



# La manufactura aditiva y los materiales compuestos en el diseño de prótesis transtibiales de uso deportivo

## *Additive manufacturing and materials compounds in the design of transtibial prostheses for sports use*

Rosel Solís Manuel Javier <sup>1,2</sup>, Molina Salazar Javier <sup>1</sup>, Paz González Juan Antonio <sup>2</sup>, Ruiz Ochoa Juan Antonio <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California, Tijuana, Baja California, México.

**Autor de correspondencia:** Manuel Javier Rosel Solís, Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California, Tijuana, Baja California, México. E-mail: [mrosel@uabc.edu.mx](mailto:mrosel@uabc.edu.mx). ORCID: 0000-0002-3800-7094.

**Recibido:** 1 de Julio del 2017

**Aceptado:** 3 de Febrero del 2018

**Publicado:** 26 de Septiembre del 2018

**Resumen.** - *En el presente trabajo se revisa el estado del arte que guarda la manufactura aditiva en cuanto a sus avances en la mejora de sus materiales, específicamente, a través de la incorporación de materiales compuestos, como la fibra de carbono. Además, se hace una revisión de los procesos convencionales de manufactura de materiales compuestos y se analiza el grado de aplicación de la manufactura aditiva y los materiales compuestos en la manufactura de prótesis transtibiales protésicas y de uso deportivo, con el objetivo de identificar oportunidades de mejora.*

**Palabras clave:** Modelado por deposición fundida; Materiales compuestos; Manufactura; Prótesis.

**Abstract.** - *In the present work, the state of the art that preserves the additive manufacturing is reviewed in terms of the advances in the improvement of its materials, specifically, through the incorporation of composite materials, such as carbon fiber. In addition, a review of the conventional processes of the manufacture of composites and analyzes the degree of the application of the manufacture and the composite materials in the manufacture of the transtibial prosthesis for sport use, with the objective of identifying improvement opportunities.*

**Keywords:** Fused modeling deposition; Composite materials; Manufacturing; Prostheses.



## 1. Introducción

La manufactura aditiva es un proceso que presenta grandes ventajas para la fabricación de productos personalizados y producción a baja escala [1], reduciendo los ciclos de diseño [2]. La aplicación de este proceso está dirigida a diversas áreas, teniéndose especial énfasis en el área médica, por ejemplo, en la manufactura de prótesis y órtesis humanas [3] que requieren de un alto grado de personalización para la adecuada adaptación al paciente por lo que la manufactura aditiva representa una buena alternativa [4]. Sin embargo, los materiales utilizados para la impresión tridimensional presentan propiedades mecánicas que limitan su uso [5] por lo cual es necesario buscar la mejora de dichos materiales, a través de la combinación con otros de mayor resistencia.

Los materiales compuestos a base de fibra de carbono presentan características de mayor resistencia y menor peso, comparados con materiales metálicos, que pueden ser aplicadas a la manufactura de prótesis [6]. Para su aplicación, estos materiales deben ser analizados para conocer sus características y así poder identificar las posibilidades de mejora, así como la posibilidad de ser usados en los nuevos procesos como la manufactura aditiva.

## 2. Metodología

Esta investigación se enfocó en la búsqueda de información sobre tres principales tópicos: la manufactura aditiva, los materiales compuestos y la manufactura de prótesis, con el objetivo principal de encontrar literatura que relacionara estos tópicos con el fin de identificar oportunidades de mejora en el proceso de fabricación de una prótesis transtibial de uso deportivo.

Para la búsqueda de información se consultaron las bases de datos de Elsevier, Springer, Scopus y Emerald y se utilizaron las siguientes palabras

clave: Manufactura aditiva, materiales compuestos, prótesis, procesos, abs, y modelado por deposición fundida.

## 3. Manufactura Aditiva

La manufactura aditiva es un proceso que utiliza información de modelos tridimensionales para construir objetos capa por capa a diferencia de los procesos de maquinado convencional [7]. Con base en el análisis del impacto social [8], económico [9] y ambiental [10] que en los últimos años se ha realizado, este proceso se considera un desarrollo tecnológico trascendente impulsado por la disminución de costos de los equipos de impresión, que la hace accesible para usos industriales y domésticos [11].

Son varias las técnicas de fabricación de prototipos rápidos a base de polímeros y resinas de las cuales se pueden obtener piezas funcionales para su uso en la revisión y verificación de diseños. En la Figura 1 se muestran algunas que incluyen: la estereolitografía o SLA, por sus siglas en inglés, que utiliza un polímero fotosensible [12]; la manufactura de objetos por laminado (LOM) colocando y formando láminas de plástico [13]; la fusión en polvo sinterización selectiva por láser (SLS) que usa en su proceso de polímeros en polvo que son fundidos con láser [14]; la deposición de aglutinante (BJ) en la cual se inyecta a las capas de plástico en polvo un líquido que lo endurece [15]. Otro proceso es por chorro de material (MJ) en el que a través de una boquilla extrusora se depositan partículas de material líquido que se solidifican al tener contacto con las capas antes depositadas [16]; la deposición directa de energía (DED) es otro proceso en el que se dirige una luz de láser directamente a una pequeña región en un sustrato de polvo metálico para fundirlo [17], y por último el modelado por deposición de plástico fundido (FDM) [18]. Este último método, mostrado en Figura 2, es de los más utilizados ya que tiene



como ventajas bajo costo, desperdicio y cambio rápido de materiales y fácil manejo [19].

El modelado por deposición de plástico fundido (FDM) requiere de un cabezal con una o dos boquillas extrusoras que funden filamento plástico y lo depositan sobre una base de plástico, formando capas de material. Para asegurar la adherencia y rápida solidificación de cada capa de material con la capa anterior, la cabeza

extrusora calienta el material 0.5°C por encima de su punto de fusión. A esta temperatura, el plástico se solidifica en solo 0.1 s y queda adherido a la capa anterior. Los equipos más recientes combinan dos tipos de materiales, uno para la construcción del modelo y otro para el soporte del modelo. Este material de soporte es frágil y quebradizo, permitiendo que sea retirado al terminar la fabricación [20].

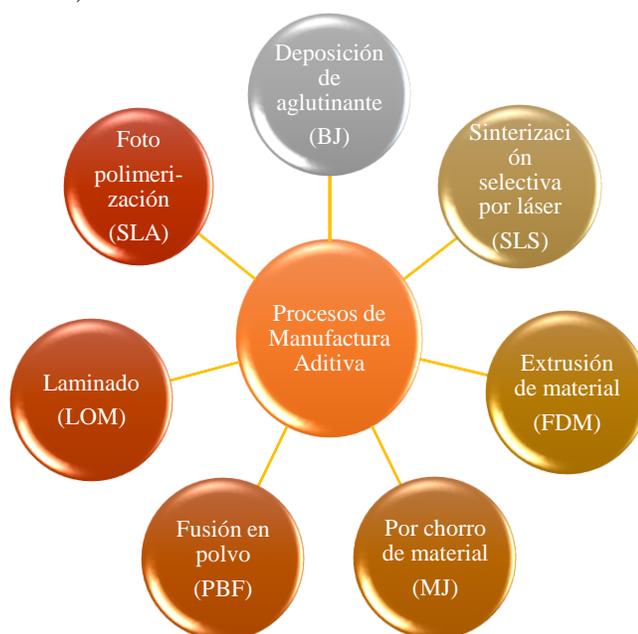


Figura 1. Clasificación de procesos de manufactura aditiva según la norma ISO/ASTM 529000:2015 [8].

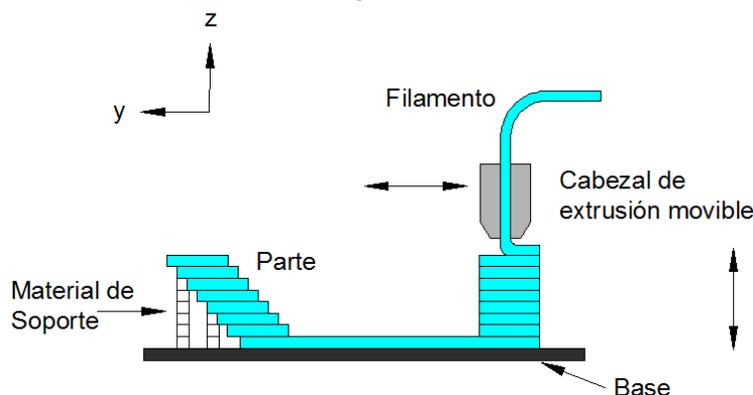


Figura 2. Modelado por deposición de plástico fundido (FDM) [20].

#### a) Ejemplos de aplicación



Se han estudiado oportunidades de aplicación en diferentes áreas, por ejemplo, en el campo de la industria de la construcción, se pretende su utilización para la fabricación de componentes de estructuras de gran escala [21]. Thompson (2016) menciona aplicaciones de manufactura aditiva en la fabricación de implantes médicos, órtesis, prótesis humanas. Se ha repostado también su uso potencial en el campo de la biotecnología y ciencias químicas [22] para la construcción de tejidos y huesos humanos utilizando materiales biocompatibles [23]. En el diseño de moldes es posible obtener en menor tiempo los modelos utilizados para la fabricación de las cavidades de los moldes para fundición [24]. En la industria manufacturera se ha aplicado en la fabricación de herramientas y producción de bajo volumen, en menor tiempo y bajo costo [25]. En la industria aeroespacial, ha ayudado al estudio de la aerodinámica a través de la construcción de modelos a escala para su análisis y mejora en túnel de viento, acortado los ciclos de diseño de nuevas aeronaves [26].

#### b) Ventajas

Una de las ventajas de la manufactura aditiva en la de construir partes en diferentes colores y grados de acabado superficial. Además, la fabricación de prototipos rápidos no requiere herramientas especiales y es flexible en la construcción de partes con geometrías complejas [24] aunque se necesita exactitud para obtener las dimensiones de un objeto para digitalizarlo en un programa de diseño asistido por computadora [27].

#### c) Limitaciones

El potencial que posee la manufactura aditiva es amplio, sin embargo, es necesario considerar sus limitaciones, tales como las posibles desviaciones que se pueden presentar al discretizar un modelo tridimensional, para seccionarlo en capas que posteriormente servirán

de base para la deposición del material. La dirección de orientación del modelo también puede afectar el resultado final [1]. Otra limitación actual, es el costo de los materiales que ofrecen los proveedores que fabrican los equipos de manufactura aditiva, lo cual hace menos atractivo el uso de este proceso; para ello se han desarrollado formas para la obtención de materias primas que sean más económicas, tal es el caso de la obtención de filamento plástico a base de acrílico nitrilo butadieno estireno (ABS) [28] obtenido por extrusión para utilizarlo en el proceso de modelado por deposición fundida [29].

#### i. Exactitud

La exactitud de un modelo tridimensional depende de la información digital usada para construirlo; sin embargo, se han estudiado otros factores que afectan su exactitud dimensional y geométrica durante el proceso de construcción [30]. De manera general, la exactitud depende del principio de fabricación utilizado en el equipo de impresión tridimensional, materiales utilizados, parámetros de trabajo, velocidades de operación y tamaño de capas depositadas [19, 31].

Para mejorar los procesos de manufactura aditiva se optimizó la generación de trayectorias de trabajo mejorando la calidad y los tiempos de fabricación [32] y se han establecido parámetros de trabajo para mejorar la exactitud [33]. En otros estudios también se logra mejorar la exactitud del modelo, a través de analizar la orientación y dirección de construcción que están relacionadas al consumo de materiales [35]. La orientación y dirección de construcción afectan también al acabado superficial y a la textura, que pueden verse reflejados en la rugosidad de un modelo y su apariencia externa [36].

#### ii. Propiedades mecánicas de los materiales para manufactura aditiva



Para identificar otros usos de la manufactura aditiva se han estudiado materiales comerciales, clasificándolos según el principio de funcionamiento de la impresora tridimensional, para identificar sus limitaciones mecánicas [37], lográndose determinar los criterios para su utilización [38]. En pruebas de tensión realizadas al material se encontró que la dirección de construcción y el espacio entre cordones afectan su resistencia demostrándose que el material es anisotrópico [5, 39], y que la resistencia a la tensión es proporcional a la masa del modelo construido [40]. Esta condición también se comprobó en pruebas de fatiga a muestras de material construidas en nueve direcciones y fueron probadas en un aparato de ensayo de tracción [41]. Dado que en el proceso de manufactura aditiva los materiales plásticos son llevados a su punto de fusión, es importante ajustar la escala del modelo ya que se contraen y deforman al solidificarse. Este ajuste de escala se puede realizar con la aplicación de un modelo matemático que compensa el efecto del encogimiento [42].

El conocimiento generado sobre los materiales en la manufactura aditiva, ha servido para ampliar su aplicación en nuevos usos [43]. En este sentido, se ha trabajado en reforzar los materiales en distintas maneras [44]. Por ejemplo, se han probado mezclas de polímero con fibras de carbono, para utilizarlas como materia prima en el proceso de modelado por deposición de material fundido [45]. También se ha tratado de obtener un modelo reforzado a partir de la coextrusión o impregnación de material plástico y fibras continuas de carbono, obteniendo materiales con propiedades mejoradas [46, 47]. Se encontró que la adición de fibras de carbono al material para deposición además de afectar las propiedades mecánicas, también tiene influencia en otras características como sus propiedades eléctricas y térmicas mejorando su conductividad eléctrica y su capacidad aislante [48, 49]. Dado

lo anterior se han reportado investigaciones enfocadas a lograr una mejora en las propiedades de los materiales modificando las trayectorias de trabajo de los equipos de impresión tridimensional para minimizar su anisotropía [32, 34], además de expandir sus aplicaciones en el campo de la biotecnología, buscando el desarrollo de biomateriales que pudieran sustituir partes internas del cuerpo humano [50–53] y la biocompatibilidad de estos materiales con tejidos orgánicos, dado que los materiales actuales utilizados en Manufactura Aditiva, como los plásticos, son porosos y absorben fluidos internos, lo que provoca riesgo de infecciones. Otras investigaciones se han dirigido a la incorporación de materiales orgánicos, como las células madre, para la impresión tridimensional de huesos humanos [54]. Sin embargo, para aplicaciones de alto impacto como en el caso de las prótesis deportivas, se identifica como principal alternativa a la combinación de los plásticos usados en la manufactura aditiva con los materiales compuestos.

#### 4. Materiales Compuestos

Los materiales compuestos han cobrado gran importancia en la industria aeronáutica, aeroespacial, automotriz y en la fabricación de generadores eólicos, en general, en la fabricación de objetos que poseen muy bajo peso, con una alta resistencia [55]. Esto se debe a que los materiales compuestos, comparados con el acero son cinco veces más fuertes, dos veces más rígidos y pueden llegar a ser cuatro veces más livianos [56].

Un material compuesto consiste de dos o más materiales (proporciones razonables >5%) que trabajan juntos y cada uno contribuye estructuralmente a un nivel macroscópico con sus propiedades. Esto resulta en una combinación y el material resultante tiene propiedades superiores a la de los constituyentes (Figura 3).

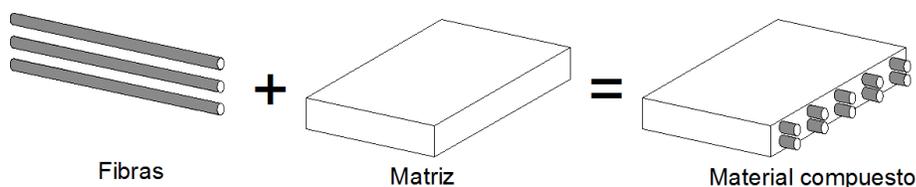


Figura 3. Componentes de un material compuesto [6].

Existen diferentes métodos para trabajar con materiales compuestos y pueden clasificarse en

dos grupos, métodos de molde cerrado y molde abierto.

Tabla 1. Métodos de procesamiento de materiales compuestos.

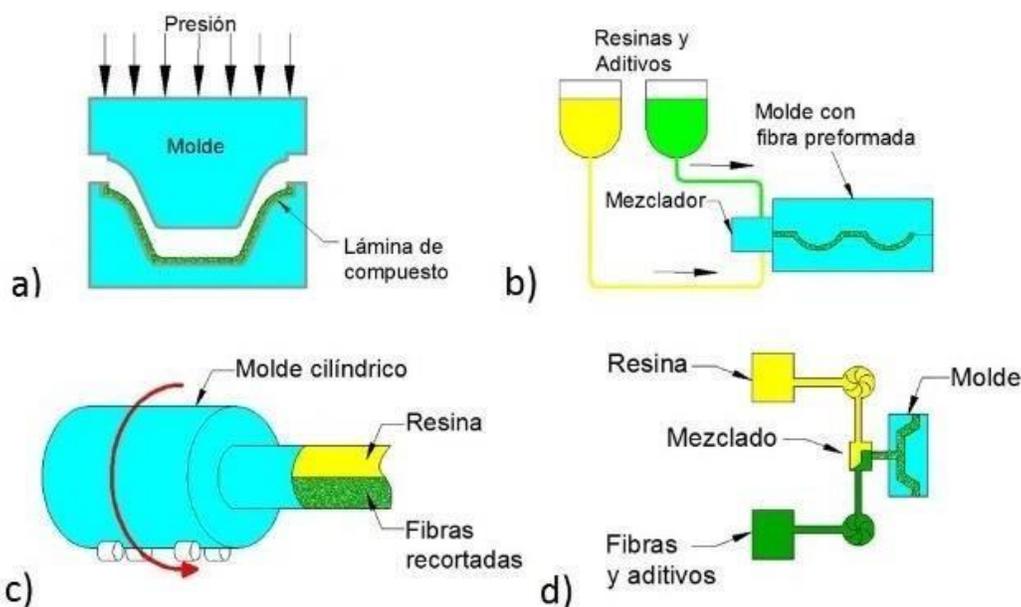
Molde Cerrado	Molde Abierto
Por laminado de componentes	Por colocación manual
Por transferencia de resina	Devanado de filamentos
Moldeo centrífugo	A presión con autoclave
Moldeo por inyección	Por infusión de resina
Moldeo por pultrusión	
Proceso por molde perdido	

Entre los métodos de molde cerrado, se encuentran el moldeo por laminado de componentes, el moldeo por transferencia de resina, moldeo centrífugo, moldeo por inyección, moldeo por pultrusión, y moldeo por molde perdido. Los métodos por molde abierto son el moldeo a mano, devanado de filamentos, con autoclave y por infusión de resina (Tabla 1).

#### 4.1.. Procesos a molde cerrado

El proceso por laminado de componentes consiste en la fabricación de láminas obtenidas por la combinación de fibras de vidrio o carbono y resinas y aditivos, que pasan por un sistema de rodillos y de impregnación, que posteriormente se trabaja por moldeo por compresión (Figura 4a). Uno de sus usos principales es la fabricación de partes de carrocería de vehículos para la industria automotriz [57–59]. En el moldeo por

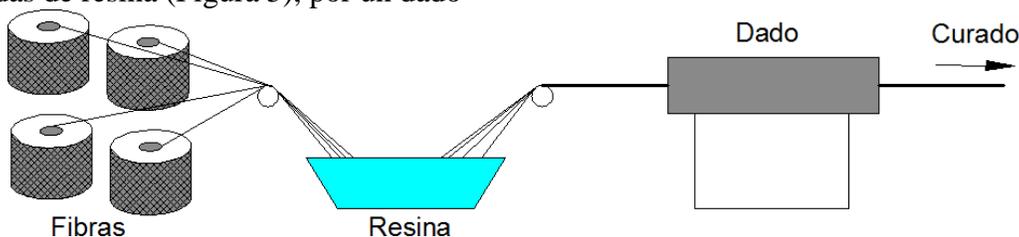
transferencia de resina, se introduce al molde una preforma hecha de fibras, al cerrarse el molde, la resina y los aditivos son inyectados a presión al interior del molde para iniciar su proceso de curado (Figura 4b). Este proceso presenta la ventaja del tener un direccionamiento controlado de las fibras lo cual resulta en partes y componentes de mayor resistencia para aplicaciones automotrices, marcos de bicicletas, cascos, entre otras [60, 61]. En el moldeo centrífugo, un molde cilíndrico se mantiene en constante rotación en posición horizontal. Se introduce la mezcla de fibras, resinas y aditivos los cuales se van distribuyendo de manera homogénea sobre las paredes del molde con el movimiento rotatorio, hasta que el material termina su proceso de curado (Figura 4c). Los usos de esta técnica de moldeo son la fabricación de tuberías o ductos y de recipientes y contenedores [62, 63]. En el proceso de moldeo por inyección de materiales compuestos, se utiliza la misma tecnología que en el moldeo de polímeros, solo difiere en que además de inyectarse el polímero termoplástico o termoestable, se inyecta el polímero mezclado con fibras de vidrio, de carbono o aramida, según sea el caso (Figura 4d). A diferencia del moldeo por transferencia de resina, no puede controlarse el posicionamiento de las fibras además de que, debido al movimiento del tornillo de la unidad inyectora, la longitud de las fibras es muy limitada [64, 65].



**Figura 4.** Procesos a molde cerrado: a) Moldeo por laminado de componentes, b) Moldeo por transferencia de resina, c) Moldeo centrífugo, d) Moldeo por Inyección, (Wacker.com, Nptel.ac.in, Owens Corning, com).

El proceso de pultrusión, es otro de los procesos a molde cerrado y se diferencia de los cuatro ya descritos por ser continuo [66]. Consiste en hacer pasar fibras de vidrio, carbono u otros materiales, preimpregnadas de resina (Figura 5), por un dado

de extrusión que les da forma y a través de la aplicación de calor, se inicia el proceso de curado de la resina, obteniéndose como producto principal perfiles estructurales de longitudes diversas [67, 68].



**Figura 5.** Proceso a molde cerrado: Moldeo por pultrusión (Tecnología de los plásticos.blogspot.mx).

En el proceso de fundición de acero con molde de cera perdida, se hace una reproducción de una pieza que se quiere fabricar utilizando cera, al vaciar el metal fundido, la cera es desplazada por el metal, ocupando la cavidad del molde, y al enfriarse, se obtiene el producto final [69, 70]. Siguiendo este principio, la compañía Stratasys, fabricante de equipos de impresión tridimensional, ha desarrollado una aplicación que ayuda a resolver las limitaciones de la fabricación de ductos y tuberías con materiales

compuestos a través de materiales de impresión tridimensional que son solubles y que sirven de molde para la fabricación de partes de material compuesto [71]. En la **Figura 6** se muestra en color blanco el núcleo soluble construido por FDM y en color negro el producto (ducto para aplicaciones automotrices) con material compuesto.

#### 4.2. Procesos a molde abierto



Dentro de los procesos de molde abierto se encuentra el moldeo por colocación manual (Figura 7), que consiste en colocar las capas de fibra sobre la cavidad de un molde de un solo lado, aplicando la resina con rodillos o brocha para impregnarla y lograr su adherencia [72]. Es un método muy flexible que presenta como principal ventaja que no necesita la aplicación de alta presión para intercalar las capas de fibras y resina; sin embargo, puede presentar problemas de mala adherencia, fibras expuestas, arrugas y burbujas de aire, cuarteaduras y grietas y mala adherencia al molde [73, 74].



Figura 6. Proceso fabricación con materiales compuestos y núcleos solubles [71].

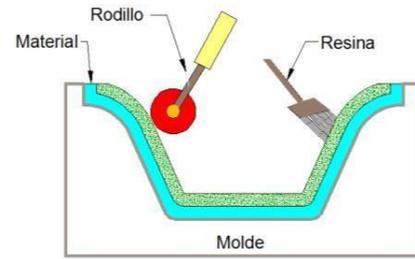


Figura 7. Proceso a molde abierto: Moldeo por colocación manual (coremt.com).

El moldeo por colocación manual es muy utilizado en la fabricación de partes para la industria aeroespacial y en la fabricación de embarcaciones.

En el devanado de filamentos [75], a) se utiliza un molde cilíndrico giratorio, conocido como mandril [76], sobre el cual van enrollándose fibras continuas a alta velocidad [77]; las fibras pasan por un baño de resina antes de ser enrolladas sobre el mandril y permitiendo controlar la cantidad de resina que deberá aplicarse. Las piezas que se desean obtener deben ser cilíndricas, sin curvaturas entrantes, y debe ser posible retirar el mandril al finalizar el proceso. Una vez terminado el devanado de las fibras, las piezas inician su proceso de curado en un horno.

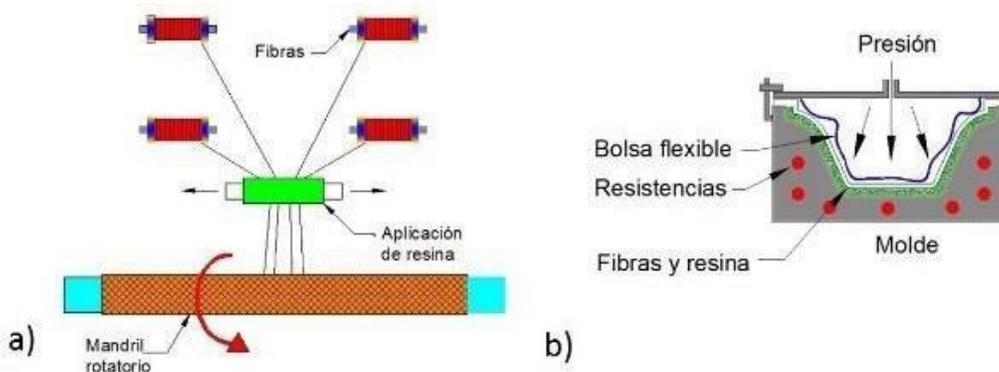


Figura 8. Proceso a molde abierto: a) Devanado de filamentos, b) A presión por autoclave (voodoohotrods.com).

A diferencia del moldeo por colocación manual, en el proceso por autoclave, b), la presión de vacío y temperatura generadas aseguran el contacto permanente de cada una de las capas de fibra, lográndose la eliminación de defectos

como los mencionados en el proceso manual [78]. Las fibras utilizadas en este proceso son pre-impregnadas de resina, son colocadas en el molde y recubiertas con una película plástica que permite aislar las partes y aplicarles presión de



vacío y temperatura para que la resina empiece a curarse [79]. Este proceso puede aplicarse en una gran familia de materiales poliméricos para la fabricación de partes en la industria automotriz y aeroespacial [80].

En el moldeo de compuestos, la infusión de resina representa otra alternativa muy similar al moldeo por autoclave. Estos dos métodos coinciden en

que se utiliza un molde abierto para dar la forma al producto a fabricar y mediante la aplicación de vacío, se logra compactar las fibras [81]. Una vez aplicado el vacío (Figura 9), la resina se introduce al molde desde un contenedor por un conducto de entrada, y va impregnando las capas de fibra hasta que sale por otro conducto de salida, conectado a una trampa para evitar que la resina llegue a la bomba de vacío [66, 82].

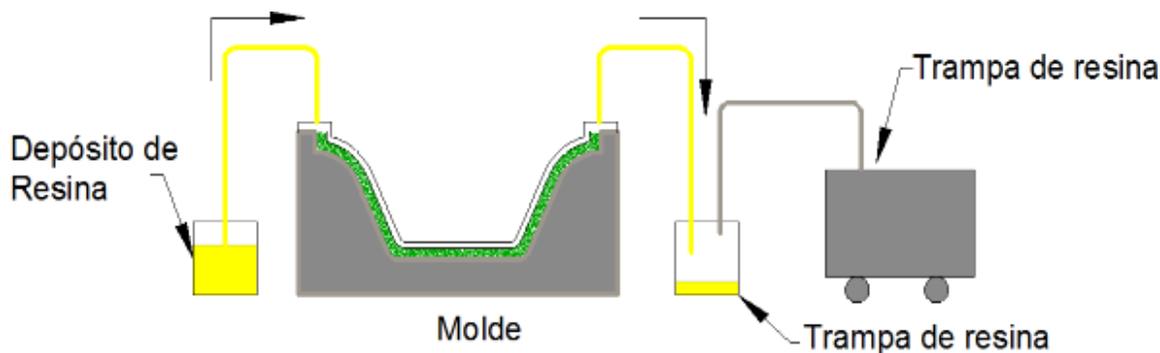


Figura 9. Proceso de infusión de resina [66].

## 5. Manufactura de prótesis

Una prótesis es un dispositivo que reemplaza o provee una parte del cuerpo que falta por diversas razones, tales como accidentes, malformaciones congénitas y enfermedades [4]. El Comité Internacional de la Cruz Roja (CICR), con sede en Ginebra Suiza, a raíz de las afectaciones provocadas por las guerras en Europa y los bajos ingresos de los países afectados, creó en 1979 el Programa de Rehabilitación Física del CICR, el cual promueve el uso de tecnología apropiada para adaptarse a las necesidades de los discapacitados.

El CICR plantea en sus directrices que esta tecnología debe ser duradera, cómoda, fácil de usar y de mantener. Además, que debe ser fácil de aprender, utilizar y reparar, que sea estándar, pero a la vez compatible con el clima de las diferentes regiones del mundo. Propone en el

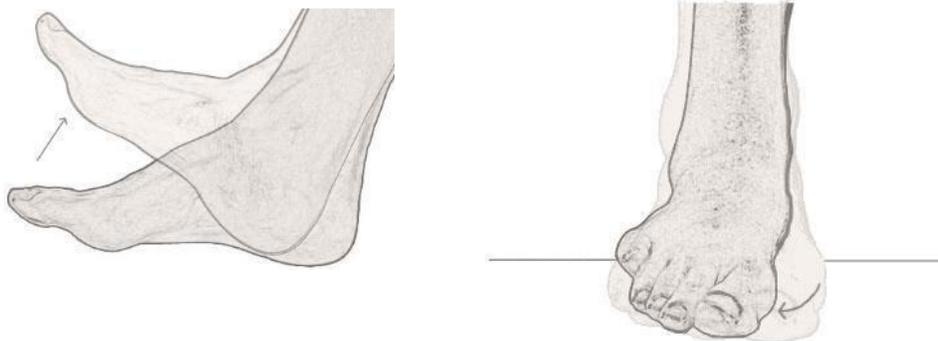
proceso de manufactura desarrollado, la incorporación de materiales ligeros y duraderos como el polipropileno (PP) y el EthylVinylAcetate (EVA), además del polieuretano, en reemplazo de materiales tradicionales como la madera y el caucho [83, 84]. Harish Mysore, menciona el caso de las prótesis para pie, desarrolladas en la India, las cuales representan una alternativa de muy bajo costo para personas amputadas en ese país y que representa una oportunidad de mejorar su calidad de vida, brindándoles una mejor movilidad. Las tecnologías utilizadas en el desarrollo de estas prótesis datan del año 1968 y aunque no incorporan tecnologías de actualidad, utilizan materiales simples como el caucho micro celular, madera de sauce, cuerdas de nylon y caucho adicional para recubrir la prótesis para añadir flexibilidad y absorción de los impactos, textura y color que la hacen ver de una manera natural (Figura 10) [85].



**Figura 10:** “The Jaipur Foot” Fuente: “The Jaipur Foot”, IEEE pulse 2016.

En el estudio realizado por Rihs y Polizzi en 2001 en pacientes amputados, encontraron que las características más importantes en el diseño de prótesis, para ofrecer un uso confortable y lograr un movimiento de caminado natural, son las siguientes [86]:

**Dorsiflexión:** Flexión dorsal es el movimiento que reduce el ángulo entre el pie y la pierna en el cual los dedos del pie se acercan a la espinilla. El movimiento opuesto se llama flexión plantar (Figura 11).



**Figura 11.** Dorsiflexión del pie (northcoastfootcare.com) (izquierda). Eversión del pie (northcoastfootcare.com) (derecha).

**Eversión:** La eversión es un movimiento producido en la articulación subastragalina. Se ocasiona cuando el calcáneo se aleja de la línea que pasa por el centro del cuerpo (parte externa del pie). La eversión máxima es aproximadamente de  $10^\circ$  (Figura 12).

Se han desarrollado prótesis inteligentes, que incluyen sensores y dispositivos electrónicos que se conectan a las terminales nerviosas del paciente amputado, para de esta manera dar movimiento al miembro artificial [87–89]. Para aplicaciones deportivas, las opciones son menos sofisticadas, sin embargo, las prótesis transtibiales de fibra de carbono mejoran considerablemente el rendimiento del atleta, y se han estudiado las geometrías y ángulos de contacto con el suelo [90] y la biomecánica del cuerpo humano al caminar [91] y correr [92, 93], para lograr el máximo retorno de energía [94, 95], que es fundamental para el buen

**Absorción de impactos:** Se refiere a la capacidad de absorber golpes y energía sin romperse.

- Retorno de energía: Capacidad de la prótesis de almacenar energía.
- Torsión del tobillo: Movimiento circular respecto al plano de la articulación del tobillo.



funcionamiento de la prótesis. El avance en el desarrollo de este tipo de prótesis ha sido considerable pudiendo mencionar el caso del corredor olímpico sudafricano Oscar Pistorius [96], quien utilizó en sus participaciones en Juegos Olímpicos prótesis de pie, en ambas extremidades inferiores (Figura 13). pasa por el centro del cuerpo (parte externa del pie). La eversión máxima es aproximadamente de  $10^\circ$  (Figura 12).



**Figura 12.** Oscar Pistorius, Atleta Olímpico que utiliza prótesis de materiales compuestos. (Popular Science, popsci.com).

El caso de este atleta ha llevado a la discusión sobre si la utilización de estas prótesis puede igualar o incluso dar ventaja a un atleta paralímpico contra los atletas que poseen sus piernas normales, hace evidente que, con el uso

de estos elementos, una persona amputada puede mejorar considerablemente su calidad de vida, ya que podría realizar de manera normal sus actividades deportivas o de recreación. No se reporta algún impacto negativo o algún peligro a la integridad física de los usuarios de éstas prótesis, causadas por el uso de la fibra de carbono y de las resinas utilizadas en su proceso de fabricación [97].

Existen patentes sobre el desarrollo de prótesis para pies, en los que se establecen diferentes métodos de fabricación, incorporando materiales metálicos y recubrimientos que mejoren la estética del pie [98– 101]. Se utilizan diferentes mecanismos para el accionamiento de la articulación del tobillo, así como formas de elementos que dan soporte al cuerpo. Se mencionan dispositivos para la sujeción del pie al resto del cuerpo [102], y hacen referencia a prótesis cosméticas para uso cotidiano.

En el mercado ya se comercializan diseños de prótesis para extremidades inferiores para uso deportivo, la empresa Óssur®, ofrece algunos de los siguientes productos Óssur® Flex-Run™, Óssur® Flex-Sprint™, y Óssur® Cheetah®, mismos que se muestran en la Figura 13.



**Figura 13.** Prótesis Óssur® Flex Run, Flex Sprint y Cheetah. Fuente: Óssur®.



Óssur®, actualmente aparece como cesionaria de la patente US 20150209160 A1, Prosthetic sport feet (Prótesis de pies deportiva), en la cual establecen como declaraciones que las prótesis tienen una forma aerodinámica en forma de ala, y “que se extiende entre una porción proximal y una porción distal generalmente horizontal y se curva de forma cóncava entre la parte proximal y la parte distal” [103]. En otra de las declaraciones se contempla el uso de espumas en su superficie, y que puede ser construida con fibras de carbono y hace referencia también a que podría ser hueca en su interior. Se contempla un sistema para el desalojo del aire del interior hueco de la prótesis y que su sección transversal pudiera tener una forma elíptica [97].

El acoplamiento o “socket”, es la parte de la prótesis que permite al usuario su correcta sujeción a su extremidad amputada (muñón). Además, el “socket” debe ser lo más cómodo posible para su uso; esto se logra obteniendo un modelo del muñón, usando materiales comunes como yeso [85] o a través de programas computacionales [104] y obtener un modelo digital del muñón, y con base en esa información, construir el “socket” con materiales compuestos o manufactura aditiva [105].

## 6. Conclusiones

La manufactura aditiva ofrece grandes ventajas en el desarrollo de nuevos productos, sin embargo, presenta características que limitan su uso en aplicaciones que exigen el cumplimiento de requerimientos de esfuerzos y otras propiedades mecánicas importantes. Por otro lado, los materiales compuestos exceden las propiedades mecánicas de los materiales metálicos como el acero. La tendencia observada en el presente trabajo es la combinación de ambas tecnologías, para aprovechar sus ventajas individuales en aplicaciones específicas, teniendo como resultado un proceso aún más eficiente.

Se considera importante realizar investigaciones que aporten nuevos y mejores métodos de trabajo para combinar la flexibilidad y rapidez que ofrece la manufactura aditiva, con la resistencia al esfuerzo, rigidez y ligereza de los materiales compuestos para la optimización de los procesos de manufactura de prótesis, contribuyendo así, a la mejora de la calidad de vida de los pacientes amputados.

Al utilizar partes de plástico fabricadas por impresión tridimensional, para combinarlas con materiales compuestos, es necesario resolver problemas de delaminación y para obtener prótesis transtibiales que cumplan con los requerimientos para este tipo de dispositivos [106].

## Referencias

- [1] M. K. Thompson, G. Moroni, T. Vaneker, G. Fadel, R. I. Campbell, I. Gibson, A. Bernard, J. Schulz, P. Graf, B. Ahuja, and F. Martina, “Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 65, no. 2, pp. 737–760, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004>.
- [2] W. Gao, Y. Zhang, D. Ramanujan, K. Ramani, Y. Chen, C. B. Williams, C. C. L. Wang, Y. C. Shin, S. Zhang, and P. D. Zavattieri, “The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering,” *Comput. Des.*, vol. 69, pp. 65–89, Apr. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>.
- [3] C. Lunsford, G. Grindle, B. Salatin, and B. E. Dicianno, “Innovations With 3- Dimensional Printing in Physical Medicine and Rehabilitation: A Review of the Literature,” *PM&R*, vol. 8, no. 12, pp. 1201–1212, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2016.07.003>.
- [4] R. K. Chen, Y. Jin, J. Wensman, and A. Shih, “Additive manufacturing of custom orthoses and prostheses—A review,” *Addit. Manuf.*, vol. 12, Part A, pp. 77–89, Oct. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.04.002>.
- [5] S. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, and P. K. Wright, “Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 8, no. 4, pp. 248–257, Oct. 2002. <https://doi.org/10.1108/13552540210441166>.
- [6] B. A. Newcomb, “Processing, structure, and properties of carbon fibers,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 91, Part 1, pp. 262–282, Dec. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.10.018>.



- [7] ASTM Standard, “F2792. 2012. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies,” West Conshohocken, PA ASTM Int. See [www.astm.org](http://www.astm.org). (doi 10.1520/F2792-12), 2015.
- [8] J. Kietzmann, L. Pitt, and P. Berthon, “Disruptions, decisions, and destinations: Enter the age of 3-D printing and additive manufacturing,” *Bus. Horiz.*, vol. 58, no. 2, pp. 209–215, Mar. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2014.11.005>.
- [9] C. Weller, R. Kleer, and F. T. Piller, “Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 164, pp. 43–56, Jun. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.02.020>.
- [10] M. Gebler, A. J. M. Schoot Uiterkamp, and C. Visser, “A global sustainability perspective on 3D printing technologies,” *Energy Policy*, vol. 74, pp. 158–167, Nov. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.08.033>.
- [11] T. Rayna and L. Striukova, “From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 102, pp. 214–224, Jan. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.07.023>.
- [12] J. Wang, A. Goyanes, S. Gaisford, and A. W. Basit, “Stereolithographic (SLA) 3D printing of oral modified-release dosage forms,” *Int. J. Pharm.*, vol. 503, no. 1, pp. 207–212, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2016.03.016>.
- [13] J. Park, M. J. Tari, and H. T. Hahn, “Characterization of the laminated object manufacturing (LOM) process,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 6, no. 1, pp. 36–50, Mar. 2000. <https://doi.org/10.1108/13552540010309868>.
- [14] J. P. Kruth, X. Wang, T. Laoui, and L. Froyen, “Lasers and materials in selective laser sintering,” *Assem. Autom.*, vol. 23, no. 4, pp. 357–371, Dec. 2003. <https://doi.org/10.1108/01445150310698652>.
- [15] S. Meteyer, X. Xu, N. Perry, and Y. F. Zhao, “Energy and Material Flow Analysis of Binder-jetting Additive Manufacturing Processes,” *Procedia CIRP*, vol. 15, pp. 19–25, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.030>.
- [16] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, “Material Jetting,” in *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, New York, NY: Springer New York, 2015, pp. 175–203. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3\\_7](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3_7).
- [17] J.-Y. Lee, J. An, and C. K. Chua, “Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials,” *Appl. Mater. Today*, vol. 7, pp. 120–133, Jun. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2017.02.004>.
- [18] P. Jain and A. M. Kuthe, “Feasibility Study of Manufacturing Using Rapid Prototyping: FDM Approach,” *Procedia Eng.*, vol. 63, pp. 4–11, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.275>.
- [19] Y. Tang and Y. F. Zhao, “A survey of the design methods for additive manufacturing to improve functional performance,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 22, no. 3, pp. 569–590, 2016. <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2015-0011>.
- [20] D. Pham and R. Gault, “A comparison of rapid prototyping technologies,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 38, no. 10–11, pp. 1257–1287, Oct. 1998. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(97\)00137-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(97)00137-5).
- [21] N. Labonnote, A. Ronnquist, B. Manum, and P. Rüther, “Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities,” *Automation in Construction*, vol. 72, pp. 347–366, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.026>.
- [22] B. C. Gross, J. L. Erkal, S. Y. Lockwood, C. Chen, and D. M. Spence, “Evaluation of 3D Printing and Its Potential Impact on Biotechnology and the Chemical Sciences,” *Anal. Chem.*, vol. 86, no. 7, pp. 3240–3253, Apr. 2014. <https://doi.org/10.1021/ac403397r>.
- [23] S. V. Murphy and A. Atala, “3D bioprinting of tissues and organs,” vol. 32, p. 773, Aug. 2014. <https://doi.org/10.1038/nbt.2958>.
- [24] N. Hopkinson and P. Dickens, “Rapid prototyping for direct manufacture,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 7, no. 4, pp. 197–202, Oct. 2001. <https://doi.org/10.1108/EUM0000000005753>.
- [25] E. Sachs, M. Cima, P. Williams, D. Brancazio, and J. Cornie, “Three-Dimensional Printing: Rapid Tooling and Prototypes Directly from a CAD Model,” *J. Eng. Ind.*, vol. 114, no. 4, pp. 481–488, Nov. 1992. <https://doi.org/10.1115/1.2900701>.
- [26] E. Kroll and D. Artzi, “Enhancing aerospace engineering students’ learning with 3D printing wind-tunnel models,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 17, no. 5, pp. 393–402, Aug. 2011. <https://doi.org/10.1108/13552541111156522>.
- [27] B. Satyanarayana and K. J. Prakash, “Component Replication Using 3D Printing Technology,” *Procedia Mater. Sci.*, vol. 10, pp. 263–269, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.06.049>.
- [28] G. Wypych and G. Wypych, “ABS poly(acrylonitrile-co-butadiene-co-styrene),” in *Handbook of Polymers*, 2016, pp. 5–11. <https://doi.org/10.1016/B978-1-895198-92-8.50005-7>.
- [29] R. Singh, S. Singh, and K. Mankotia, “Development of ABS based wire as feedstock filament of FDM for industrial applications,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 22, no. 2, pp. 300–310, Mar. 2016. <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2014-0086>.
- [30] H. G. Lemu and S. Kurtovic, “3D Printing for Rapid Manufacturing: Study of Dimensional and Geometrical Accuracy,” in *Advances in Production Management Systems. Value Networks: Innovation, Technologies, and Management: IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2011, Stavanger, Norway, September 26-28, 2011, Revised Selected Papers*, J. Frick and B. T. Laugen, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 470–479. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-33980-6\\_51](https://doi.org/10.1007/978-3-642-33980-6_51).



- [31] D. T. Pham and R. S. Gault, "A comparison of rapid prototyping technologies," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 38, no. 10–11, pp. 1257–1287, Oct. 1998. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(97\)00137-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(97)00137-5).
- [32] Y. Jin, Y. He, J. Fu, W. Gan, and Z. Lin, "Optimization of tool-path generation for material extrusion-based additive manufacturing technology," *Addit. Manuf.*, vol. 1–4, pp. 32–47, Oct. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.08.004>.
- [33] O. A. Mohamed, S. H. Masood, and J. L. Bhowmik, "Optimization of fused deposition modeling process parameters for dimensional accuracy using I-optimality criterion," *Measurement*, vol. 81, pp. 174–196, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.12.011>.
- [34] B. Ezair, F. Massarwi, and G. Elber, "Orientation analysis of 3D objects toward minimal support volume in 3D-printing," *Comput. Graph.*, vol. 51, pp. 117–124, Oct. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2015.05.009>.
- [35] K. Hu, S. Jin, and C. C. L. Wang, "Support slimming for single material based additive manufacturing," *Comput. Des.*, vol. 65, pp. 1–10, Aug. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.03.001>.
- [36] P. J. Nuñez, A. Rivas, E. García-Plaza, E. Beamud, and A. Sanz-Lobera, "Dimensional and Surface Texture Characterization in Fused Deposition Modelling (FDM) with ABS plus," *Procedia Eng.*, vol. 132, pp. 856–863, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.570>.
- [37] J. Kotlinski, "Mechanical properties of commercial rapid prototyping materials," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 20, no. 6, pp. 499–510, Oct. 2014. <https://doi.org/10.1108/RPJ-06-2012-0052>.
- [38] Z. Quan, A. Wu, M. Keefe, X. Qin, J. Yu, J. Suhr, J.-H. Byun, B.-S. Kim, and T.-W. Chou, "Additive manufacturing of multi-directional preforms for composites: opportunities and challenges," *Mater J. Today*, vol. 18, no. 9, pp. 503–512, Nov. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2015.05.001>.
- Wulfsberg, A. Herrmann, G. Ziegmann, G. Lonsdorfer, N. Stöß, and M. Fette, "Combination of Carbon Fibre Sheet Moulding Compound and Prepreg Compression Moulding in Aerospace Industry," *Procedia Eng.*, vol. 81, pp. 1601–1607, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.197>.
- [39] A. R. Torrado, C. M. Shemelya, J. D. English, Y. Lin, R. B. Wicker, and D. A. Roberson, "Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing," *Addit. Manuf.*, vol. 6, pp. 16–29, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.02.001>.
- [40] N. G. Tanikella, B. Wittbrodt, and J. M. Pearce, "Tensile strength of commercial polymer materials for fused filament fabrication 3D printing," *Addit. Manuf.*, vol. 15, pp. 40–47, May 2017. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.03.005>.
- [41] J. Lee and A. Huang, "Fatigue analysis of FDM materials," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 19, no. 4, pp. 291–299, Jun. 2013. <https://doi.org/10.1108/13552541311323290>.
- [42] Y. Xu, "Experimental Study of ABS Material Shrinkage and Deformation Based on Fused Deposition Modeling," *MATEC Web Conf.*, vol. 67, 2016. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20166703039>.
- [43] D. Gu, "Materials creation adds new dimensions to 3D printing," *Sci. Bull.*, vol. 61, no. 22, pp. 1718–1722, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11434-016-1191-y>.
- [44] P. Dudek, "FDM 3D Printing Technology in Manufacturing Composite Elements," *Arch. Metall. Mater.*, vol. 58, no. 4, pp. 1415–1418, Jan. 2013. <https://doi.org/10.2478/amm-2013-0186>.
- [45] F. Ning, W. Cong, J. Qiu, J. Wei, and S. Wang, "Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling," *Compos. Part B Eng.*, vol. 80, pp. 369–378, Oct. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.013>.
- [46] C. Yang, X. Tian, T. Liu, Y. Cao, and D. Li, "3D printing for continuous fiber reinforced thermoplastic composites: Mechanism and performance," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 23, no. 1, pp. 209–215, 2017. <https://doi.org/10.1108/RPJ-08-2015-0098>.
- [47] R. Matsuzaki, M. Ueda, M. Namiki, T.-K. Jeong, H. Asahara, K. Horiguchi, T. Nakamura, A. Todoroki, and Y. Hirano, "Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation," *Sci. Rep.*, vol. 6, p. 23058, Mar. 2016. <https://doi.org/10.1038/srep23058>.
- [48] F. Wang, R. Y. Hong, W. G. Feng, D. Badami, and K. Zeng, "Electrical and mechanical properties of ABS/EPDM composites filled with carbon black," 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.03.136>.
- [49] Z. Weng, J. Wang, T. Senthil, and L. Wu, "Mechanical and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposites for fused deposition modeling 3D printing," *Mater. Des.*, vol. 102, pp. 276–283, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.045>.
- [50] E. J. McCullough and V. K. Yadavalli, "Surface modification of fused deposition modeling ABS to enable rapid prototyping of biomedical microdevices," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 213, no. 6, pp. 947–954, Jun. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.12.015>.
- [51] S. J. Kalita, *Biointegration of Medical Implant Materials*. Elsevier, 2010. <https://www.elsevier.com/books/biointegration-of-medical-implant-materials/sharma/978-1-84569-509-5>.
- [52] X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou, and D. Hui, "3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective," *Compos. Part B Eng.*, vol. 110, pp. 442–458, Feb. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>.
- [53] S. Bose, S. Vahabzadeh, and A. Bandyopadhyay, "Bone tissue engineering using 3D printing," *Mater. Today*, vol. 16, no. 12, pp. 496–504, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2013.11.017>.



- [54] B. Leukers, H. Gülkan, S. H. Irsen, S. Milz, C. Tille, M. Schieker, and H. Seitz, "Hydroxyapatite scaffolds for bone tissue engineering made by 3D printing," *J. Mater. Sci. Mater. Med.*, vol. 16, no. 12, pp. 1121–1124, 2005. <https://doi.org/10.1007/s10856-005-4716-5>.
- [55] B. A. Newcomb, "Processing, structure, and properties of carbon fibers," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 91, pp. 262–282, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.10.018>.
- [56] D. Calestani, M. Villani, M. Culiolo, D. Delmonte, N. Coppedè, and A. Zappettini, "Smart composites materials: A new idea to add gas-sensing properties to commercial carbon- fibers by functionalization with ZnO nanowires," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 245, pp. 166–170, Jun. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.01.109>.
- [57] D. Ferré Sentis, L. Orgéas, P. J. J. Dumont, S. Rolland du Roscoat, M. Sager, and P. Latil, "3D in situ observations of the compressibility and pore transport in Sheet Moulding Compounds during the early stages of compression moulding," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 92, pp. 51–61, Jan. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.10.031>.
- [58] P. R. Fernandes, A. L. B. Hurtado, and E. C. Batiz, "Ergonomics Management with a Proactive Focus," *Procedia Manuf.*, vol. 3, pp. 4509–4516, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.465>.
- [59] J. Wulfsberg, A. Herrmann, G. Ziegmann, G. Lonsdorfer, N. Stöß, and M. Fette, "Combination of Carbon Fibre Sheet Moulding Compound and Prepreg Compression Moulding in Aerospace Industry," *Procedia Eng.*, vol. 81, pp. 1601–1607, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.197>.
- [60] S. Bickerton and P. A. Kelly, "11 - Compression resin transfer moulding (CRTM) in polymer matrix composites BT-Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)," in *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering*, Woodhead Publishing, 2012, pp. 348-380. <https://doi.org/10.1533/9780857096258.3.348>.
- [61] T. Okabe, Y. Oya, G. Yamamoto, J. Sato, T. Matsumiya, R. Matsuzaki, S. Yashiro, and S. Obayashi, "Multi-objective optimization for resin transfer molding process," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 92, pp. 1–9, Jan. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.09.023>.
- [62] C.-H. Chen, K. Takita, S. Ishiguro, S. Honda, and H. Awaji, "Fabrication on porous alumina tube by centrifugal molding," *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 25, no. 14, pp. 3257–3264, Sep. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2004.08.019>.
- [63] R. Sivakumar, T. Nishikawa, S. Honda, H. Awaji and F. D. Gnanam, "Processing of mullite– molybdenum graded hollow cylinders by centrifugal molding technique," *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 23, no. 5, pp. 765–772, Apr. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(02\)00197-8](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(02)00197-8).
- [64] A. Romero and G. Herranz, "Development of feedstocks based on steel matrix composites for metal injection moulding," *Powder Technol.*, vol. 308, pp. 472–478, Feb. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.055>.
- [65] S. P. Magalhães da Silva, P. S. Lima, and J. M. Oliveira, "Rheological behaviour of cork- polymer composites for injection moulding," *Compos. Part B Eng.*, vol. 90, pp. 172–178, Apr. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.12.015>.
- [66] S. A. Hadigheh, R. J. Gravina, S. Setunge, and S. J. Kim, "Bond characterization of adhesively bonded joints made with the resin infusion (RI) process," *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 57, pp. 13–21, Mar. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.10.001>
- [67] I. Tena, M. Sarrionandia, J. Torre, and J. Aurrekoetxea, "The effect of process parameters on ultraviolet cured out of die bent pultrusion process," *Compos. Part B Eng.*, vol. 89, pp. 9–17, Mar. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.11.027>.
- [68] P. J. Novo, J. F. Silva, J. P. Nunes, and A. T. Marques, "Pultrusion of fibre reinforced thermoplastic pre-impregnated materials," *Compos. Part B Eng.*, vol. 89, pp. 328–339, Mar. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.12.026>.
- [69] K. Cai, D. Guo, Y. Huang, and J. Yang, "Solid freeform fabrication of alumina ceramic parts through a lost mould method," *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 23, no. 6, pp. 921– 925, May 2003. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(02\)00229-7](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(02)00229-7).
- [70] E. Chica, S. Agudelo, and N. Sierra, "Lost wax casting process of the runner of a propeller turbine for small hydroelectric power plants," *Renew. Energy*, vol. 60, pp. 739–745, Dec. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.06.030>.
- [71] Stratasys, "Champion Motorsport: FDM Empowers Champion Motorsport to Create Strong, Beautiful Parts for Porsche," 2014. [Online]. Available: <http://www.stratasys.com/resources/case-studies/automotive/champion-motorsport?returnUrl=http://www.stratasys.com/resources/case-studies?search=composite>. [Accessed: 01- Jan-2017].
- [72] F. Cucinotta, E. Guglielmino, and F. Sfravara, "Life cycle assessment in yacht industry: A case study of comparison between hand lay-up and vacuum infusion," *J. Clean. Prod.*, vol. 142, Part, pp. 3822– 3833, Jan. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.080>.
- [73] E. Sevkat and M. Brahim, "The bearing strength of pin loaded woven composites manufactured by vacuum assisted resin transfer moulding and hand lay-up techniques," *Procedia Eng.*, vol. 10, pp. 153–158, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.028>.
- [74] Y. Zhai and S. Liang, "Optimal lay-ups to maximize loss factor of cross-ply composite plate," *Compos. Struct.*,



- vol. 168, pp. 597– 607, May 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.01.019>.
- [75] L. Sorrentino, M. Marchetti, C. Bellini, A. Delfini, and F. Del Sette, “Manufacture of high performance isogrid structure by Robotic Filament Winding,” *Compos. Struct.*, vol. 164, pp. 43–50, Mar. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.12.061>.
- [76] E. Vargas Rojas, D. Chapelle, D. Perreux, B. Delobelle, and F. Thiebaud, “Unified approach of filament winding applied to complex shape mandrels,” *Compos. Struct.*, vol. 116, pp. 805– 813, Sep. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.06.009>.
- [77] A. Cherniaev and I. Telichev, “Experimental and numerical study of hypervelocity impact damage in composite materials fabricated by filament winding,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 98, pp. 19–33, Dec. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.07.001>
- [78] L. K. Grunenfelder, A. Dills, T. Centea, and S. Nutt, “Effect of prepreg format on defect control in out-of-autoclave processing,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 93, pp. 88–99, Feb. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.10.027>
- [79] P. Hubert, G. Fernlund, and A. Poursartip, “13 - Autoclave processing for composites BT - Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs),” in *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering*, Woodhead Publishing, 2012, pp. 414–434. <https://doi.org/10.1533/9780857096258.3.414>.
- [80] L. A. Khan, A. Kausar, and R. J. Day, “Aerospace composite cured by quickstep and autoclave processing techniques: Evaluation and comparison of reaction progress,” *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 65, pp. 100–105, Jun. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2017.02.014>.
- [81] K. K. Verma, B. L. Dinesh, K. Singh, K. M Gaddikeri, and R. Sundaram, “Challenges in Processing of a Cocured Wing Test Box Using Vacuum Enhanced Resin Infusion Technology (VERITY),” *Procedia Mater. Sci.*, vol. 6, pp. 331–340, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.042>
- [82] Y. Gu, X. Tan, Z. Yang, M. li, and Z. Zhang, “Hot compaction and mechanical properties of ramie fabric/epoxy composite fabricated using vacuum assisted resin infusion molding,” *Mater. Des.*, vol. 56, pp. 852–861, Apr. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.077>
- [83] International Comitee of the Red Cross, “Manufacturing Guidelines, Partial Foot Prosthesis,” *Phys. Rehabil. Program.*, 2006. <http://www.icrc.org/en/doc/assets/files/other/eng-partial-foot.pdf>.
- [84] International Comitee of the Red Cross, “Manufacturing Guidelines, Push-Fit Syme Prosthesis,” *Phys. Rehabil. Program.*, 2013. <http://www.icrc.org/en/doc/assets/files/publications/icrc-mg-symes-pushfit-web-0868.pdf>.
- [85] H. Mysore, “The Jaipur Foot,” *IEEE Pulse*, 2016. <http://www.orcid/10.1109/mpul.2016.2539798>
- [86] D. Rihs and I. Polizzi, *Prosthetic foot design*. Rehab Tech-Monash Rehabilitation Technology Research Unit, 1996. <https://studylib.net/doc/18100946/prosthetic-foot-design>.
- [87] R. Rusinek, J. Warminski, M. Szymanski, K. Kecik, and K. Kozik, “Dynamics of the middle ear ossicles with an SMA prosthesis,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 127, pp. 163–175, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.10.004>.
- [88] M. Liu, P. Datsaris, and H. H. Huang, “A Prototype for Smart Prosthetic Legs- Analysis and Mechanical Design,” *Adv. Mater. Res.*, vol. 403–408, pp. 1999–2006, 2012. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.403-408.1999>
- [89] J. D. Carlson, W. Matthis, and J. R. Toscano, “Smart prosthetics based on magnetorheological fluids,” 2001, vol. 4332, no., pp. 4332–4339. <https://doi.org/10.1117/12.429670>.
- [90] S. Litzengerger, A. Sabo, and F. K. Fuss, “Effect of Different Mounting Angles of Prosthetic Feet Dedicated to Sprinting on Reaction Forces,” *Procedia Eng.*, vol. 147, pp. 490–495, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.226>.
- [91] Y. Sagawa Jr., K. Turcot, S. Armand, A. Thevenon, N. Vuillerme, and E. Watelain, “Biomechanics and physiological parameters during gait in lower-limb amputees: A systematic review,” *Gait Posture*, vol. 33, no. 4, pp. 511– 526, Apr. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2011.02.003>
- [92] H. Hobara, B. S. Baum, H.-J. Kwon, A. Linberg, E. J. Wolf, R. H. Miller, and J. K. Shim, “Amputee locomotion: Lower extremity loading using running-specific prostheses,” *Gait Posture*, vol. 39, no. 1, pp. 386–390, Jan. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2013.08.010>
- [93] B. S. Baum, M. P. Schultz, A. Tian, B. Shefter, E. J. Wolf, H. J. Kwon, and J. K. Shim, “Amputee Locomotion: Determining the Inertial Properties of Running-Specific Prostheses,” *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, vol. 94, no. 9, pp. 1776–1783, Sep. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2013.03.010>
- [94] S. M. Rigney, A. Simmons, and L. Kark, “Mechanical characterization and comparison of energy storage and return prostheses,” *Med. Eng. Phys.*, vol. 41, pp. 90–96, Mar. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2017.01.003>.
- [95] B. J. Hafner, J. E. Sanders, J. Czerniecki, and J. Ferguson, “Energy storage and return prostheses: does patient perception correlate with biomechanical analysis?,” *Clin. Biomech.*, vol. 17, no. 5, pp. 325–344, Jun. 2002. [https://doi.org/10.1016/S0268-0033\(02\)00020-7](https://doi.org/10.1016/S0268-0033(02)00020-7).
- [96] A. Marcellini, S. Ferez, D. Issanchou, E. De Léséleuc, and M. McNamee, “Challenging human and sporting boundaries: The case of Oscar Pistorius,” *Perform. Enhanc. Heal.*, vol. 1, no. 1, pp. 3–9, Aug. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.peh.2011.11.002>.



- [97] L. Nolan, “Carbon fibre prostheses and running in amputees: A review,” *Foot Ankle Surg.*, vol. 14, no. 3, pp. 125–129, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.fas.2008.05.007>.
- [98] B. W. Townsend and B. K. Claudino, “Prosthetic foot with tunable performance.” Google Patents, 2011. <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=W02005097010>.
- [99] R. E. Arbogast and C. J. Arbogast, “Prosthetic foot.” Google Patents, 1989. <https://patentimages.storage.googleapis.com/13/f8/ff/51b8a4acec95aa/US8323354.pdf>.
- [100] V. L. Phillips, “Symes foot prosthesis.” Google Patents, 1996. <https://www.google.com/patents/WO1989005617A1?cl=d&e>.
- [101] U. Wellershaus, “Jointless prosthetic foot.” Google Patents, 1992. <https://patents.google.com/patent/CA2054588A1/un>.
- [102] O. F. Halldorsson, D. Sandahl, B. Gunnarsson, and E. S. Egilsson, “Prosthetic device, system and method for increasing vacuum attachment.” Google Patents, 2013. <https://patents.google.com/patent/US9486335B2/en>.
- [103] A. V. Clausen, C. Lecomte, D. S. Marlin, and L. Gunnsteinsson, “Prosthetic sport feet.” Google Patents, 2015. <https://patents.google.com/patent/US9737420B2/en>
- [104] D. M. Sengeh and H. Herr, “A Variable- Impedance Prosthetic Socket for a Transtibial Amputee Designed from Magnetic Resonance Imaging Data,” *JPO J. Prosthetics Orthot.*, vol. 25, no. 3, 2013. <https://doi.org/10.1097/JPO.0b013e31829be19c>
- [105] P. Ng, P. S. V Lee, and J. C. H. Goh, “Prosthetic sockets fabrication using rapid prototyping technology,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 8, no. 1, pp. 53–59, 2002. <https://doi.org/10.1108/13552540210413310>
- [106] R. R. Williams, W. E. Howard, and S. M. Martin, “Composite sandwich structures with rapid prototyped cores,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 17, no. 2, pp. 92–97, 2011. <https://doi.org/10.1108/13552541111113835>



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

*Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:*

*Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.*

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)