

Diseño y Fabricación de Órtesis Personalizadas mediante Escaneo 3D, Diseño Generativo y Manufactura Aditiva

Design and Fabrication of Patient-Specific Orthotic Devices through 3D Scanning,
Generative Design, and Additive Manufacturing

Jacob Sierra Lemus¹, Angélica Rayas Hernández¹, Rafael Guzmán Cabrera²

¹ División de Ciencias e Ingenierías, Campus León, Universidad de Guanajuato.

² Departamento de Ingeniería Eléctrica, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato., j.sierralemus@ugto.mx

Resumen

La personalización de férulas ortopédicas representa un reto tanto clínico como tecnológico, dada la necesidad de un ajuste anatómico y funcional adecuado para cada paciente. El objetivo de este estudio fue diseñar, fabricar y validar una férula personalizada, empleando herramientas digitales para optimizar el proceso en tiempos y costos. Se desarrolló un flujo de trabajo digital basado en escaneo 3D, herramientas de diseño generativo, simulación estructural por elementos finitos e impresión 3D con polímeros biocompatibles. El estudio tuvo un enfoque exploratorio de tipo mixto, documentando el proceso paso a paso y evaluando funcionalidad y aceptación por parte del usuario. El dispositivo obtenido cumplió con los criterios de resistencia estructural y ajuste anatómico, presentando deformaciones máximas de 0.619 mm (PLA) y 0.853 mm (PETG) y factores de seguridad superiores a 4. El tiempo total de fabricación fue de 6 horas y 50 minutos. El proceso optimiza el uso de materia prima, por lo que el costo final del material usado fue de alrededor de \$30 MXN. La férula fue percibida como ligera y cómoda, con preferencia sobre el yeso convencional. Este trabajo demuestra el potencial de los instrumentos digitales e impresión 3D para el diseño y la fabricación de órtesis, promoviendo su transferencia a entornos educativos y hospitalarios.

Palabras clave: Impresión 3D, órtesis, férula, diseño generativo, FEA, FDM.

Abstract

Customizing orthopedic splints poses significant clinical and technological challenges, especially in achieving optimal anatomical and functional adaptation for each patient. This study aimed to design, fabricate, and validate a personalized splint through a digital workflow incorporating 3D scanning, generative design, finite element analysis, and 3D printing with biocompatible polymers. An exploratory mixed-methods approach was used to document each stage and assess both device performance and user acceptance. The resulting splint met structural and anatomical requirements, exhibiting maximum deformations of 0.619 mm (PLA) and 0.853 mm (PETG) with safety factors exceeding 4. Total manufacturing time was 6 hours and 50 minutes, with optimized material use resulting in a final cost of approximately \$30 MXN. The device was perceived as lightweight and comfortable, and users showed a clear preference over conventional plaster casts. These findings highlight the potential of digital tools and 3D printing for efficient, patient-specific orthosis fabrication and support their adoption in educational and clinical environments.

Palabras clave: 3D printing, orthosis, splint, generative design, FEA, FDM.

Introducción

La necesidad de inmovilizar lesiones ha acompañado a la humanidad desde tiempos inmemoriales. Existen registros de férulas rudimentarias en civilizaciones como la egipcia, la griega y la romana, donde ramas, vendas y yesos primitivos eran empleados para estabilizar fracturas y favorecer la recuperación (Rohan Surabhi *et al.*, 2025). Hoy, la atención ortopédica sigue siendo un pilar en la salud pública mundial. Se estima que cada año ocurren millones de fracturas y lesiones que requieren dispositivos de inmovilización, tanto en países desarrollados como en regiones con recursos limitados (World Health Organization, 2024). La función esencial de las férulas, desde su origen histórico hasta la actualidad, ha sido proteger e inmovilizar la zona lesionada para favorecer la recuperación adecuada de los tejidos óseos y blandos (DeYulis & Hinson, 2023).

Dentro de las órtesis se encuentran las férulas de inmovilización total, conocidas en la literatura anglosajona como “cast”. En este artículo, utilizaremos el término “férula” para referirnos específicamente a este tipo de dispositivo. En América Latina, estos dispositivos son comúnmente llamados “yeso” o “escayola” en el lenguaje coloquial. Cabe aclarar que, aunque el término “férula” puede referirse a dispositivos rígidos no circunferenciales (splints) en contextos técnicos, aquí se emplea para denominar los yesos o escayolas que inmovilizan completamente una extremidad.

A pesar de ser de uso común, las férulas frecuentemente se aplican de manera incorrecta. Su confección manual depende de la habilidad y experiencia del médico, lo que puede resultar en aplicaciones deficientes (Althoff & Reeves, 2023). En un estudio pacientes a quienes se les aplicó una férula confeccionada, ésta fue colocada incorrectamente en el 93 % de las ocasiones, con algunas provocando complicaciones en piel y tejido (Abzug *et al.*, 2019). Otro informe reveló que hasta el 23 % de las reconsultas en urgencias pediátricas por inmovilización se debían a férulas aplicadas excesivamente apretadas o sueltas (Scheinberg *et al.*, 2024). El ajuste inadecuado puede generar otros inconvenientes, como roces, transpiración excesiva, mal olor y picazón (Savaş & Aydoğan, 2020; Alotaibi *et al.*, 2025). Estas complicaciones se han documentado en más del 10 % de los casos pediátricos inmovilizados (Torlincasi *et al.*, 2023), y son un factor importante por considerar, ya que las molestias derivadas por mal uso pueden contribuir al abandono o uso irregular de las órtesis y a menor eficacia del tratamiento (Bashir *et al.*, 2022).

Todo lo anterior impulsa la búsqueda de soluciones innovadoras, repetibles y accesibles, y subraya la importancia de producir dispositivos ortopédicos de calidad con ajuste personalizado. La manufactura aditiva (impresión 3D, permite fabricar productos de geometrías complejas y materiales diversos, facilitando la creación de órtesis que superen las deficiencias de los métodos tradicionales.

En los últimos años, la validación clínica de dispositivos ortopédicos impresos en 3D ha cobrado especial relevancia. Estudios recientes demuestran que la manufactura aditiva reduce los tiempos de fabricación, con satisfacción y aceptación igual o superior a la de dispositivos convencionales, remarcando además una mejor recepción por el “factor de estilo” de los dispositivos hechos con impresión 3D (Oud, Kerkum, *et al.*, 2021; Patel y Gohil, 2022; Bashir *et al.*, 2022).

Además, la literatura técnica reciente respalda la eficacia y funcionalidad de las férulas impresas en 3D. Se ha demostrado en varios estudios que las férulas hechas por este método soportan ciclos de fuerza habituales en la clínica, reportan iguales o mejores resultados de la rehabilitación, mejoran la aceptación e incrementan adherencia al tratamiento (Popescu *et al.* 2023; Glazer *et al.* 2025; Xu *et al.* 2025). Otros equipos como los de Umer *et al.* (2023), Amin y Abu (2024), Sarmiento Anchundia & Salazar Loor (2022) y Sachin *et al.* (2025) Aportan criterios de optimización, integración, simulación y selección de materiales idóneos.

México tiene un sistema de salud mixto, con instituciones públicas como el IMSS, ISSSTE, IMSS-Bienestar y los servicios estatales cubriendo a la mayoría de la población, mientras que una minoría recurre al sector privado para atención especializada o complementaria. El gasto público en salud, que en 2023 (CIEP, 2023) representó aproximadamente el 2.8% del PIB, está muy por debajo del 6% recomendado por la OMS, lo que limita la inversión en tecnologías avanzadas, como la impresión 3D para dispositivos ortopédicos personalizados. A pesar de ellos, el panorama a 2025 es alentador. Las impresoras 3D de escritorio son cada vez más asequibles y fáciles de utilizar; materiales como PLA y PETG están ampliamente disponibles, y existen numerosos cursos en línea que facilitan su aprendizaje y adopción. Gracias a esta infraestructura

emergente, varias universidades y hospitales del país ya han comenzado a fabricar férulas personalizadas como alternativa al yeso tradicional (Xolalpa-González *et al.*, 2024; Ramirez-Vázquez *et al.*, 2024).

La fabricación aditiva, en particular la impresión 3D por deposición de filamento fundido (FDM), permite la construcción incremental de dispositivos ortopédicos personalizados mediante la extrusión de polímeros termoplásticos capa por capa. Esta técnica supera las limitaciones de los métodos sustractivos tradicionales (tallado, fresado), posibilitando la creación de geometrías complejas —como entramados y cavidades internas— sin necesidad de ensamblajes adicionales. En el contexto ortopédico, esta capacidad es crítica para fabricar férulas ligeras, ventiladas y adaptadas a la anatomía del paciente, mejorando el confort y reduciendo el peso respecto a los yesos convencionales. Una vez generado el modelo digital personalizado mediante escaneo 3D, la impresión del dispositivo puede completarse en cuestión de horas, optimizando los tiempos de entrega y facilitando la iteración en el diseño. Además, la impresión FDM minimiza el desperdicio de material y reduce los costos asociados, ya que solo se utiliza la cantidad necesaria para la pieza final y sus soportes.

El diseño generativo es un enfoque computacional en el que, a partir de restricciones definidas, algoritmos de inteligencia artificial exploran automáticamente un espacio de soluciones viables. Con estos parámetros fijos, el programa presenta opciones que resuelven el problema planteado, por lo que solo resta comparar estas opciones y seleccionar la que mejor cumpla los requerimientos funcionales y de fabricación. En este trabajo tanto el diseño generativo como el FEA se llevaron a cabo con Fusion360 de la suite de Autodesk. A diferencia de la optimización topológica tradicional, que parte de un modelo inicial, el diseño generativo puede crear nuevas topologías sin requerir un diseño de partida. Los parámetros críticos que deben especificarse incluyen: zonas de conservación (interfaz con el cuerpo o dispositivos), zonas de exclusión (espacios libres para movimiento o acceso), condiciones de carga (fuerzas, apoyos, restricciones), propiedades del material (límite elástico, módulo de Young), y objetivos de optimización (minimización de masa o maximización de rigidez con un factor de seguridad definido).

El análisis por elementos finitos (FEA) es una técnica de simulación computacional útil para realizar una validación previa del desempeño mecánico de las férulas generadas digitalmente. Fundamentalmente, el FEA fragmenta el modelo tridimensional en elementos discretos, lo que vuelve mucho más manejable el proceso de solución de las ecuaciones de la mecánica del material. Así, es posible identificar la distribución de tensiones, deformaciones y desplazamientos bajo condiciones de carga simuladas. Las métricas fundamentales para validar un diseño son la tensión máxima (comparada contra el límite elástico del material), el desplazamiento máximo (relacionado con la funcionalidad e inmovilización), y el factor de seguridad global (FS), que debe cumplir con los márgenes establecidos clínicamente (por ejemplo, $FS \geq 2$). De igual forma, se revisan mapas de distribución de tensiones para evitar concentraciones locales que pudieran originar fracturas o fallas prematuras.

Los polímeros más utilizados para férulas impresas en 3D son el ácido poliláctico (PLA) y el tereftalato de polietileno glicol (PETG). El PLA destaca por su alta rigidez y buena precisión dimensional y facilidad de impresión, aunque es más frágil y menos resistente al calor. El PETG, por su parte, ofrece mayor tenacidad, mayor elongación antes de romper ($>10\text{--}20\%$), y mejor tolerancia a temperaturas elevadas ($75\text{--}80^\circ\text{C}$), lo que le permite soportar condiciones de uso más exigentes y repetidas cargas cíclicas. Ambos materiales presentan adecuada biocompatibilidad para aplicaciones externas y bajo impacto ambiental. La selección del material depende de la rigidez y resistencia requeridas, la exposición térmica esperada, la durabilidad bajo cargas repetidas, y las consideraciones de biocompatibilidad y seguridad.

Metodología

Se realizó un estudio exploratorio con enfoque mixto (cuantitativo-cualitativo), orientado a documentar y analizar detalladamente el flujo de trabajo digital para la elaboración de férulas ortopédicas personalizadas mediante manufactura aditiva, utilizando escaneo 3D, modelado generativo, simulación estructural (FEA) e impresión 3D con materiales poliméricos comerciales. El objetivo fue demostrar la factibilidad técnica y el potencial de este enfoque para su futura transferencia y divulgación en entornos clínicos y académicos.

Escaneo Tridimensional

La adquisición del modelo anatómico se realizó mediante escaneo 3D de la zona de la muñeca con un escáner 3DMaker Pro SEAL, seleccionando la región anatómica correspondiente al antebrazo distal y la articulación radiocarpiana.

La segmentación de la geometría digital consideró la delimitación de zonas de conservación (circunferencias en antebrazo y proximal a los dedos), orientadas a garantizar la inmovilización de la articulación y prevenir torsión, flexión y extensión indeseadas de la muñeca (Figura 1).

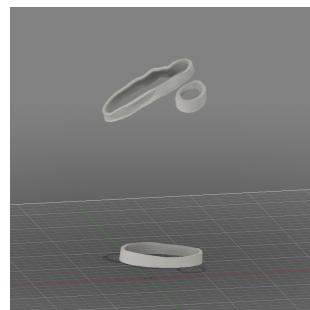


Figura 1. Segmentación de la malla anatómica en anillos de restricción (zonas de conservación) se muestran los anillos correspondientes a las regiones de soporte en el antebrazo y mano, generados en el software CAD como base para la definición de restricciones geométricas en el diseño generativo de la férula ortopédica.

Diseño Generativo

El modelo limpio y segmentado se importó a Fusion 360 (Autodesk, EE. UU.) para la configuración del entorno de diseño generativo. Se definieron zonas verdes (material requerido), zonas rojas (material de obstáculo), anclajes en las áreas de conservación y restricciones de movimiento correspondientes a la base de la férula (Figura 2).



Figura 2. Identificación y segmentación de zonas funcionales en el modelo anatómico digital: de izquierda a derecha, visualización de la malla original, definición de regiones de obstáculo (rojo), geometría de partida (amarillo) y regiones de conservación (verde), empleadas como geometrías para la configuración del diseño generativo en el software CAD.

Se establecieron condiciones de frontera mediante la aplicación de fuerzas de 50 N en diversos casos de carga. Se consideraron casos de flexión, extensión, torsión en sentido de las manecillas del reloj y en sentido contrario a las manecillas del reloj, estos últimos con una magnitud de 5 Nm.

Simulación por Elementos Finitos (FEA)

Sobre el diseño seleccionado se realizó análisis por elementos finitos empleando el módulo integrado de Fusion 360. El mallado automático utilizó elementos de tamaño de 4 mm. Las condiciones de frontera incluyeron la restricción total de la base de la férula y aplicación de fuerzas de 50 N en diversos casos de carga (Figura 3). Se consideraron nuevamente casos de flexión, extensión, torsión en sentido de las manecillas del reloj y en sentido contrario a las manecillas del reloj.

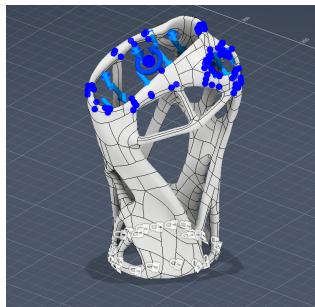


Figura 3. Configuración de casos de carga en el modelo de férula ortopédica: se muestran las áreas de aplicación de fuerzas (marcadas en azul) y las condiciones de restricción, establecidas en el entorno de simulación.

Las propiedades mecánicas asignadas a los materiales “Printed PLA” y “Printed PETG” se obtuvieron de la base de datos pública Fusion360PrinterMaterials, considerando módulo elástico, límite elástico y coeficiente de Poisson específicos de cada material. El análisis permitió identificar la distribución de tensiones, localización de máximos de deformación y puntos débiles estructurales. Las variables registradas fueron la deformación máxima obtenida en el análisis FEA, el estrés máximo, el factor de seguridad máximo logrado, los tiempos registrados para cada etapa del proceso y la estimación de costo de material utilizado. Dado el carácter exploratorio del estudio, los resultados numéricos específicos a este trabajo deben tomarse solo como una exploración de la metodología. Para producir una férula aplicable a un auténtico contexto clínico, las etapas del proceso pertinentes deben estar asesoradas por un profesional de la salud.

Fabricación aditiva (impresión 3D)

La férula final se fabricó en PETG utilizando una impresora Bambulab P1S, con los siguientes parámetros del programa Bambu Studio:

- Perfil “0.16 óptimal”
- Altura de capa: 0.16 mm
- Flujo volumétrico máximo: 10 mm³/s
- Perímetros: 4
- Densidad de relleno: Patrón giroide a 30%

Validación funcional preliminar

La férula se fijó al usuario mediante un broche personalizado y cinchos plásticos. Se utilizó de forma continua durante 12 horas en condiciones cotidianas, evaluando ajuste y comodidad mediante observación visual directa, inspección de tolerancias y movilidad, así como retroalimentación espontánea del usuario. No se emplearon cuestionarios estructurados ni instrumentos cuantitativos estandarizados de satisfacción.

Resultados

El escaneo y la limpieza de la malla STL (eliminación de ruido, reparación de huecos y suavizado de superficies) se completaron en aproximadamente 15 minutos utilizando el software Meshmixer (Autodesk, EE.UU.) (Figura 4).

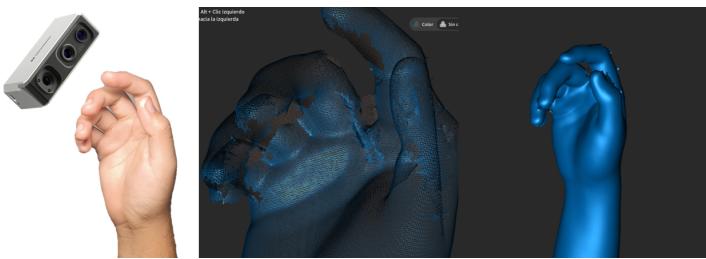


Figura 4. Secuencia del proceso de adquisición y procesamiento digital de la mano y muñeca. A la izquierda, ilustración del escáner 3D con el escáner y la mano del paciente; al centro, visualización de la nube de puntos generada tras la captura inicial; y a la derecha, malla digital limpia y suavizada lista para segmentación anatómica en Meshmixer.

El diseño generativo se ejecutó en la nube hasta la convergencia, con una duración de cálculo total menor a 15 minutos (Figura 5).

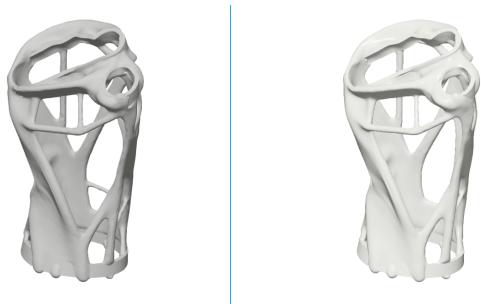


Figura 5. Ejemplo de soluciones topológicas generadas. Se muestran dos configuraciones geométricas candidatas para la férula ortopédica a partir de las restricciones y cargas definidas. Estas variantes fueron evaluadas por criterios de rigidez, factor de seguridad y viabilidad de fabricación.

La selección final de la topología se basó en el cumplimiento de un factor de seguridad mínimo de 2 (según simulación FEA), priorizando geometrías con grosor robusto y minimización de zonas de alta concentración de esfuerzo. Posteriormente, se exportó el resultado nuevamente a Meshmixer para su limpieza y engrosamiento de regiones delgadas con el objetivo de facilitar la impresión.

Se obtuvieron los resultados del análisis por elementos finitos (FEA) para los materiales PLA y PETG, evaluando el comportamiento de la férula bajo diferentes condiciones de carga. Las deformaciones máximas registradas en movimiento de flexión fueron de 0.469 mm (PLA) y 0.646 mm (PETG) (Figura 7), y en movimiento de extensión, de 0.619 mm (PLA) y 0.853 mm (PETG) (Figura 6).

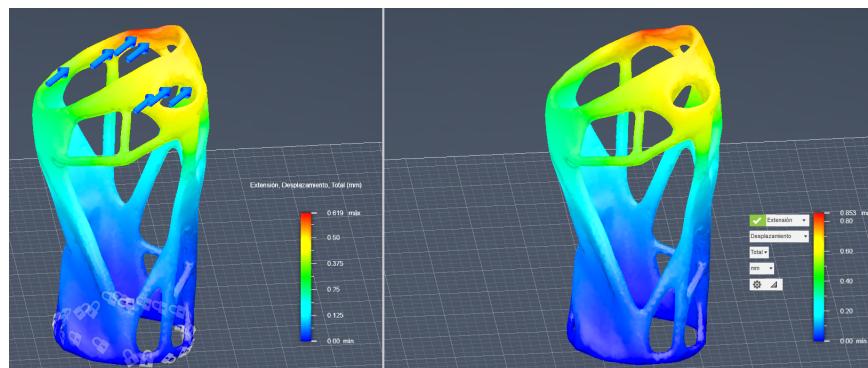


Figura 6. Desplazamiento máximo (mm) en la férula ortopédica simulada bajo condición de extensión: a la izquierda, resultados para PLA; a la derecha, para PETG. Se observa un mayor desplazamiento en la región posterior superior.

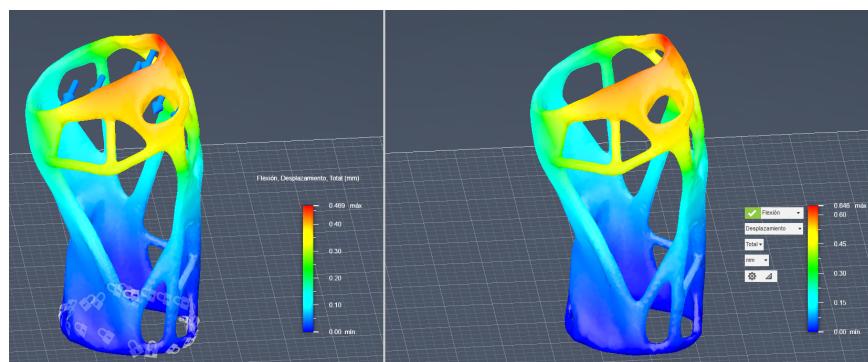


Figura 7. Desplazamiento máximo (mm) en la férula ortopédica simulada bajo condición de flexión: a la izquierda, resultados para PLA; a la derecha, para PETG. Se observa un mayor desplazamiento en la región anterior superior.

En los casos de momento en sentido horario y antihorario, las deformaciones estuvieron en el orden de los micrómetros y se consideraron no relevantes para los propósitos de este trabajo.

El factor de seguridad mínimo alcanzado en flexión fue de 6.583 (PLA) y 5.62 (PETG); en extensión, de 4.858 (PLA) y 4.148 (PETG). Para los casos de momento horario y antihorario, el factor de seguridad fue 15 en ambos materiales, alcanzando el límite de la simulación. Los valores máximos de estrés fueron 4.092 MPa para ambos materiales en flexión, 5.545 MPa en extensión, y 0.006 MPa para los momentos de torsión (Figura 8). El PETG mostró una mayor ductilidad en comparación con el PLA. La distribución del estrés no evidenció regiones de concentración crítica y ambas simulaciones cumplieron con los criterios de diseño establecidos ($FS \geq 2$).

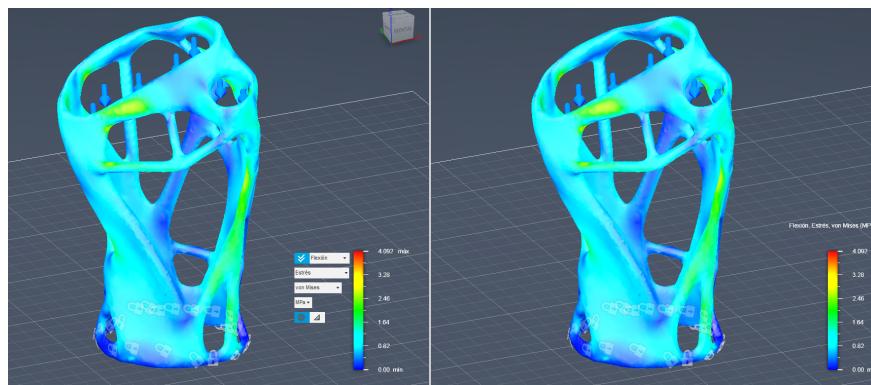


Figura 8. Distribución de estrés de von Mises (MPa) en la férula ortopédica simulada bajo condición de flexión: a la izquierda, resultados para PLA; a la derecha, para PETG. Se observa una ligera concentración de esfuerzo en las regiones amarillas y verdes, con adecuada dispersión del estrés en el resto de la estructura.

En cuanto a la fabricación aditiva, el peso final de la férula impresa fue de 99.34 g, con un consumo total de 112.07 g de PETG, incluyendo soportes. El tiempo total de impresión fue de 6 horas y 20 minutos. No se presentaron defectos, errores ni retrabajos, y el acabado superficial obtenido fue satisfactorio. No se reportaron dificultades técnicas durante la impresión ni en el post-procesado. El costo estimado de la férula, considerando un precio de \$280 MXN por kilogramo de PETG, fue de aproximadamente \$30 MXN.

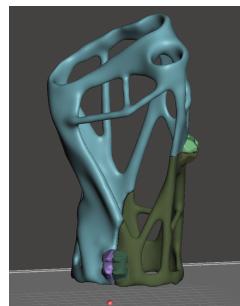


Figura 9. Modelo digital final de la férula ortopédica, tras la etapa de limpieza y engrosamiento en software CAD. Se aprecian las zonas reforzadas y los detalles anatómicos preservados. Se añadieron broches de fijación antes de su exportación al programa de corte para la impresión.

Durante la evaluación funcional, la férula demostró un ajuste anatómico óptimo. No causó puntos de presión ni molestias, incluso después de 12 horas de uso ininterrumpido. La percibieron liviana, cómoda y atractiva a la vista, además que restringió bien el movimiento de torsión, flexión y extensión conforme al diseño. El usuario reportó una ligera sudoración en la región palmar, pero remarcó su preferencia a este diseño sobre las férulas de yeso, añadiendo que es de su agrado poder ducharse con ella. No fue necesario realizar ajustes ni modificaciones posteriores (Figura 10).



Figura 10. Vista frontal de la férula finalizada, instalada sobre la mano del usuario.

Discusión

Los hallazgos de este estudio sugieren que la integración de tecnologías digitales representa una estrategia viable para el desarrollo de órtesis ortopédicas personalizadas. A diferencia de estudios previos centrados en contextos hospitalarios de alta especialidad y materiales patentados de muy alto costo, el presente trabajo se distingue por su enfoque estructurado integrando herramientas digitales, lo cual facilita la transferencia tecnológica laboratorios educativos y posiblemente a la clínica.

La aceptación positiva por parte del usuario refuerza la importancia del diseño centrado en el paciente y la colaboración interdisciplinaria, que son factores poco explorados en muchos trabajos previos. En este sentido, el estudio aporta evidencia sobre el valor de integrar la perspectiva clínica desde la fase de diseño para adaptar cada dispositivo a las necesidades reales del paciente. No obstante, las limitaciones del trabajo, como el estudio de un solo caso y la falta de pruebas clínicas de largo plazo, restringen la generalización de los resultados. Es fundamental que futuras investigaciones consideren tanto el escalamiento del tamaño muestral como la evaluación funcional y clínica sostenida en el tiempo.

Por otro lado, se identifica la necesidad de avanzar hacia el uso de materiales más flexibles y resistentes, así como de automatizar aún más el flujo digital, para reducir la dependencia de habilidades técnicas especializadas. Estas líneas pueden ampliar el impacto social y clínico de la metodología propuesta.

Conclusiones

Este estudio permitió demostrar la factibilidad de implementar un proceso digital completo para el diseño y fabricación de férulas ortopédicas personalizadas. El escaneo 3D fue identificado como el principal desafío técnico, especialmente para extremidades de gran tamaño, debido a las limitaciones de los dispositivos disponibles y a los altos requerimientos de procesamiento de datos.

El modelado y simulación asistidos por herramientas en la nube facilitaron la optimización estructural y redujeron los tiempos de desarrollo. Se observó que materiales como PLA y PETG cumplen con los requerimientos mínimos para férulas temporales, aunque el PETG ofrece mayor ductilidad, lo que podría beneficiar el confort del usuario.

El diseño generativo y la simulación permitieron obtener órtesis ligeras y anatómicamente ajustadas. El proceso de fabricación resultó accesible en términos de costo y reproducibilidad, y la aceptación por parte del usuario fue positiva, sin necesidad de ajustes posteriores.

Se concluye que la combinación de tecnologías digitales puede contribuir significativamente a la personalización y accesibilidad de órtesis en contextos clínicos y educativos. Se recomienda explorar materiales más flexibles, como TPU, y fortalecer la colaboración interdisciplinaria para adaptar los diseños a las necesidades terapéuticas de cada paciente.

Finalmente, se sugiere validar estos hallazgos en estudios con muestras más amplias y en aplicaciones clínicas diversas, así como continuar el desarrollo de herramientas y metodologías que simplifiquen el flujo de trabajo digital y mejoren la integración con la práctica clínica.

Referencias

- Abzug, J. M., Schwartz, B. S., & Johnson, A. J. (2019). Assessment of Splints Applied for Pediatric Fractures in an Emergency Department/Urgent Care Environment. *Journal of Pediatric Orthopedics*, 39(2), 76–84. <https://doi.org/10.1097/BPO.0000000000000932>
- Alotaibi, M. N., Aldaraani, L. G. A., Altala, A. S., Alqurashi, A. A., Alateeq, I. S., Alkhamisi, A. A., Allehaimeed, I. S., Jad, A. Y., Alosaimi, H., Alharbi, B. H., Alenezi, A., Almutairi, A. Z., Alroudhan, F. K., & Alqarni, M. M. (2025). Comparing the Outcomes of Cast Immobilization with and Without K-Wire Fixation for Displaced Distal Radius Fractures in the Pediatric Population: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Medicina (Kaunas, Lithuania)*, 61(5), 852. <https://doi.org/10.3390/medicina61050852>
- Althoff, A. D., & Reeves, R. A. (2023, August 6). Splinting. PubMed; StatPearls Publishing. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK557673/>
- Amin, M. R., & Abu, M. (2024). Design and Characterization of Additively Manufactured Patient-Specific Wrist Hand Orthosis. *Engineering Proceedings*, 69–69. <https://doi.org/10.3390/engproc2024076069>
- Bashir, A. Z., Dinkel, D. M., Pipinos, I. I., Johanning, J. M., & Myers, S. A. (2022). Patient Compliance With Wearing Lower Limb Assistive Devices: A Scoping Review. *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*, 45(2), 114–126. <https://doi.org/10.1016/j.jmpt.2022.04.003>
- Choo, Y. J., Boudier-Revéret, M., & Chang, M. C. (2020). 3D printing technology applied to orthosis manufacturing: narrative review. *Annals of Palliative Medicine*, 9(6), 4262–4270. <https://doi.org/10.21037/apm-20-1185>
- CIEP. (2025, October 10). Gasto en salud y Objetivos de Desarrollo Sostenible. CIEP. <https://ciep.mx/gasto-en-salud-y-objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Cong, B., & Zhang, H. (2025). Innovative 3D printing technologies and advanced materials revolutionizing orthopedic surgery: current applications and future directions. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2025.1542179>
- DeYulis, M., & Hinson, J. W. (2023, August 14). Joint Immobilization. PubMed; StatPearls Publishing. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK557703/>
- Ekanayake, C., Gamage, J. C. P. H., Mendis, P. A., & Weerasinghe, P. (2023). Revolution in orthopedic immobilization materials: A comprehensive review. *Heliyon*, 9(3), e13640. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13640>
- Glazer, C., Oravitan, M., Pantea, C., Stanila, A. M., Jurjiu, N.-A., Totok, A., Marghitas, M. P., & Avram, C. (2025). 3D-printed orthoses vs. traditional plaster cast: a comparative clinical study. *Balneo and PRM Research Journal*, 16(1), 785–785. <https://doi.org/10.12680/balneo.2025.785>
- Nguyen, S., McDowell, M., & Schlechter, J. (2016). Casting: Pearls and pitfalls learned while caring for children's fractures. *World Journal of Orthopedics*, 7(9), 539. <https://doi.org/10.5312/wjo.v7.i9.539>
- Oud, T. A. M., Lazzari, E., Gijsbers, H. J. H., Gobbo, M., Nollet, F., & Brehm, M. A. (2021). Effectiveness of 3D-printed orthoses for traumatic and chronic hand conditions: A scoping review. *PLOS ONE*, 16(11), e0260271. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260271>
- Oud, T., Kerkum, Y., Groot, P., Gijsbers, H., Nollet, F., & Brehm, M. (2021). Production time and user satisfaction of 3-dimensional printed orthoses for chronic hand conditions compared with conventional orthoses: A prospective case series. *Journal of Rehabilitation Medicine – Clinical Communications*, 4(1), jrmcc00049. <https://doi.org/10.2340/20030711-1000048>
- Patel, P., & Gohil, P. (2022). Custom orthotics development process based on additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 59(3), A52–A63. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.858>
- Popescu, D. M., Baciu, F., Vlasceanu, D., Marinescu, R., & Laptoiu, D. (2023). Investigations on the Fatigue Behavior of 3D-Printed and Thermoformed Polylactic Acid Wrist–Hand Orthoses. *Polymers*, 15(12), 2737–2737. <https://doi.org/10.3390/polym15122737>

Ramirez-Vázquez, J. C., Rivera-García, G. E., Cervantes-López, M. J., Llanes-Castillo, A., & Cruz-Casados, J. (2024). Diseño y desarrollo de una ótesis tobillo-pie (AFO) mediante impresión 3D. *Revista Interdisciplinaria de Ingeniería Sustentable y Desarrollo Social*, 10(1), 257–267.
<https://doi.org/10.63728/riisds.v10i1.45>

Sachin, B., Rao, C. M., Kumar, N. K., Prasad, C. D., Kumar, A., None Ravikiran, Manjunath, H. N., Aravind, S. L., & Saravana Bavan. (2025). Design and fabrication strategies for enhancing patient comfort and sustainability through PETG based 3D-printed orthoses. *Progress in Additive Manufacturing*.
<https://doi.org/10.1007/s40964-024-00945-x>

Sarmiento Anchundia, J., & Salazar Loor, R. (2022). Selección de materiales para el diseño de ortesis aplicando Métodos Multicriterios, Simulación y Optimización Topológica. *Revista InGenio*, 5(2), 16–30. <https://doi.org/10.18779/ingenio.v5i2.518>

Savaş, S., & Aydoğán, Ç. (2020). Factors affecting orthosis adherence following acute traumatic hand tendon repairs: A prospective cohort study. *Journal of Hand Therapy*, 33(1).
<https://doi.org/10.1016/j.jht.2020.10.005>

Scheinberg, M., Nihalani, S., Mehta, L., Shah, A., Scheinberg, M., Nihalani, S., Mehta, L., & Shah, A. (2024). Evolution in Casting Techniques: A Narrative Review of Casting Methods, Techniques, and Innovation. *Cureus*, 16(2). <https://doi.org/10.7759/cureus.53454>

Surabhi, R., Surabhi, A., & Ganti, L. (2025). The Orthopedic Splint and Its Origins. *Orthopedic Reviews*, 17. <https://doi.org/10.52965/001c.137673>

Torlincasi, A. M., Lopez, R. A., & Waseem, M. (2023, January 16). Acute Compartment Syndrome. NIH.gov; StatPearls Publishing. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK448124/>

Umer, U., Syed Hammad Mian, Khaja Moiduddin, & Hisham Alkhalefah. (2023). Exploring Orthosis Designs for 3D Printing Applying the Finite Element Approach: Study of Different Materials and Loading Conditions. *JDR*, 2(1), 85-97. <https://doi.org/10.57197/jdr-2023-0011>

World Health Organization (WHO). (2024, September 25). Fracturas por fragilidad. Who.int; World Health Organization: WHO. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/fragility-fractures>

Xolalpa-González, J. A., Salinas-Sánchez, I., Santos-Borraz, L. A., & Arenas-Vargas, S. (2024). Innovación tecnológica en la enseñanza de ótesis y prótesis. Caso en la ENES Juriquilla de la UNAM. *Revista Mexicana de Educación Médica*, 11(2). <https://doi.org/10.24875/rmem.24000011>

Xu, C., Wang, L., Zhang, M., Li, X., & Li, K. (2025). A clinical study on the application of three-dimensionally printed splints combined with finite element analysis in paediatric distal radius fractures. *Frontiers in Pediatrics*, 13. <https://doi.org/10.3389/fped.2025.1559762>