



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS

“Francisco García Salinas”



Unidad Académica de Ingeniería I

MAESTRÍA EN CIENCIA E INGENIERÍA EN MATERIALES

**Fabricación de férulas personalizadas para pacientes quemados
mediante manufactura aditiva**

Tesis que presenta:

Ismael Aguilar Ortega

Para obtener el título de:

Maestro en Ciencia e Ingeniería de los Materiales

Director: Dr. Luis Carlos Ortiz Dosal

Codirector: Dr. Eleazar Samuel Kolosovas Machuca

Revisores:

Dr. Enrique Alejandro López Baltazar

Dr. Miguel Montoya Dávila

Agosto 2023



SOMOS
ARTE, CIENCIA Y
DESARROLLO
CULTURAL

**COORDINACIÓN DE
INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

Carta de similitud núm. 416/IyP
Zacatecas, Zacatecas 06/julio/2023

Dr. Omero Alonso González
Responsable de la MCIM – UAZ
Presente

Estimado Dr. Omero,

Después de saludarlo, sirva el presente oficio para notificar que el documento

"Fabricación de férulas personalizadas para pacientes quemados mediante manufactura aditiva"
De Ismael Aguilar Ortega

Fue analizado con el software Copyleaks, con la intención de detectar similitudes; el resultado en cuestión fue

20.9 % de similitud

De acuerdo a lo anterior, el porcentaje se considera **ACEPTABLE** de acuerdo a los estándares internacionales.

Atentamente

"Somos Arte, Ciencia y Desarrollo Cultural"

Dr. Carlos Francisco Bautista Capetillo
Coordinador de Investigación y Posgrado
Universidad Autónoma de Zacatecas



SOMOS
ARTE. CIENCIA Y
DESARROLLO
CULTURAL



Pasante de la Maestría en
Ciencia e Ingeniería de los Materiales
Ing. Ismael Aguilar Ortega
Presente

En relación con su atento oficio de fecha 13 de marzo del presente año, del cual solicita se le señale el **TEMA** que deberá desarrollar para la elaboración de su Tesis de Grado de Maestra en Ciencia e Ingeniería de los Materiales manifiesto a Usted lo siguiente:

Con esta fecha se reunieron los Docentes Investigadores, Dr. Luis Carlos Ortiz Dosal, Dr. Enrique Alejandro López Baltazar, y el Dr. Miguel Montoya Dávila, integrantes del H. Comité de Tesis, en la Dirección de esta Unidad Académica de Ingeniería y estuvieron acordes en fijar el siguiente:

TEMA

“FABRICACION DE FERULAR PERSONALIZADAS PARA PACIENTES QUEMADOS MEDIANTE MANUFACTURA ADITIVA.”

Lo que comunico a Usted Para su conocimiento manifestándole que se acordó un plazo de **SEIS MESES** para la presentación de su **TESIS**, indicándole que esta no deberá ser impresa hasta en tanto no envíe las copias correspondientes para ser revisadas por el H. Comité de Tesis para su aprobación o en caso indicarle las correcciones que fueren pertinentes.

A T E N T A M E N T E

Zacatecas, Zac., 15 de marzo del 2023



Dr. Víctor Manuel Ortiz Romero
Unidad Académica de Ingeniería
Director de la Unidad Académica de Ingeniería



SOMOS
ARTE CIENCIA Y
DESARROLLO
CULTURAL



DR. VÍCTOR MANUEL ORTIZ ROMERO
DIRECTOR DE LA UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA
PRESENTE

Zacatecas, Zac., 28 de abril del 2023

Los miembros del H. Comité de Tesis le informamos que la Tesis **"FABRICACION DE FERULAR PERSONALIZADAS PARA PACIENTES QUEMADOS MEDIANTE MANUFACTURA ADITIVA."** realizada por el alumno **Ismael Aguilar Ortega**, pasante de la Maestría en Ciencia e Ingeniería de los Materiales con número de matrícula 42106067, se acepta para su impresión y defensa como opción al Grado de Maestría en Ciencia e Ingeniería de los Materiales por este H. Comité de Tesis

Dr. Luis Carlos Ortiz Dosal

Director de Tesis

Dr. Enrique Alejandro López Baltazar

Revisor

Dr. Miguel Montoya Davila

Revisor

Dr. Omero Alonso González

Coordinador de la Maestría en Ciencia
e Ingeniería de los Materiales

Vo.Bo.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS "FRANCISCO GARCÍA SALINAS"

UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA

UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA DE LOS MATERIALES

Correo Electrónico: materiales@uaz.edu.mx Web: http://materiales.uaz.edu.mx



SOMOS
ARTE, CIENCIA Y
DESARROLLO
CULTURAL



DRA. EN D. SAMANTA DECIRE BERNAL AYALA
COORDINADORA DEL DEPARTAMENTO ESCOLAR
CENTRAL DE LA U.A.Z.
PRESENTE

La Dirección de esta Unidad Académica, comunica a usted que las copias del manuscrito de Tesis **“FABRICACION DE FERULAR PERSONALIZADAS PARA PACIENTES QUEMADOS MEDIANTE MANUFACTURA ADITIVA.”**, del C. Ismael Aguilar Ortega, a la misma, ya fueron revisadas y aprobadas para su impresión por el H. Comité de Tesis, constituida por el Dr. Luis Carlos Ortiz Dosal, Dr. Enrique Alejandro López Baltazar, y el Dr. Miguel Montoya Dávila, del Programa de la Maestría en Ciencia e Ingeniería de los Materiales.

Me despido de usted enviándole un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Zacatecas, Zac., 16 de junio de 2023



Dr. Víctor Manuel Ortiz Romero
Unidad Académica de Ingeniería
Director de la Unidad Académica de Ingeniería

C.c.p.- Archivo

RESUMEN

El objetivo de este trabajo de investigación es demostrar que una férula fabricada con filamento PLA y con el uso una impresora 3D se puede ayudar potencialmente en la recuperación y cicatrización a pacientes que han sufrido lesiones por quemaduras, debido a que cada paciente tiene necesidades diferentes se plantea la idea de hacer que la férula sea personalizada en razón de que puede favorecer más al paciente.

En investigaciones anteriores se ha comprobado que es viable el uso de impresión 3D para elaborar las férulas, sin embargo, debido a que en un entorno clínico o hospitalario es difícil que haya estaciones de diseño esto ha hecho que sea complicado fabricar las férulas personalizadas para cada paciente, también se concluyó que no hay una interfaz entre ingenieros que puedan crear las férulas y los médicos que atienden a los pacientes por lo que esto ha complicado el proceso.

Se tomo un caso de estudio Hospital Central "Dr. Ignacio Morones Prieto" de San Luis Potosí, S. L. P, y en colaboración con el personal médico se diseñó, se usó filamento PLA para imprimir la férula, el personal médico también apoyo en la adaptación de la férula al paciente.

Se documento todo el proceso del diseño y fabricación de la férula, se llevó a cabo una prueba mecánica tipo ensayo de tensión al material usado (PLA), y se concluyó que la férula realmente cumplió con su objetivo ayudando a la recuperación del paciente.

Este tema de estudio es muy importante ya que aborda un problema real en el campo de la medicina y presenta una solución potencialmente útil y personalizada mediante el uso de tecnología de impresión 3D. Es importante seguir investigando y desarrollando este enfoque para mejorar aún más la atención médica y el proceso de recuperación de pacientes con lesiones por quemaduras.

ABSTRACT

The objective of this research work is to demonstrate that a splint manufactured with PLA filament, using a 3D printer, can potentially aid in the recovery and healing of patients who have suffered burns. Since each patient has unique needs, the idea of creating personalized splints is proposed, as it can better cater to the individual requirements of the patient.

Previous research has established the feasibility of using 3D printing to fabricate splints. However, the lack of design stations in clinical or hospital settings has made it challenging to manufacture custom splints for each patient. Moreover, the absence of a proper interface between engineers capable of creating the splints and the medical staff attending to the patients has further complicated the process.

A case study was conducted at the Central Hospital "Dr. Ignacio Morones Prieto" in San Luis Potosí, S. L. P, where, in collaboration with the medical personnel, a custom splint was designed. PLA filament was used for printing the splint, and the medical staff assisted in its adaptation to the patient.

The entire process of designing and fabricating the splint was documented, and a mechanical test in the form of a tension assay was performed on the PLA material used. The results concluded that the splint effectively fulfilled its objective by aiding in the patient's recovery.

This study addresses a significant issue in the field of medicine and offers a potentially useful and personalized solution through the use of 3D printing technology. Continued research and development in this area are crucial to further improve medical care and the recovery process for patients with burn injuries.

AGRADECIMIENTOS

A mis maestros y asesores que me guiaron para elaborar este documento, a mis familiares, amigos y compañeros de generación por el apoyo, a todos los que de alguna manera me apoyaron, muchas gracias.

INDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT.....	2
AGRADECIMIENTOS	3
INDICE DE CONTENIDO	4
INDICE DE FIGURAS.....	6
INDICE DE TABLAS.....	8
INDICE DE GRAFICAS.....	8
1 INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 ANTECEDENTES.....	9
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
1.3 JUSTIFICACIÓN	12
1.4 REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	12
1.4.1 Manufactura Aditiva	12
1.4.2 Principales tecnologías de impresión 3D	15
1.4.2 Sistemas CAD	18
1.4.3 Ortesis o Férulas	18
1.4.3.1 Férulas. ¿Qué es una férula?.....	18
1.5 OBJETIVOS.....	19
1.5.1 Objetivo general:.....	19
1.5.2 Objetivos específicos:	19
1.6 HIPÓTESIS.....	19
1.7 RESULTADOS ESPERADOS	20
2 METODOLOGÍA	21
2.1 SELECCIÓN DEL MATERIAL.....	21
2.2 MATERIALES DE IMPRESIÓN 3D FDM MÁS USADOS.	22
2.2.1 Criterios de selección del material.....	23
2.2.2 Las opciones de filamento más usadas en impresión 3D FDM.....	24
2.3 VENTAJAS ESPECIALMENTE IMPORTANTES DEL PLA, ELECCIÓN DEL MATERIAL Y PROVEEDOR.....	28
2.3.1 Ventajas y elección del material	28
2.3.2 Selección del proveedor.....	29
2.3.3 Pruebas al Material.	29

2.4 PRUEBA DE TENSIÓN AL MATERIAL	30
2.4.1 ¿Qué es una prueba de tensión?	30
2.4.2 Diseño de la muestra	31
2.4.3 El relleno	33
2.4.4 Realización de la prueba de tensión	36
2.4.5 Resultados de la prueba de tensión.....	40
2.5 CASO DE ESTUDIO	48
2.5.1 Planeación del flujo de trabajo para crear las férulas	49
2.5.2 Etapas del flujo de trabajo para fabricar las férulas:	51
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	70
3.1 Prueba de tensión realizada al material y el valor de porcentaje de relleno en las férulas.....	70
3.2 Resultados del caso de estudio.....	71
3.4 Uso del software de modelado 3D Zbrush	73
4 CONCLUSIONES	74
REFERENCIAS.....	76
ANEXOS	79
Anexo 1 Dibujo de ingeniería de la muestra utilizada para las pruebas de tensión.....	79
Anexo 2 Segundo paciente documentado.....	81
Anexo 3 Análisis estadísticos realizados en R Studio.....	86

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Clasificación de los métodos de manufactura aditiva según la ASTM (15).	14
Figura 2 Proceso de impresión 3D por depósito de filamento fundido o más conocido como FDM (14). 15	15
Figura 3 Férula de plástico sujetando la mano de un paciente (22).....	18
Figura 4 Clasificación general de los materiales de ingeniería.	21
Figura 5 Rollos de filamento PLA marca Esun. Foto de la página de esun3D.com, fabricante de filamentos.	23
Figura 6 Diseño de la muestra de acuerdo al estándar D638 -10 (27).	31
Figura 7 Modelo 3D de la muestra realizado en Siemens NX.....	32
Figura 8 Muestra 1-1, con relleno al 20% patrón cuadrícula.....	34
Figura 9 Muestra 3-1, con relleno al 60% patrón cuadrícula.....	34
Figura 10 Impresora 3D Artillery x1, usada para imprimir las muestras.	36
Figura 11 Máquina universal de pruebas Shimadzu AG-I.	37
Figura 12 Muestra de PLA con relleno al 20 % ya fracturada en la prueba de tensión.	39
Figura 13 Muestras de PLA con relleno al 60% después de haber pasado por la prueba de tensión.	39
Figura 14 Diagrama de flujo del proceso para llevar a cabo el análisis estadístico.	42
Figura 15 Fotografías de las manos del menor con heridas.	49
Figura 16 Flujo de trabajo con las principales actividades para imprimir las férulas para el paciente del caso de estudio.	50
Figura 17 Medidas solicitadas al personal de salud del paciente.....	51
Figura 18 Captura de pantalla del Software Daz Studio, dentro del software un modelo 3D de un cuerpo humano.	53
Figura 19 Un escáner 3D trabajando en una pequeña pieza (37).....	54
Figura 20 Kit completo de fotogrametría para aplicaciones de ingeniería o medición (38).	56
Figura 21 Captura de pantalla del programa Zbrush, con el modelo estándar de un brazo humano antes de empezar a modelar la férula.	58
Figura 22 Etapa inicial del modelo 3D.....	59
Figura 23 Captura de pantalla mientras se realiza el modelo 3D.	60
Figura 24 Férula de la mano izquierda, modelo 3D creado en Zbrush.	61
Figura 25 Férula de la mano derecha, modelo 3D creado en Zbrush.....	61
Figura 26 captura de pantalla de la operación realizada en Ultimaker Cura.....	62
Figura 27 Férulas 3D impresas y con velcro adaptado para sujetar a las manos del paciente.	63
Figura 28 Se muestran las férulas impresas por la parte posterior.	64
Figura 29 Dispositivo de cartón, cinta para curaciones y vendas usado por los médicos antes de obtener las férulas.	65
Figura 30 El menor usando las férulas después de colocárselas por primera vez.....	66
Figura 31 Imagen de las dos manos del paciente con las férulas.	66
Figura 32 Mano derecha del paciente del caso de estudio.	67
Figura 33 Termografía de las manos del paciente	69
Figura 34 Fotos de las manos del paciente las heridas han mejorado después del uso de la férula.	72
Figura 35 Fotos antes y después del tratamiento con el uso de la férula en el paciente de la mano derecha.	72

Figura 36 Fotos antes y después del tratamiento con el uso de la férula en el paciente de la mano izquierda	73
Figura 37 Imagen del paciente donde se muestra la condición de la lateralización.	82
Figura 38 Foto del paciente después de la cirugía.....	83
Figura 39 Capturas de pantalla de varias vistas del modelo 3D de la férula.	84
Figura 40 Foto de la férula 3D impresa en PLA se colocó velcro para la sujeción.	84
Figura 41 Imágenes del paciente usando la férula personalizada.	85

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de los métodos de manufactura aditiva de acuerdo al principio básico de funcionamiento.....	14
Tabla 2 Resumen de las características de los materiales más comunes en la impresión tipo FDM.	28
Tabla 3 Mediciones obtenidas al diámetro del filamento marca 3Dpn en milímetros.	30
Tabla 4 Dimensiones en mm con las cuales se realizó el modelo 3D de la muestra (27).....	32
Tabla 5 Resumen del número de muestras para la prueba de tensión y forma de identificación.....	33
Tabla 6 Resumen de los porcentajes de relleno más utilizados de acuerdo las fuentes consultadas (9) (12) (28).....	35
Tabla 7 Mediciones de las muestras de PLA.	38
Tabla 8 Resumen de los resultados de la prueba de tensión.	40
Tabla 9 Valor p de los resultados de la prueba de tensión por cada grupo de muestras con diferente % de relleno.	43
Tabla 10 Valores de P en la prueba t de Student para la variable de Máximo esfuerzo.	45
Tabla 11 Media de algunas variables de la prueba de tensión (máxima carga, máximo. desplazamiento, máximo esfuerzo, máxima deformación).	47
Tabla 12 Mediciones realizadas a las manos del paciente en centímetros.	51

INDICE DE GRAFICAS

Gráfica 1 Comparación de los valores de p con el intervalo de confianza 0.05.	46
Gráfica 2 Valores del máximo esfuerzo para cada % de relleno.....	70

1 INTRODUCCIÓN

La impresión 3D ha sido utilizada ampliamente en los últimos años en aplicaciones relacionadas al área de la salud, una aplicación importante es la fabricación de férulas u ortesis para diversos tratamientos. En el presente trabajo demostramos la hipótesis de que una férula fabricada con manufactura aditiva puede ayudar a la recuperación de un paciente con heridas por quemaduras.

Se utilizaron los conocimientos adquiridos en la maestría en ciencia e ingeniería de los materiales para seleccionar un material adecuado para diseñar una pieza (férula), hacer un diseño funcional teniendo en cuenta las necesidades del paciente y fabricarla mediante manufactura aditiva (impresión 3D por depósito de filamento fundido) que permita un tiempo de recuperación menor en pacientes afectados por heridas en las manos causadas por quemaduras.

1.1 ANTECEDENTES

Las heridas por quemaduras son una de las condiciones más devastadoras en los casos de medicina, y según la severidad de los casos pueden causar discapacidades, limitaciones físicas y disminución en la calidad de vida de los pacientes (1). Cada año en algunos países como Estados Unidos se estima que alrededor de 500,000 personas acuden a buscar atención médica por quemaduras (2).

Aunque la mano comprende sólo entre 3-5% de la superficie del cuerpo humano es muy susceptible a lesiones o quemaduras debido a su proximidad con algunas fuentes térmicas o porque normalmente es usada como escudo para proteger otras partes del cuerpo, además de que la mano es el principal medio por el cual el ser humano se pone en contacto físico con el mundo. Por lo tanto, la mano es propensa a absorber una gran cantidad de energías lo que puede causar lesiones graves, entre éstas, quemaduras (3).

En los adultos las quemaduras son usualmente ocasionadas por actividades recreativas o por alguna actividad relacionada con su trabajo, mientras que en los niños son más frecuentes las lesiones por escaldaduras o quemaduras por contacto (3).

En México se reportaron 9073 defunciones por quemaduras entre el 2000 al 2013, con predominio en la población masculina adulta, también se tienen datos de este tipo de lesiones provocan alrededor de 300,000 defunciones al año (4), por lo que esto ha llevado a que los centros hospitalarios cuenten con una unidad especializada para atender a este tipo de pacientes, como lo es el caso de la Unidad de Quemados del Hospital Central “Dr. Ignacio Morones Prieto” el cual está ubicado en la ciudad de San Luis Potosí, S. L. P.

Según datos del mismo hospital se atiende la población del Estado de San Luis Potosí, de estados cercanos, como Zacatecas y Durango, entre otros y población migrante. La misión de esta unidad

antes mencionada tiene como misión atender a pacientes adultos y pediátricos con quemaduras que presenten criterios de hospitalización. Su objetivo principal es brindar una atención de calidad para devolver la salud al paciente después de su accidente y ayudarlo a incorporarse a sus actividades cotidianas (4), para llevar a cabo este trabajo de investigación se estableció una colaboración con dicha institución médica.

De acuerdo con la literatura consultada (2), el plan de rehabilitación para pacientes con quemaduras se enfoca principalmente en:

- a) Cuidado de heridas
- b) Posicionamiento
- c) Ejercicios de rango de movimiento
- d) Uso de férulas u ortesis
- e) Ejercicios de fortalecimiento
- f) Ejercicios funcionales y de resistencia.

Por otro lado, para prevenir contracturas en las articulaciones en los pacientes post quemaduras, se recomienda una atención integral que incluya adición de injertos en la piel, movilización articular temprana, cuidado adecuado de cicatrices y el uso de férulas u ortesis. La aplicación de ortesis o férulas es una importante práctica que debe mantenerse durante todo el proceso del cuidado de quemaduras (5), doctores del hospital médico y la literatura coinciden bastante en esto.

Actualmente no es fácil obtener férulas personalizadas a bajo costo por lo que una alternativa viable es el uso de impresión 3D para fabricarlas, este método de fabricación es de bajo costo y utilizando conocimientos en diseño se puede alcanzar un alto grado de personalización.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos 25 años las impresoras 3D se han utilizado para fabricar dispositivos terapéuticos como prótesis y ortesis (3). En junio de 2018 se llevó a cabo el desarrollo de una investigación en la cual a seis pacientes se les proporcionó una férula impresa en 3D que constaba de silicona y nylon de grado médico. El diseño de la férula se realizó usando software CAD (por sus siglas en inglés *computer aided design*), que quiere decir la utilización de tecnología informática para realizar diseños y/o modelo 3D de ingeniería) y un escáner 3D. Todos los pacientes usaron la férula por más de 7 meses, todas se justaron perfectamente al cuerpo del paciente. En esa investigación se demostró que es posible usar y fabricar las férulas usando impresoras 3D; incluso se demostró que esta técnica tiene varias ventajas con respecto al proceso de fabricación normal aunque se observó también que el costo era más elevado. Los autores concluyeron que en un futuro cercano cuando los costos de los escáneres, impresoras 3D y el uso de sistemas CAD de

código abierto sean más accesibles será más factible el uso de este proceso para fabricar las férulas (6).

En otro estudio realizado en 2020, se menciona que la manufactura aditiva (usando tecnologías de impresión 3D con polímeros) ha demostrado su capacidad para fabricar modelos personalizados de ortesis para pie y tobillo además de férulas para la parte de la muñeca de la mano, con buen ajuste, buena resistencia y buena evolución médica de los pacientes (7), usando técnicas de impresión 3D.

Por otro lado, en el trabajo de investigación de S. Telfer *et al.* (8) en 2012 se mencionan tres obstáculos los cuales limitan el uso de manufactura aditiva para su uso más efectivo. Esta misma investigación hace referencia a SLA (siglas en inglés para *Stereo Litography* - estereolitografía). Esta tecnología funciona mediante un mecanismo que proyecta una fuente de luz en un polímero para solidificarlo y crear el objeto 3D. También se menciona el término SLS (*Selective Laser Sintering* – sinterización por láser selectiva). Este método de manufactura aditiva utiliza una fuente térmica para sinterizar partículas de un polímero capa por capa hasta completar el objeto 3D (9). Por último, también se menciona la tecnología FDM, del término en inglés *Fused Deposition Modeling* en este proceso se utiliza un termoplástico el cual es extruido a través de una boquilla caliente, la impresora coloca el material en una plataforma hasta imprimir el modelo 3D (10).

Continuando con la investigación de S. Telfer *et al.*, sobre los obstáculos que limitan el uso de la manufactura aditiva, el primer obstáculo es que, si bien es posible usar paquetes de CAD para producir modelos de ortesis con geometrías complejas y que al mismo tiempo sea posible hacer cambios rápidos en forma y tipo, no existe actualmente un software que permita fabricarlas en un entorno clínico. En segundo lugar, para diseñar un dispositivo personalizado, el software CAD requiere un escaneo 3D de la parte anatómica de interés, ya sea tomado directamente del paciente o de un modelo 3D base, y se menciona que actualmente hay varios paquetes comerciales que permitan realizar esta actividad, pero debido a la restricción del médico para manipular la posición de pies o tobillos o el área afectada por una herida mientras se realiza el escaneo 3D, este enfoque aún no ha sido aceptado por los mismos médicos. En tercer lugar, se menciona que, si bien la tecnología de impresión 3D es una opción económica (en términos de máquinas y material en comparación con tecnologías como SLS y SLA) presenta la dificultad de imprimir geometrías complejas debido al uso de soportes necesarios para realizar una “buena impresión 3D”. También se menciona que los tiempos de impresión no son tan buenos como en las tecnologías SLS y SLA, por lo tanto, se sugiere que esta tecnología (FDM) sea usada sólo para la fabricación en bajo volumen. Por último, también se menciona en este artículo de investigación que los costos de impresión 3D en tecnologías SLS y SLA aún están por encima de los que normalmente se cotizan con los dispositivos usados tradicionalmente (8).

Por lo anterior es de importancia seguir trabajando en el área de desarrollo de férulas u ortesis que ayuden a los pacientes que sufren este tipo de lesiones. En particular en el uso de tecnologías de impresión 3D por FDM y en el mejor método para llegar a obtener los diseños de las férulas u

ortesis de la mejor forma posible. Como ejemplo está la Unidad de Quemados del Hospital Central “Dr. Ignacio Morones Prieto”, en la ciudad de San Luis Potosí, que tiene frecuentemente la necesidad de adaptar férulas y ortesis a los pacientes que acuden a solicitar atención.

1.3 JUSTIFICACIÓN

La investigación y desarrollo de nuevos métodos de diseño y fabricación de férulas personalizadas permitirá que cada vez sean más accesibles para las personas que las necesitan, como es el caso de los pacientes de la unidad de quemados del Hospital Central “Dr. Ignacio Morones Prieto”.

El movimiento normal de pacientes con quemaduras en sus extremidades hace que la recuperación se vuelva lenta, por lo que es necesario el uso de férulas que inmovilicen y protejan las heridas durante todo el proceso de tratamiento de este tipo de heridas.

Se plantea la necesidad de usar PLA como material para fabricar la férula, ya que es de bajo costo, accesible, fácil de imprimir en una impresora de depósito de filamento fundido y no presenta reacciones desfavorables para el cuerpo humano.

La ciencia e ingeniería en materiales es una combinación de dos áreas importantes en la ingeniería, por un lado, la ciencia en materiales, que es el conocimiento básico de la estructura interna, propiedades y la elaboración de materiales, y por otro lado, la ingeniería en materiales, la cual se interesa principalmente por el empleo fundamental y aplicado de materiales para que éstos puedan ser convertidos en productos que la sociedad necesita (11).

Por lo anterior se plantea llevar a cabo este proyecto desde un enfoque de ciencia e ingeniería en materiales para diseñar y/o elaborar las férulas impresas en 3D que una parte de la sociedad necesita con base en los principios de ciencia e ingeniería en materiales e impresión 3D.

1.4 REVISIÓN DE LA LITERATURA

1.4.1 Manufactura Aditiva

La manufactura aditiva es un término general para referirse a un proceso de fabricación en el cual se usa una máquina-herramienta para crear objetos físicos en 3D construyendo el objeto en capas y depositando el material capa por capa (12). Una impresora 3D es el tipo de máquina que se usa en este proceso ya que su principio de funcionamiento es construir un objeto capa por capa, el material que se usa en las impresoras 3D depende del método de manufactura aditiva que se esté aplicando.

Las impresoras en 3D se empezaron a utilizar en los sectores industriales, ya que en un principio los costes eran algo dispares y ahora las podemos encontrar en precios más o menos económicos.

Una ventaja importante de la impresión 3D es el poder hacer prototipos y piezas rápidamente, por ejemplo, durante la contingencia sanitaria por COVID-19 en todo el mundo, las impresoras 3D fueron usadas para crear rápidamente miles de “caretas protectoras” para evitar la propagación del virus (13), en este caso se utilizaron impresoras 3D y algún material plástico.

1.4.1.2 Métodos de manufactura aditiva

Actualmente hay varios métodos de manufactura aditiva, y la forma en que un objeto se crea en una impresora 3D depende de la tecnología que se use, sin embargo, hay cuatro formas básicas en las que se basan la mayoría de las tecnologías de impresión 3D, a continuación, se explican:

Primero, extrusión de material, hay impresoras 3D que crean objetos usando material fundido o semilíquido a través de una boquilla del cabezal de impresión. La mayoría de las veces, se utiliza un termoplástico fundido que se endurece rápidamente. Algunas impresoras 3D utilizan metal fundido o incluso chocolate o glaseado para imprimir creaciones culinarias en 3D. También existen impresoras 3D que pueden usar concreto, pasta cerámica o arcilla para fabricar objetos, básicamente este es el primer método en que se basan las impresoras 3D (14).

Segundo, fotopolimerización, estas impresoras 3D que crean objetos mediante la solidificación selectiva de una resina líquida conocida como "fotopolímero", que se endurece cuando es expuesta a un láser u otra fuente de luz. Algunas de estas impresoras de "fotopolimerización" construyen capas del objeto sumergiéndolas en un tanque de líquido. Mientras tanto, otras inyectan una sola capa de resina desde una cabeza de impresión y utilizan luz ultravioleta para solidificarla antes de agregar la siguiente capa (14).

Tercero, unión de partículas de polvo, este proceso se basa construir objetos capa por capa al unir selectivamente los gránulos o partículas de un polvo muy fino. El objeto 3D se fabrica mediante la inyección de un adhesivo sobre capas sucesivas de polvo, o mediante la fusión de las partículas del polvo con un láser u otra fuente de calor (14).

Y un último método se basa en la laminación, en este caso, capas sucesivas de papel, metal o plástico cortadas en laminas se pegan juntas para construir un objeto sólido. Cuando se utilizan hojas de papel como material de construcción, son cortadas con una cuchilla o láser y luego pegadas entre sí (14).

En los últimos años se han desarrollado varias técnicas de manufactura aditiva todas basadas en los cuatro principios de funcionamiento descritos anteriormente, una clasificación estandarizada para simplificar la terminología entre usuarios, investigadores y empresas fue elaborada por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM siglas en inglés de *American Society for Testing and Materials*) y se muestra en la figura 1, debido a que el documento consultado (15) tiene la terminología en inglés, se agregaron los nombres de los procesos en inglés y español:



Figura 1 Clasificación de los métodos de manufactura aditiva según la ASTM (15).

Con base en los cuatro principios de funcionamiento descritos anteriormente, se pueden clasificar estos métodos estandarizados por ASTM como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1 Clasificación de los métodos de manufactura aditiva de acuerdo al principio básico de funcionamiento.

Principio de funcionamiento	Extrusión	Fotopolimerización	Unión de partículas de polvo	Laminación
Tipo de proceso de manufactura aditiva	Extrusión de material	Fotopolimerización	Inyección de aglutinante	Laminación de laminas
		Material de inyección	Fusión de lecho de polvo	
			Deposición de energía dirigida	

Actualmente las aplicaciones de la impresión 3D son múltiples y muy variadas gracias a las diferentes técnicas y materiales que se pueden utilizar en función del tipo de objeto, precisión de detalles y resistencia (16).

Por ejemplo, en el área de medicina y salud, ya es una realidad el hecho de poder crear ciertas partes del cuerpo a través de impresoras en 3D y que son toleradas por el organismo. En el ámbito de las prótesis y otras especialidades como la odontología es donde quizás hay más utilidades. Eso sin olvidar la gran ventaja de poder crear piezas o aparatos sanitarios con gran rapidez (16).

1.4.2 Principales tecnologías de impresión 3D

1.4.2.1 La técnica de impresión 3D por depósito de filamento fundido.

Esta técnica (FDM siglas en inglés *Fused Deposition Modeling*) consiste en depositar sucesivamente un filamento de plástico o metal, y pertenece al método de manufactura aditiva de extrusión descrito anteriormente. En este proceso una boquilla de extrusión, a través de la cual pasa el filamento, va depositando el material siguiendo el trazado definido por el archivo del modelo 3D. Esta boquilla se calienta a más de 185 °C, (esta temperatura varía dependiendo del tipo de filamento) fundiendo el material a medida que imprime. El material es depositado en capas muy finas (una media de 0,04 mm de grosor). El objeto se construye, por lo tanto, capa por capa, de la base a la cima, como se muestra en la figura 2.

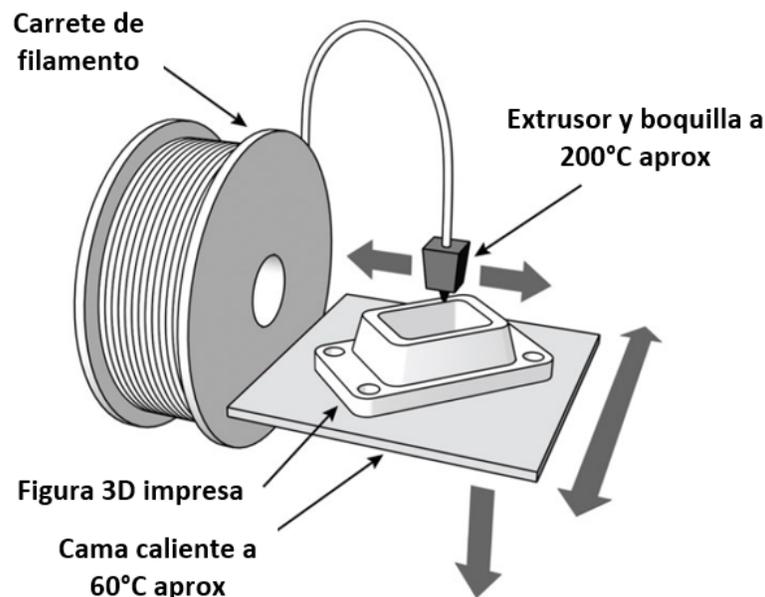


Figura 2 Proceso de impresión 3D por depósito de filamento fundido o más conocido como FDM (14).

1.4.2.1.1 Parámetros y observaciones importantes para realizar una impresión 3D exitosa usando una impresora tipo FDM.

Una impresión 3D exitosa usando la técnica de depósito de filamento fundido tiene las siguientes características (12):

- La pieza física no presenta rebabas o exceso de material
- La pieza física tiene un acabado liso, aunque las marcas de la altura de capa son visibles (dependiendo del valor configurado previamente) aun así se debería de apreciar un acabado uniforme.
- La pieza no presenta deformaciones.
- El objeto impreso en 3D corresponde dimensionalmente con el diseño 3D de la pieza.
- La pieza impresa en 3D esta solida sin partes “flojas” o frágil.

Los parámetros para imprimir correctamente una pieza, varían dependiendo de cada material por ejemplo para imprimir en PLA se recomienda usar 200° C mientras que para otros materiales coma ABS se puede imprimir a 240°C, por lo que dependiendo de cada material hay que elegir los parámetros adecuados, en la sección 2.2.2 se explica más a detalle que parámetros funcionan mejor para cada filamento.

En general para imprimir correctamente en una impresora 3D tipo FDM se recomienda lo siguiente (14) (9):

- Tener una buena nivelación de cama
- Asegurarse que todos los tornillos, bandas, rodamientos, ejes de la impresora estén bien ajustados.
- Usar un material de buena calidad
- Mantener los rodamientos de la impresora engrasados
- Realizar mantenimientos preventivos a las impresoras.
- Hacer una buena configuración de temperaturas y parámetros para cada material que se valla a imprimir.
- Asegurar que la impresión de la primera capa de la pieza sea eficaz ya que si la primera capa por alguna razón presenta errores las capas posteriores también tendrán algún tipo de defecto y por consiguiente la impresión no será exitosa.

1.4.2.1.2 Ácido poliláctico

El ácido poliláctico o también conocido por las siglas PLA en un poliéster alifático altamente versátil y biodegradable derivado de recursos 100% renovables como el maíz y la remolacha azucarera, es usado en una amplia gama de productos básicos (17). Por estos motivos el PLA tiene diversas aplicaciones, desde medicina, elaboración de juguetes, así como en varias industrias y en algunos casos reemplazando a polímeros petroquímicos convencionales. Una

ventaja importante de este material es que es biodegradable y biocompatible. Este material es de los más utilizados actualmente en la impresión por depósito de filamento fundido.

El ácido poliláctico (PLA) es un biopolímero termoplástico ampliamente estudiado debido a su potencial como alternativa sostenible a los plásticos convencionales.

Investigaciones como la realizada por Chen y Patel (18) han demostrado que el PLA es soluble en agua caliente y puede experimentar una degradación acelerada en presencia de humedad y altas temperaturas durante largos períodos de tiempo. Esta degradación es el resultado de un proceso de hidrólisis, en el cual las moléculas de agua reaccionan con los enlaces químicos del PLA, causando la ruptura de la cadena polimérica.

Además, estudios como los de Aluigi et al. (19) y Panaitescu et al. (20) han señalado que la presencia de microorganismos, como bacterias y hongos, puede acelerar la degradación del PLA en ambientes acuosos. Estos microorganismos descomponen el PLA a través de procesos biológicos, lo que resulta en una descomposición más rápida del material.

Es importante destacar que la degradación del PLA en agua es un proceso gradual y depende de las condiciones ambientales. En las mismas fuentes consultadas se ha señalado que la velocidad de degradación varía según la temperatura, la humedad y la presencia de microorganismos específicos, n condiciones normales de uso y almacenamiento, el PLA es estable y resistente al agua.

1.4.2.2 Estereolitografía (SLA)

La estereolitografía (SLA siglas en inglés para *Stereo Litography* - estereolitografía) fue la primera tecnología de impresión 3D del mundo, inventada en los años 80's, y sigue siendo una de las tecnologías más populares en el ámbito profesional. La impresión por SLA usa un láser para curar resina líquida y convertirla en plástico endurecido, por lo tanto, pertenece al método de fotopolimerización mencionado anteriormente.

Las piezas realizadas mediante SLA ofrecen el mayor grado de resolución y precisión, los detalles más nítidos y el acabado de la superficie más liso de todas las tecnologías de impresión 3D, pero el principal beneficio de la SLA se encuentra en su versatilidad. Los fabricantes de materiales han creado innovadoras fórmulas de resina fotopolimerizable para SLA con una gran variedad de propiedades ópticas, materiales y térmicas capaces de igualar las de los termoplásticos estándar, industriales y para ingeniería.

La impresión por SLA es una excelente opción para prototipos con un alto nivel de detalle que requieren una escasa tolerancia y superficies lisas, como moldes, patrones y piezas funcionales. Es una técnica que se utiliza en diversas industrias, desde la ingeniería y el diseño de productos a la fabricación, la odontología, la joyería, la elaboración de maquetas y la educación (21).

1.4.2 Sistemas CAD

Los sistemas de diseño asistido por computadora CAD (por sus siglas en inglés *Computer-Aided Design*), consisten en el uso de sistemas informáticos para crear dibujos o modelos 2D o 3D que permitan representar una pieza o un modelo. Los modelos que son creados pueden representar alto nivel de detalle, ya que se utilizan representaciones matemáticas para definir el objeto que se desea crear.

Los sistemas CAD son ampliamente usados en la impresión 3D para representar los objetos que se van a fabricar.

1.4.3 Ortesis o Férulas

1.4.3.1 Férulas. ¿Qué es una férula?

Una férula es un dispositivo externo y rígido hecho de diversos materiales como aluminio, yeso, madera, cartón, plástico entre otros, y que es empleado en lesiones que ameritan la inmovilización, en la figura 3 se muestra una imagen de una férula de brazo.



Figura 3 Férula de plástico sujetando la mano de un paciente (22).

¿Para qué se usan las férulas?

Las férulas se utilizan con la finalidad de mantener en la posición adecuada, permitir el sostén e inmovilizar diferentes zonas del cuerpo, generalmente las zonas de mayor movilidad.

De esta forma la férula se utiliza de forma temporal en el tratamiento de fracturas y luxaciones, para permitir el proceso de consolidación del hueso y cicatrización de los tejidos lesionados, además este dispositivo facilita la circulación tanto venosa como linfática de la zona afectada, y por último corrige y evita deformidades.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo general:

Desarrollar una férula personalizada que puedan ser utilizada en la extremidad (mano) de un paciente pediátrico con quemaduras para mejorar el proceso de recuperación y cicatrización de las lesiones.

1.5.2 Objetivos específicos:

1. Diseñar la férula mediante la aplicación de técnicas de diseño asistido por computadora.
2. Fabricar la férula mediante manufactura aditiva (impresión 3D por depósito de filamento fundido) usando filamento PLA.
3. Caracterizar las propiedades mecánicas de las férulas fabricadas.
4. Evaluar si los dispositivos creados con impresión 3D realmente cumplen con las funciones de una férula ayudando en la recuperación del paciente.

1.6 HIPÓTESIS

Una férula personalizada construida mediante impresión 3D (por depósito de filamento fundido) y material PLA permite que las heridas en manos de pacientes pediátricos por quemaduras sanen más rápido.

1.7 RESULTADOS ESPERADOS

1. Evaluar el uso de la férula que fabriquemos junto con el personal de salud del Hospital Central "Dr. Ignacio Morones Prieto" de San Luis Potosí, S. L. P.,
2. Qué la férula desarrollada muestre resultados positivos en la mejoría del paciente
3. Tener un proceso documentado con base en la experimentación y observación del diseño y desarrollo de la férula personalizada el cual permita la comprobación mediante la evaluación médica de que la férula ayudará a que las pacientes post quemaduras presenten una mejor recuperación.

2 METODOLOGÍA

2.1 SELECCIÓN DEL MATERIAL

Se realizó una investigación bibliográfica para clasificar y contextualizar los materiales de ingeniería. De acuerdo con varias fuentes (11) (23), se comparte la idea de que se puede clasificar a los materiales dentro de cuatro grandes grupos principales los cuales son: materiales metálicos, poliméricos (plásticos), cerámicos y compuestos. En la Figura 4 se muestra la clasificación mencionada.

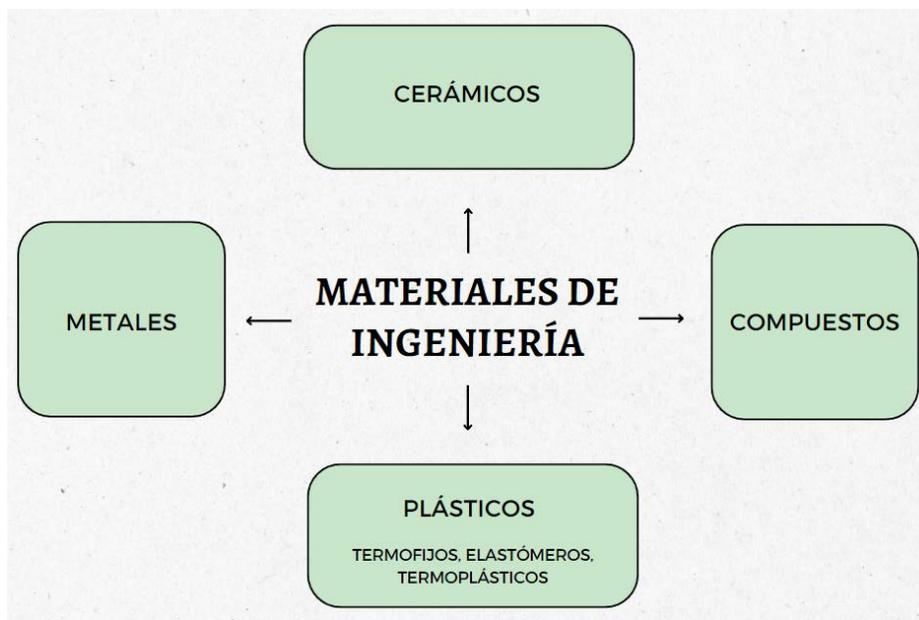


Figura 4 Clasificación general de los materiales de ingeniería.

De acuerdo con esta clasificación el presente trabajo se enfocó en los materiales termoplásticos, que están dentro de la clasificación de polímeros o plásticos.

Los plásticos son uno de los numerosos materiales poliméricos y tienen moléculas extremadamente grandes. Entre los productos de consumo e industriales fabricados con polímeros están los recipientes para alimentos y bebidas, empaques, artículos de señalización, partes o piezas de computadoras y monitores, textiles, material médico, espumas, pinturas, blindajes de seguridad, juguetes, aparatos domésticos y electrodomésticos, lentes entre otros.

La palabra plástico procede del griego *plastikos*, que significa "capaz de ser moldeado y formado". Los plásticos se pueden formar, maquinar, fundir y unir en diversas formas con relativa facilidad.

Se requieren operaciones mínimas adicionales de acabado superficial, si es que se necesita alguna; esta característica proporciona una ventaja importante sobre los metales. Los plásticos se encuentran disponibles en el mercado como película, lámina, placa, barras y tubos de diversas secciones transversales (23).

Los polímeros en impresión 3D generalmente vienen en 3 diferentes formas, filamento, resina, y polvos, y generalmente están divididos en termoplásticos y termofijos. La principal diferencia entre ellos es su comportamiento con la temperatura.

Un termoplástico es un plástico que a altas temperaturas puede fundirse, permitiendo después darle diferentes formas. Cuando se calienta se derrite y cuando se enfría se endurece, esta propiedad es de mucha ayuda para reciclar el plástico, ya que luego de calentarse y moldearse pueden volverse a calentar y formar otros objetos.

La popularidad de los termoplásticos se encuentra en su capacidad de reutilizarse. Existen diferentes tipos de termoplásticos, entre los más usados están el policarbonato, el polietileno (PE), el poliéster, el nylon, el teflón, el policloruro de vinilo (PVC), el polipropileno (PP), el polibutileno (PB), el poliestireno (PS), el polimetilmetacrilato (PMMA) y el politereftalato de etileno (PET). Estos polímeros termoplásticos se encuentran en la vida diaria, al cocinar en un sartén con teflón, en los pisos de vinilo de las oficinas y casas, en las tuberías, entre muchísimas cosas más. Son materiales muy versátiles que poseen las siguientes propiedades:

- Se pueden reciclar y reusar.
- Buenos aislantes térmicos y eléctricos.
- Maleables con el calentamiento.
- Buena resistencia química a temperatura ambiente.
- Buena resistencia a la fluencia.

Además, los polímeros termoplásticos tienen otras características propias como el hecho de que cada plástico cuenta con una temperatura de transición por debajo de la cual son duros y frágiles, y por encima pueden ser suaves y flexibles (24).

2.2 MATERIALES DE IMPRESIÓN 3D FDM MÁS USADOS.

Los filamentos termoplásticos son el material más usado en impresoras tipo FDM, cuando se calientan se vuelven blandos y flexibles, y cuando se enfrían se endurecen (23). Los filamentos vienen envasados en bobinas y se pueden encontrar en varios colores y tamaños, en la figura 5 se muestra una imagen de como son los rollos de PLA de la marca esun.



Figura 5 Rollos de filamento PLA marca Esun. Foto de la página de esun3D.com, fabricante de filamentos.

2.2.1 Criterios de selección del material

Seleccionar el filamento que mejor se adapte a cierta impresora 3D o a cierto proyecto es una tarea importante en cualquier proceso de impresión 3D ya que esto afecta el resultado final. Cada filamento tiene sus ventajas y desventajas.

Algunos puntos a considerar preliminarmente son:

1. Diámetro del filamento:

Seleccionar el diámetro adecuado para cada tipo de impresora FDM para asegurar que haya compatibilidad entre filamento e impresora, actualmente hay 2 tipos de medidas disponibles en el mercado:

- 1.75 mm

- 3.0 mm

2. Tipo de filamento

Plástico es el principal material en impresión 3D, pero en algunas presentaciones se puede encontrar combinado con aditivos que alteran sus propiedades como resistencia, color, textura, etc.

Algunos de estos tipos pueden ser:

- Básico (Sólo polímero, polímero con colorantes)
- Híbrido (Polímero con materiales adicionales)
- Fórmulas para aplicaciones especiales.

Es importante verificar cuáles son las necesidades del proyecto antes de elegir cualquier material.

3. Costo y disponibilidad

Los filamentos para impresión 3D en México pueden comprarse en la mayoría de las tiendas virtuales en línea como Mercado Libre, Amazon, Steren entre otros, o incluso con proveedores que pueden manejar varias marcas y tipos de filamento. Dependiendo de la calidad y tipo de filamento los precios por un rollo de material van desde \$350 pesos mexicanos hasta \$2000 pesos mexicanos, normalmente con 1 kg de material cada rollo.

4. Calidad

No todos los filamentos tienen la misma calidad, y esto es importante para obtener piezas finales de buen acabado o con una mejor geometría. Los puntos a tomar en cuenta al elegir un filamento y revisar la calidad son:

- **Diámetro del filamento:** El diámetro del filamento debe ser consistente, algunas marcas manejan tolerancias entre +/- 0.02 mm y es importante verificar que no sea demasiado grueso o demasiado delgado para evitar problemas al momento de imprimir.
- **Impurezas, residuos, viscosidad.** Normalmente los filamentos de baja calidad tienden a tener impurezas o imperfecciones que al momento de realizar las impresiones ocasionan atascos en la impresora.
- **Humedad.** Los filamentos tienden a absorber humedad de la atmósfera y esto ocasiona que no se impriman correctamente, por lo que es necesario que se revise que el material venga bien empacado y sellado al vacío para evitar que tenga humedad antes de empezar a usarlo (12).

2.2.2 Las opciones de filamento más usadas en impresión 3D FDM

2.2.2.1 ABS (*Acrilonitrilo-butadieno-estireno*)

Propiedades importantes:

Útil para partes durables que deben soportar altas temperaturas, fácil de imprimir, plástico resistente

Usos comunes:

Partes de lego, equipo para deportes, accesorios para teléfonos celulares, juguetes, dispositivos electrónicos.

Uso en impresión 3D

El ABS es ideal para partes que tengan movimiento, cubiertas para partes electrónicas, juguetes, entre otros dispositivos.

Ventajas:

- Ligero y ligeramente flexible
- Uno de los termoplásticos más baratos del mercado
- Tolera temperaturas más elevadas
- Uno de los primeros materiales de impresión 3D.

Desventajas:

- Plástico a base de petróleo y menos biodegradable.
- Requiere una temperatura más alta para alcanzar el punto de fusión
- Crea humos que pueden irritar a las personas
- Es propenso a encogerse y alabearse

Resistencia/Flexibilidad/Durabilidad

Resistencia: Alta / Flexibilidad: Media / Durabilidad: Alta

Temperatura de impresión (general)

210 °C - 250 °C

Temperatura de la cama (general)

80 °C - 110 °C

Adherencia a cama caliente

Recomendable usar cinta o espray para el cabello

2.2.2.2 PLA (Ácido Poliláctico)

Propiedades importantes:

No tiene olor, no se deforma mucho, es amigable con el medio ambiente, se imprime fácil.

Usos comunes:

Implantes médicos biodegradables, envoltorios de caramelos, envases de alimentos, piezas de prototipos, piezas de arte etc.

Uso en impresión 3D

El PLA tiene la capacidad de degradarse en ácido láctico el cual es inofensivo para el ser humano y para el organismo, debido a esta propiedad, se utiliza en suturas médicas y en algunos implantes quirúrgicos.

Implantes como tornillos, varillas, u otro tipo de dispositivos implantados quirúrgicamente se descomponen naturalmente en el organismo.

Además, el PLA se considera seguro para los alimentos, por lo tanto, se utiliza en envasados, artículos desechables, ropa, productos de higiene, pañales, etc.

Ventajas:

- Es de los materiales más fáciles de imprimir
- Es ideal para principiantes en la impresión 3D
- Menos propenso a la deformación en comparación con el ABS
- Puede producir un aroma dulce cuando se imprime, al cual no es desagradable

Desventajas:

- Puede ser fuerte pero frágil
- Atrae las moléculas de agua y en ocasiones se vuelve quebradizo, eso lo hace difícil de imprimir si no se almacena correctamente
- El PLA con humedad necesita una temperatura de extrusión más alta

Resistencia/Flexibilidad/Durabilidad

Resistencia: Alta / Flexibilidad: Baja / Durabilidad: Media

Temperatura de impresión (general)

190 °C - 230 °C

Temperatura de la cama (general)

40 °C - 60 °C

Adherencia a cama caliente

Recomendable usar Cinta o espray para el cabello

2.2.2.3 PETG (Tereftalato de polietileno Glicol)

Propiedades importantes:

Puede ser certificado por autoridades para usar en recipientes de comida, utensilios para preparar alimentos, no suele causar deformación, sin olor ni humo al momento de imprimirse.

Usos comunes:

Accesorios para celulares, partes mecánicas, botellas de agua, joyería, etc.

Uso en impresión 3D

El PETG es normalmente usado para fabricar accesorios para aparatos electrónicos, celulares, y piezas que requieren un poco de flexibilidad y resistencia al impacto.

Ventajas:

- Apto para uso alimentario
- Material fácil de imprimir en 3D.
- Flexible entre el ABS y el PLA
- Maneja un amplio rango de temperaturas de impresión.
- Duro y a prueba de golpes

Desventajas:

- Absorbe la humedad del aire, debe almacenarse adecuadamente para evitar problemas.
- Requiere temperaturas más altas para imprimir que el PLA. Algunas impresoras no pueden alcanzar las temperaturas requeridas.

Resistencia/Flexibilidad/Durabilidad

Resistencia: Alta / Flexibilidad: Media / Durabilidad: Alta.

Temperatura de impresión (general)

230 °C - 250 °C

Temperatura de la cama (general)

50 °C - 70 °C

Adherencia a cama caliente

Recomendable usar Cinta o espray para el cabello.

En la Tabla 2 se puede apreciar un resumen comparativo de las características de cada material:

Tabla 2 Resumen de las características de los materiales más comunes en la impresión tipo FDM.

Características	ABS	PLA	PETG
Temp. en boquilla	210-250° C	190-230°C	230-250°C
Temp. en Cama	80-110° C	40-60°C	50-70°C
Ventilador de capa	100%	100%	40%
Alturas de capa	0.12-0.32 mm	0.12-0.32 mm	0.12-0.32 mm
Resistencia	Alta	Alta	Alta
Flexibilidad	Media	Baja	Media
Durabilidad	Alta	Media	Alta
Usos comunes	Partes de Lego, equipo para deportes, accesorios para teléfonos celulares, juguetes, etc.	Implantes médicos biodegradables, envases de alimentos, prototipos, piezas de arte.	Accesorios para celulares, partes mecánicas, botellas de agua, joyería, etc.

2.3 VENTAJAS ESPECIALMENTE IMPORTANTES DEL PLA, ELECCIÓN DEL MATERIAL Y PROVEEDOR.

2.3.1 Ventajas y elección del material

Biodegradable:

El plástico biodegradable es un plástico que se descompone de forma natural en el medio ambiente y más rápido que el plástico tradicional.

Biocompatible

El PLA ha sido usado en usos clínicos desde hace años y se ha demostrado que es biocompatible (compatible con el cuerpo humano).

Estas ventajas resultan sumamente importantes para la investigación del presente proyecto, ya que se pretende que las férulas impresas en 3D estén en contacto con el cuerpo humano, por lo que en este punto de la investigación se decidió elegir el material PLA para continuar con el proyecto.

2.3.2 Selección del proveedor.

En México existe una gran variedad de marcas, proveedores, o vendedores de material para impresión 3D, por lo que bastó con realizar investigación en sitios web y tiendas de comercio electrónico para obtener información de precios, tiempos de entrega, especificaciones etc.

La marca de Filamentos 3Dpn Plastic con sede en la ciudad de Monterrey Nuevo León, México ofrece una amplia gama de materiales para impresión 3D y en su sitio web anuncian tener más de 20 años de experiencia por lo que accedimos a probar con su PLA en color dorado, blanco y negro para empezar a realizar pruebas al material.

2.3.3 Pruebas al Material.

Revisión de dimensiones y empaquetado.

El material se recibió en perfecto estado, se observó que se encontraba perfectamente sellado al vacío (y con bolsa de disecante) lo cual descartó la posibilidad de que llegara con humedad, además de que el embobinado del filamento se notó bien enrollado.

Comprobación de diámetro.

La impresora con la que se desarrolló el proyecto (la cual es descrita más adelante) es compatible con filamento de diámetro 1.75 mm, por lo que fue importante adquirir el filamento con esta especificación.

Una vez recibido el filamento de la marca 3Dpn se procedió a realizar mediciones para comprobar que este cumpliera con la especificación, en la Tabla 3 se muestran los resultados:

Tabla 3 Mediciones obtenidas al diámetro del filamento marca 3Dpn en milímetros.

Medición #	Resultado en mm
1	1.75
2	1.76
3	1.75
4	1.74
5	1.76
6	1.74
7	1.75
8	1.76
9	1.75
10	1.75
Media	1.75

Por lo anterior, se demostró que el material muestra un buen desempeño en cuanto al cumplimiento de la especificación del diámetro, además de tener buen embobinado, y buen empaquetado.

2.4 PRUEBA DE TENSIÓN AL MATERIAL

2.4.1 ¿Qué es una prueba de tensión?

Una prueba de tensión, también conocida como ensayo de tracción o prueba de resistencia a la tracción, es una técnica utilizada para evaluar las propiedades mecánicas de un material cuando se somete a una fuerza de tracción. Esta prueba es comúnmente utilizada en la ciencia e ingeniería de materiales para determinar la resistencia, ductilidad y comportamiento ante la deformación de un material (25).

Durante la prueba de tensión, una muestra del material se coloca en una máquina de ensayo y se aplica una fuerza de tracción gradualmente creciente. Esto produce una deformación en la muestra, que se mide en función de la fuerza aplicada y la elongación resultante. A partir de estas mediciones, se obtiene una curva de tensión-deformación, que proporciona información sobre las propiedades mecánicas del material (25) (26).

Es importante mencionar que la prueba de tensión se realiza siguiendo normas y estándares específicos, como ASTM E8 para metales y ASTM D638 para plásticos, entre otras, que establecen los procedimientos de ensayo, las dimensiones de las muestras y los parámetros a medir.

2.4.2 Diseño de la muestra

Para llevar a cabo esta se tomó de referencia el estándar de ASTM D638-10 *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics* (27) en la figura 6 se muestra una imagen tomada de estándar.

Este documento cubre los requerimientos de diseño para determinar las propiedades de tensión de plásticos reforzados y no reforzados en forma de muestras estándar, y para realizar las pruebas de tensión en condiciones controladas.

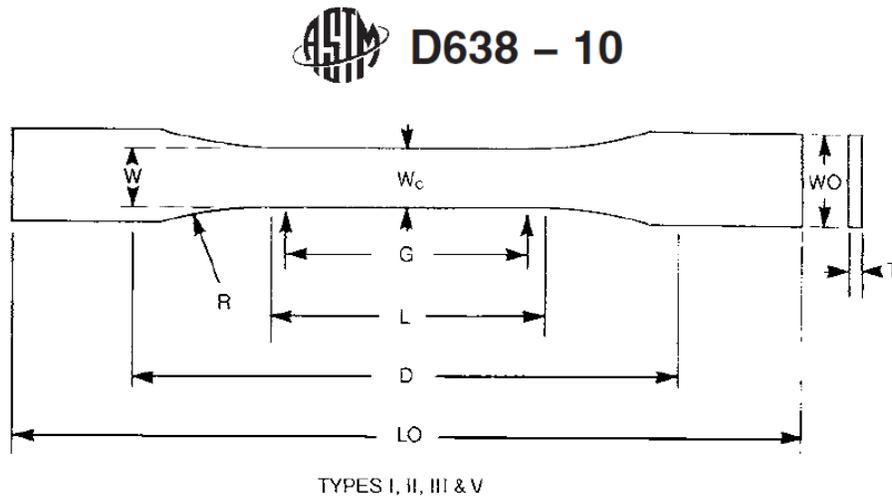


Figura 6 Diseño de la muestra de acuerdo al estándar D638 -10 (27).

Donde:

T es el espesor de la muestra, W es el ancho de la longitud más estrecha, L Longitud de la sección más estrecha, LO es la longitud total.

Por lo tanto, se realizó el modelo 3D con las siguientes dimensiones que se muestran en la tabla 4.

Tabla 4 Dimensiones en mm con las cuales se realizó el modelo 3D de la muestra (27).

Variable	Descripción	Dimensiones en mm
W	Anchura de la sección estrecha	13.00
L	Longitud de la sección estrecha	57.00
WO	Ancho total	19.00
LO	Longitud total	165.00
G	Longitud Calibrada	50.00
D	Distancia entre agarres	115.00
R	Radio	76.00

El modelo 3D se llevó a cabo en el software de modelado paramétrico 3D Siemens NX, la imagen se muestra en la figura 7. Un dibujo de ingeniería de la muestra se puede apreciar en el Anexo 1.

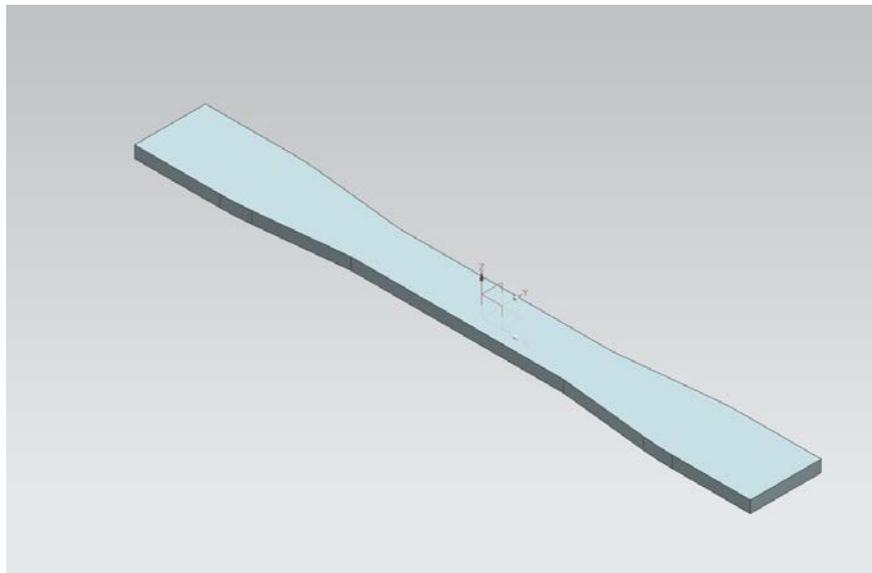


Figura 7 Modelo 3D de la muestra realizado en Siemens NX.

Una vez realizado el modelo 3D, se diseñó un experimento para imprimir 25 muestras en total.

Esta experimentación consistió en cambiar un parámetro de la impresión 3D, en específico el porcentaje de relleno, este parámetro se mide en porcentaje. En la sección siguiente (2.4.3) se describe a que se refiere la palabra “relleno” en impresión 3D.

Se imprimieron 5 muestras con porcentaje de relleno al 20%, 5 muestras con porcentaje de relleno al 40%, 5 muestras con porcentaje de relleno al 60%, 5 muestras con porcentaje de relleno al 80% y por último 5 muestras con porcentaje de relleno al 100%. Las muestras fueron identificadas individualmente con un código para tener trazabilidad en los resultados. En la tabla 5 podemos ver un resumen de esta información.

Tabla 5 Resumen del número de muestras para la prueba de tensión y forma de identificación.

% de Relleno	Numero de muestras	Identificación de las muestras
20%	5 piezas	1-1, 1-2 ,1-3, 1-4, 1-5
40%	5 piezas	2-1, 2-2, 2-3, 2-4, 2-5
60%	5 piezas	3-1, 3-2, 3-3, 3-4, 3-5
80%	5 piezas	4-1, 4-2, 4-3, 4-4, 4-5
100%	5 piezas	5-1, 5-2, 5-3, 5-4, 5-5
Total	25 piezas	

2.4.3 El relleno

Se puede definir el relleno como, la densidad de material que hay dentro del objeto impreso en 3D. Se mide en porcentajes (%) en lugar de milímetros; siendo el valor de 100% una parte completamente sólida y 0 % una pieza “hueca” solo con material en las paredes exteriores.

En las Figuras 8 y 9, se puede apreciar la diferencia entre valores de relleno al 20% y 60% respectivamente, ambos con el patrón de relleno cuadrícula, estas imágenes fueron generadas usando el *slicer* Cura (Un *slicer* es el programa informático utilizado para generar los códigos g que necesita la impresora 3D para imprimir un modelo 3D).

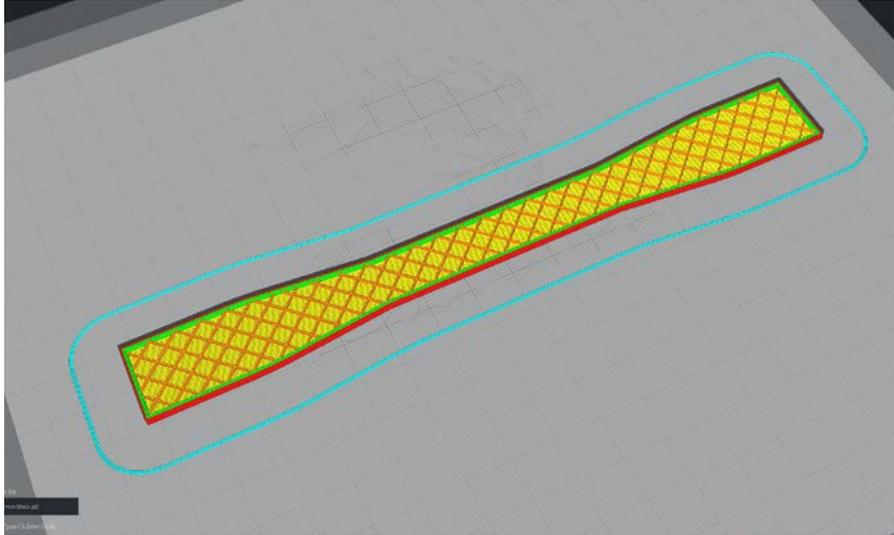


Figura 8 Muestra 1-1, con relleno al 20% patrón cuadrícula.

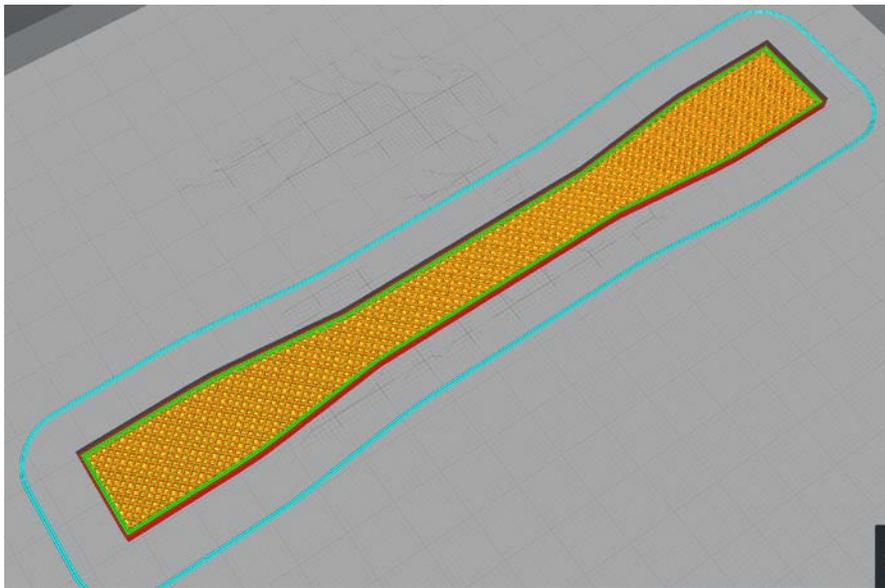


Figura 9 Muestra 3-1, con relleno al 60% patrón cuadrícula.

Tener un porcentaje de relleno bajo permite a las piezas ser impresas más rápido, a un menor costo y usando menos material, la mayoría de *slicer* por default están configurados para imprimir el relleno al 20%, el cual se considera adecuado para la mayoría de aplicaciones de impresión 3D (9).

De acuerdo con las fuentes bibliográficas consultadas sobre el tema del relleno, la mayoría coinciden en lo siguiente (9) (12) (28):

- Si la pieza será usada solo para pruebas o prototipos es recomendable usar 10-20 % en el parámetro de relleno.
- El porcentaje de 20% es el más común o más usado en la impresión 3D.
- Para piezas que tengan una aplicación funcional y para maximizar la durabilidad se recomiendan valores de 75-80%.

En la tabla 6 se organiza un resumen de esta información.

Tabla 6 Resumen de los porcentajes de relleno más utilizados de acuerdo las fuentes consultadas (9) (12) (28).

% De relleno	10-20 %	20%	70-80%
Aplicación	Pruebas, prototipos, decoraciones	Mas común en impresión 3D	Aplicación funcional y maximizar durabilidad

Para realizar la impresión de las muestras se utilizó una impresora 3D tipo FDM marca *Artillery* Modelo x1, en la figura 10 se muestra la imagen de la maquina utilizada y el filamento de la marca mencionada anteriormente 3Dpn plastic.



Figura 10 Impresora 3D Artillery x1, usada para imprimir las muestras.

2.4.4 Realización de la prueba de tensión

La prueba de tensión se realizó en las instalaciones de la Maestría en Ciencia e Ingeniería en Materiales en la máquina universal Autograph Shimadzu AG-I, esta máquina es usada para llevar a cabo pruebas de resistencia mecánicas a los materiales, en la figura 11 se puede apreciar dicha maquina utilizada.

El ensayo consistió someter a la prueba de tensión cada muestra impresa en 3D. En la maquina se hizo la configuración del ensayo en tipo de ensayo “tracción” “modo sencillo” a una velocidad de 2 mm/min. También la maquina se configuro para que se detuviera cuando las muestras se fracturaran por rotura.



Figura 11 Máquina universal de pruebas Shimadzu AG-I.

Cada una de las muestras se inspecciono visualmente en busca de deformaciones o defectos, no se detectaron anomalías en las muestras. Después se midió cada muestra (espesor, anchura, y longitud calibrada) para capturar la información dimensional en la maquina universal, en la tabla 7 se muestran las dimensiones realizadas, los datos están organizados por el porcentaje de relleno y cada muestra esta identificada.

Es importante mencionar que es necesario capturar esta información en la maquina universal para que esta pueda hacer los cálculos necesarios mientras la maquina aplica la fuerza de alargamiento a las muestras.

Tabla 7 Mediciones de las muestras de PLA.

% de relleno	Nombre de la muestra	Espesor mm	Anchura mm	Longitud calibrada mm
20	1-1	3.32	13.17	56.00
	1-2	3.35	13.3	56.00
	1-3	3.35	13.18	56.00
	1-4	3.37	13.32	56.00
	1-5	3.23	13.23	56.00
40	2-1	2.69	13.87	56.00
	2-2	2.69	13.28	56.00
	2-3	2.69	13.89	56.00
	2-4	2.69	13.69	56.00
	2-5	2.69	13.62	56.00
60	3-1	3.34	13.67	56.00
	3-2	3.21	13.33	56.00
	3-3	3.24	13.57	56.00
	3-4	3.24	13.54	56.00
	3-5	3.26	13.52	56.00
80	4-1	2.88	13.85	56.00
	4-2	2.85	13.73	56.00
	4-3	2.81	13.73	56.00
	4-4	2.80	13.80	56.00
	4-5	2.84	13.75	56.00
100	5-1	3.23	13.54	56.00
	5-2	3.23	13.57	56.00
	5-3	3.21	13.49	56.00
	5-4	3.20	13.58	56.00
	5-5	3.20	13.47	56.00

Se llevaron a cabo las pruebas a cada grupo de muestras por separado, es decir, las 5 muestras con relleno al 20%, luego las 5 muestras con relleno al 40%, y así sucesivamente hasta completar el total de las muestras disponibles, en la figura 12 puede apreciar una muestra después de ser fracturada durante la prueba, se puede apreciar que la fractura fue en la parte superior de la muestra, la ruptura dividió a la muestra en 2 partes distintas.

En la figura 13 podemos ver las muestras con relleno al 60% después de haber sido sometidas a la prueba de tensión dos de estas muestras se fracturaron completamente, mientras que las tres restantes con las mismas características de relleno no lo hicieron.



Figura 12 Muestra de PLA con relleno al 20 % ya fracturada en la prueba de tensión.

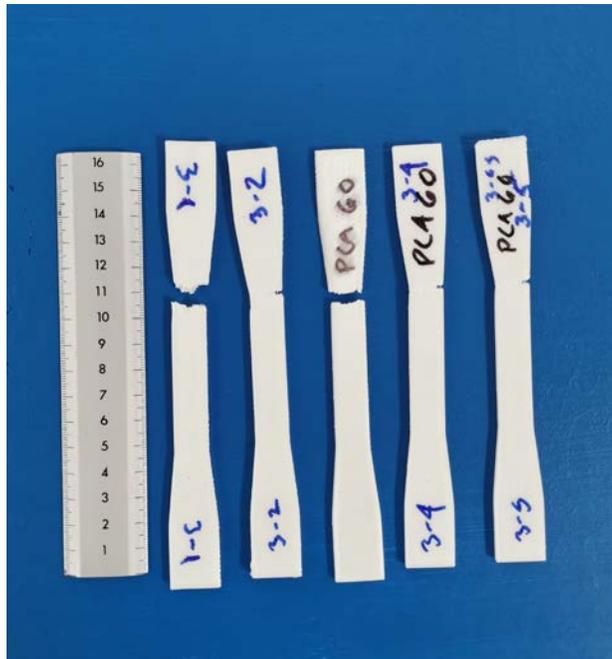


Figura 13 Muestras de PLA con relleno al 60% después de haber pasado por la prueba de tensión.

2.4.5 Resultados de la prueba de tensión

En la Tabla 8 se puede observar un resumen con los resultados de la prueba de tensión ordenados por el porcentaje de relleno. En la siguiente sección (2.4.5.1) se analizaron los datos mediante técnicas estadísticas.

Tabla 8 Resumen de los resultados de la prueba de tensión.

% de Relleno	Máx. Carga kN Media(SD;Mín-Máx)	Máx. Despl mm Media(SD;Mín-Máx)	Máx. Esfuerzo N/mm² Media(SD;Mín-Máx)	Máx. Deformación % Media(SD;Mín-Máx)
20%	1.29(0.04;1.21-1.32)	2.72(0.35;2.36-3.14)	29.3(1.41;27.05-30.93)	4.86(0.62;4.21-5.61)
40%	0.84(0.1;0.76-1.01)	1.55(0.32;1.31-2.08)	22.79(2.8;20.21-27.53)	2.76(0.56;2.34-3.71)
60%	1.32(0.13;1.11-1.45)	2.37(0.34;1.88-2.77)	29.89(3.14;25.41-33.96)	4.23(0.61;3.36-4.95)
80%	1.11(0.07;0.98-1.16)	1.82(0.18;1.57-2.05)	28.45(2.19;24.67-30.07)	3.24(0.31;2.8-3.66)
100%	0.96(0.1;0.82-1.06)	1.46(0.28;1.13-1.77)	21.98(2.48;18.69-24.47)	2.61(0.5;2.01-3.17)

Los resultados están ordenados por % de relleno, estando en cada fila el promedio, desviación estándar, valor mínimo y valor máximo de las 5 muestras con el mismo valor de relleno.

2.4.5.1 Análisis estadístico de los datos obtenidos en la prueba de tensión.

Los análisis estadísticos son una herramienta crucial en la interpretación de los datos obtenidos de una prueba de tensión a un material plástico. Estos análisis permiten realizar una evaluación cuantitativa y objetiva de los resultados experimentales, brindando una comprensión más profunda de las propiedades mecánicas del material.

En primer lugar, los análisis estadísticos permiten resumir los datos de manera concisa y significativa. A través de medidas descriptivas como la media, la desviación estándar y la mediana, se puede obtener una visión general de las características centrales y la dispersión de los datos. Estas medidas resumidas proporcionan una base sólida para la comparación entre diferentes muestras o condiciones de prueba (29).

Además, los análisis estadísticos permiten evaluar la significancia de las diferencias observadas entre grupos o condiciones. Mediante pruebas de hipótesis estadísticas, como la prueba t de Student o el análisis de varianza (ANOVA), es posible determinar si las diferencias observadas son estadísticamente significativas o simplemente se deben a variaciones aleatorias. Esto ayuda a evitar conclusiones erróneas basadas en diferencias insignificantes y proporciona una base sólida para la toma de decisiones (30).

En la actualidad hay varios programas de computadora que son de ayuda para elaborar análisis estadísticos, en los últimos años un programa que ha ganado bastante popularidad en este ámbito es R y la consola RStudio. R es un software libre fue diseñado para realizar análisis estadísticos, gráficas etc. La consola R es la interfaz de usuario que se utiliza para comunicarnos con R e indicarle al programa que análisis o tareas necesitamos hacer, para hacer esto se utiliza una línea de comandos muy similar un lenguaje de programación (31).

R es utilizado ampliamente para hacer muchos tipos de modelos estadísticos, desde regresión lineal hasta redes neuronales entre otras aplicaciones de estadística, por lo que se decidió usar este software para hacer el análisis estadístico.

El flujo del proceso que se siguió para realizar el análisis se puede apreciar en la figura 14:

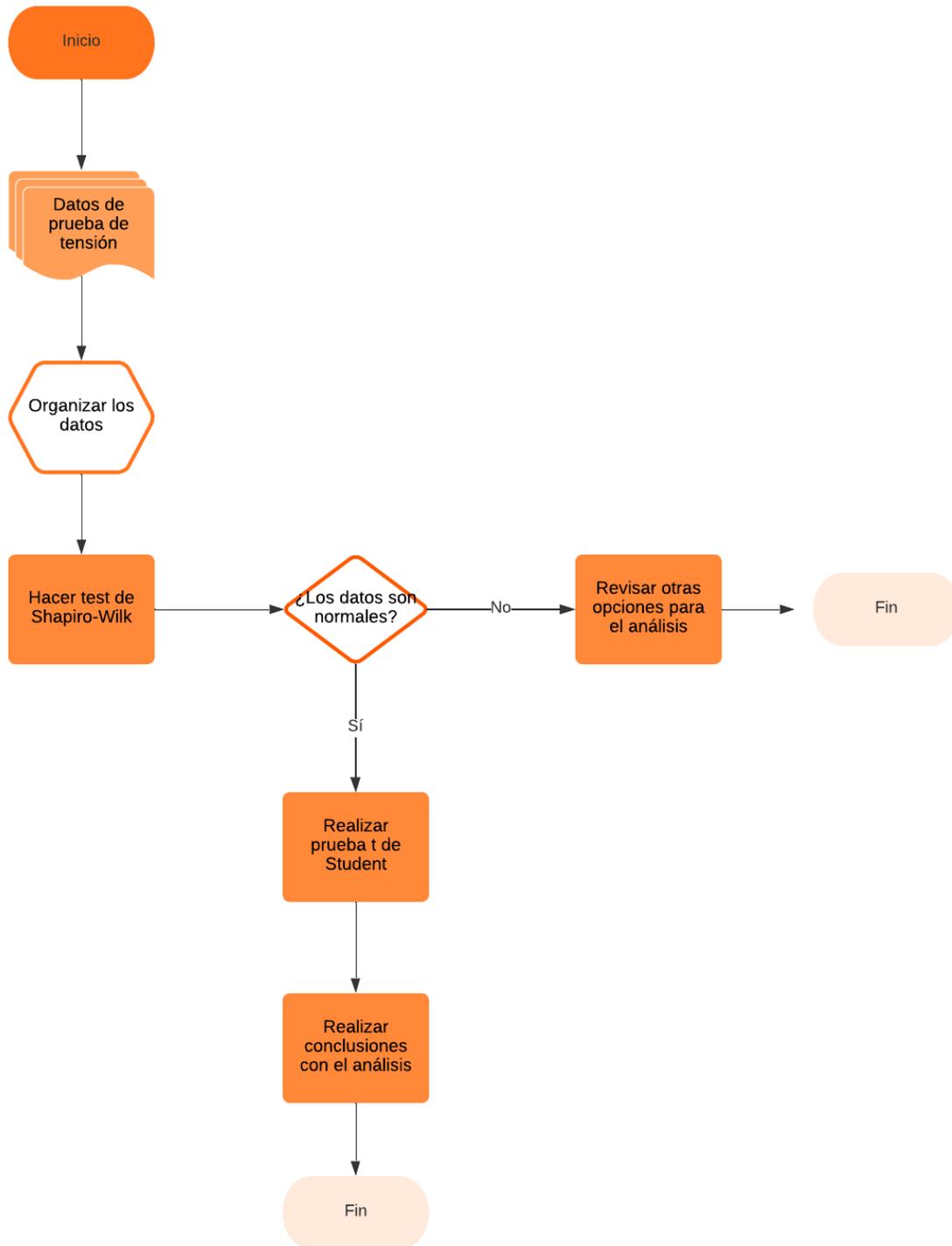


Figura 14 Diagrama de flujo del proceso para llevar a cabo el análisis estadístico.

2.4.5.2 Test Shapiro-Wilk

Una vez organizados los datos que se obtuvieron en la prueba de tensión, se procedió a realizar la prueba de Shapiro-Wilk en la consola RStudio.

El test de Shapiro-Wilk es una prueba estadística utilizada para evaluar la normalidad de una muestra de datos. Esta prueba se basa en la hipótesis nula de que los datos provienen de una población con una distribución normal. Su objetivo es determinar si los datos siguen una distribución normal o si existen desviaciones significativas. Es ampliamente utilizado en la investigación científica y en estadística para verificar la normalidad de los datos antes de aplicar otros análisis estadísticos (32).

La prueba calcula un estadístico de prueba y un valor p , que indica la probabilidad de obtener los datos observados si la distribución es realmente normal. Esta prueba se basa en la covarianza entre los datos observados y los valores esperados si los datos fueran realmente de una distribución normal. El valor p resultante se compara con un umbral predefinido (generalmente 0.05) para determinar si se rechaza o no la hipótesis nula.

Si el valor p es mayor que el umbral (0.05), no hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula y se puede inferir que los datos siguen una distribución normal. Por otro lado, si el valor p es menor que el umbral, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que los datos no siguen una distribución normal (33).

En base a la explicación anterior se plantearon las siguientes hipótesis:

H_0 : Los datos siguen una distribución normal.

H_1 : Los datos no siguen una distribución normal.

La prueba fue realizada en la consola del software RStudio. En la tabla 9 se muestra un resumen del valor de p obtenido en el estadístico para cada grupo de muestras con el mismo porcentaje de relleno.

Tabla 9 Valor p de los resultados de la prueba de tensión por cada grupo de muestras con diferente % de relleno.

% de relleno	Máx. Carga kN	Máx. Despl. mm	Máx. Esfuerzo N/mm ²	Máx. Deformación %	Rotura Carga kN	Rotura Despl. mm	Rotura Esfuerzo N/mm ²	Rotura Deformación %
20	0.0701	0.4422	0.4882	0.8918	0.2625	0.1207	0.3713	0.1210
40	0.1123	0.0791	0.1763	0.0791	0.4837	0.0223	0.3552	0.1390
60	0.6266	0.7413	0.9051	0.7413	0.0016	0.9548	0.0039	0.9548
80	0.0428	0.9744	0.1722	0.9744	0.5060	0.4922	0.5095	0.4922
100	0.5161	0.3907	0.5004	0.3906	0.1582	0.2216	0.1833	0.2216

La interpretación de estos datos es que todos los valores de p son mayores a 0.05, lo que sugiere que no se puede rechazar la hipótesis nula de que los datos en todas las variables siguen una distribución normal a un intervalo de confianza de 95%. Esto implica que es aceptable asumir que los datos en todas las variables de la prueba de tensión provienen de una distribución normal.

En el anexo 2, que se encuentra al final de este trabajo de investigación se pueden encontrar los resultados de esta prueba en RStudio.

Una vez observado estos resultados se procedió al siguiente paso.

2.4.5.3 Prueba t de Student

La prueba t de Student es una técnica estadística utilizada para determinar si hay diferencias significativas entre las medias de dos grupos de datos independientes, se basa en la distribución t de Student, que tiene en cuenta la variabilidad dentro de cada grupo y el tamaño de las muestras (34).

Esta prueba es ampliamente utilizada en diversos campos de investigación y se aplica cuando se desea comparar dos grupos o condiciones. Su objetivo es determinar si las diferencias observadas entre los grupos son estadísticamente significativas o simplemente se deben a la variación aleatoria.

La prueba plantea dos hipótesis, en la hipótesis nula sugiere que no hay diferencias significativas entre las medias de los datos, mientras que en la hipótesis alternativa es lo contrario. Normalmente se toma un intervalo de confianza de 0.05 para aceptar o rechazar la hipótesis nula.

La prueba t de Student se basa en la suposición de que las muestras siguen una distribución normal, en el análisis anterior ya comprobamos que los datos en efecto si siguen una distribución normal.

En base a la explicación anterior se plantearon las siguientes hipótesis:

H_0 : No hay diferencia significativa entre las medias de los grupos de datos.

H_1 : Si existe una diferencia significativa entre los grupos de datos.

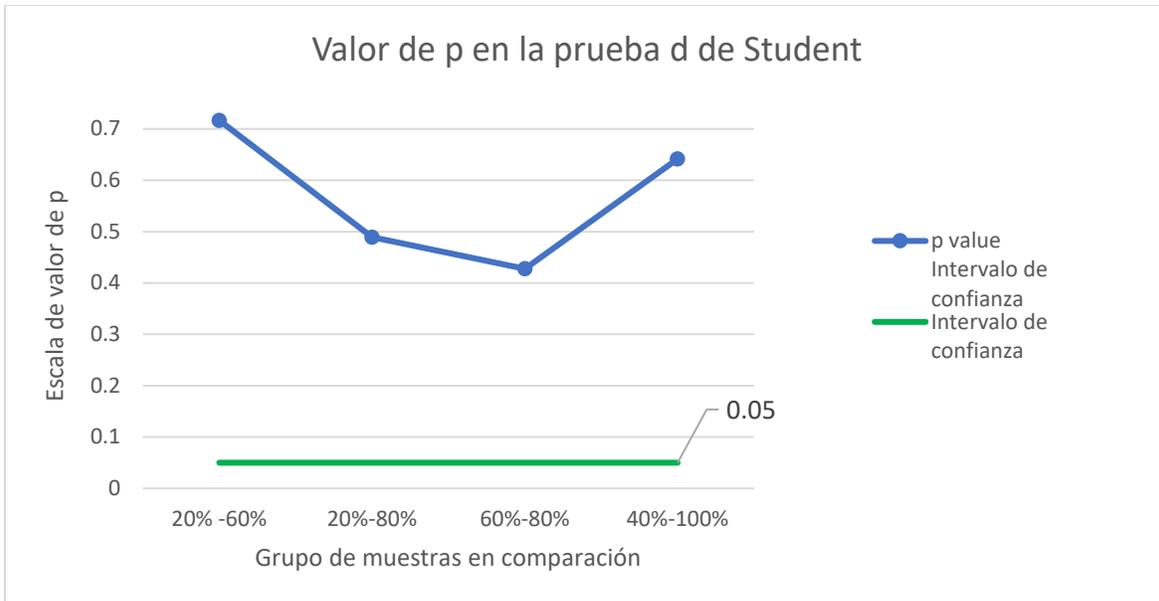
Esta prueba también fue realizada usando el programa informático RStudio, esta se realizó tomando en consideración el valor del máximo esfuerzo. Esta variable representa la capacidad del material para resistir la aplicación de una fuerza externa que tiende a estirar o alargar la muestra. Esta medida es fundamental para evaluar la calidad y la resistencia mecánica de los materiales, ya que proporciona información sobre su capacidad para soportar cargas y esfuerzos aplicados en una dirección axial.

En la tabla 10 se muestran los resultados del valor p obtenido en RStudio para la prueba t de student, se están comparando las medias de los diferentes grupos de muestras con diferente porcentaje de relleno.

Tabla 10 Valores de P en la prueba t de Student para la variable de Máximo esfuerzo.

Grupos en comparación (x-y)	Máx. Esfuerzo N/mm ² Medias (x;y)	p value
20%-60%	20.303;29.892	0.7167
20%-80%	29.303;28.451	0.4889
60%-80%	29.892;28.451	0.4276
40%-100%	22.790;21.980	0.6417

En la gráfica 1 se puede apreciar la comparación de los valores de p con el intervalo de confianza 0.05, se puede apreciar que todos los valores están por arriba del intervalo de confianza mencionado.



Gráfica 1 Comparación de los valores de p con el intervalo de confianza 0.05.

Observando los valores de p en esta prueba, y a un nivel de significancia del 95% (0.05 p value), se aceptó la hipótesis nula y se concluye que no existe diferencia significativa entre los grupos de datos en comparación.

Otra observación importante es que las muestras con mayor cantidad de relleno no tienen mejores propiedades mecánicas que las que tienen valores de relleno más bajos. Esto se puede apreciar en la tabla 11 donde se muestran algunas variables de la prueba mecánica llevada a cabo. En la misma tabla se puede observar que los valores en cada variable de la prueba de tensión no aumentan al aumentar el porcentaje de relleno, por ejemplo, los valores del Máx. esfuerzo inician en 29.3 N/mm² con el relleno al 20%, y terminan en 21.98 N/mm² con un porcentaje de relleno al 100%, es decir realmente la máxima fuerza de ruptura no está aumentando de valor mientras se aumenta el relleno en las muestras.

Tabla 11 Media de algunas variables de la prueba de tensión (máxima carga, máximo desplazamiento, máximo esfuerzo, máxima deformación).

% de relleno	Máx. Carga kN Media	Máx. Despl mm Media	Máx. Esfuerzo N/mm² Media	Máx. Deformación % Media
20	1.29	2.72	29.30	4.86
40	0.84	1.55	22.79	2.76
60	1.32	2.37	29.89	4.23
80	1.11	1.82	28.45	3.24
100	0.96	1.46	21.98	2.61

2.4.5.4 Observaciones importantes sobre la selección del material.

Como se mencionó anteriormente, se seleccionó el material PLA para realizar la férula por una serie de ventajas que presenta frente a otros polímeros, (biocompatibilidad, bajo costo, relativamente fácil de imprimir, biodegradable, entre otros).

Analizando la información de la prueba de tensión y la bibliografía consultada en la sección 1.4.2.1.1 “Acido poliláctico”, se optó por elegir el valor de 80% para imprimir las férulas.

2.5 CASO DE ESTUDIO

Para continuar con la investigación se presenta el siguiente caso de estudio. Se trata de un paciente pediátrico de la unidad de quemados del Hospital Central de San Luis Potosí. Se eligió este centro médico por contar con una unidad especializada para tratar estos pacientes como se mencionó en la sección 1.1 “Antecedentes”, colaborando estrechamente con esta institución para fines de investigación.

Con este caso de estudio se puede ver la necesidad de los pacientes de contar con férulas personalizadas, se ayudó al paciente facilitándole las férulas que necesito, las cuales fueron creadas con impresión 3D.

Adicionalmente en el Anexo 3, se muestran los resultados de un segundo paciente para el cual también se fabricaron férulas, el proceso para fabricar los dispositivos fue el mismo en ambos casos.

Caso de estudio: primer paciente de la Unidad de Quemados del Hospital Central “Dr. Ignacio Morones Prieto” en San Luis Potosí.

1. Datos generales del paciente:

Paciente pediátrico de 3 años de edad. Sexo: Masculino

2. Diagnóstico médico:

Quemadura por fuego directo de segundo grado superficial en la cara anterior de ambas manos.

3. Datos del centro médico donde se está tratando:

Unidad De Quemados Hospital Central “Dr. Ignacio Morones Prieto”.

4. Nombre del médico o especialista:

Dr. Mario Martínez Jiménez - Cirujano General.

Se puede observar en los datos generales que se trata de un menor de 3 años, el cual sufrió quemaduras en sus manos, en la figura 15 se pueden ver algunas de las lesiones que presentó (Es importante mencionar que los padres del menor firmaron un consentimiento informado para el uso de las imágenes con fines educativos, de tratamiento, de investigación y científicos).



Figura 15 Fotografías de las manos del menor con heridas.

El sitio de las quemaduras corresponde a las articulaciones metacarpo-falángicas e interfalángicas en ambas manos, por lo que existía el riesgo de presentar complicaciones durante el proceso de cicatrización. Una de estas complicaciones es la contractura cicatricial. Estas contracturas se producen cuando la cicatriz de la quemadura se contrae. Esto ocasiona limitación en la movilidad articular y se considera una complicación grave de las quemaduras en zonas articulares. Es por esto que el médico tratante de este paciente solicitó la colocación de una férula durante el proceso de cicatrización, para mantener la articulación en una posición adecuada evitando la posición “en garra” en la mano, impidiendo la cicatrización anormal y por tanto la contractura.

2.5.1 Planeación del flujo de trabajo para crear las férulas

Una vez revisado el caso de estudio, y en vista de las necesidades del paciente, se procedió a la planeación de las actividades que serían necesarias para fabricar las férulas.

En la Figura 16, se presenta un resumen del flujo de trabajo y en la siguiente sección (2.5.2) se explica a detalle cada etapa del proceso.

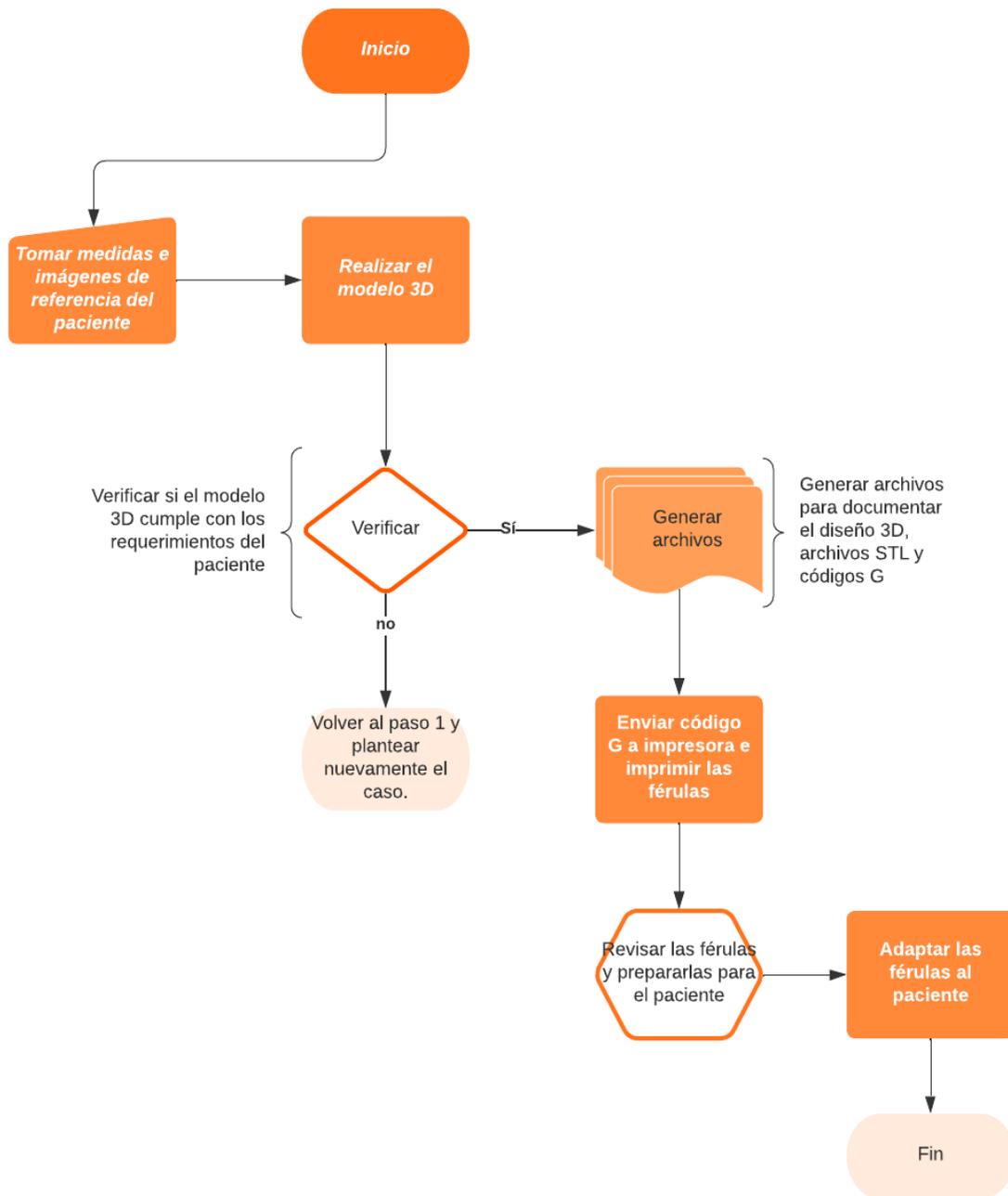


Figura 16 Flujo de trabajo con las principales actividades para imprimir las férulas para el paciente del caso de estudio.

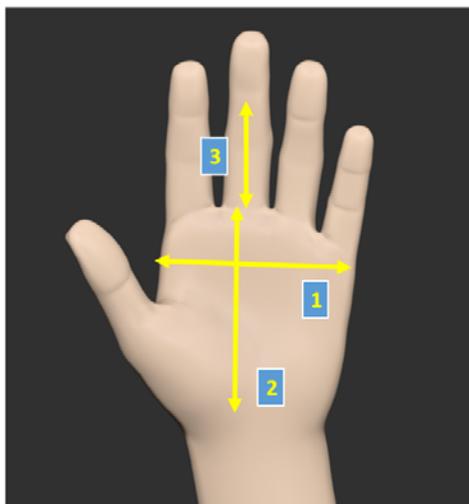
2.5.2 Etapas del flujo de trabajo para fabricar las férulas:

2.5.2.1 Tomar referencias, medidas e imágenes de referencia para realizar el modelo 3D

Se reunió la mayor cantidad de fotos posible, se tuvo comunicación directa con el personal de salud del Hospital Central de San Luis Potosí esta colaboración fue importante para comprender las necesidades del paciente.

También se solicitaron mediciones de las manos del paciente a los médicos para crear el modelo 3D, en la figura 17 se muestran las mediciones que fueron solicitadas.

En la tabla 12 se encuentran los valores de las mediciones en cm de acuerdo a como se identificaron en la figura 18.



Realizar las siguientes mediciones en la mano que se va a tratar como se ve en las flechas:

Medida #1 Distancia ancho de la palma

Medida #2 Medida largo de la palma

Medida #3 Medida de lo mas largo de la herida en los dedos

Figura 17 Medidas solicitadas al personal de salud del paciente.

Tabla 12 Mediciones realizadas a las manos del paciente en centímetros.

Mano Derecha	
Medida #1	5.0 cm
Medida #2	6.0 cm
Medida #3	2.5 cm

Mano Izquierda	
Medida #1	5.3 cm
Medida #2	6.0 cm
Medida #3	2.8 cm

Así mismo con la finalidad de tener más referencias que ayudaran a construir el modelo 3D de las férulas y que éstas se adaptaran de la mejor forma a la geometría de una mano humana, se tomó de referencia un modelo estándar del software Daz Studio.

2.5.2.1.2 Daz Studio

DAZ Studio es un programa de modelado 3D gratuito. Este programa permite crear personajes 3D, elementos de diseño gráfico, entornos virtuales e ilustraciones entre otras cosas.

Entre las características que ofrece DAZ Studio destacan las siguientes:

- Ofrece una gran biblioteca de contenido 3D, que sirve para explorar y crear.
- Gracias a esa biblioteca es posible construir en cortos periodos modelos 3D completos, desde un simple objeto 3D hasta una escena 3D completa con renders.
- Permite exportar imágenes y vídeos fotorrealistas.
- Una gran comunidad de usuarios sirve para examinar sus creaciones y consultar dudas.
- La galería ofrecida muestra lo que otros artistas están haciendo.
- Existen concursos semanales y mensuales en los que mostrar nuestras habilidades artísticas (35).

La principal característica de este programa que fue de ayuda para el objetivo de esta investigación es la capacidad que tiene este software en su biblioteca de contenido 3D, ya que entre otras cosas cuenta con un gran catálogo de figuras estándar humanas, las cuales están diseñadas para ajustar usar o adecuar en diferentes proyectos relacionados con el diseño y modelado 3D, en la figura 18 se puede ver captura de pantalla de este software.

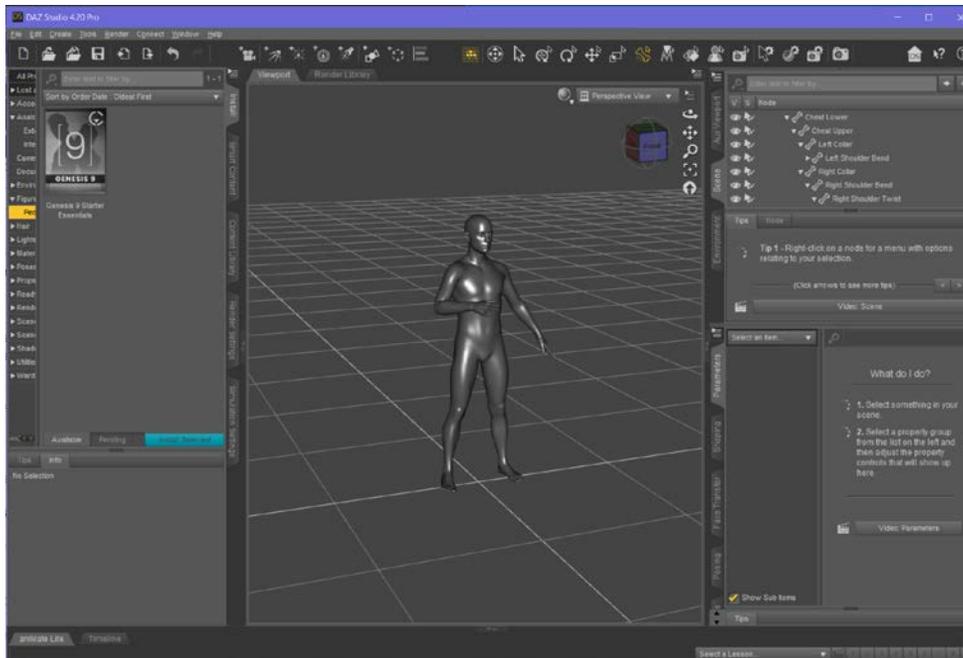


Figura 18 Captura de pantalla del Software Daz Studio, dentro del software un modelo 3D de un cuerpo humano.

Dentro de la interfaz de usuario de Daz Studio, se navegó en su librería de recursos y modelos 3D, se pudo notar que su librería está completa, con bastantes figuras estándar listas para crear modelos y proyectos 3D, algo importante que se observó es que es muy fácil manipular, personalizar, escalar, posar, cada modelo 3D. Dentro de los modelos de figuras humanas se seleccionó el modelo “Genesis 8 Male”, el cual es el modelo masculino de una figura humana como el mostrado en la figura 18.

Se exportó el modelo a un formato estándar que es compatible con la mayoría de programas usados en el diseño asistido por computadora (.obj), de esta forma el modelo se encontró ya listo para usarse en la creación de las férulas. Este modelo 3D sirvió más adelante como referencia para crear el modelo 3D de las férulas.

2.5.2.2 Creación del modelo 3D.

2.5.2.2.1 Revisión de las opciones disponibles para crear el modelo 3D.

Un modelo 3D, es una representación gráfica en 3D de un objeto a través de un software informático, el cual usualmente es usado para obtener información de dicho objeto. En el ámbito

de la ingeniería los modelos 3D son usados para definir las geometrías de la pieza, para fines de inspección y para fabricación usando sistemas de manufactura.

Para este caso, es necesario crear un modelo 3D para definir y diseñar la geometría de las férulas que se requieren fabricar usando la impresión 3D. Por lo tanto, se procedió a investigar sobre las opciones disponibles.

De acuerdo a la investigación se concluyó que las mejores opciones para crear el modelo 3D fueron las siguientes:

- Escaneo 3D.

Un escáner 3D es una máquina que sirve para capturar la geometría de un objeto y su color para después formar un modelo 3D del mismo. Es decir, es capaz de transformar un objeto real en uno virtual que podemos manipular con nuestras computadoras con programas especializados (36).

El escaneo 3D es la técnica de usar un escáner 3D para crear un modelo 3D de un objeto físico dentro de un programa informático. Esta técnica implica el uso de software especial, manipular físicamente la pieza a escanear para obtener las mejores tomas con el escáner, realizar un post procesado en el software para obtener el modelo 3D lo más parecido al objeto físico, entre otras cosas, en la figura 19 se aprecia una imagen de este tipo de dispositivos.



Figura 19 Un escáner 3D trabajando en una pequeña pieza (37).

Su uso es muy variado y actualmente se utiliza en muchos sectores:

- Patrimonio: Conservación de obras de arte. Reproducción de esculturas.
- Ingeniería: Control dimensional, control de calidad, ingeniería inversa de piezas.
- Dental: Diseño de prótesis y estudios odontológicos.
- Arquitectura: Medición y planificación de edificios, levantamiento de planos.
- Arqueología: Estudio de yacimientos arqueológicos. Reconstrucción de piezas.
- Topografía: Estudio de terrenos, minería. Trazados viales.

Una ventaja de usar esta técnica es el alto nivel de precisión entre el objeto físico y el modelo 3D, podríamos trabajar con dimensiones reales del objeto, por ejemplo al escanear directamente la mano del paciente garantizaríamos que la férula se adaptara 100%.

Entre las principales desventajas hay que considerar que los escáneres 3D son costosos; que podría haber incapacidad de movilizar las manos del paciente (es complicado realizar el escaneo en las manos de un paciente poco cooperador, por lo que no es una opción práctica o cómoda para todos los pacientes); y que el equipo requiere el uso de software especializado (usualmente todas las marcas de scanner 3D cuentan con su propio programa para procesar los archivos 3D que son resultado de los escaneos, por lo que tendremos que adquirir este tipo de programas y además recibir un entrenamiento para hacer uso de él).

- Fotogrametría.

La fotogrametría es una técnica empleada para determinar las propiedades geométricas, dimensiones y forma, de los objetos y espacios. Esto se consigue, mediante el uso de fotografías del objeto de estudio.

Básicamente utilizando cámaras potentes y software especializado se realizan muchas tomas del objeto físico de interés, luego la fotogrametría infiere las dimensiones, características y formas utilizando múltiples imágenes superpuestas obtenidas desde diferentes posiciones y ángulos. Así hasta construir un modelo 3D o la información de interés del objeto físico con el que se está trabajando. En la figura 20 se puede ver el equipo completo para realizar esta técnica.



Figura 20 Kit completo de fotogrametría para aplicaciones de ingeniería o medición (38).

Entre las principales ventajas de usar esta técnica encontramos, que se obtiene una gran precisión del objeto con el que se está trabajando, buena calidad de detalle, calidad en las texturas del objeto, alta precisión en las dimensiones entre otras.

En general, las desventajas de la fotogrametría son que requiere mucho tiempo, y conocimientos técnicos para llevarla a cabo correctamente y, aun así, puede no dar los frutos deseados cuando no se dan las condiciones idóneas. Hay que hacer decenas, y a veces cientos, de fotos una a una, y asegurarse de que la calidad de cada una de ellas es buena y de que se solapan correctamente, además de que se requieren equipos de fotografía, hardware, y softwares costosos.

- Usar un software de modelado 3D

Actualmente en la industria y en el ámbito académico existen muchos programas de diseño y modelado 3D, para diversas aplicaciones, podemos encontrar programas para crear piezas mecánicas, hasta para crear render o realizar animaciones con figuras orgánicas. Teniendo esto en mente era importante elegir un software que se adaptara mejor al tipo de modelo que tendríamos que realizar y que a la vez fuera fácil de usar.

En la investigación realizada (39) se detectó que existen en la actualidad 2 tipos de programas de diseño asistido por computadora y se pueden describir así:

a) Software de modelado paramétrico.

En esta categoría encontramos la mayoría de software que se usan en talleres, empresas de diseño, universidades, etc. Usando el diseño paramétrico se crea un modelo a través de datos que se ingresan en un software, que es capaz de traducirlos mediante ecuaciones en formas virtuales que se actualizan al momento, facilitando la obtención de un diseño final y reduciendo las actividades rutinarias.

Algunos de los usos de este tipo de sistemas informáticos podemos encontrar diseño de piezas mecánicas, arquitectura, diseño y desarrollo de productos para fabricar en serie.

Algunos de los softwares más usados son SolidWorks, Fusión 360, Siemens NX, CATIA. En este tipo de programas se puede crear geometría tipo inorgánica, es decir son todos los objetos fabricados por el hombre, que no tiene forma orgánica o natural etc.

b) Software de modelado 3D y esculpido digital.

La característica de este tipo de programas es la capacidad que tienen para realizar formas y diseños de tipo orgánico.

Las figuras orgánicas se describen como las formas o modelos que hacen referencia a seres vivos, como humanos, animales, plantas u objetos que sean más deformes.

Por ejemplo, la forma de un brazo humano, podemos decir que es una figura tipo orgánica y para realizar un modelo 3D de esto sería muy difícil hacerlo en un programa de modelado paramétrico como Solid Works. En este caso lo ideal sería usar un software de modelado orgánico, el cual tiene las herramientas y características para crear con mayor facilidad este tipo de modelos 3D.

Algunos de los softwares de modelado orgánico más comunes en la actualidad son: Blender, Zbrush, SketchUp entre otros.

2.5.2.2.2 Elección del método y software para realizar el modelo 3D.

Una vez analizando las opciones anteriores para crear el modelo 3D, se concluyó que la mejor opción sería usar un programa de modelado 3D y escultura digital debido a que es ideal para crear geometrías irregulares u orgánicas.

Para la elaboración de este proyecto se decidió utilizar el software Zbrush, el cual es un programa de modelado 3D, escultura digital e impresión 3D que funciona como modelado poligonal. Es ideal para modelar figuras orgánicas, como seres vivos, animales, personajes, naturaleza y utensilios.

2.5.2.3 Creando el modelo 3D en Zbrush

Como se mencionó anteriormente se utilizó el software Zbrush para crear los modelos 3D de las férulas, ya que posee una alta capacidad para manipular o crear figuras orgánicas entre otras funciones para exportar o manipular los objetos. En la figura 21 se muestra la interfaz de trabajo de dicho programa.

Al momento de crear el modelo, estos fueron los puntos que se consideraron más importantes:

- Buscar que la férula se adaptara a la forma de la mano del paciente
- Hacer que la férula fuera cómoda de usar
- Que la impresión 3D de la férula fuera fácil de realizar.

Teniendo esto en consideración, se usó el archivo que se mencionó anteriormente de Daz Studio para tener la forma de un brazo humano completo de referencia y a partir de ahí crear la férula.

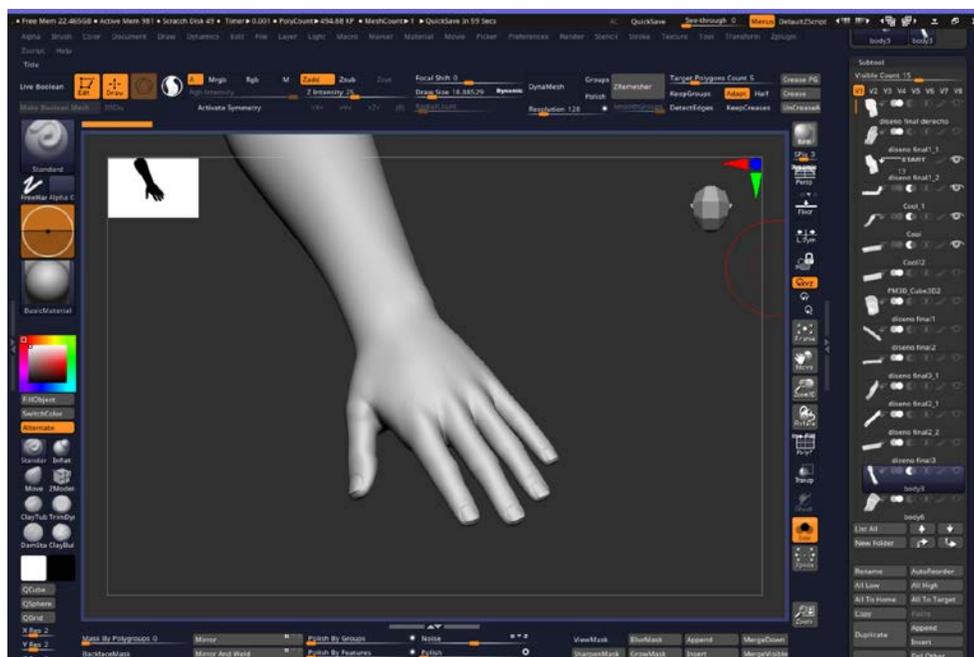


Figura 21 Captura de pantalla del programa Zbrush, con el modelo estándar de un brazo humano antes de empezar a modelar la férula.

En la figura 21 se muestra el modelo importado del software Daz studio de un brazo humano estándar, a partir de este modelo, se usaron las herramientas del programa Zbrush para crear la

geometría de las férulas. Algunas de las herramientas que más se usaron dentro del software fueron modelado con “z modeler” “dinamic subdivision” “qmesh” entre otras.

Durante la realización del modelo 3D se consideró también la forma en que la férula sería sujeta a la mano del paciente, por lo que se colocó en el diseño una ranura para colocar algún material que ayudara a la sujeción de la férula a la mano del paciente pediátrico.

En la figura 22 se puede ver la etapa inicial del diseño (en vista lateral y frontal) de la férula de la mano derecha, se agregó material debajo de la palma de la mano para con las diferentes “brochas” y herramientas del programa dar forma poco a poco a la férula.

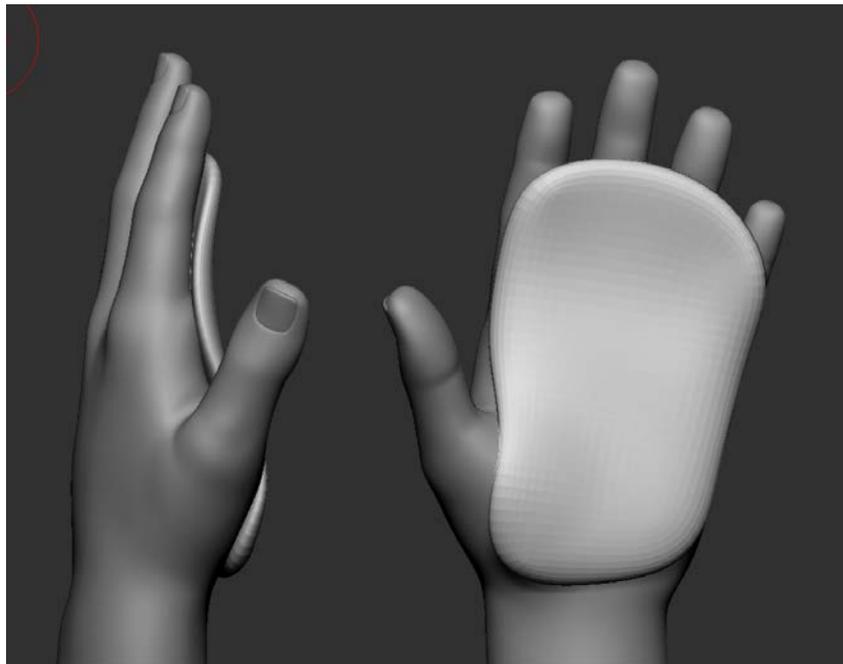


Figura 22 Etapa inicial del modelo 3D

En las etapas iniciales del modelado 3D en Zbrush es recomendado trabajar con geometrías básicas y con “pocos polígonos”, es por eso que en la figura anterior no se ve mucho detalle en la férula, en la figura 23 (vistas lateral y frontal) con el uso de subdivisiones y otras herramientas ya se puede ver un poco más de detalle en la creación de los modelos.

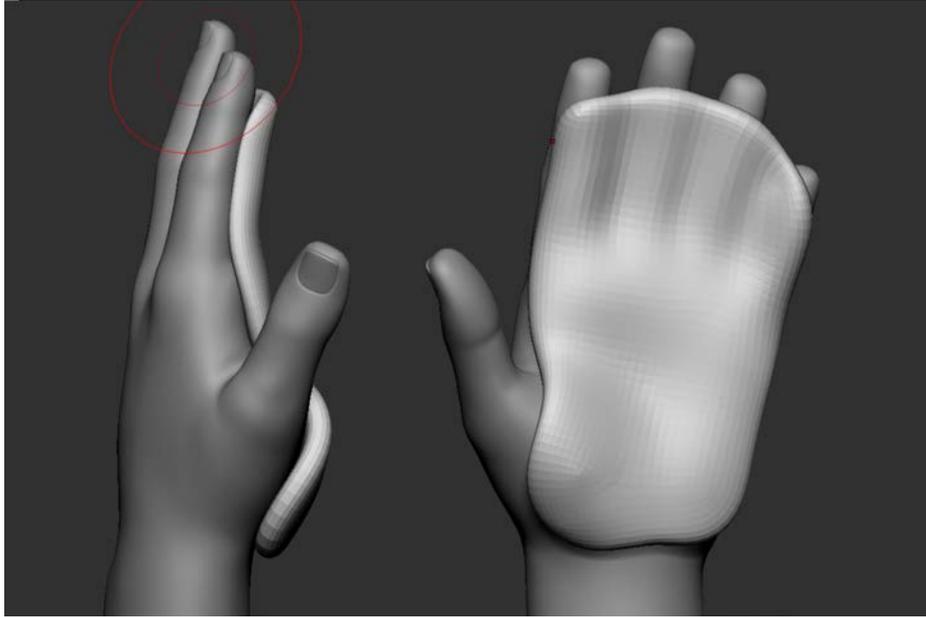


Figura 23 Captura de pantalla mientras se realiza el modelo 3D.

En la figura 24 se muestra el modelo 3D creado de la férula de la mano izquierda, en esta imagen el modelo ya está terminado, se puede apreciar que la férula está colocada en la figura de una mano humana. En esta misma imagen se puede apreciar las tiras de velcro que se modelaron dentro del mismo diseño para simular la posición del material que ayudaría a la sujeción de la férula.

En la figura 25 se muestra el modelo de la mano derecha en vista frontal y lateral, se puede apreciar que la férula sigue la forma de una mano humana, además de eso se pueden observar las ranuras que se colocaron a los modelos 3D para sujetar la férula.



Figura 24 Férula de la mano izquierda, modelo 3D creado en Zbrush.



Figura 25 Férula de la mano derecha, modelo 3D creado en Zbrush.

2.5.2.4 Generar archivos STL y códigos G.

Una vez creados los modelos 3D de las férulas (ambas manos), lo siguiente fue preparar los archivos, desde el mismo Zbrush se exportaron los modelos en formato stl.

El formato o extensión .stl, es el formato estándar que leen la mayoría de software “slicers” el cual es usado para crear los códigos g y programas para impresoras 3D. A este tipo de programa se les conoce como *slicer* en inglés debido a que dividen el objeto 3D en capas esta característica es clave en la manufactura aditiva como se mencionó en la sección 1.4.1 “Manufactura aditiva”.

Para la creación de los códigos G se utilizó el programa ultimaker cura. ultimaker Cura es una aplicación diseñada para impresoras 3D, en la que se pueden configurar los parámetros de impresión y después transformarlos a código G.

En esta aplicación es muy sencillo realizar la configuración de parámetros de las impresoras 3D, es donde se le indica a la impresora, a qué temperaturas debe trabajar, velocidades, alturas de capa y relleno. En la figura 26 se muestra una captura de pantalla del “slicer” mencionado.

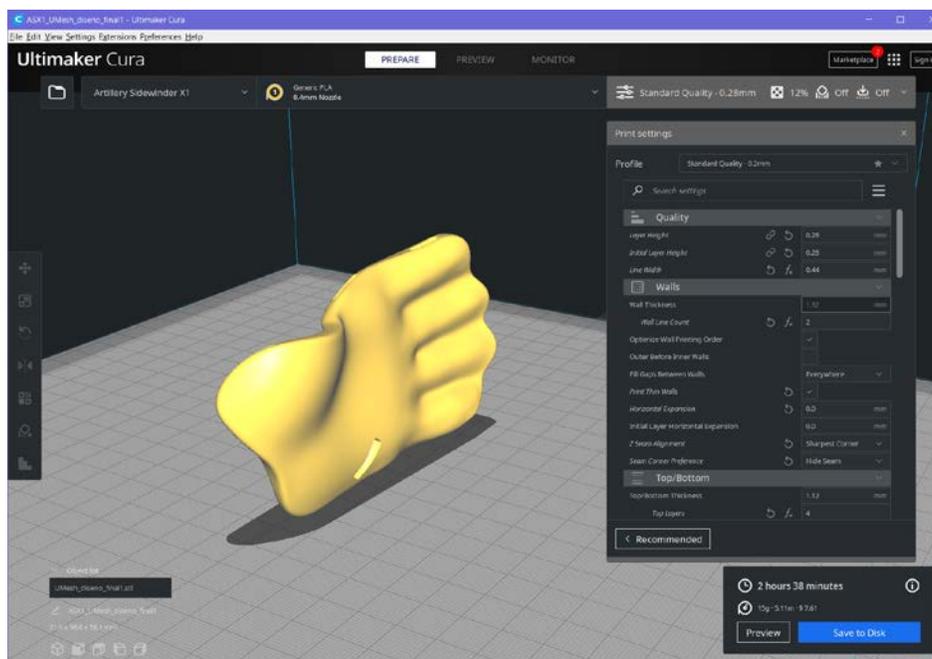


Figura 26 captura de pantalla de la operación realizada en Ultimaker Cura.

Otro punto importante de este programa es que permite ver una simulación de los movimientos que realizara la impresora y asimismo permite detectar errores de impresión e implementar

mejoras en el proceso. Por lo que en este paso es donde se crearon los códigos g antes de mandarlos a la impresora.

2.5.2.5 Impresión 3D de las férulas.

Una vez que se realizaron los códigos G, el siguiente paso fue enviar los archivos a la impresora 3D y esperar que se realizara la impresión.

Para realizar la impresión se usó la máquina mencionada anteriormente, una impresora tipo FDM modelo Artilley x1 y el PLA de la marca 3Dpn plastic.

Se realizó la impresión de las férulas, la impresora 3D tardó aproximadamente 6 horas en la impresión por cada férula y se observó un buen acabado como resultado del proceso.

En la figura 27 se puede ver las férulas ya impresas, se puede ver la parte “interior de las férulas” es decir la parte que hará contacto con la mano del paciente, se puede notar que las férulas siguen la forma de la mano. Se puede observar que la impresión dejó un acabado suave y liso. Tiras de velcro fueron colocadas en las ranuras para ayudar a la sujeción de la férula a la mano del paciente, este detalle también se aprecia en la figura 25.



Figura 27 Férulas 3D impresas y con velcro adaptado para sujetar a las manos del paciente.

En la figura 26 se muestra la parte posterior de las férulas, esta es la parte que no hace contacto por el área afectada en el paciente, sin embargo, se puede apreciar que el acabado es liso también se observa que las férulas están libres de rebabas o alguna geometría extraña que pueda dañar al paciente. En esta foto también se pueden ver las tiras de velcro que fueron colocadas a las férulas para ayuda a la sujeción.

Como se puede ver en las figuras 27 y 28 el diseño de cada férula es diferente, esto se debe a que las partes afectadas son diferentes en cada mano del paciente, es por eso que el diseño (en la figura 24 vista anteriormente se aprecia mejor este detalle en el diseño) de la férula de la mano izquierda tiene un poco de menos material en la parte que cubre a los dedos, mientras que en la férula de la mano derecha si fue necesario que la férula cubriera hasta el dedo meñique.



Figura 28 Se muestran las férulas impresas por la parte posterior.

2.5.2.6 Revisar las férulas y preparar.

Se realizó una inspección visual para detectar errores o defectos de impresión, se notó que las férulas seguían bien la forma plasmada en el diseño. También se detectó que no había geometrías irregulares o extrañas en las férulas.

Se realizó una segunda inspección dimensional para de igual manera detectar errores en la impresión, los resultados fueron correctos.

El siguiente paso fue adaptar el velcro a las férulas, como se ve en la Figura 26, el velcro fue una parte importante del diseño de las férulas para asegurar que las férulas fueran útiles y fácil de usar por el paciente.

2.5.2.7 Adaptar las férulas al paciente.

El personal médico de la unidad de quemados indico que para este paciente del caso de estudio estaban usando un dispositivo como férula provisional hecha con cartón, cinta de curaciones y vendas el cual se muestra en la figura 29. Este dispositivo fue fabricado de manera urgente por los médicos al no contar con una férula que se adaptara a las necesidades del menor y desde luego que no cumplía la 100% con la función de una férula. Al momento de entregar las férulas fabricadas con PLA al hospital este dispositivo dejó de ser utilizado.



Figura 29 Dispositivo de cartón, cinta para curaciones y vendas usado por los médicos antes de obtener las férulas.

Con el apoyo del personal médico que atendió al menor, se realizó la adaptación de las férulas, se observó que se adaptaban de forma correcta a la forma de las manos.

En la Figura 30 se puede ver al menor usando las férulas, se puede observar también como las férulas se adaptaron de forma correcta a la palma de la mano del paciente, además de eso podemos ver como el velcro fue usado de forma correcta para sujetar los dispositivos. En la figura 31 podemos ver las dos manos del paciente mientras usa las férulas en ambas manos.



Figura 30 El menor usando las férulas después de colocárselas por primera vez.



Figura 31 Imagen de las dos manos del paciente con las férulas.

El paciente comenzó a usar las férulas el día 27 de octubre de 2022 y la recomendación de los médicos fue usarlas por al menos 3 meses para evaluar el resultado. También el paciente acudió a consultas regulares para seguimiento.

2.5.2.8 Seguimiento al paciente.

El personal médico del Hospital Central de San Luis Potosí dio seguimiento al caso después de que las férulas fueron colocadas.

En la Figura 32 se puede ver que ha habido una mejoría en la cicatrización de las heridas, esta foto fue tomada en la consulta de seguimiento del paciente. Las férulas han ayudado a evitar las contracturas por cicatrización al impedir una posición anormal de la mano.



Figura 32 Mano derecha del paciente del caso de estudio.

2.5.2.9 Utilización de Termografía para dar seguimiento al paciente.

¿Qué es la Termografía?

La termografía es una técnica con la que, a través de una imagen, podemos determinar la temperatura de cualquier objeto o ser vivo. Esto es debido a que la radiación infrarroja que captan este tipo de cámaras es emitida y absorbida en mayor o menor medida por todas las cosas.

La radiación infrarroja es un tipo de radiación electromagnética de mayor longitud de onda que la luz visible pero menor que la de las microondas. Por lo tanto, tiene menor frecuencia que la luz visible y mayor que las microondas. Su rango de longitudes de onda va desde unos 700 nanómetros hasta 1 milímetro. La radiación infrarroja es emitida por cualquier cuerpo cuya temperatura sea mayor que 0 Kelvin, es decir, -273 grados Celsius (cero absoluto) (40).

Si bien hay ciertos animales, como algunas serpientes de cascabel o determinados peces, que son capaces de ver la longitud de onda infrarroja, los seres humanos, por el contrario, sólo son capaces de ver en el rango visible. Esto hace que sea necesario para las personas el uso de cámaras termográficas, que captan y grafican en una escala de colores visibles, para poder ver las imágenes obtenidas en la longitud de onda del infrarrojo.

La termografía aporta, entre otros, los siguientes beneficios:

- Método sin contacto: al captar imágenes, no es necesario el contacto.
- No destructivo: al contrario que otros métodos de medida, en la termografía no es necesaria la interacción física con el material, pudiendo obtener los resultados sin dañarlo.
- Inspección en tiempo real: se puede monitorizar constantemente, obteniendo resultados instantáneos y pudiendo corregir las deficiencias que se encuentren en la producción.
- Gran adaptabilidad: al constar de una cámara, se puede instalar en gran cantidad de procesos productivos sin tener que modificarlos.
- Calidad y fiabilidad: al obtener información en una longitud de onda no visible para el ojo humano, se mejora la inspección de calidad.
- Mapeado completo: de todas las piezas y de todas las zonas visibles de éstas, pudiendo observar defectos o heterogeneidades (41).

La termografía en la actualidad tiene diversos usos en áreas de industria, investigación etc., pero algo importante es el uso en medicina, por ejemplo:

Detección de temperatura corporal: últimamente se ha aplicado este método para la determinación de la temperatura de las personas para comprobar si tienen fiebre o no en la lucha contra el COVID 19. También se usa para detectar tumores, lesiones o infecciones en pacientes (42).



Figura 33 Termografía de las manos del paciente

En la imagen termográfica de la Figura 33 se pueden ver los cambios de temperatura según el color de la imagen. Las manos del paciente, al centro, presentan algunas áreas en color amarillo y verde, indicando las zonas con menor temperatura lo cual corresponde al sitio en donde se encuentran las lesiones del paciente.

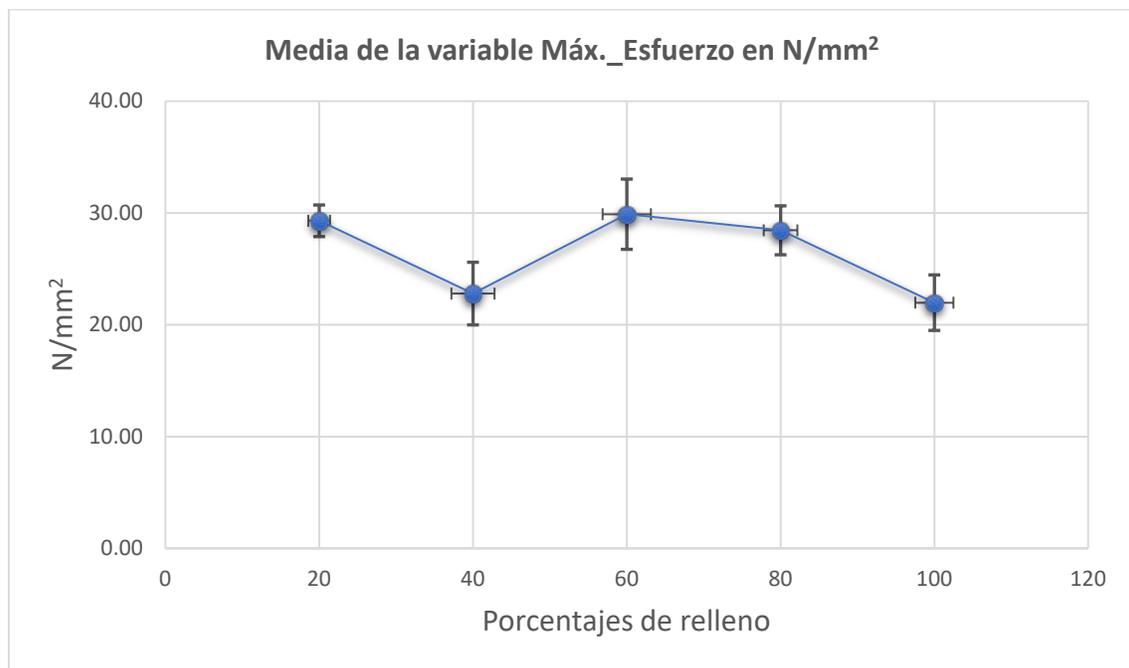
Actualmente en el hospital de San Luis Potosí se están llevando a cabo investigaciones para monitorear heridas y quemaduras usando la técnica de la termografía (43), por lo que se sugiere bastante que en futuras investigaciones se utilice la termografía para dar seguimiento a los pacientes que están siendo tratados con férulas impresas en 3D. Por lo que dejamos la posibilidad en puerta de continuar con esa investigación en algún otro posgrado.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Prueba de tensión realizada al material y el valor de porcentaje de relleno en las férulas.

No se encontró una diferencia en las propiedades mecánicas de las muestras analizadas en la prueba de tensión. En la sección 2.4.4 “Realización de la prueba de tensión” se llevaron a cabo pruebas estadísticas las cuales indicaron la poca variación de los resultados entre los distintos grupos de muestras con diferente porcentaje de relleno.

En la gráfica 2 están graficadas las medias del máximo esfuerzo en N/mm^2 . Se puede observar que realmente las propiedades mecánicas no mejoraron al aumentar el valor en el parámetro de relleno, también se muestran las barras de error con la desviación estándar.



Gráfica 2 Valores del máximo esfuerzo para cada % de relleno.

Se puede ver también en la gráfica 2 que el valor del máximo esfuerzo, está entre 20 y 30 N/mm^2 , y realmente no se observa un aumento en la línea de tendencia mientras sube el valor en el relleno.

Una vez comprobado que las propiedades mecánicas no tuvieron diferencia cambiando el porcentaje de relleno con una muestra de acuerdo al estándar ASTM D638-10 mencionado en la

sección 2.4.2 “Diseño de la muestra” fue que se tomó la decisión de usar el porcentaje de relleno al 80% para fabricar las férulas para el paciente, esta decisión también fue sustentada por lo siguiente:

- En la sección 1.4.2.1.1 “Acido Poliláctico” se revisó literatura y se pudo concluir que el PLA puede experimentar degradación en presencia de agua debido a procesos de hidrólisis y a la acción de microorganismos específicos.
- En la sección 2.4.3 “El relleno” se documentó cuáles son los valores de porcentaje de relleno más utilizados en la impresión 3D tipo FDM.

Es importante mencionar que la degradación del PLA en agua es un proceso lento y depende de las condiciones ambientales. También hay que mencionar que mientras más porcentaje de relleno tienen las piezas a imprimir esto hace que el proceso sea más largo y más costoso, es por eso que no es recomendable usar valores como el 100%.

No se reportaron roturas o daños en las férulas por parte de ninguno de los pacientes que las utilizaron. El costo de producción de las férulas es bajo y el grado de personalización es mayor que los métodos actuales de inmovilización para el tratamiento de heridas en la mano. Esto se debe a la precisión de la impresora 3D y al detalle que se le da a la geometría utilizando software de modelado. No se reportaron reacciones desfavorables por parte de los pacientes que las utilizaron. Las férulas cumplieron con su propósito ya que inmovilizaron de forma adecuada las manos de los pacientes. Prueba de ello es que se observó una correcta cicatrización de las heridas.

3.2 Resultados del caso de estudio

De acuerdo con el médico Dr. Mario Martínez Jiménez quien estuvo dando seguimiento a los pacientes en el hospital estos son los resultados sobre el uso de las férulas.

La férula cumplió con el objetivo de inmovilizar, proteger y mantener los dedos en una buena posición lo cual permitió al paciente una mejor y pronta recuperación.

En las imágenes podemos ver las manos del menor, se puede apreciar que las heridas han mejorado bastante solo se pueden ver unas pequeñas cicatrices.

El doctor también comentó que las manos del menor se encuentran en buen estado, ha recuperado la movilidad al 100% de sus dedos y no padeció de contracturas.

En la figura 34 se pueden observar las manos del paciente después de haber usado las férulas, también se observa que ha mejorado bastante la condición de las heridas, y se notan un poco las cicatrices de las heridas, pero siguen en proceso de recuperación.



Figura 34 Fotos de las manos del paciente las heridas han mejorado después del uso de la férula.

En la figura 35 se muestra un antes y después de la mano izquierda del paciente, se puede observar que al inicio del tratamiento en la unidad médica las heridas están profundas, en la foto del después se puede apreciar como las heridas han mejorado considerablemente.



Figura 35 Fotos antes y después del tratamiento con el uso de la férula en el paciente de la mano derecha.

En la figura 36, podemos ver el antes y después de la mano derecha del paciente, también se observa una mejoría considerable en las heridas del paciente.



Figura 36 Fotos antes y después del tratamiento con el uso de la férula en el paciente de la mano izquierda

3.4 Uso del software de modelado 3D Zbrush

Se utilizó este programa de modelado y escultura digital el cual demostró tener altas capacidades y herramientas para crear geometrías irregulares. El software cuenta con potentes herramientas para trabajar con archivos muy pesados, también tiene herramientas precisas para escalar, medir, rotar y manipular los objetos 3D con presión. Además, cuenta con un módulo especial para exportar los archivos en extensión .stl, este archivo es el modelo 3D con el que se hace la secuencia de códigos que leerá la impresora 3D para crear el objeto.

El modelo 3D fue creado con la más mínima cantidad de recursos, (pocos polígonos en el modelo) esto facilitó bastante las tareas de creación del modelo 3D. El software tiene también varias herramientas para trabajar con estos modelos sin algún problema, incluso ofrece la ventaja de incrementar o disminuir rápidamente la el número de polígonos del modelo 3D, o también trabajar en forma dinámica para estar cambiando la geometría del modelo. Por lo anterior se concluye que este software muestra amplias ventajas y herramientas para hacer este tipo de modelos 3D.

4 CONCLUSIONES

Se desarrollo una férula personalizada para un paciente pediátrico el cual presentó heridas por quemaduras como se presentó en el caso de estudio. El paciente uso la férula durante su recuperación mientras fue atendido en el Hospital Central "Dr. Ignacio Morones Prieto" de San Luis Potosí, la férula mostró resultados positivos al ayudar en la recuperación del paciente protegiendo e inmovilizando las áreas afectadas por las heridas.

Las férulas fueron diseñadas usando técnicas de diseño asistido por computadora, en específico se usó el programa Zbrush el cual demostró ser una herramienta útil y eficaz en el proceso de diseño y fabricación de este tipo de modelos 3D.

Para fabricar las férulas se utilizó manufactura aditiva en específico impresión 3D mediante el método de depósito de filamento fundido y PLA, se concluyó que este tipo de dispositivos presentan una alternativa prometedora y funcional para el tratamiento de heridas causadas por quemaduras en pacientes pediátricos.

Se llevo a cabo una prueba de tensión para caracterizar las propiedades mecánicas del material utilizado para fabricar la férula, se realizaron análisis estadísticos a los resultados y se concluyó que con los parámetros de impresión usados y el PLA de la marca 3Dpn plastic no hay diferencia significativa en las propiedades mecánicas. Esta información junto con la investigación bibliográfica documentada ayudó a elegir un parámetro de porcentaje de relleno que fuera útil en el desarrollo de los dispositivos usados como férulas.

Los resultados del caso de estudio demostraron que las férulas fabricadas cumplieron con su propósito principal, inmovilizando, protegiendo y manteniendo en una posición adecuada las partes del cuerpo afectadas. También facilitaron una mejor cicatrización de los tejidos lesionados, favoreciendo la circulación sanguínea en las áreas afectadas y evitando posibles deformaciones en las extremidades de los pacientes. Además de eso no se encontraron efectos negativos en los pacientes durante el uso de las férulas.

La colaboración exitosa con el personal médico del hospital antes mencionado de San Luis Potosí permitió un seguimiento adecuado de los pacientes que utilizaron las férulas, brindando datos importantes para evaluar la efectividad de las férulas en el proceso de recuperación. Además, se logró con éxito tener un vínculo entre médicos especialistas de la unidad de quemados de la institución e ingenieros e investigadores especialistas en manufactura aditiva.

El caso de estudio realizado proporcionó información valiosa y realista sobre las heridas por quemaduras en pacientes, lo que contribuyó al cumplimiento de los objetivos de la investigación. Todo el proceso desde la selección del material, diseño, pruebas la material y fabricación de las férulas fue documentado con éxito.

En conclusión, se confirma que las férulas fabricadas mediante impresión 3D por el método descrito anteriormente permiten una recuperación más rápida de heridas en manos de pacientes pediátricos con quemaduras.

Estos hallazgos resaltan el potencial y la relevancia de las férulas personalizadas fabricadas mediante impresión 3D en el tratamiento de heridas en pacientes pediátricos, y abren la puerta a nuevas oportunidades para mejorar la atención médica con tecnologías innovadoras y personalizadas.

REFERENCIAS

1. *Demonstration of the use of the ICF framework in detailing complex functional deficits after major burn.* Grisbrook, T.L., et al. s.l. : Elsevier, 2012, Burns, Vol. 38, pp. 32-43. 0305-4179.
2. Scott Ward, R.;. *Orthotics and Prosthetics in Rehabilitation.* Saunders : Elsevier, 2016. 9780323610186.
3. *Scar Management of the Burned Hand.* Sorkin, Michael, Cholok, David and Levi, Benjamin. s.l. : Hand Clinics, 02 2017, Hand Clinics, Vol. 33.
4. Loza Gonzáles, Victor Manuel. *Diagnostico situacional integral. Unidad de quemados. Hospital Central "Dr. Ignacio Morones Prieto".* SLP : Hospital Central "Dr. Ignacio Morones Prieto", 2022.
5. *The Application of Three-Dimensional Printed Finger Splints for Post Hand Burn Patients: A Case Series Investigation.* Nam, Ho-Sung et al. s.l. : Annals of rehabilitation medicine, 2018, Vol. 42.4, pp. 634-638.
6. *3D printing of patient-specific neck splints for the treatment of post-burn neck contractures.* Visscher, Dafydd O., et al. s.l. : Burns & Trauma, 06 2018, Vol. 6.
7. *Advances in Medical Applications of Additive Manufacturing.* Li, Chunxu, et al. 11, Beijing China : Elsevier, Nov 2020, Vol. 6, pp. 1222-1231. 2095-8099.
8. *Embracing additive manufacture:.* Telfer, S., Pallari, J., Munguia, J. et al. 84, Glasgow, UK : BMC musculoskeletal disorders, May 2012, Vol. 13.
9. Redwood, Ben, Schoffer, Filemon and Garret, Brian. *The 3D printing handbook.* Amsterdam : 3D Hubs, 2017.
10. Centro de Inovacion tecnologica. ¿Que es la tecnologia fdm? *Fablan esan.* [Online] Fablan esan, May 10, 2023. [Cited: May 10, 2023.] <https://fablab.esan.edu.pe/blog/que-es-la-tecnologia-fdm>.
11. Smith, F. William. *Fundamentos de la Ciencia e Ingenieria de materiales.* 3 ed. Madrid : Mc Graw Hill, 1996. 0-07-059241-1.
12. Torta, Stephanie and Torta, Jonathan. *3D printing an Introduction.* Virginia USA : David Pallai, 2019. 13: 978-1683922094.
13. Gómez Ortega, Arturo and Moreno, Bárbara. Impresión 3D en tiempos de pandemia. *Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial.* [Online] cidesi, Abr 18, 2022. [Cited: May 2023, 1.] <https://www.cidesi.com/site/impresion-3d-pandemia/>.
14. Barnatt, Christopher. *3D printing.* s.l. : Explainingthefuture.com, 2016. p. 29.
15. *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies F2792.* American Society for Testing and Materials ASTM. 12a, PA : ASTM, 2013, Vol. 1.
16. Adeva, Roberto. Adslzone. *Todo lo que debes saber sobre la impresión 3D y sus utilidades.* [Online] Adslzone, Marzo 11, 2022. [Cited: 12 Marzo, 2022.] <https://www.adslzone.net/reportajes/tecnologia/impresion-3d/>. NA.

17. *Polylactic Acid Technology*. Drumright, Ray E. and Gruber, Patrick R. s.l. : Advanced Materials, Dec 2000, Vol. 12, pp. 1841 - 1846.
18. *Plastics Derived from Biological Sources: Present and Future: A Technical and Environmental Review*. Chen, G. Q. and Patel, Martin K. 2011, Vol. 4.
19. *Hydrolytic degradation of polylactic acid (PLA) and its composites in natural and composting conditions*. Aluigi, A., et al. 2012, Vol. 2.
20. *Hydrolytic degradation of polylactic acid (PLA) and its composites*. Panaitescu, D. M., Nicolae, C. A. and Frone, A. N. 2017, Vol. 11.
21. Formlabs. Comparación de tecnologías de impresión 3D: FDM, SLA o SLS. *Formlabs*. [Online] Formlabs, 01 01, 2022. [Cited: 06 01, 2022.] <https://formlabs.com/es/blog/fdm-sla-sls-como-elegir-tecnologia-impresion-3d-adeuada/>.
22. Bitfab. Bitfab. *Ferulas impresas en 3D*. [Online] Bitfab, Feb 2, 2022. [Cited: Feb 2, 2023.] <https://bitfab.io/es/blog/ferulas-impresas-en-3d/>.
23. Kalpakjian, Serope and Schmid, Steven R. *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. Quinta Ed. Mexico : Pearson Education, 2008. 978-970-26-1026-7.
24. Line X. *¿Qué son los termoplásticos?* [Online] Line X, 1 1, 2023. [Cited: 1 1, 2023.] <https://www.linex.mx/que-son-los-termoplasticos/>.
25. Callister Jr., William D. and Rethwisch, David G. *Materials Science and Engineering*. NYC : John Wiley & Sons, 2008.
26. Ashby, M. F. and Jones, D. R. H. *Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications, and Design*. MA : Butterworth-Heinemann, 2013.
27. *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. ASTM standards. Pennsylvania : ASTM standards, 2010, Vol. 1.
28. Jordan, John. *3D Printing*. London : The MIT Press, 2019. 9780262536684.
29. Mendenhall, William, Beaver, Robert J. and Beaver, Barbara M. *Introducción a la probabilidad y estadística*. CDMX : Cengage Learning Editores, 2010.
30. Devore, Jay L. *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias*. CDMX : Cengage Learning Editores, 2008. 0-495-38217-5.
31. Gouveia, Rafa González. RGG. *Qué es R y RStudio?* [Online] RGG, Mar 22, 2019. [Cited: May 10, 2023.] <https://gonzalezgouveia.com/que-es-r-y-rstudio/>.
32. *An extension of Shapiro and Wilk's W test for normality to large samples*. Royston, J. P. s.l. : Applied Statistics, 1982, Vol. 31.
33. *An Analysis of Variance Test for Normality*. Shapiro, S.S. 1965, Vol. 52.
34. Triola, Mario F. *Elementary Statistic*. s.l. : Pearson, 2018.

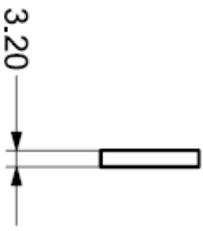
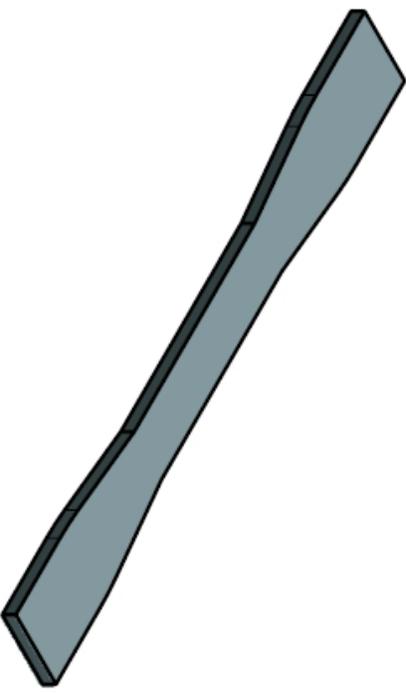
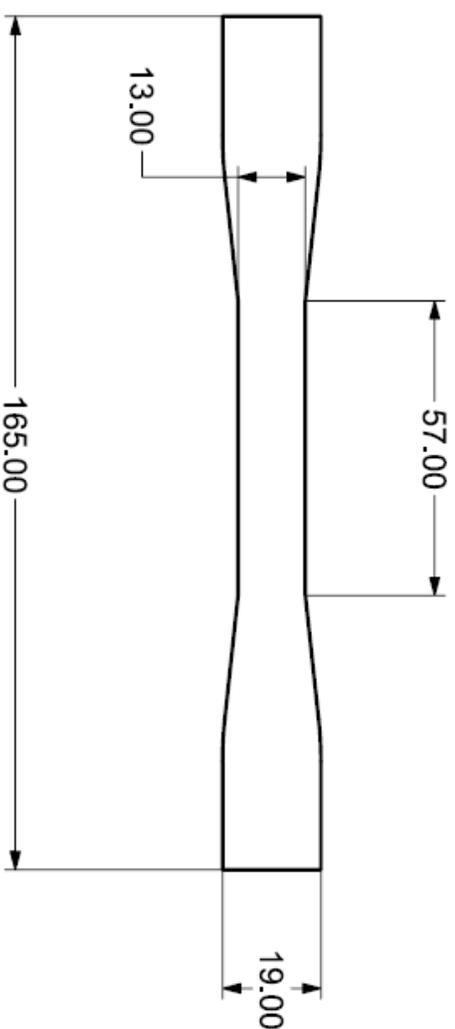
35. González, Fabriciano . DAZ 3D, para crear imágenes en 3D. *Batiburrillo - De todo un poco*. [Online] Batiburrillo, Marzo 22, 2020. [Cited: Enero 1, 2023.] <https://www.batiburrillo.net/daz-3d-para-crear-imagenes-en-3d/>.
36. GP, Luis. ¿Qué es y para que sirve un escáner 3D? *Digitalizacion 3D*. [Online] Digitalizacion 3D, Febrero 10, 2015. [Cited: Enero 5, 2023.] <https://www.digitalizacion-3d.com/que-es-y-para-que-sirve-un-escaner-3d/>.
37. 3D market. 3D market. *Escaner Einscan SE*. [Online] 3D market, Feb 1, 2023. [Cited: Feb 1, 2023.] <https://www.3dmarket.mx/escaner-einscan-se/>.
38. Mubanga, Kanyanta . Artec3D. *Qué es la fotogrametría*. [Online] Artec3D, Mayo 5, 2022. [Cited: Enero 5, 2023.] <https://www.artec3d.com/es/learning-center/what-is-photogrammetry>.
39. Grupo Kefren. MODELADO 3D. CARACTERÍSTICAS, TIPOS Y MÁS. *Grupo Kefren*. [Online] Grupo Kefren, May 21, 2021. [Cited: Abr 01, 2023.] <https://grupokefren.com/disenomodelado-3d/>.
40. Quimica.es. Radiación infrarroja. *Quimica.es*. [Online] Quimica.es, May 01, 2023. [Cited: May 10, 2023.] https://www.quimica.es/enciclopedia/Radiaci%C3%B3n_infrarroja.html.
41. Ingeniería Forense,. Atriainnovation. *Termografía, qué es y para qué se usa*. [Online] Automatización, Calidad, Caracterización, , Junio 17, 2020. [Cited: Enero 5, 2023.] <https://www.atriainnovation.com/termografia-que-es-para-que-se-usa/>.
42. Atria Innovation. Atria Innovation. *Termografía, qué es y para qué se usa*. [Online] Atria Innovation, Jun 17, 2020. [Cited: May 10, 2023.] <https://www.atriainnovation.com/termografia-que-es-para-que-se-usa/>.
43. *Distribution of skin temperature in Mexican children*. Kolosovas-Machuca, Eleazar S. and González, Francisco J. 2011, Vol. 6.

ANEXOS

Anexo 1 Dibujo de ingeniería de la muestra utilizada para las pruebas de tensión.

El dibujo se identificó con el número de dibujo “Type I 3.2 mm thick” debido a que tiene las características “Type I” del estándar que se usó de referencia (27). Debido a que el dibujo ocupa toda la hoja se encuentra en la siguiente página.

Notas:
 Modelo realizado en base al estándar ASTM D638 -10



ALL DIMENSIONS IN MM

UAZ

MAESTRÍA EN CIENCIA E
 INGENIERÍA DE LOS MATERIALES

PROBETA TYPE I

FIRST ISSUED	OCT 22
DRAWN BY	IAO
CHECKED BY	

TITLE	PROBETA TYPE I	
SIZE	DRG. NO.	SHEET REV.
A3	Type I 3.2mm thick	A
SCALE 1:1		SHEET 1 OF 1

1 2 3 4 5 6 7 8

Anexo 2 Segundo paciente documentado.

Caso de estudio: segundo paciente de la Unidad de Quemados del Hospital Central “Dr. Ignacio Morones Prieto” en San Luis Potosí.

1. Datos generales del paciente:

Paciente pediátrico de 5 años de edad. Sexo: Femenino

2. Diagnóstico médico:

Quemadura por fuego directo en la mano derecha, con mayor afección del dedo índice

3. Datos del centro médico donde se está tratando:

Unidad De Quemados Hospital Central “Dr. Ignacio Morones Prieto”.

4. Nombre del médico o especialista:

Dr. Mario Martínez Jiménez Cirujano General.

Otros datos importantes del paciente:

- 6 meses después con secuela de lateralización externa de la articulación de la última falange (ver las imágenes siguientes)
- Se le realiza cirugía plástica de reconstrucción
- Se coloca férula de posicionamiento dos semanas después de la cirugía

Se trata de un menor del sexo femenino, este paciente también sufrió quemaduras en la mano derecha, el personal médico comenta que 6 meses después de haber sufrido las heridas, el menor presento contracturas y una condición denominada lateralización externa de la articulación de la última falange, en la figura 37 se muestra la mano del paciente.



Figura 37 Imagen del paciente donde se muestra la condición de la lateralización.

El Dr. Mario Aurelio M. jefe de la unidad de quemados del hospital central de San Luis Potosí, también indico que se le realizo una cirugía plástica de reconstrucción, en la figura 38 se muestra la imagen después de la cirugía.



Figura 38 Foto del paciente después de la cirugía.

El medico dio la indicación de que para una mejor recuperación se usara una férula para proteger e inmovilizar el dedo afectado. Se tuvo comunicación con los médicos para fabricar la férula personalizada para este paciente.

El flujo de trabajo para fabricar las férulas personalizadas es el descrito en la Figura 16 el cual se muestra en la sección 2.5.1 “Planeación del flujo de trabajo para crear las férulas”, por lo que se siguió este mismo proceso para diseñar, imprimir, y usar las férulas. En la figura 39 se muestran capturas de pantalla del diseño realizado en Zbrush.

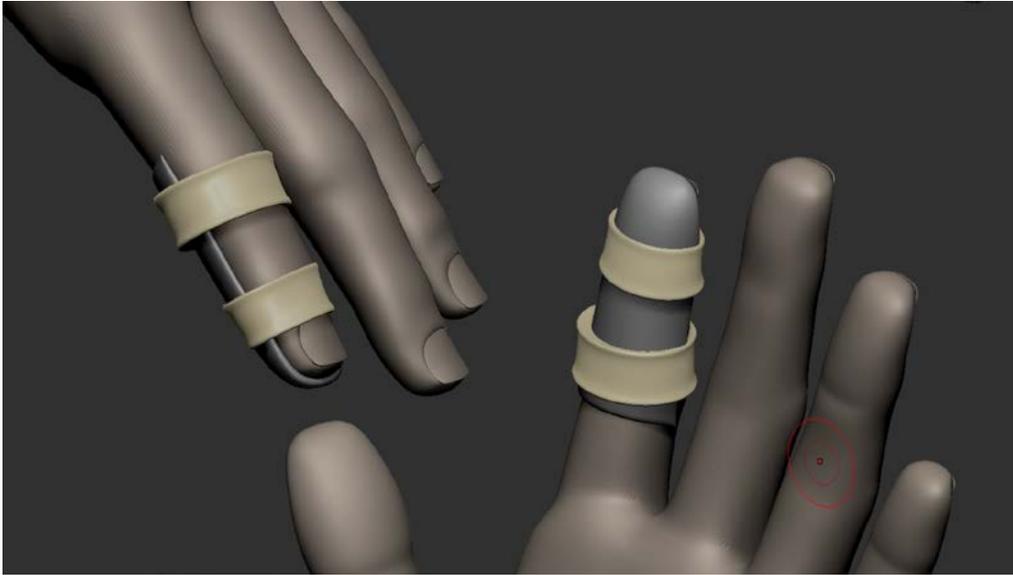


Figura 39 Capturas de pantalla de varias vistas del modelo 3D de la férula.

Usando el mismo método de impresión usado en el paciente 1 se imprimió la férula con PLA de la misma marca usada anteriormente, pero ahora se usó el material en color azul, en la figura 40 se muestra la férula impresa con material velcro para ser usada por el paciente.



Figura 40 Foto de la férula 3D impresa en PLA se colocó velcro para la sujeción.

En la figura 41 se muestra el momento en que el médico de la unidad de quemados colocó la férula al paciente, se puede ver cómo la férula se adapta perfectamente al dedo índice del paciente. Las tiras de velcro que se colocaron ayudaron a sujetar la férula de manera efectiva.



Figura 41 Imágenes del paciente usando la férula personalizada.

Los médicos especialistas, confirmaron que esta férula también cumplió con su propósito ayudando a inmovilizar y proteger el área afectada en el paciente, además de eso la férula ayudó a evitar contracturas al mantener el dedo índice en posición extendida. Con este segundo caso de estudio se da más sustento a las conclusiones de este trabajo de investigación.

Anexo 3 Análisis estadísticos realizados en R Studio

R version 4.2.3 (2023-03-15 ucrt) -- "Shortstop Beagle"
Copyright (C) 2023 The R Foundation for Statistical Computing
Platform: x86_64-w64-mingw32/x64 (64-bit)

R is free software and comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY.
You are welcome to redistribute it under certain conditions.
Type 'license()' or 'licence()' for distribution details.

R is a collaborative project with many contributors.
Type 'contributors()' for more information and
'citation()' on how to cite R or R packages in publications.

Type 'demo()' for some demos, 'help()' for on-line help, or
'help.start()' for an HTML browser interface to help.
Type 'q()' to quit R.

[Workspace loaded from ~/.RData]

```
> # Prueba de normalidad de los datos PLA
> # Porcentaje de relleno 20
> # Máxima carga
> maxima_carga_20<-c(1.29044, 1.30375, 1.31419, 1.21425, 1.32169)
> summary(maxima_carga_20)
```

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
1.214	1.290	1.304	1.289	1.314	1.322

```
> shapiro.test(maxima_carga_20)
```

Shapiro-Wilk normality test

```
data: maxima_carga_20
W = 0.79235, p-value = 0.07009
```

```
> # Máximo desplazamiento
> maximo_desplazamiento_2<-c(2.356, 3.143, 2.77, 2.383, 2.954)
> summary(maximo_desplazamiento_2)
```

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
2.356	2.383	2.770	2.721	2.954	3.143

```
> shapiro.test(maximo_desplazamiento_2)
```

Shapiro-Wilk normality test

```
data: maximo_desplazamiento_2
W = 0.90571, p-value = 0.4422
```

```
> #
> # Máximo esfuerzo
> maximo_esfuerzo_20<-c(29.513, 29.2616, 29.7644, 27.0504, 30.929)
> summary(maximo_esfuerzo_20)
```

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
27.05	29.26	29.51	29.30	29.76	30.93

```
> shapiro.test(maximo_esfuerzo_20)
```

Shapiro-Wilk normality test

```
data: maximo_esfuerzo_20
W = 0.91338, p-value = 0.4882
```

```
> #máxima deformación
> maxima_deformacion_20<-c(4.20714, 5.6125, 4.94643, 5.275, 4.85929)
> summary(maxima_deformacion_20)
```

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
4.207	4.859	4.946	4.980	5.275	5.612

```

> shapiro.test(maxima_deformacion_20)

Shapiro-Wilk normality test

data:  maxima_deformacion_20
W = 0.97262, p-value = 0.8918

> # Rotura carga
> rotura_carga_20<- c(0.83575, 0.751, 0.58731, 0.78225, 0.74931)
> summary(rotura_carga_20)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
0.5873 0.7493 0.7510 0.7411 0.7823 0.8357
> shapiro.test((rotura_carga_20))

Shapiro-Wilk normality test

data:  (rotura_carga_20)
W = 0.86903, p-value = 0.2625

> # Rotura desplazamiento
> rotura_desplazamiento_20<- c(2.825, 3.923, 3.748, 2.818, 3.627)
> summary(rotura_desplazamiento_20)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
2.818 2.825 3.627 3.388 3.748 3.923
> shapiro.test(rotura_desplazamiento_20)

Shapiro-Wilk normality test

data:  rotura_desplazamiento_20
W = 0.82187, p-value = 0.1207

> # rotura esfuerzo
> rotura_esfuerzo_20<- c(19.114, 16.8556, 13.3018, 17.4266, 16.8466)
> summary(rotura_esfuerzo_20)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
13.30 16.85 16.86 16.71 17.43 19.11
> shapiro.test(rotura_esfuerzo_20)

Shapiro-Wilk normality test

data:  rotura_esfuerzo_20
W = 0.89278, p-value = 0.3713

> # rotura deformacion
> rotura_deformacion_20<- c(5.04464, 7.00536, 6.69286, 5.03124, 6.47679)
> summary(rotura_deformacion_20)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
5.031 5.045 6.477 6.050 6.693 7.005
> shapiro.test(rotura_deformacion_20)

Shapiro-Wilk normality test

data:  rotura_deformacion_20
W = 0.82202, p-value = 0.121

> #####
> #Datos relleno 40
> # carga maxima 40
> max_carga_40<- c(0.81731, 0.7705, 0.75503, 1.01388, 0.83309)
> summary(max_carga_40)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
0.7550 0.7705 0.8173 0.8380 0.8331 1.0139
> shapiro.test(max_carga_40)

```

Shapiro-Wilk normality test

data: max_carga_40
W = 0.81783, p-value = 0.1123

```
> # maximo desplazamiento
> max_desp_40<-c(1.389, 1.361, 1.313, 2.078, 1.591)
> summary(max_desp_40)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
 1.313  1.361  1.389  1.546  1.591  2.078
> shapiro.test(max_desp_40)
```

Shapiro-Wilk normality test

data: max_desp_40
W = 0.7987, p-value = 0.07908

```
> #maximo esfuerzo 40
> max_esf_40<-c(21.9058, 21.5686, 20.2074, 27.5314, 22.7386)
> summary(max_esf_40)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
 20.21  21.57  21.91  22.79  22.74  27.53
> shapiro.test(max_esf_40)
```

Shapiro-Wilk normality test

data: max_esf_40
W = 0.84401, p-value = 0.1763

```
> #maxima deformacion
> max_def_40<-c(2.48036, 2.43036, 2.34464, 3.71071, 2.84107)
> summary(max_def_40)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
 2.345  2.430  2.480  2.761  2.841  3.711
> shapiro.test(max_def_40)
```

Shapiro-Wilk normality test

data: max_def_40
W = 0.79871, p-value = 0.07909

```
> # rotura carga
> rot_car_40<-c(0.411, 0.34084, 0.42319, 0.72556, 0.57531)
> summary(rot_car_40)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
 0.3408 0.4110  0.4232  0.4952  0.5753  0.7256
> shapiro.test(rot_car_40)
```

Shapiro-Wilk normality test

data: rot_car_40
W = 0.91265, p-value = 0.4837

```
> # rotura desplazamiento
> rot_desp_40<-c(1.753, 1.795, 1.851, 2.522, 1.923)
> summary(rot_desp_40)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
 1.753  1.795  1.851  1.969  1.923  2.522
> shapiro.test(rot_desp_40)
```

Shapiro-Wilk normality test

data: rot_desp_40
W = 0.73666, p-value = 0.02229

```

> # rotura esfuerzo 40
> rot_esf_40<- c(11.0157, 9.54124, 11.326, 19.7024, 15.7027)
> summary(rot_esf_40)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
 9.541 11.016 11.326 13.458 15.703 19.702
> shapiro.test(rot_esf_40)

```

Shapiro-Wilk normality test

```

data: rot_esf_40
W = 0.88963, p-value = 0.3552

```

```

> # rotura deformacion
> rot_def_40<- c(3.13036, 3.20536, 3.30536, 4.02143, 3.43393)
> summary(rot_def_40)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
 3.130  3.205  3.305  3.419  3.434  4.021
> shapiro.test(rot_def_40)

```

Shapiro-Wilk normality test

```

data: rot_def_40
W = 0.82995, p-value = 0.139

```

```

> #####
> # Datos relleno 60
> # maxima carga
> max_carga_60<- c(0.81731, 0.7705, 0.75503, 1.01388, 0.83309)
Error in file(out, "wt") : cannot open the connection
Error in file(out, "wt") : cannot open the connection
> summary(max_carga_60)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
 0.7550 0.7705 0.8173 0.8380 0.8331 1.0139
> shapiro.test(max_carga_60)

```

Shapiro-Wilk normality test

```

data: max_carga_60
W = 0.81783, p-value = 0.1123

```

```

> # maximo desplazamiento
> # corregir error
> # maxima carga 60
> max_carga_60<- c(1.33463, 1.45331, 1.37912, 1.11456, 1.2981)
> summary(max_carga_60)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
 1.115  1.298  1.335  1.316  1.379  1.453
> #maximo desplazamiento
> max_desp_60<- c(2.292, 2.614, 2.773, 1.881, 2.291)
> summary(max_desp_60)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
 1.881  2.291  2.292  2.370  2.614  2.773
> shapiro.test(max_desp_60)

```

Shapiro-Wilk normality test

```

data: max_desp_60
W = 0.95058, p-value = 0.7413

```

```

> #maximo esfuerzo
> max_esf_60<- c(29.231, 33.9644, 31.3674, 25.4065, 29.4908)
> summary(max_esf_60)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.

```

```
25.41 29.23 29.49 29.89 31.37 33.96
> shapiro.test(max_esf_60)
```

Shapiro-Wilk normality test

```
data: max_esf_60
W = 0.9748, p-value = 0.9051
```

```
> #maxima deformacion
> max_def_60<-c(4.09286, 4.66786, 4.95179, 3.35893, 4.09107)
> summary(max_def_60)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
 3.359  4.091  4.093  4.233  4.668  4.952
> shapiro.test(max_def_60)
```

Shapiro-Wilk normality test

```
data: max_def_60
W = 0.95058, p-value = 0.7413
```

```
> #rotura carga
> rot_car_60<-c(0.59819, 0.99669, 0.59525, 0.59881)
> summary(rot_car_60)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
0.5952 0.5975 0.5985 0.6972 0.6983 0.9967
> shapiro.test(rot_car_60)
```

Shapiro-Wilk normality test

```
data: rot_car_60
W = 0.63707, p-value = 0.001626
```

```
> #rotura desplazamiento
> rot_desp_60<-c(3.703, 3.302, 2.759, 3.03)
> summary(rot_desp_60)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
2.759  2.962  3.166  3.199  3.402  3.703
> shapiro.test(rot_desp_60)
```

Shapiro-Wilk normality test

```
data: rot_desp_60
W = 0.98948, p-value = 0.9548
```

```
> #rotura esfuerzo
> rot_esf_60<-c(13.9798, 22.6691, 13.5686, 13.5862)
> summary(rot_esf_60)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
13.57  13.58  13.78  15.95  16.15  22.67
> shapiro.test(rot_esf_60)
```

Shapiro-Wilk normality test

```
data: rot_esf_60
W = 0.66252, p-value = 0.003876
```

```
> #rotura deformacion
> rot_def_60<-c(6.6125, 5.89643, 4.92679, 5.41071)
> summary(rot_def_60)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
4.927  5.290  5.654  5.712  6.075  6.612
> shapiro.test(rot_def_60)
```

Shapiro-Wilk normality test

```

data: rot_def_60
W = 0.98948, p-value = 0.9548

> #####
> # maxima carga 80
> max_carg_80<-c(0.98413, 1.11481, 1.13663, 1.16181, 1.15469)
> summary(max_carg_80)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
 0.9841 1.1148 1.1366 1.1104 1.1547 1.1618
> shapiro.test(max_carg_80)

```

Shapiro-Wilk normality test

```

data: max_carg_80
W = 0.7674, p-value = 0.04279

> # maximo desplazamiento 80
> max_desp_80<-c(1.5675, 1.81, 1.762, 1.886, 2.05)
> summary(max_desp_80)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
 1.567 1.762 1.810 1.815 1.886 2.050
> shapiro.test(max_desp_80)

```

Shapiro-Wilk normality test

```

data: max_desp_80
W = 0.98855, p-value = 0.9744

> #maximo esfuerzo
> max_esf_80<-c(24.6722, 28.4896, 29.4605, 30.6676, 29.5695)
> summary(max_esf_80)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
 24.67 28.49 29.46 28.57 29.57 30.67
> shapiro.test(max_esf_80)

```

Shapiro-Wilk normality test

```

data: max_esf_80
W = 0.84257, p-value = 0.1722

> # maxima deformacion 80
> max_def_80<-c(2.79911, 3.23214, 3.14643, 3.36786, 3.66071)
> summary(max_def_80)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
 2.799 3.146 3.232 3.241 3.368 3.661
> shapiro.test(max_def_80)

```

Shapiro-Wilk normality test

```

data: max_def_80
W = 0.98855, p-value = 0.9744

> #rotura carga 80
> rot_car_80<-c(0.92881, 1.04531, 1.05506, 0.99569, 0.85375)
> summary(rot_car_80)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
 0.8538 0.9288 0.9957 0.9757 1.0453 1.0551
> shapiro.test(rot_car_80)

```

Shapiro-Wilk normality test

```

data: rot_car_80
W = 0.91625, p-value = 0.506

```

```

> #rotura desplazamiento 80
> rot_desp_80<- c(1. 598, 1. 863, 1. 814, 1. 956, 2. 419)
> summary(rot_desp_80)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
 1. 598  1. 814   1. 863   1. 930   1. 956   2. 419
> shapiro.test(rot_desp_80)

```

Shapiro-Wilk normality test

```

data:  rot_desp_80
W = 0. 91403, p-value = 0. 4922

```

```

> # rotura esfuerzo 80
> rot_esf_80<- c(23. 2855, 26. 7135, 27. 3465, 25. 7683, 21. 865)
> summary(rot_esf_80)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
 21. 86  23. 29  25. 77  25. 00  26. 71  27. 35
> shapiro.test(rot_esf_80)

```

Shapiro-Wilk normality test

```

data:  rot_esf_80
W = 0. 9168, p-value = 0. 5095

```

```

> # rotura deformacion 80
> rot_def_80<- c(2. 85357, 3. 32679, 3. 23929, 3. 49286, 4. 31964)
> summary(rot_def_80)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
 2. 854  3. 239  3. 327  3. 446  3. 493  4. 320
> shapiro.test(rot_def_80)

```

Shapiro-Wilk normality test

```

data:  rot_def_80
W = 0. 91403, p-value = 0. 4922

```

```

> #####
#####
> # datos con 100 % de relleno
> #carga maxima
> max_carg_100<- c(0. 90034, 0. 81906, 1. 05494, 1. 06319, 0. 93966)
> summary(max_carg_100)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
 0. 8191 0. 9003 0. 9397 0. 9554 1. 0549 1. 0632
> shapiro.test(max_carg_100)

```

Shapiro-Wilk normality test

```

data:  max_carg_100
W = 0. 91783, p-value = 0. 5161

```

```

> #max desp
> max_desp_100<- c(1. 313, 1. 127, 1. 727, 1. 7735, 1. 356)
> summary(max_desp_100)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
 1. 127  1. 313  1. 356  1. 459  1. 727  1. 774
> shapiro.test(max_desp_100)

```

Shapiro-Wilk normality test

```

data:  max_desp_100
W = 0. 89647, p-value = 0. 3907

```

```

> # maximo esfuerzo
> max_esf_100<- c(20. 5867, 18. 6868, 24. 3618, 24. 4658, 21. 7997)
> summary(max_esf_100)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
 18.69  20.59   21.80   21.98   24.36   24.47
> shapiro.test(max_esf_100)

```

Shapiro-Wilk normality test

```

data:  max_esf_100
W = 0.91534, p-value = 0.5004

```

```

> #maxima deformacion
> max_def_100<- c(2. 34464, 2. 0125, 3. 08393, 3. 16696, 2. 4214)
> summary(max_def_100)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
 2.013  2.345   2.421   2.606   3.084   3.167
> shapiro.test(max_def_100)

```

Shapiro-Wilk normality test

```

data:  max_def_100
W = 0.89646, p-value = 0.3906

```

```

> # rotura carga
> rot_car_100<- c(0. 84103, 1. 03719, 1. 01925)
> summary(rot_car_100)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
 0.8410 0.9301  1.0192  0.9658  1.0282  1.0372
> shapiro.test(rot_car_100)

```

Shapiro-Wilk normality test

```

data:  rot_car_100
W = 0.81797, p-value = 0.1582

```

```

> # rotura desplazamiento
> rot_desp_100<- c(1. 344, 1. 746, 1. 804)
> summary(rot_desp_100)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
 1.344  1.545   1.746   1.631   1.775   1.804
> shapiro.test(rot_desp_100)

```

Shapiro-Wilk normality test

```

data:  rot_desp_100
W = 0.84288, p-value = 0.2216

```

```

> # rotura esfuerzo
> rot_esf_100<- c(19. 2305, 23. 9519, 23. 4548)
> summary(rot_esf_100)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.
 19.23  21.34   23.45   22.21   23.70   23.95
> shapiro.test(rot_esf_100)

```

Shapiro-Wilk normality test

```

data:  rot_esf_100
W = 0.828, p-value = 0.1833

```

```

> # deformacion rotura 100
> rot_def_100<- c(2. 4, 3. 11786, 3. 22143)
> summary(rot_def_100)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.

```

```
2.400 2.759 3.118 2.913 3.170 3.221
> shapiro.test(rot_def_100)
```

Shapiro-Wilk normality test

```
data: rot_def_100
W = 0.84287, p-value = 0.2216
```

```
> #####
####
> # t de student
> t.test(maxima_carga_20, max_carg_100)
```

Welch Two Sample t-test

```
data: maxima_carga_20 and max_carg_100
t = 6.609, df = 5.3443, p-value = 0.0009202
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 0.2062118 0.4606402
sample estimates:
mean of x mean of y
 1.288864 0.955438
```

```
> t.test(maximo_desplazamiento_2, max_desp_100)
```

Welch Two Sample t-test

```
data: maximo_desplazamiento_2 and max_desp_100
t = 6.3288, df = 7.6528, p-value = 0.000272
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 0.79845 1.72535
sample estimates:
mean of x mean of y
 2.7212 1.4593
```

```
> t.test(maximo_esfuerzo_20, max_esf_100)
```

Welch Two Sample t-test

```
data: maximo_esfuerzo_20 and max_esf_100
t = 5.732, df = 6.3418, p-value = 0.00101
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 4.237609 10.409431
sample estimates:
mean of x mean of y
 29.30368 21.98016
```

```
> t.test(maxima_deformacion_20, max_def_100)
```

Welch Two Sample t-test

```
data: maxima_deformacion_20 and max_def_100
t = 7.3307, df = 7.981, p-value = 8.243e-05
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 1.627035 3.121337
sample estimates:
mean of x mean of y
 4.980072 2.605886
```

```
> t.test(rotura_carga_20, rot_car_100)
```

```
Welch Two Sample t-test
```

```
data: rotura_carga_20 and rot_car_100
t = -2.991, df = 3.7798, p-value = 0.0433
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.43815708 -0.01124159
sample estimates:
mean of x mean of y
0.7411240 0.9658233
```

```
> t.test(rotura_desplazamiento_20, rot_desp_100)
```

```
Welch Two Sample t-test
```

```
data: rotura_desplazamiento_20 and rot_desp_100
t = 6.3453, df = 5.903, p-value = 0.0007649
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 1.076663 2.437070
sample estimates:
mean of x mean of y
3.388200 1.631333
```

```
> t.test(rotura_esfuerzo_20, rot_esf_100)
```

```
Welch Two Sample t-test
```

```
data: rotura_esfuerzo_20 and rot_esf_100
t = -3.1053, df = 3.6296, p-value = 0.04109
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -10.6285699 -0.3783901
sample estimates:
mean of x mean of y
16.70892 22.21240
```

```
> t.test(rotura_deformacion_20, rot_def_100)
```

```
Welch Two Sample t-test
```

```
data: rotura_deformacion_20 and rot_def_100
t = 6.3437, df = 5.9026, p-value = 0.0007661
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 1.922184 4.351979
sample estimates:
mean of x mean of y
6.050178 2.913097
```