser de este material el dispositivo puede diseñarse de manera que pueda ser retirado en cualquier momento y valerse a poner sin ningún tipo de inconveniente, esto es necesario si el medico requiere hacer un diagnóstico del avance de la lesión o realizar algún tipo de terapia, también al ser de plástico es totalmente sumergible en agua sin perder sus características estructurales proporcionando cierta independencia al usuario del dispositivo, incluso modelos más avanzados vienen un con sistema de electroestimulación para evitar la



pérdida de masa muscular por el tiempo de inmovilización, gracias a todas estas características esta parece ser una solución bastante viable a los inconvenientes ocasionados por la utilización de yeso para la fabricación de las férulas al tener un dispositivo que realiza su función de forma eficaz sin ocasionar otro tipo de molestias (Herrera Gil, 2019).

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Diseñar, desarrollar y fabricar férulas personalizadas en impresión 3D para el tratamiento de fracturas, proporcionándole a Humanos3D la posibilidad de ayudar a personas no amputadas.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

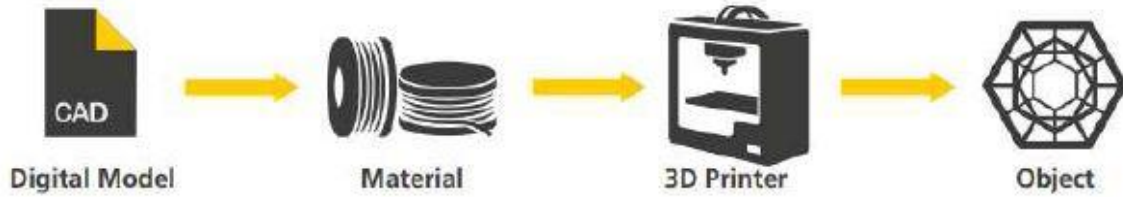
- Determinar los diferentes requerimientos de las férulas de muñeca y brazo, mediante un escáner 3D.
- Diseñar las férulas mediante el software CAD
- Evaluar a través de elementos finitos los esfuerzos del dispositivo diseñado.

- Precisar los tiempos, posiciones y ajustes de impresión que optimicen la fabricación de las férulas.
- Fabricar las férulas mediante la técnica de impresión 3D y evaluar cualitativamente su funcionalidad.

## **2. MARCO TEORICO**

### **2.1. Impresión 3D**

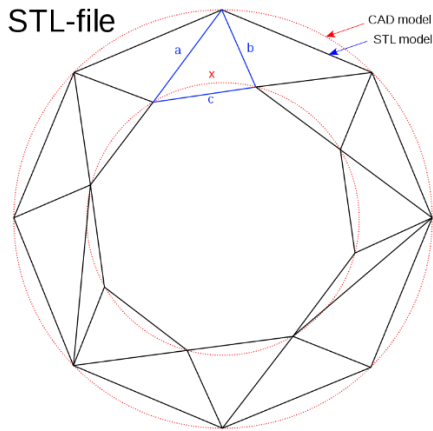
La impresión 3D es una tecnología basada en la unión o adición de materiales mediante capas sucesivas para crear objetos tridimensionales todo esto partiendo de modelos digitales de los mismos, para realizar la adición del material generalmente se usan impresoras 3D las cuales trabajan con distintos tipos de plásticos, todo este proceso se encuentra expresado en la figura 1, las impresoras 3D son más baratas, rápidas y sencillas de utilizar que cualquier otra tecnología de construcción adición ofreciendo la posibilidad de tener piezas y montajes complejos fabricados con diferentes materiales y propiedades mecánicas (Andrade, 2019, p. 13); (Fuentes Bordallo, 2017, p. 4)



*Figura 1. Proceso de impresión 3D*

*(Heutger, 2016, p. 5).*

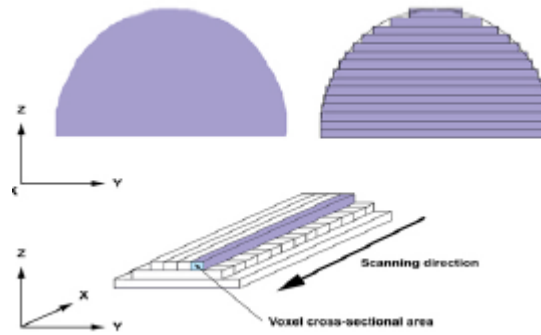
La impresión 3D se remonta al año 1976 cuando se inventa la primera impresora por inyección de tinta o comúnmente conocidas como impresoras 2D las cuales son las precursoras de las impresoras por inyección de material o impresoras 3D, en 1984 Chuck Hull desarrolla un sistema que permite fabricar objetos tridimensionales a través del proceso de estereolitografía (SLA) el cual básicamente es adición de capas mediante el curado de polímeros que reaccionan a la luz ultravioleta cuyo archivo digital se encontraba en formato STL (Standard Tessellation Language) (Herrera Gil, 2019, p. 42), los archivos STL solo especifica la geometría de la superficie del modelo tridimensional es decir no posee ninguna representación de color o textura o diferentes características las cuales son propias de un modelo CAD, en la figura 2 se observa de forma más precisa esta diferencia (Noguera, 2014, p. 5)



*Figura 2. Diferencia entre STL y CAD*  
(Noguera, 2014, p. 5)

### **2.1.1. Procesamiento**

Las impresoras 3D imprimen en capas sucesivas de material, por esto antes de imprimir cualquier modelo 3D a partir de un archivo STL este debe ser primero procesado en un software denominado recortadora o slicer el cual convierte el formato STL en un modelo de capas sucesivas generando un archivo G-code que contiene las instrucciones para una impresora en específico, la impresora sigue dichas instrucciones para depositar el material en capas sucesivas, esta técnica permite crear casi cualquier forma o característica geométrica (Noguera, 2014, p. 6), el proceso de añadido de capas se observa en la figura 3.



*Figura 3. Modelo de capas*

*(Noguera, 2014, p. 6)*

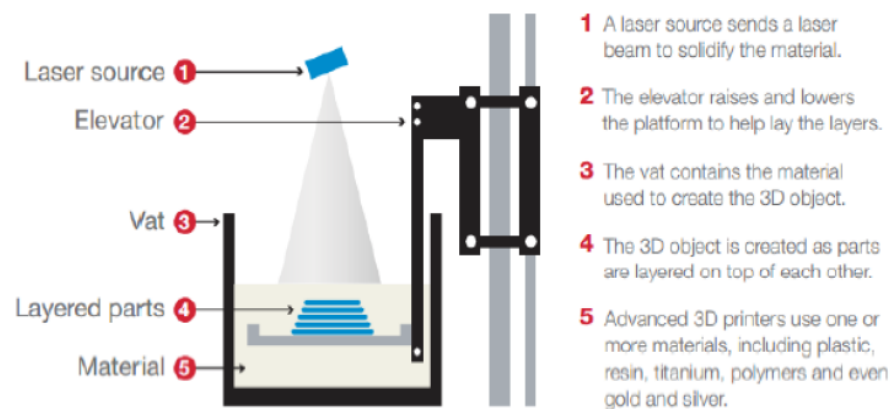
La resolución de la impresora permite determinar el espesor de la capa, generalmente las capas de una impresión miden 100 micras, aunque algunos dispositivos más avanzados y con mucha más tecnología permiten capas con un espesor de 16 micras lo cual permite una mejor definición de la pieza impresa (Noguera, 2014, p. 6).

### **2.1.2. Tecnologías de impresión 3D**

Actualmente existen diversos métodos o tecnologías que permiten realizar una impresión 3D, las cuales son:

### 2.1.2.1. Fotopolimerización

Esta tecnología de impresión 3D es la más antigua que se conoce, está basada en el curado de capas sucesivas, los métodos más usados para este tipo de impresión son la estereolitografía (SLA), en la figura 4 todo este proceso se encuentra de manera detallada, fotopolimerización por luz ultravioleta (DLP) y fotopolimerización por absorción de fotones, esta tecnología es usada cuando se necesita una gran cantidad de detalles en la pieza impresa es decir que la pieza sea lo más fiel posible al diseño, una aplicación de la fotopolimerización es la joyería donde se necesita un alto nivel de detalle y estética(Herrera Gil, 2019, p. 46).



*Figura 4. Impresión de estereolitografía*

*(Zapata Martínez, 2018, p. 25)*

### 2.1.2.2. Fusión de lecho en polvo

La fusión de lecho en polvo consiste básicamente en una capa de polvo del material del cual se va a imprimir el objeto se expone a una fuente de energía térmica la cual funde capa por capa hasta conseguir el objeto impreso, existen 5 tipos de métodos para fabricar objetos por fusión de lecho en polvo las cuales son, fusión por haz de electrones, sinterización selectiva por calor, sinterización selectiva por láser, fusión selectiva por láser y sinterización de metal directa por láser, algunas aplicaciones de esta tecnología de impresión 3D se remontan a la industria automovilística y la aeroespacial, donde se requiere un alto rendimiento (Herrera Gil, 2019, p. 46)

#### ***2.1.2.3. Inyección de aglutinante***

Esta técnica consiste fundamentalmente en pulverizar aglutinantes líquidos o de naturaleza resinosa sobre un lecho de polvo que posteriormente se solidifican en sección transversal, cada capa del objeto se imprime de manera similar a como lo hacen las impresoras tradicionales por inyección de tinta con la diferencia de que cada capa de aglutinante se imprime sobre un lecho de polvo, para esta tecnología se resaltan dos métodos los cuales son, cama de polvo y tinta e impresión 3D basada en yeso, sus aplicaciones más comunes se encuentran en el campo del prototipado rápido y los materiales más usados son resinas, cristal, metal, ceras entre otros (Herrera Gil, 2019, p. 47).

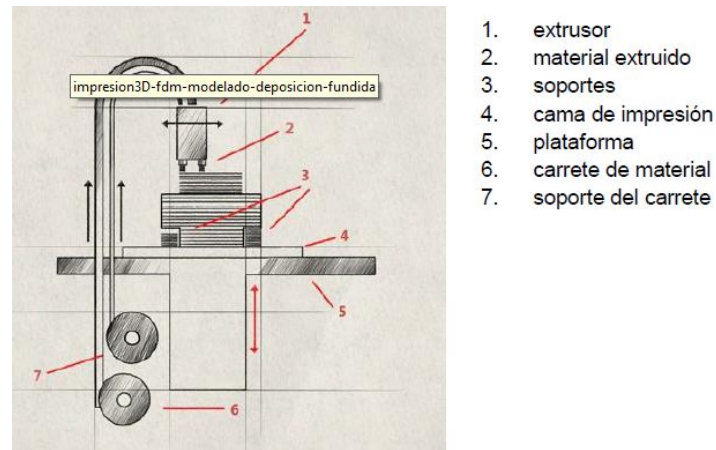
#### ***2.1.2.4. Inyección de material.***

La inyección de material consiste en un cabezal de impresión, el cual tiene un movimiento inyectando un polímero reactivo a la luz el cual va formando diferentes capas, entre las aplicaciones más comunes de esta tecnología se destaca la creación de maquetas de alta precisión las cuales se necesitan en diferentes industrias, por ejemplo, la industria odontológica y joyería (Herrera Gil, 2019, p. 48).

#### ***2.1.2.5. Extrusión FDM.***

El modelado por deposición fundida o FDM por sus siglas en inglés es una técnica por la cual una bobina de filamento abastece un extrusor, este dispositivo funde el material por encima de la temperatura de fusión haciéndolo semilíquido para poder extruirlo a través de una boquilla la cual puede ser de diferente diámetro, la cual deposita el material sobre las otras capas frías, el extrusor tiene la capacidad de desplazarse en las tres direcciones para depositar el material de acuerdo a la geometría del modelo 3D (Herrera Gil, 2019, p. 49), en la figura 5 se tienen todos los implementos necesarios para realizar la extrusión FDM.



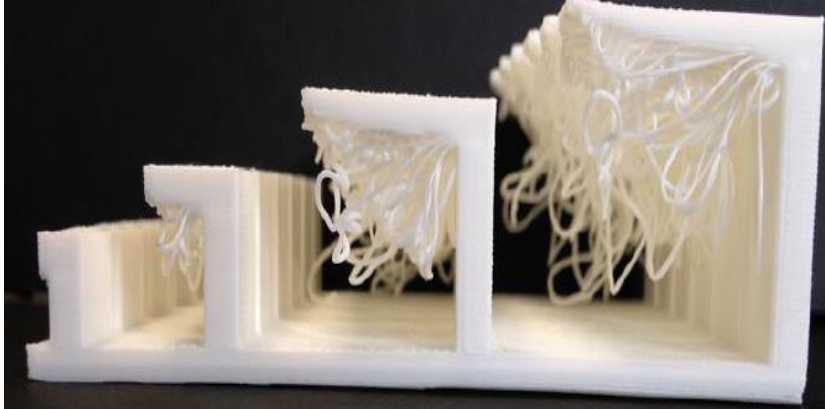


1. extrusor
2. material extruido
3. soportes
4. cama de impresión
5. plataforma
6. carrete de material
7. soporte del carrete

*Figura 5. Impresión FDM*

*(Herrera Gil, 2019, p. 50)*

En esta tecnología de impresión existe un concepto importante llamado soportes, al ser una técnica que extruye el material fundido sobre la capa anterior más fría, cuando se imprime un objeto en voladizo la capa que se extruye no tiene donde depositarse lo cual hace que el material extruido se solidifique de forma irregular produciendo fallos en la pieza como los que se observan en la figura 6, debido a esto es necesario la colocación de soportes cuando se imprime en voladizo, la única función de estos soportes es que se deposite material sobre estos y evitar que la parte en voladizo se solidifique en el aire.



*Figura 6. Pieza sin soportes  
(Ortega Lázaro, 2019, p. 45)*

### **2.1.3. Materiales en impresión 3D**

Existen una gran variedad de materiales para utilizar en la impresión 3D, los más usados en la actualidad en diversas aplicaciones son:

#### **2.1.3.1. ABS.**

El acrilonitrilo butadieno estireno es un material termoplástico con buenas propiedades mecánicas donde el acrilonitrilo le da dureza ante altas temperaturas y el butadieno le provee una resistencia al impacto, su deformación es mínima, su temperatura de impresión se encuentra en el rango de 230-245 °C, una vez impreso no puede exponerse a más de 85°C además no puede estar en contacto con alimentos (Mejia, 2014).

### 2.1.3.2. PLA.

El ácido polilactico es un termoplástico de origen natural y biodegradable, tiene buena resistencia a la tracción además de una buena calidad superficial, es el material más utilizado para la impresión 3D para prototipado porque es fácil de usar y su bajo costo, su temperatura de impresión se encuentra entre 190-200 °C (Mejia, 2014), no puede ser expuesto a más de 50°C (Herrera Gil, 2019), todas sus especificaciones de resistencia están expresados en la figura 7.

PLA - PROPIEDADES FÍSICAS		
DESCRIPTION	TEST METHOD	TYPICAL VALUE
SPECIFIC GRAVITY	ASTM D1505	1,24 G / CC
MFI	-	6,0 G / 10 MIN
TENSILE STRENGHT	ASTM D882	110 MPA -145 MPA
ELONGATION AT BREAK	ASTM D882	160% - 100%
TENSILE MODULUS	ASTM D882	3310 MPA - 3860 MPA
IMPACT STRENGTH	-	7,5 KJ / M

*Figura 7. Propiedades del PLA  
(Zapata Martínez, 2018, p. 34)*

### **2.1.3.3. PVA.**

El alcohol polivinilico es un material soluble en agua el cual suele utilizarse como material de soporte por su buena adherencia con el PLA y el nylon, además permite que al sumergir la pieza en agua los soportes se disuelvan y la pieza no presente imperfecciones, por esto es utilizado en impresoras con doble extrusión (Herrera Gil, 2019).

### **2.1.3.4. Ninjaflex.**

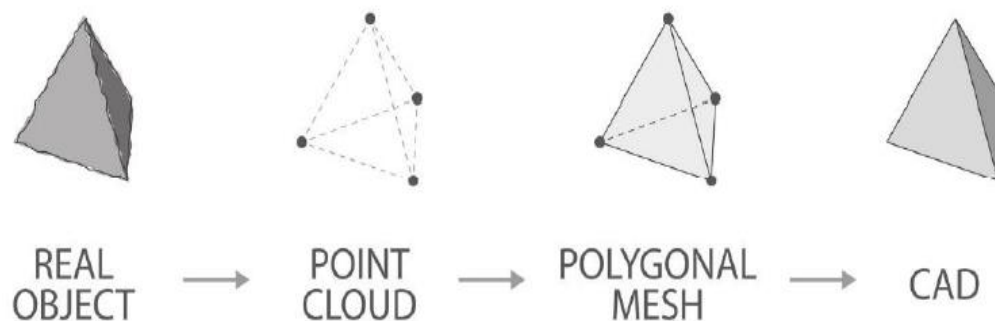
Es un elastómero con el cual se puede imprimir partes o piezas con buena flexibilidad, consistencia y dureza la temperatura de impresión se encuentra en 215°C (Mejia, 2014).

### **2.1.3.5. FC.**

La fibra de carbono es un material constituido por una cantidad de fibras con un diámetro de entre 5-10 micras, la fibra de carbono cuenta con una alta flexibilidad, excelente resistencia, bajo peso y tolerancia a las altas temperaturas, sus aplicaciones se encuentran en la industria aeroespacial, deportes de motor y aplicaciones militares (Zapata Martínez, 2018, p. 37).

## 2.2. Escaneado 3D

Un escáner 3D es un dispositivo el cual permite la digitalización de un objeto físico pudiendo capturar su geometría y en algunas situaciones hasta su textura y crear un modelo tridimensional de él, este modelo se obtiene a través de una nube de puntos los cuales son situados en el espacio que posteriormente se unen generando una malla la cual representa la geometría del objeto, posteriormente esta malla se puede manipular a través de un software CAD, todos estos pasos se encuentran plasmados de forma más visual en la figura 8, para poder obtener esta nube de puntos es necesario definir un sistema esférico de coordenadas donde el origen se considera en el escáner y cada punto tiene una coordenada  $\varphi$  y  $\theta$  además de una distancia  $r$ , dependiendo de la geometría del objeto puede ser necesario varios análisis y posteriormente agruparlos, este proceso se conoce como alineación (Ortega Lázaro, 2019).



*Figura 8. Proceso de digitalización de un objeto*

(Ortega Lázaro, 2019, p. 3)

### **2.2.1. Tipos de escáner 3D**

En la actualidad existen una gran variedad de dispositivos de escaneo los cuales se dividen en dos grandes grupos, estos son: escáneres 3D de contacto y escáneres 3D sin contacto.

#### ***2.2.1.1. De contacto con el objeto.***

Los escáneres con contacto cuentan con un dispositivo denominado comúnmente como palpador el cual permite tener contacto físico con el objeto que se va a escanear, estos palpadores suelen tener cabezal de acero, zafiro o rubí el cual les permite aumentar su precisión, la digitalización se crea presionando con el palpador, el cual gracias a los sensores internos que posee permite establecer las coordenadas XYZ del objeto, la principal desventaja de este tipo de escáneres radica en que requieren contacto directo con el objeto y ejercer presión, este contacto puede dañar o modificar la superficie lo cual lo hace imposible de utilizar en objetos con gran valor histórico e incluso el cuerpo humano (Herrera Gil, 2019, p. 17)

### ***2.2.1.2. Sin contacto con el objeto.***

Este tipo de escáneres como su nombre lo indica no requieren de ningún contacto con el objeto, a su vez este tipo de escáneres se dividen en dos grupos, activos y pasivos.

#### *2.2.1.2.1. Escáneres activos.*

Los escáneres activos funcionan emitiendo una onda la cual es dirigida al objeto el cual refleja la onda, y su retorno es analizado por los sensores del sistema, luego de terminado el escaneo el resultado se envía al software correspondiente para obtener la nube de puntos y posteriormente la reconstrucción del objeto en un modelo digital 3D (Ortega Lázaro, 2019, p. 6), los escáneres activos tienen diversas formas de trabajar, algunas de estas son:

##### *2.2.1.2.1.1. Luz estructurada.*

Como se observa en la figura 9 la tecnología de luz estructurada está basada en la deformación que tiene un patrón de luz al ser proyectada sobre el objeto, esta tecnología hace uso de una cámara digital con un leve desvío que permite el reconocimiento del objeto y usando un procesamiento similar a la triangulación permite encontrar eficientemente la distancia de cada punto del objeto, existen múltiples técnicas para utilizar la tecnología de luz estructurada pero la más rápida es la proyección de un patrón de rejilla el cual produce una

deformación del patrón sobre el objeto que se registra gracias a la cámara, para poder obtener un escaneado completo del objeto es necesario realizar un barrido por todo el objeto (Herrera Gil, 2019, p. 19).

La gran ventaja de esta tecnología es poder escanear múltiples puntos al mismo tiempo o un campo de visión completo, lo cual permite disminuir o eliminar de manera permanente el problema de la deformación ocasionada por el movimiento, pero la desventaja más grande que poseen es que su eficacia en el escaneo de superficies reflectantes y transparentes es pobre y produce resultados de digitalización erróneos (Ortega Lázaro, 2019, p. 12).

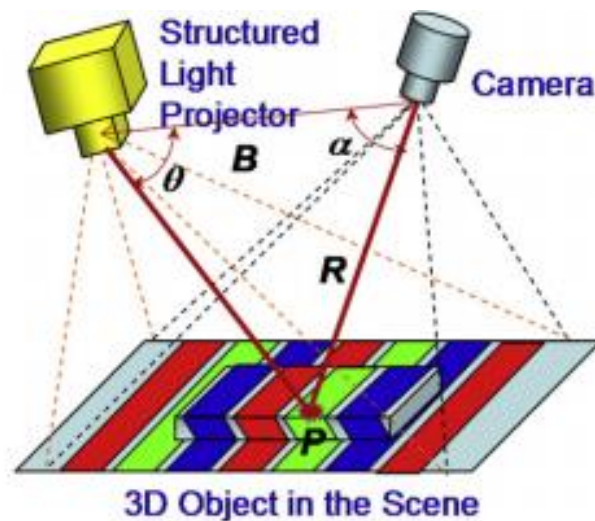


Figura 9. Tecnología de luz estructurada

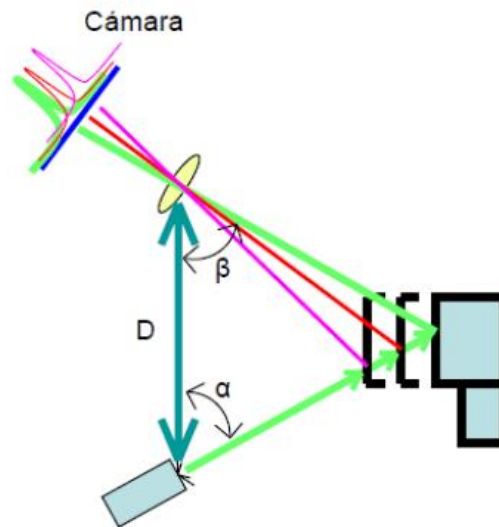
(Geng, 2011)



#### 2.2.1.2.1.2. *Triangulación.*

La triangulación está basada en la emisión de una luz láser la cual incide sobre el objeto que se va a escanear, una cámara es la encargada de buscar la ubicación de la luz del láser que es reflejada por el objeto (Herrera Gil, 2019, p. 18)

La tecnología lleva como nombre triangulación porque el dispositivo emisor del rayo láser, la cámara y el objeto forman un triángulo como se observa en la figura 10 en donde la distancia ( $D$ ) entre la cámara y el dispositivo emisor de laser es conocida, el ángulo beta que forma el láser también es conocido, el ángulo alfa que se forma con la cámara puede determinarse encontrando la ubicación del láser en la cámara, con estas variables conocidas el escáner puede determinar las demás dimensiones del triángulo teniendo la distancia de los puntos y por tanto la nube de puntos del modelo digital 3D (Herrera Gil, 2019, p. 18), este tipo de tecnología es de alta precisión pero debe usarse en distancias cortas, además no puede escanear objetos que se encuentren visibles para la cámara y el láser simultáneamente (Ortega Lázaro, 2019, p. 8)



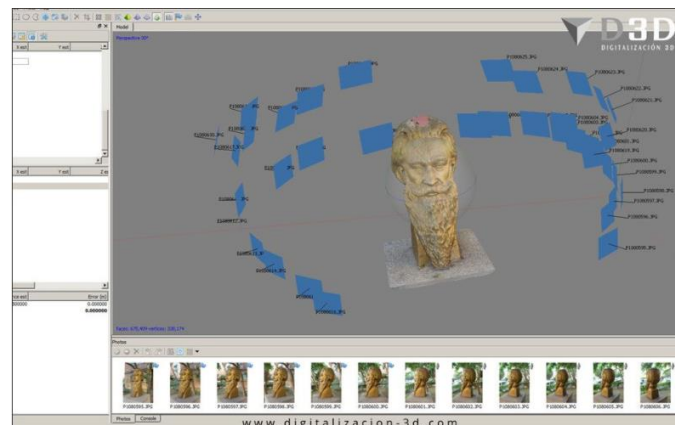
*Figura 10. Tecnología de triangulación  
(Ortega Lázaro, 2019)*

#### *2.2.1.2.2. Escáneres Pasivos.*

Este tipo de escáneres se conocen como pasivos porque no pueden emitir ningún tipo de radiación por sí mismos, pero detectan la luz visible al ser una radiación que se encuentra totalmente disponible, aunque también otro tipo de radiación como la infrarroja puede ser utilizada, para su funcionamiento usualmente no necesitan hardware especializado, al igual que los activos por medio de un software se obtiene la nube de puntos que genera el modelo digital del objeto (Herrera Gil, 2019, p. 20), al igual que los activos también tienen diferentes tipos, los cuales son:

### 2.2.1.2.2.1. Fotogrametría.

La fotogrametría no es necesariamente un tipo de escáner, es más bien una técnica de escaneo pasivo la cual hace uso de una cámara fotográfica, con ayuda de la cámara se obtiene el modelo digital 3D de un objeto a través de fotografías 2D, con estas fotografías se puede obtener las características geométricas del objeto, las dimensiones y su posición en el espacio (figura 11), las fotografías se pueden realizar con una cámara común como la de un smartphone o una cámara profesional pero esto afecta la precisión en la obtención de la nube de puntos que genera el modelo; las ventajas que posee esta técnica radica principalmente en lo asequible y barata que es pues no se necesita de un hardware especializado, además se puede fotografiar casi cualquier objeto aunque la iluminación puede afectar la precisión (Herrera Gil, 2019, p. 20).



*Figura 11. Modelo 3D por fotogrametría*

*Figura obtenida de la página web (G, 2015)*

#### *2.2.1.2.2. Estereoscopía.*

Esta técnica de escaneo está basada en el mismo principio de la fotogrametría, para obtener el modelo se emplean 2 cámaras separadas ligeramente observando exactamente la misma escena, luego se analizan las diferencias entre las imágenes vistas por cada una de las cámaras pudiendo encontrar la distancia de cada punto en las imágenes (Herrera Gil, 2019, p. 20).

### **2.3. Diseño asistido por computadora (CAD)**

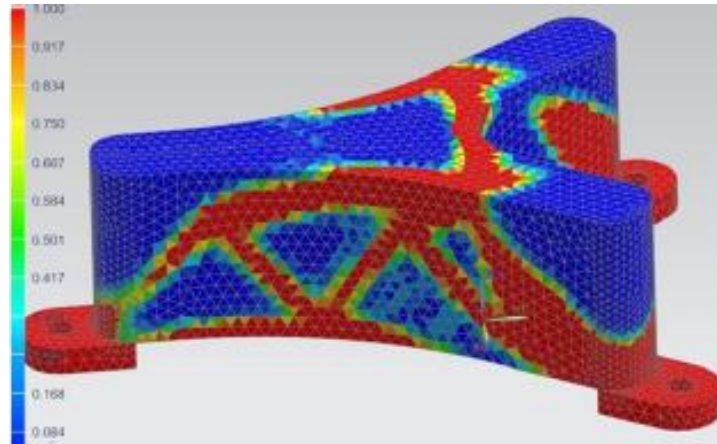
El diseño CAD consiste en utilizar softwares de computadoras para crear, modificar, representar y documentar representaciones graficas que pueden ser bidimensionales o tridimensionales obteniendo una alternativa a los diseños realizados manualmente y a los prototipos de producto, tiene una gran aplicación en el diseño industrial y la creación de productos, además de la animación por computador y efectos especiales, el diseño CAD es usado durante todas fases del proceso de ingeniería desde lo mínimo que es el diseño conceptual de productos hasta el análisis de ensambles, el software CAD le brinda herramientas al ingeniero para probar de forma interactiva las variantes del diseño disminuyendo el número de prototipos físicos lo cual permite reducir costes de desarrollo, mejorar productividad, asegurar calidad, reducir tiempo de salida al mercado, utilizar el diseño asistido por computadora le permite a los ingenieros lograr una mayor precisión reduciendo los errores, obtener una documentación sólida y sencilla del diseño incluyendo

diversas características como dimensiones, geometrías y listas de materiales, además el diseñador puede reutilizar de forma sencilla los datos de diseño (Siemens, n.d.).

#### **2.4. Optimización topológica**

Es una herramienta matemática la cual le permite al diseñador obtener un diseño óptimo a partir de una topología inicial. En la ingeniería mecánica el término topología óptima hace referencia a una pieza o parte mecánica diseñada especialmente para maximizar o minimizar alguna característica anhelada, la parte de maximizar la rigidez teniendo una restricción de volumen tiene gran importancia pues permite disminuir el peso final que tiene el objeto manteniendo sus condiciones de rigidez y funcionalidad, la optimización topológica es una técnica la cual brinda una solución al problema a través de iteraciones consecutivas las cuales maximizan o minimizan una función objetivo o de costos (Meza, 2012, pp. 12–13).

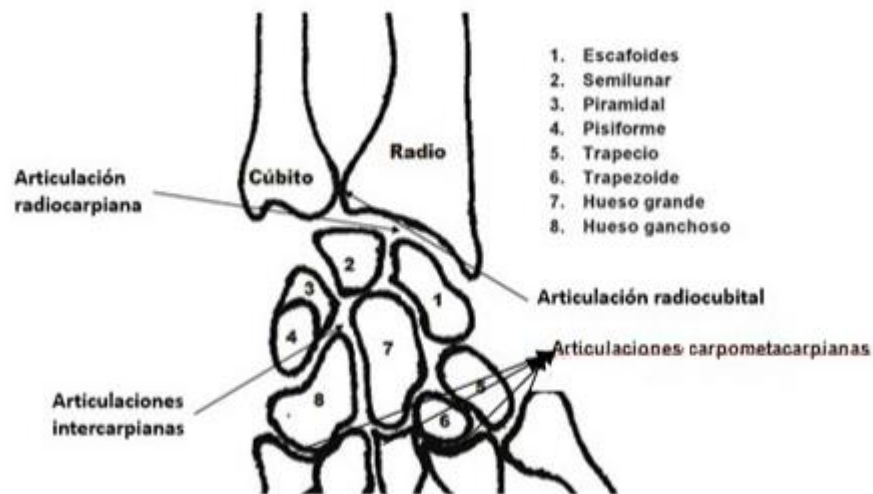
La optimización topológica mediante CAE es básicamente eliminar material que no tiene los soportes a través de un software de elementos finitos comenzando con una topología inicial para posteriormente a través del software ingresar las condiciones de carga y restricción de volumen obteniendo una solución a la observada en la figura 12, donde la parte en color rojo representa los elementos imprescindibles de la pieza y en azul las partes que no cumplen una función de soporte y que se pueden retirar de la pieza (Andrade, 2019, p. 20).



*Figura 12. Optimización topológica de un diseño  
(Andrade, 2019, p. 21)*

## **2.5. Articulación de la muñeca**

Se le denomina muñeca a toda el área anatómica que conforma la unión entre el antebrazo y la mano, esta zona de las extremidades superiores está formada por las partes distales de los huesos del antebrazo, radio, cubito y los huesos que constituyen el carpo, la figura 13 presenta toda esta área de manera más precisa, su límite se encuentra definido por el borde inferior del musculo pronador cuadrado y el limite distal de las articulaciones metacarpianas. Las características estructurales de la muñeca permiten movimientos bastante complejos en diferentes planos, además los ligamentos benefician la fijación de todo el sistema de hueso y la estabilidad de todo el complejo de la articulación (Medina et al., 2016).



*Figura 13. Componentes de la articulación de la muñeca  
(Medina et al., 2016)*

### 2.5.1. Fractura de muñeca

La movilidad y estabilidad que posee la articulación de la muñeca se ven afectadas en gran medida cuando se producen lesiones y particularmente cuando ocurren fracturas inestables que afectan la articulación radio carpiana, a su vez estas características de la articulación de la muñeca también sufren una afección en el proceso de recuperación de las fracturas, específicamente cuando hay inestabilidad o no se colocan dispositivos osteosíntesis o fijadores externos para la corrección de la fractura; dentro de este complejo articular la

fractura más recurrente es la de distal del radio afectando la articulación radiocarpiana, este tipo de fracturas se encuentran entre las más atendidas por los servicios de urgencias en todo el mundo constituyendo el 70% de las fracturas de antebrazo además suele presentarse en edades tempranas como la niñez o en la adolescencia donde la principal causa de fractura está dada por traumatismos de alta energía, es decir, a impactos que generan fuerzas más altas a la resistencia de los huesos de la articulación radiocarpiana o de las partes distales del radio (Medina et al., 2016, pp. 2–9) (Buonamici et al., 2018)

#### ***2.5.1.1. Tratamiento de fractura de muñeca.***

El tratamiento depende del tipo de fractura, severidad y complejidad y complejidad de la misma, por ejemplo las fracturas estables y no desplazadas se pueden tratar de una forma convencional, es decir, inmovilizando con una férula de yeso, a diferencia de la mayoría de fracturas que se presentan en adultos mayores que suelen tener un patrón de inestabilidad incluyendo la fragmentación de la cortical dorsal y angulación dorsal de la superficie articular, este caso se suele recurrir al tratamiento quirúrgico para proporcionarle estabilidad al complejo articular y reducir la fractura, otro tipo de tratamiento utilizado en las fracturas de muñeca es el uso de fijadores externos, estos fijadores son un dispositivo mecánico que se encuentra situado por fuera de la piel del paciente fijándose en el hueso por medio de alambres o clavos roscados proporcionando estabilidad en la fractura, los fijadores suelen ser utilizados en fracturas abiertas permitiendo el fácil manejo de las lesiones en las partes blandas al tiempo que disminuyen el riesgo de infección, fracturas intra o extraarticulares en



las que el patrón de inestabilidad y la calidad ósea no permitan ningún otro tipo de tratamiento, síndrome compartimental, pacientes con múltiples traumatismos que requieren cuidados intensivos; por todo esto es necesario identificar bien el tipo de fractura para poder utilizar el tratamiento correcto y brindar una buena recuperación de la articulación (Medina et al., 2016, pp. 13–14).

## **2.6. Ortesis de miembros superiores**

Las ortesis son elementos biomecánicos las cuales son puestos externamente con el único fin de restaurar o mejorar la funcionalidad del sistema musculo esquelético, los problemas musculo esqueléticos están asociados principalmente a los traumatismos, deporte y lesiones asociadas al trabajo, aunque frecuentemente también se utilizan en pacientes con problemas neurológicos como traumatismo craneoencefálico, parálisis cerebral y lesiones medulares y de nervios periféricos, de la igual forma en pacientes con artritis, los materiales con los que se suelen fabricar este tipo de ortesis son el yeso, termoplásticos de baja temperatura como el orthoplast o de alta temperatura como el polivinilico-PVC, el velcro también está comprendido entre los materiales usados para la fabricación de este tipo de ortesis al igual que algunos metales (Pozo Safla et al., 2020).

### 2.6.1. Ortesis estáticas

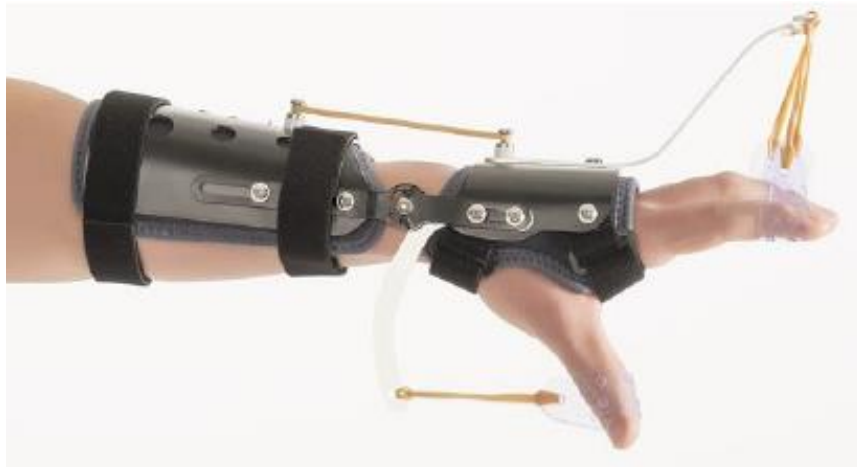
Este tipo de ortesis se conocen como posicionales ya que su principal función es la de impedir el movimiento manteniendo una misma postura durante una cantidad de tiempo y son comúnmente usadas cuando la persona ha tenido algún tipo de fractura o inflamación de tendones o de tejido blando, un ejemplo de este tipo de ortesis son las férulas de yeso (figura 14) usadas para la rehabilitación de la fractura de miembro superior (Herrera Gil, 2019, p. 32), con este tipo de ortesis se debe inmovilizar solo la articulación al cual el movimiento intenta impedirse, debido a esto debe ajustarse al contorno además de que no se debe ejercer presiones sobre prominencias óseas (Arce & Medicina De Rehabilitación, 2008, p. 2).



*Figura 14. Férula de yeso  
(de Prada Marty et al., 2008)*

### 2.6.2. Ortesis dinámicas

Las ortesis dinámicas al contrario que las estáticas permiten o facilitan el movimiento generalmente para ayudar en el movimiento de músculos debilitados, este tipo de ortesis, guían, limitan o resisten ciertos movimientos y previenen determinados movimientos, para realizar un tratamiento con este tipo de ortesis es importante conocer a detalle el movimiento que se debe asistir o resistir además de definir el límite de este movimiento, las fuentes de fuerza pueden ser internas como fuerzas musculares o externas como bandas elásticas, resortes, barras de tensión, entre otros (Arce & Medicina De Rehabilitación, 2008, p. 2), en la figura 15 se tiene el modelo de una ortesis dinámica de miembro superior.

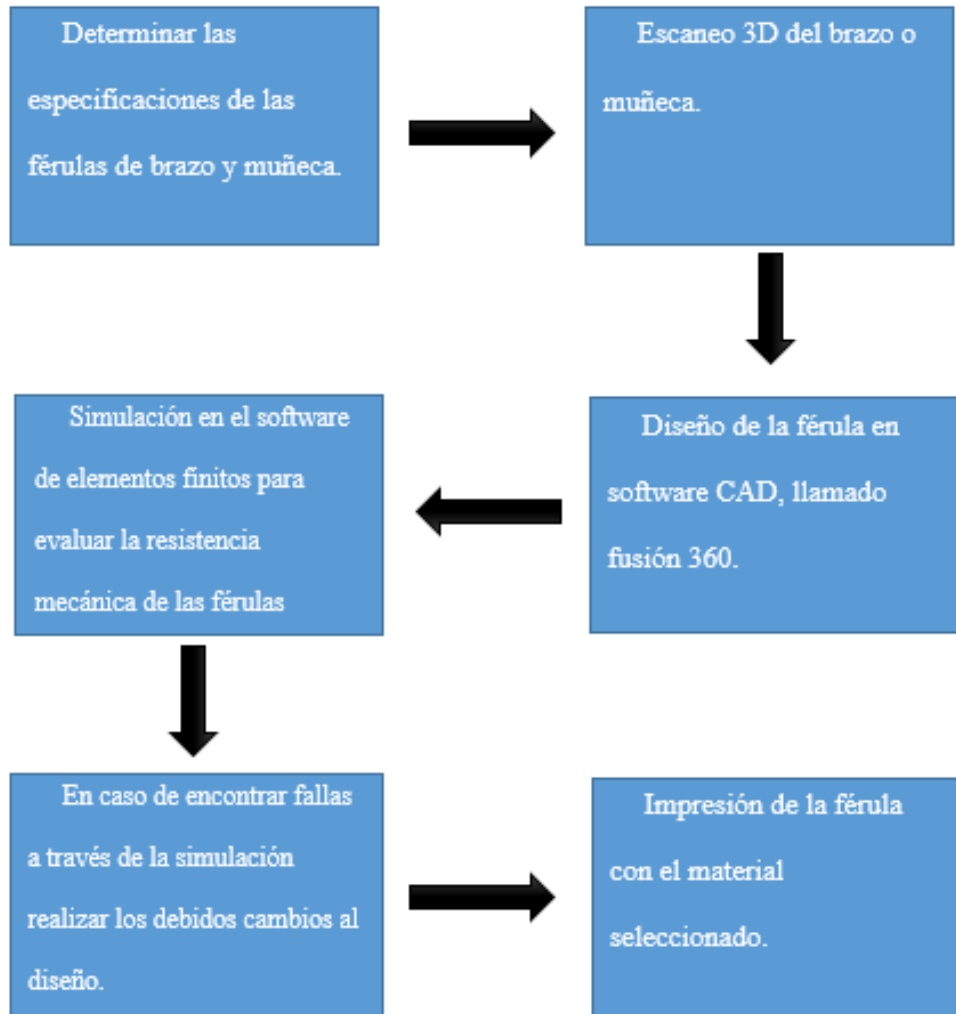


*Figura 15. Ortesis dinámica.*

*(Herrera Gil, 2019)*

### 3. METODOLOGÍA

El desarrollo del proyecto como se observa en la figura 16 se ha dividido en cinco fases:



*Figura 16. Diagrama de flujo metodología*

Antes de iniciar con todo el diseño de la ortesis se debe tener en cuenta los requisitos propuestos en la realización de la casa de calidad, lo cual va a permitir tener un dispositivo acorde a las necesidades y que sea funcional, los requisitos a tener en cuenta son:

- El peso del dispositivo no debe superar los 200 gr.
- El dispositivo debe ser cómodo, en este apartado se tienen en cuenta parámetros como, por ejemplo, que la férula se pueda mojar, que tenga una correcta adaptación a la anatomía del paciente, permitir la fácil colocación, permitir circulación de aire, es decir que tenga agujeros en su diseño.
- Debe ser impresa con un material de bajo costo y fácil acceso.
- Proporcionar una resistencia adecuada en el punto de interés.
- Estéticamente se vean atractivas.

Basado en las desventajas expuestas anteriormente sobre las férulas elaboradas con yeso, los requerimientos anteriormente expuestos se eligen acorde a mejorar o eliminar estas desventajas, es decir que el dispositivo funcione igual a uno fabricado con yeso sin tener todas las restricciones que tienen estos, además gracias a la elaboración de la matriz QFD, que permite asegurar la calidad en la creación de productos, basándose en las necesidades y exigencias de los usuarios; garantizando a su vez dispositivos adaptativos, funcionales que facilitan el desarrollo de su vida cotidiana.

### 3.1. Escaneado 3D

Para el desarrollo de la férula primeramente se debe de realizar un escaneado 3D de la zona, donde se obtendrá un modelo 3D como referencia, que facilitará la elaboración del diseño y permitirá que esta sea adaptable totalmente adaptable y personalizada.

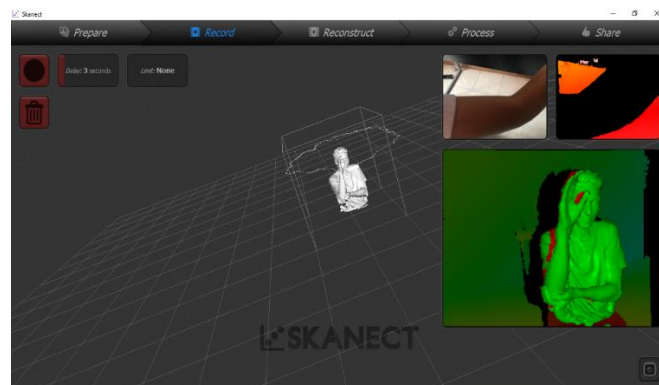
Antes de la obtención del escáner se deben de tener en cuenta ciertos parámetros, que proporcionan una buena calidad; estos parámetros son la iluminación, la distancia entre el escáner y la parte a escanear, el color de la habitación y por último la forma y color del objeto. El escáner que se empleó para la obtención del modelado es un escáner de mano, de tecnología de luz estructurada, el cual se adapta a un iPad y que junto a la aplicación STRUCTURE, permite ver las visualizaciones que el sensor captura y trasmite.

Adicionalmente a se utiliza otra aplicación llamada SKANECT la cual permite crear, perfeccionar y compartir estos modelos 3D que han sido captados por el sensor, al abrir el programa de SKANECT, este despliega una pestaña la cual indica la distancia óptima dependiendo del objeto o cuerpo que se va a escanear, en el caso del proyecto la distancia es de 1x1x1 m. Para facilitar la toma del escáner se optó por marcar la zona con la distancia requerida (figura 17) para evitar inconvenientes durante el proceso, se sugiere que esta zona tenga un camino fuera de obstáculos, además de una excelente iluminación, preferiblemente interiores que no tenga luz directa del sol.



*Figura 17. Marcado de la zona de escaneo*

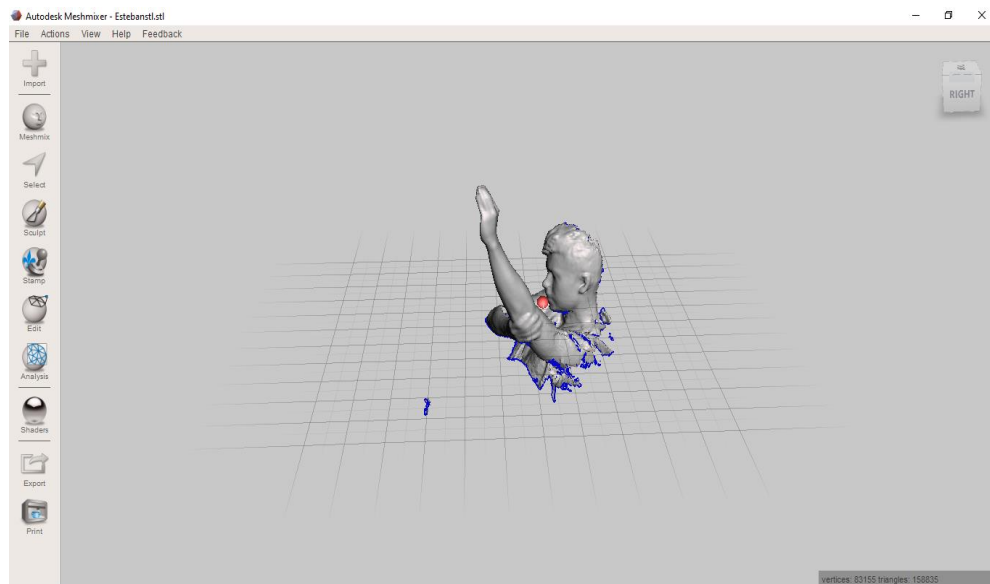
Después de realizar la toma del escáner y teniendo en cuenta los parámetros requeridos, se obtiene el siguiente modelo digital 3D (figura 18), el cual puede ser exportarlo como un archivo STL, para proceder a su procesamiento y posterior diseño.



*Figura 18. Resultado de escaneo 3D*

### 3.2. Meshmixer

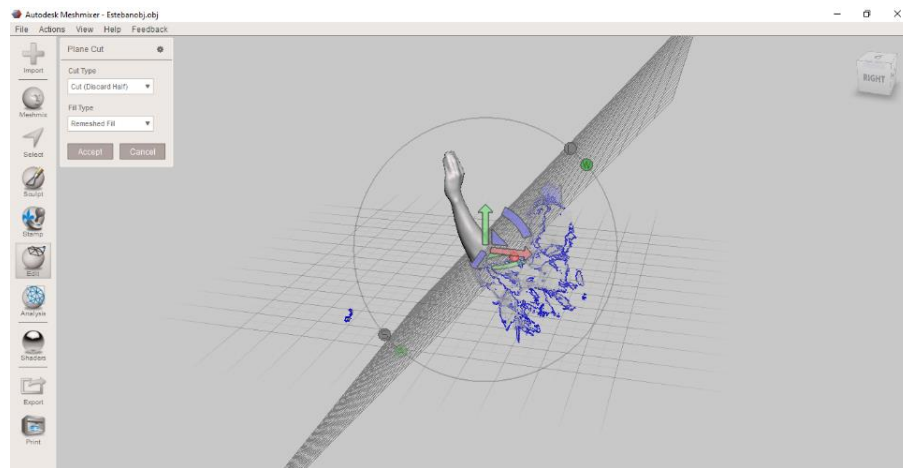
Antes de realizar el diseño 3D en un software CAD, se debe procesar el escáner obtenido y realizar ciertas correcciones al modelado 3D, para esto se emplea el Software Meshmixer, que proporciona la posibilidad de realizar modificaciones a la malla, para la revisión y corrección del escáner primero se debe importar el archivo STL al programa meshmixer, donde posteriormente se evalúa y se elimina todas aquellas partes que no son importantes para el diseño de la férula y posterior desarrollo del proyecto, en la figura 19 se presenta el modelo 3D en el software meshmixer.



*Figura 19. Modelo 3D exportado en meshmixer*

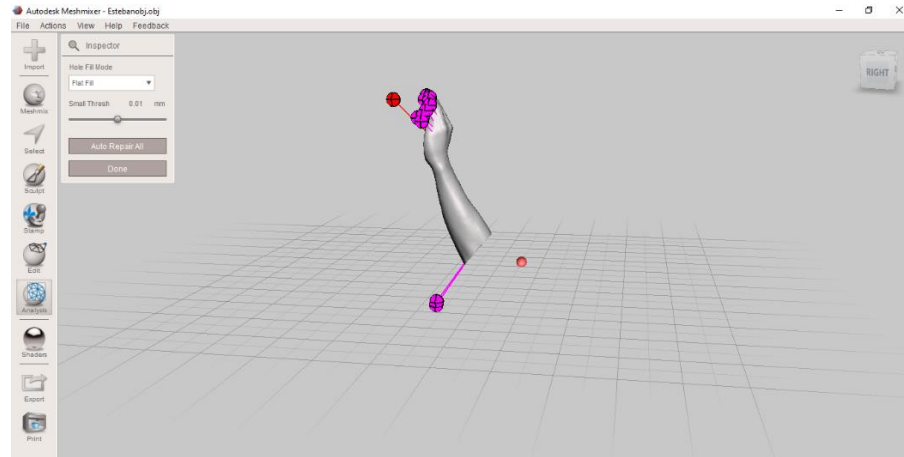


Para eliminar las partes extras del modelo 3D, se emplea la herramienta Plane Cut, Al abrir la herramienta, esta despliega un plano que permite situarlo en diferentes direcciones hasta encontrar la posición que se adapte para tener un buen corte (figura 20), existe otro método de corte que se puede emplear, en el cual se seleccionan las partes que no son interés y se presiona la tecla x, estas automáticamente se eliminaran, haciendo un proceso mucho más corto e intuitivo.



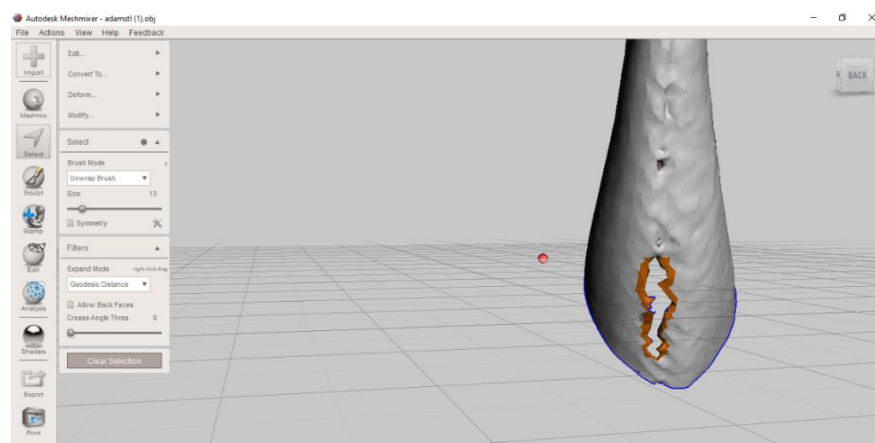
*Figura 20. Modelo 3D recortado*

Después de realizar el corte, se debe de realizar una inspección de la malla con el fin de encontrar errores e imperfecciones en ella para esto se utiliza la herramienta Inspector, que indica en que parte de la malla del modelo 3D hay fallas, esta herramienta muestra estas pequeñas fallas mediante esfera de colores (figura 21) y permite arreglarlas con solo presionarlas o seleccionando la opción Auto Repair All.



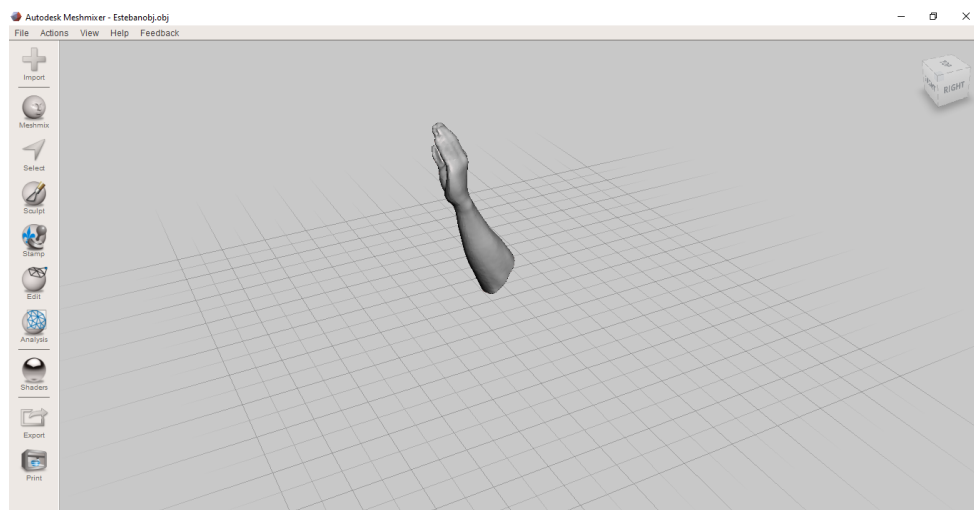
*Figura 21. Reparación del modelo 3D*

En muchas ocasiones la malla presenta fallas que la herramienta Inspector no puede reparar, las más comunes son grandes espacios que afectan el modelo como el que se advierte en la figura 22, para solucionar esto se selecciona los bordes o la zona donde se presenta el problema y se presiona la tecla F. Automáticamente se ve como se unen los puntos, solucionando el inconveniente del agujero.



*Figura 22. Inconsistencia en el modelo 3D*

El software también permite realizar un suavizado del escáner para corregir partes donde se presenten deformaciones, para esto se implementa la herramienta Brushes, que otorga la facilidad de hacer refinado o reducción de la malla, otorgando un mejor aspecto a esta y obteniendo un archivo utilizable como el presentado en la figura 23, permitiendo la elaboración del diseño CAD, en ocasiones no es necesario ejecutar todos los pasos, ya que el resultado del escaneado 3D obtenido es óptimo y solo presenta pequeñas irregularidades lo cual lo hace bueno para la elaboración del diseño CAD de la férula.



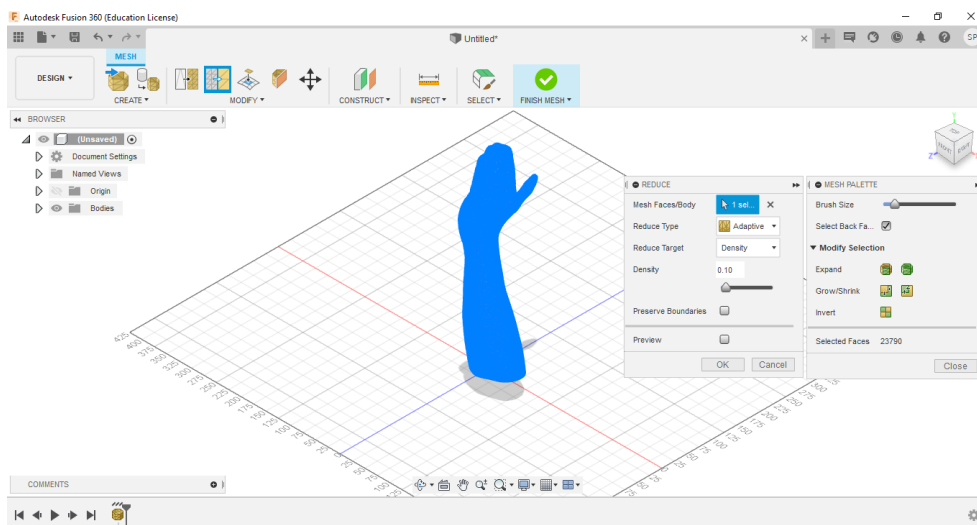
*Figura 23. Modelo 3D utilizable para diseño*

### **3.3. Diseño CAD**

Para el diseño de la férula se empleó el software de Diseño Fusion 360, el cual es uno de los softwares más potentes que se encuentran en el mercado, permite crear modelos 3D gracias a su gran variedad de herramientas, es un programa de uso fácil que trabaja con la

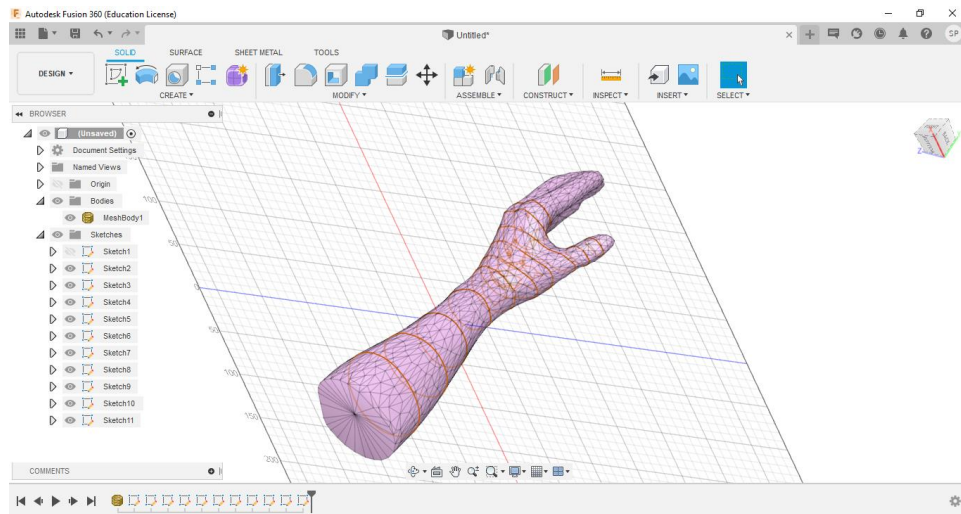
nube lo que nos permite ver los modelos creados desde cualquier lugar, su principal uso se centra en el diseño mecánico e industrial contando con diferentes módulos de trabajo que permitiendo procesar sólidos, mallas, superficies... También cuenta con módulo de ensamblaje y análisis geométrico.(Ortega Lázaro, 2019).

Para hacer el diseño de la férula, como primer paso se debe de importar el archivo STL que anteriormente se procesó en Meshmixer (figura 24). Para realizar esto, se debe de ir a la sección Create, donde se encuentra la herramienta de Create Mesh, se selecciona y esta se dirige a una nueva ventana donde se procede a la importación del archivo STL.



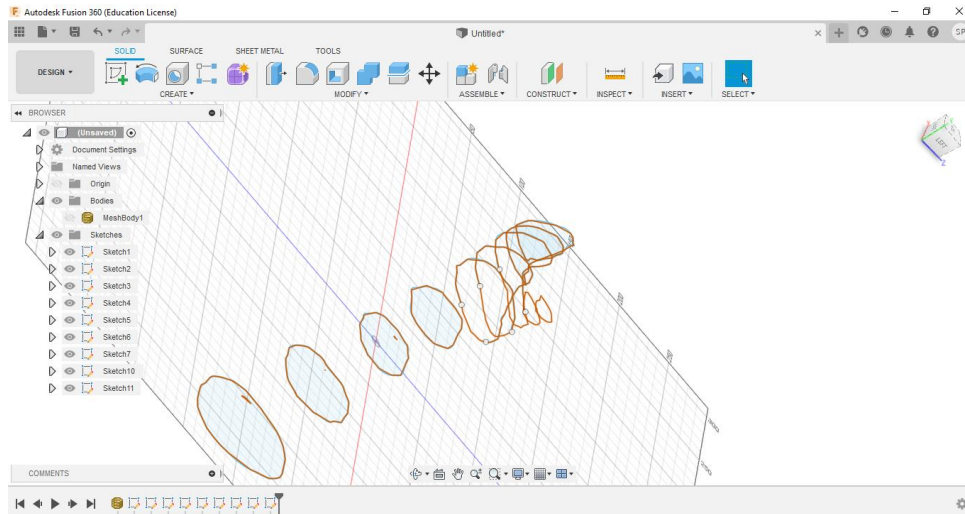
*Figura 24. Archivo STL en fusion 360*

Teniendo el modelo importado, se inicia con el diseño de la férula. Para esto se selecciona la parte de Create y se elige la herramienta de Create Mesh Section Sketch, esta herramienta permite realizar trazos a lo largo del contorno de la malla del archivo STL así como se observa en la figura 25.



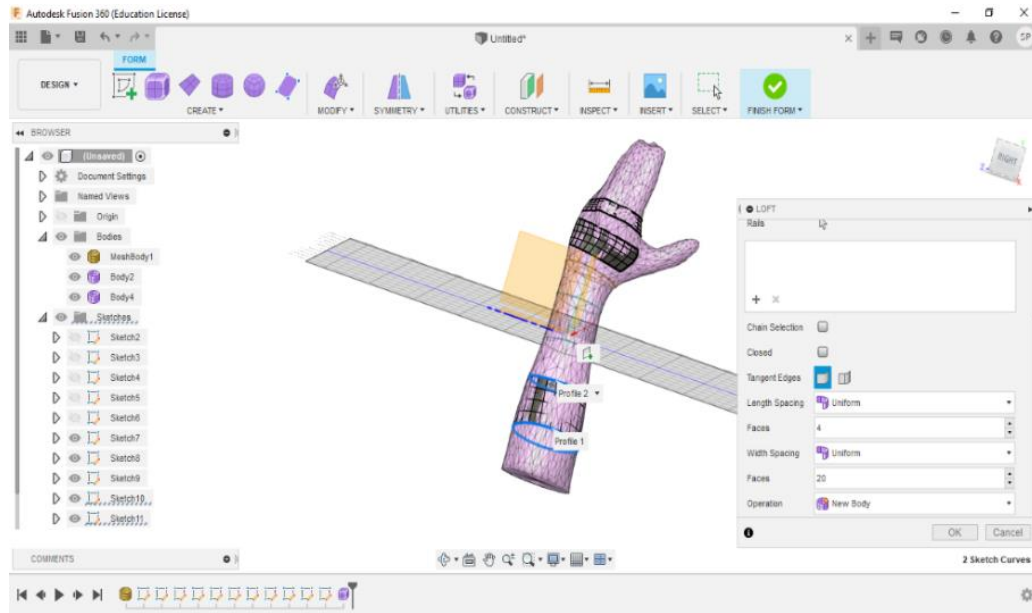
*Figura 25. Contornos*

Después de obtener los contornos se debe de crear planos correspondientes a cada uno. Para lograr esto, se emplea al apartado de Create donde se encuentra la herramienta de Fit Curves to Mesh Section, la cual permite seleccionar desde un contorno completo, hasta uno que tenga ciertos puntos de limite, esta última opción es implementado en la parte del pulgar ya que se necesita que esta zona tenga un agujero por el cual va introducido el pulgar de la persona, en la figura 26 se observa el proceso terminado el cual permite la obtención de la geometría de la mano.



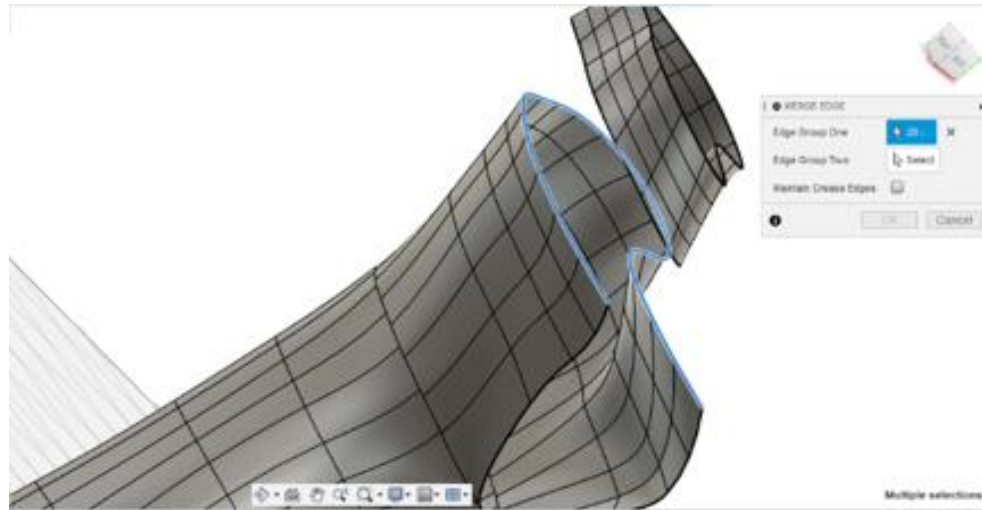
*Figura 26. Contorno que permite dibujar la geometría de la mano*

Posteriormente después de generar los planos se usa el instrumento Create Form, donde se puede utilizar la herramienta Loft para unir todos estos contornos que anteriormente fueron generados, cabe resaltar que para la selección de estos contornos solo se deben seleccionar pequeños grupos que tengan la misma simetría, permitiendo crear una primera geometría de malla que representa la mano (figura 27)



*Figura 27. Partes de malla obtenidos de los contornos*

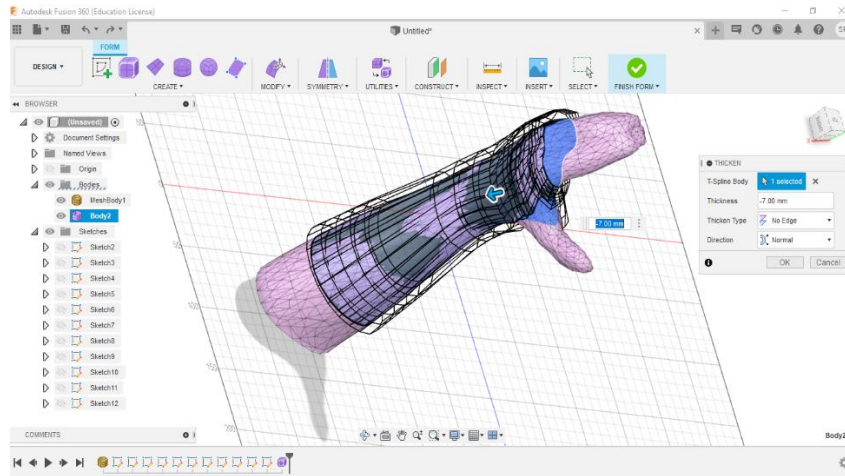
Luego de tener los diferentes contornos debidamente detallados el siguiente paso es obtener la malla con la geometría de la mano y obtener un cuerpo, Para realizar este paso, se utiliza la sección de Modify se y emplea la función de Merge Edge, en donde puede seleccionar un grupo de bordes de dos cuerpos y unirlos uno con el otro, esto se presenta mas detalladamente en la figura 28. Para que el resultado final sea satisfactorio se debe seleccionar primero el contorno de malla que está abierta y de la misma forma seleccionar el contorno de la malla que es completamente cerrada, dejando el mismo espacio de selección de la malla abierta para poder generar el espacio por donde va introducido el pulgar.



*Figura 28. Unión de las partes de la malla*

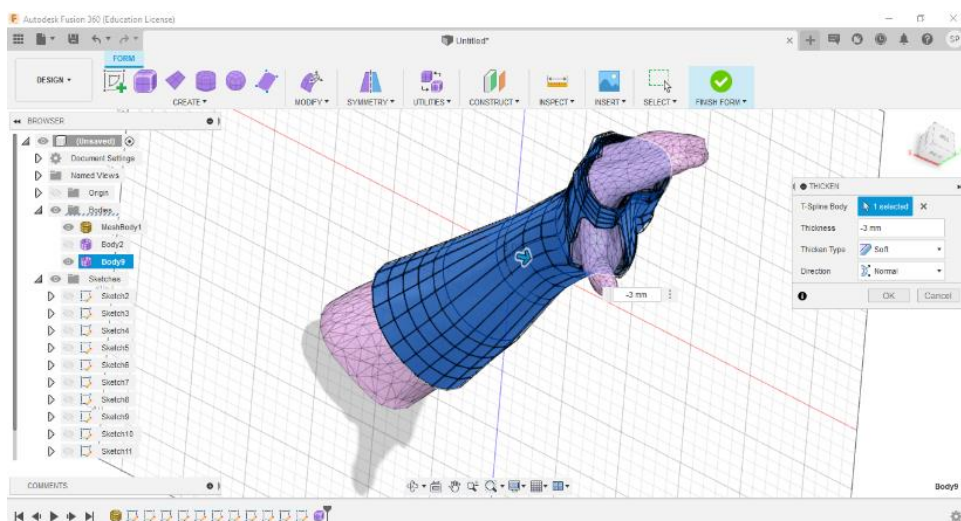
Luego de obtenida la malla acoplado al modelo 3D, a esta se le debe otorgar un espesor con el objetivo de lograr un cuerpo completamente rígido, en esta parte se vuelve a hacer uso del módulo de Modify, con ayuda de esta herramienta se crea un cuerpo más alejado del modelo 3D, es decir poner un offset a la pieza para que la malla creada no se mezcle con la malla del modelo digital 3D (Ortega Lázaro, 2019), el resultado de este procedimiento se encuentra detallado en la figura 29.





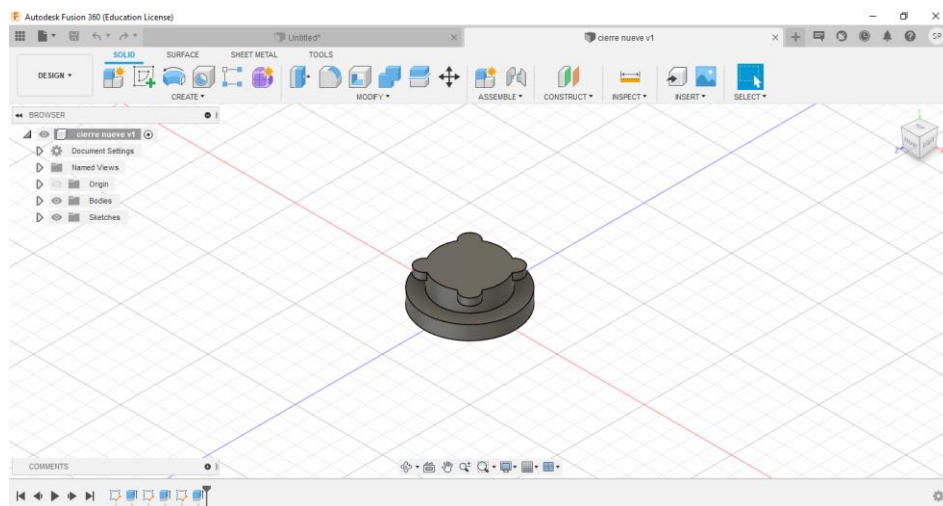
*Figura 29. Offset a la malla generada*

En consiguiente, se vuelve a elegir la herramienta, pero en este caso se emplea el Thicken tipo Sharp, el cual da el espesor a este nuevo cuerpo con offset con material de la férula de 4mm, brindando la estabilidad necesaria como se observa en la figura 29, obteniendo la malla completamente definida presentada en la figura 30.

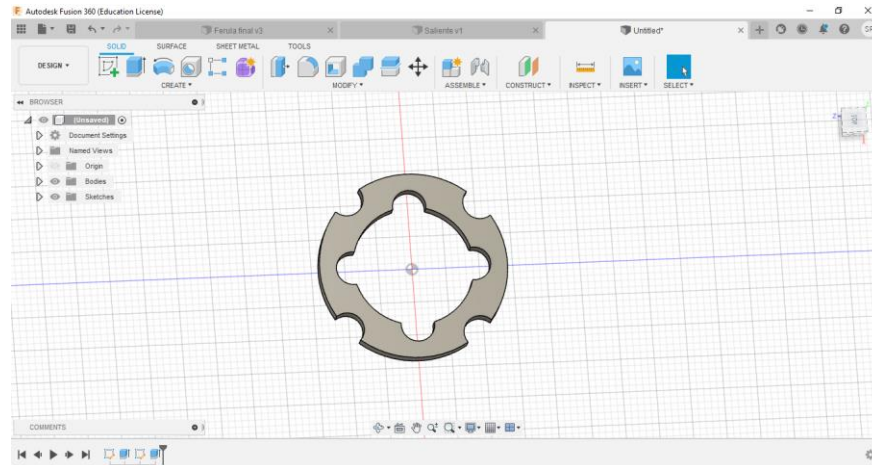


*Figura 30. Malla completamente definida*

Ya terminado la aplicación del espesor, se puede dar por finalizado y el siguiente paso es el ensamble del sistema de cierre diseñado, este sistema de cierre está conformado por un anillo circular (figura 31), el cual se compone por una rendija y pestañas salientes (figura 32) que tienen la función de bloquear, el saliente que se va a introducir al igual que el sistema de cierre es un anillo que encaja a la perfección en la rendija del cierre y permite el bloqueo con solo girarlo, tiene la ventaja de que permite situarlo, en varios planos de la férula, dependiendo del corte que se le requiera implementar.



*Figura 31. Diseño cierre circular.*



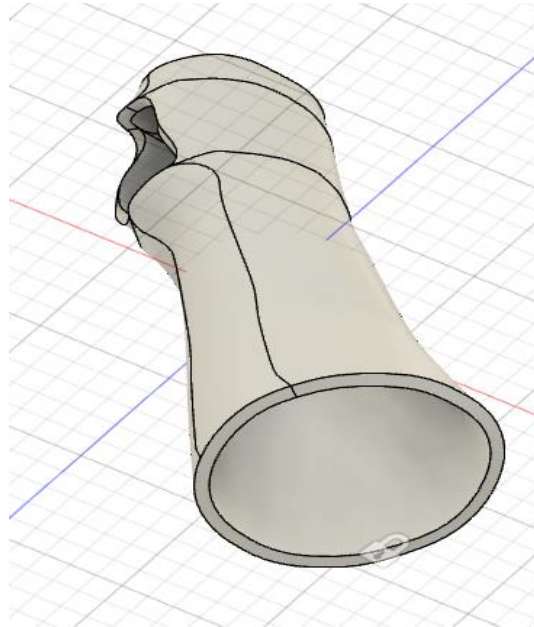
*Figura 32. Bloqueo del cierre circular*

Para el ensamble de los cierres simplemente se importa el archivo donde se encuentre el diseño y se procede a ubicar los cierres en el plano que se requiera, en el diseño del proyecto los cierres se ubicaron en un plano longitudinal ya que la férula será recortada en esta sección. Por último, emplea la herramienta Combine, la cual combina los diferentes cuerpos convirtiéndolos en uno solo.

### **3.4. Simulación**

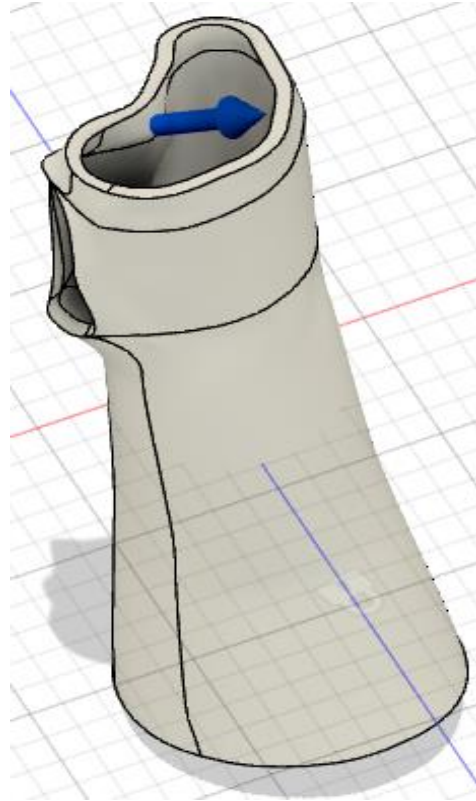
En este proyecto se empleó el método de optimización topológica el cual permite evaluar la distribución óptima de material en un volumen determinado sometido a tensiones mecánicas, para realizar la optimización topológica al igual que para el diseño se empleó el software fusión 360, como primer paso se deben identificar y ubicar las restricciones de la pieza, con la ayuda de la herramienta de Constraints, en este caso como dice (Andrade, 2019,

p. 62) se empleó una restricción en la parte inferior de la férula, en la figura 33 se observa un candado indicando que en esta parte se encuentra la restricción.



*Figura 33. Restricción en la férula.*

Luego de tener las restricciones, se aplican las fuerzas a las que van a estar sometidas la órtesis (figura 34), en este estudio se empleó una fuerza máxima de flexión equivalente a 12 N (Andrade, 2019).



*Figura 34. Fuerzas aplicadas a la férula*

El siguiente paso a emplear es la visualización y cálculo de la malla la cual se realiza tomando un tamaño absoluto de 4 mm; para esto se hace uso de la herramienta de Toggle Mesh Visibility que resuelve de manera adecuada las características geométricas del modelo. finalmente, con todas las condiciones necesarias se procede a realizar el análisis, utilizando la herramienta Solve, la cual realiza la simulación, ya sea de forma local o en la nube. Los resultados de este procedimiento se encuentran de forma más detallada en la parte de resultados.

Después de la obtención de la optimización se realiza la extracción del material, para poder realizar el análisis de FEA, que permite evaluar los esfuerzos y desplazamientos mecánicos. Para lograr esto se utiliza el software especializado ANSYS para obtener ciertos parámetros de la malla y realizar un estudio con buenos resultados.

### 3.5. Impresión 3D

Luego de tener el diseño CAD completo, se procede a la impresión 3D de la órtesis, para esto es necesario importar los archivos STL del diseño, al software PrusaSlicer, programa utilizado en la impresora de tecnología tipo FDM.

Al importar el archivo de la parte de la férula que se desea imprimir, se deben de poner ciertos parámetros de impresión para que esta tenga todos los requerimientos necesarios para un buen resultado.

Los parámetros empleados en la impresión se encuentran en la tabla 1

*Tabla 1 Parámetros de impresión*

Parámetros	Especificación
Altura de capa	0,22 mm
Material	PLA
Soportes	Support on build plate only
Relleno	70%
Brim	Activo
Separación entre soportes y pieza	0,4 mm
Velocidad de impresión	60 mm/s

Las impresoras 3D funcionan colocando una capa sobre otra del filamento extruido para crear un objeto 3D. Cada nueva capa debe ser apoyada una sobre otra para dar estabilidad, en el caso de que no sea así, el modelo comienza en el aire y la pieza puede fallar, para evitar esto se debe agregar una estructura de soporte adicional para garantizar una impresión exitosa, en nuestro caso el tipo de soporte es denominado Support on build plate only, el cual se genera solo en aquellas partes paralelas a la cama de impresión. Estos soportes están a una distancia de 0.4 mm de la pieza impresa para que a la hora de la extracción sean mucho más fácil remover sin perjudicar la pieza. El relleno de la pieza es del 70%, La férula será impresa en PLA, debido a sus grandes propiedades como son la resistencia y rigidez, además de proporcionar un gran acabado superficial a la férula; en la figura 35 las partes de color verde representan los soportes de la pieza.

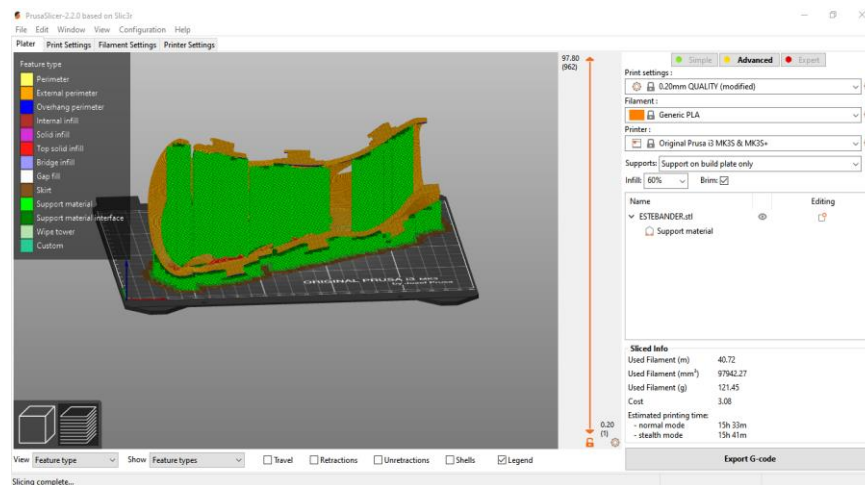
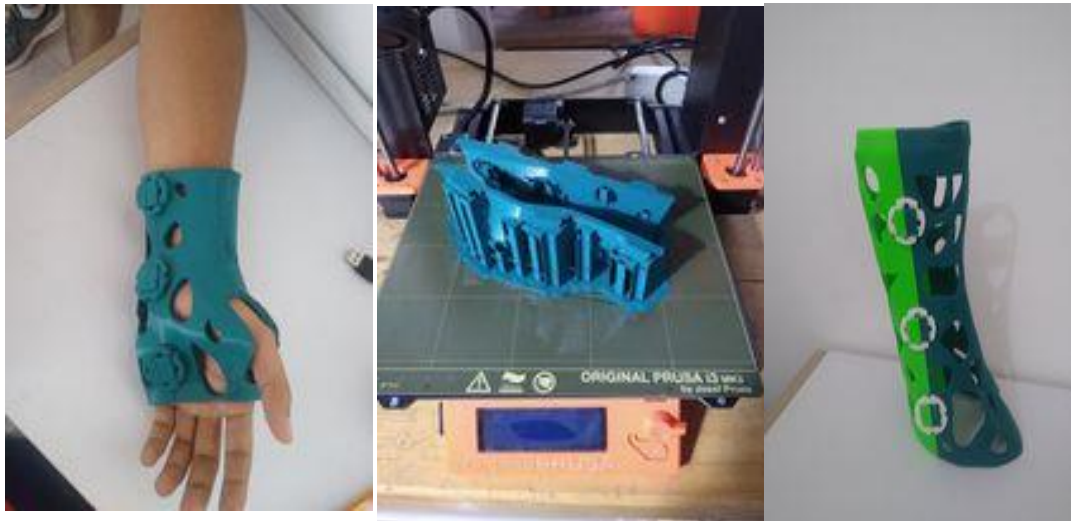


Figura 35. Pieza en el software rebanador

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Primeros prototipos

Basado en los artículos consultados para el desarrollo de este trabajo se observa que a la mayoría de férulas fabricadas no se le hace ningún tipo de análisis de elementos finitos, es decir el material retirado del dispositivo se hace sin ningún criterio, se hace aleatoriamente por eso se diseñó diferentes prototipos con este principio y así tener un punto de partida para los posteriores análisis, los prototipos impresos se presentan en la figura 36.



*Figura 36. Prototipos impresos*



Como se observa en la figura 36 los patrones en los agujeros del dispositivo son puestos de manera aleatoria sin ningún tipo de criterio, estos prototipos fueron de gran utilidad para saber si había que realizar algún cambio en la metodología del diseño y tener un primer acercamiento a la forma en la que se debía imprimir los dispositivos, los soportes que había que poner en la pieza para no tener ningún problema de impresión, verificar los broches de cierre además de poder evaluarlas puestas en personas, como resultado de esto se llegó a la conclusión de que la forma más sencilla de imprimir el dispositivo era realizar un corte e imprimir dos partes, todo esto teniendo en cuenta la capacidad de las impresoras presentes, para los broches se evaluó que tan efectivos eran para mantener la férula cerrada y fija además de que tan difícil era su colocación. Los resultados fueron satisfactorios ya que como se observa en la figura 37 la férula permanece debidamente sellada.

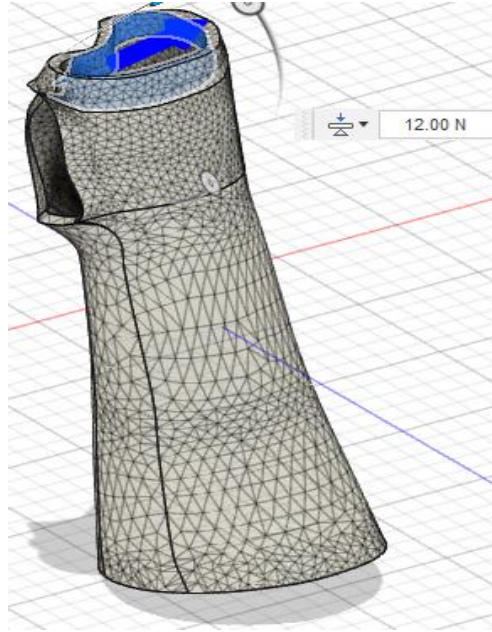
Para llevar a cabo la impresión de estos prototipos se utilizaron los parámetros descritos en la tabla 1 teniendo como resultado las férulas de la figura 37, las cuales tomaron un tiempo de impresión de entre 30-35 horas, lo cual no cumple con una característica o requerimiento que se había planteado el cual era tener un tiempo de impresión de 10 horas o menos, este tiempo es difícil de modificar debido a que se tendrían que realizar ciertos ajustes en los parámetros de impresión, por ejemplo bajar aún más el porcentaje de relleno, lo cual ocasionaría aumentar la fragilidad y que pueda romperse también se puede aumentar la velocidad de impresión, la cual es una opción más viable aunque esto puede ocasionar un atasco de la impresora ocasionando daños en la pieza y llevando a una pérdida de material, por lo tanto se tomó la decisión de dejar el tiempo de impresión sin modificar teniendo en

cuenta que hay 3 impresoras que pueden realizar el trabajo proporcionando los tiempos aproximadamente a los requeridos.

#### **4.2. Optimización topológica.**

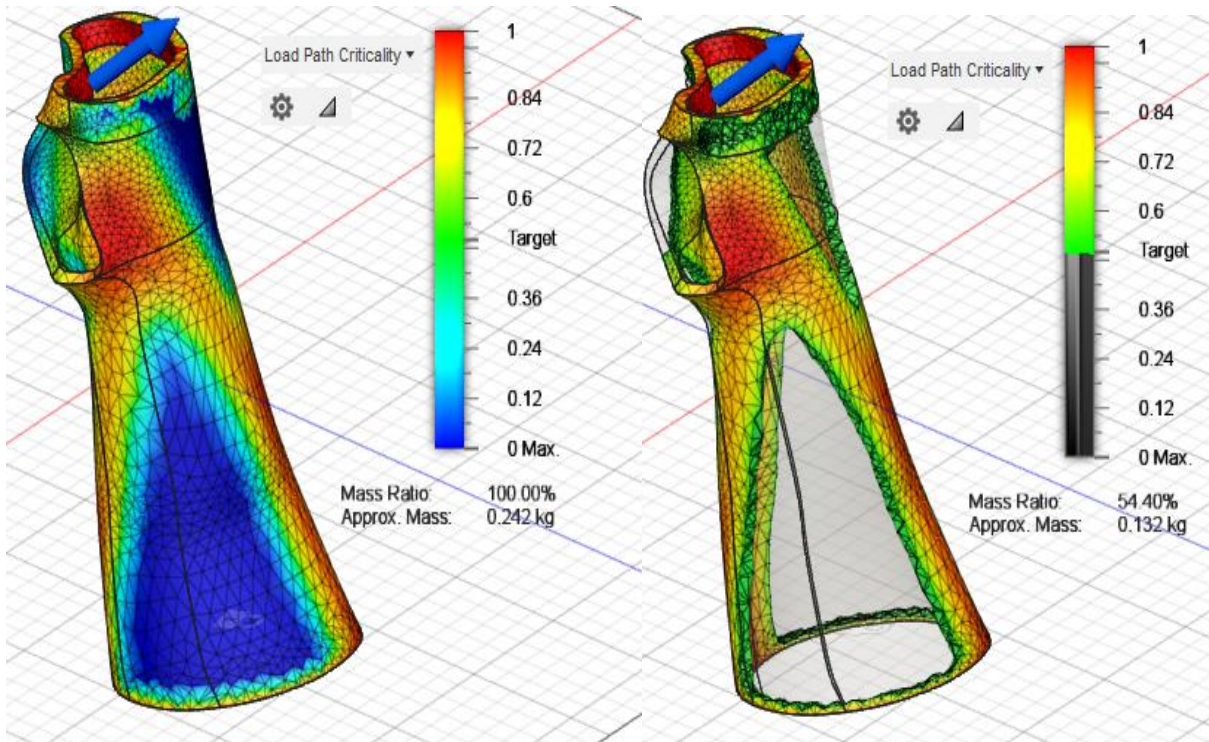
Como se había mencionado antes el retiro del material de la férula se hacían sin ningún criterio para remediar esto se recurrió a una técnica de análisis conocida como la optimización de topología la cual permite optimizar una característica de cualquier estructura que se haya diseñado previamente, en el caso del diseño de la férula se desea optimizar la masa, es decir eliminar material que no sea necesario para mantener las características de resistencia de acuerdo a una fuerza aplicada, todo esto para tener certeza de que parte de la férula se puede eliminar material.

La optimización se llevó a cabo teniendo en cuenta diversos requerimientos, el principal es reducir la masa del dispositivo en 50% con el objetivo de tener un dispositivo más liviano, para llevar a cabo esto se aplica una fuerza de flexión de 12N en la zona donde están ubicados los nudillos como dice (Andrade, 2019) para esta parte en extensión se aplica un 8% de la fuerza total que corresponde a los 12N aplicados y una restricción en la parte inferior de la férula, también se utiliza una malla de tamaño absoluto de 4 mm, en la figura 37 se observan todos estos parámetros establecidos.



*Figura 37. Parámetros de optimización*

Como resultado de aplicar el algoritmo de optimización se obtiene la topología presentada en la figura 38.

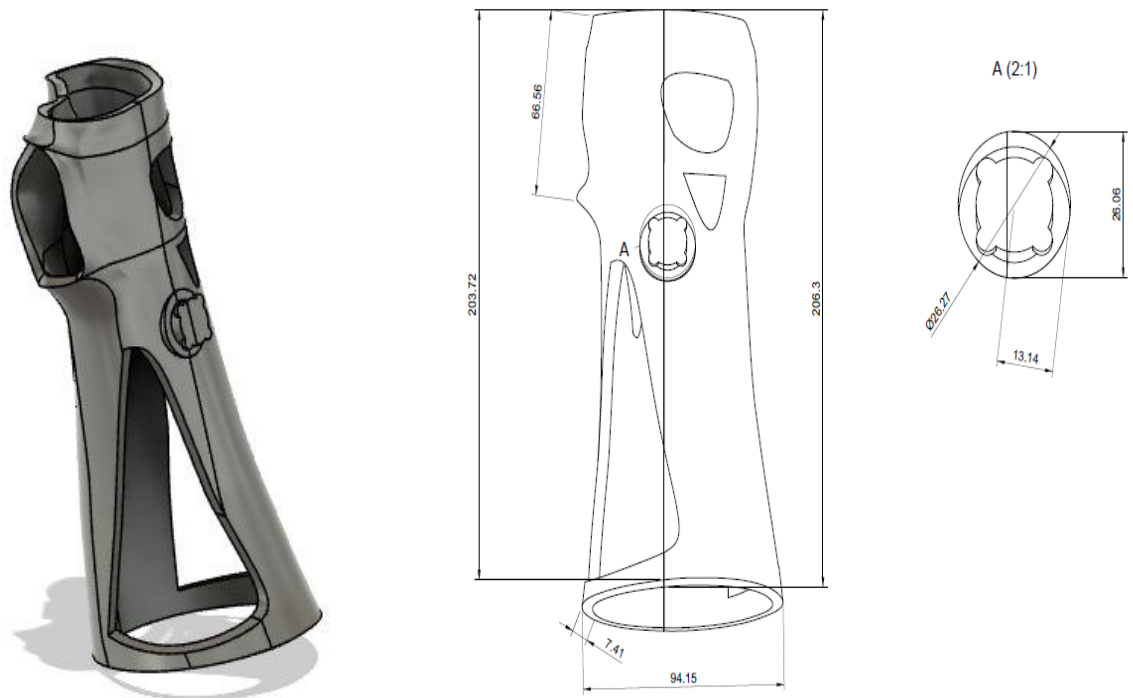


*Figura 38. Topología optimizada*

Con los resultados de la optimización se puede tener más certeza de cuanto y de donde se puede retirar material, el cual es el objetivo final al realizar este proceso, en la figura 39 se observa una gama de colores los cuales van desde el azul hasta el rojo, estos sirven como indicador, las partes de azul y parte del verde son zonas que no son necesarias para mantener la resistencia de férula con base a la fuerza aplicada, por esto se pueden eliminar del diseño y crear un dispositivo más liviano, pasando de 242gr a una masa de 132gr, indicando que el proceso fue exitoso, por otra parte teniendo en cuenta que la férula es para el tratamiento de

fracturas no va a estar sometido a grandes esfuerzos y que su objetivo principal es proporcionar inmovilización de la parte afectada.

Teniendo en cuenta que aplicar el algoritmo de optimización genera bordes irregulares en las zonas eliminadas es necesario proceder de nuevo a la parte de diseño para suavizarlos, además de decidir de qué partes de la férula se va a retirar el material, también un plano que permite tener las medidas con una altura de aproximadamente 200 mm, esto se observa con más detalle en la figura 39.

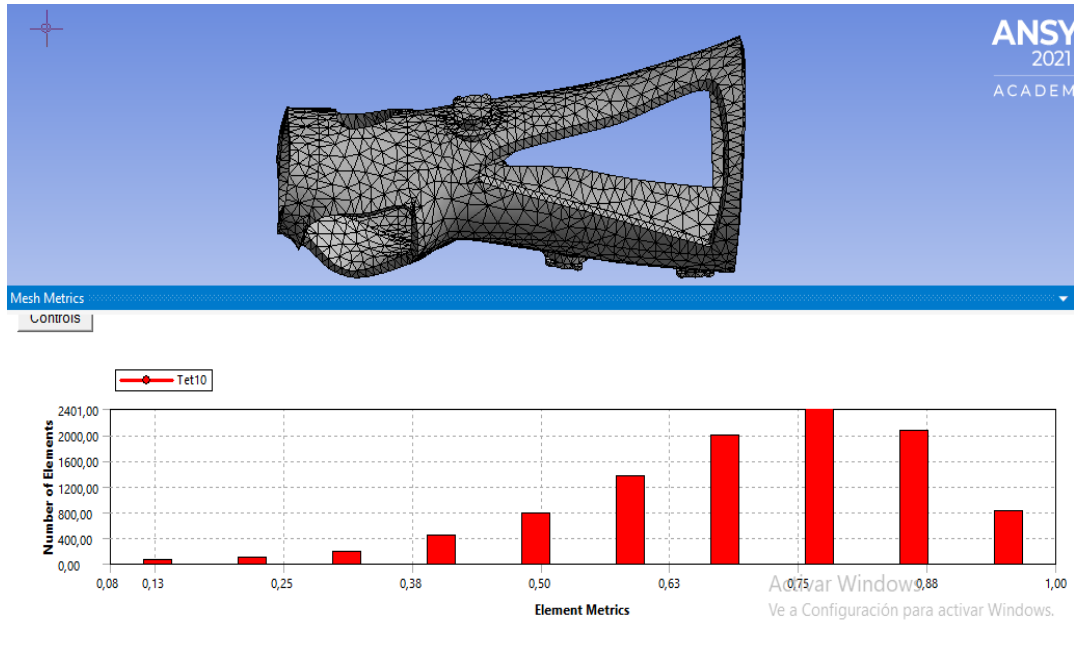


*Figura 39. Férula optimizada*

### **4.3. Análisis de elementos finitos**

Para corroborar que todo el procedimiento de optimización que se llevó a cabo fue exitoso se realiza un análisis de elementos finitos, dicho análisis se lleva a cabo en el software ANSYS ya que es un software más especializado y que permite visualizar ciertos parámetros de la malla que son clave al momento de realizar estos análisis, porque nos permite garantizar buenos resultados, además permite asegurar que si este análisis se replica en otros programas se puede obtener resultados igual de satisfactorios, estos parámetros son, la calidad de la malla, la relación de aspecto de los elementos de la malla y el skewness; para realizar este análisis se utilizaron los mismos parámetros y condiciones que para la optimización, es decir la fuerza de flexión de 12N, la restricción en la parte inferior de la férula y un tamaño de malla de 4 mm.

La primera métrica a revisar es la calidad de la malla (figura 40), es decir que tan bien definidos se encuentran los elementos que conforman la malla.

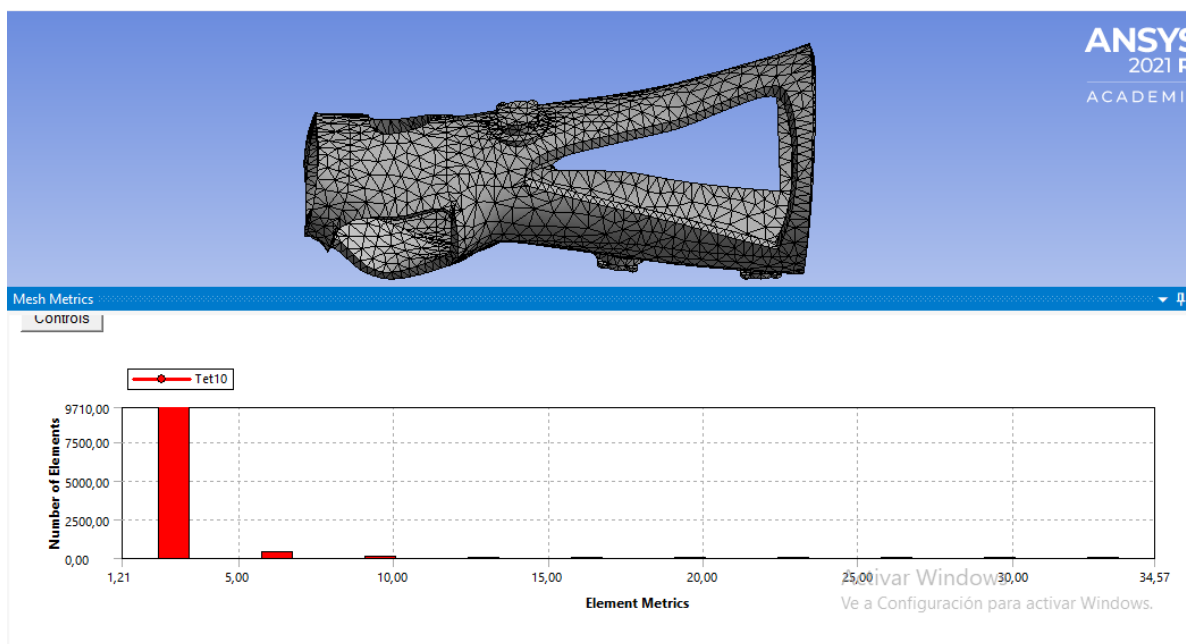


*Figura 40. Calidad de la malla*

Para la generación del mallado se debe tener en cuenta la geometría compleja de la férula, por esto es bueno aprovechar los diferentes tipos de elementos que genera ANSYS, en este caso como se observa en la figura 40 son unos tetraedros de 10 nodos, también en la gráfica se tiene en cuenta la distribución de dichos elementos donde, los que tienen una mejor calidad son aquellos más cercanos a un valor de 1, en este caso se tiene muchos elementos que cumplen con este requisito por lo cual se puede afirmar que se cuenta con un malla de buena calidad.

Otra métrica importante es la relación de aspecto cuya grafica es presentada en la figura 41, esta se obtiene teniendo en cuenta la relación entre la arista más larga del elemento y la normal más corta, es decir se mide que tan perfectos son los elementos generados en la malla,

para este caso que son tetraedros de 10 nodos esta métrica mide que tan parecidos son estos elementos a un tetraedro, al igual que en la gráfica de la calidad de malla entre más cercano a 1 estén los elementos de mejor calidad serán, para la malla generada se observa que la mayoría de estos tetraedros están en un valor muy cercano a 1 y por debajo de un valor permisible de 5 (Solidworks, n.d.) asegurando que la malla generada es de buena calidad.



*Figura 41. Relación de aspecto*

La última métrica que se midió en la malla fue el skewness o la asimetría y su gráfica se encuentra expresada en la figura 42, este valor determina cuáles estructuras de la malla están cerca de su forma ideal, para esta métrica se tienen ciertos rangos para determinar la calidad estos se encuentran expresados en la figura 43.



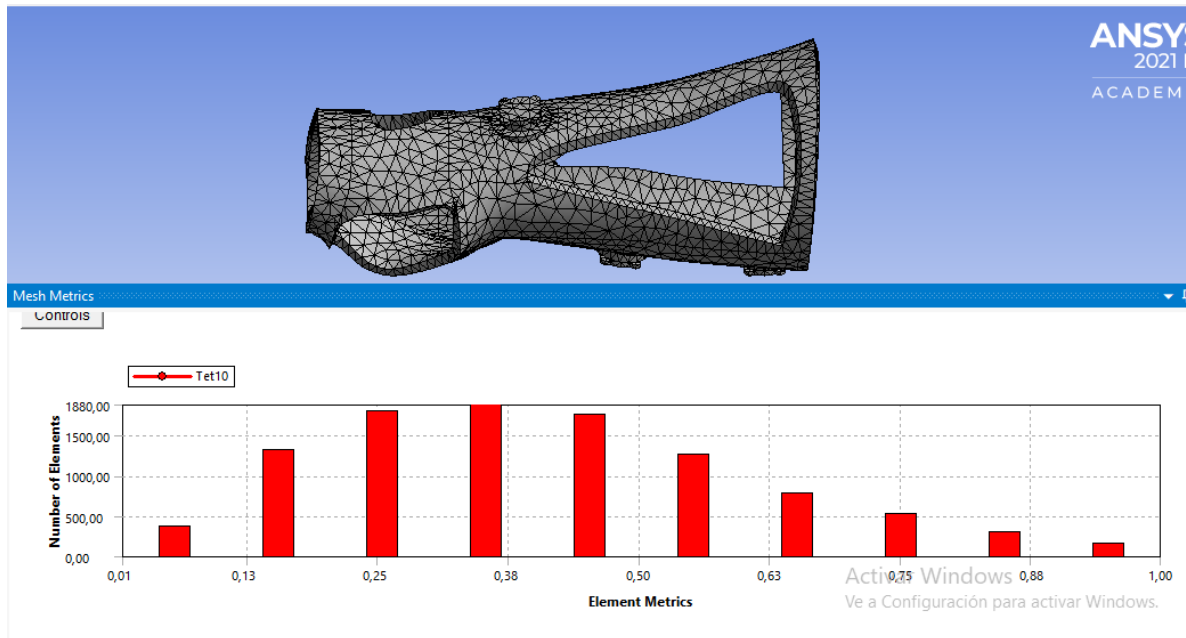


Figura 42. Skewness

Value of Skewness	Cell Quality
1	degenerate
0.9 — <1	bad (sliver)
0.75 — 0.9	poor
0.5 — 0.75	fair
0.25 — 0.5	good
>0 — 0.25	excellent
0	equilateral

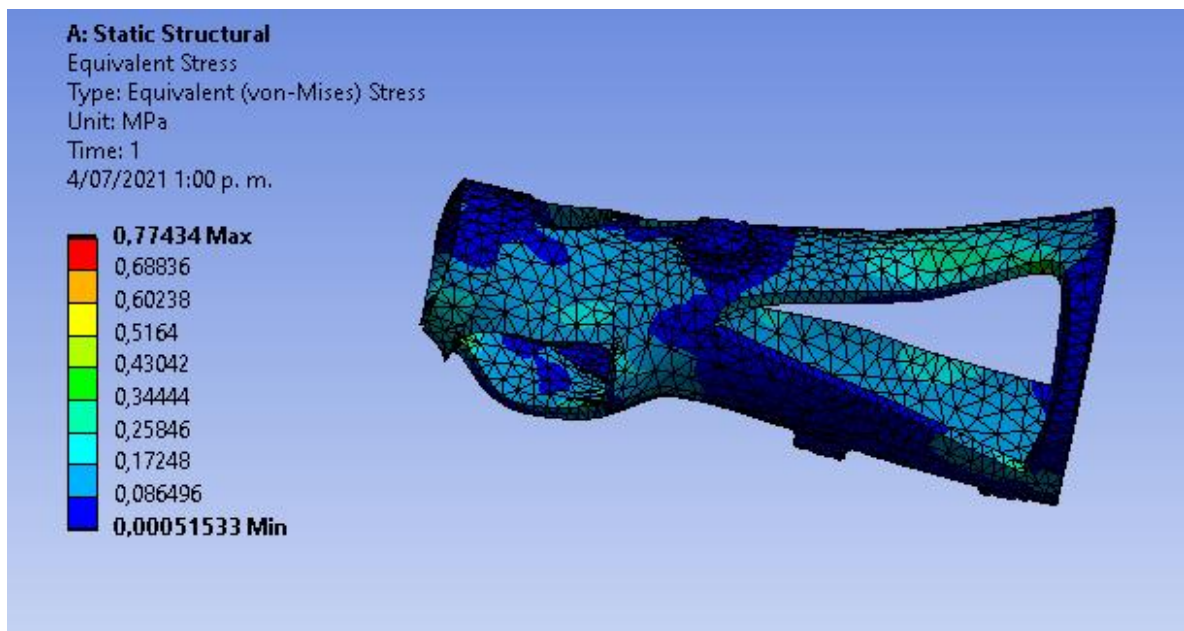
Figura 43. Valores de Skewness

(*Sesgo de Estructuras de Malla En ANSYS® Mallado (Expresión Ilustrada)*, n.d.)

Teniendo en cuenta las figura 43 los valores presentados en la gráfica una gran cantidad de los elementos se encuentran dentro del rango aceptable para el valor de skewness, teniendo en cuenta que mientras más bajo sea este valor mejor resultado se obtendrá caso contrario a lo que ocurre con la relación de aspecto y la calidad de la malla; por lo tanto habiendo

analizado estas 3 métricas se puede garantizar que los resultados obtenidos serán confiables además de que si se replica el análisis en otro software los resultados serán similares.

Con los aspectos más importantes de la malla revisados, se realiza el análisis de elementos finitos a la férula optimizada con el fin de corroborar su resistencia y si existen puntos críticos en ella, se utilizan las mismas condiciones que en el algoritmo de optimización, en este caso se analizan los esfuerzos de von Mises (figura 44) para saber a qué esfuerzos estará sometida la férula y compararlos con el material con el cual se va a imprimir.

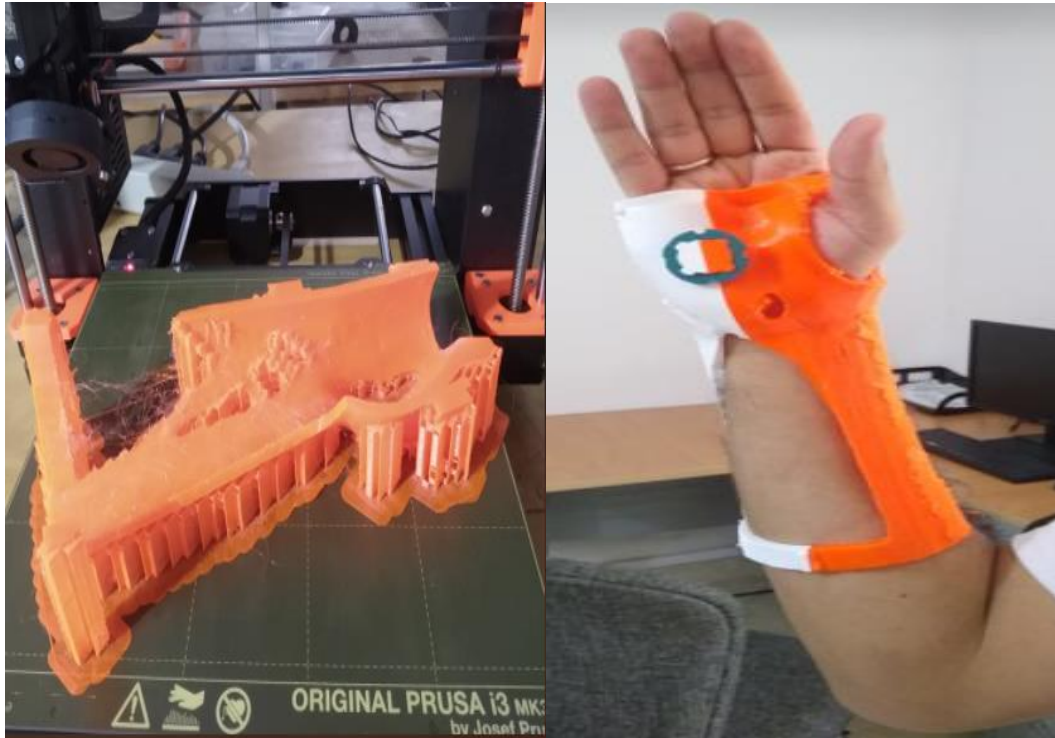


*Figura 44. Esfuerzos de Von Misses*

En este apartado se simula los esfuerzos de von Mises es decir las tensiones a las cuales estará sometido el dispositivo que para la fuerza aplicada de 12N la férula estará a un esfuerzo máximo de 0,77 MPa. Según esto, el dispositivo no llegará estar sometido a este máximo de tensión teniendo en cuenta que el esfuerzo máximo admisible para el PLA es de 60 MPa (Pozo Safla et al., 2020). Además, al ser un dispositivo de inmovilización y recuperación de una fractura el usuario no lo estará sometiendo a grandes esfuerzos que lo lleven hasta la falla mecánica, sin embargo, es pertinente evaluar dichos esfuerzos para tener plena seguridad de esto y verificar los resultados de la optimización.

#### **4.4. Impresión 3D**

Posteriormente de realizados todos los análisis se realiza la impresión 3D del dispositivo el cual se observa en la figura 45, en este apartado se toman los parámetros usados en la impresión de los anteriores prototipos, es decir los parámetros presentes en la tabla 1.



*Figura 45. Férula optimizada impresa*

Se obtiene un dispositivo igual de funcional a los prototipos anteriormente impresos, esta vez sin patrones pero con certeza de que en esos puntos se podía retirar material, aunque en los agujeros creados se podría realizar este tipo de patrones con la ayuda de un software CAD, en este apartado hay un punto muy importante que se observa en la figura 45 el cual corresponde al uso de soportes en la impresión de la pieza, estos soportes se deben poner para las partes de la pieza que se encuentran en voladizo que por la forma en la que se imprimió corresponde a muchas partes de la férula, el problema de estos soportes aparte de ser un gasto más de material es que estos se encuentran adheridos a la pieza (aunque en el software de rebanado se estableció que estuvieran a una distancia de 0,4 mm) se hace difícil retirarlos generando imperfecciones en la superficie lo cual no afecta su funcionalidad pero

si su estética y en una parte la facilidad para poner los broches de cierre, esto se puede evitar utilizando un material diferente para los soportes, como el PVA (alcohol polivinílico) este material es soluble en agua, es decir cuando se termine de imprimir la pieza solo debe sumergirse en agua y los soportes se disuelven en el agua dejando la férula en perfecto estado, el problema es que para utilizar este material se debe contar con una impresora que tenga doble extrusor, con la que no se contaba en la organización, aunque sería una mejora considerable teniendo en cuenta el trabajo a futuro.

Finalmente se evaluaron los dispositivos impresos en diferentes usuarios a través de una encuesta, las férulas fueron usadas durante un periodo de aproximadamente 1 hora y al finaliza respondieron una encuesta basada en parámetros de comodidad y funcionalidad con puntuaciones de 1 a 5 donde 1 es muy malo y 5 es muy bueno, la encuesta se encuentra de manera más detallada en la sección de anexos y cuyas preguntas son:

1. ¿En cuestión de peso, como considera el dispositivo?
2. ¿En términos de contacto con la piel, el dispositivo es?
3. ¿Con respecto al cierre del dispositivo, este es?
4. ¿En términos de estabilidad, como considera el dispositivo?
5. ¿Usaría este dispositivo o uno tradicional de yeso?

*Tabla 2. Puntuaciones encuesta*

<b>Puntuación</b>					
<b>Usuario</b>	<b>Pregunta 1</b>	<b>Pregunta 2</b>	<b>Pregunta 3</b>	<b>Pregunta 4</b>	<b>Pregunta 5</b>
<b>Usuario # 1</b>	5	3	3	4	4
<b>Usuario # 2</b>	5	4	5	5	3
<b>Usuario # 3</b>	5	3	2	3	4
<b>Promedio</b>	5	3,33	3,33	4	3,66

Basado en los resultados de la encuesta propuesta existe un buen nivel de aceptación con los dispositivos, es decir se cumple con los requerimientos propuestos para el dispositivo, es decir se obtiene una férula ligera, funcional y cómoda, teniendo en cuenta que en algunos aspectos como el sistema de cierre tiene ciertas fallas, pero no de diseño sino de impresión, como se mencionó anteriormente los soportes generan imperfecciones ocasionando que ubicar el bloqueo de los broches sea en algunas ocasiones algo complejo de realizar, en cuanto al contacto con la piel también tiene una calificación aceptable al producir pequeñas irritaciones en la piel que pueden ser resueltas utilizando un material por encima de la férula como fomi, para aumentar la comodidad del dispositivo.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El escaneado 3D proporciona un modelo digital con la precisión dimensional necesaria para tomarlo como base del diseño y crear un dispositivo que sea totalmente adaptable a la anatomía del miembro superior de cada persona, sin importar el tamaño y grosor de su brazo.

El algoritmo de optimización topológica permitió realizar un diseño basado en parámetros más estrictos permitiendo tener el diseño en un periodo de tiempo más corto y con el menor peso posible, permitiendo al usuario realizar diversas tareas con normalidad.

El proceso de impresión FDM es bastante versátil permitiendo obtener piezas con geometrías muy complejas además de poder trabajar con diferentes materiales, logrando obtener modelos ergonómicos y adaptables, aunque hay que tener en cuenta diversos aspectos que se obtienen mediante la experiencia con esta tecnología para lograr una impresión satisfactoria.

Los dispositivos obtenidos cumplen los requerimientos planteados, capaces de inmovilizar el brazo afectado siendo ligero, sumergible en agua, estético y adaptable al propio brazo cumpliendo así con los objetivos el cual era transformar un escáner 3D en un dispositivo totalmente usable.

Como no existe mucho en la literatura sobre ensayos y análisis de elementos finitos a ortesis, específicamente férulas, fue difícil determinar los esfuerzos a los cuales estaría sometido el dispositivo, también se debía tener en cuenta que la disponibilidad de las impresoras presentes en la organización no era muy grande ya que ellos deben tenerlas en constante producción para su proyecto de clínicas móviles.

Como recomendaciones se hace énfasis en revisar el apartado de los soportes y utilizar el PVA como material alternativo de soporte por las razones anteriormente mencionadas, además es importante seguir en la investigación de las fuerzas aplicadas al dispositivo ya que de este tema hay poca información en la literatura, se pueden realizar ensayos mecánicos a los dispositivos ya impresos y como punto final se debe empezar el trámite para hacer todo el proceso con el Invima y poder probar los dispositivos en voluntarios que tengan una fractura de miembro superior, con el fin de probar la viabilidad completa de las férulas.

## 6. REFERENCIAS

Adriana Cristina Zapata Guzman, Marcela Quintero Ospina, Diego Alexis Zapata Rivera,

Laura Isaza Morales, P. O. R. (n.d.). *La Prevalencia e Incidencia de los Accidentes de Tránsito en Colombia y el Impacto de los Métodos Alternativos de Solución de Conflictos (1) | Accidente de tráfico | Seguridad vial*. 20 Marzo 2020. Retrieved April 12, 2021, from <https://es.scribd.com/document/453843783/La-Prevalencia-e->



Incidencia-de-los-Accidentes-de-Transito-en-Colombia-y-el-Impacto-de-los-Metodos-Alternativos-de-Solucion-de-Conflictos-1

Andrade, L. (2019). *Manufactura de Férulas para el Tratamiento de Artritis de Muñeca Aplicando Tecnología de Impresión 3D*. 13.

Arce, C., & Medicina De Rehabilitación, G. (2008). *ORTESIS DE MIEMBROS SUPERIORES Clasificación – Funciones – Prototipos – Características – Indicaciones*. I, 8. [http://www.arcesw.com/o\\_m\\_s.pdf](http://www.arcesw.com/o_m_s.pdf)

Buonamici, F., Furferi, R., Governi, L., Lazzeri, S., McGreevy, K. S., Servi, M., Talanti, E., Ucheddu, F., & Volpe, Y. (2018). A CAD-based procedure for designing 3D printable arm-wrist-hand cast. *Computer-Aided Design and Applications*, 16(1), 25–34. <https://doi.org/10.14733/cadaps.2019.25-34>

de Prada Marty, A., Blázquez Rodríguez, M. C., Dominguez Pérez, L., Chozas Garcia, B., Leal de Pedro, E., & Sánchez Juan, A. (2008). Técnicas de enfermería: inmovilizaciones con férulas de yeso. *Hospital Universitario 12 de Octubre de Madrid, Servicio de Urgencias Residencia General*, 1–7.

Fuentes Bordallo, M. (2017). *Diseño y ensayo de férulas personalizadas mediante impresión 3D*. <https://idus.us.es/handle/11441/73201#X-9qycxGJBE.mendeley>

G, L. (2015). *Generar modelos 3d por fotogrametría*. <https://www.digitalizacion-3d.com/generar-modelos-3d-por-fotogrametria/>

Geng, J. (2011). Structured-light 3D surface imaging: a tutorial. *Advances in Optics and Photonics*, 3(2), 128. <https://doi.org/10.1364/aop.3.000128>

- Gosselin, R. A., Spiegel, D. A., Coughlin, R., & Zirkle, L. G. (2009). Injuries: The neglected burden in developing countries. In *Bulletin of the World Health Organization* (Vol. 87, Issue 4, p. 246). <https://doi.org/10.2471/BLT.08.052290>
- Herrera Gil, L. (2019). *Diseño y desarrollo de una férula de miembro superior escaneada e impresa en 3D*. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/37756>
- Heutger, M. (2016). *3D PRINTING AND THE FUTURE OF SUPPLY CHAINS A DHL perspective on the state of 3D printing and implications for logistics*.
- Medina, C., Benet, M., & Marco, F. (2016). El complejo articular de la muñeca: aspectos anatófisiológicos y biomecánicos, características, clasificación y tratamiento de la fractura distal del radio. *MediSur*, *14*(4), 430–446.  
[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1727-897X2016000400011&lng=es&nrm=iso&tlng=es%0Ahttp://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1727-897X2016000400011](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1727-897X2016000400011&lng=es&nrm=iso&tlng=es%0Ahttp://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1727-897X2016000400011)
- Mejia, H. (2014). Ventajas y desventajas de las impresoras 3D. *Revista Tecnológica*, *12*(ISSN 1729-7532), 5. <http://www.lifeder.com/ventajas-desventajas-redes-sociales/>
- Meza, C. (2012). *Optimización topológica en el diseño de elementos estructurales mecanicos*. 32.
- Noguera, J. (2014). *3D P Rinters*. 1–28.
- Ortega Lázaro, A. (2019). *Desarrollo de férulas para impresión 3D: Fase de digitalización y diseño CAD*. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/36788>

Pozo Safla, E. R., Aquino Arroba, S. M., Novillo Andrade, G. G., & Castelo Guevara, E. A. (2020). Simulación de esfuerzos mecánicos sobre las férulas para miembros superiores. *ConcienciaDigital*, 3(1.2), 137–156.

<https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v3i1.2.1202>

*Sesgo de estructuras de malla en ANSYS® Mallado (expresión ilustrada)*. (n.d.). 2021.

Retrieved July 4, 2021, from <https://mechanicalbase.com/skewness-of-mesh-structures-in-ansys-meshing/>

Siemens. (n.d.). *CAD / Diseño asistido por ordenador | Siemens Digital Industries*

*Software*. Retrieved April 20, 2021, from

<https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/our-story/glossary/computer-aided-design-cad/12507>

Solidworks. (n.d.). *Verificaciones de calidad de malla - 2016 - Ayuda de SOLIDWORKS*.

Retrieved July 4, 2021, from

[http://help.solidworks.com/2016/spanish/solidworks/cworks/c\\_Mesh\\_Quality\\_Checks.htm](http://help.solidworks.com/2016/spanish/solidworks/cworks/c_Mesh_Quality_Checks.htm)

Zapata Martínez, R. (2018). *Desarrollo de férulas articulares personalizadas como apoyo al diseño, implementación y validación de la plataforma biomédica colaborativa UBORA Tutor del Proyecto: Andrés Díaz Lantada*.

## ANEXOS

Pregunta	Puntuaciones				
	1	2	3	4	5
<b>1. En cuestión de peso, cómo considera el dispositivo</b>	Demasiado pesado, no puedo usar bien el brazo	Peso moderado, dificultad para realizar múltiples tareas	Ligeramente pesado, se me dificulta realizar algunas tareas	Ligero	Muy ligero, no interviene en ninguna de mis tareas
<b>2. En términos de contacto con la piel, como considera el dispositivo</b>	Quiere quitárselo inmediatamente fue puesto	Irritante	Cómodo, con irritación ocasional	Cómodo	Muy cómodo, no genera irritación
<b>3. Con respecto al cierre del dispositivo, este es</b>	Nada eficiente, fue muy difícil su colocación	Dificultad para la colocación y posterior cierre	Cierre eficiente, con dificultad ocasional	Cierre eficiente	Cierre muy eficiente, no presentó dificultades para la colocación
<b>4. En términos de estabilidad, como considera el dispositivo</b>	Muy inestable, la extremidad afectada no queda inmovilizada	Poco estable, la extremidad afectada aún presenta algunos movimientos	Estable, con pequeños desplazamientos de la extremidad afectada	Estable	Muy estable, la extremidad afectada queda inmovilizada completamente
<b>5. Usaría este dispositivo o uno tradicional de yeso</b>	No lo usaría	Acepta usarlo con disgusto	Tiene dudas	Lo usaría	Sin ninguna duda y con toda la voluntad, aceptaría usarlo