

Artículo:

Diseño y desarrollo de una órtesis tobillo-pie (AFO) mediante impresión 3D

Design and development of an ankle-foot orthosis (AFO) using 3D printing

Juan-Carlos Ramirez-Vázquez¹, Guadalupe-Esmeralda Rivera-García¹, Miriam-Janet Cervantes-López², Arturo Llanes-Castillo², Jaime Cruz-Casados²

Revista Interdisciplinaria de
Ingeniería Sustentable y Desarrollo
Social (RIISDS)

¹ Tecnológico Nacional de México – ITS de Pánuco, Veracruz, México.

² Universidad Autónoma de Tamaulipas, Tamaulipas, México.

* Autor correspondiente: carlos.ramirez@itspanuco.edu.mx

Recibido: 31 de octubre de 2024

Aceptado: 17 de noviembre de 2024

Publicado: 20 de diciembre de 2024

Publicación anual editada por el
Instituto Tecnológico Superior de
Tantoyuca

Desv. Lindero Tametate, S/N
Col. La Morita
C.P. 92100
Tantoyuca, Veracruz, México.
Teléfono: 789 8931680, Ext.196.

Correo electrónico:
revistadigital@itsta.edu.mx

Sitio WEB
<https://itsta.edu.mx/revistadigital>

ISSN 2448-8003

Editor responsable:
Dr. Horacio Bautista Santos

Copyright: Este artículo es de acceso
abierto distribuido bajo los términos y
condiciones de la licencia Creative
Commons
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Resumen: El estudio detalla la evolución histórica de las órtesis, desde sus orígenes rudimentarios hasta los avances modernos. El objetivo principal es el diseño y desarrollo de una órtesis de tobillo-pie, utilizando tecnología de impresión 3D. Este prototipo brinda al paciente estabilidad, movilidad, comodidad, mejorando la funcionalidad de tobillos-pies del paciente, disminuyendo el riesgo de fracturas y en forma general a mejorar su calidad de vida. La metodología incluye las fases de determinación de requerimientos, modelado 3D, construcción de prototipos, pruebas, ajustes e implementación. Como resultado se presenta el diseño y desarrollo de la órtesis, así como los materiales, impresora 3D y software utilizado, de tal manera que los médicos o autores puedan replicarlo o reproducirlo. Se concluye que las órtesis desarrolladas en impresoras 3D, garantiza una adaptación personalizada a la anatomía del paciente, con un enfoque en ergonomía, precisión y comodidad.

Palabras clave: órtesis, modelado 3D, impresión 3D.

Resumen

El estudio detalla la evolución histórica de las órtesis, desde sus orígenes rudimentarios hasta los avances modernos. El **objetivo** principal es el diseño y desarrollo de una órtesis de tobillo-pie, utilizando tecnología de impresión 3D. Este prototipo brinda al paciente estabilidad, movilidad, comodidad, mejorando la funcionalidad de tobillos-pies del paciente, disminuyendo el riesgo de fracturas y en forma general a mejorar su calidad de vida. La **metodología** incluye las fases de determinación de requerimientos, modelado 3D, construcción de prototipos, pruebas, ajustes e implementación. Como **resultado** se presentan se presenta el diseño y desarrollo de la órtesis, así como los materiales, impresora 3D y software utilizado, de tal manera que los médicos o autores puedan replicarlo o reproducirlo. Se **concluye** que las órtesis desarrolladas en impresoras 3D, garantiza una adaptación personalizada a la anatomía del paciente, con un enfoque en ergonomía, precisión y comodidad.

Palabras clave: órtesis, modelado 3D, impresión 3D.

Abstract

The study details the historical evolution of orthoses, from their rudimentary origins to modern advances. The main objective is the design and development of an ankle-foot orthosis, using 3D printing technology. This prototype provides the patient with stability, mobility, comfort, improving the patient's ankle-foot functionality, decreasing the risk of fractures and generally improving their quality of life. The methodology includes the phases of requirements determination, 3D modeling, prototype construction, testing, adjustments and implementation. As a result, the design and development of the orthosis is presented, as well as the materials, 3D printer and software used, so that physicians or authors can replicate or reproduce it. It is concluded that the orthosis developed in 3D printers, guarantees a personalized adaptation to the patient's anatomy, with a focus on ergonomics, precision and comfort.

Keywords: orthosis, 3D modeling, 3D printing.

Introducción

El origen de las órtesis data de alrededor del año 3000 a.C., con los primeros dispositivos rudimentarios adaptados a necesidades funcionales y culturales de la época, usando materiales disponibles. Los avances significativos comenzaron en el antiguo Egipto, con extremidades protésicas de fibras, y un dedo del pie protésico hallado en una momia egipcia. En la antigüedad, culturas como los romanos y persas desarrollaron órtesis funcionales y bélicas. Durante la Alta Edad Media, las órtesis eran principalmente estéticas y poco funcionales. El Renacimiento revitalizó la tecnología protésica con materiales como hierro y madera, destacando innovaciones de Ambroise Paré, quien introdujo órtesis con flexión de rodilla. Las guerras civiles y mundiales impulsaron avances significativos, y tras la Segunda Guerra Mundial, las demandas de los veteranos llevaron al uso de materiales modernos como plásticos y aluminio, mejorando la calidad de vida de los amputados (Galli y Pelozo, 2017).

El objetivo del presente estudio es presentar el diseño y desarrollo de una órtesis de tobillo-pie, en donde se muestran los componentes y cantidades utilizadas, consumo de energía eléctrica, horas de impresión, tipo de impresora 3D y software manejado, con el propósito de que el autor o profesionales de la salud pueda fácilmente replicarlo.

Las órtesis de tobillo-pie son dispositivos médicos que proporcionan soporte, ayudan en la rehabilitación y movilidad de las personas con diversas condiciones de salud, tienen como propósito brindar al paciente estabilidad, aliviando la carga corporal y mejorando la funcionalidad de tobillos y pies. La órtesis mejora la calidad y el gasto de energía al caminar, así como la funcionalidad del pie y el tobillo (Morris et al., 2011).

La órtesis de tobillo-pie (AFO), es útil para personas con problemas cerebrovasculares, esclerosis múltiple, pie equino, parálisis cerebral, rehabilitación postquirúrgica, entre otras enfermedades. Así mismo, la órtesis de tobillo-pie (AFO) puede ser útil tanto para personas con osteoporosis como con poliomielitis. En el caso de la osteoporosis, la AFO proporciona soporte y estabilidad, ayudando a prevenir caídas y fracturas al estabilizar el tobillo y pie. En pacientes con poliomielitis, mejoran la movilidad, corrigen deformidades y compensan la debilidad muscular o parálisis, permitiendo caminar de manera más segura y eficiente. Para mejorar la movilidad, se prescriben habitualmente órtesis de tobillo y pie (Figueiredo et al.,

2008), (Daryabor et al., 2018), (Wright y DiBello, 2020). La órtesis promueve la correcta alineación del tobillo y previene contracturas musculares (Tardieu et al., 1988). Además, el utilizar la órtesis puede traer potenciales beneficios psicológicos y psicosociales para la persona que la utiliza (Aboutorabi et al., 2017), (Firouzeh et al., 2021), (Autti-Rämö et al., 2006).

Muchas personas con problemas de tobillo-pie, enfrentan dificultades para llevar a cabo actividades básicas sin asistencia externa. Esta dependencia afecta su autoestima y bienestar emocional. Por lo tanto, es fundamental abordar esta problemática y promover su autonomía. Al implementar estrategias integrales como acceso equitativo a un dispositivo (órtesis), podemos empoderar a estas personas para que vivan de manera independiente y plena a pesar de los desafíos que enfrentan debido a su enfermedad.

La clave para construir una órtesis eficaz es la comprensión del sistema musculoesquelético (Ofluo lu, 2009) y, además, cuando se prescribe un tratamiento con aparatos ortopédicos, se debe prestar atención a cuándo y el tiempo que deben usarse durante el día (Morris et al., 2011).

Las órtesis genéricas a menudo no se adaptan bien a la anatomía del paciente provocando molestias en su utilización, lo que ocasiona que decidan dejar de utilizarlas. Es fundamental adoptar un enfoque personalizado en la fabricación de órtesis protectoras pasivas, para que los pacientes puedan mejorar la movilidad en sus miembros inferiores.

La impresión 3D, se utiliza actualmente en muchas áreas (Zolfagharian et al., 2016), (Ngo et al., 2018), (Vafadar et al., 2021) y proporciona beneficios significativos en comparación con las tecnologías de fabricación convencionales, como la capacidad de personalización, mayor libertad en el diseño y producción bajo demanda (Attaran, 2017).

En la literatura reciente se observa un interés cada vez mayor en el uso de la tecnología de impresión 3D para la creación de órtesis y férulas, destacándose tanto sus beneficios como las barreras actuales (Choo et al., 2020), (Keller et al., 2021), (Oud et al., 2021). Esta tecnología permite la construcción de estructuras que son difíciles de realizar de manera manual (Cano-Vicent et al., 2021), (Jandyal et al., 2022), (Raj et al., 2022).

Con el uso de impresoras 3D, es posible crear modelos digitales extremadamente precisos de las áreas afectadas. La creación de estas órtesis se realiza mediante impresoras de polímeros y resinas, teniendo como resultado dispositivos ergonómicos y personalizados. La impresión 3D, ha revolucionado la industria al permitir la creación de objetos tridimensionales a través de la deposición capa por capa de materiales. Este enfoque es prometedor para la producción rápida de prototipos y componentes funcionales, especialmente en la fabricación de piezas personalizadas y complejas. Actualmente, esta tecnología se utiliza principalmente para productos que requieren personalización o alta precisión, ofreciendo ventajas como la reducción de errores, flexibilidad en el diseño y costos más bajos en logística y manufactura.

La impresión 3D ha tenido un impacto significativo en la medicina, facilitando la creación de prótesis a medida y modelos anatómicos precisos (Mazzoli et al., 2020). Esta tecnología ofrece ventajas como la disminución del desperdicio de material, un tiempo de producción más rápido y la posibilidad de personalización a un costo accesible (Wohlers, 2019).

Materiales y métodos

Para llevar a cabo el diseño y desarrollo de una órtesis de tobillo-pie, se siguieron las siguientes fases:

Fase de determinación de requerimientos. En esta etapa, se registran las medidas y el peso del paciente para personalizar la órtesis, asegurando que se adapte correctamente a su anatomía. También se evalúan las limitaciones específicas del paciente en términos de movimiento de la extremidad, fuerza muscular, velocidad y rango de movimiento. Además, se definen los criterios de precisión y seguridad necesarios para salvaguardar la salud y la integridad del paciente. De la misma manera se definen los materiales y cantidades a utilizar. Establecer claramente los objetivos y especificaciones de la órtesis es fundamental para el proceso de diseño. Se tomaron las medidas de 1 estudiante con poliomielitis del Instituto Tecnológico Superior de Pánuco.

Fase del modelado 3D. Para el modelado se utiliza Tinkercad, una herramienta en línea gratuita para crear y modelar en 3D, lo que permite visualizar en todos los ángulos el diseño de la órtesis. Se realizan las modificaciones y correcciones necesarias para que el producto se adapte de manera personalizada al paciente. El diseño debe tener en cuenta las variaciones en el volumen del miembro durante la recuperación, evitar perforaciones que puedan provocar edema y asegurar una superficie suave para prevenir irritaciones.

Fase de construcción del prototipo. Tras verificar que el diseño cumple con las especificaciones, se convierte al formato STL, que es estándar en la industria de prototipos rápidos (Hull, s.f.). Este formato es compatible con la impresora 3D Ender 3 PRO, que utiliza filamento PLA de 1.75 mm. Se imprime el prototipo a tamaño real (100% escala), lo que toma aproximadamente 1 día 2 horas 13 minutos, durante las cuales se supervisa el proceso para evitar problemas como apagones. Al finalizar la impresión, se realiza una inspección visual y táctil para asegurar que no haya defectos en la estructura.

Fase de pruebas. En esta etapa, se evalúa el diseño de la órtesis según criterios de precisión y estabilidad. Se mide la exactitud en el movimiento del pie, la velocidad de movimiento y la estabilidad del sistema. Además, se verifica que la órtesis se ajuste bien a la anatomía del paciente y sea cómoda.

Fase de Ajustes. Tras evaluar el desempeño de la órtesis, se identifican áreas que requieren mejoras para cumplir con los objetivos y especificaciones iniciales. Esto puede implicar ajustes en la precisión, velocidad, estabilidad, ergonomía o comodidad. También se pueden necesitar cambios en los materiales. Los ajustes deben hacerse de manera sistemática y basados en los resultados de la evaluación previa, asegurando que la órtesis se adapte a las necesidades y objetivos específicos del paciente.

Fase de Implementación. En esta etapa, se prueba la órtesis en situaciones reales para que el paciente la use en sus actividades diarias. Se evalúa su eficacia, eficiencia y seguridad, además de observar cómo se siente el paciente al usarla y su comodidad. Se realiza un seguimiento continuo del uso de la órtesis durante un tiempo determinado, analizando su impacto en la calidad de vida del paciente, incluyendo mejoras en movilidad, reducción del

dolor y otros indicadores de bienestar. También se registran los comentarios del paciente para realizar ajustes y mejoras si es necesario.

Resultados y discusión

Requerimientos

En la Tabla 1, se detalla el software utilizado para el diseño, la marca de la impresora, el tiempo de impresión empleado y el consumo de filamento PLA, tanto en gramos como en metros, el velcro utilizado y el consumo energético.

Tabla 1. Requerimientos para el desarrollo de una órtesis.

Software para el diseño	Marca de la impresora	Tiempo de impresión (h)	Filamento utilizado (g)	Filamento utilizado (m)	Velcro utilizado (m)	Electricidad (Wh)
Tinkercad	Ender-3Pro	1Día 2Horas, 13 minutos	171g	57.33m	.25m por cada pie	7,341.6W

Fuente: Autores (2024).

Modelado 3D y construcción del prototipo

En la figura 1, se presenta el diseño una órtesis tobillo-pie (AFO), así como el resultado final del desarrollo utilizando la impresión 3D.

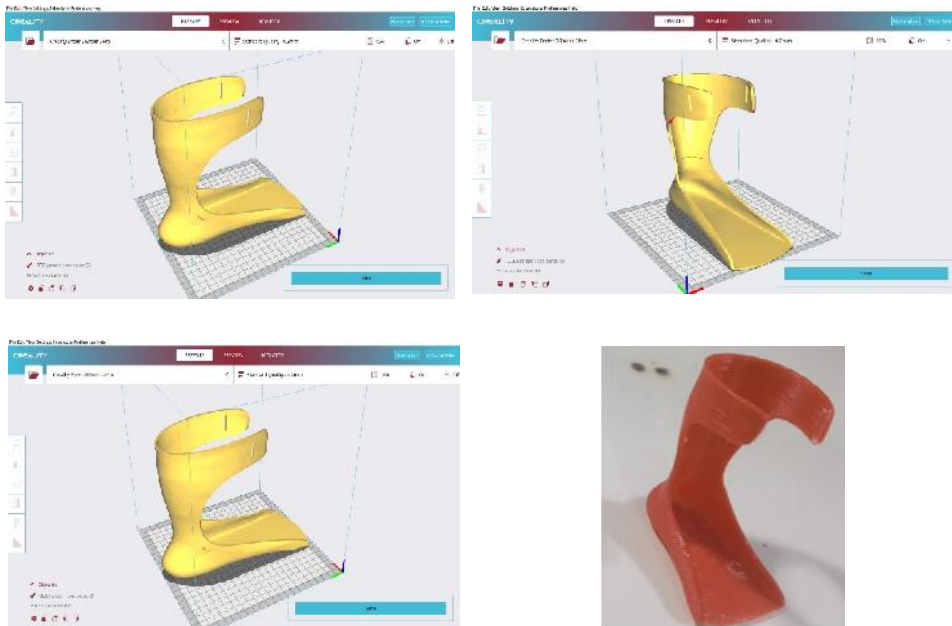


Figura 1. Diseño y desarrollo de una de tobillo-pie.
Fuente: Autores (2024).

Ajustes, pruebas e implementación

La órtesis fue probada al estudiante con poliomielitis y se pudo observar una mayor confianza al caminar y una reducción notable en el dolor y la fatiga muscular. La efectividad de la órtesis se evaluó con pruebas prácticas probándolo de manera directa y proporcionando una evaluación de su desempeño en situaciones reales.

El diseño de la órtesis consiguió una mejora notable en la estabilidad. Las pruebas indicaron que el soporte y los materiales empleados proporcionan un equilibrio óptimo entre rigidez y flexibilidad, ajustándose adecuadamente a los movimientos naturales del tobillo-pie sin comprometer la seguridad.

Conclusiones

El diseño de la órtesis de tobillo-pie presentado ofrece un soporte personalizado que permite mejorar la movilidad, prevenir fracturas, estabilidad, alivio de dolor, independencia y el bienestar general. La órtesis de tobillo-pie demuestra ser una solución prometedora para mejorar la calidad de vida de las personas con problemas de musculoesqueléticas, condiciones crónicas, discapacidades físicas y en la recuperación postoperatoria. También es común entre atletas para prevenir lesiones y mejorar la estabilidad, así como en adultos mayores.

La impresión 3D tiene un gran potencial para desarrollar órtesis personalizadas que mejoran la calidad de vida en casos de lesiones de tobillo y pie. No obstante, es necesario llevar a cabo más investigaciones para optimizar la tecnología, reducir costos y tiempos.

Se espera en la próxima etapa utilizar actuadores neumáticos o motores de corriente continua para la automatización de la órtesis, tal y como se presenta en diversas investigaciones (Park et al., 2014), (Takahashi et al., 2015), (Galle et al., 2013) o motores de corriente continua (Kim et al., 2011), (Ward et al., 2011), (Krebs et al., 2004), (Molledo et al.), (Shorter et al., 2011), (Blaya y Herr, 2004), (Gordon et al., 2006), (Yeung et al., 2018).

A pesar de la etapa temprana de nuestro diseño se puede observar su funcionalidad y el apoyo que puede brindar a la extremidad inferior del cuerpo humano. Se pretenden realizar estudios a mayor escala y a largo plazo para validar estos hallazgos y explorar mejoras adicionales en el diseño.

Referencias Bibliográficas

- Aboutorabi, A., Arazpour, M., Ahmadi Bani, M., Saeedi, H., & Head, J. (2017). Efficacy of ankle foot orthoses types on walking in children with cerebral palsy: A systematic review. *Ann. Phys. Rehabil. Med.*, 60, 393–402. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2017.05.004>
- Attaran, M. (2017). The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Bus. Horiz.*, 60, 677–688. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>
- Autti-Rämö, I., Suoranta, J., Anttila, H., Malmivaara, A., & Mäkelä, M. (2006). Effectiveness of upper and lower limb casting and orthoses in children with cerebral palsy: An overview of review articles. *Am. J. Phys. Med. Rehabil.*, 85, 89–103. https://journals.lww.com/ajpmr/abstract/2006/01000/effectiveness_of_upper_and_lower_limb_casting_and.13.aspx
- Cano-Vicent, A., Tambuwala, M., Hassan, S., Barh, D., Aljabali, A., Birkett, M., . . . Serrano-Aroca, Á. (2021). Fused Deposition Modelling: Current Status, Methodology, Applications and Future Prospects. *Addit. Manuf.*, 47(102378). <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102378>
- Choo, Y., Boudier-Revéret, M., & Chang, M. (2020). 3D printing technology applied to orthosis manufacturing: narrative review. *Ann. Palliat. Med.*, 9, 4262–4270. <https://doi.org/10.21037/apm-20-1185>
- Daryabor, A., Arazpour, M., & Aminian, G. (2018). Effect of Different Designs of Ankle-Foot Orthoses on Gait in Patients with Stroke: A Systematic Review. *Gait Posture*, 62, 268–279. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.03.026>
- Figueiredo, E., Ferreira, G., Maia Moreira, R., Kirkwood, R., & Fetters, L. (2008). Efficacy of Ankle-Foot Orthoses on Gait of Children with Cerebral Palsy: Systematic Review of Literature. *Pediatr. Phys.*, 20, 207–223.

https://journals.lww.com/pedpt/abstract/2008/02030/efficacy_of_ankle_foot_orthoses_on_gait_of.2.aspx

- Firouzeh, P., Sonnenberg, L., Morris, C., & Pritchard-Wiart, L. (2021). Ankle foot orthoses for young children with cerebral palsy: A scoping review. *Disabil. Rehabil*, 43, 726–738. <https://doi.org/10.1080/09638288.2019.1631394>
- Galli, K., & Pelozo, S. (25 de 12 de 2017). Órtesis y Prótesis. Auditoría médica.
- Hull, C. (s.f.). 3D Systems Engineering Company. Retrieved 30 de 08 de 2024, from <https://es.3dsystems.com/quickparts/learning-center/what-is-stl-file#:~:text=El%20formato%20de%20archivo%20STL,un%20modelo%20s%C3%B3lido%20con%20tri%C3%A1ngulos>.
- Jandyal, A., Chaturvedi, I., Wazir, I., Raina, A., & Ul Haq, M. (2022). 3D Printing—A Review of Processes, Materials and Applications in Industry 4.0. *Sustain. . Oper. Comput.*, 3, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.09.004>
- Keller, M., Guebeli, A., Thieringer, F., & Honigmann, P. (2021). In-hospital professional production of patient-specific 3D-printed devices for hand and wrist rehabilitation. *Hand Surg.Rehabil*, 40, 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.hansur.2020.10.016>
- Mazzoli, A., Maida, L., Iasilli, G., & Aversa, A. (2020). 3D printing processes for materials and devices: Some major examples and trends in the medical field and related applications. *Materials*, 13(3), 575.
- Morris, C., Bowers, R., Ross, K., Stevens, P., & Phillips, D. (2011). Orthotic management of cerebral palsy: Recommendations from a consensus conference. *NeuroRehabilitation*, 28, 37–46.
- Ngo, T., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Compos. Parte B Eng.*, 143, 172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
- Ofluo lu, D. B. (2009). Orthotic management in cerebral palsy. *Acta Orthop. Traumatismo.*, 43, 165-172. <https://doi.org/10.3944/AOTT.2009.165>
- Oud, T., Lazzari, E., Gijbsers, H., Gobbo, M., Nollet, F., & Brehm, M. (2021). Effectiveness of 3D-printed orthoses for traumatic and chronic hand conditions: A scoping review. *PLoS ONE*, 16(e0260271). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260271>

- Raj, R., Dixit, A., Łukaszewski, K., Wichniarek, R., Rybarczyk, J., Kuczko, W., & Górski, F. (2022). Numerical and Experimental Mechanical Analysis of Additively Manufactured Ankle–Foot Orthoses. *Materials*, 15(6130). <https://doi.org/10.3390/ma15176130>
- Tardieu, C., Lespargot, A., Tabary, C., & Bret, M. (1988). For how long must the soleus muscle be stretched each day to prevent contracture? *Dev. Med. Child Neurol.*, 30, 3–10. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.1988.tb04720.x>
- Vafadar, A., Guzzomi, F., Rassau, A., & Hayward, K. (2021). Advances in Metal Additive Manufacturing: A Review of Common Processes, Industrial Applications, and Current Challenges. *Appl. Sci.*, 11, 1213. <https://doi.org/10.3390/app11031213>
- Wohlers, T. (2019). 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual .
- Wright, E., & DiBello, S. (2020). Principles of Ankle-Foot Orthosis Prescription in Ambulatory Bilateral Cerebral Palsy. *Phys. Med. Rehabil. Clin. N. Am.*, 31, 69–89. <https://doi.org/10.1016/j.pmr.2019.09.007>
- Zolfagharian, A., Kouzani, A., Khoo, S., Moghadam, A., Gibson, I., & Kaynak, A. (2016). Evolution of 3D printed soft actuators. *Sens. Actuators A Phys.*, 250, 258–272. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.09.028>