

ANÁLISIS COMPARATIVO POR ELEMENTO FINITO EN PRÓTESIS TRANSTIBIALES DE ACERO INOXIDABLE, RESINA EPÓXICA Y MATERIAL COMPUESTO CON REFUERZOS ORGÁNICOS

COMPARATIVE ANALYSIS BY FINITE ELEMENT IN TRANSTIBAL PROSTHETICS OF STAINLESS STEEL, EPOXY RESIN AND COMPOSITE MATERIAL WITH ORGANIC REINFORCEMENTS

Omar Dante García Monroy

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, México
omardantegarciamonroy@gmail.com

Fernando Rocha Conejo

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, México
fernando_cone@live.com.mx

Miroslava Cano Lara

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, México
miroslava.cano@itesi.edu.mx

Higinio Juárez Ríos

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Irapuato
higinio.juarez@itesi.edu.mx

Recepción: 16/septiembre/2019

Aceptación: 13/noviembre/2019

Resumen

Se presenta el estudio comparativo por elemento finito del diseño de prótesis transtibial modular empleando el material comercial acero inoxidable AISI 304, así como el material económico de resina epóxica. Se complementa el estudio con un material compuesto novedoso conformado por la resina poliéster y refuerzos de fibras de jute, fibras de vidrio y pulverizado de nuez.

El análisis estático de la prótesis utilizó un peso de 90 kg considerado para una persona adulta y equivalente a una fuerza de 1600 N., con lo cual buscamos un resultado de deformación menor al establecido en la norma ISO 10328 que es de 15 mm.

Los resultados entre el material comercial y los materiales de estudio son

comparados, y el material propuesto presenta valores semejantes al de la resina epóxica, y ofrece un factor de seguridad de 1.2375. De esta es factible continuar con los estudios de diseños, análisis y manufactura de prótesis con materiales compuestos con refuerzos orgánicos de bajo costo y con una opción de compra para las personas que no pueden adquirir una prótesis comercial.

Palabra(s) Clave: Análisis estático, elemento finito, material compuesto, prótesis transtibial.

Abstract

The comparative study is presented by finite element of the design of modular transtibial prosthesis using the commercial material stainless steel AISI 304, as well as the economic material of epoxy resin. The study is complemented with a novel composite material made up of polyester resin and reinforcements of jute fibers, glass fibers and walnut powder.

The static analysis of the prosthesis used a weight of 90 kg considered for an adult and equivalent to a strength of 1600N, with which we look for a deformation result lower than that established in ISO 10328 which is 15 mm.

The results between the commercial material and the study materials are compared, and the proposed material presents values similar to that of the epoxy resin, and offers a safety factor of 1.2375. From this it is feasible to continue with the studies of design, analysis and manufacture of prostheses with composite materials with low-cost organic reinforcements and with a purchase option for people who cannot acquire a commercial prosthesis.

Keywords: Composite material, finite element, static analysis, transtibial prosthesis.

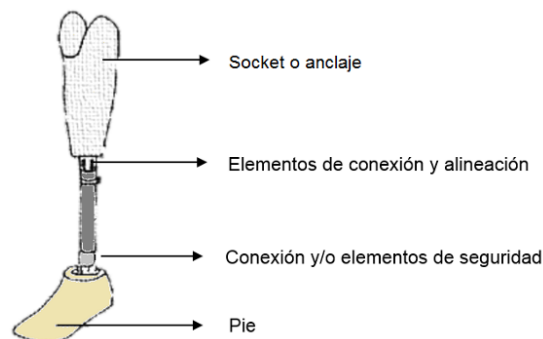
1. Introducción

Una prótesis es un aditamento anatómico-mecánico que sustituye de forma total o parcial un segmento y la función de este [Caudillo, 2016]. Anteriormente las prótesis se elaboraban en una sola pieza principalmente de materiales duros y pesados, como madera, acero y resina. Este tipo de prótesis son conocidas como prótesis convencionales, actualmente se siguen fabricando, pero

únicamente para las personas que ya están acostumbrados al uso de ellas y no desean cambiar por un sistema diferente [CIDOP Ortopedia, 2019].

En particular existen diversos tipos de prótesis de pierna, las prótesis modulares son sistemas protésicos que emplean materiales de la era espacial, tales como; aluminio, fibra de carbono, kevlar, titanio, termoplásticos, entre otros. Estas prótesis son elaboradas en piezas modulares (desmontables) como lo son el socket, la abrazadera, el tubo quien remplaza la tibia y el pie, lo que permite cambiar con facilidad una pieza por otra para su reparación o mejora. Son mucho más versátiles y funcionales, empleando sistemas de tecnología avanzada como, válvulas, giroscopios, pistones, etc [Doberti, 2015].

Existen tipos de prótesis de pierna de acuerdo al nivel de amputación como lo son la prótesis transtibial y transfemoral, ambas del tipo modular y convencional [CIDOP Ortopedia. 2019]. En la figura 1 se muestra una prótesis transtibial común que está conformada por un socket o anclaje, los elementos de conexión y alineación, elementos de seguridad y por un pie.

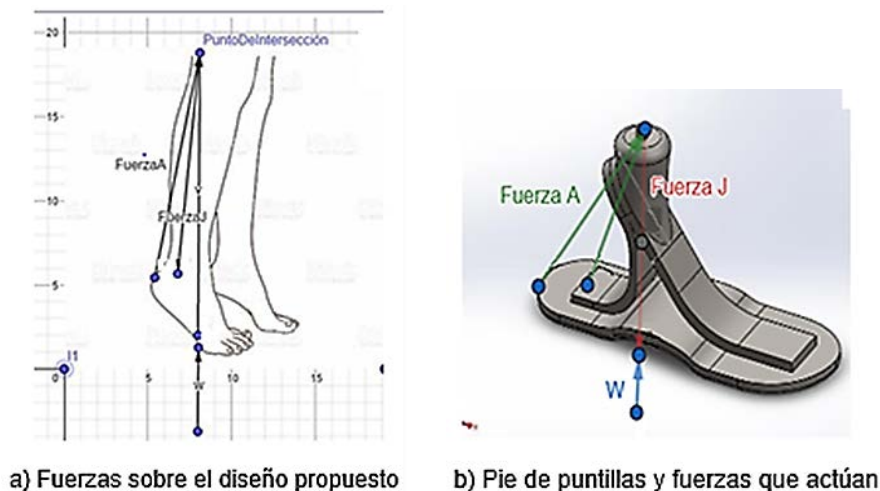


Fuente: Esperanza, 2012.

Figura 1 Elementos que conforman una prótesis transtibial.

Algunas prótesis transtibiales, como lo menciona Doberti J., se diseñan a partir de placas de polioximetileno cortadas con waterjet y Nylon 12 impresas en 3D, con un costo total de 173,500 pesos y un costo anual de 77,400 pesos por concepto de reemplazo de pieza [Doberti, 2015]. El diseñador tiene la responsabilidad de asegurar que la prótesis sea segura para trabajar bajo condiciones previsibles como lo son el mantenerse de pie, caminar y subir escalones. Para esto se requiere

un estudio de la biomecánica del miembro inferior, en particular el análisis estático de las fuerzas que actúan sobre la articulación del tobillo, el paciente se considera parado de puntillas, en el cual existen tres fuerzas coplanares principales actuando sobre el mismo: la fuerza de reacción del suelo W , la fuerza muscular a través del tendón de Aquiles A , y la fuerza de reacción articular sobre la cúpula del astrágalo J . La fuerza de reacción articular es aproximadamente 2.1 veces el peso corporal [Nordin, (2004)]. La figura 2 muestra el diagrama de cuerpo libre de las fuerzas ejercidas en el pie al estar parado de puntillas. Donde dado por el resultado de la multiplicación de 1.2 W y J es la fuerza de reacción articular sobre la cúpula del astrágalo siendo igual a 2.1 W [Nordin, 2004].



a) Fuerzas sobre el diseño propuesto

b) Pie de puntillas y fuerzas que actúan

Fuente: Elaboración propia.

Figura 2 Fuerzas que actúan en el pie.

La mayor parte de los esfuerzos recaen en la parte del pie, siendo esta la zona donde se realiza el análisis estático con el material sugerido que debe cumplir seguridad, soportar una carga referencia y cumplir con las condiciones de operación.

Existen diversos estudios de análisis mecánicos en prótesis transtibiales de acero inoxidable, resina epóxica y fibra de carbono, por ejemplo, Martínez empleó una masa para el usuario de 120 kg, debido a que las prótesis transtibiales comerciales soportan cargas que oscilan en su mayoría para personas de este peso. Sabiendo el valor de la gravedad, la carga resulta de 1765.8 N. Los resultados obtenidos al

aplicar la fuerza calculada son de una deformación de 18.4 y 1.4 mm de la parte trasera y delantera del pie respectivamente [Doberti, 2015].

Cely [2011] diseñaron y construyeron una prótesis para amputación transfemoral pediátrica con un sistema de desplazamiento vertical, empleando el material de acero inoxidable AISI 304. El diseño de la prótesis fue analizado por elemento finito y sometido a una carga de 4.38 N debido a que esta prótesis fue guiada para una niña de 4 años. Al realizar el análisis de esfuerzo se obtuvo un valor de 1.33×10^6 N/m² y un desplazamiento máximo de 2.619×10^{-3} mm [Cely, 2011]. Cely [2011] diseño una prótesis transtibial con material acero inoxidable al cromo la cual fue sometido a un peso de 70 kg, una distribución uniforme de tensiones con un esfuerzo mínimo de 17.8783 N/m² y un esfuerzo máximo de 4.20057×10^7 N/m². Así mismo el análisis de desplazamientos resultantes, dio un valor mínimo de 1.00057×10^{-33} m y un valor máximo de 2.720057×10^{-5} m [Mercedes, 2007].

Siqueiros M. et. al., [2018] diseñó una prótesis transtibial de material compuesto de resina epóxica y fibra de carbono donde analizó la prótesis con una fuerza de 2013N con lo cual obtuvieron como resultado una deformación máxima de 0.2014mm en la sección del talón. La fuerza aplicada a este diseño se dio por que se desea comparar el material de resina epóxica y fibra de carbono con los de la norma ISO 10328 y comprobar si el material cumple con lo necesario [Sigueiro, 2018].

Los estudios de diseño y análisis mecánicos en prótesis transtibiales muestran que las deformaciones no superan los 15mm establecidos por la norma ISO 10328 [ISO 10328, 2018] a pesar de aplicarles diferentes fuerzas estas no afectan del todo a los materiales como lo son el acero inoxidable AISI 304 y la resina epóxica con fibra de carbono.

El diseño de la prótesis transtibial analiza los esfuerzos mecánicos, donde los valores calculados serán comparados con los esfuerzos permitidos por la norma ISO 10328 dentro de las condiciones de operación [ISO 10328, 2018].

La mayoría de los materiales compuestos que se utilizan en ingeniería constan de dos materiales: un refuerzo llamado rellenedor y una matriz. El reforzador proporciona rigidez y resistencia; la matriz mantiene juntos los materiales y sirve para transferir carga entre los refuerzos discontinuos [Budynas, 2012]. Existen

considerables sugerencias para las fibras naturales que pueden implementarse para mejorar sus propiedades mecánicas. Una vez que las estructuras de la base se hacen fuertes, los polímeros se pueden fortalecer y mejorar fácilmente. Hay varios aspectos que nos ayudan a mejorar el rendimiento de los compuestos como son la orientación de la fibra, la resistencia de las fibras, las propiedades físicas de las fibras, las propiedades de adhesión interfacial de las fibras y muchas más. Las propiedades mecánicas de las matrices de PLA, epoxi, PP y poliéster pueden verse afectadas al reforzar diferentes tipos de fibras naturales [Kumar, 2017].

En la tabla 1 se muestran las propiedades de los materiales empleados en la elaboración de prótesis transtibiales en el mercado de acero inoxidable AISI y resina epóxica obtenidos en el software ANSYS. Actualmente existen materiales compuestos que comprenden refuerzos con fibras naturales, el jute es un ejemplo de ellos. En la tabla 1 se muestran las propiedades mecánicas del material compuesto con refuerzos de fibra de jute y cascara de nuez, el cual se emplea para el estudio mecánico.

Tabla 1 Propiedades mecánicas de materiales para la prótesis transtibial.

Propiedades mecánicas	Acero inoxidable (AISI 304)	Resina epóxica	Resina poliéster, pulverizado de nuez y fibra de jute y vidrio
Resistencia a la tracción [MPa]	207	54.6	26.091425
Modulo Young [MPa]	1.93×10^5	3780	1291.21
Densidad [kg/m ³]	7750	1160	1278

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la tabla 1, las propiedades mecánicas del acero son mayores a los materiales alternativos como la resina y el material compuesto, el cual presenta mejores propiedades en la resistencia. Las propiedades mecánicas del jute son: una densidad de 1.5 g/m^3 , un módulo de elasticidad entre 10 y 30 GPa y una resistencia a la tracción de 393 a 773 MPa [Kumar, 2017]. Montaña et al. utilizó material compuesto de resina poliéster, pulverizado de nuez y fibra de jute y vidrio, que fue utilizado en la fabricación de una careta deportiva y los resultados cuentan con los parámetros físicos requeridos para proteger particularmente los huesos nasales del jugador [Montaña, 2018].

En el área de la medicina, una gran cantidad de personas que se ha tenido que someter a una operación de amputación en los últimos años. Los costos de una prótesis comercial que permite al sujeto volver a sus actividades normales son muy altos, \$63,000 aprox. depende de cada paciente, para una gran porción del público que las necesitan [Doberti, 2015]. En este trabajo se muestra una alternativa de prótesis transtibial diseñada en el software de diseño SolidWorks implementando un material compuesto con fibras orgánicas (en beneficio del medio ambiente), además de reducir el costo de la misma a comparación de las que se venden en el mercado actualmente.

Se pretende que el material compuesto a emplear en el estudio mecánico de la prótesis transtibial presente una alta resistencia, ligereza para considerar una reducción de costes.

2. Métodos

Se realizó un diseño de una prótesis transtibial modular con ayuda de un software de diseño, empleando los tres materiales de interés: el acero inoxidable y la resina epóxica como materiales convencionales y el material compuesto con refuerzos orgánicos propuesto [Doberti, 2015], [Esperanza, 2012], [Mercedes, 2017], [ISO 10328, 2018], [Kumar, 2017].

Materiales

El análisis de la prótesis transtibial abarca el estudio de 3 materiales. El acero inoxidable, resina epóxica y un material compuesto conformado por resina poliéster, pulverizado de nuez y fibra de jute y vidrio [Montaño, 2018]. Debido a las propiedades mecánicas mostradas en la tabla 1, el material es aplicado al diseño propuesto de la prótesis.

Diseño en SolidWorks de Prótesis transtibial

Para realizar el diseño de la prótesis transtibial se utilizó el software de diseño. A partir de la figura 2 y diseños consultados en investigaciones previas [Doberti, 2015], [Esperanza, 2012], [Mercedes, 2007], [ISO 10328, 2018],[Kumar, 2017], se

realizó la prótesis transtibial.

Las consideraciones para el diseño de la prótesis transtibial comprende las medidas del otro pie (planta del pie, distancia del muñón al tobillo, distancia del tobillo a la planta del pie, un peso o masa de la persona de 90 kg, y el diseño del tobillo fijo, por lo que no presenta grados de libertad. Estos parámetros son necesarios para analizar el diagrama de cuerpo libre de la figura 2.

El diseño de la planta del pie, se considera lo más parecido a una plantilla de zapato, curvada para que pueda imitar el rodamiento al estar en marcha el sujeto. Las medidas usadas en este prototipo fueron de 27.5 cm de largo, 11 cm de ancho para la punta y 9 cm de ancho para el talón. El diseño de la plantilla se observa en la figura 3.

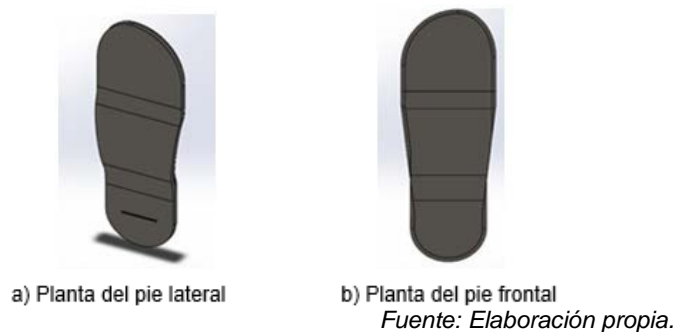


Figura 3 Diseño de la plantilla.

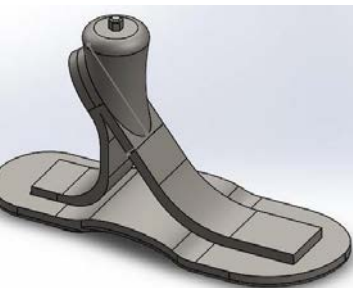
El estudio del diseño de la prótesis transtibial es estático, de esta manera no se considera un tobillo móvil y no presenta movimiento. Se agregaron unas placas que funcionan como amortiguadores para reducir el impacto de la marcha. Dichas placas y tobillo se muestran en la figura 4, figura 4a muestra el tobillo en vista lateral con las placas que funcionarán como amortiguadores y en figura 4b vista trimétrica del tobillo y los amortiguadores.

Finalmente, en la parte de diseño se realizó el ensamblaje de las piezas tobillo con las placas y la planta del pie, como se observa en la figura 5. El análisis mecánico de la prótesis transtibial se realiza con los materiales propuestos de acero inoxidable AISI, resina epóxica y el material compuesto de resina epóxica, pulverizado de nuez, fibras de jute y vidrio.



a) Tobillo con placas b) Vista trimétrica

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5 Ensamblaje final del pie protésico. Vista trimétrica.

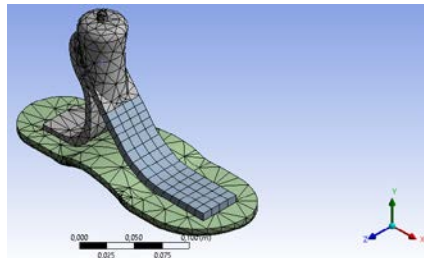
3. Resultados

En relación a los tres materiales de estudio para la prótesis transtibial, se realizó un estudio estático por el software de elemento finito con el modelo mostrado en la figura 6 y los datos del material propuesto de resina poliéster, pulverizado de nuez y fibra de jute y vidrio, además de ser necesario aplicar correctamente las sujeciones, el sentido de la gravedad, y una fuerza externa aplicada de 1600 N.

Para realizar el estudio mecánico de esfuerzos en la prótesis se le aplicó un mallado al diseño. Para las zonas curvas se utilizó un mallado con elementos triangulares ya que presenta una mayor adaptabilidad, pero al tener mayor densidad esto incrementa el tiempo de simulación. Y para las zonas planas utilizamos la geometría rectangular sin ningún problema ya que es válida como la otra y consume menos recursos computacionales.

El número de nodos que presentó el diseño de la prótesis transtibial fue de 6094 nodos y 2922 elementos. Cabe mencionar que en la figura 6 se observan 3 colores (verde, gris y azul) esto debido a que representan las piezas que conforman el diseño de la prótesis transtibial, además de que se observan 2 tipos de mallado, el

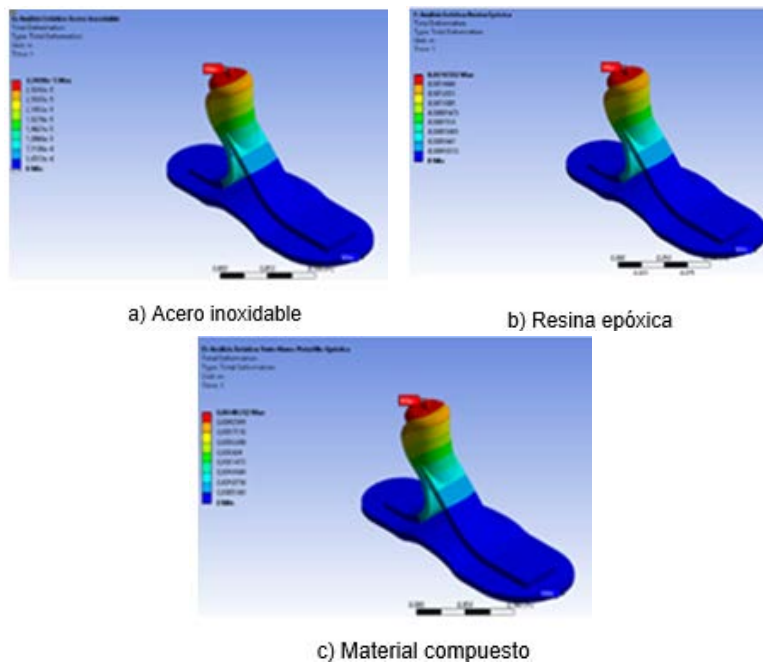
de geometría triangular que es usado en las zonas donde se aprecian curvaturas y el de geometría rectangular en las zonas planas como se menciona en el párrafo anterior. Dicho mallado fue definido por el software de elemento finito como se muestra en la figura 6.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6 Mallado realizado por el software de elemento finito.

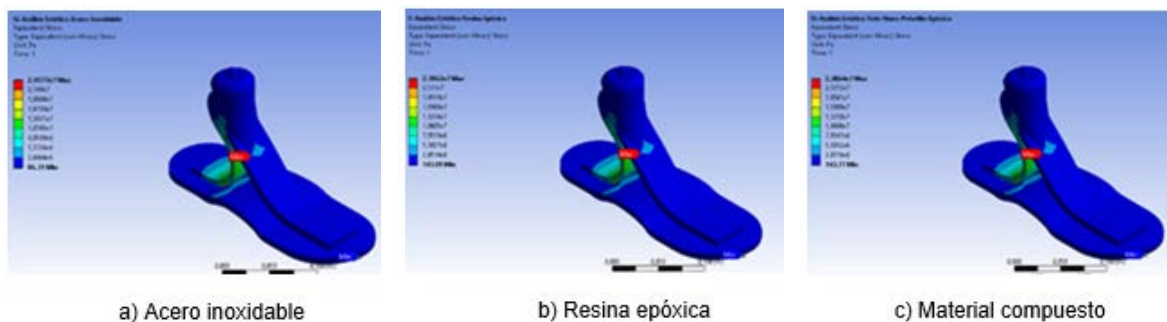
La figura 7 muestra el resultado de la deformación total obtenida en el estudio con una carga de 90 kg de los tres materiales: a. acero inoxidable, b. resina epóxica y c. resina poliéster con cascara de nuez, fibras de jute y vidrio, que se interpreta como el desplazamiento que presenta la prótesis transtibial al aplicar dicha fuerza.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7 Resultados de deformación total de los tres materiales.

En los resultados obtenidos de desplazamientos claramente el acero inoxidable presenta un mejor resultado al tener un desplazamiento de 3.2898×10^{-5} mm, sin embargo, los resultados obtenidos de la resina epóxica y del material propuesto son aceptables en comparación con el acero inoxidable teniendo un desplazamiento de 165.02×10^{-5} mm para resina epóxica y 483.12×10^{-5} mm para el material propuesto. La figura 8 muestra el resultado del esfuerzo equivalente obtenido en el estudio de los tres materiales: Acero inoxidable, Resina epóxica y Resina poliéster-pulverizado de nuez-fibra de jute-vidrio. Para los tres materiales se interpreta como la sustitución de esfuerzos combinados multiaxiales de tensión y cortante por un único esfuerzo de tensión pura, de 2.4177×10^7 , 2.862×10^7 y $2,386 \times 10^7$ Pa, respectivamente.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8 Resultados del esfuerzo equivalente de los tres materiales.

La tabla 2 muestra la comparación entre los resultados obtenidos de deformación total máxima, esfuerzo equivalente máximo y esfuerzo equivalente mínimo con anterioridad del acero inoxidable AISI 304, resina epóxica y del material propuesto. Con el propósito de analizar los datos establecidos y validar los resultados obtenidos en la simulación en elemento finito, se muestran las propiedades mecánicas para cada material en la tabla 3.

Tabla 2 Resultados del análisis mecánico en materiales para prótesis transtibial.

Estudio	Acero inoxidable (AISI 304)	Resina epóxica	Resina poliéster, pulverizado de nuez y fibra de jute y vidrio
Deformación total máxima [10^{-5} m]	3.2898	165.02	483.12
Esfuerzo equivalente máximo [10^7 Pa]	2.4177	2.3862	2.3864
Esfuerzo equivalente mínimo [Pa]	86.31	143.09	143.77

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3 Propiedades mecánicas de los materiales para la prótesis transtibial.

Estudio	ISO 10328	Acero inoxidable (AISI 304)	Resina epóxica	Resina poliéster, pulverizado de nuez y fibra de jute y vidrio
Fuerza [N]	2000	1600	1600	1600
Deformación total [m]	0.015	3.2898×10^{-5}	165.02×10^{-5}	483.12×10^{-5}
Puntos críticos	Talón/punta	Tobillo	Tobillo	Tobillo

Fuente: Elaboración propia.

4. Discusión

La alternativa de emplear materiales compuestos con refuerzos orgánicos en comparación con los materiales comerciales en prótesis transtibiales, apoya en cierta parte a proponer nuevos materiales con características como bajo costo, peso moderado y utilidad de materiales naturales que sustentan el beneficio del medio ambiente.

El diseño mecánico de la prótesis transtibial con el material compuesto de resina poliéster, pulverizado de nuez, fibras de jute y fibra de vidrio fue sometida a una fuerza de 1600N que equivale al peso de una persona de 90kg dando como resultado una deformación de 483.12×10^{-5} m la cual es menor a la establecida en la norma ISO 10328 [9]. Los resultados comparativos entre el material comercial de acero inoxidable AISI 304 el cual contempla elevados costos de compra, la resina epóxica que se emplea para prótesis comunes, y el material compuesto propuesto en este trabajo, ofrece este último un factor de seguridad de 1.2375. De esta manera se da soporte a continuar con los estudios de diseños, análisis y manufactura de prótesis con materiales compuestos con refuerzos orgánicos de bajo costo y con una opción de compra para las personas que no pueden adquirir una prótesis comercial.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] Caudillo, G. (2016). Los amputados y su rehabilitación. Un reto para el estado. Academia Nacional de Medicina. México: Intersistemas. CONACYT.
- [2] CIDOP Ortopedia. (2019). Prótesis //Miembro inferior. 10 junio 2019, de CIDOP Ortopedia: <https://www.cidoportopedia.com/protesismi>
- [3] Doberti, A. (2015). Diseño de una prótesis de pierna para amputados

- transtibiales. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- [4] Esperanza, C., Lely, C., Luengas, A., Manuel, C. & Balaguera. (2012). Respuesta a carga de una prótesis transtibial con elementos infinitos durante el apoyo y balanceo. *Visión Electrónica*, 2, pp. 83-86.
- [5] Nordin, M. & Frankel, V. (2004). *Biomecánica básica del sistema musculoesquelético*. España: Mc Graw Hill.
- [6] Cely, B., Mendoza, E., & Arellana, R., (2011), *Diseño y construcción de una prótesis para amputación transfemoral pediátrica con un sistema de desplazamiento vertical, validado por análisis por elementos finitos.*, Cali, Colombia: El Hombre y la Máquina, pp. 69-76.
- [7] Mercedes, M. & Días A., (2007). *Diseño y análisis por el método de elementos finitos y tomografía computarizada de una prótesis transtibial*. Cali, Colombia: Scientia et Technica Año XIII, pp. 746-747.
- [8] Siqueiro, M., Reyna, M., Nuño, V., Huegel, J., & Castañeda, M., (2018). *Metodología para la fabricación de una prótesis transtibial a base de material compuesto de fibra de carbono y resina epóxica*, México: Revista materia.
- [9] ISO 10328: 2006, *Prosthetics-structural testing of lower -limb prostheses – Requirements and test methods*.
- [10] Budynas, R., & Keith J., (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Nueva York: Mc Graw Hill.
- [11] Kumar, A., & Srivastava, A., (2017), *Preparation and Mechanical Properties of Jute Fiber Reinforced Epoxy Composites*, India: Industrial Engineering Management.
- [12] Montaña P., & Flores, P., (2018), *Análisis y modelado 3D de máscara facial deportiva basada en material compuesto*, México: SOMIM.