

Nuevo sistema de fabricación aditiva para la creación de material compuesto utilizado en piezas médicas

PLAN DE INVESTIGACIÓN
PROGRAMA DE DOCTORADO EN FORMACIÓN EN LA SOCIEDAD DEL CONOCIMIENTO
UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

Alberto Sánchez Ramírez

DIRECTORES:

Juan A. Juanes.
Fernando Blaya Haro
Roberto D'Amato

24 de marzo de 2019

INTRODUCCIÓN

Impresión 3D (3DP), prototipado rápido (RP), fabricación aditiva (AM), fabricación en capas, ... todos estos sinónimos sirven para identificar una tecnología de fabricación que se caracteriza por la creación de piezas en tres dimensiones mediante capas de capas. Este fenómeno tecnológico ha creado tal expectativa en la sociedad que varios medios importantes como The Economist han decidido llamarlo con el siguiente calificativo: "La Tercera Revolución Industrial" [1].

La industria médica siempre ha utilizado los sistemas de fabricación más modernos para mejorar la calidad, el diseño y la seguridad. La fabricación aditiva se utiliza actualmente en muchas áreas de la medicina. Existen cuatro grupos de materiales sintéticos usados dentro de la medicina en la fabricación aditiva. Estos serían los metálicos, cerámicos, poliméricos y materiales compuestos.

Algunos ejemplos de estos materiales son la creación de piezas dentales utilizando la técnica SLM (fusión por láser selectiva) [2] o la fabricación de prótesis ortopédicas utilizando la técnica FDM (Fused Deposition Modeling), en la que el escaneado de la extremidad del paciente y el posterior tratamiento del archivo digitalizado permite fabricar con un material termoplástico una férula a medida [3]. También la impresión 3D permite el diseño y creación de tejidos y órganos con tinta orgánica [4], [5], [6].

Al mismo tiempo, hay un crecimiento en el uso de materiales compuestos avanzados en medicina como el CFRP (Plásticos reforzados con fibra de carbono), en el que la combinación correcta entre fibra de carbono y una matriz orgánica (epoxi) genera un material con mejores propiedades que las partes que lo componen por separado [7]. Este material se utiliza en la medicina ortopédica moderna y en los dispositivos protésicos [8], así como en los casos de craneoplastia [9].

El trabajo se centrará en el uso de los materiales biocompatibles poliméricos y de materiales compuestos en la fabricación aditiva. La fabricación de material compuesto mediante FFF engloba los dos aspectos necesarios para la fabricación de un material compuesto. Por un lado, se puede generar material compuesto en la obtención del hilo que posteriormente será extruido en la máquina de FFF y por otro lado se puede obtener el material compuesto en el proceso de deposición de capas intercalando dos materiales que al solidificar generen el material compuesto. Actualmente, la gran mayoría de artículos que hacen referencia a material compuesto en FFF o FDM se centran en la obtención del hilo en el que está presente un termoplástico que hace de matriz y un pequeño porcentaje de otras sustancias, ya sean partículas metálicas [10], [11],[12], [13], [11],[14], partículas cerámicas [15], fibras de CFRP [16], [17], [18], [19] o fibras de vidrio [20],[21] que hacen de refuerzo. En todos los casos se busca mejorar las propiedades de las piezas de material compuesto con respecto a las piezas fabricadas únicamente con el material termoplástico. Es importante reseñar que la mejora en resistencia sólo se produce únicamente en la dirección XY. La generación del hilo mediante material compuesto no mejora las propiedades de la pieza en la dirección de creación de las capas (XZ), por este motivo la inclusión de un refuerzo o adhesivo entre capas mejorará las propiedades en las 3 dimensiones.

El objetivo de este trabajo se centra en el análisis de un material compuesto biocompatible generado mediante las técnicas de fabricación aditiva FFF y Robocasting. El material compuesto creado a partir de la impresión en capas alternas de un adhesivo epoxi bicomponente y un termoplástico permitirá incrementar las propiedades estructurales a tracción en el plano XY [22], en el plano XZ y además mejorar la resistencia a impacto.

HIPÓTESIS DE TRABAJO Y PRINCIPALES OBJETIVOS

La creación de un material compuesto biocompatible generado a partir de la impresión en capas alternas de un adhesivo epoxi bicomponente y un termoplástico permitirá incrementar las propiedades estructurales a tracción en el plano XY, en el plano XZ y además mejorar la resistencia a impacto.

Objetivo principal.

La tesis busca crear una nueva técnica de fabricación aditiva que permita fabricar piezas de material compuesto biocompatibles que sean ligeras, resistentes y cuya geometría no esté limitada tal y como sucede con los sistemas de fabricación tradicional de material compuesto. Por este motivo se trabajará con materiales termoplásticos y adhesivos epoxi sobre una máquina de fabricación aditiva basada en la técnica de FFF. Para ello se diseñará un cabezal extrusor de adhesivo que será fabricado mediante la técnica FFF. Este nuevo extrusor será implementado en una máquina de AM RepRap junto al extrusor del filamento termoplástico. La impresión conjunta de ambos materiales biocompatibles, en capas alternas, generará un material compuesto que permitirá incrementar las propiedades estructurales de la pieza tanto en el plano XY como en el XZ, además de mejorar sus características mecánicas frente al impacto.

La comparativa de los resultados obtenidos en los ensayos entre las probetas creadas mediante la técnica FFF y las probetas fabricadas con la nueva técnica permitirá caracterizar las propiedades obtenidas con esta nueva técnica.

Objetivos secundarios.

Como parte de la metodología para alcanzar el objetivo principal se analizará:

- 1.- El proceso de diseño y construcción de la máquina,
- 2.- Las variables mecánicas de la máquina.
- 3.- Los parámetros del software utilizado para obtener los valores óptimos que permitan su correcto funcionamiento.
- 4.- El correcto conocimiento de todos estos parámetros de la máquina que permitirá generar una nueva técnica de fabricación de piezas médicas.
- 5.- Los materiales más adecuados para esta tesis analizando sus principales características para el sector de la medicina, tanto para prótesis como para piezas de protección.
- 6.- Las propiedades mecánicas obtenidas de los ensayos a tracción e impacto de las probetas realizadas mediante los materiales seleccionados (resina epoxi bicomponente y termoplásticos (PLA y PLA+fibra de carbono)).

METODOLOGÍA

- **Prospectiva tecnológica:** En esta fase se analizará el estado del arte de varios apartados que serán necesarios para la tesis. En primer lugar, se analizará la fabricación de material compuesto biocompatible en AM y sus técnicas más representativas haciendo hincapié en la fabricación por filamento fundido y el robocasting. Y en segundo lugar se analizarán los adhesivos epoxi que mejor comportamiento pudieran tener para la adhesión de termoplásticos.
- **Impresora 3D FFF:** Para la realización de la tesis es necesario obtener una impresora 3D FFF que pueda ser modificada para poder implementar el nuevo hardware. Por este motivo se analizarán las impresoras reprop del mercado y se seleccionará aquella que por geometría y dimensiones mejor se adapte al uso final que se le pretende dar. En esta etapa, se recibirá la máquina, se montará, se calibrará y se fabricarán piezas para poder comprender y entender todos los parámetros de la máquina.
- **Diseño y fabricación del cabezal dosificador:** En esta etapa se diseñarán y se fabricarán las piezas que conformarán el dosificador. Los requisitos de diseño se centrarán en las dimensiones del cartucho de epoxi bicomponente y deberá ser incluido en los carriles de la impresora 3D. El accionamiento será mecánico e incorporará componentes propios de las impresoras reprop para que sea compatible con el software y hardware de la electrónica Arduino.
- **Modificación impresora 3D para material compuesto:** La incorporación del equipo dosificador en la impresora 3D conllevará una adaptación en el carro principal de los extrusores, en la estructura de la impresora y en la electrónica. Todo este cambio permitirá generar una máquina con 2 extrusores y por lo tanto será necesario reconfigurar el firmware de la electrónica Arduino y sus parámetros de impresión. Los parámetros principales de velocidad de dosificación, velocidad de movimiento, altura de capa... se estudiarán para poder crear piezas de material compuesto.
- **Fabricación de Probetas:** En la creación de las probetas de material compuesto biocompatible, se utilizarán 2 tipos de materiales, termoplásticos y adhesivo epoxi. Las probetas se diseñarán según UNE 116005_2012 "Fabricación por adición de capas en materiales plásticos". El diseño ha sido desarrollado en dos partes distintas. En primer lugar, la probeta fue diseñada en 2D y 3D para obtener el archivo stl y luego el gcode. En segundo lugar, según el diseño anterior, se han obtenido dos archivos que nos permitirán obtener la probeta bimaterial en formato .amf. El resultado de este diseño ha permitido obtener las probetas con capas interpuestas de termoplástico y epoxi. La creación del material compuesto se realiza mediante la deposición alterna de los dos materiales. La primera capa depositada es la de termoplástico con un relleno del 100% para crear la base de la pieza que se está imprimiendo. A continuación, se deposita la capa de resina de epoxi con una reducción de perímetro para permitir que al depositar la siguiente capa de termoplástico se pueda asegurar la unión entre capas de termoplástico. El diámetro de la boquilla del cartucho de resina epoxi es de 2 mm, por lo tanto, se ha elegido un diámetro de 0,8 mm para el extrusor de termoplástico buscando la máxima igualdad en el diámetro de salida de ambos materiales. La impresora 3D asciende 0,5 mm cada vez que deposita una capa de termoplástico. En cada proceso de deposición de resina epoxi no se produce variación en altura respecto a la impresión de la capa anterior de termoplástico. La diferencia de altura entre los dos cabezales de la impresora 3D es de 0,1 mm a favor del dosificador de epoxi y se ha conseguido gracias al diseño del hardware. Esta altura es necesaria para garantizar la correcta deposición de la resina sobre la capa inferior porque se consigue evitar la creación de gotas debido a la tensión superficial y por lo tanto evitamos dosificaciones irregulares. El proceso de impresión es lineal con un relleno de material en la capa inicial y final del 100%. En el resto de capas se produce un relleno del 75% para poder entremezclar ambos materiales y crear un "composite". El ángulo en el proceso de deposición es de 45° alternando la orientación entre cada capa de termoplástico.
- **Ensayo de Probetas:** Las probetas se ensayarán según los requisitos que se contemplan en la Norma UNE 116005 "Fabricación por adición de capas en materiales plásticos" para tracción y ISO 17340 para ensayo de impacto. Se realizarán ensayos a tracción y a impacto. Se deberán ensayar al menos 5 unidades de cada tipo de probeta por este motivo se realizarán 6 unidades de cada probeta generando un total de 108 probetas que servirá para cubrir los 18 casos que se pretende estudiar. Con estos ensayos se pretende observar la influencia de epoxi y su temperatura de curado en las características mecánicas de las probetas. Se estudiará la característica anisotrópica propia del proceso de fabricación FFF, para ello se imprimirá la probeta de manera horizontal y vertical para el ensayo de tracción y horizontal para el ensayo a impacto.

MEDIOS Y RECURSOS MATERIALES DISPONIBLES

Este trabajo se desarrolla en el programa de Doctorado: Formación en la Sociedad del Conocimiento [23], [24] [25], siendo su portal, accesible desde <http://knowledgesociety.usal.es>, la principal herramienta de comunicación y visibilidad de los avances [26]. En él se irán incorporando todas las publicaciones, estancias y asistencias a congresos durante el transcurso del trabajo.

Hardware: La inclusión de este nuevo cabezal dosificador obligará a realizar modificaciones en la estructura de la impresora y en los parámetros del software de la máquina para que se pueda trabajar con dos cabezales en la misma impresión. Respecto a la estructura se modificará el puente superior para dejar espacio al dosificador del adhesivo epoxi.

Software: En la tesis se utilizarán los siguientes softwares:

-Arduino: Control de la máquina.

-Autodesk Inventor: Diseño de las probetas y obtención del archivo .stl

-Autodesk Netfabb: Revisión del mallado del archivo .stl

-Slic3r: Obtención del archivo con el código g, utilizado por la impresora D para ejecutar los movimientos de impresión.

-Repetier Host: Simulación de la impresión y verificación de los movimientos de los extrusores antes de impresión real.

Material de impresión:

En la creación de las probetas de material compuesto se utilizarán 2 tipos de materiales, termoplásticos y adhesivos epoxi. Los termoplásticos se comprarán en forma de hilo con un diámetro exterior comprendido entre 2,85 y 3 mm de diámetro. La tesis se realizará contemplando los siguientes termoplásticos: PLA (ácido poliláctico), PLA reforzado con fibra de carbono. Respecto a los adhesivos epoxi se utilizarán en formato bicomponente y en cartucho de 50 ml. Estos cartuchos están en el mercado con dimensiones estandarizadas para poder ser usados en pistolas dosificadoras y por este motivo se podrán intercambiar en el dosificador que se diseñará pensando en las dimensiones exteriores del cartucho. El adhesivo epóxi elegido ha sido Loctite EA 9461 A & B principalmente por su idoneidad en la unión de termoplásticos, por su curado a temperatura ambiente y por un tiempo de curado de 240 min.

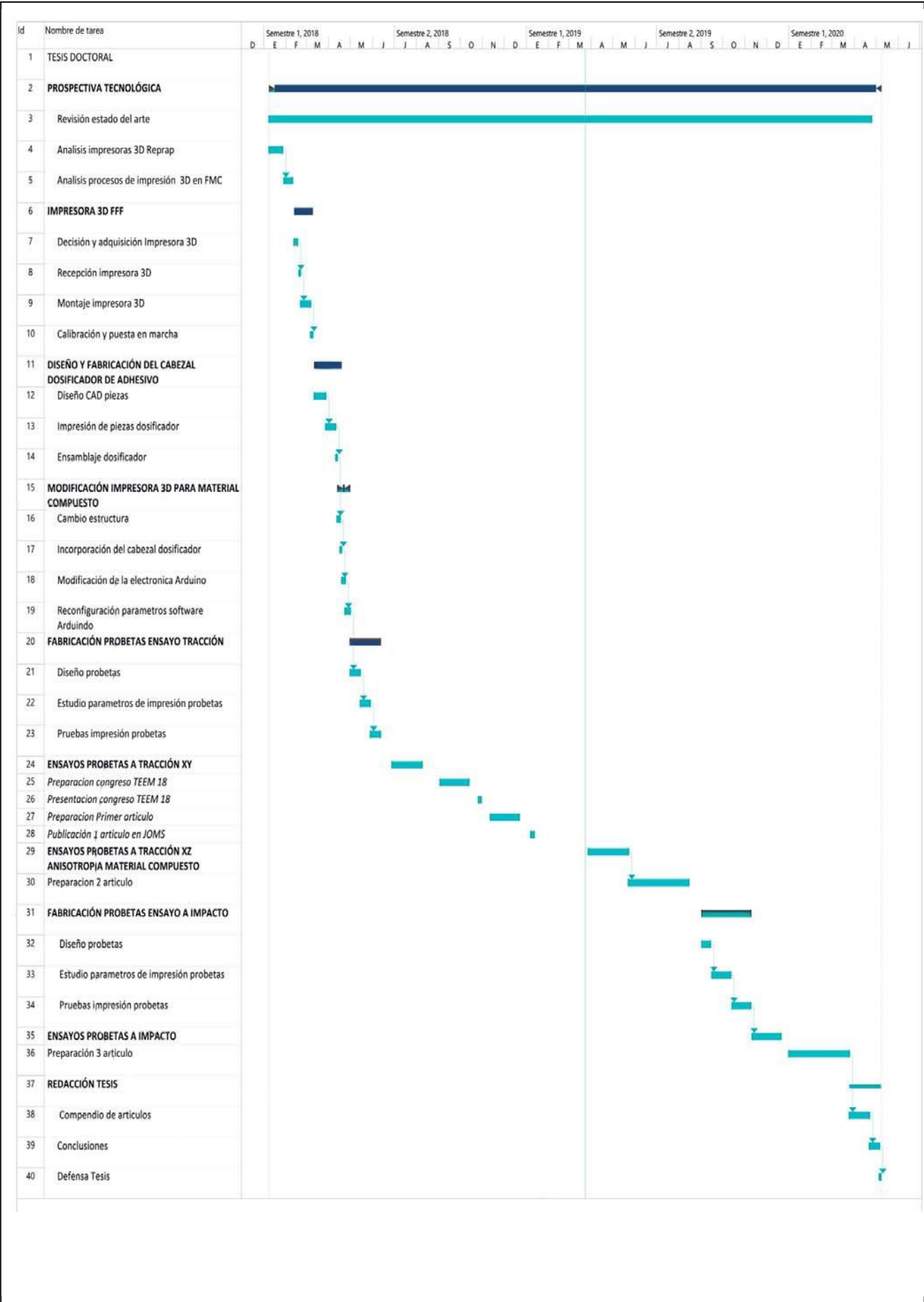
Laboratorio y ensayos:

Las probetas y los ensayos se han realizado en:

-Laboratorio de Fabricación aditiva y digitalización tridimensional de la ETSIDI (Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial) de la Universidad Politécnica de Madrid. Siendo el laboratorio oficial nº 425 de la red de laboratorios de la Comunidad de Madrid.

-Laboratorio de plásticos de la ETSIDI (UPM).

PLANIFICACIÓN TEMPORAL



REFERENCIAS

- [1] The Economist, "The third Industrial Revolution," 2012.
- [2] A. Gebhardt, F. M. Schmidt, J. S. Hötter, W. Sokalla, and P. Sokalla, "Additive Manufacturing by Selective Laser Melting: The realizer desktop machine and its application for the dental industry," *Phys. Procedia*, vol. 5, no. PART 2, pp. 543–549, 2010.
- [3] F. Blaya, P. S. Pedro, J. L. Silva, R. D'Amato, E. S. Heras, and J. A. Juanes, "Design of an Orthopedic Product by Using Additive Manufacturing Technology: The Arm Splint," *J. Med. Syst.*, vol. 42, no. 3, 2018.
- [4] F. P. W. Melchels, M. A. N. Domingos, T. J. Klein, J. Malda, P. J. Bartolo, and D. W. Huttmacher, "Additive manufacturing of tissues and organs," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 37, no. 8, pp. 1079–1104, 2012.
- [5] H. N. Chia and B. M. Wu, "Recent advances in 3D printing of biomaterials," *J. Biol. Eng.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–14, 2015.
- [6] R. R. Jose, M. J. Rodriguez, T. A. Dixon, F. Omenetto, and D. L. Kaplan, "Evolution of Bioprinting and Additive Manufacturing Technologies for 3D Bioprinting," *ACS Biomaterials Science and Engineering*. 2016. [7] A. Miravete and L. Castejón, "Materiales compuestos," *Temas de disseny*, vol. 20, pp. 123–139, 2002.
- [8] M. S. Scholz et al., "The use of composite materials in modern orthopaedic medicine and prosthetic devices: A review," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 71, no. 16, pp. 1791–1803, 2011.
- [9] W. Saringer, I. Nöbauer-Huhmann, and E. Knosp, "Cranioplasty with individual Carbon Fibre Reinforced Polymere (CFRP) medical grade implants based on CAD/CAM technique," *Acta Neurochir. (Wien)*, vol. 144, no. 11, pp. 1193–1203, 2002.
- [10] M. Nikzad, S. H. Masood, I. Sbarski, and A. Groth, "A Study of Melt Flow Analysis of an ABS-Iron Composite in Fused Deposition Modelling Process," *Tsinghua Sci. Technol.*, vol. 14, no. June 2009, pp. 29–37, 2009.
- [11] M. Nikzad, S. H. Masood, and I. Sbarski, "Thermo-mechanical properties of a highly filled polymeric composites for Fused Deposition Modeling," *Mater. Des.*, vol. 32, no. 6, pp. 3448–3456, 2011.
- [12] S. H. Masood and W. Q. Song, "Materials & Design Development of new metal / polymer materials for rapid tooling using Fused deposition modelling," *Mater.*, vol. 25, pp. 587–594, 2004.
- [13] S.H. Masood and W.Q. Song, "Thermal characteristics of a new metal / polymer material for FDM rapid prototyping process," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 25, no. 4, pp. 309–315, 2005.
- [14] N. Sa'ude, S. Masood, M. Nikzad, and M. Ibrahim, "Dynamic Mechanical Properties of Copper-ABS Composites for FDM Feedstock," *Int. J. Eng. Res. Appl.*, vol. 3, no. 3, pp. 1257–1263, 2013.
- [15] 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.
- [16] M. L. Shofner, K. Lozano, F. J. Rodríguez-Macías, and E. V. Barrera, "Nanofiber-reinforced polymers prepared by fused deposition modeling," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 89, no. 11, pp. 3081–3090, 2003.
- [17] M. L. Shofner, F. J. Rodríguez-Macías, R. Vaidyanathan, and E. V. Barrera, "Single wall nanotube and vapor grown carbon fiber reinforced polymers processed by extrusion freeform fabrication," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 34, no. 12, pp. 1207–1217, 2003.
- [18] 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, 2015. [19] H. L. Tekinalp et al., "Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 105, no. 2014, pp. 144–150, 2014.
- [20] L. Novakova-Marcincinova and J. Novak-Marcincin, "Production of Composite Material by FDM Rapid Prototyping Technology," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 474, no. 2014, pp. 186–191, 2014.
- [21] W. Zhong, F. Li, Z. Zhang, L. Song, and Z. Li, "Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 301, no. 2, pp. 125–130, 2001.
- [22] A. Sánchez Ramírez, R. D. Amato, F. Blaya Haro, M. I. Islan Marcos, and J. A. Juanes, "Novel Technique Based on Fused Filament Fabrication (FFF) and Robocasting to Create Composite Medical Parts," *J. Med. Syst.*, 2019.
- [23] F. J. García-Peñalvo, "Formación en la sociedad del conocimiento, un programa de doctorado con una perspectiva interdisciplinar," *Educ. Knowl. Soc.*, vol. 15, no. 1, pp. 4–9, 2014.
- [24] F. J. García-Peñalvo, "Edición 2018-2019 del Kick-off del Programa de Doctorado "Formación en la Sociedad del Conocimiento," Seminarios del Programa de Doctorado en Formación en la Sociedad del Conocimiento (23 de octubre de 2018), Salamanca, España, 2018. .
- [25] F. J. García-Peñalvo, A. García-Holgado, and M. S. Ramírez-Montoya, "The PhD Corner: TEEM 2018 Doctoral Consortium," in *TEEM'18 Proceedings of the Sixth International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality (Salamanca, Spain, October 24th-26th, 2018)*, 2018, pp. 979–983.
- [26] A. García-Holgado, F. J. García-Peñalvo, and M. J. Rodríguez-Conde, "Definition of a Technological Ecosystem for Scientific Knowledge Management in a PhD Programme," in *Proceedings of the 3rd International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality*, 2015, pp. 695–700.