



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA FÉRULA DE MUÑECA PARA FABRICACIÓN ADITIVA

Alumno: Raúl Fernández Castellanos

Tutor: Prof. D. Javier Fernández Aceituno

Depto.: Ingeniería Mecánica y Minera

Febrero 2024



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA FÉRULA DE MUÑECA PARA FABRICACIÓN ADITIVA

Tutor: Prof. D. Javier Fernández Aceituno

Alumno: Raúl Fernández Castellanos

Contenido

1. Objetivos y metodología	4
1.1 Objetivos.....	4
1.2 Metodología:	5
1.2.1 Documentación	5
1.2.2 Diseño	5
1.2.3 Fabricación.....	6
2. Introducción.....	6
2.1 Historia de la ortopedia	6
2.2 Diferencia entre férula órtesis y prótesis	9
2.2.1 Férula:.....	9
2.2.2 Ortesis:.....	10
2.2.3 Prótesis	10
2.3 Férulas impresas en 3D	11
2.3.1 Tecnologías de impresión 3d.....	11
2.3.2 Materiales.....	14
3. Diseño	16
3.1 Medidas	16
3.1.2 Antropometría.....	17
3.1.2 Escaneado	17
3.2 Limpieza con Meshmixer	22
3.3 Obtener el modelo base.....	25
3.3.1 Programas CAD	26
3.3.2 Dimensionado correcto.....	27
3.4 Cuerpo de la férula	30
4. Algoritmos de optimización y simulación.....	36
4.1 Hipótesis simplificativas	37

4.1.1 Movimientos y fuerzas	37
4.1.2 Palanca de 3º género	38
4.1.3 Tipo de material considerado	39
4.2 Optimización topológica	39
4.2.1 Explicación, aplicaciones	39
4.2.2 Características de la simulación mecánica [30]	40
4.2.3 Análisis de tensiones	50
4.3 Diseño generativo	51
4.3.1 Explicación, aplicaciones	51
4.3.2 Parámetros de diseño generativo [30].	53
4.2.3 Comparación entre métodos	65
4.4 Otras formas de optimizar	65
4.4.1 Patrón Voronoi	65
4.4.2 Architected Material	67
5. Impresión 3D	69
5.1 Sujeciones	69
5.2 Configuración para imprimir	72
5.3 Post procesado	74
6. Conclusiones	76
6.1 Colocación, ventajas e inconvenientes.	76
6.2 Trabajo futuro, mejoras, rentabilidad	77
7. Bibliografía	78

1. Objetivos y metodología

1.1 Objetivos

El presente proyecto nace con la motivación de aprender y aplicar dos algoritmos de diseño. La optimización topológica y el diseño generativo. Para ello se podrían utilizar sobre una pieza ya existente o en un ámbito conocido. Sin embargo, se ha elegido el ámbito de la ortopedia, donde hay referencias suficientes para poder seguir un procedimiento establecido en las primeras fases del diseño, pero donde no es tan común la aplicación de estrategias propias de la ingeniería.



figura 1 férula de antebrazo realizada con impresión 3D

Para poder aplicar tales algoritmos se diseñará y fabricará una férula de retención de muñeca con una impresora 3D. Los objetivos a cumplir son los siguientes:

1. Obtener un modelo de una mano:

Para comenzar a diseñar la férula se necesitará un paciente virtual sobre el que poder trabajar con medidas reales. El primer objetivo será conseguir un duplicado digital de la mano real.

2. Aplicar la Optimización topológica:

La optimización topológica es un algoritmo de diseño que permite optimizar una geometría existente. Para ello será necesario diseñar una primera férula con la que comenzar

la optimización. El segundo objetivo será optimizar la geometría para reducir la masa por medio de esta técnica.

3. Aplicar el Diseño generativo:

El diseño generativo es un nuevo algoritmo de diseño que incorpora las últimas actualizaciones de algunos programas CAD. A diferencia del anterior, genera una geometría casi desde cero. Por ello el tercer objetivo será volver a diseñar una nueva férula aplicándolo.

4. Fabricar la férula mediante Impresión 3d:

Una vez acabada la fase de diseño, se tomará como último objetivo la fabricación de la férula realizada por diseño generativo.

1.2 Metodología:

1.2.1 Documentación

Para comenzar, se hará una búsqueda bibliográfica del estado de la ortopedia para conocer las distintas metodologías y dispositivos utilizados para tratar fracturas y malformaciones del cuerpo. Este estudio preliminar dará paso a poder realizar una serie de hipótesis simplificadoras que permitan reducir a unos pocos movimientos la movilidad de la mano y de la metodología seguida para simular materiales usados en impresión 3D.

1.2.2 Diseño

El procedimiento para aplicar cualquier técnica de optimización del diseño comienza por tener un modelo 3D sobre el que trabajar. Seguiremos el caso de un paciente hipotético que necesite el tratamiento de una fractura de mano. Por ello se van a valorar las distintas alternativas que permitan obtener una medida real de las dimensiones de una mano. Pero finalmente se conseguirá un modelo digital a través de escaneado con aplicaciones de Smartphone. Sobre él se realizarán las modificaciones pertinentes hasta que sea apto para pasar a trabajar con un programa CAD ya que habrá que realizar modificaciones en la malla.

Una vez tengamos el modelo 3D de la mano se empezará a trabajar con un programa de diseño CAD. Se deberá corroborar que estamos utilizando la escala correcta mediante la comparación del modelo con una fotografía de la mano real. Entonces se podrá comenzar a diseñar la férula. Un primer cuerpo que sirva como base para poder pasar a aplicar la optimización topológica. Se buscará como criterio de optimización mantener la rigidez al máximo para una reducción de masa dada. Y posteriormente se hará necesario un análisis de tensiones para estudiar que la nueva férula cumple estructuralmente. Con esto se tendrá

un primer diseño válido para comenzar la fase de fabricación. Pero en su lugar se buscará diseñar un segundo modelo mediante diseño generativo.

A diferencia de la optimización topológica, este permite elegir el método de fabricación que se pretende utilizar, así como el material. También nos permite seguir un criterio de rigidez, masa y desplazamiento, así como un factor de seguridad de antemano. Esto es debido a la idiosincrasia del método. Que a diferencia del anterior no necesita un modelo base para optimizar, sino una geometría inicial sobre la que aplicar esfuerzos y modificaciones de la geometría en un proceso iterativo. Lo que permite simular y comparar simultáneamente alternativas de diseño. Tanto en geometría como en propiedades mecánicas.

Ambos métodos serán comparados y adicionalmente se explorarán otros métodos posibles pero descartados con los que se podrían conseguir resultados similares. Ya sea por ser demasiado sencillos de aplicar o demasiado complejos.

1.2.3 Fabricación

Por último, de cara a la fabricación se hará necesario estudiar la posición y tipos de sujeciones para mantener unidas las dos mitades de la férula y pasar a un programa que permita generar el código G de la impresora 3D. Tras la fabricación será necesario un posprocesado de las piezas y con ello se dará por finalizado el proyecto.

2. Introducción

La ortopedia es la rama de la medicina destinada a deformaciones o anomalías del cuerpo mediante ejercicios, prótesis, aparatos o cirugía.

A lo largo de la historia son numerosos los utensilios utilizados para recuperar o sustituir estas funciones del cuerpo perdidas y su diseño siempre ha estado condicionado por las técnicas de fabricación conocidas en ese momento. Pero con la aparición de tecnologías digitales y fabricación aditiva se ha abierto el camino a rediseñar estos dispositivos a pesar de contar con miles de años de antigüedad.

2.1 Historia de la ortopedia

La historia del tratamiento de fracturas y malformaciones se pierde en la prehistoria, pero es interesante hacer un repaso por la evolución de los tratamientos y las causas que motivaron.

De acuerdo con [1], se puede suponer que desde la prehistoria se han realizado técnicas básicas medicinales para aliviar dolores y heridas como inmovilizar con vendas o aplicar calor. También amputaciones para desechar partes del cuerpo imposibles de rehabilitar

en aquel momento. Pero no erramos al decir que estaban condicionadas por creencias y supersticiones.

Para buscar los primeros escritos que aporten documentación debemos dirigirnos al mundo antiguo, donde en la zona del mediterráneo surgen las primeras grandes civilizaciones, en las que nos centraremos sin entrar en India y China.

En Egipto se han encontrado férulas rudimentarias de caña y madera junto a momias. Además, tenemos el primer registro del uso de una muleta en un grabado del 2830 a.C. así como numerosos papiros explicando detalles sobre fracturas óseas y tratamientos de la época.

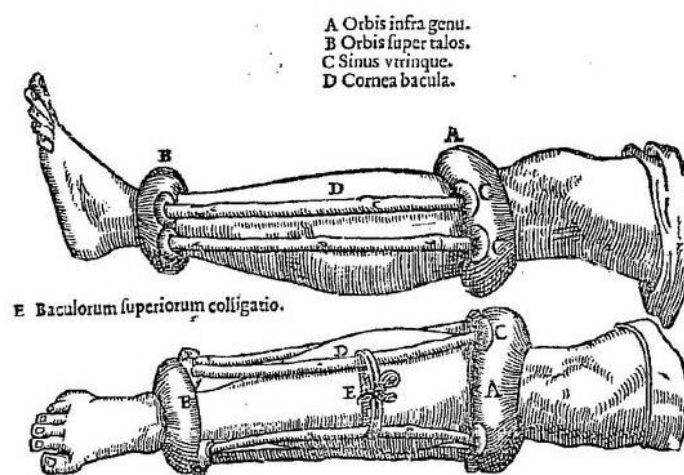


figura 2: registros de muletas utilizadas en el año 2830 a.C

En Grecia comienza a aparecer un primer enfoque científico de la medicina. Hipócrates (460-370 a.C.) escribe sobre la inmovilización mediante férulas de vendajes, que, impregnados en resinas y ceras debían ir cambiándose cada pocos días para volver a ajustar la presión. También describe las buenas prácticas médicas como la higiene y una clasificación del instrumental quirúrgico de la época. Sus aportaciones serán difundidas gracias al imperio romano y tendrán vigencia los siguientes 2000 años.

Ya en el imperio Romano cabe destacar a Galeno (129-199 d.C), un cirujano de gladiadores que prefirió aplicar tratamientos más cercanos a la fisioterapia que a la cirugía.

Con aportaciones sobre inmovilización de miembros, pero por primera vez realizando un estudio de la anatomía del cuerpo.



Estensione della frattura della gamba mediante un apparecchio fatto di anelli e bastoncini (III, 29).

figura 3: férula usada en el Imperio romano descrita en un tratado medieval

Tras la caída del imperio romano de occidente, la siguiente gran civilización que aportó a la medicina fueron los árabes. Se piensa que Rhazés (850-923 d.C) fue el primero en introducir el yeso en el tratamiento de fracturas. Abulcasis (936-1013 c.C), nacido cerca de Córdoba ya utiliza el yeso de manera recurrente además de acolchar las ya usadas férulas de madera.

Pero en general en occidente fue una época de estancamiento del conocimiento científico. Se retornó a la medicina popular e interpretaciones religiosas de los sucesos. Todo ello hasta el siglo XII, donde aparecen las primeras universidades y hospitales cristianos, junto a la influencia árabe se comienza una transmisión permanente del conocimiento médico. Comenzando por ejemplo en Salerno (1224) un periodo de estudio teórico y otro práctico de un año para ejercer como médico. Sin embargo, seguían ejerciendo los artesanos hábiles en el manejo de herramientas.

El punto de ruptura llega con el renacimiento, donde se dejan atrás las teorías de Galeno para comenzar un riguroso estudio de la anatomía humana. Destacamos a Ambrosio Paré (1510-1590), que fue cirujano del ejército francés. Además de sus escritos destaca el hecho de describir cómo trató su propia herida abierta para evitar la amputación, y diseñar junto a herreros prótesis de hierro, corsés y avances en el instrumental ortopédico. También Nicholas Andry (1658- 1759), decano de la universidad de París utilizó por primera vez la palabra Ortopedia, que tenía por objetivo corregir deformidades infantiles (ortos-derecho y

paidos-niño) y el símbolo por el que se identificará esta rama de la medicina, un árbol torcido con un dispositivo corrector. Pero es en el siglo XVIII donde ya aparece el primer hospital especializado en ortopedia a manos de Jean-Andre Venel (1740-1791).

En los siglos XIX y XX aparece la anestesia, los rayos x y el efecto de los microorganismos está aceptado. Los cirujanos están considerados una especialidad de la medicina y su profesión se enseña en universidades con evaluación de competencias. Es aquí donde aparecen instrumentos hasta hoy utilizados como la férula de Thomas, creada por Hugh Owen Thomas (1834-1891), que disminuyó la tasa de mortalidad de heridas de fémur del 80 al 20% en la primera guerra mundial. Pero la capacidad ahora real de acceder al interior del cuerpo permite el uso de placas, tornillos, alambres como fijación o la sustitución directa de huesos por prótesis metálicas.



figura 4: férula de Thomas

2.2 Diferencia entre férula órtesis y prótesis

Los dispositivos médicos utilizados para restaurar o sustituir funciones del cuerpo humano pueden ser muy variados. Pueden ser externos o internos y tener como objetivo desde restringir la movilidad de una pequeña zona, hasta suplir por completo la falta de un miembro. Por ello, en ortopedia se hace necesaria una clasificación. Lo más habitual es separar las categorías por la función que realizan.

2.2.1 Férula:

Las férulas son dispositivos externos no invasivos que tienen como objetivo mantener partes del cuerpo móviles en una posición fija deseada. Consiguen detener los efectos de una lesión para comenzar el tratamiento o la recuperación natural del cuerpo. Son fabricadas a

medida del paciente de manera que sea el propio el que pueda retirarla, en yeso o plástico normalmente. [2], [3]



figura 5: férula

2.2.2 Órtesis:

Una férula buscaba inmovilizar, pero existen casos en los que es necesario aplicar una fuerza sobre partes del cuerpo o reconducir las que el cuerpo genera sobre sí mismo. Es decir, cuando se busca modificar el sistema locomotor se utilizan órtesis. Que se pueden clasificar en estabilizadoras, si inmovilizan (las férulas son un tipo de órtesis), o funcionales si permiten algo de movilidad. [4].



figura 6: órtesis

2.2.3 Prótesis

Las prótesis son dispositivos externos que buscan sustituir una función corporal. Donde a diferencia de las anteriores si reemplaza la parte del cuerpo. Son utilizadas cuando el paciente ha sufrido una amputación o se necesita recuperar una función degenerada por causas naturales o accidentales.

Se suelen clasificar en base a tres factores. Uno es el material, otro es el modo de colocación (endoprótesis si necesita cirugía o exoprótesis si se coloca en la superficie) y el último es la cantidad sustituida (parciales o totales). [5], [6].



figura 7: prótesis

2.3 Férulas impresas en 3D

Las técnicas de fabricación se pueden dividir en sustractivas y aditivas.

Las sustractivas parten de un bloque de material y por medio de esfuerzos mecánicos se elimina o corta parte de él hasta conseguir la geometría deseada. Son los casos del torneado o fresado, por ejemplo. Que han podido actualizarse por medio de máquinas de control numérico que automatizan la tarea y son capaces de replicar exactamente un modelo virtual.

Las aditivas por otro lado se han limitado a la inyección de plástico o fundición, por ejemplo, que a menudo son la manera más rentable de generar la pieza. Sin embargo, la aparición de la impresión 3D supone unir la fabricación aditiva con el control numérico. Permitiendo generar piezas directamente a partir de un modelo diseñado en software CAD, sin necesidad de moldes. [7].

2.3.1 Tecnologías de impresión 3d

Las tecnologías de impresión 3D han crecido en número hasta el punto de poder fabricar una pieza en casi cualquier material. Sin embargo, por las limitaciones debemos estudiar solamente las que son accesibles a nivel doméstico. Siendo la parte menos importante de este proyecto ya que se podría repetir la fabricación con impresoras preparadas para materiales más resistentes [8].

2.3.1.1 FDM

La deposición por filamento fundido es una de las tecnologías de impresión 3D más extendidas. Consiste en calentar una bobina de material termoplástico hasta su punto de fusión y extruirlo a través de una boquilla formando capa sobre capa con un movimiento controlado dado por el G-code.

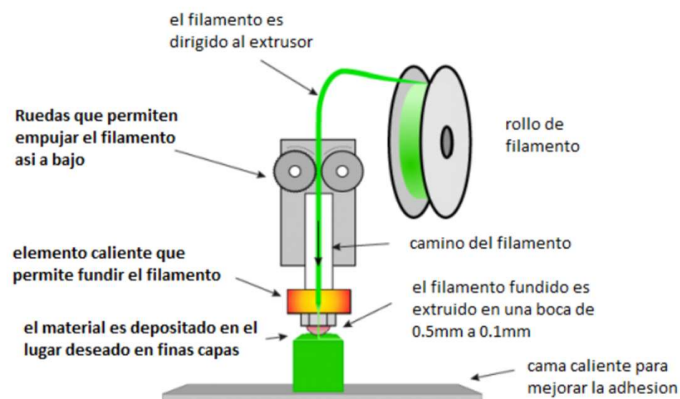


figura 8: esquema de funcionamiento de la impresión FDM

Este código debe ser generado en un laminador. Un software que permite configurar los parámetros de impresión como la velocidad, temperatura o altura de capa entre otros.

El acabado superficial depende directamente de esta altura de capa. Con una boquilla de mayor diámetro el material es capaz de ser extruido en mayor tamaño, lo que reduce el tiempo de impresión, pero a costa de un acabado donde se observan estos saltos de capa.

No suele ser posible imprimir en ángulos mayores a 45° en voladizo ya que el material cae por gravedad sin poder adherirse a las capas inferiores, lo que hace necesario la impresión simultánea de estructuras de soporte que deben ser removidas una vez terminada la impresión, afectando también al acabado de la pieza. [9], [10].

2.3.1.2 SLA

La estereolitografía consiste en utilizar un láser que, al impactar sobre la resina líquida, esta queda solidificada.

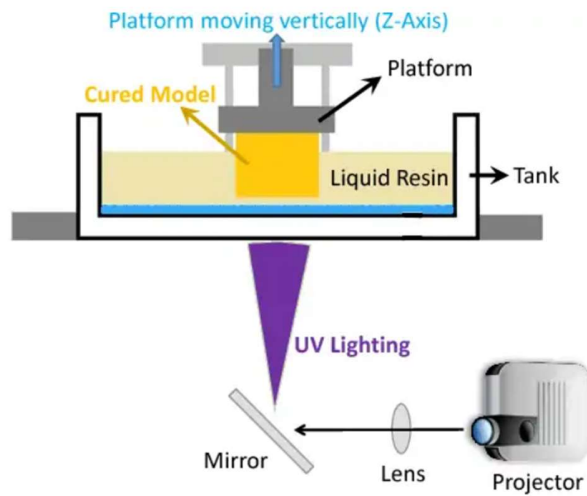


figura 9: esquema de funcionamiento de la impresión SLA

La precisión alcanzada con esta tecnología es superior a la FDM consiguiendo detalles imposibles para esta y con un acabado superficial liso. Por ello se utiliza en industrias como la odontología, la joyería o la fabricación de moldes.

Existen otras tecnologías derivadas, como la SLS, donde se utiliza polvo en lugar de resina, o la LCD donde se utiliza una pantalla LCD para fotopolimerizar la resina con la que está en contacto.

El proceso para imprimir es similar al seguido en FDM. Se prepara un modelo 3D y con un software de laminado se genera el GCODE. A continuación, la cama de impresión debe llenarse parcialmente de resina.

La pieza se va generando capa por capa a medida que la luz solidifica el líquido. La cama asciende hasta la altura de la siguiente capa, que en estos casos es mucho menor que en las de filamento fundido, lo que otorga el acabado superficial superior tan característico de esta tecnología. Cabe destacar que los modelos deben imprimirse inclinados ya que se reduce la sección que se solidifica en cada capa. Así se garantiza que la fuerza generada al subir no despegue la base de la pieza.

Tras terminar la impresión, necesita un posprocesado de limpieza. Las resinas utilizadas son tóxicas y se recomienda suficiente ventilación y el uso de mascarilla. Tras lavarla en alcohol o productos específicos necesita una exposición a radiación ultravioleta que termine de solidificar las capas externas de la pieza. También se debe hacer en el interior, taladrando o añadiendo agujeros en el diseño para evitar que en el interior permanezca resina líquida. [11], [12].

2.3.2 Materiales

Los materiales utilizados en impresión 3D son muy numerosos. Se han diseñado suficientes variedades para tener una amplia gama de propiedades mecánicas, texturas, características estéticas. Aquí nos vamos a centrar en los más comunes que son de interés para nuestro caso, ya que la variedad es tan amplia que se pueden encontrar filamentos y resinas de metales, maderas, con propiedades flexibles, fluorescentes etc.

2.3.2.1 PLA

El ácido poliláctico es uno de los plásticos más utilizados en impresión 3D. Su producción deriva de la fermentación de almidones de maíz, arroz o caña de azúcar entre otros para extraer ácido láctico, del que está compuesto el PLA. De esta manera se obtiene un termoplástico sostenible que puede ser biodegradable bajo ciertas condiciones.

Se utiliza mayormente en forma de bobinas de filamento que funde a una temperatura cercana a 200°C, siendo uno de los materiales más fáciles con los que trabajar en este campo.



figura 10: bobina de filamento de PLA

Sin embargo, sus propiedades mecánicas son insuficientes para resistir grandes esfuerzos. Dependerá de la cantidad de relleno aplicado al interior de la pieza en el momento de imprimirla. Por ello este material es a menudo usado para decoración, figuras, juguetes ya que eliminar los soportes es relativamente sencillo. Y aunque es biocompatible, a menudo está mezclado con otros componentes por lo que, aunque se utiliza en la industria alimentaria como envases, no se recomienda cuando va a calentarse.

En cuanto al posprocesado, es posible eliminar la rugosidad superficial con técnicas de abrasión como pintarlo con resina epoxi y lijarlo. Pudiendo conseguir un acabado liso, aunque limitándose al prototipado y alejándose de la fabricación en serie. [13].

Este será el material utilizado en la fabricación.

2.3.2.2 ABS

El acrilonitrilo butadieno estireno es un polímero termoplástico es otro de los materiales más comunes usados en impresión 3D. La polimerización de estos tres monómeros da lugar a unas propiedades mecánicamente superiores a las del PLA.

Es algo más difícil de imprimir que el PLA ya que funde a temperaturas cercanas a 260°C, que a menudo son dañinas para algunos componentes de la impresora. Lo que puede obligar a preparar la máquina previamente. Además, el ABS debido a que es muy sensible a los cambios de temperatura necesita una cama de impresión precalentada además de protegerlo de corrientes de aire cerrando la impresora con un cajón aislante.

En cuanto al pos procesado a diferencia del PLA, el ABS puede ser derretido ante la presencia de químicos domésticos. Por lo que una práctica común es exponerlo en cortos periodos a vapores de acetona para derretir la capa más superficial de la pieza. Consiguiendo así un acabado liso que no puede conseguirse con otros materiales.



figura 11: comparación de PLA (izquierda) frente a ABS con acetona (derecha)

Su uso está muy extendido en la industria del automóvil, electrodomésticos y juguetes ya que puede durar años sin presentar cambios ni deformaciones. [14].

2.3.2.3 Resina

Tanto si utilizamos tecnología SLA como LCD, el proceso siempre pasa por provocar una polimerización de la resina. El parámetro determinante a la hora de caracterizarlas es la longitud de onda a la que responden a la luz. Necesitando la máquina más o menos potencia, o variar el tiempo de exposición hasta solidificarla.



figura 12: comparación del acabado superficial

En cuanto a características mecánicas, las que están disponibles para uso doméstico son frágiles y necesitan de un curado posterior siendo sometidas a luz ultravioleta para detener por completo las reacciones. Sin embargo, existen multitud de resinas de distintos fabricantes que varían enormemente las propiedades. Como las transparentes, las lavables al agua o las flexibles.

Pero las de uso industrial tienen propiedades muy superiores. Como las termoresistentes, que soportan elevadas temperaturas, las calcinables, útiles para la fundición a la cera perdida, donde en este caso se sustituye la cera por resina, que sirve para generar el modelo, pero deja paso al metal fundido o las dentales, que a diferencia del resto no son tóxicas [15].

3. Diseño

Una vez estudiada la metodología a seguir debemos obtener un modelo de una mano real sobre la que trabajar. Para ello estudiaremos el proceso convencional y alternativas que nos permitan trabajar con programas CAD. Donde trabajaremos el resto del proyecto hasta conseguir el modelo final.

3.1 Medidas

Tradicionalmente era necesario medir sobre el paciente o utilizar patrones, sin embargo, la técnica manual ha dado paso al uso del escáner 3D.

3.1.1 Antropometría

Para la fabricación puede ser necesaria la elaboración de un patrón, dibujando la geometría en otro material antes de trasladarla al que será definitivo.

Si se prescinde de él, se debe contar con una plantilla ya cortada que se adapta a la forma de la mano y tan solo necesita ser recortada para adaptarse al paciente concreto. Pero en el caso de usarlo se consigue un resultado exacto que no depende de la experiencia del terapeuta ya que usualmente se elabora dibujando en una hoja de papel el contorno de la mano y se traslada a un material termoplástico.

Otra manera de conseguir la medida es obtener un positivo de la mano en yeso sobre la que se colocan capas de cuero o microfibra. Dado que debe dejarse secar, es un método utilizado cuando la enfermedad es crónica y la vida útil de la férula debe ser larga [36].

3.1.2 Escaneado

Con la aparición de técnicas digitales, se puede conseguir un modelo preciso de la parte del cuerpo deseada.

La manera más común de obtener un modelo es mediante el uso de un escáner 3D. Donde se rodea el objeto para generar una malla. Sin embargo, el precio de estos escáneres es elevado. Por ello en este proyecto se han buscado alternativas para obtener dicha malla. Con ventajas, pero también problemas que se detallarán a continuación.

- **Scaniverse:**



Ilustración 1: logo de Scaniverse

Se eligió esta App ya que promete un escaneo muy parecido al realizado por un escáner 3D, pues su intención es utilizar el sensor LiDAR (Light Detection And Ranging) de un Smartphone o Tablet para realizar la misma función. El sensor LiDAR emite luz infrarroja y mide el tiempo que tarda en retornar, de esta manera calcula distancias y consigue un mapa de profundidad. A pesar de realizarse desde un dispositivo sin LiDAR, tras muchos intentos el resultado fue satisfactorio.



figura 13: resultado 1 de SCANIVERSE

Sin embargo, aunque en un primer vistazo el resultado parece correcto, tiene errores geométricos, apreciables al intentar trabajar con la malla.

Un segundo intento arroja otra malla. Esta vez tiene errores en el antebrazo y dimensiones de los dedos. Pero es suficiente para el objetivo de este proyecto.

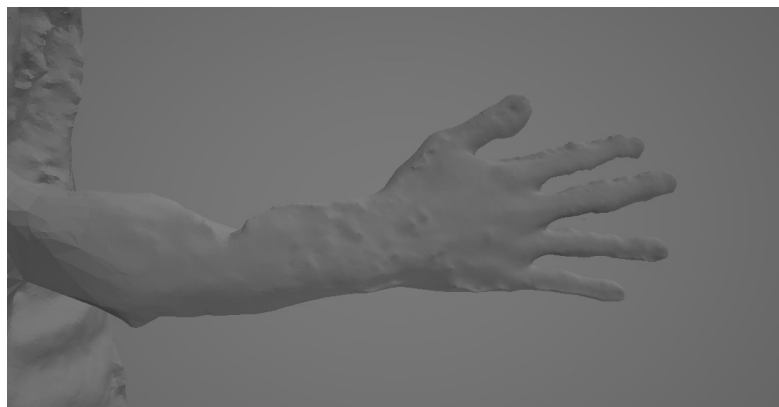


figura 14: resultado 2 de SCANIVERSE

- **Kiri engine:**



Ilustración 2: logo de Kiri engine

Mediante fotogrametría, esta App permite realizar una gran cantidad de fotografías (hasta 70 en la versión de prueba) que el programa convertirá en malla. Después de varios intentos, se ha obtenido una malla aceptable.

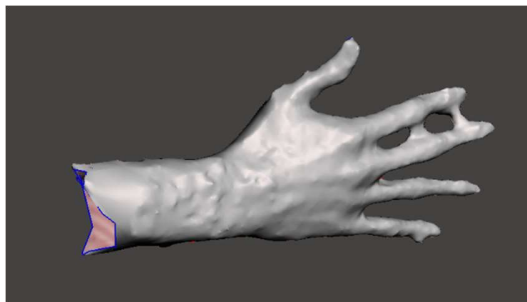


figura 15: resultado de KIRI ENGINE

- **Otras alternativas planteadas:**

- **Kinect:**



figura 16: Kinect

Kinect es un dispositivo creado por Microsoft para el control de videojuegos utilizando los movimientos del cuerpo como sustituto de un mando. Se lanzó en 2010 para la videoconsola Xbox 360 y tras unos años en el mercado lanzaron una revisión que mejoró las prestaciones.

Combina cámara RGB, sensor de profundidad e infrarrojos para obtener una captura del movimiento que hay frente a él. Con el paso del tiempo la comunidad ha preparado

software específico para utilizarlo como escáner 3D. Los resultados pueden ser muy cercanos a un escáner 3D convencional. Pudiendo encontrar numerosos estudios utilizándolo para rehabilitación, robótica, impresión 3D y muchas otras aplicaciones para las que no fue diseñado originalmente [21].

Para este proyecto se trató de usar el primer modelo para escanear la mano. Sin embargo, este modelo es demasiado antiguo y los resultados carecían de resolución. Se generó un modelo tosco que no guardaba ningún detalle. Por ello se desistió del método tras pocos intentos.

- **Xkelet:**



Ilustración 3: logo de Xkelet

Xkelet es una empresa española que se dedica a la impresión 3D de férulas de diseño propio. Pero su éxito radica en el software propio que utilizan para obtener los modelos pues desde un dispositivo iPhone o iPad con su app Xkscan cualquier persona es capaz de escanear distintas partes del cuerpo. El modelo 3D generado pasa directamente a la empresa, desde donde se imprime [20].



figura 17: férula de la empresa Xkelet

Dado que el uso de esta aplicación no tiene versión de prueba y no se dispone del modelo para trabajar con él, también se desechó esta alternativa. Pues el objetivo de este proyecto es aplicar los algoritmos de mejora del diseño y no fabricar la férula en sí.

- **Gaussian splatting:**

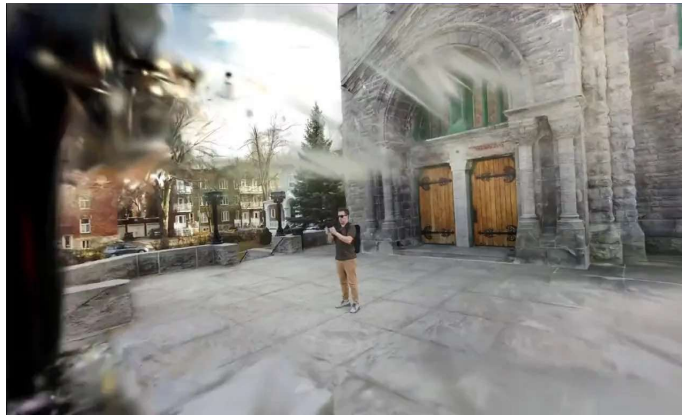


figura 18: Gaussian splatting

Durante la etapa de escaneo se probaron multitud de las apps disponibles en el momento. Pero hay dos que merecen ser destacadas, son LumaAI y Poly-Cam. En un principio se utilizaron para obtener un modelo 3D tal y como las anteriores. Pero el resultado no fue el deseado. Aplicaban la técnica de la fotogrametría y no destacaban por encima del resto.

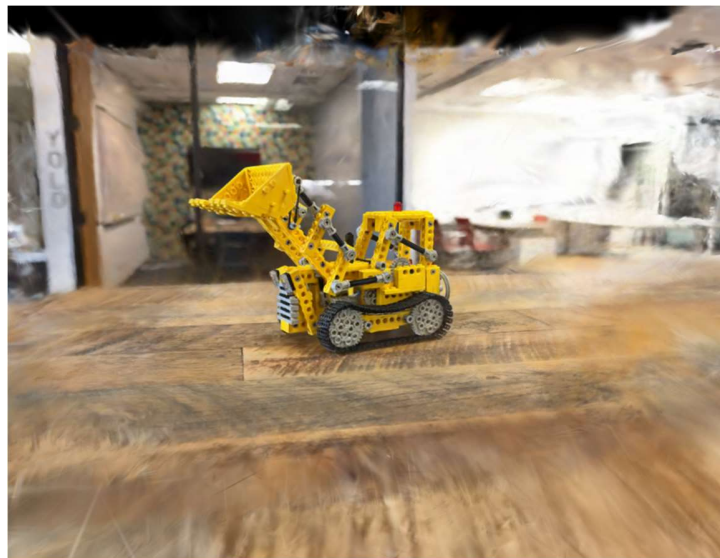


figura 19: Gaussian splatting de LumaAI

Sin embargo, ha aparecido una nueva metodología que promete resultados superiores al resto llamada Gaussian Splatting, pues se basa en la distribución gaussiana para asignar a cada imagen 2D unos valores que representen la posición, color, covarianza y transparencia.

Tras ser tratados los datos con machine learning se obtiene una representación tridimensional del objeto fotografiado.

Representa una gran ventaja respecto a todas las alternativas ya que las imágenes para alimentar el algoritmo pueden ser extraídas directamente de un video, lo que le da mucha más versatilidad que un escáner 3D convencional. La manera de fotografiar puede ser la misma que con la fotogrametría, pero los resultados son superiores por lo que este nuevo método va a ir sustituyendo al primero. Y aunque existían otras líneas de investigación como la tecnología NeRF de Nvidia, esta requiere mucho menos tiempo de procesamiento.

Por todo ello está siendo rápidamente incorporada en programas de diseño 3D y motores de videojuegos. Ya que de seguir trabajando la compatibilidad se puede convertir en el estándar del escaneo 3D [22].

Volviendo a Kiri engine, durante la realización de este proyecto ya se ha actualizado para incorporar este método. Sin embargo, no está lo suficientemente desarrollado aún para poder extraer de él una malla con la que trabajar por lo que se descartó la opción.

3.2 Limpieza con Meshmixer

Finalmente se ha escogido el segundo modelo obtenido con Scaniverse. A continuación, necesita ser tratado en un programa de edición de malla.

Se ha escogido Meshmixer [23] de la empresa Autodesk por ser uno de los programas dominantes del sector. Principalmente por ser gratuito a todos los niveles, por lo que goza de una amplia comunidad y documentación. Está específicamente diseñado para manejar mallas 3D ya que permite modificarlas, repararlas, cortarlas etc siempre que se le dé un modelo base. Si bien puede ser utilizado para crear la férula, este paso lo haremos posteriormente en otro programa de diseño paramétrico donde no haga falta la intervención manual.



Ilustración 4: logo de Autodesk Meshmixer

Lo primero es cargar la malla en el programa. Con la herramienta de selección se marca la zona sobre la que se desea trabajar.

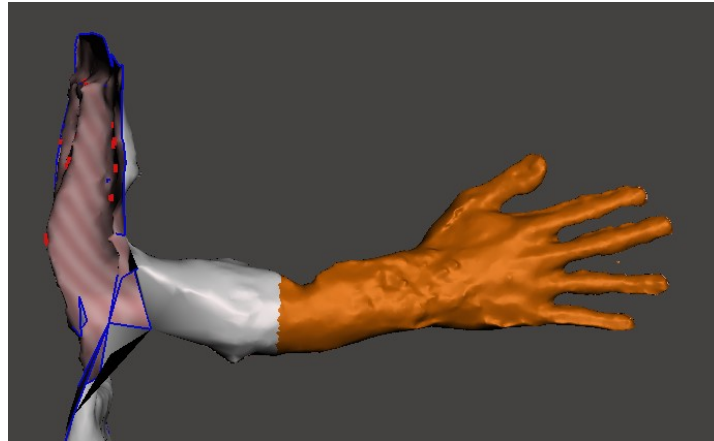


figura 20: selección de la zona deseada

Una vez seleccionada, se separa del cuerpo principal para ser un objeto independiente. De esta manera conseguimos reducir la zona de trabajo eliminando la zona del antebrazo y torso ya que carece de interés.

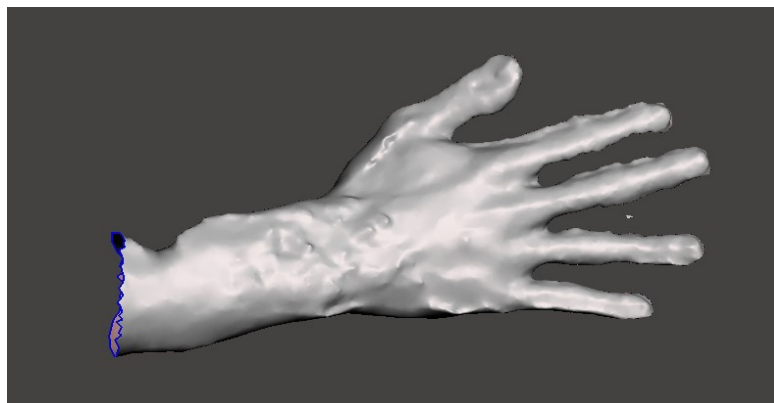


figura 21: se aísla la zona de trabajo

Este proceso puede generar fallos en la zona de rotura. Es conveniente utilizar antes de continuar la herramienta inspeccionar, que automáticamente detecta y corrige los fallos derivados del corte.

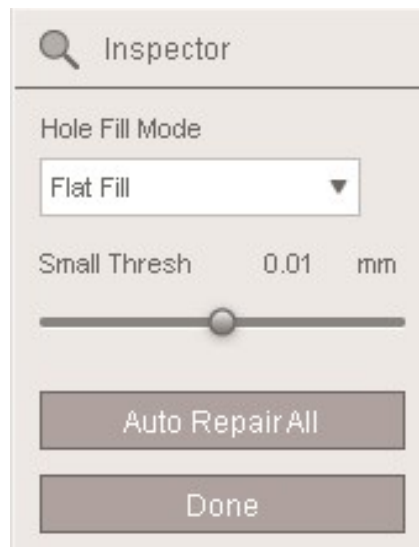


figura 22:herramienta inspeccionar

Si pasamos a visualizar la malla podemos ver que no es uniforme. Además, al ser demasiado grande cualquier cambio aplicado con las herramientas de esculpido podría afectar solo a polígonos aislados, siendo difícil su manejo. Más tarde abordaremos este problema.



figura 23: malla irregular

Hasta ahora se está trabajando con la malla conseguida en el proceso de escaneo. Pero es conveniente volver a realizar la malla. De esta manera podríamos cambiar la cantidad de polígonos o la forma de estos. Por el momento es suficiente con generar una malla uniforme.

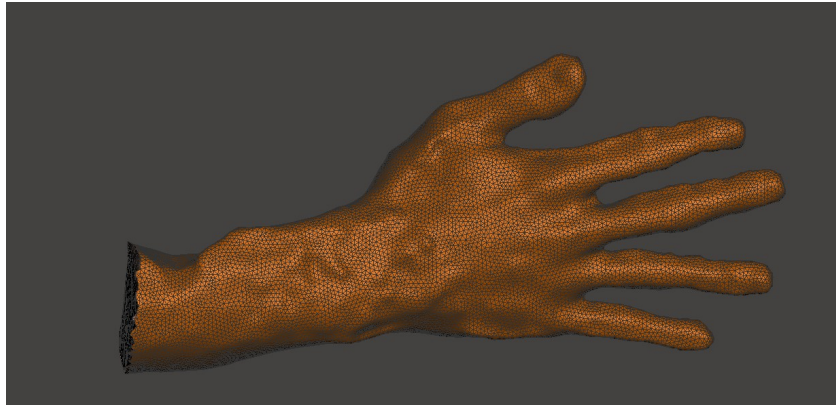


figura 24: malla uniforme

La malla ya está lista para utilizar las herramientas de esculpido. Con ellas, de manera manual, se ha suavizado la geometría, se han eliminado artefactos y rellenado el hueco del antebrazo. Quedando así un objeto 3D totalmente manejable

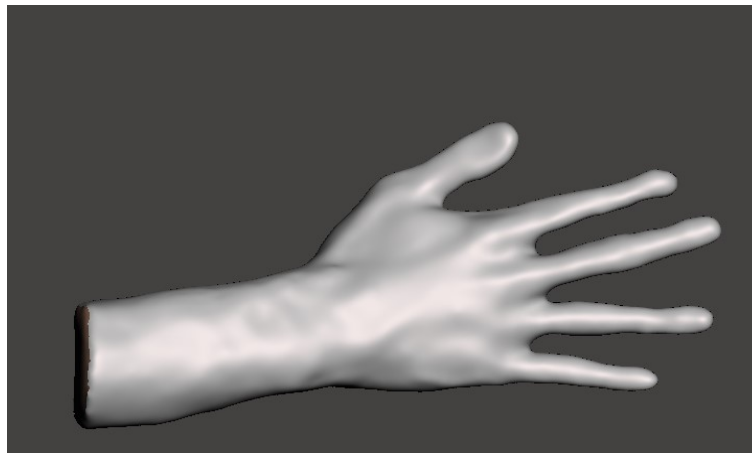


figura 25: esculpido sobre la malla

3.3 Obtener el modelo base.

Como se comentó, no se realizará la férula con Meshmixer, aunque solo habría seleccionar una zona y extruirla el interés de este proyecto es aplicar algoritmos de optimización del diseño, por lo que el siguiente paso es trasladarlo a un programa CAD.

3.3.1 Programas CAD

- **Fusion 360:**



Ilustración 5: logo de Fusion360

Es un programa CAD de la empresa Autodesk orientado al diseño de productos desde el inicio hasta el final. Es decir, que permite diseñar, realizar simulaciones de tensiones, análisis térmicos, simulaciones de eventos, preparar la estrategia de mecanizado o corte y obtener los planos. También realizar animaciones y renderizados del producto. Aunque también permite realizar ensamblajes y aplicar movimientos controlados, no es tan eficaz en este aspecto como su contraparte Inventor, de la misma compañía.

Su gran atractivo destaca en su versión gratuita. Ya que para estudiantes, aficionados y empresas que no facturen más de 100.000\$ al año la licencia de uso no tiene coste, lo que permite ser una herramienta recurrente que tener en cuenta. Por ello será el programa a utilizar [24].

- **Ntopology:**



Ilustración 6: logo de Ntopology

Es un software de diseño creado en 2015 por la compañía del mismo nombre. Su finalidad es poder crear cualquier geometría sin que el diseñador se encuentre limitado por la herramienta [25].

Su funcionamiento es distinto a otros programas CAD. No se trabaja con sólidos si no que se debe importar de otro programa externo previamente diseñado. Entonces el programa lo convierte en un cuerpo implícito, definido por una ecuación. Esta ecuación se va colocando en bloques, unos dentro de otros. Por ejemplo, un primer bloque importa la malla, se lleva a un segundo bloque donde se corta, en un tercero, se ahueca, y a su vez esta cadena podría

ser por ejemplo un relleno para otra parte de la cadena de bloques. De esta manera se va modificando esta ecuación sin tener que renderizar ningún objeto 3D, lo que agiliza el cálculo.

En él se pueden realizar simulaciones de tensión, optimización topológica, diseño generativo y diseños lattice que son difíciles de manejar con cualquier otro software.

El único inconveniente es que la curva de aprendizaje es elevada, siendo necesaria la formación que proporciona la compañía. Tras probarlo un tiempo se tuvo que desechar esta opción por ser demasiado compleja para los objetivos de este proyecto.

- **Grasshopper:**

Rhinoceros 3D fue en sus orígenes un complemento de AutoCAD, de la empresa Autodesk. Pero tomó un camino propio convirtiéndose en un software CAD.



Ilustración 7: logo de Rhinoceros

En 2007 se incorporó como plug-in la herramienta Grasshopper. En ella se trabaja con representaciones matemáticas en forma de cajas. Estas se van uniendo en un diagrama de nodos que forma un algoritmo de diseño. Capaz de crear la pieza, modificarla y preparar el código para su fabricación por impresión 3D.



Ilustración 8: logo de Grasshopper

Sería una opción viable de cara a fabricar férulas en serie. Sin embargo, no cuenta con una versión de prueba gratuita que permita experimentar y aprender con él, por lo que se ha descartado como opción de diseño [26], [27].

3.3.2 Dimensionado correcto

Una vez nos hemos decantado por Fusion360. Importamos la mano, pero el programa detecta dos mallas. El primer paso será combinarlas.

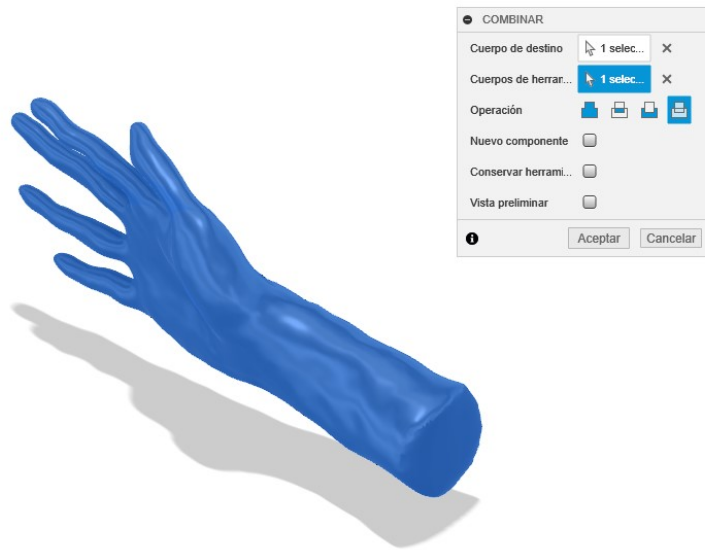


figura 26: herramienta combinar

Fusion360 advierte que demasiados polígonos alargarán el tiempo de cálculo. Tan solo tenemos que reducir el tamaño de la malla, para que esté formada por menos polígonos. Perderá resolución, pero es la única manera de poder trabajar con fluidez.

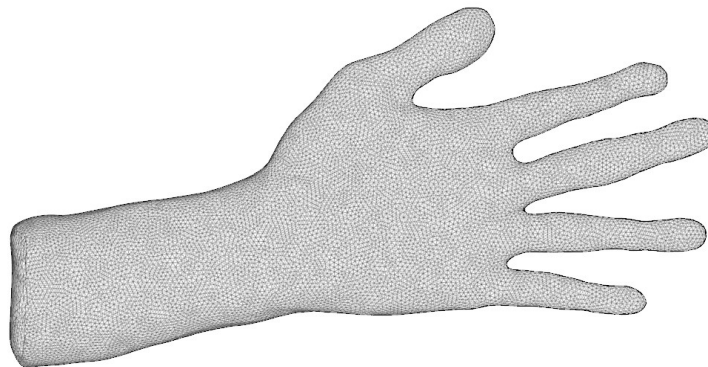


figura 27: malla demasiado densa

De la malla de la figura 27 pasamos a la malla de la figura 28.

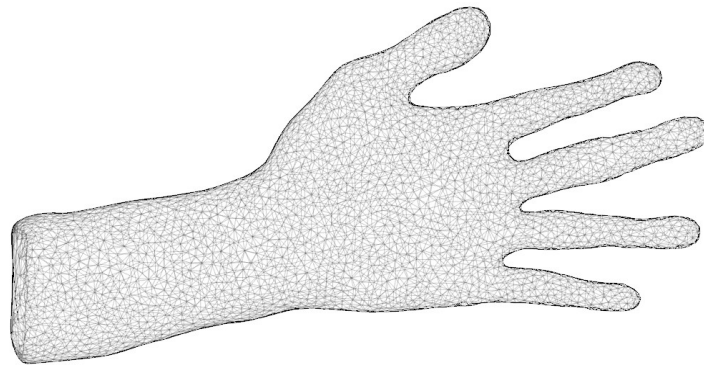


figura 28: malla aligerada

Uno de los problemas de no haber utilizado un escáner es que las dimensiones del objeto no son reales. Se intentó corregir el problema realizando nuevos escaneos junto a un objeto de dimensiones conocidas. Por ejemplo, se utilizó un cubo de 10x10x10 mm pegado a la mano para que, dimensionando este la mano quede en la escala correcta. Sin embargo, otro método resultó más efectivo.

Se ha optado por tomar fotografías de la mano real junto a una regla. De esta manera se trasladan al programa con la opción de lienzo para colocarlas sobre los planos de referencia y se escala indicando la distancia entre dos puntos. Como conocemos las dimensiones de la regla, la mano también escalará a sus dimensiones correctas.

Procedemos a realizar las fotografías de la mano, pero se debe tener cuidado con la perspectiva porque deformaría la escala. A pesar de poder utilizarse una para cada plano de referencia, con utilizar la frontal es suficiente.



figura 29: lienzo de la mano

Ahora podemos superponer el modelo 3D hasta hacerlos coincidir ajustando el tamaño. En este paso se observa cómo el modelo que importamos de Meshmixer medía apenas unos milímetros originalmente. Pero con la herramienta de escalar y mover conseguimos asegurarnos de que el orden de magnitud es el deseado.



figura 30: modelo superpuesto sobre el lienzo

3.4 Cuerpo de la férula

Ya tenemos la mano completamente definida. El siguiente paso es generar la férula en torno a ella. Lo que haremos será colocar bocetos que registren la geometría. En la pestaña

de malla, utilizamos la herramienta de crear boceto de sección de malla para cortar el modelo con un plano. En la intersección se genera el boceto con la forma del perímetro. Tras cada boceto debemos editarlo y utilizar ajustar curva a la sección de malla.

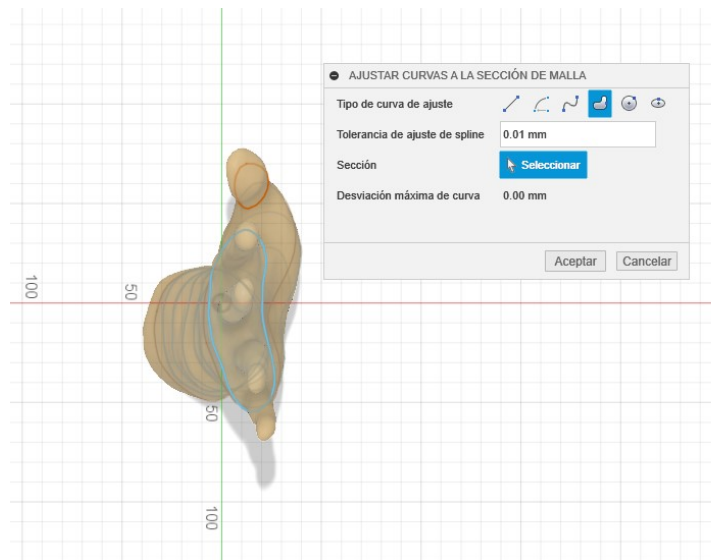


figura 31: ajustar curvas a la sección de malla

Con esto hemos conseguido el trazado que deberá seguir la férula. La zona del pulgar estará abierta, por lo tanto, esos contornos se quedarán abiertos.

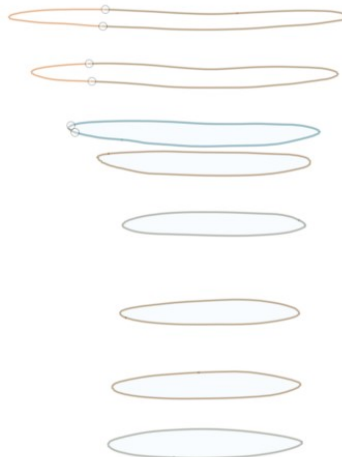


figura 32: bocetos generados en torno al perfil de la mano

Ahora unimos los contornos con la herramienta elevación. Debemos hacerlo generando caras suficientes para que la superficie pueda conectarse correctamente. Pero demasiadas caras harían difícil trabajar con el modelo.

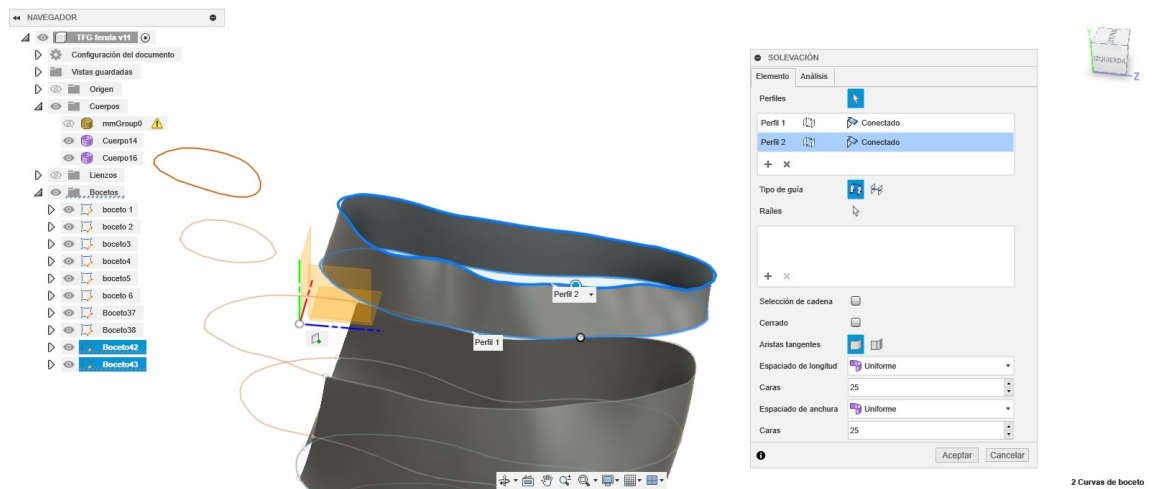


figura 33: solevación con los perfiles generados

Dado que los contornos del pulgar están abiertos, no se puede realizar en un solo paso. Hay que realizar tres solevaciones. La forma generada es la siguiente:



figura 34: tres solevaciones

Debemos unir las aristas con la herramienta de crear forma, y fusionar arista.

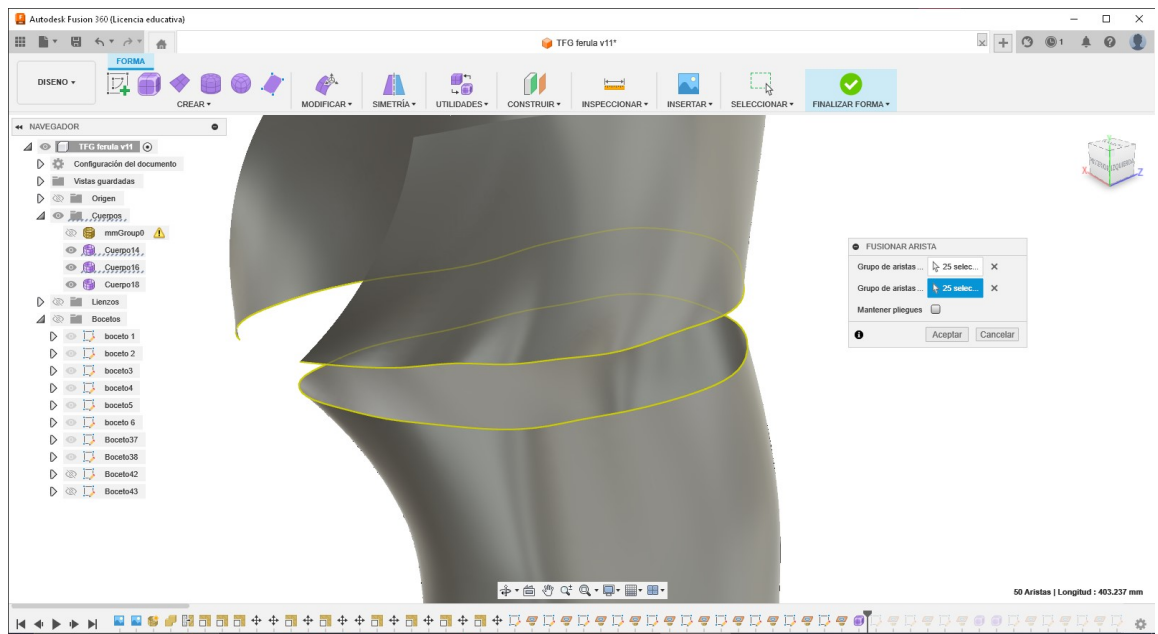


figura 35: fusionar arista

Tras unir las tres superficies conseguimos de esta manera un primer esbozo de la férula. Sin embargo, aún no tiene volumen.



figura 36: superficie de la férula

Debemos darle espesor. Con la opción espesor sin arista conseguimos una segunda superficie separada. Esta será la holgura que hay entre la férula y la mano, pero aún no es el espesor.

$$\text{espesor} = 4 \text{ mm}$$

Es aconsejable dejar una holgura. Tanto para permitir la ventilación como para poder forrar el interior de tela, goma, o las posibles vendas del paciente. Sin embargo, el valor de

4mm está motivado además por la incertidumbre del proceso de escaneo. Asegurando que este prototipo podrá ser colocado sin problemas.

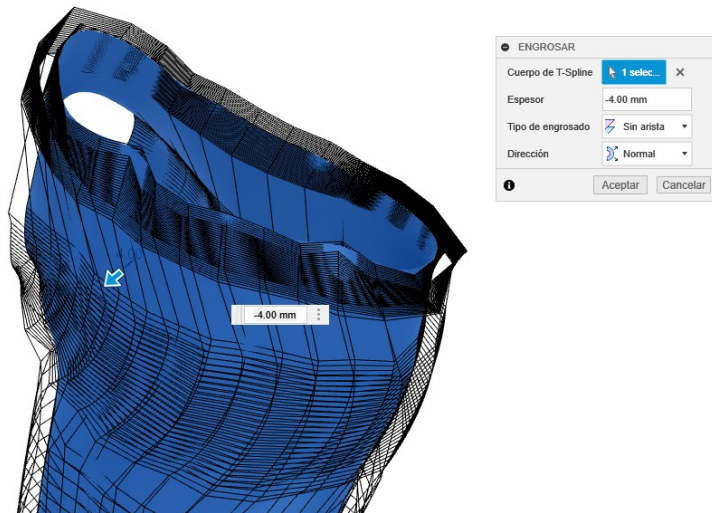


figura 37: espesor sin arista

Ahora tenemos el desfase de la primera superficie.



figura 38: holgura de 4mm

En este momento se observa como la férula, al haberse ensanchado intersecta la mano. Vamos a necesitar algo de edición manual.



figura 39: las superficies intersectan

En la sección forma, podemos mover manualmente las caras del modelo. Aquí es donde resulta beneficioso haber mantenido un número de caras pequeño durante la creación de la superficie. Con editar forma suave seleccionamos la cara que intersecta y la desplazamos hasta que estemos seguros de que no penetra en la mano.

Una segunda solución, podría haber sido elegir mejor los bocetos de sección de malla. Sabiendo que el modelo crecería con la holgura. De esta manera no se habría añadido esta arbitrariedad.

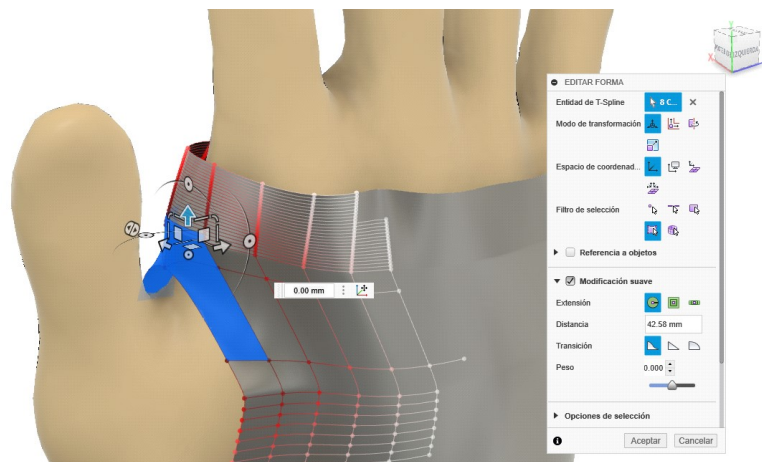


figura 40: edición manual

Ya tenemos la base de la férula. Pero, aún es una malla. Si queremos aplicar los algoritmos de optimización necesitamos convertirlo en sólido.



figura 41: conversión de malla a sólido

Con este último paso hemos conseguido el primer modelo de la férula. Tan solo habría que añadir las sujeciones y cortarla. Sin embargo, vamos a aplicar la optimización topológica. Y por último buscaremos un diseño alternativo con el diseño generativo.



figura 42: cuerpo sólido de la férula

4. Algoritmos de optimización y simulación

Una vez disponemos del modelo preparado, se deben establecer los objetivos de las simulaciones. Por ello se establecerán los medios teóricos para lograrlo y los pasos a seguir.

Objetivos de la simulación:

- Maximizar rigidez
- Reducir masa en un 50%

4.1 Hipótesis simplificativas

Necesitaremos recurrir a la bibliografía para encontrar una manera adecuada de enfocar el análisis biomecánico. Por un lado, debemos conocer los movimientos que es capaz de realizar una mano humana. Una vez entendidos podremos realizar una serie de hipótesis que permitan simplificar las magnitudes de los esfuerzos y las restricciones que vamos a colocar, que nos dará un diagrama del sólido libre que permita reducirlo a un problema sencillo.

4.1.1 Movimientos y fuerzas

De acuerdo con [16] existen cuatro movimientos principales que debemos analizar: extensión, flexión, abducción y aducción. Los cuales darán lugar a distintas colocaciones de los vectores de fuerza. En el artículo se ha referenciado al estudio de voluntarios sanos que los realizaron bajo estudio. Dando lugar a una tabla de magnitudes, pero parten de la hipótesis de que un paciente lesionado no podrá realizar la totalidad de la fuerza por la que realizan la simulación con un 12% del total. Pero para este proyecto, se han utilizado el 100%, que junto a los factores de seguridad permitirán realizar las simulaciones y asumir hipótesis sin fallar.

Vamos a empezar por describir los movimientos de según [17]:

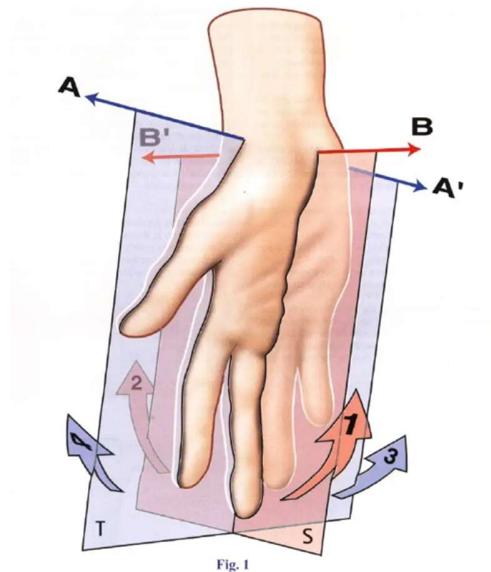


figura 43: movimientos de la mano

Flexión (flecha 1): la cara anterior o palmar de la mano se aproxima a la cara anterior del antebrazo

Extensión (flecha 2): la cara posterior de la mano se aproxima a la cara posterior del antebrazo.

Aducción (flecha 3): la mano se aproxima al eje del cuerpo y su borde interno forma con el borde interno del antebrazo un ángulo obtuso abierto hacia dentro.

Abducción (flecha 4): la mano se aleja del eje del cuerpo y su borde externo forma con el borde externo del antebrazo un ángulo obtuso abierto hacia fuera.

4.1.2 Palanca de 3º género

En [16] también se supone un antebrazo en reposo, es decir, fijado. De esta manera en la simulación se traduce en establecer restricciones a todos los grados de libertad en la zona más cercana a este.

Sin embargo, también podemos encontrar referencias suficientes para poder considerar el brazo como una palanca de tercer género [18]. Una palanca de este tipo es aquella en la que la fuerza para levantar el peso está aplicada entre éste y el apoyo. Son las que predominan en el cuerpo humano ya que si bien no generan ventaja mecánica si favorecen la velocidad y amplitud de movimientos.

Por todo ello consideraremos restringir solamente la parte inferior de la férula, que equivale al punto de apoyo de la palanca.

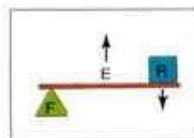
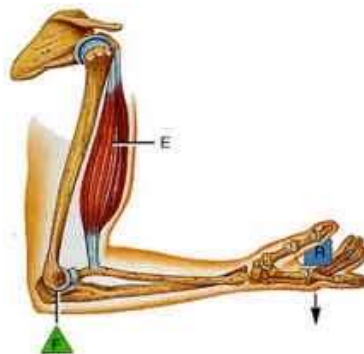


figura 44: brazo como palanca de tercer género

4.1.3 Tipo de material considerado

El material colocado por la impresión 3D FDM presenta propiedades anisótropas. Es decir que varían para cada eje. Esto es debido a la manera de colocar el material en forma de capa sobre capa. Presentando una resistencia menor en la dirección de crecimiento de estas.

Esta anisotropía nos puede suponer un problema a la hora de simular el material, pues nos va a obligar a asumir simplificaciones que nos alejan de la realidad. Pero esta dificultad ha sido documentada y existen maneras de solventarla. Una de ellas, es suponer que las propiedades si son isotrópicas y a continuación asignar a todas las direcciones el módulo elástico más pequeño, trabajado en el lado de la seguridad. Ya que nosotros trabajaremos con factores de seguridad amplios, este será nuestro proceder [19].

4.2 Optimización topológica

4.2.1 Explicación, aplicaciones.

La optimización topológica es una estrategia de diseño que utiliza algoritmos para optimizar la colocación de material bajo unos criterios de diseño como restricciones y cargas. El resultado es una malla con la geometría original modificada que, necesita posteriormente un análisis de tensiones.

El procedimiento pasa por aplicar tensiones en el modelo para identificar las zonas donde el material no es necesario estructuralmente mediante el método de elementos finitos. Donde estos elementos forman un campo de densidad, con valor cero, elimina el material, y con valor uno lo mantiene sólido. Es decir, calcula las tensiones y determina qué secciones del objeto no son necesarias



figura 45: optimización topológica

Las geometrías conseguidas a menudo eran inviables de fabricar hasta la aparición de la impresión 3D, donde esta complejidad adicional no se traduce en mayores costes.

En cuanto a las aplicaciones, podemos encontrar la optimización topológica en el sector aeroespacial, donde es necesario reducir al máximo el peso del fuselaje sin comprometer las prestaciones mecánicas, por ejemplo, el morro del Airbus A380 fue rediseñado con esta técnica reduciendo en 500 Kg el peso del avión. También es interesante en la industria automovilística por los mismos motivos. Donde además se puede diseñar de manera que en caso de accidente las deformaciones sufridas por la estructura sean conducidas hacia otra geometría prevista.

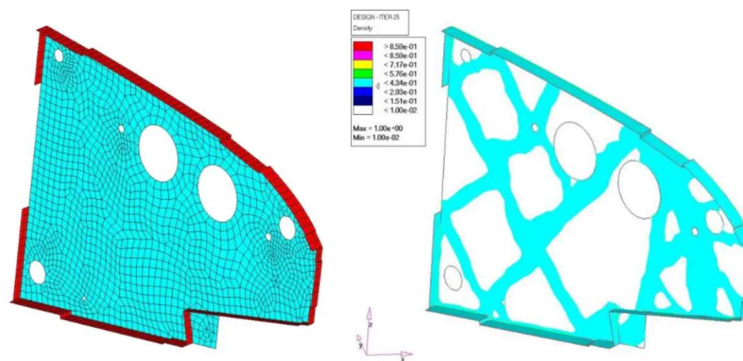


figura 46: optimización topológica aplicada a la aviación

En nuestro caso, Fusion 360 solo da una guía de cómo debe ser rediseñado el modelo, pero no verifica que estructuralmente sea viable. Debe realizarse una simulación estática a posteriori [28], [29].

4.2.2 Características de la simulación mecánica [30]

Para configurar el algoritmo se deben seguir una serie de pasos. El camino a seguir queda esquematizado en el siguiente diagrama de bloques:



Ilustración 9: diagrama de la optimización topológica

Para iniciar la simulación debemos elegir el cuerpo de destino, que será el que se desea optimizar. En este caso la férula.

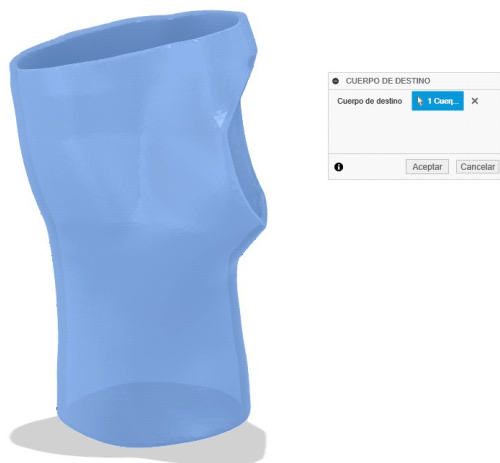


figura 47: cuerpo de destino

El siguiente paso es marcar una geometría de conservación. Todo lo que quede dentro de ella permanecerá inalterado. En nuestro caso será una franja en la parte superior e inferior, otra que atraviesa transversalmente todo el cuerpo para dividir en dos la férula y colocar las sujeciones y otra en la zona del pulgar. Esto se consigue colocando cilindros (en verde) para englobar en su interior la zona conservada y una esfera en la zona del pulgar.

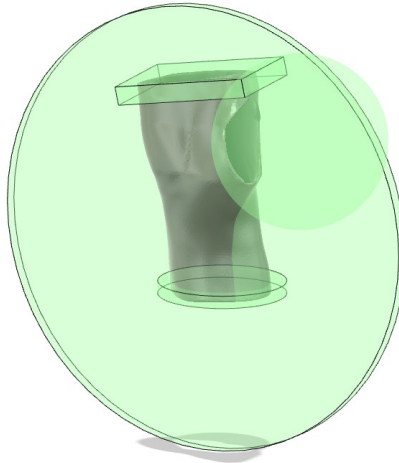


figura 48: geometrías de conservación

Se deben establecer los objetivos globales de la simulación. Estos son dos:

La masa objetivo será el porcentaje de masa original que se desea conservar.

La rigidez maximizada implica que se eliminará el material en aquellos lugares donde menos la afecte. Consiguiendo una relación masa/rigidez óptima.

El criterio de diseño será reducir la masa a un 50% de su valor original maximizando la rigidez. Elegir valores demasiado pequeños puede impedir que la simulación alcance el objetivo.

● CRITERIOS DE OPTIMIZACIÓN DE FORMA

	Parámetro	Expresión	Valor	Unidades
▼ Objetivos globales +				
	Masa de destino	< O =	50	%
	Rigidez	Maximizar		
▼ Restricciones globales +				
	Conservar contorno 4	N/A		
	Conservar contorno 5	N/A		
	Conservar contorno 6	N/A		
	Conservar contorno 7	N/A		

Conservar entidades con cargas y restricciones ☒

Aceptar Cancelar

figura 49: criterios de optimización de forma

A la hora de elegir el material elegimos PLA. Podríamos usar ABS, más resistente, que permitiría una reducción de peso. Sin embargo, al presentar mayor dificultad para imprimir, se utilizará PLA.

Como no está incorporado en el programa necesitamos añadirlo. Se han utilizado las propiedades de [31].

Propiedades Mecánicas	PLA
Resistencia a la tracción (MPa)	59
Alargamiento a la ruptura (%)	7
Módulo elástico (MPa)	3500
Módulo de corte (MPa)	1287
Radio de Poisson	0.36
Rendimiento	70
Resistencia a la flexión (MPa)	106
Dureza (HR)	88
Temperatura de reflexión térmica (°C)	55
Porcentaje de elongación (%)	11.3
Módulo de Young (MPa)	1280

figura 50: propiedades del PLA [31]

En este punto se deben tener en cuenta los efectos de la anisotropía. De acuerdo a la bibliografía, una manera solventar esto podría ser suponerlo isótropo y asignar el menor módulo elástico a las tres direcciones. Otra manera más sencilla también contemplada será suponerlo isótropo, y a la hora de realizar la simulación, utilizar un factor de seguridad amplio.

Nosotros usaremos esta última hipótesis ya que como veremos en el análisis estático estamos del lado de la seguridad.

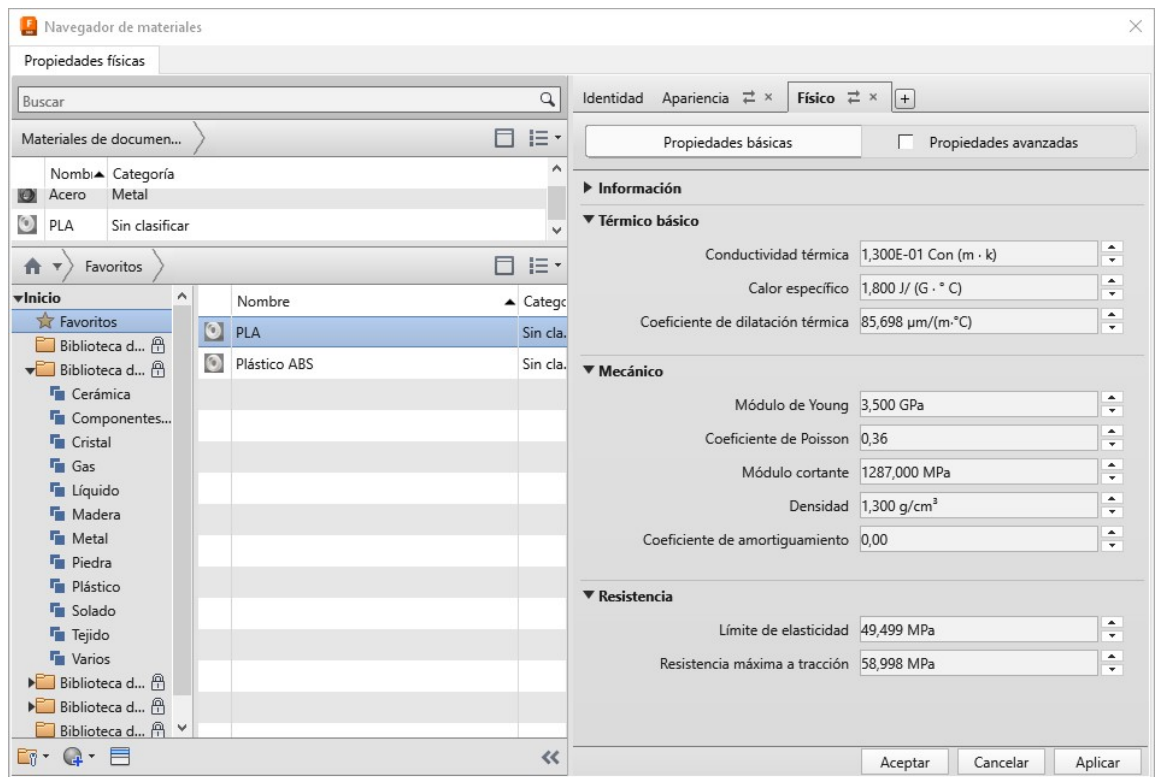


figura 51: caracterización del PLA en Fusion360

Las restricciones definen los puntos fijos del objeto. Son aquellas zonas donde existen obstáculos que impiden el desplazamiento, como un muro o en este caso, el antebrazo. Marcamos ocho puntos de la parte inferior como totalmente restringidos para mantener nuestra hipótesis de palanca de 3º grado.

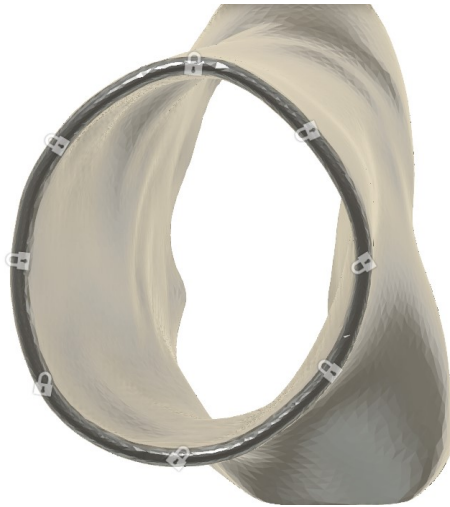


figura 52: restricciones

Ha llegado el momento de colocar las cargas. Anteriormente se explicó cuales son los movimientos y fuerzas que se tendrán en consideración.

Con la opción de colocar fuerza puntual, con módulo y dirección representamos cada uno de los casos de carga, manteniendo las mismas condiciones en todos. La simulación se realizará para los cuatro casos simultáneos.

Movimiento	Extensión	Flexión	Abducción	Aducción
Fuerza (N) al 8%	6.7	11.8	9.1	7.9
Fuerza (N) al 100%	83.75	147.5	113.75	98.75

Tabla 1: fuerzas generadas por los movimientos considerados

A continuación, se colocan las cargas sobre el modelo:

- Movimiento de flexión



figura 53: movimiento de flexión

- Movimiento de extensión



figura 54: movimiento de extensión

- Movimiento de aducción



figura 55: movimiento de aducción

- Movimiento de abducción



figura 56: movimiento de abducción

Por último, debemos generar la malla. Se ha utilizado un tamaño de elemento lo suficientemente pequeño para conseguir una resolución capaz de eliminar material de manera precisa. Ya que un tamaño de malla mayor, aunque reduce los tiempos de cálculo no es capaz de discriminar bien entre las zonas de tensión. A pesar de que el programa permite elegir más parámetros avanzados para construir la malla, no nos hará falta para lograr los objetivos.

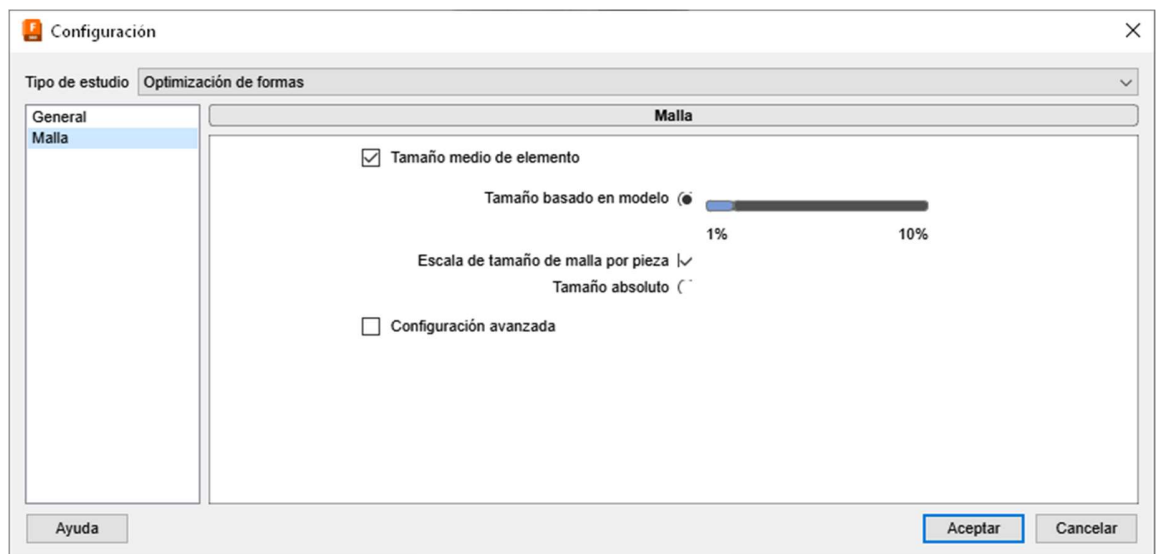


figura 57: generación de la malla

Con esto quedan establecidos todos los parámetros y solo falta realizar la simulación. En el verificador observamos que no se presentan errores y que la simulación está lista para comenzar. Esta se realizará en la nube consumiendo créditos, que para esta versión de estudiante son ilimitados.

Lo que obtenemos al terminar es el cuerpo de la férula con las zonas de distinto valor de tensión coloreadas. En rojo las de máxima tensión y en azul las de mínima.

En el gráfico de tensiones de la leyenda podemos mover el porcentaje de masa eliminada. De esta manera se observa que eligiendo un cien por cien de la masa tenemos la férula original. Donde en azul oscuro aparecen las zonas de tensión mínima.

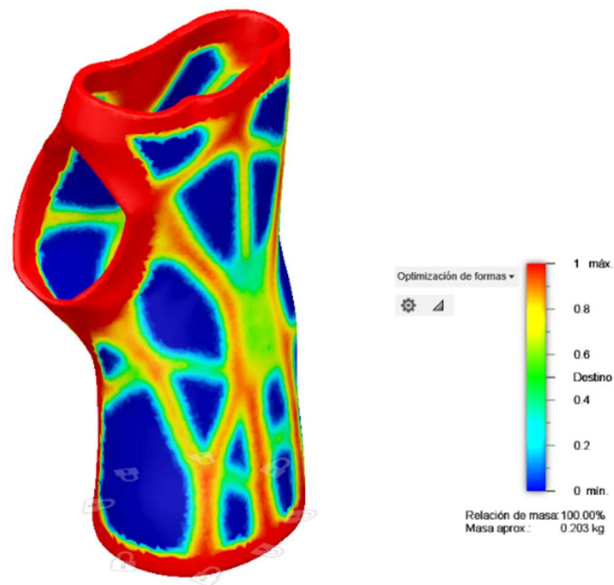


figura 58: resultado de la simulación

Por otro lado, llevando el gráfico hasta el porcentaje de masa a eliminar elegido durante la preparación se observa cómo el cuerpo queda cortado o con geometrías no deseadas.

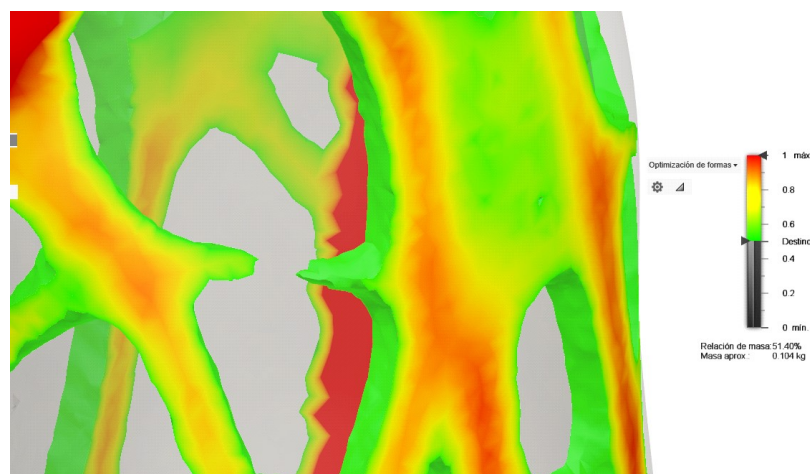


figura 59: la masa de destino da lugar a geometrías no deseadas

Por ello no utilizaremos el valor de destino. En su lugar reduciremos la masa manualmente hasta tener una pieza idónea para nuestro caso. Que reduzca material, pero mantenga la ergonomía.

Elegimos finalmente un valor de 65% de la masa original.

$$masa = 0.132 \text{ Kg}$$

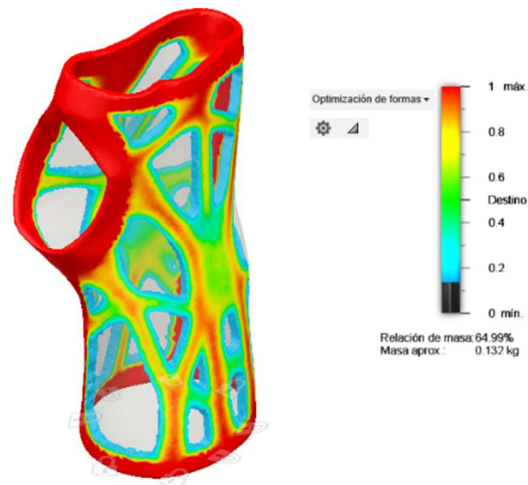


figura 60: nueva masa elegida

Este será el modelo final que elegimos. Lo convertimos en malla y lo exportamos para seguir utilizándolo.



figura 61: férula optimizada

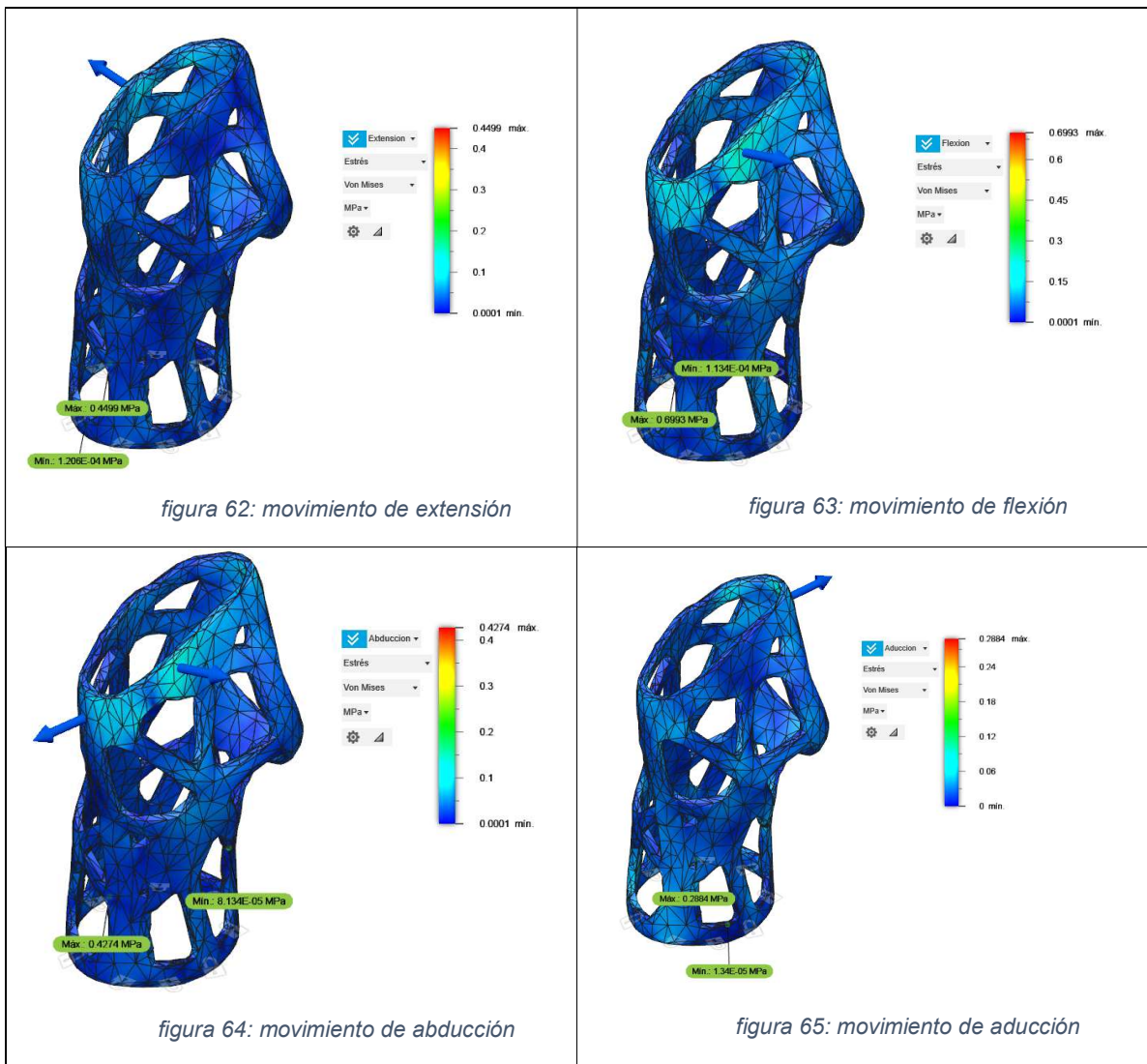
Pero aún no está listo. El siguiente paso será colocar las sujeciones y cortarla en dos partes.

No obstante, llegados a este punto ya hemos podido aplicar con éxito la optimización topológica, que era uno de los objetivos de este proyecto. Por ello vamos a desarrollar una metodología alternativa para volver a diseñar. Aplicaremos el diseño generativo.

4.2.3 Análisis de tensiones

Antes de dar el diseño por válido es necesario verificar si la optimización realmente es funcional, ya que si no soporta las cargas realmente no hay una mejora. Pero la optimización topológica no realiza los cálculos necesarios para averiguarlo, solo da una orientación del diseño.

Por ello vamos a realizar una simulación de tensión estática donde volveremos a aplicar las fuerzas y restricciones para comprobar si las tensiones de Von Mises están dentro del rango de seguridad.



Se pueden observar las magnitudes en la siguiente tabla:

Movimiento	Tensión máxima (MPa)	Factor de seguridad
Extensión	0.4499	15
Flexión	0.6993	15
Abducción	0.4274	15
Aducción	0.2884	15

Tabla 2: resultados del análisis de tensiones

Como vemos, la férula soportaría completamente los esfuerzos supuestos. Se mantienen muy por debajo del límite elástico del PLA que son 49.5 por lo que no será necesaria ninguna modificación del diseño. También se observa unos coeficientes de seguridad muy elevados. Nos garantizan que la estructura soporta los esfuerzos, pero por otro lado también nos indican que está sobredimensionada. Se podría realizar un proceso iterativo en el que se reduzca el espesor hasta encontrar el valor óptimo. También se podría cambiar a un material menos resistente si fuera necesario o cambiar los requisitos de rigidez y masa dados.

4.3 Diseño generativo

4.3.1 Explicación, aplicaciones

La optimización topológica existe desde hace años, era una herramienta que el diseñador podía aplicar a su modelo. Sin embargo, el diseño generativo es una estrategia de diseño completamente distinta, que quita el peso al usuario de proporcionarle un modelo inicial con el que empezar a trabajar.

El método utiliza inteligencia artificial para generar un modelo inicial que cumpla los requisitos de diseño. Este sirve como base para generar un segundo modelo y este proceso se va repitiendo hasta que el programa considera que la solución converge y no es capaz de generar una iteración más.



figura 66: diseño generativo

En cuanto a las aplicaciones, se suele utilizar para aligerar aquellas piezas más pesadas de un conjunto. Ya que una ventaja del método es que permite realizar la simulación simultánea de múltiples materiales y métodos de fabricación. Por ejemplo, en cuanto a casos reales, el fabricante japonés WHILL logró reducir el peso del bastidor de la batería de un vehículo de movilidad personal en un 40% pero también es utilizado en el diseño de las celdas unitarias de estructuras reticuladas, que pueden observarse en zapatillas deportivas, o intercambiadores de calor compactos, y que se estudiarán en la sección 4.2.2.



figura 67: bastidor de batería de un vehículo de movilidad personal por diseño generativo

A pesar de que arroja resultados que a priori parecen difíciles de fabricar, se le puede indicar el método de fabricación deseado de manera que siempre esté garantizada su viabilidad. Y cómo este método realiza un análisis de tensiones en cada iteración se puede verificar que soportará las cargas dadas [32], [33].

4.3.2 Parámetros de diseño generativo [30].



Ilustración 10: diagrama del diseño generativo

Antes de ir a la pestaña de diseño generativo, debemos realizar un diseño preliminar.

Comenzamos trabajando sobre la mano igual que hicimos con la optimización topológica. Realizando bocetos de sección de malla con una solevación posterior. Pero de manera que la superficie generada tenga al menos 20 mm de anchura. Esto es debido a que

cuanto más resistente sean las geometrías iniciales más libertad tendrá el algoritmo para diseñar. Los 20 mm serán suficientes.



figura 68: superficies preliminares

Desde crear forma, le damos espesor como hicimos anteriormente. Primero sin aristas para dejar una holgura de 4 mm que permita tanto la colocación de vendaje como superar la incertidumbre del proceso de medida de la mano. Tal y como hicimos durante la optimización topológica.



figura 69: holgura

Repetimos el proceso con aristas para darle el espesor propiamente dicho. También de 4mm ya que como dijimos buscamos tener rigidez inicial.



figura 70: cuerpo preliminar del diseño generativo

Con esto, ya podemos salir de “crear forma”, lo que generará el cuerpo base sobre el que trabajar y con el que ya podemos ir a la pestaña de diseño generativo.

El primer paso es indicar la geometría de conservación. Esta será añadida al cuerpo final y no se verá alterado durante el estudio. El programa tomará estos cuerpos como las zonas que debe unir de la manera que considere para cumplir los objetivos que le indicaremos. Deben ser las zonas esenciales para el diseño, como uniones o puntos donde recaen las cargas.



figura 71: selección de la geometría de conservación



figura 72: la geometría de conservación es representada en color verde

Por otro lado, también hay que indicarle la geometría de obstáculo, que tendrá prohibido tocar a la hora de generar material. Es decir, que esta será la herramienta que nos permita guiar el diseño. Podría servir para dejar un espacio suficiente alrededor de un agujero simulando la herramienta que el operario usará para colocar un perno, por ejemplo. Nosotros, al utilizar la mano como obstáculo impedimos que el material se coloque en línea recta, y que en cambio siga su contorno.



figura 73: selección de la geometría de obstáculo



figura 74: la geometría de obstáculo se representa en color rojo

En este punto también podríamos indicarle una geometría inicial para comenzar las iteraciones, como el primer cuerpo de férula que obtuvimos. Pero en nuestro caso no lo haremos. Buscamos que el algoritmo tenga la máxima libertad para comenzar el estudio. Tampoco añadiremos planos de simetría, que no tenemos, ni desfases, ya que la holgura de 4mm era suficiente.

A continuación, indicamos las restricciones estructurales, que son la parte de la modelo fijada a otros cuerpos que no están presentes en el estudio, como el antebrazo. Por ello bloquearemos la anilla inferior para asegurar nuestra hipótesis de palanca de 3º genero.

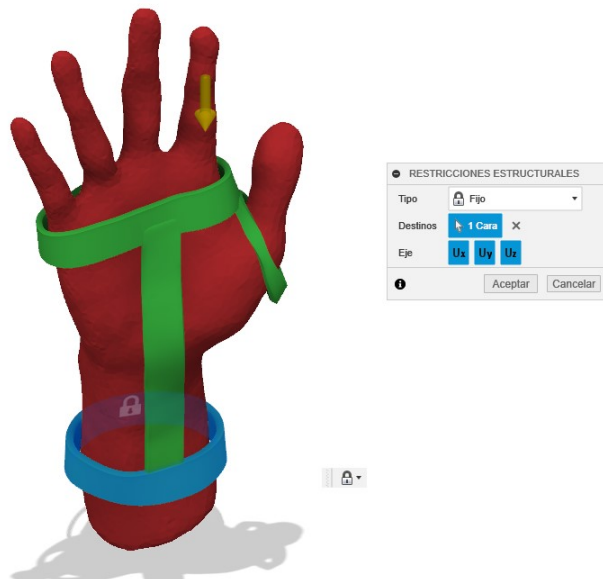


figura 75: selección de restricciones

Llegamos al momento de colocar las fuerzas. Lo haremos tal y como hicimos en la optimización topológica, las mismas magnitudes y movimientos. En este caso hemos tenido que unir las anillas de la parte superior y del pulgar debido a que, de no hacerlo, el programa lo uniría simplemente sin añadir material a su alrededor.



figura 76: colocación de los distintos casos de carga en el árbol del programa

Tenemos que elegir una serie de normas de diseño. Por un lado, son dos los **objetivos** que nos propone el programa.

- **Maximizar la rigidez:** para una masa objetivo, el estudio generará la geometría con mayor rigidez posible, eliminando material en cada iteración allí donde no afecte a esta. Pero puede generar un modelo más pesado de lo necesario.
- **Minimizar masa:** obtiene la mínima masa posible que soporte los esfuerzos sin atender a la rigidez. Pero a cambio de ser susceptible a deformaciones.

En cuanto a los **límites**, nos permite elegir valores para cada uno de ellos:

- **coeficiente de seguridad:** es la relación entre el límite elástico y la tensión de Von Mises máxima. Un valor elevado nos asegura que siempre se trabaja del lado de la seguridad.
- **Objetivo de masa:** nos permite elegir la masa cuando la hemos indicado como objetivo.
- **Desplazamiento:** nos permite elegir el desplazamiento máximo de manera global y local.

Nosotros tomaremos un factor de seguridad de 2 y una masa objetivo de 0.15Kg ya que al carecer de un cuerpo de base se usará como referencia la que se obtuvo en la optimización topológica. Además, se ha colocado un límite local al desplazamiento del pulgar de 1mm por estar esta en voladizo respecto al eje vertical de la mano.

OBJETIVOS Y LÍMITES

Objetivos

Minimizar masa

Maximizar rigidez

Límites

Factor de seguridad

Destino de masa

Desplazamiento

Global

Local

Ubicación 1

+

×

Ubicación

1 Cara

X

Dirección

X

Y

Z

X máxima

1.00 mm

Y máxima

1.00 mm

Z máxima

1.00 mm

Aceptar

Cancelar

figura 77: objetivos y límites

Lo siguiente es indicar el método de fabricación.

El algoritmo tendrá en cuenta las peculiaridades de cada método. Tenemos disponible la opción de generar un modelo sin restricciones, que no tiene por qué ser posible de fabricar, pero es la que mejor cumple los objetivos indicados. Aunque permite seleccionar la opción de fresado, de corte y de fundición. Nosotros buscamos la impresión 3D. Marcamos aditivo con una orientación tanto de Y + como de Y-. Es decir, si la férula se fabricará de abajo a arriba de la manera en que está colocado el modelo o al revés.

figura 78: selección del método de fabricación

A la hora de elegir material volvemos a usar el PLA que ya teníamos caracterizado. También se ha añadido el ABS por ser un material más rígido tan solo para poder comparar resultados.

figura 79: selección de material

Con esto hemos terminado de preparar el estudio. La malla se generará durante la simulación y tendremos tantos casos de estudio como materiales y métodos de fabricación hayamos elegido. En nuestro caso, el estudio 1 nos devolverá 4 soluciones. Orientación Y + para PLA y ABS y orientación Y- con PLA y ABS.

Generar

Mostrar

☒	Estudio	Nombre	Modelo	Estado	Créditos de nube
☒		Estudio 1 - Componente estructural	Modelo generativo 1	Preparado	11

Cuenta Educación

Necesario: - Disponible: Sin límite Permanecerá: -



Generar 1 estudio

Cerrar

figura 80: se resuelve el estudio

El estudio de diseño generativo gastará 11 créditos, pero la versión de estudiante del programa permite la generación sin límite.

Una vez generado podemos filtrar los resultados por cada parámetro principal que se ha elegido durante la preparación.

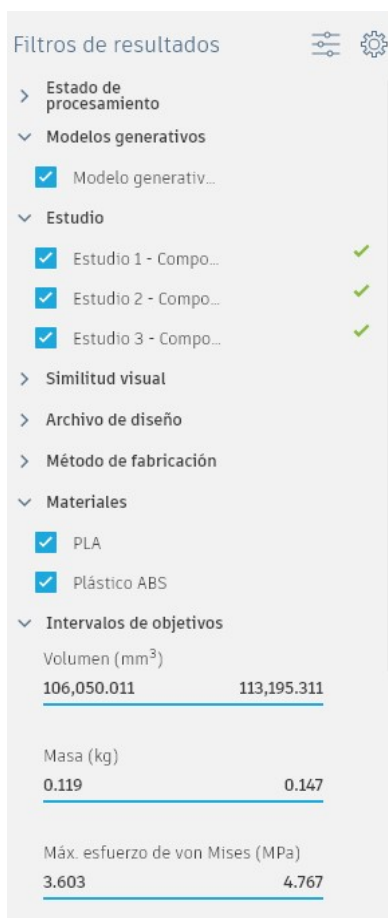


figura 81: los resultados se pueden filtrar por los principales criterios de diseño

Observamos cómo se han generado los cuatro resultados del estudio 1.

	Estudio 1 - Compo... - Resultado 1	78.515 %	Convergencia	Modelo generativo 1	PLA	Aditivo	Único
	Estudio 1 - Compo... - Resultado 2	77.507 %	Convergencia	Modelo generativo 1	PLA	Aditivo	Único
	Estudio 1 - Compo... - Resultado 3	62.573 %	Convergencia	Modelo generativo 1	Plástico ABS	Aditivo	Único
	Estudio 1 - Compo... - Resultado 4	58.573 %	Convergencia	Modelo generativo 1	Plástico ABS	Aditivo	Único

figura 82: resultados del estudio 1

Se le prestará atención sólo al caso Y- con PLA. Ya que es nuestro material y sentido de impresión deseable. Podríamos fijarnos en el caso Y+, pues tan solo cambiaría la orientación del objeto para imprimir. Pero el resultado para la orientación elegida es correcto. De los cuatro casos nos centraremos en este.

Una vez dentro del caso deseado, se puede observar el proceso iteración por iteración.

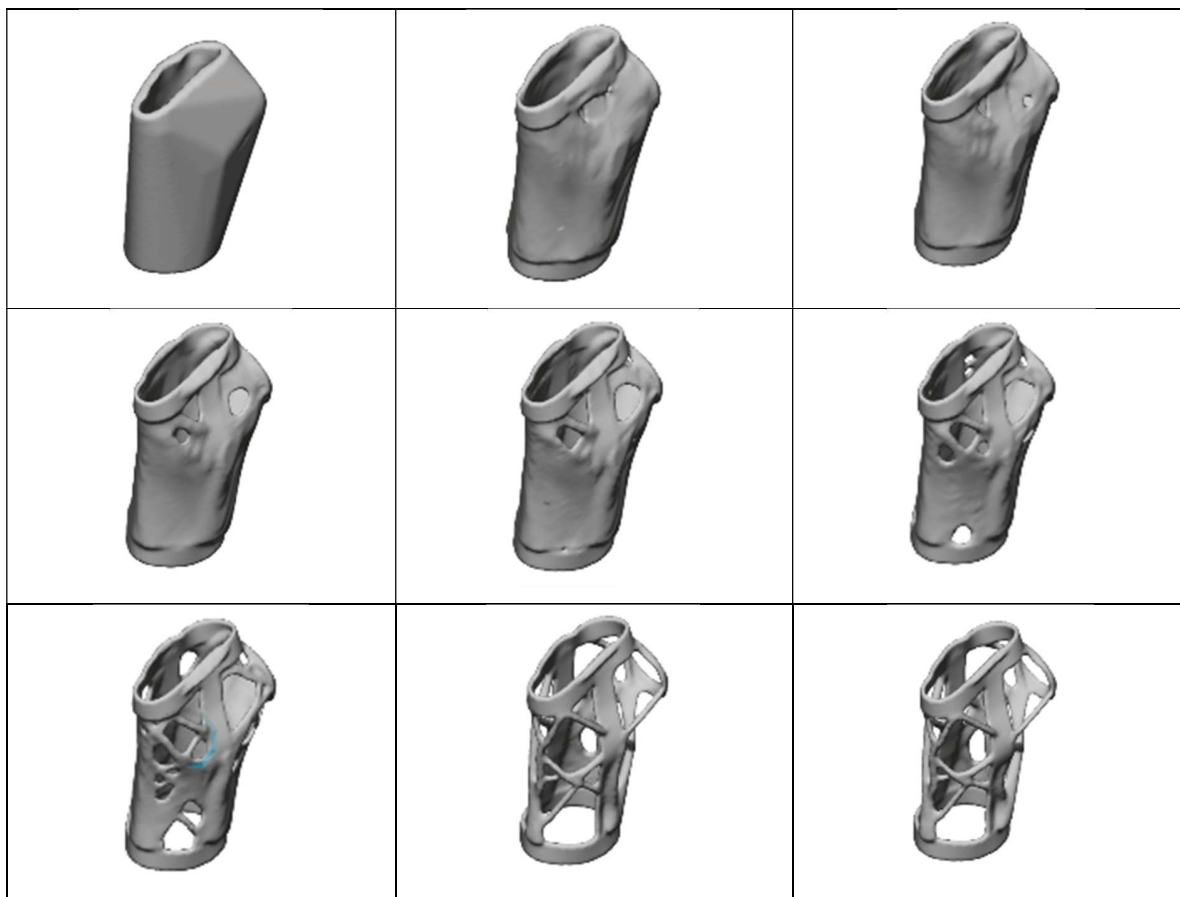


Tabla 3: iteraciones representativas del estudio generativo

Hemos conseguido después de 29 iteraciones la convergencia. Las tensiones máximas de von Mises son 3.6 MPa por lo que entra dentro del límite elástico del material, que son 49.5 MPa.

Desde aquí podemos variar la barra de iteraciones para volver a un estado anterior ya que, aunque cumpla mecánicamente puede no cumplir otros factores de diseño como la comodidad o estética. Se han elegido tan solo 9 iteraciones representativas para mostrar, pero se elegirá la última. En todo el proceso se puede ver cómo ha mantenido los cuerpos originales, que eran geometría de conservación. Cómo ha dejado el hueco de la mano, que era el obstáculo, y cómo ha tenido la libertad de generar nervios allí donde el algoritmo considere necesario.

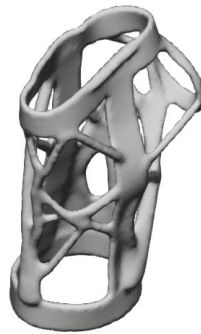


figura 83: férula final en la iteración 29

El resultado muestra las propiedades finales del diseño generativo. Con especial atención a la masa y tensión de Von Mises.

Propiedades	
Estado	Convergencia
Modelo generativo	Modelo generativo 1
Material	PLA
Orientación	Y-
Método de fabricación	Aditivo
Similitud visual	Único
Volumen de producción (pcs.)	-
Coste por pieza	
Intervalo (USD)	-
Mediana (USD)	-
Coste total	
Intervalo (USD)	-
Mediana (USD)	-
Volumen (mm ³)	113,065.078
Masa (kg)	0.147
Máx. esfuerzo de von Mises (MPa)	3.603

figura 84: propiedades de la iteración 29

Ya hemos conseguido el diseño final. El diseño generativo está completo. Tan solo nos falta añadir las sujeciones y cortar.

4.2.3 Comparación entre métodos

Se han obtenido los esfuerzos sufridos por la férula en ambos diseños. Para compararlos, en el caso de la optimización topológica se usarán los valores del movimiento que generó el caso más desfavorable, la flexión.

	Optimización topológica	Diseño generativo
Tensión de Von Mises (Mpa)	0.6993	3.603
Factor de seguridad	15	13.75
Masa (Kg)	0.132	0.147

Tabla 4: comparación entre la optimización topológica y el estudio generativo

El diseño generativo es un 11.36 % más pesado y su factor de seguridad es menor. Aunque mecánicamente resiste menos, a cambio requiere menos tiempo de preparación por parte del diseñador. Además, su propósito es encontrar geometrías inconcebibles para el diseño manual, y permite elegir el método de fabricación.

Por otro lado, no se están teniendo en cuenta los costes de fabricación ya que al utilizar impresión 3D doméstica estos no van a variar entre un método y otro.

4.4 Otras formas de optimizar

4.4.1 Patrón Voronoi

Una alternativa de diseño podría haber sido simplemente realizar agujeros sin ningún criterio técnico y posiblemente la férula no se vería comprometida. Existen multitud de maneras de realizarlos, con celdas hexagonales o siguiendo algún criterio estético. Sin embargo, hay un patrón que destaca por encima del resto a la hora de diseñar para imprimir en 3D, es el patrón Voronoi.

Un diagrama de Voronoi divide un espacio en regiones de manera que, en cada subdivisión hecha, el centro esté más cercano al centro de su región que al de otras. Es decir, que permite visualizar el área de influencia de una región respecto a otras [34].



figura 85: reparto de capitales de provincia mediante diagrama de Voronoi

Está implícito en la biología como manera de distribuir células o semillas. Pero también aparece por causas ambientales, por ejemplo en los árboles, donde debido a la competencia por la luz, se prioriza el crecimiento de unas ramas en detrimento de otras. O visto de otra manera, aumentar su peso en el diagrama de Voronoi.

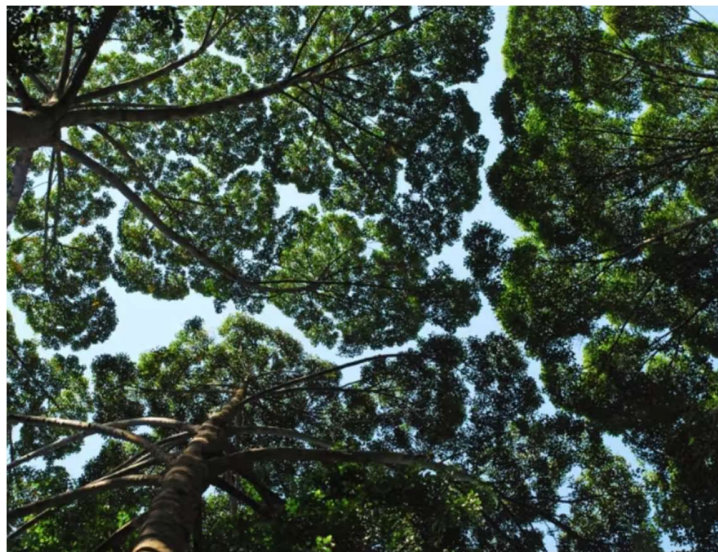


figura 86: crecimiento de las copas de los árboles siguiendo un patrón de Voronoi

Si lo aplicamos al diseño puede darnos un resultado mecánicamente interesante, ya que las tensiones generadas en un área se podrían reconducir hacia otras. Por ser un método confiable, rápido y estético es una de las técnicas de optimización más usadas en el diseño de órtesis 3D.



figura 87: férulas diseñadas mediante patrón de Voronoi

4.4.2 Architected Material

Las propiedades mecánicas de un material vienen dadas por la manera en la que están enlazados los átomos que lo componen. Pero con el desarrollo de la fabricación aditiva se puede tener una segunda capa de control de las propiedades.



figura 88: zapatilla Adidas 4DFWD con suela reticular

Los llamados architected materials están formados por celdas unitarias diseñadas para tener las propiedades que se desee. Cómo imprimir una pieza en metal, pero con la porosidad y fragilidad de un hueso o madera. Un material que bajo una dirección de esfuerzos sea elástico, pero en otra colapse. O en nuestro caso particular, de retención de muñeca, que permitiera el movimiento de los dedos en una dirección, pero presente resistencia en otra.

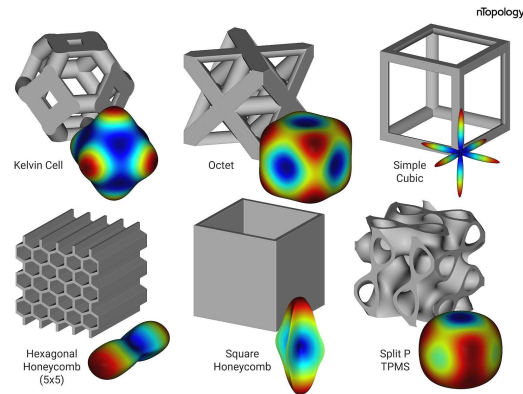


figura 89: distintos tipos de celdas unitarias

No obstante, el desarrollo de estas celdas con propiedades a medida queda muy por encima de los objetivos marcados. Tan solo las encontraremos a la hora de elegir un relleno para imprimir, donde en los programas más utilizados ya incorporan algunas de ellas, como giroides y octetos [35].

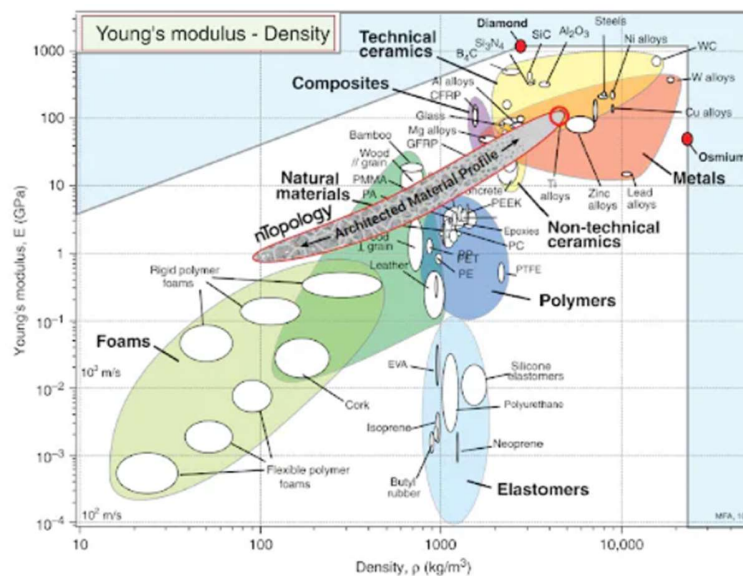


figura 90: los Architected material permiten elegir propiedades de otras familias de materiales. Puede observarse cómo estos tienen presencia en un rango amplio del diagrama.

5. Impresión 3D

5.1 Sujeciones

Al decantarnos por la tecnología FDM, debemos tener en cuenta la idiosincrasia del método. Dado que se deposita el material capa sobre capa, las propiedades mecánicas de este variarán en función de la dirección de los esfuerzos.

Por ejemplo, si se somete la pieza a tracción en la dirección de impresión puede acabar sufriendo delaminación. Las capas se despegarán. Y, por otro lado, imprimir de manera que los esfuerzos se reparten a lo largo de cada capa hará la pieza mucho más resistente y será la clave a tener en cuenta para el diseño de las sujeciones.



figura 91: pieza impresa en 3D sufriendo delaminación

Existen muchas maneras de mantener unidas las dos partes. Una de las más cómodas sería añadir ranuras para colocar correas de velcro que se unan entre ellas. Sería fácil de sustituir y la solución más rápida a la hora de colocar y retirar la férula. El inconveniente llegaría a la hora de mojarla, pues el velcro quedaría húmedo a diferencia del PLA.

Otra solución pasa por generar la sujeción en el propio diseño del modelo. Serían las uniones del tipo snap-fit o juntas de presión, muy utilizadas en el moldeo por inyección. Donde por medio de la propia geometría de las uniones estas quedan bloqueadas cuando se aprietan entre ellas. Tiene muchas ventajas ya que las de este tipo no requieren materiales externos, y sería la más cómoda en cuanto a rapidez para montar y desmontar. Tampoco tendría problema para mojarse [36].

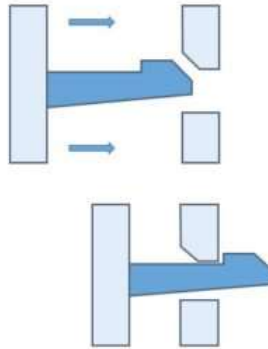


figura 92: unión del tipo snap-fit

Sin embargo, debido a la anisotropía no se puede garantizar que estas uniones soportan los esfuerzos puesto que son concentradores de tensión. Además, en el diseño generativo se estableció la dirección de impresión y esto limita las opciones de las que ahora disponemos. Ya que cualquier tipo de geometría en voladizo necesita de soportes. O como mínimo puede no ser dimensionalmente precisa impidiendo que la sujeción sea eficaz. Por último, también destacar que de romperse haría inservible toda la férula.

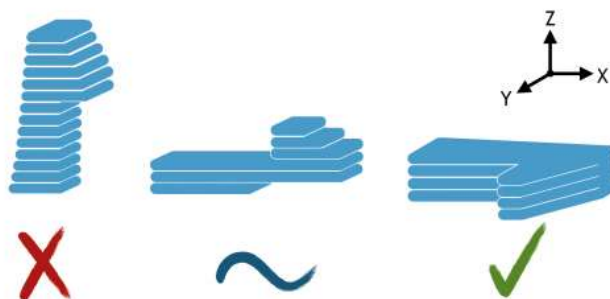


figura 93: el sentido de impresión compromete la resistencia mecánica de la unión

Nuestro diseño, que es un prototipo, necesita garantizar una serie de hipótesis simplificativas antes de preocuparnos por aspectos ergonómicos. En este punto hemos cortado la férula en dos mitades. Esto es un cambio significativo que debemos tener bajo control. Para asemejarse lo máximo posible al caso simulado vamos a utilizar fijaciones con tornillos, que van a requerir más tiempo de montaje, pero permiten la unión con máxima rigidez posible, acercándonos lo más posible al caso diseñado.

Tras probar varias métricas, los tornillos M3 cumplen la función correctamente, ya que hay que tener en cuenta los nervios y ondulaciones que hace el diseño y que pueden impedir insertarlos.

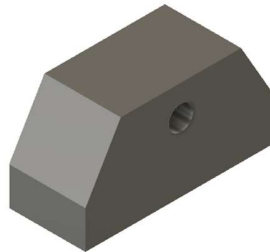


figura 94: unión con agujero para tornillos M3

Tras modelar la unión, vamos a copiarla seis veces y distribuirla por la línea de partición de la férula. Esta fue una de las geometrías de conservación del diseño generativo con vistas a que en este paso tengamos espacio para colocarlas. A pesar de haberlo previsto, el algoritmo ha generado protuberancias que ahora pueden impedir hacer pasar pernos y girar las tuercas. Estos aspectos se han tenido en cuenta en su colocación.

Ya situados, se añade un plano que pase por la línea de partición y se utiliza como herramienta de corte. Con esto, ya hemos terminado el diseño definitivo.



figura 95: mitad izquierda de la férula



figura 96: mitad derecha de la férula

5.2 Configuración para imprimir

El algoritmo del diseño generativo generó los nervios de manera que no necesiten soporte. Pero como se ha intervenido manualmente en el diseño para colocar las sujeciones. Estos nuevos componentes sí que necesitan soportes. También los agujeros de estas. Para configurar la impresión necesitamos un programa laminador. se ha utilizado el programa Ultimaker-Cura y la configuración estándar, sin entrar en variables avanzadas pues no serán necesarias.



Ilustración 11: logo de Ultimaker-Cura

El programa añade automáticamente soportes, pero nosotros solo los queremos en puntos concretos por lo que colocamos un paralelepípedo donde estará prohibido generarlos. Así garantizamos que se imprimirá sin defectos.

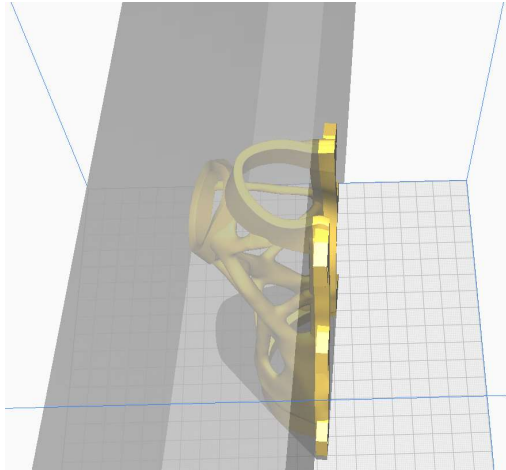


figura 97: la geometría dentro del paralelepípedo no generará soportes

Los parámetros de impresión son:

- **boquilla de impresión de 0.4**

utilizar una boquilla de más diámetro permitiría utilizar alturas de capa mucho mayores. Sin embargo, esto afectaría mucho al acabado superficial, incluso dejando los agujeros inservibles. Un tamaño de 0.4 es el estándar por ser lo suficientemente preciso y rápido.

- **Altura de capa de 0.2mm**

Con la boquilla elegida se podrían utilizar alturas de capa de 0.12 mm. Tendría un acabado superficial superior, pero a costa de un tiempo de impresión más elevado.

- **soportes en forma de árbol.**

La manera estándar de imprimir es utilizar soportes verticales justo debajo de la zona que los requiera. Pero con la aparición de soportes en árbol el proceso cambia. Se genera un soporte grueso en su base que se reduce a medida que crece. Ramificándose para dar soporte a otras zonas sin necesidad de que esta tenga el suyo propio. Reduciéndose así tanto el material utilizado como los daños generados a la pieza a la hora de retirarlos.

- **relleno del 20% en forma de giroide**

Las piezas fabricadas con impresora 3D se suelen ahuecar para ahorrar material y tiempo dado que estamos trabajando con un prototipo su finalidad, de tenerla es dar pie a trabajos futuros de mejora, no es necesario que tenga prestaciones reales. Por lo que no se fabricará maciza.

Con estos parámetros, el tiempo de impresión para una sola parte alcanza las 9h 49 min con 70 g de material o 23.39m. Las dos mitades tienen valores similares. Se observa cómo sólo aparecen soportes de árbol sobre la zona permitida.

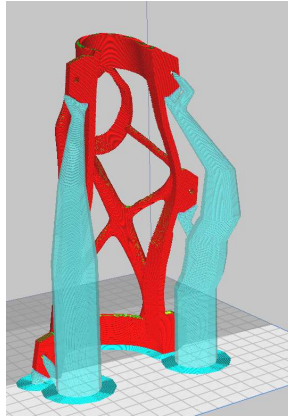


figura 98: Pieza lista para imprimir.

5.3 Post procesado

Tras acabar la fabricación, es necesario separarla de la cama de impresión. Eliminar los soportes y cortarlos con ayuda de unos alicates. Pero este proceso deja la zona de unión áspera y con aristas vivas. Es necesario lijarla.

Por otro lado, los agujeros de los tornillos necesitan el paso de una lima para dar tolerancia suficiente.



figura 99: parte izquierda a la espera de ser despegada de la cama de impresión y recibir posprocesado

La férula finalmente está construida.



figura 100: férula impresa y limpiada

Tras unir las partes y colocar los tornillos se observa como la métrica y el lugar elegidos para la sujeción permiten el ensamblaje correcto y la unión es rígida.



figura 101: férula finalizada

6. Conclusiones

6.1 Colocación, ventajas e inconvenientes.

Por último, se procede a colocarla. La escala ha sido correcta, por lo que el proceso de escaneo y el dimensionado con fotografías de la mano ha funcionado.

Teniendo el primer prototipo fabricado se puede observar cómo la holgura de 4 mm que se le dio es demasiada, dejando un pequeño juego entre la mano y la férula. Esto no satisface la hipótesis de palanca de 3º género. Se podría subsanar utilizando una venda debajo, pero es información valiosa de cara a realizar correcciones futuras de este trabajo.

Hablando de ergonomía, la férula es suave al tacto ya que se ha diseñado sin utilizar soportes en la zona de contacto con la piel. La ventilación es suficiente ya que está formada mayormente por nervios y no por material macizo.

En cuanto a las sujeciones, a pesar de que se puede colocar con una sola mano es un proceso tedioso que, aunque satisface la rigidez exigida debería buscarse la manera de pasar a uniones del tipo snap-fit



figura 102: parte superior de la férula colocada



figura 103: parte inferior de la férula colocada

6.2 Trabajo futuro, mejoras, rentabilidad

Se ha realizado este prototipo atendiendo a una serie de limitaciones. Que de ser solventadas darían lugar a una metodología distinta. Vamos a ver una serie de correcciones necesarias de cara a realizar un segundo prototipo.

Por un lado, el escaneado se ha realizado con un Smartphone. Y aunque ha sido suficiente para obtener el modelo 3D sería inviable utilizarlo para escanear pacientes, ya que la tasa de éxito es demasiado baja. Necesita demasiados intentos antes de conseguir un modelo válido. Así que se recomienda utilizar un escáner 3D profesional para dar agilidad a este proceso. O seguir de cerca tecnologías de escaneo alternativas como Gaussian splatting.

Paralelamente, debido a la incertidumbre que se arrastraba desde el proceso de escaneo, se utilizaron filtros de realidad aumentada como manera de colocar la férula diseñada sobre la mano del paciente. A pesar de que se alejaba de los objetivos del proyecto y de que fotografiar la mano fue más rápido, es una línea de trabajo interesante a seguir. Por ejemplo, en protésica puede ser más importante la similitud con la zona de alrededor que las propiedades mecánicas, ya que se suelen esculpir los modelos a mano en otros tipos de software menos técnicos como Zbrush.

Por otro lado, una vez obtenido el escaneo se ha requerido tiempo de trabajo manual para aplicar los algoritmos de optimización. De cara a fabricar y suministrar una mayor cantidad de férulas, con precio competitivo, con plazos estrictos etc, se recomienda utilizar otro tipo de programas de diseño por bloques como Grasshopper. De esta manera, si se prepara un algoritmo de diseño tan solo habría que suministrar una malla inicial y obtener la férula final. Aunque ya existen aplicaciones como Xkelet que aplican estos algoritmos directamente.

7. Bibliografía

[1] Ballesteros Massó, R; Gómez Barrena, E; Delgado Martinez, AD: Historia de la traumatología y cirugía ortopédica [En línea]. Disponible en: <https://web.ujaen.es/investiga/cts380/historia/historiadef.htm>

[2] Definición - Qué es férula [En línea]. Disponible en: <https://www.fisioterapia-online.com/glosario/ferula>

[3] Diferencias entre órtesis, férulas y prótesis [En línea]. Disponible en: <https://ortoprono.es/blog/ortopedia-tecnica/diferencias-ortesis-ferula-protesis/>

[4] Diferencias entre órtesis y férula [En línea]. Disponible en: <https://www.primclnicasortopedicas.es/diferencias-entre-ortesis-y-ferula/>

[5] Definición - Qué es prótesis [En línea]. Disponible en: <https://www.fisioterapia-online.com/glosario/protesis>

[6] Prótesis y órtesis: prevención y tratamiento [En línea]. Disponible en: <https://recoveryclinic.com/similitudes-diferencias-protesis-ortesis/>

[7] Todo sobre las férulas impresas en 3D [En línea]. Disponible en: <https://bitfab.io/es/blog/ferulas-impresas-en-3d/>

[8] FDM, cómo elegir la tecnología de impresión 3D adecuada [En línea]. Disponible en: <https://formlabs.com/es/blog/fdm-sls-como-elegir-tecnologia-impresion-3d-adecuada/>

[9] Cómo funciona una impresora 3D FDM [En línea]. Disponible en: <https://sicnova3d.com/blog/experiencias-3d/como-funciona-una-impresora-3d-fdm/>

[10] FDM- Modelado por deposición fundida [En línea]. Disponible en: <https://www.3ds.com/es/make/service/3d-printing-service/fdm-fused-deposition-modeling>

[11] SLS y SLA: ¿Qué son y en qué se distinguen? [En línea]. Disponible en: <https://www.impresoras3d.com/sls-y-sla-que-son-y-en-que-se-distinguen/>

[12] Diferencias entre la tecnología DLP vs LCD en tu impresora de resina [En línea]. Disponible en: <https://www.impresoras3d.com/diferencias-entre-la-tecnologia-dlp-vs-lcd-en-tu-impresora-de-resina/>

[13] Guía completa: El filamento de PLA en la impresión 3D [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/guia-filamento-pla-en-la-impresion-3d-190820192/#!>

[14] Guía completa: El filamento de ABS en la impresión 3D [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/filamento-de-abs-impresion-3d-06062019/>

[15] Los diferentes tipos de resinas que existen para la impresión 3D [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/tipos-resinas-impresion-3d-201220222/#!>

[16] Usama Umer, Syed Hammad Mian, Khaja Moiduddin, Hisham Alkhalefah, Exploring Orthosis Designs for 3D Printing Applying the Finite Element Approach Study of Different Materials and Loading Conditions, Journal of disability research, 2023, volume 2, Issue 1, Páginas 85-97:

https://www.researchgate.net/publication/371668036_Exploring_Orthosis_Designs_for_3D_Printing_Applying_the_Finite_Element_Approach_Study_of_Different_Materials_and_Loading_Conditions

[17] A.I. Kapandji, Fisiología Articular. España: Ed. Médica Panamericana, Tomo I, 6ª.ed, pág. 146-151, 2006.

[18] Arcila. J, Cardona. D, Becerra, H. EL SISTEMA DE PALANCAS BASE PARA EL ANÁLISIS MECÁNICO DEL MOVIMIENTO CORPORAL HUMANO Y SUS ALTERACIONES, Revista actividad física y desarrollo humano, 2017. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/339506349_EL_SISTEMA_DE_PALANCAS_BASE_PARA_EL_ANALISIS_MECANICO_DEL_MOVIMIENTO_CORPORAL_HUMANO_Y_SUS_ALTERACIONES

[19] Jorge Vilches Garrigues, Estado actual de la impresión 3D FDM en la industria. Universitat politècnica de valència, 2021.

[20] Xkelet, la escayola 3D a través de tu smartphone [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/xkelet-escayola-3d-030320222/>

[21] Victor Tobes Perez, Raul Fernandez Perez, Uso de Kinect para el entrenamiento de actividades físicas, Universidad Complutense de Madrid, 2017.

[22] Gaussian Splatting, nueva técnica de renderización 3D [En línea]. Disponible en: <https://many-worlds.es/es/blog/gaussian-splatting-renderizacion-3d/>

[23] Meshmixer, el software gratuito de modelado para superficies 3D [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/meshmixer-software-modelado-261020202/>

[24] Tutorial de Fusion 360: Nociones básicas y consejos para la impresión 3D [En línea]. Disponible en: <https://formlabs.com/es/blog/fusion-360-tutorial-y-consejos-para-impresion-3d/>

[25] Ntopology [En línea]. Disponible en: <https://www.ntop.com>

[26] Rhinoceros: qué características tiene el software de modelado 3D [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/rhinoceros-caracteristicas-software-300320202/#!>

[27] Los beneficios de Grasshopper en la fabricación aditiva [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/grasshopper-fabricacion-aditiva-010620212/>

[28] Optimización topológica [En línea]. Disponible en: <https://formlabs.com/es/blog/optimizacion-topologica/>

[29] ¿Qué es la optimización topológica? [En línea]. Disponible en: <http://es.insta3dm.com/info/what-is-topology-optimization-simply-explai-79274969.html>

[30] Ayuda de Autodesk Fusion 360: Optimización de forma [En línea]. Disponible en: <https://help.autodesk.com/view/fusion360/ESP/?guid=SIM-SHAPE-OPTIMIZATION>

[31] Análisis de las propiedades físicoquímicas de materiales poliméricos para re-uso en impresiones 3D [En línea]. Disponible en: <http://www.cienciacierta.uadec.mx/2018/09/09/analisis-de-las-propiedades-fisicoquimicas-de-materiales-polimericos-para-re-uso-en-impresiones-3d/>

[32] Introducción al diseño generativo [En línea]. Disponible en: <https://formlabs.com/es/blog/disenio-generativo/>

[33] Voronoi, casco de bicicleta de diseño generativo [En línea]. Disponible en: <https://es.futuroprossimo.it/2020/08/voronoi-casco-da-bici-in-design-generativo/>

[34] Diagramas de Voronoi en R [En línea]. Disponible en: <https://datascience.recursos.uoc.edu/es/diagramas-de-voronoi-en-r/#:~:text=Un%20diagrama%20de%20Voronoi%20es,que%20a%20ning%C3%BAn%20otro%20centro.>

[35] Architected materials for impact absorption: A complete guide [En línea]. Disponible en: <https://www.ntop.com/resources/blog/architected-materials-impact-absorption/>

[36] Diseño de ajuste por presión: tipos de ajustes a presión y mejores prácticas [En línea]. Disponible en: <https://www.rapiddirect.com/es/blog/snap-fit-design/>

[37] Órtesis de mano [En línea]. Disponible en: <https://academiademano.ar/wp-content/uploads/2022/02/ortesis-de-mano.pdf>