

**Uso de la resina poliéster en el diseño
de un exoesqueleto pasivo de
extremidad inferior**

*Polyester resin uses in a passive exoskeleton
design from inferior extremity*

Jorge Esau Tierradentro Cruz
Diego Fernando Rodríguez¹

Artículo de investigación

Recepción: 13 de abril de 2020
Aceptación: 10 de junio de 2020

Cómo citar:

Tierradentro Cruz, J. y Rodríguez, D. 2020. Uso de la resina poliéster en el diseño de un exoesqueleto pasivo de extremidad inferior. Mare Ingenii. Ingenierías 2 (1), pp. 07-17. Recuperado de <http://cipres.sanmateo.edu.co/index.php/mi>

¹ Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: tierramecanica@gmail.com

Resumen:

El estudio de nuevos materiales para el diseño de exoesqueletos está siendo evaluado debido al alto costo de los materiales con que actualmente se fabrican. Los exoesqueletos pasivos no necesitan de ningún motor o controlador lo cual facilita su construcción y accesibilidad pero la mayoría de diseños son construidos en aluminio o fibra de carbono, materiales de difícil acceso para el público de bajos recursos. En el presente artículo se describirá la posibilidad de encontrar si la resina poliéster combinada con los materiales fique, cáñamo y fibra de vidrio, puede mejorar sus propiedades mecánicas de tracción, a su vez, de flexión y así poder utilizarlo en la construcción de un exoesqueleto pasivo de miembro inferior. Para ello, se realiza una caracterización de cada material y se analizan los resultados comparando los datos base en el modelo matemático planteado para el diseño de un exoesqueleto pasivo pie-pantorrilla.

Palabras claves: exoesqueleto pasivo, resina, materiales compuestos

Abstract:

The study of new materials for the design of exoskeletons is being evaluated due to the high cost of the materials which they are currently manufactured. Passive exoskeletons do not need any motor or controller, which facilitates their construction and accessibility, but most designs are constructed of aluminum or carbon fiber, materials that are difficult to access for the poor public. The present article will describe the possibility of finding if the polyester resin combined with any of the following materials: hemp and glass fiber, can improve its mechanical properties of tensile, and in turn of flexion and thus to be able to use it in the construction of A passive exoskeleton of a lower limb. To do this, a characterization of each material performed and the results compared with the base data in the mathematical model proposed for the design of a foot-calf passive exoskeleton.

Keywords: passive exoskeleton, resin, composite materials

Introducción

Los desarrollos de mecanismos para mejorar la capacidad motriz de los seres humanos son cada vez más sofisticados pero más costosos [1], debido a la tecnología que estos utilizan y a las aplicaciones que se les puede dar. La principal función de los desarrollos es garantizar una mejor calidad de vida y aumentar la movilidad del cuerpo [2], [3], [4], [5]. El último estudio realizado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) en Colombia [6] evidencia que cerca del nueve (9)% de la población presenta algún tipo de discapacidad en miembros inferiores. Por eso los estudios se han dedicado a tratar esta problemática [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13] y en algunos casos a mejorar la capacidad humana. Por ejemplo, los utilizados por las fuerzas militares [14], para trabajos pesados [15], [16] y diseños menos complejos que solo se enfocan en tratar específicamente una parte del cuerpo ayudando a reducir el costo de energía al caminar [2], [17], [18].

Por otro lado, el exoesqueleto artificial es un sistema adaptado al cuerpo o a una parte específica que consiste en mecanismos mecánicos o electromecánicos que ayudan a reducir esfuerzos y aumentar movilidad. De esta manera, garantiza estabilidad, firmeza y autonomía en el movimiento realizado por las personas que presenten algún tipo de discapacidad que afecte los grupos musculares [19].

Como se mencionó anteriormente, el alto costo de los materiales en los cuales se fabrican actualmente los exoesqueletos [5], [20] constituye un aspecto crítico para personas de bajos recursos económicos, más aún si a esto se suma la complejidad

del diseño [21] llevándolo en algunos casos a ser inasequible. La mayoría de veces estos diseños son personalizados, las características del cuerpo de cada persona son únicas y las necesidades difieren unas de otras. Estudios recientes tienden a realizar comparativos que abarcan toda la población colombiana de tal forma que permita mayor funcionalidad del exoesqueleto [22], es decir, que se pueda adaptar a cualquier persona o que los cambios realizados sean mínimos sin afectar su funcionalidad.

En este sentido, se desarrollan modelos de exoesqueletos desde pasivos [23], hasta los que implementan actuadores electromecánicos [15], [24]. Cabe resaltar la importancia de los exoesqueletos pasivos pues no necesitan de mecanismos complejos para dar soporte y permitir el movimiento, entonces, facilita su construcción y lo hace más asequible. El exoesqueleto pasivo es un dispositivo simple compuesto por eslabones rígidos, juntas (o pines) y resortes, que no utilizan motor o controlador alguno para generar el movimiento [10]. Lo necesario para la construcción de este tipo de exoesqueletos es determinar el centro de masa del sistema y conocer las cargas que actúan sobre él. Posteriormente, se realiza la selección del resorte de acuerdo con el esfuerzo que va a soportar, asimismo, se determina el material más adecuado para el diseño.

En la selección de materiales para el diseño de las piezas soporte y de anclaje para exoesqueletos pasivos, actualmente, se utilizan fibras de carbono o aluminios [2]; son materiales que presentan propiedades mecánicas que se ajustan a las cargas aplicadas por los mecanismos. En el diseño de exoesqueletos es necesario realizar una evaluación de los posibles materiales a utilizar, según la función que estos tendrán que desempeñar. Por tal motivo, día a día se estudian posibilidades para la

implementación de materiales que sean de bajo peso, bajo costo [19] y que satisfagan los diseños. De allí surgen los materiales compuestos como una alternativa.

Los materiales compuestos son aquellos que se forman por la unión de dos (2) o más materiales para conseguir la combinación de propiedades físicas y mecánicas. Estas combinaciones garantizan una mayor aplicación en los diseños y, como por lo general se utilizan materiales de bajo costo, resultan más asequibles para el desarrollo de partes. Dentro de las matrices de naturaleza polimérica se encuentran los termoplásticos, termoestables y elastómeros; entre los termoestables más comunes se encuentra la resina de poliéster.

La resina poliéster es la más utilizada por su buena relación calidad-precio; pueden combinarse con cualquier tipo de refuerzo adquiriendo distintas propiedades mecánicas [25]. Así, el objetivo de este trabajo es evaluar el uso de la resina poliéster combinada con alguna fibra en el diseño de un exoesqueleto pasivo para extremidad inferior.

Metodología

Para el desarrollo del proyecto se establecen tres (3) etapas donde se analiza el diseño de un exoesqueleto pasivo utilizando materiales compuestos. Para ello, se hace una recolección de la información donde se busca un modelo matemático que cumpla con las especificaciones del sistema; asimismo, se desarrolla de acuerdo con los parámetros establecidos. En este sentido, se realiza un análisis de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales compuestos evaluados en este documento mediante ensayos al material. En la selección de materiales de diseño se identifican los principales compuestos utilizados en la fabricación de exoesqueletos pasivos.



Figura 1. Diagrama del proceso a desarrollar durante el análisis de materiales y viabilidad del diseño del exoesqueleto.

Para el desarrollo del proyecto se establecen tres (3) etapas donde se analiza el diseño de un exoesqueleto pasivo utilizando materiales compuestos. Para ello, se hace una recolección de la información donde se busca un modelo matemático que cumpla con las especificaciones del sistema; asimismo, se desarrolla de acuerdo con los parámetros establecidos. En este

Modelo matemático.

Para el desarrollo del modelo matemático se tiene en cuenta lo investigado y se identifican las necesidades de la población que utilizará el dispositivo. En este caso, se eligieron los siguientes datos para el análisis estático: una persona adulta de 85 kg y una altura de 172 cm ya que el dispositivo nace como una necesidad de un sujeto con estas características. La persona utilizada para el diseño del dispositivo presenta agotamiento y malestar en la pierna al momento de realizar caminatas prolongadas por un tiempo superior a 15 minutos. Por tal motivo, se quiere alargar este periodo de marcha con el uso del dispositivo [2], [8].

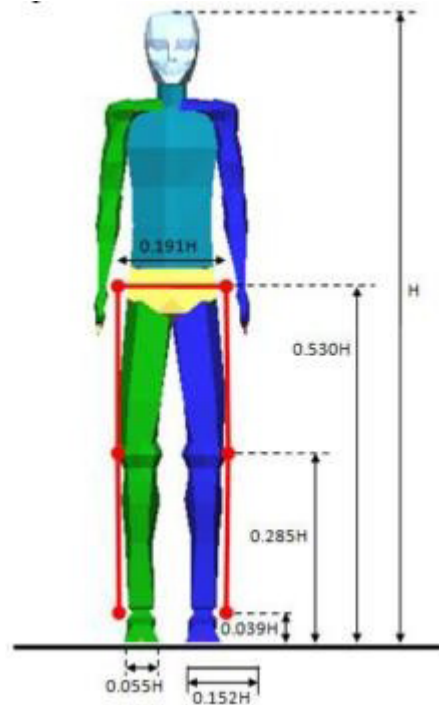


Figura 2. Ejes de rotación de miembro inferior. [26]

Para realizar el cálculo de las variables que actúan sobre el exoesqueleto se utilizan las relaciones de la Figura 3 y de la Tabla 1. Allí se muestran los valores de masa y los centros de masa en función de la altura y la masa de la persona establecidas por Winter, Drillis y Contini [8]. La Figura 2 muestra las fuerzas y torques que actúan sobre la extremidad y que serán calculadas para el diseño del dispositivo.

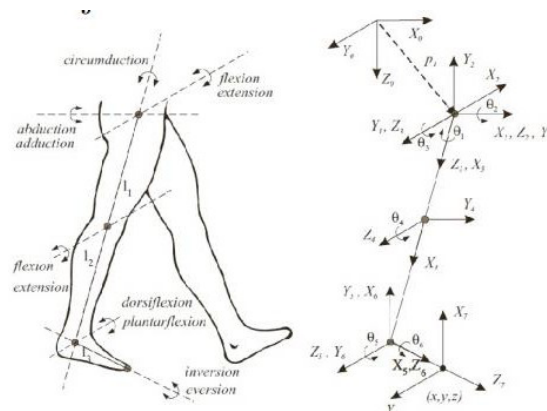


Figura 3. Longitud de las partes de la pierna en función de la altura total. [8]

Segmento	Peso de segmento	CM/ longitud de segmento		Radio de giro/ longitud de segmento		
		Proximal	Distal	CG	Proximal	Distal
Pie	0.0145M	0.50	0.50	0.475	0.690	0.690
Pantorrilla	0.0465M	0.433	0.567	0.302	0.528	0.643
Muslo	0.100 M	0.433	0.567	0.323	0.540	0.653
Pie y pantorrilla	0.061 M	0.606	0.394	0.416	0.735	0.572
Total pierna	0.161M	0.447	0.553	0.326	0.560	0.650

Tabla 1. Relación masa y localización de centros de masa en función de la altura y masa de la persona. [8]

El siguiente modelo aplica para el análisis de pie-pantorrilla:

$$m = \text{masa persona (kg)} * 0.061 \quad (1)$$

$$= \text{altura persona (m)} * 0.324 \quad (2)$$

$$= m * \text{gravedad} \quad (3)$$

Entonces, utilizando las formulas obtenidas del diagrama de cuerpo libre, asumiendo el mecanismo como de dos (2) eslabones y un pivote [8], [19]. Únicamente se reemplazan los valores con los de la persona que se va a analizar de las siguientes ecuaciones:

$$M = 100\% F * l \quad (6)$$

$$F_y = W - 100\%F \quad (7)$$

$$Mz = -MX + 100\%F * 0.285 * \text{alturapersona} \quad (9)$$

Ahora bien, para el análisis dinámico se sustituyen los valores obtenidos en la siguiente ecuación:

$$F_1 = m * a \quad (10)$$

Ensayo de tracción materiales compuestos.

En este caso, para el análisis del ensayo de tracción a materiales compuestos se evalúa la resina poliéster combinada con

talco industrial, cáñamo, fibra de vidrio y fique. El comportamiento de la resina (clasificada como un polímero frágil) se muestra en la Figura 3. Allí se evidencia la estructura del material, la gráfica de esfuerzo versus deformación y la variación de las fibras al momento de aplicar una carga axial.

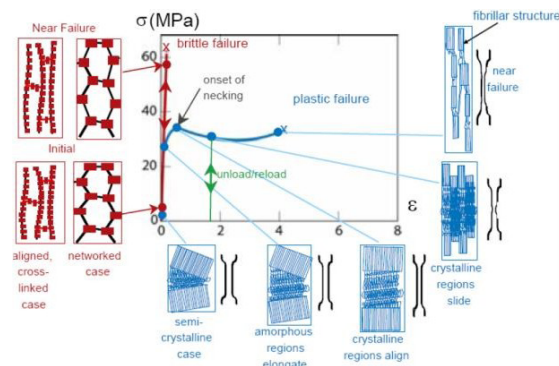


Figura 4. Respuesta de un polímero frágil y dúctil mostrando los cambios estructurales. [27]

Para la preparación de las probetas se utilizó resina polyester activa y un MEC. La proporción entre el catalizador fue del dos (2)% con respecto al total de resina a mezclar. Para ello se utilizó un instrumento de pesaje con división de escala de 0.01g con el propósito de garantizar mayor homogeneidad en la mezcla. La estructura inicial del molde se realizó en madera teniendo en cuenta las dimensiones descritas en la norma ISO 527-2. Sin embargo, como la resina se adhiere a la madera al momento del secado, se realiza un molde final utilizando alginato que es un material utilizado para hacer moldes dentales. El alginato se prepara con agua de acuerdo con las indicaciones del fabricante y se vierte sobre el molde de madera para adaptar la forma de la probeta. Posteriormente, se deja secar por 30 segundos y se retira del molde de madera.

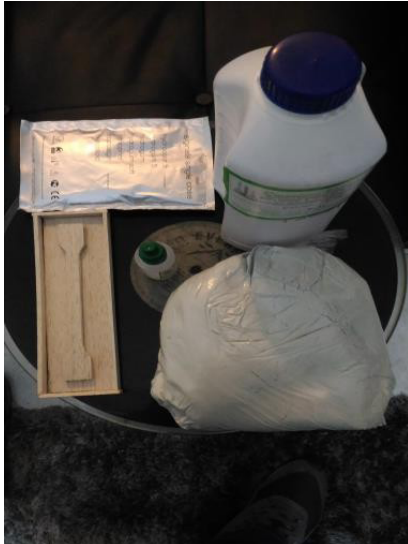


Figura 5. Materiales para la preparación de las protesis.

En este proceso se utilizan cinco (5) protesis mecanizadas de acuerdo con lo descrito en la norma ISO 527-2 de cada combinación de material con la resina polyester, para someterse a tracción identificando el comportamiento del material al ser sometido a cargas axiales. Por consiguiente, se identifican las características del material a utilizar para el desarrollo de un exoesqueleto pasivo para extremidad inferior económico, que cumpla con las condiciones básicas del paciente. Al utilizar resina como material de diseño es importante identificar cómo será el proceso para la creación de los moldes del exoesqueleto.

Selección de materiales.

Entre los materiales utilizados en los diseños de exoesqueletos inferiores pasivos se encuentra el aluminio, el ABS y la fibra de carbono. En la Tabla 2 se evidencian los valores de resistencia a la tracción, límite elástico y elongación de los materiales antes mencionados junto con los valores de la resina poliéster pura.

Material	Resistencia Tracción (MPa)	Módulo elástico (GPa)	Elongación (50mm)%
Aluminio 6061	310	66.6	25
ABS	41.4	2.1	5 a 25
Fibra de Carbono	2759	276	No especificado
Resina pura	50	3.4	2.0

Tabla 2. Valores estimados en el ensayo de tracción de algunos materiales usados en exoesqueletos. [28]

Resultados

Ahora bien, teniendo en cuenta que para el diseño de un exoesqueleto de miembro inferior (utilizando resina polyester) se debe tener un molde de la pieza a fabricar, se tiene que pensar en el proceso que se llevará a cabo para la creación del molde; o si se piensa realizar el dispositivo a partir de un despiece general. En caso de realizar una sola pieza donde se use un molde general lo convierte en una pieza personalizada y facilita que el paciente se adapte más rápido a su uso a diferencia de piezas universales. En el caso contrario se tendrían piezas estándares fabricadas en resina combinada con el material que garantice una mayor resistencia del material a cargas axiales, sin embargo, se tiene que pensar en las uniones de sujeción utilizadas en las juntas.

En estos casos se complica la implementación del diseño ya que se debe tener en cuenta el molde a utilizar y que el material que se use no me afecte la pieza y pueda tener imperfecciones al momento de la aplicación de la resina; en el peor de los escenarios, puede afectar a la persona que se le adapte el dispositivo. Por tal motivo se debe identificar un material que no genere residuos y no afecte el tiempo de secado de las piezas. En este caso, la mejor opción es diseñar un molde por piezas en un pro-

grama CAD e imprimirlo en ABS; material utilizado por estos equipos que cumple con los requerimientos de diseño. Así, con el diseño del exoesqueleto se espera reducir hasta en un diez (10)% la carga total de la pierna y que el mecanismo presente un ahorro en consumo de energía.

En la Figura 6 se observa el diseño del dispositivo a utilizar para pie-pantorrilla utilizando un programa CAD. Solo se muestra el diseño del tobillo-pantorrilla, el complemento de pie-tobillo se hace una figura en L unida al dispositivo anteriormente mencionado. De esta manera, garantiza la adaptación a la superficie del pie.

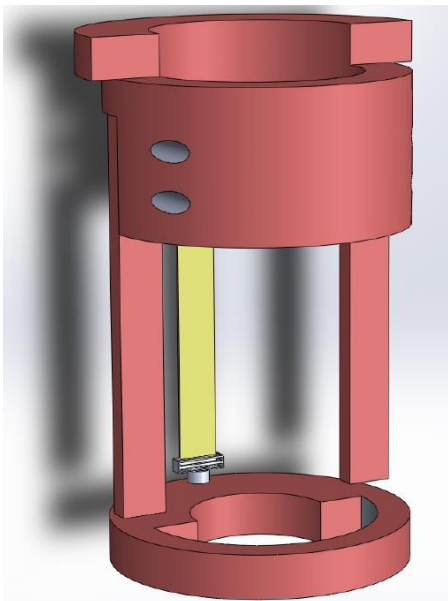


Figura 6. Modelo de exoesqueleto para parte inferior, hecho en resina poliéster y utiliza una banda elástica adaptada a un mecanismo para generar movimiento.

Modelo matemático.

$$= 85 \text{ kg} * 0.061$$

$$= 5.185 \text{ kg}$$

$$= 1.72 * 0.324$$

$$= 0.5573 \text{ m}$$

$$W = 5.185 \text{ kg} * 9.80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$= 50.847 \text{ N}$$

Según lo anterior, el material solo soporta el 15% del peso. En este caso soportaría $WP= 7.62 \text{ N}$. De acuerdo con estudios previos [19] una banda elástica se utiliza para el diseño; ejerce una fuerza de 0.5 kgf a 25% de elongación y de 1.3 kgf a 100% de elongación. Así, se estima una fuerza promedio al caminar de $F1=60 \text{ N}$ [19]. Relacionando los anteriores datos se tiene que:

$$100 \% F = 12.7486 \text{ N}$$

$$M_x = 12.7486 \text{ N} * 0.5573 \text{ m}$$

$$M_x = 7.1047$$

$$F_y = 7.62 \text{ N} - 12.7486 \text{ N}$$

$$F_y = -5. \text{ N}$$

$$M_z = -7.105 \text{ Nm} - 60 \text{ N} * 0.4902 \text{ m}$$

$$M = -36.52 \text{ Nm}$$

$$a = \frac{60}{5.185} \frac{\text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{\text{kg}}$$

$$a = 11.57 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

En el caso de la banda elástica para el diseño de un exoesqueleto pasivo se utiliza un constante de 60 N/m , el valor obtenido por estudios previos [8] que se adapta a las condiciones calculadas anteriormente.

Ensayo de tracción materiales compuestos.

Al realizar el ensayo de tracción para observar el comportamiento de la resina polyester, combinada con los distintos materiales, se observa que es un material frágil y la elongación encontrada es menor al tres (3)%. La Figura 6 muestra la carga máxima promedio obtenida por cada combinación de material. Por su parte, en la Figura 7 se observan los valores de la resistencia a la tracción de los mismos.

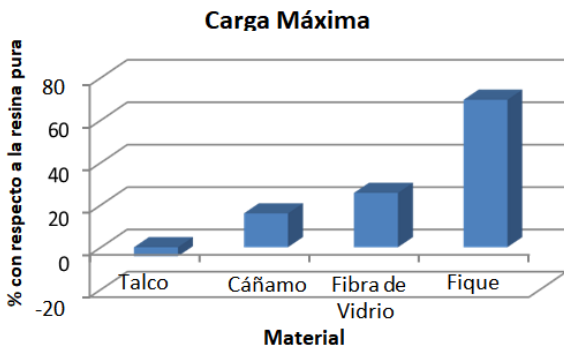


Figura 6. Carga de máxima de los distintos materiales combinados con resina polyester

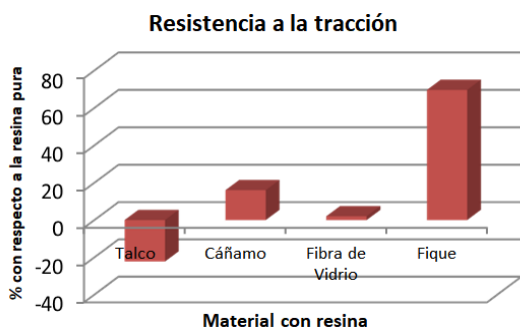


Figura 7. Resistencia a la tracción de los distintos materiales combinados con resina polyester.

La carga máxima obtenida combinando resina con talco industrial se redujo en un 4.3%. En cambio el comportamiento del cáñamo, la fibra de vidrio y el fique fue positivo aportando un valor extra en la carga máxima. Además, el fique tuvo un aumento del 69.5% en su carga máxima de tensión; el cáñamo obtuvo un 16 % y la fibra de vidrio un 25.7%

En cuanto a la resistencia a la tracción, se observa que no hay relación directa entre los materiales combinados y la resina pura. La máxima resistencia fue de 61.53 MPa, obtenida de la combinación de resina polyester y fique. Esto evidencia un aumento del 69.6% de este valor con respecto a la resina pura. En el caso del talco industrial se evidencia una reducción de 22.2 %, en relación con el cáñamo. La fibra de vidrio obtuvo un aumento del 16% y del dos (2)% respectivamente.

De acuerdo con el modelo matemático, se evidencia que el exoesqueleto solo soportaría una carga de 7.62N y la carga máxima que resulto para los materiales evaluados supera en un 50% este valor. Sin embargo, estos resultados están basados en un porcentaje de mezcla de 80% resina y 20% fibras. En este sentido, no es posible asegurar que el material presente un comportamiento lineal si se varían esas proporciones.

La fuerza que ejerce la banda elástica es soportada por el mecanismo anclado a la estructura y las uniones de sujeción por lo que esta carga se distribuye entre la estructura, la pierna y el mecanismo de sujeción de banda.

Selección de materiales.

Ahora bien, según las propiedades determinadas en el ensayo de tracción, con las descritas en la Tabla 2, se observa un incremento de los valores de la resina utilizando fique y cáñamo. Al comparar estos valores con los materiales utilizados en los diseños de exoesqueletos se observa que las mejores opciones de fabricación son la fibra de carbono, seguido del aluminio. Sus propiedades mecánicas alcanzan los valores más altos en relación con los otros materiales indicados.

No obstante, se evidencia que estos valores tienden a ser muy altos en comparación con los valores mínimos de diseño. Por consiguiente, no es necesario para el modelo que se está utilizando; evaluando el costo del dispositivo realizado en fibra de carbono (comparado con el de resina), se estaría disminuyendo el valor final del producto en más de un 60%, tomando como referencia los valores comerciales de cada material. Por tal motivo es posible utilizar resina junto con fique (o cáñamo) como material estructural. Presenta un buen

comportamiento a cargas axiales y es conforme a los valores calculados superando las propiedades del ABS y la resina pura.

Análisis de resultados

Comparando los resultados de la resina con lo descrito en la tabla de materiales [28] se obtiene que la carga de tracción y la resistencia de tracción aumenta al utilizar fibras, ya sea de fique, cáñamo o fibra de vidrio. Se observa un mayor aumento utilizando fique como material compuesto. Con referencia al diseño realizado en fibra de carbono [2], como este material se usó debido a que posee un excelente comportamiento mecánico para diseños estructurales; actualmente es uno de los más utilizados (junto al aluminio). Sin embargo, al analizar los valores de las cargas que se aplican sobre el exoesqueleto; así como al utilizar únicamente un elástico soportado a un mecanismo para reducir el esfuerzo al caminar; es posible realizar un modelo utilizando materiales de menor costo y conformes con los requisitos de diseño.

El diseño planteado busca reducir hasta en un diez (10)% el valor del esfuerzo a caminar, comparado con otros autores [2] que alcanzan hasta el siete (7%); sería un avance en cuanto a costo como a eficiencia del diseño. Para ello es necesario realizar estudios de marcha con el dispositivo para evaluar su funcionalidad. Lo que sí es posible evaluar es la carga soportada por el dispositivo que se plantea a un 15% del peso de la persona; comparado con otros autores se supera en cinco (5)% este valor. Para estudios posteriores, es necesario realizar un análisis dinámico utilizando el dispositivo.

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos, según el modelo del exoesqueleto pa-

sivo para miembro inferior pie-pantorrilla, se observa la simplicidad del diseño y el que no utiliza actuadores para funcionamiento del mecanismo. Así, en cambio, utiliza la carga de la gravedad para generar el movimiento. En este documento se evalúa el ensayo de tracción a la resina poliéster combinado con fique, cáñamo, talco industrial y fibra de vidrio, se determina la viabilidad de utilizar materiales compuestos en el diseño de exoesqueletos.

Evaluando la carga máxima encontrada por los materiales antes mencionados, se observa un aumento de la carga máxima respecto a la resina pura, a excepción del talco industrial que disminuye en un cuatro (4)% su valor. La resistencia a la tracción (parámetro a evaluar) evidencia un aumento de este valor cuando se utiliza cáñamo y fique aproximadamente en un 14% y 69% respectivamente.

El material que mejor se comportaría para el diseño de la estructura del exoesqueleto es la resina combinada con fique. La resistencia a la tracción alcanzó un aumento cercano al 70% en relación con la resina pura. Fácilmente cumple con los requerimientos de diseño pues las cargas que debe soportar por el exoesqueleto están por debajo de las cargas calculadas para reducir el peso en un 15%.

Como futuras investigaciones se propone realizar pruebas y modelos garantizando el soporte total de la pierna; fabricados en materiales que sean de fácil acceso al público. Finalmente, determinando la densidad total de los componentes y con el apoyo de especialistas en el área médica hacer un análisis a fondo de los requerimientos del paciente.

Referencias

- [1] M. Chávez, F. Spitia and A. Baradica, "Exoesqueletos para potenciar las capacidades humanas y apoyar la rehabilitación," *Rev. Ing. Biomédica*, vol. 4, no. 7, pp. 63–73, 2010.
- [2] S. H. Collins, M. B. Wiggin and G. S. Sawicki, "Reducing the energy cost of human walking using an unpowered exoskeleton," *Nature*, vol. 522, no. 7555, pp. 212–215, 2015.
- [3] A. Karelis, L. Carvalho, M. Castillo, D. Gagnon and M. Aubertin-Leheudre, "Effect on body composition and bone mineral density of walking with a robotic exoskeleton in adults with chronic spinal cord injury," *J. Rehabil. Med.*, no. 1, 2016.
- [4] R. W. Jackson, C. L. Dembia, S. L. Delp and S. H. Collins, "Muscle-tendon dynamics explain unexpected effects of exoskeleton mechanics on metabolic rate during walking," vol. 220, no. 11, 2017.
- [5] E. Veslin, J. G. Slama, M. S. Dutra and O. Lengerke, "Análisis Cinemático de un Exoesqueleto de Partes Superiores de 7 GDL," pp. 1–8.
- [6] J. Gómez, "Identificación de las personas con discapacidad en los territorios desde el rediseño del registro," DANE, pp. 1–22, 2008.
- [7] A. Lugo-Villeda, "Diseño robótico de un exoesqueleto pediátrico para miembro superior basado en criterios clínicos y antropomórficos para análisis de movimiento y rehabilitación," tesis de maestría, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, 2013.
- [8] J. M. Grosso and D. Tibaduiza, "Diseño y Validación de un Exoesqueleto Maestro-Esclavo para Rehabilitación de Piernas," en *Conf. 2008 VI Congreso Internacional de Investigaciones en Ingeniería Eléctrica y Electrónica*.
- [9] B. Hwang and D. Jeon, "Development and preliminary testing of a novel wheelchair integrated exercise/rehabilitation system," *IEEE 13th Int. Conf. Rehabil. Robot.*, pp. 1–6, 2013.
- [10] Z. Lerner, D. Damiano, H.-S. Park, A. Gravunder and T. Bulea, "A Robotic Exoskeleton for Treatment of Crouch Gait in Children with Cerebral Palsy: Design and Initial Application," *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 25, no. 6, pp. 650–659, 2016.
- [11] C. Papadimitriou, "To move as a human," *Phys. Life Rev.*, vol. 16, 2016.
- [12] D. R. Louie and J. J. Eng, "Powered robotic exoskeletons in post-stroke rehabilitation of gait: a scoping review," *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 13, no. 1, p. 53, 2016.
- [13] J. F. Borisoff, J. Mattie, and V. Rafer, "Concept proposal for a detachable exoskeleton-wheelchair to improve mobility and health," *IEEE Int. Conf. Rehabil. Robot.*, 2013.
- [14] E. Jiménez, "Tesis: Diseño de exoesqueleto de apoyo a la motricidad para la articulación de cadera," pp. 234, 2014.
- [15] B. Chen, et al., "Recent developments and challenges of lower extremity exoskeletons," *J. Orthop. Transl.*, vol. 5, pp. 26–37, 2016.

- [16] C. Constantinescu, P. C. Muresan, and G. M. Simon, "JackEx: The New Digital Manufacturing Resource for Optimization of Exoskeleton-based Factory Environments," *Procedia CIRP*, vol. 50, pp. 508–511, 2016.
- [17] S. Galle, W. Derave, F. Bossuyt, P. Calders, P. Malcolm, and D. De Clercq, "Exoskeleton plantarflexion assistance for elderly," *Gait Posture*, vol. 52, pp. 183–188, 2017.
- [18] P. R. Geigle and M. Kallins, "Exoskeleton-Assisted Walking for People With Spinal Cord Injury," *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, vol. 98, no. 7, pp. 1–3, 2017.
- [19] J. Acuña, et al., "Diseño y construcción de un exoesqueleto ligero y compacto a fin de aumentar la velocidad y disminuir el esfuerzo de una persona promedio al caminar," tesis de pregrado, pp. 1–46, 2016.
- [20] D. A. B. Camilo Acosta-Márquez, "The Analysis, Design and Implementation of a Model of an Exoskeleton to Support Mobility," en *Conf. 2005 Rehabilitation Robotics*, IEEE Xplore, pp. 99–102.
- [21] S. Jackson et al., "Development of an active powered biped lower limb exoskeleton," en *Conf. 2014, IEEE Int. Conf. Autom. Sci. Eng.*, pp. 990–995.
- [22] V. Lajeunesse, C. Vincent, F. Routhier, E. Careau and F. Michaud, "Exoskeletons design and usefulness evidence according to a systematic review of lower limb exoskeletons used for functional mobility by people with spinal cord injury," *Disabil. Rehabil. Assist. Technol.*, vol. 11, no. 7, pp. 535–547, 2016.
- [23] S. K. Agrawal, S. K. Banala, and A. Fattah, "A Gravity Balancing Passive Exoskeleton for the Human Leg," *Robot. Sci. Syst.*, no. 302, 2006.
- [24] M. Campbell, "Exoskeleton helps the paralysed walk again," *New Sci.*, vol. 208, no. 2782, p. 21, 2010.
- [25] J. Ruiz, L. Ceballos, M. Fuentes, R. Osorio, M. Toledano and F. García-Godoy, "Propiedades mecánicas de resinas compuestas modificadas o no con poliácidos.," *Av. Odontoestomatol.*, vol. 19, no. 6, pp. 291–297, 2003.
- [26] J. Ballesteros, M., Martínez, "Diseño mecánico y construcción de un exoesqueleto de miembros inferiores que emula la marcha humana," p. 131, 2015.
- [27] UNIOVI, "Resistencia de polímeros," pp. 1–89, 2013.
- [28] P. (Universidad A. N. L. Tapia, "Tablas de Materiales." 2017, México.