



Estudio de diseño óptimo de una férula de miembro inferior con patrones de distintas geometrías

Application of Autodesk Revit software as a BIM tool in project management

Estudo de projeto ótimo de uma tala de membro inferior com padrões de diferentes geometrías

Miguel Aquino ^I

saquino@esPOCH.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-2723-9850>

Isaías Caicedo ^{II}

isaias.caicedo@esPOCH.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-3192-5084>

Jorge Buñay ^{III}

jorge.bunay@esPOCH.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-8003-3619>

Edwin Pozo ^{IV}

edwin.pozo@esPOCH.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-5930-7494>

Correspondencia: saquino@esPOCH.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

* **Recibido:** 23 de mayo de 2022 * **Aceptado:** 12 de junio de 2022 * **Publicado:** 7 de julio de 2022

- I. Carrera de Mecánica, Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- II. Carrera de Mecánica, Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- III. Carrera de Mecánica, Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- IV. Carrera de Mecánica, Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

Resumen

En el presente documento se realizó un estudio comparativo entre varios diseños de una férula de miembro inferior que cuentan con una geometría diferente, lo cual permitió determinar el diseño óptimo en cuanto a la masa, deformación, esfuerzo y factor de seguridad. Para el desarrollo del diseño se utilizó el software CAD SolidWorks para dibujar y adaptar las condiciones requeridas, tomando un patrón de referencia en donde se ubicaban las diferentes geometrías elegidas para su estudio (círculo, triángulo, hexágono, rombo y elipse). A partir de estas consideraciones, se procedió a realizar el análisis estructural en el software ANSYS como un sólido 3D mediante el uso de los métodos de elementos finitos y a través del mejoramiento de la malla para obtener resultados que nos permitan realizar una comparación entre ellos y que estén amparados por la curva de convergencia. Finalmente, se obtuvo como resultado variaciones entre los elementos en cuestión y se determinó que la geometría elipsoidal tiene las mejores características de masa, esfuerzo y factor de seguridad, sin embargo, tiene una ligera elevación en la deformación de aproximadamente 1 mm de diferencia. Mientras que la geometría triangular mostró tener ventajas y desventajas, colocándose como una segunda opción y la geometría hexagonal obtuvo desfavorables resultados en cuanto a esfuerzo y factor de seguridad.

Palabras Clave: Diseño; férula; miembro inferior; geometrías.

Abstract

In this document, a comparative study was carried out between several designs of a lower limb splint that have a different geometry, which allowed determining the optimal design in terms of mass, deformation, effort and safety factor. For the development of the design, SolidWorks CAD software was used to draw and adapt the required conditions, taking a reference pattern where the different geometries chosen for study were located (circle, triangle, hexagon, rhombus and ellipse). Based on these considerations, the structural analysis was carried out in the ANSYS software as a 3D solid through the use of finite element methods and through the improvement of the mesh to obtain results that allow us to make a comparison between them and that are covered by the convergence curve. Finally, variations between the elements in question were obtained as a result and it was determined that the ellipsoidal geometry has the best characteristics of mass, effort and safety factor, however, it has a slight elevation in the deformation of approximately 1 mm

difference. While the triangular geometry showed advantages and disadvantages, being placed as a second option and the hexagonal geometry obtained unfavorable results in terms of effort and safety factor.

Keywords: Design; splint; lower member; geometries.

Resumo

Neste documento, foi realizado um estudo comparativo entre vários desenhos de tala de membro inferior que possuem uma geometria diferente, o que permitiu determinar o desenho ótimo em termos de massa, deformação, esforço e fator de segurança. Para o desenvolvimento do projeto, foi utilizado o software CAD SolidWorks para desenhar e adaptar as condições requeridas, tomando um padrão de referência onde se localizavam as diferentes geometrias escolhidas para estudo (círculo, triângulo, hexágono, losango e elipse). Com base nessas considerações, a análise estrutural foi realizada no software ANSYS como um sólido 3D através do uso de métodos de elementos finitos e através do aprimoramento da malha para obter resultados que nos permitem fazer uma comparação entre eles e que são abordados por a curva de convergência. Por fim, obteve-se como resultado variações entre os elementos em questão e determinou-se que a geometria elipsoidal possui as melhores características de massa, esforço e fator de segurança, porém, possui uma leve elevação na deformação de aproximadamente 1 mm de diferença. Enquanto a geometria triangular apresentou vantagens e desvantagens, sendo colocada como segunda opção e a geometria hexagonal obteve resultados desfavoráveis em termos de esforço e fator de segurança.

Palavras-chave: Projeto; tala; membro inferior; geometrias.

Introducción

Formulación del Problema

En la actualidad, el hombre cuando sufre una fractura en un miembro inferior y necesita de una inmovilización, la opción más utilizada es la colocación de órtesis de yeso, pero estos presentan desventajas en la recuperación del paciente ya que suelen ser muy pesados por lo tanto son incómodos, estáticos, objetos no sumergibles y por estas razones evitan que el paciente pueda desarrollar ciertas actividades. [1] Por esto motivo, se plantea el desarrollo de una férula de miembro inferior tomando en cuenta el tipo de material que se va a implementar considerando sus propiedades permitiendo que el paciente posea mayor movilidad.

Marco Conceptual

1) *Fracturas de Miembros inferiores*: Las fracturas producidas en miembros inferiores se dan en la tibia y el peroné que son los huesos que le dan estructura a la extremidad inferior de la pierna, entre la rodilla y el tobillo. La fractura producida en la tibia o en el peroné es una lesión traumática grave, que se produce por un fuerte golpe directo sobre la zona o por un mecanismo de rotación forzada, no es necesario un golpe muy violento para que se produzca la fractura, puede bastar un choque de intensidad moderada o un movimiento rotacional forzado, como se aprecia en la Figura 1. Otro tipo de fractura que afecta especialmente a la tibia en la zona media y distal es aquella causada por la repetición de contracciones de los músculos de la pierna y son las llamadas fractura por estrés. [2] Por esta razón, se debe analizar el peroné que se sitúa de forma paralela a la tibia y es más delgado que ésta y a diferencia de la tibia, por lo cual se considera al peroné como una ayuda en la recuperación ya que no soporta peso y no forma parte en la articulación de la rodilla. [3]

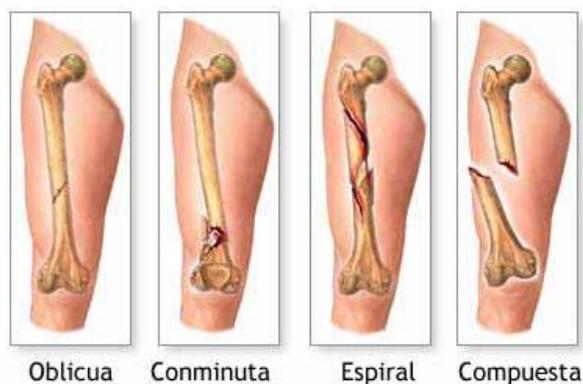


Fig. 1 Vista anterior y posterior de la tibia y peroné

2) *Férulas de Miembros Inferiores*: Las férulas o dispositivos ortésicos suponen una gran ayuda para individuos con patologías en la marcha humana, proporcionando ayuda a la locomoción y/o rehabilitación. La marcha es un movimiento complejo gobernado por la actividad muscular, que controla la estabilidad del individuo para su movilidad. [4] En este proyecto se pretende diseñar una férula considerando que estas se han consolidado en el campo de la rehabilitación física, ya que su principal aplicación es inmovilizar una determinada parte del cuerpo humano, la misma que

permite obtener resultados favorables debido a sus ventajas y características.[5] Estas férulas abarcarán la articulación distal y proximal con respecto al foco de fractura para garantizar una buena inmovilización, considerando que existen varios tipos de férulas para miembros como son:

- Rígidas las mismas que pueden ser deformables y no deformables.
- Flexibles neumáticas y de vacío.
- De tracción.



Fig. 2 Modelo de férula de miembro inferior

En la Figura 2, podemos observar el diseño de una férula de miembro inferior, donde su fácil colocación la hace eficaz, permitiendo una correcta inmovilización, evitando lesiones secundarias como musculares, daño vascular, lesiones nerviosas, y disminuyendo el dolor, por lo que facilitan el traslado del paciente. [6]

Se debe tomar en consideración que con la tecnología de escaneo 3D se ha permitido un gran avance en la fabricación de férulas utilizando ingeniería inversa, donde su principal ventaja es la mejoría en la adaptación a la anatomía del paciente. [7] Esto unido al uso de las diferentes tecnologías de la impresión 3D como se aprecia en la Figura 3 y a nuevos materiales que facilitan el diseño y permiten una validación para tratamientos de fracturas de miembro inferior, superior e incluso deformaciones de columna. [8]

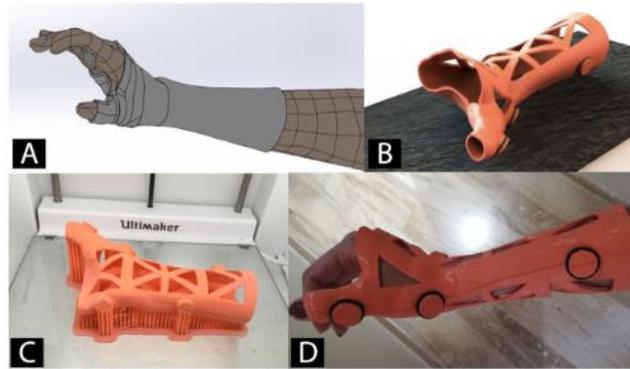


Fig. 3 Impresión 3D mediante material PLA

Formulación de la Hipótesis

Considerando que la sección de la férula que cubre la tibia y el peroné presentará aberturas laterales de diferentes geometrías que faciliten la transpiración de la piel para una mejor recuperación del paciente. Se propone un modelo de férula en función de la Figura 2, partiendo de las propiedades del material, como de las limitaciones asociadas, concretamente se pretende obtener una férula para tratar fracturas de tibia y peroné, ergonómico y adaptable a distintas longitudes de pierna, que requiera de un mantenimiento mínimo y que sea ligero, debido que permitirá el traslado del paciente evitando movilizar su miembro inferior.

Materiales y Métodos

Descripción del Diseño

Para realizar el análisis del diseño es necesario utilizar modelos abstractos que representen matemáticamente el problema, donde hay que señalar que la validez del modelo dependerá de las simplificaciones realizadas. Y no hay que olvidar nunca que es el modelo lo que se estudia y se analiza, y no el sistema real. A partir de esto se toma en cuenta que el modelo ha de reproducir el comportamiento del sistema en aquellos aspectos que sean relevantes. Para corroborar los resultados de los modelos y asegurar su validez pueden realizarse análisis de los prototipos. [9] El proceso de análisis puede esquematizarse de la siguiente forma, como se aprecia en la Figura 4:

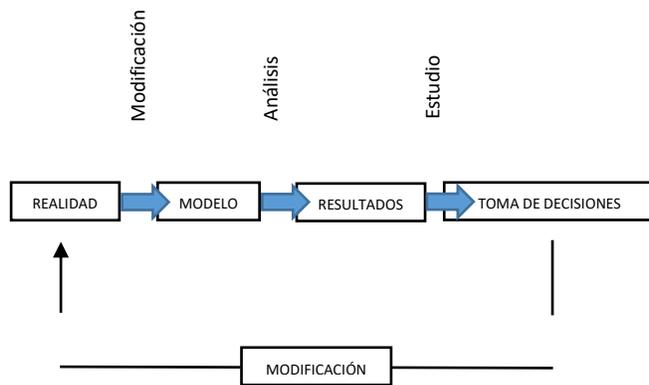


Fig. 4 Representación del análisis del Diseño

Teniendo presente el diseño que se quiere efectuar, se procede a determinar los distintos prototipos, considerando las diferentes formas geométricas para las aberturas en la parte lateral de férula de miembro inferior, para lo cual se va a tener presente que estas aberturas van a seguir un patrón y van ocupar la misma área, lo que permite obtener resultados más reales a partir del peso que obtiene el dispositivo, como del análisis de deformación y su factor de seguridad que se obtiene a partir de la implementación del Método de Elemento Finito. Las distintas aberturas en la sección lateral ayudan a cumplir algunos objetivos como son la visibilidad de la lesión, la higiene y la supresión de presión en algunas zonas, referente a la unión se ha querido conseguir una fijación invisible acorde con el diseño inicial y eficaz.

Material Implementado

El material utilizado para la simulación de la férula de miembro inferior es el PLA. El PLA es muy adecuado para la fabricación de este modelo ya que es un plástico biodegradable, se comporta muy bien con piezas angulosas y se consigue una resolución excelente de impresión y buen acabado superficial. [1] El PLA al ser un material de corte fino, su viscosidad disminuye con la tensión aplicada. El filamento PLA ha adquirido gran aceptación dentro de la fabricación aditiva debido a sus orígenes a base de productos renovables, además que tiene mayor resistencia a factores externos como el calor, por lo que suele utilizarse también en el sector alimentario. Las propiedades del material PLA, vienen detallados en la tabla I, los mismos que serán de vital importancia en la simulación de Método de Elemento Finito. [10]

TABLA I. Especificaciones del material PLA

Propiedades del PLA		
Propiedad	Dimensión	Unidad
Densidad	$1,26 * 10^3$	kg/m^3
Módulo de Young	3,3 – 3,6	GPa
Coefficiente de Poisson	0,38 – 0,4	-
Resistencia a la Tracción	47 – 70	MPa
Resistencia a la Compresión	66 – 86	MPa
Límite Elástico	55 – 72	MPa
Conductividad Térmica	0,13 – 0,16	$W/m^{\circ}C$
Máxima temperatura de servicio	45 – 55	$^{\circ}C$
Mínima temperatura de servicio	-20 – (-10)	$^{\circ}C$

Diseño Propuesto

En el presente trabajo de investigación relacionado al diseño comparativo de una férula de miembro inferior que presenta aberturas laterales con patrones de figuras geométricas, para lo cual se requiere conocer los aspectos anatómicos como las medidas de un miembro inferior de un paciente adulto, requeridas para el dimensionamiento de la férula. En esta sección se especifica como se realizó el diseño para la férula de miembro inferior, para lo cual se analizó cada uno de los siguientes parámetros.

1) *Especificaciones del Diseño:* Los primeros bocetos de la férula, se desarrollaron inspirados en formas orgánicas y/o geométricas. Para las dimensiones de la férula fueron diseñadas a partir de los referentes anatómicos de una pierna de un hombre adulto, considerando que el dispositivo inmovilizador está conformado por dos partes, la primera parte estará conformada por el tobillo y la planta del pie, y la segunda cubrirá la tibia y el peroné. Además, se toma en cuenta el patrón de las aberturas laterales de la férula, esto con el objetivo de facilitar la visión de la lesión, permitir la transpiración de la piel y por supuesto para que sea estéticamente atractivo. Finalmente, los elementos de unión entre las dos partes, así como las correas para sujetar la férula a la pierna. [11]

2) *Desarrollo del Diseño:* Para el desarrollo del diseño se considera cada una de las especificaciones, donde una vez seleccionado el diseño se procede a modelarlo en el software SolidWorks. En primer lugar, se modela la parte que cubrirá el tobillo y la planta del pie cuyas dimensiones son 80x250mm y un espesor de 3 mm, como se puede observar en la Figura 5.

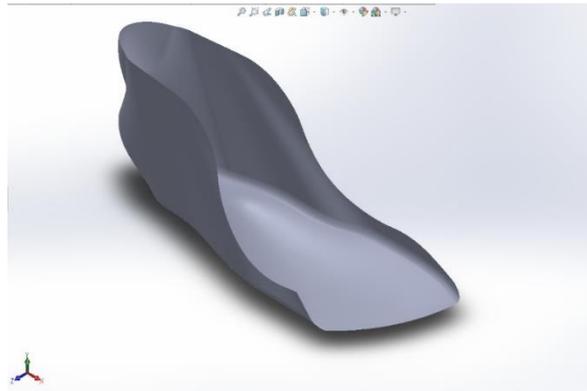


Fig. 5 Elemento 1 conformado por la planta del pie y la sección del tobillo

Una vez obtenido el modelo del elemento 1, procedemos al desarrollo de la férula para la sección de la tibia y del peroné como podemos observar en la Figura 6, la misma que posee las siguientes dimensiones 270x80 mm y un espesor de 3mm.

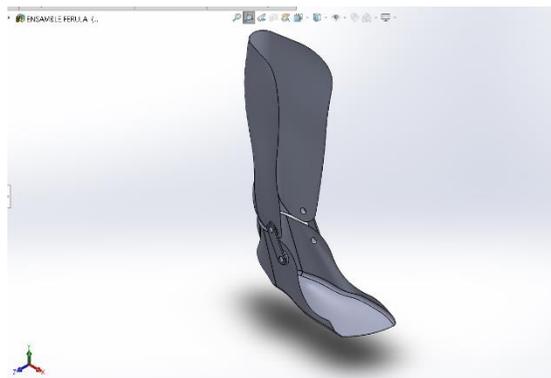


Fig. 6 Elemento 2 de la férula de miembro inferior

Con respecto al diseño de la férula, se ha querido reflejar la idea de una férula que forma parte de la pierna como si se tratara de una segunda piel, un complemento atractivo y eficaz, al considerar su fácil uso y cómodo para el paciente.[1] En la Figura 6, podemos apreciar el diseño de la férula, en la misma que se puede apreciar las dimensiones completas del dispositivo las mismas que son 350 mm de alto, 250 mm de largo y un ancho de 80mm.

Desarrollo de Prototipos

Para realizar los distintos prototipos de diseño para la férula de miembro inferior es necesario utilizar modelos geométricos como son circular, triangular, hexagonal, romboide, elipsoidal, los mismos que seguirán el patrón que se puede observar en la Figura 7, que nos permita obtener resultados precisos para determinar el modelo óptimo.

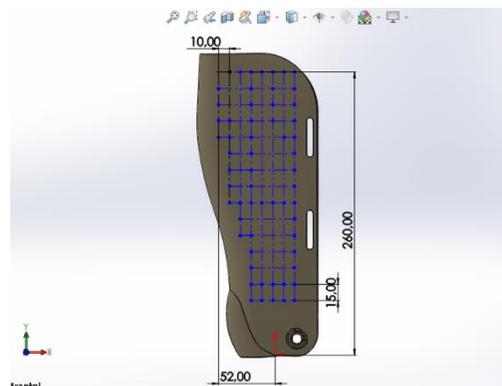
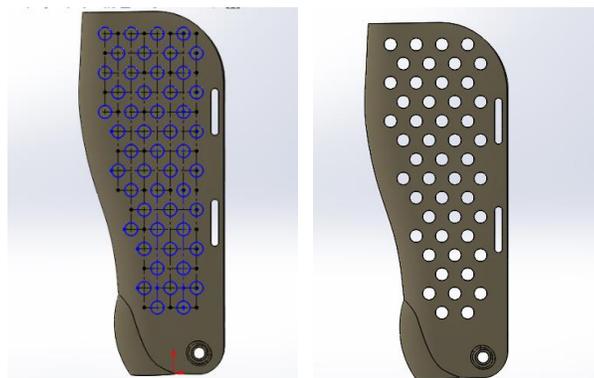


Fig. 7 Vista lateral del patrón de las aberturas

1) *Geometría Circular*: Con respecto a la forma circular se considera un radio de 5 mm, la misma que viene representada en la Figura 8.



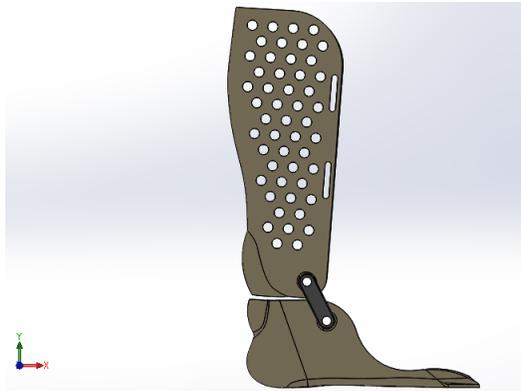


Fig. 8 Vista lateral con aberturas con forma circular

Las propiedades se encuentran representadas en la Figura 9 que fueron obtenidas en SolidWorks. Con respecto a la férula de miembro inferior con aberturas de forma circular se tiene una masa de 327 g. y una superficie de $1,90E5 \text{ mm}^2$.

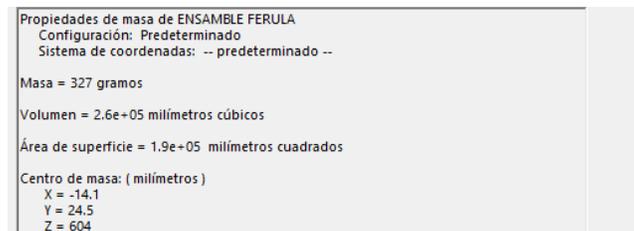
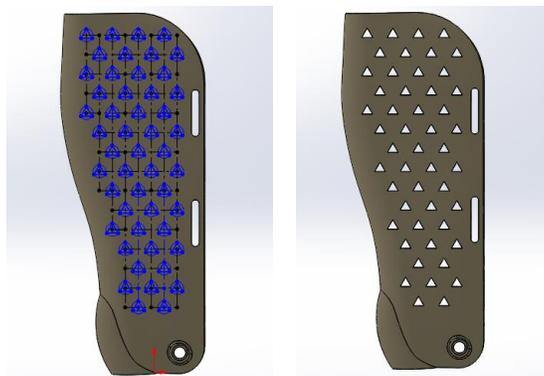


Fig. 9 Propiedades Prototipo 1

2) *Geometría Triangular*: Con respecto a la forma triangular se considera un radio circunscrito de 5 mm, la misma que viene representada en la Figura 10.



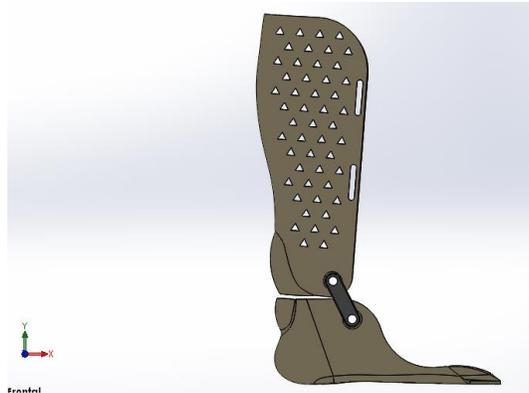


Fig. 10 Vista lateral con aberturas con forma triangular

Las propiedades se encuentran representadas en la Figura 11 que fueron obtenidas en SolidWorks. Con respecto a la férula de miembro inferior con aberturas de forma triangular se tiene una masa de 345 g. y una superficie de $1,98E5 \text{ mm}^2$.

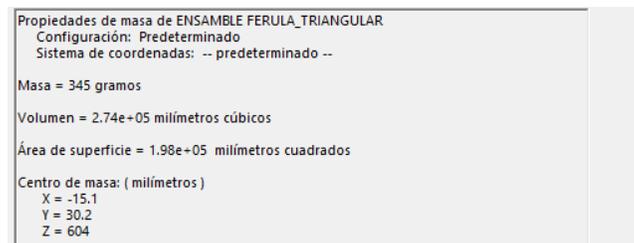
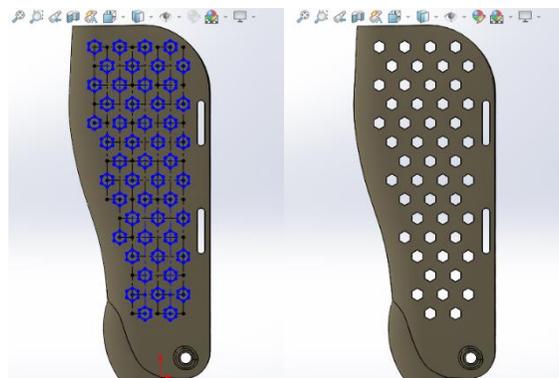


Fig. 11 Propiedades Prototipo 2

3) *Geometría Hexagonal*: Con respecto a la forma hexagonal se considera un círculo circunscrito radio de 5 mm, la misma que viene representada en la Figura 12.



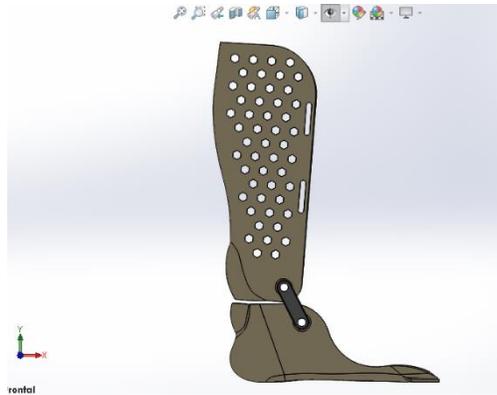


Fig. 12 Vista lateral con aberturas con forma hexagonal

Las propiedades se encuentran representadas en la Figura 13 que fueron obtenidas en SolidWorks. Con respecto a la férula de miembro inferior con aberturas de forma hexagonal se tiene una masa de 333 g. y una superficie de $1,92E5 \text{ mm}^2$.

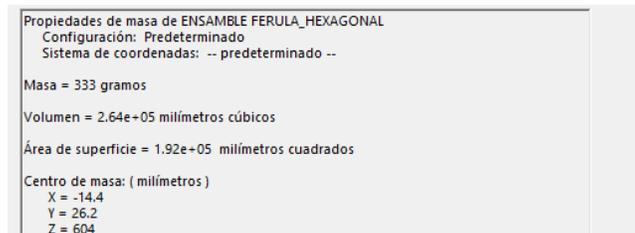
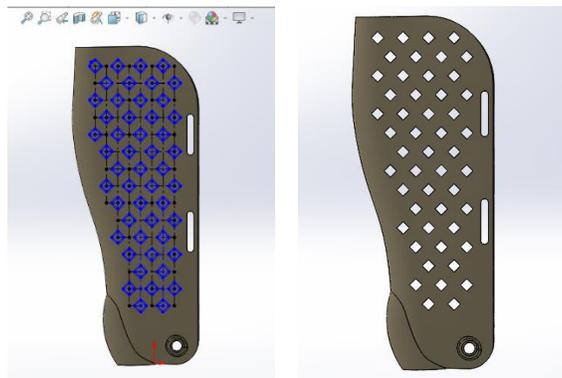


Fig. 13 Propiedades Prototipo 3

4) *Geometría Romboidea*: Con respecto a la forma romboidea se considera un radio circunscrito de 5 mm, la misma que viene representada en la Figura 14.



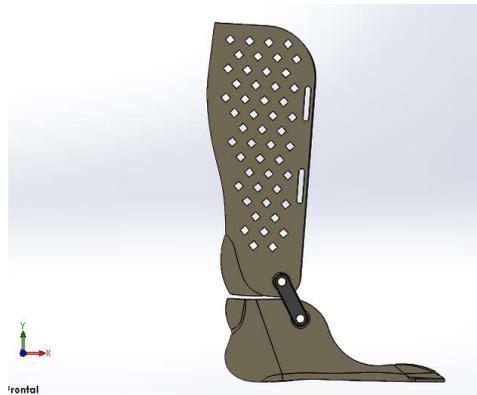


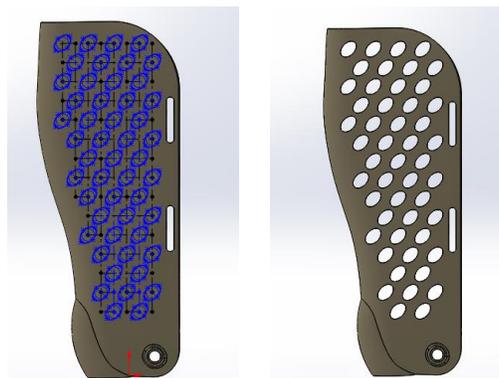
Fig. 14 Vista lateral con aberturas con forma romboidea

Las propiedades se encuentran representadas en la Figura 15, donde la férula con aberturas de forma romboidea tiene una masa de 339 g. y una superficie de $1,95E5 \text{ mm}^2$.

Propiedades de masa de ENSAMBLE FERULA_ROMBOIDE
Configuración: Predeterminado
Sistema de coordenadas: -- predeterminado --
Masa = 339 gramos
Volumen = 2.69e+05 milímetros cúbicos
Área de superficie = 1.95e+05 milímetros cuadrados
Centro de masa: (milímetros)
X = -14,7
Y = 28,1
Z = 604

Fig. 15 Propiedades Prototipo 4

5) *Geometría Elipsoidal*: Con respecto a la forma elipsoidal se considera un radio 1 de 5 mm y un radio 2 de 7,50 mm, la misma que viene representada en la Figura 16.



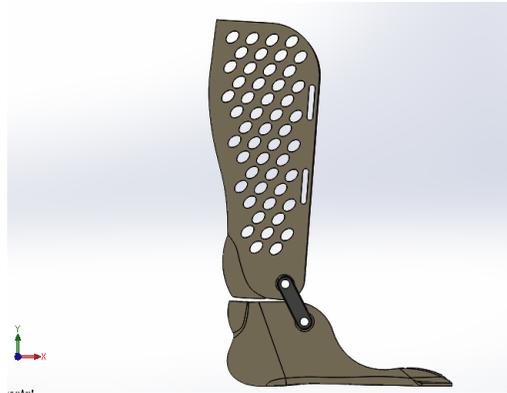


Fig. 16 Vista lateral con aberturas con forma elipsoidal

Las propiedades se encuentran representadas en la Figura 17 que fueron obtenidas en SolidWorks. Con respecto a la férula de miembro inferior con aberturas de forma elipsoidal se tiene una masa de 312 g. y una superficie de $1,84E5 \text{ mm}^2$.

Propiedades de masa de ENSAMBLE FERULA_ELIPSOIDAL	
Configuración:	Predeterminado
Sistema de coordenadas:	-- predeterminado --
Masa =	312 gramos
Volumen =	$2.47e+05$ milímetros cúbicos
Área de superficie =	$1.84e+05$ milímetros cuadrados
Centro de masa: (milímetros)	
X =	-13.2
Y =	19
Z =	604

Fig. 17 Propiedades Prototipo 5

Resultado y Discusión

Para la obtención de los resultados obtenidos de los diferentes prototipos de diseño de la férula de miembro inferior, se los desarrollo mediante la aplicación del Método del Elemento Finito en el software ANSYS Workbench, este análisis nos permite determinar la eficiencia de nuestro dispositivo, a partir de los resultados obtenidos de deformación total, análisis tensional, error estructural y factor de seguridad.

Deformación Total

Luego de tener los prototipos de diseño con geometrías específicas se determinó la necesidad de hacer un análisis de elementos finitos para comprender, hasta cierto punto, el comportamiento

generado por la férula en función de su deformación total producida sobre el elemento. Luego de insertar cada uno de los parámetros que van a actuar en la férula, tal como fixed support, pressure, moment, se obtuvo los siguientes resultados.

1) *Geometría Circular:* Con respecto a la deformación total producida en el prototipo 1 en una geometría con forma circular se tiene una deformación máxima de 7,6249mm, la misma que puede apreciarse en la Figura 18, cuya veracidad se encuentra respaldada en la curva de convergencia.

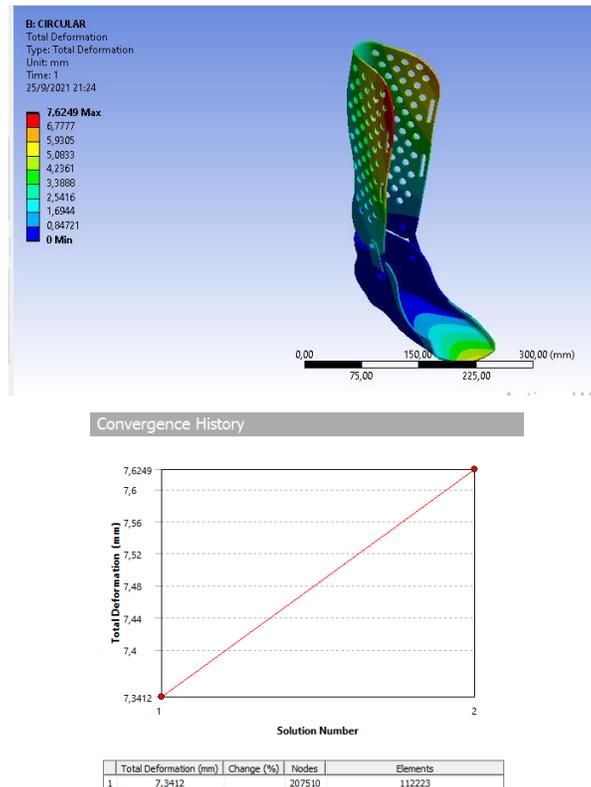


Fig. 18 Deformación total-Curva de Convergencia del Prototipo 1

2) *Geometría Triangular:* Con respecto a la deformación total producida en el prototipo 2 en una geometría con forma triangular se tiene una deformación máxima de 6,8671mm, la misma que puede apreciarse en la Figura 19, cuya veracidad se encuentra respaldada en la curva de convergencia.

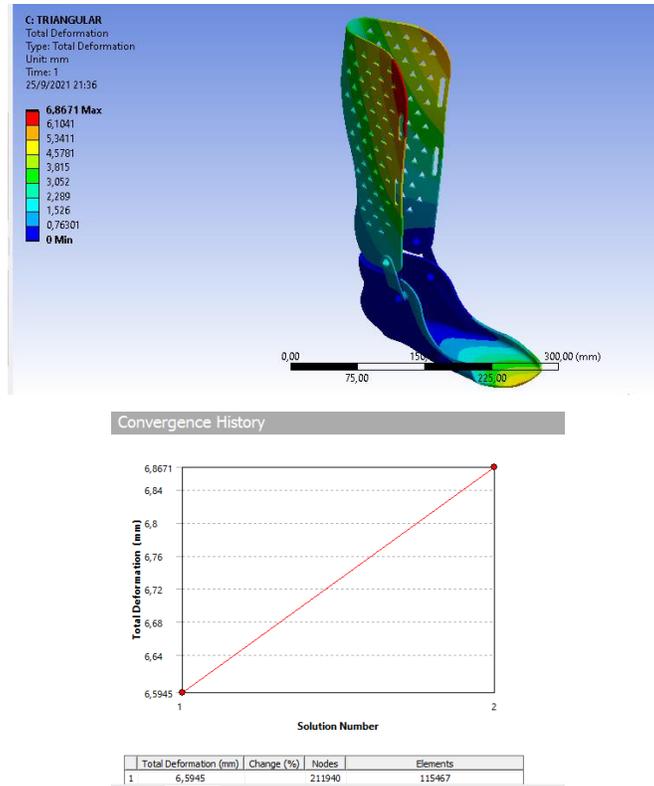
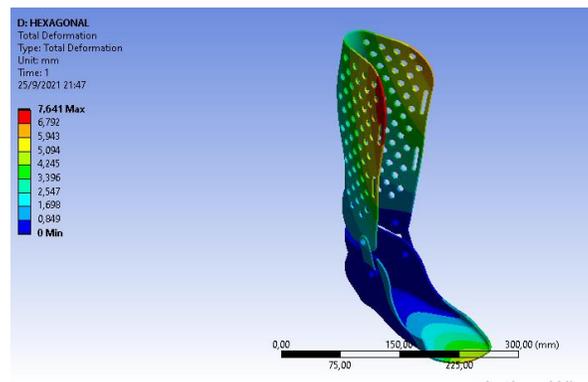


Fig. 19 Deformación total-Curva de Convergencia del Prototipo 2

3) *Geometría Hexagonal*: Con respecto a la deformación total producida en el prototipo 3 en una geometría con forma hexagonal se tiene una deformación máxima de 7,641mm, la misma que puede apreciarse en la Figura 20, cuya veracidad se encuentra respaldada en la curva de convergencia.



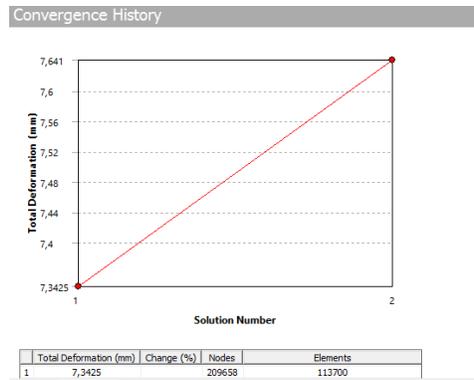


Fig. 20 Deformación total-Curva de Convergencia del Prototipo 3

4) *Geometría Romboidea*: Con respecto a la deformación total producida en el prototipo 4 en una geometría con forma romboidea se tiene una deformación máxima de 7,0403mm, la misma que puede apreciarse en la Figura 21.

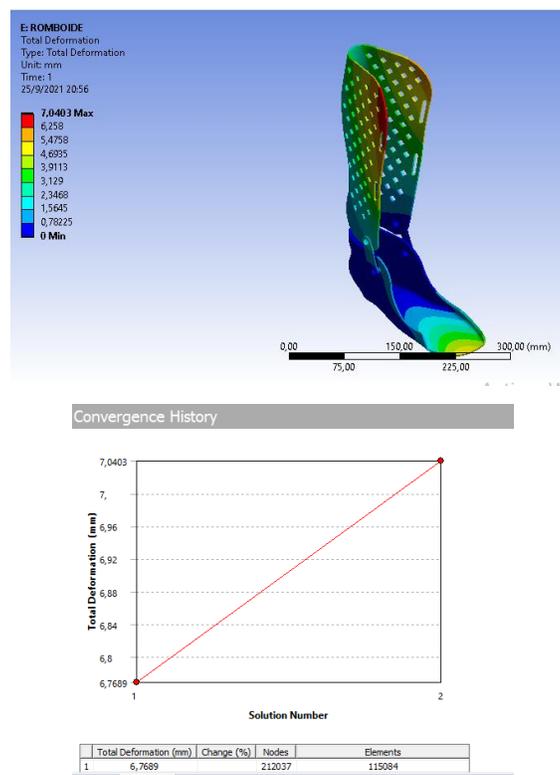


Fig. 21 Deformación total-Curva de Convergencia del Prototipo 4

5) *Geometría Elipsoidal*: Con respecto a la deformación total producida en el prototipo 5 en una geometría con forma hexagonal se tiene una deformación máxima de 8,1097mm, la misma que puede apreciarse en la Figura 22, que se encuentra respaldada en la curva de convergencia.

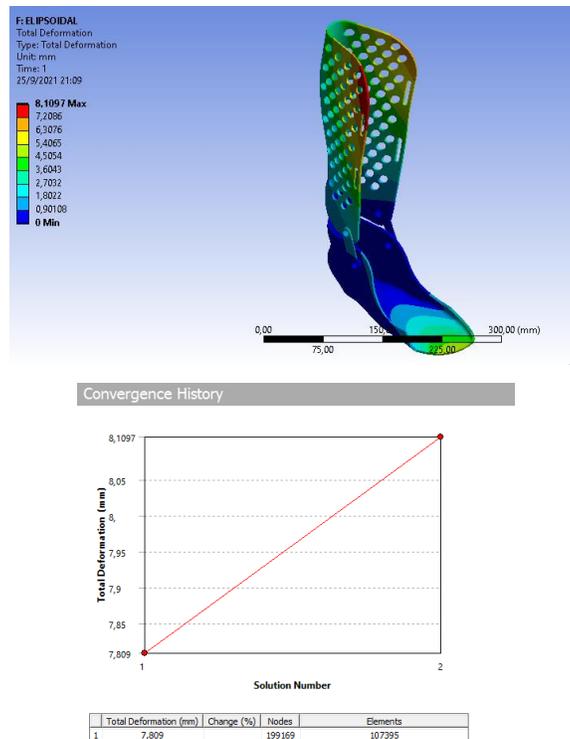


Fig. 22 Deformación total-Curva de Convergencia del Prototipo 5

Análisis Tensional

Para el análisis de los esfuerzos producidos en la férula, se obtiene un esfuerzo máximo de 31,189 MPa correspondiente al prototipo de geometría Hexagonal y el prototipo con el menor valor en su esfuerzo máximo es el prototipo de la geometría Elipsoidal con un valor de 31,156 MPa.

1) *Geometría Circular*: Con respecto a los esfuerzos equivalentes producidos en el prototipo 1 en una geometría con forma circular se tiene un valor máximo de 31,166 MPa, la misma que puede apreciarse en la Figura 23, que se encuentra respaldado en la curva de convergencia.

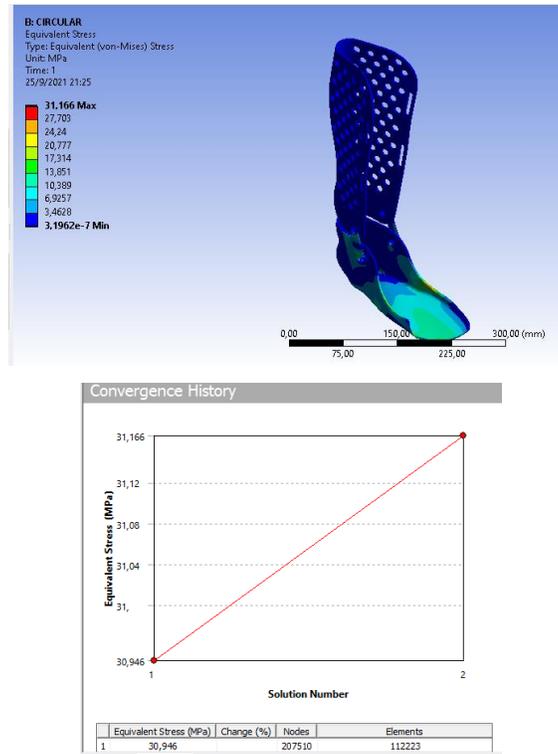
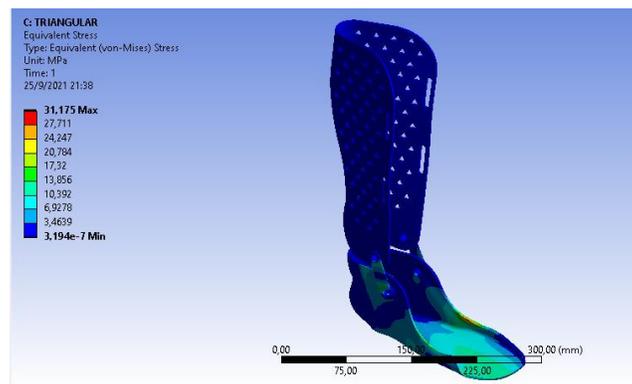


Fig. 23 Esfuerzo Tensional-Curva de Convergencia del Prototipo 1

2) *Geometría Triangular*: Con respecto a los esfuerzos equivalentes producidos en el prototipo 2 en una geometría con forma triangular se tiene un valor máximo de 31,175 MPa, la misma que puede apreciarse en la Figura 24, este valor se encuentra respaldado en la curva de convergencia obtenida en este análisis.



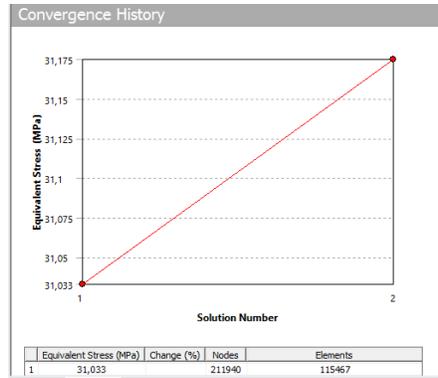


Fig. 24 Esfuerzo Tensional-Curva de Convergencia del Prototipo 2

3) *Geometría Hexagonal*: Con respecto a los esfuerzos equivalentes producidos en el prototipo 3 en una geometría con forma hexagonal se tiene un valor máximo de 31,189 MPa, la misma que puede apreciarse en la Figura 25, este valor se encuentra respaldado en la curva de convergencia obtenida en este análisis.

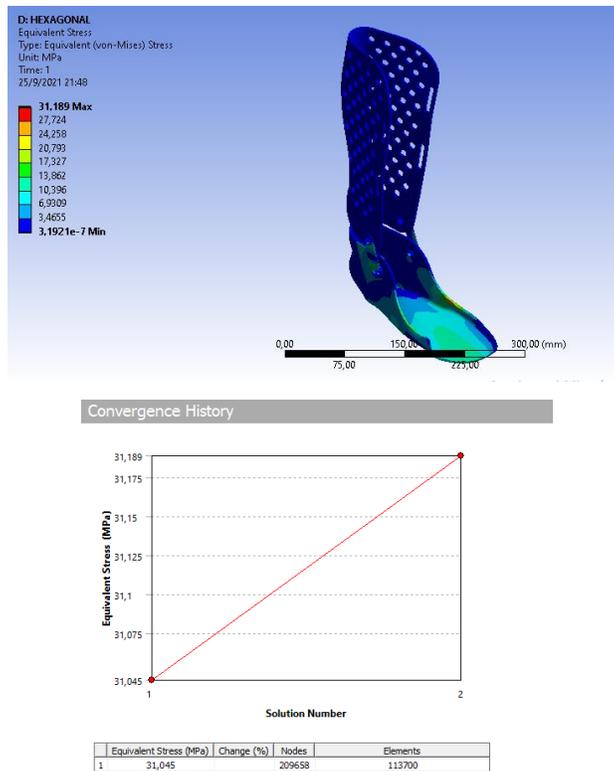


Fig. 25 Esfuerzo Tensional-Curva de Convergencia del Prototipo 3

4) *Geometría Romboidea*: Con respecto a los esfuerzos equivalentes producidos en el prototipo 4 en una geometría con forma romboidea se tiene un valor máximo de 31,174 MPa, la misma que puede apreciarse en la Figura 26.

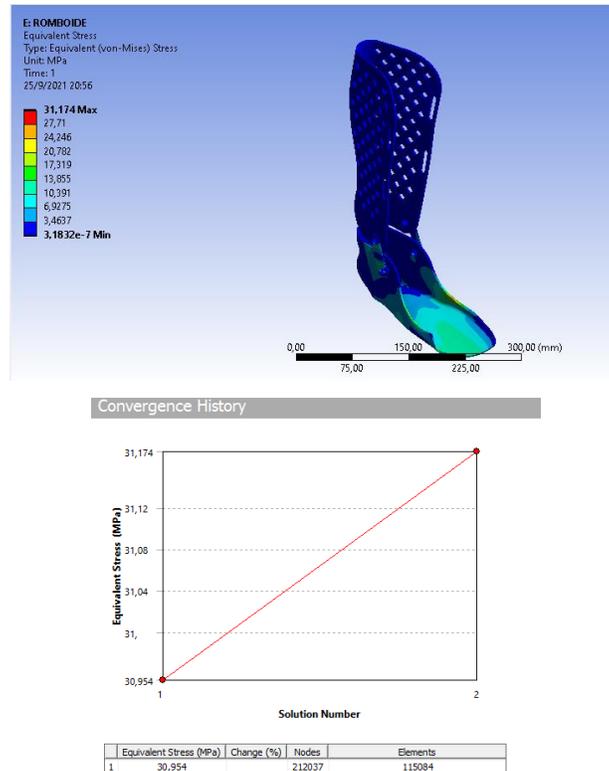


Fig. 26 Esfuerzo Tensional-Curva de Convergencia del Prototipo 4

5) *Geometría Elipsoidal*: Con respecto a los esfuerzos equivalentes producidos en el prototipo 5 en una geometría con forma elipsoidal se tiene un valor máximo de 31,156 MPa, la misma que puede apreciarse en la Figura 27, este valor se encuentra respaldado en la curva de convergencia obtenida en este análisis.

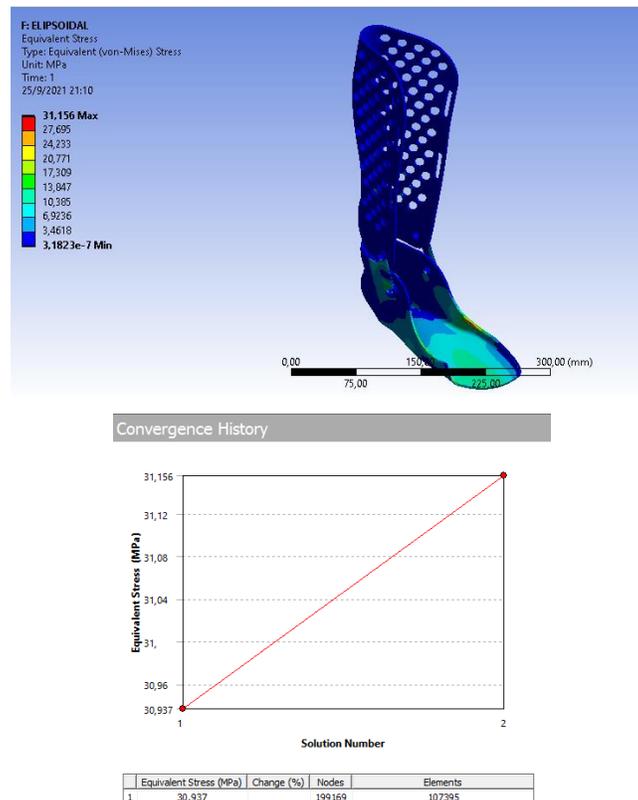


Fig. 27 Esfuerzo Tensional-Curva de Convergencia del Prototipo 5

Factor de Seguridad

Con respecto al factor de seguridad que posee la férula de miembro inferior, se tiene un valor máximo 1,5085 correspondiente al prototipo de geometría Elipsoidal y el prototipo con el menor valor es el prototipo con geometría Hexagonal con un valor de 1,5069. Se debe considerar que un valor del coeficiente de seguridad superior a la unidad indica seguridad ante el fallo, tanto mayor, cuanto más elevado sea su valor, mientras que un valor inferior a la unidad indica inseguridad o probabilidad elevada de que ocurra el fallo. En función de la variabilidad de las cargas aplicadas y las propiedades del material, cada valor del coeficiente de seguridad se puede asociar a una probabilidad de fallo o de supervivencia de la pieza analizada. [12]

1) *Geometría Circular*: Con respecto al factor de seguridad obtenido en el prototipo 1 en una geometría con forma circular se tiene un valor de 1,5081, la misma que puede apreciarse en la Figura 28.

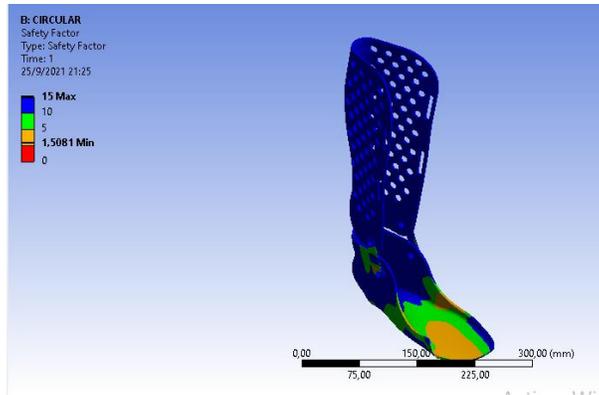


Fig. 28 Factor de Seguridad del Prototipo 1

2) *Geometría Triangular*: Con respecto al factor de seguridad obtenido en el prototipo 2 en una geometría con forma triangular se tiene un valor de 1,5076, la misma que puede apreciarse en la Figura 29.

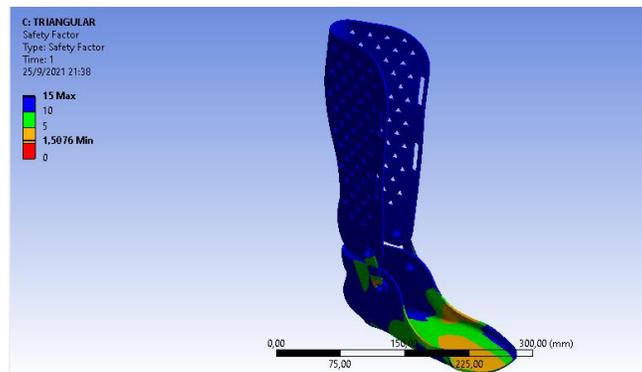


Fig. 29 Factor de Seguridad del Prototipo 2

3) *Geometría Hexagonal*: Con respecto al factor de seguridad obtenido en el prototipo 3 en una geometría con forma hexagonal se tiene un valor de 1,5069, la misma que puede apreciarse en la Figura 30.

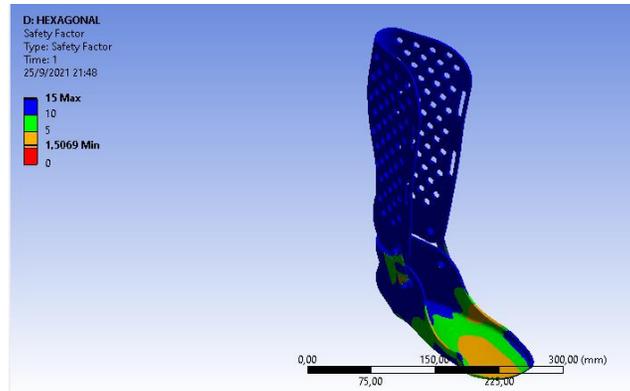


Fig. 30 Factor de Seguridad del Prototipo 3

4) *Geometría Romboidea*: Con respecto al factor de seguridad obtenido en el prototipo 4 en una geometría con forma romboidea se tiene un valor de 1,5077, la misma que puede apreciarse en la Figura 31.

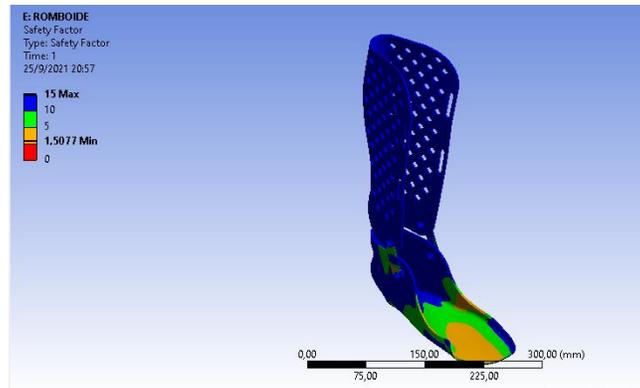


Fig. 31 Factor de Seguridad del Prototipo 4

5) *Geometría Elipsoidal*: Con respecto al factor de seguridad obtenido en el prototipo 5 en una geometría con forma elipsoidal se tiene un valor de 1,5085, la misma que puede apreciarse en la Figura 32.

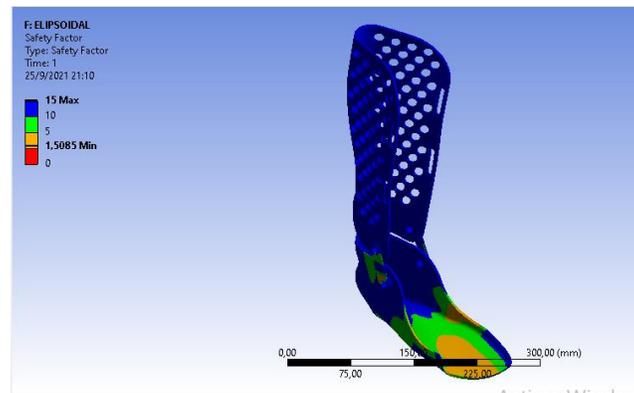


Fig. 32 Factor de Seguridad del Prototipo 5

Análisis de Resultados

A partir de la Tabla 2, se elige el prototipo de diseño ideal, mediante los resultados mostrados en la tabla 2 se ha podido verificar que la geometría elipsoidal tiene características favorables ya que su masa es de apenas 312 gramos y aunque su deformación es casi 1 mm por encima de las otras geometrías, los resultados también indican que el esfuerzo máximo que se genera es el menor en comparación con las otras formas, con un valor de 31.156 MPa.

Estas características permiten que la férula de tipo elipsoidal cuente con un factor de seguridad de 1.5085, lo cual está por encima de las otras, convirtiéndose en una de las mejores opciones para elegir a la hora de realizar un diseño.

La geometría hexagonal obtuvo el factor de seguridad más bajo, así como el esfuerzo más alto, por lo que se podría decir que no es recomendable su aplicación. Mientras que el de tipo triangular presentó una mayor masa en referencia a las otras, sin embargo, obtuvo una menor deformación que las demás y un factor de seguridad intermedio. En este sentido, es una segunda opción para tomar en cuenta debido a sus características medianamente favorables.

TABLA II. Análisis de Resultados

Análisis de Resultados				
Prototipo	Masa (kg)	Deformación (mm)	Esfuerzo (MPa)	Factor de Seguridad
Circular	327	7,6249	31,166	1,5081
Triangular	345	6,8671	31,175	1,5076

Hexagonal	333	7,641	31,189	1,5069
Romboide	339	7,0403	31,174	1,5077
Elipsoidal	312	8,1097	31,156	1,5085

Conclusiones

Mediante la realización del trabajo de investigación se concluyó que el diseño de una férula mediante softwares computacionales permite verificar su correcta geometría para una aplicación más funcional y que le permita al paciente inmovilizar determinada área de sus miembros inferiores con la finalidad de proveer una pronta recuperación.

Sin embargo, se ha visto necesario que para cada paciente se genere un tipo de férula personalizada ya que cuentan con una geometría diferente, por lo que sería necesario de la aplicación de la tecnología 3D para obtener dimensiones acordes a lo que necesita la persona.

Además, se ha aplicado geometrías de corte que generen un menor gasto de material pero que sobre todo que le permita a la piel respirar y obtener una frescura de la temperatura ambiente, lo cual se ha verificado que permite una mejor recuperación. Así mismo el ajuste de la férula debe ser adecuado para el tipo de lesión que se presente y verificado por un médico especializado para evitar que se corte la circulación de la sangre lo que provocaría efectos negativos en el paciente.

Finalmente, el tipo de material que se ha elegido es el PLA debido a que mediante la bibliografía investigada se ha visto que sus características contribuyen a la flexibilidad y resistencia que se necesita para aportar en sus funciones de recuperación y así mismo permite una buena calidad de impresión 3D.

Referencias

1. E. Requejo Arranz and J. Magdaleno Martín, “DISEÑO Y DESARROLLO DE UNA FÉRULA DE MIEMBRO SUPERIOR ESCANEADA E IMPRESA EN 3D,” Valladolid, Jun. 2019. Accessed: Sep. 22, 2021. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/228073977.pdf>.
2. Kynetar, “Fractura de tibia y peroné,” Jul. 10, 2017. <https://www.kynet.com.ar/fractura-de-tibia-y-perone> (accessed Sep. 24, 2021).
3. S. F. Hernández, “CAPÍTULO DOS: ANATOMÍA DE LA PIERNA HUMANA.”

- A. Amaia Ilzarbe, “ANÁLISIS DINÁMICO DE LAS FUERZAS DE CONTACTO ORTESISPIERNA MEDIANTE UN MODELO BIOMECÁNICO TRIDIMENSIONAL,” Barcelona, Jun. 2014. Accessed: Sep. 22, 2021. [Online]. Available: [https://biomec.upc.edu/wp-content/uploads/theses/Ilzarbe-MSc-Thesis-Analysis dinamico de las fuerzas de contacto ortesis-pierna mediante un modelo biomecanico tridimensional.pdf](https://biomec.upc.edu/wp-content/uploads/theses/Ilzarbe-MSc-Thesis-Analysis%20dinamico%20de%20las%20fuerzas%20de%20contacto%20ortesis-pierna%20mediante%20un%20modelo%20biomecanico%20tridimensional.pdf).
4. M. GUANDULAY-ALCÁZAR, R. LEDESMA-JAIME, M. FERRER-ALMARAZ, and G. RAMOS LÁZARO, “Diseño y manufactura de ortesis dinámica para mano mediante el modelado por deposición fundida (MDF),” *Rev. Ciencias la Salud*, vol. 06, no. 20, pp. 23–31, Sep. 2019, Accessed: Sep. 22, 2021. [Online]. Available: https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Ciencias_de_la_Salud/vol6num20/Revista_Ciencias_de_la_Salud_V6_N20_4.pdf.
5. C. P. D. R. A. S.-C. B. Eva Compés Molina, “Inmovilización del Miembro Inferior con Férulas de Vacío en las Urgencias extra hospitalarias,” *Complutenses*, vol. 7, no. 2, pp. 71–76, Mar. 2012, Accessed: Sep. 22, 2021. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/38810248.pdf>.
6. L. C., “Guía completa: el filamento PLA en la impresión 3D - 3Dnatives,” Aug. 19, 2019. <https://www.3dnatives.com/es/guia-filamento-pla-en-la-impresion-3d-190820192/#!> (accessed Sep. 24, 2021).
7. J. A. C.-H. F.-G. A.-C. P.-M. P. Andrés-Cano, “Papel del cirujano ortopédico y traumatólogo en la impresión 3D: aplicaciones actuales y aspectos legales para una medicina personalizada,” *Rev. Esp. Cir. Ortop. Traumatol.*, pp. 138–151, 2021, Accessed: Sep. 22, 2021. [Online]. Available: <https://www.elsevier.es/es-revista-revista-espanola-cirurgia-ortopedica-traumatologia-129-pdf-S1888441520301223>.
8. J. Frax, “PROCESO DE DISEÑO,” 2010. [http://joelfrax.com/disenio/proceso de disenio.html](http://joelfrax.com/disenio/proceso%20de%20disenio.html) (accessed Sep. 27, 2021).
9. COMA Corporation, “Propiedades del PLA.” <https://sites.google.com/view/poliacidolactico-coma/poliácido-láctico/propiedades-del-pla?authuser=0> (accessed Sep. 22, 2021).

10. J. S. Luisely Algarra and L. V. Brizeida Gamez, “Diseño de una férula de tracción,” *Rev. Ing. UC*, vol. 20, no. 02, pp. 7–13, Aug. 2013, Accessed: Sep. 24, 2021. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/707/70732655002.pdf>.
11. S Aquino, RF ARIAS, RA CORDOVA, “Práctica educativa para estudiantes de dinámica de máquinas utilizando la función de calidad”, (2019).
12. EH Medina-Quintero, SM Aquino-Aroba, “Exoesqueleto rehabilitador del dedo índice”, *Polo del Conocimiento*, (2022).
13. ER Pozo-Safla, SM Aquino-Aroba, MA Ordoñez-Viñan, “Análisis estadístico para validar la simulación por elemento finito en el diseño a deformación de una viga en voladizo,” *Polo del Conocimiento*, (2022).

© 2022 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).