

Optimización Del Proceso De Manufactura De Un Filamento Biocompatible De Bajo Costo Para
Impresión 3D.

Valentina Guevara Reyes y Juan Pablo Urrego López

Trabajo de Grado Para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director:

Alberto David Pertuz Comas

PhD. En Ingeniería Mecánica.

Universidad Industrial De Santander
Facultad De Ingeniería Fisicomecánicas
Escuela De Ingeniería Mecánica
Bucaramanga

2023

Dedicatoria

Dedico este trabajo principalmente a Dios, quien ha sido mi guía y fortaleza. También quiero dedicar este trabajo a mis padres, abuelos, hermanos y novia, quienes han sido fuente de motivación, además de un gran apoyo para mi vida y mi formación académica.

Juan Pablo.

Este proyecto va dedicado con todo amor a mi padre Jorge Guevara y mi madre Lorena Reyes por su sacrificio y esfuerzo, por darme una carrera para mi futuro y por siempre creer en mis capacidades, quienes con sus palabras de aliento no me dejaban declinar para que saliera adelante. A mi hermana Nicole, por ser fuente de motivación para poder superarme cada día más y por su constante perseverancia en mi formación académica. Tu apoyo ha sido fundamental para lograr culminar esta tesis. Espero que sigamos avanzando juntas en este camino de la educación y el crecimiento personal.

A mis compañeros y docentes que sin esperar nada a cambio compartieron su conocimiento. A mi segunda madre Sarita Ortiz, mis tíos, mis abuelos y a todas aquellas personas que a lo largo de estos años han estado apoyándome de una u otra manera fueron pilar para mi desarrollo profesional.

Valentina.

Agradecimientos

Quiero agradecer a Dios por haberme dado la fortaleza y el ánimo necesarios para llevar a cabo este proyecto. Agradezco a mis padres por brindarme su amor incondicional y apoyo, a mis abuelos por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia, a mis hermanos por estar siempre a mi lado, y a mi novia por ser mi inspiración y motivación. Este logro no solo es mío, sino también de aquellos que me han amado y apoyado. Les agradezco por ser parte de mi vida y mi familia. De igual forma Agradezco profundamente al Profesor Alberto Pertuz por su invaluable dirección en este proyecto, así como a la Universidad Industrial de Santander por proporcionar los recursos necesarios para su ejecución. También agradezco a todos los docentes que enriquecieron mi formación académica con sus experiencias y conocimientos. Su apoyo y enseñanzas fueron cruciales para alcanzar este logro.

Juan Pablo.

Agradecida con la vida por permitirme tener a mi familia la cual siempre me apoyo en cada decisión y proyecto. Gracias por creer en mi porque la vida es hermosa y una de las principales características es poder compartir y disfrutar con quienes amamos, podemos ayudar y guiar a muchas personas si lo permiten, pero también podemos ser ayudados y guiados; por esto mismo, quiero exaltar la labor de todos mis amigos, todos aquellos que estuvieron presentes en el desarrollo de mi tesis, agradezco mucho por mis profesores y a la universidad en general por todas las oportunidades que me ha brindado las cuales son incomparables.

Valentina.

Tabla de Contenido

Introducción	11
1. Objetivos	13
1.1 Objetivo General	13
1.2 Objetivos Específicos.....	13
2. Marco Teórico.....	14
2.1 Referentes teóricos	14
2.1.1 Ingeniería biomédica.....	14
2.1.2 Materiales compuestos.....	15
2.1.3 Ácido poliláctico PLA.....	18
2.1.4 Hueso de cerdo.....	21
2.1.5 Extrusión de polímeros	21
2.1.5.1 Tipos de extrusoras.	22
2.1.5.2 Proceso de extrusión.	24
3. Revisión Bibliográfica	26
3.1 Antecedentes internacionales	26
3.2 Antecedentes nacionales	29
4. Metodología Experimental.....	30
4.1 Materiales.....	30
4.1.1 Acido poliláctico (PLA).....	31

4.1.2 Hueso de cerdo.....	32
4.2 Limpieza del hueso de cerdo.....	33
4.3 Molienda y tamizado del hueso de cerdo.....	35
4.4 Proceso de extrusión.....	36
4.4.1 Filamento sin aditivo (PLA + polvo de hueso de cerdo).....	38
4.4.2 Filamento con aditivo (PLA + polvo de hueso de cerdo + PVA).....	40
5. Caracterización Mecánica.....	43
5.1 Ensayo de Tracción.....	43
6. Resultados.....	45
6.1 Filamento de PLA.....	45
6.2 Filamento fino sin aditivo (FSC).....	46
6.3 Filamento fino con aditivo (FCC).....	48
6.4 Filamento medio sin aditivo (MSC).....	50
6.5 Filamento medio con aditivo (MCC).....	51
6.6 Filamento grueso sin aditivo (GSC).....	53
6.7 Filamento grueso con aditivo (GCC).....	55
7. Análisis de los resultados.....	56
8. Conclusiones.....	59
9. Recomendaciones.....	61
Referencias Bibliográficas.....	62

Lista De Tablas

Tabla 1 Ficha técnica Ingeo biopolymer 2003D NatureWorks	31
Tabla 2 Criterios de calificación	41
Tabla 3 Matriz de selección	41
Tabla 4 Propiedades de tracción del PLA	46
Tabla 5 Propiedades de tracción de FSC.....	46
Tabla 6 Propiedades de tracción de FCC	48
Tabla 7 Propiedades de tracción de MSC	50
Tabla 8 Propiedades de tracción de MCC.....	52
Tabla 9 Propiedades de tracción de GSC	53
Tabla 10 Propiedades de tracción de GCC	55

Lista De Figuras

Figura 1 Representación estructural de un material compuesto.....	16
Figura 2 Esqueleto Porcino	33
Figura 3 Proceso de limpieza del hueso de cerdo	34
Figura 4 Proceso de molienda y tamizado del hueso de cerdo	36
Figura 5 Proceso de purgado.....	38
Figura 6 Perfil de temperaturas para la extrusión de filamentos.....	39
Figura 7 Proceso de extrusión filamento con aditivo.....	42
Figura 8 Muestras de filamento.....	43
Figura 9 Maquina Universal MTS Bionix	44
Figura 10 Gráfica esfuerzo vs deformación FSC	47
Figura 11 Gráfica esfuerzo vs deformación FCC	49
Figura 12 Gráfica esfuerzo vs deformación MSC.....	51
Figura 13 Gráfica esfuerzo vs deformación MCC	52
Figura 14 Módulo elástico promedio de los filamentos.....	56
Figura 15 Esfuerzo máximo promedio de los filamentos	58

Resumen

Título: Optimización Del Proceso De Manufactura De Un Filamento Biocompatible De Bajo Costo Para Impresión 3D.*

Autor: Valentina Guevara Reyes, Juan Pablo Urrego López**

Palabras Clave: Filamento Biocompatible, biopolímero, PLA, Hueso, Cerdo, PVA.

Descripción: El presente proyecto de investigación busca generar alternativas de bajo costo para la fabricación de biopartes por medio de la optimización del proceso de manufactura de un filamento biocompatible para impresión 3D, a través de un exhaustivo proceso de limpieza del que se obtuvo tres tamaños de polvo de hueso diferentes: Fino 125 μm , Medio 250 μm y Grueso 600 μm . Seguido de un análisis de transferencia de calor de sistemas concentrados, con el cual, se determinaron los puntos óptimos de operación de la extrusora para unos filamentos con mejores características y, a su vez, una mejor incorporación del elemento reforzante con el uso de acetato de polivinilo como agente compatibilizante. Se elaboraron un total de 19 tipos de filamentos, variando su porcentaje en peso 10%, 20% y 30%, junto con el tamaño del polvo de hueso; estos se caracterizaron mecánicamente a tracción bajo la norma ASTM D638. Se obtuvo que el porcentaje en peso óptimo de polvo de hueso es del 10% y que el tamaño con mejores propiedades mecánicas es el de tamaño medio (250 μm), siendo así el filamento M10CC aquel que presenta una mejora significativa respecto a los demás, con un aumento del 25% en el módulo de elasticidad, un 23% en el esfuerzo de fluencia y un 12% en el esfuerzo máximo a la tracción.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Alberto David Pertuz Comas. Doctor en Ingeniería Mecánica.

Abstract

Title: Optimization of the Manufacturing Process of a Low-Cost Biocompatible Filament for 3D Printing.*

Author: Valentina Guevara Reyes, Juan Pablo Urrego López**

Keywords: Biocompatible Filament, biopolymer, PLA, Bone, Pork, PVA.

Description: This research project aims to generate low-cost alternatives for the manufacturing of bioparts through the optimization of the manufacturing process of a biocompatible filament for 3D printing. This involves a thorough cleaning process that resulted in three different sizes of bone powder: Fine 125 μm , Medium 250 μm , and Coarse 600 μm . Followed by an analysis of heat transfer from concentrated systems, determining the optimal operating points for the extruder to produce filaments with improved characteristics and enhanced incorporation of the reinforcing element through the use of polyvinyl acetate as a compatibilizing agent. A total of 19 filament types were produced, varying in weight percentage (10%, 20%, and 30%) along with the bone powder size. These filaments were mechanically characterized in tension according to ASTM D638 standards. It was determined that the optimal weight percentage of bone powder is 10%, and the size with the best mechanical properties is the medium size (250 μm). Therefore, the M10CC filament showed a significant improvement compared to others, with a 25% increase in the modulus of elasticity, a 23% increase in yield strength, and a 12% increase in maximum tensile strength.

* Thesis

**Faculty of physic-mechanics engineering. School of Mechanical Engineering, Director: Alberto David Pertuz Comas. PhD. in Mechanical Engineering.

Glosario

Filamento Biocompatible: hebra larga y delgada de un material sintético o natural, usado como materia prima en procesos de impresion 3D.

PH: polvo de hueso de cerdo.

PLA: ácido poliláctico, polímero termoplástico que se obtiene de materiales orgánicos biodegradables con propiedades biocompatibles además de buena resistencia mecánica a la tracción.

PVA: acetato de polivinilo, polímero termoplástico normalmente usado como recubrimiento, presente en variedad de pegamentos y cintas adhesivas.

Introducción

Los procesos de manufactura y producción han sido de gran ayuda para la evolución del hombre, permitiéndole la dignificación de la vida humana por medio de la elaboración de herramientas capaces de facilitar y solucionar las diferentes necesidades y exigencias de la sociedad, las cuales con el paso del tiempo cambian y con ellas dichos procesos deben también cambiar y adaptarse a estos cambios. En la actualidad, como respuesta a las nuevas necesidades y exigencias del mercado, surge la manufactura aditiva (MA) teniendo como objetivo el aumento de la eficiencia, la productividad y la reducción de costos; debido a esto y a su portabilidad, es uno de los métodos más utilizados y por ende de los más conocidos.

La impresión 3D es una tecnología que se encuentra dentro de la categoría “Extrusión de material” debido a que parte de un material en forma de filamento que es succionado y fundido por el extrusor de la impresora y depositado capa a capa sobre una placa, formando la pieza deseada que normalmente se modela a través de programas CAD. (Saroia et al., 2020). Esta tecnología ha mejorado los procesos de diseño y fabricación marcando un antes y un después debido a su gran impacto en sectores industriales como el automotriz, la manufactura industrial, la electrónica, la aeroespacial, la medicina, la arquitectura y los deportes debido a la posibilidad de elaborar una gran diversidad de elementos con geometrías complejas, las cuales presentan una mayor dificultad con los métodos de manufactura tradicionales como lo son el torneado y frezado; evidenciando que la impresión 3D aporta aspectos positivos como rapidez, adaptación y bajos costos en los procesos de fabricación, por otra parte presenta limitaciones como el tamaño, la baja producción y la baja resistencia mecánica de las piezas, para dar solución a esta última limitación los

investigadores se han enfocado en los materiales compuestos que al agregar diferentes tipos de rellenos (como la fibra de carbono, fibra de vidrio, fibra de kevlar, fibra de yute, fibra de madera, hueso molido, entre otros) a la matriz comúnmente polimérica (PLA, PCL, ABS, etc.) da como resultado un FRP (Plástico Reforzado con Fibras) el cual tiende a mejorar sus propiedades mecánicas. (Dixit & Jain, 2021).

La ingeniería biomédica nace a partir de la aplicación de los principios de la ingeniería en la medicina, con el objetivo de diseñar y desarrollar elementos médicos con mejores características que permitan el diagnóstico y tratamiento de enfermedades, en donde dichos elementos deben cumplir con la cualidad de ser biomateriales debido a que suelen ser empleados en el interior del cuerpo humano o en contacto con tejidos biológicos. Esta ingeniería actúa en tres ejes principales: 1) Biomodelos para la preparación de intervenciones quirúrgicas, 2) Diseño y fabricación de dispositivos biomédicos personalizados (prótesis, implantes, férulas, guías, etc.) y 3) Andamios porosos para medicina regenerativa e ingeniería de tejidos. (J. Rojas-Lozano et al., 2019).

El presente proyecto de grado se enfoca en la optimización del proceso de manufactura de un filamento biocompatible para impresión 3D, con el objetivo de superar las limitaciones identificadas en un proceso de manufactura previo, desarrollado por (García López & Paredes Torres, 2022). Para esto se abordó inicialmente el proceso de limpieza de cerdo, seguido de un análisis de transferencia de calor para poder determinar las variables de entrada óptimas de la extrusora permitiendo un filamento con mejores características, además del uso de acetato de polivinilo (PVA) como posible agente compatibilizante entre la matriz de ácido poliláctico (PLA) y el refuerzo de polvo de hueso (PH) de cerdo. Garantizando así la consistencia y la calidad del filamento resultante.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Desarrollar, analizar y optimizar el proceso de elaboración de un filamento biocompatible para impresión 3D con el propósito de generar una alternativa para la fabricación de biopartes.

1.2 Objetivos Específicos

- Estudiar, analizar y ejecutar un método para obtener hueso molido de cerdo para posteriormente clasificarlo en tres tamaños diferentes mediante tamizado.
- Definir las variables de funcionamiento óptimo de la máquina extrusora de la Escuela de Ingeniería Mecánica para el desarrollo de filamentos para impresión 3D a base de PLA y hueso molido de cerdo.
- Generar filamentos para impresión 3D variando la proporción y el tamaño de hueso molido.
- Determinar la resistencia mecánica de los filamentos por medio de ensayos de tracción bajo la norma ASTM D638, para identificar y seleccionar la proporción y el tamaño de hueso que ofrece las mejores propiedades mecánicas.

2. Marco Teórico

2.1 Referentes teóricos

En esta sección se presentan los conceptos teóricos necesarios para el desarrollo y comprensión del proyecto, con un enfoque macroscópico, empezando con los conceptos más generales hasta los conceptos más específicos.

2.1.1 Ingeniería biomédica

Esta ciencia nace a partir del 2000 A.C cuando los egipcios crean la primera prótesis del dedo gordo del pie, después en 1696 Pieter Verduyyn diseña la primera prótesis debajo de la rodilla, en 1959 se da la primera conferencia mundial de ingenieros biomédicos en París acto seguido en el 2001 Kenneth Matsumura diseña el hígado bioartificial y en el 2013 se crean las impresoras 3D.

En efecto esa disciplina aplica todos los principios de la ingeniería para realizar soluciones en la salud humana y animal gracias al empleo de la tecnología; la ciencia no deja de avanzar y con ello la medicina. A lo anterior hay que sumar la llegada de las impresoras 3D por lo tanto la medicina entra en una nueva dimensión a través de la creación de biomateriales y tejidos. Siendo una rama de la ingeniería, en la cual en el extranjero tiene mayor desarrollo en todos los sentidos que en nuestro país a pesar de que hay diversas instituciones educativas que ofrecen el programa, los ingenieros que logran culminar su carrera aplican su conocimiento en el acrecentamiento de equipos tecnológicos, lo que hacen más necesarios dichos ingenieros ya que están llegando grandes cambios en el área de la salud.

En atención a lo anterior, estamos en un mundo donde el cambio siempre es apresurado y la ingeniería va de la mano con la biología, esa gama de servicios digitales inteligentes perpetuamente estará en provecho e incentiva a las personas en la gestión de vivir saludablemente y con ello mejorar el estilo de vida.

Lo mejor de todo es que esos cambios ya están presentes en nuestro país Colombia en el que la ingeniería tiene un rol importante donde combina habilidades de la biología y medicina, los retos son extensos y variados pues se crea nuevos métodos personalizados en el campo de la salud como por ejemplo al crear prótesis para suplantar miembros perdidos en accidentes igualmente la exploración de soluciones orientada en el tratamiento de patologías crónicas, o sea, desarrolla técnicas para la regeneración de órganos, lo mismo sucede con las patologías infecciosas. Afortunadamente la tecnología ofrece un gran dominio para la imaginación y creación de nuevos métodos acoplables en este medio.

2.1.2 Materiales compuestos

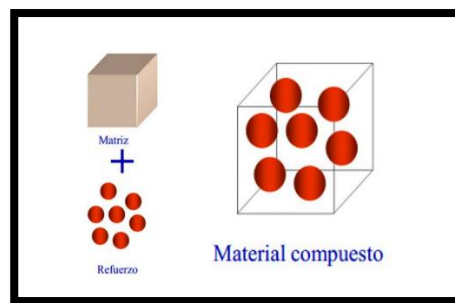
Se conoce por materiales compuestos aquellos materiales que se forman por la unión de dos o más materiales para conseguir la combinación de propiedades que no es posible obtener en los materiales originales. En 1907 se crea el primer material plástico totalmente sintético, llamado baquelita y fue inventado por el estadounidense Leo Baekeland, también fue utilizado para consumo y en aplicaciones industriales. Sin embargo, a pesar de que existen materiales con excelentes propiedades pues las aplicaciones prácticas son limitadas debido a su costo elevado porque en algunos casos se genera incompatibilidad del material y/o se encuentra una dificultad en la fabricación.

Es importante destacar la escala de longitudes donde se trata la microestructura (entre 10^{-7} y 10^{-4} m \equiv 0.1 μ m y 100 μ m), macroestructura ($> 10^{-3}$ m \equiv >1 mm) y la nanoestructura (o estructura atómica) [$< 10^{-8}$ m \equiv < 10 nm \equiv < 100 Å]. La microestructura de la fase dispersa incluye forma, tamaño, distribución y orientación de las partículas. Es relevante discernir notoriamente las relaciones en peso o en volumen ya que las densidades de estas fases pueden ser muy diferentes.

Aunque existe una gran variedad de materiales compuestos, en todos se pueden distinguir las siguientes partes, como se ilustra en la figura 1.

Figura 1

Representación estructural de un material compuesto



Nota. Esta imagen representa la estructura interna de un material compuesto. Tomada de (Romay Romero & Hernández Díaz, 2019).

Agente reforzante: es una fase de carácter discreto y su geometría es fundamental a la hora de definir las propiedades mecánicas del material.

Fase matriz o simplemente matriz: tiene carácter continuo y es la responsable de las propiedades físicas y químicas. Transmite los esfuerzos al agente reforzante. También lo protege y da cohesión al material.

Algunos materiales compuestos:

Clasificados por el tipo de fibra:

- Madera (fibras de celulosa en una matriz de lignina y hemicelulosa).
- Plástico reforzado con carbono o CFRP o "fibra de carbono".
- Plástico reforzado con vidrio (GRP, GFRP o, informalmente, "fibra de vidrio").

Clasificados por la matriz:

- Termoplásticos reforzados por fibra larga.
- Termoplásticos tejidos de vidrio.
- Compuestos termoformados o termoestables.

Compuestos de matriz metálica o MMCs.

- Cermet (cerámica y metal).
- Fundición blanca.
- Metal duro (carburo en matriz metálica).
- Laminado metal-intermetal.

Compuestos de matriz cerámica:

- Hormigón/Concreto.
- Carbono-carbono reforzado (fibra de carbono en matriz de grafito).
- Hueso (matriz ósea reforzada con fibras de colágeno).

- Adobe (barro y paja).

Compuestos de matriz orgánica/agregado cerámico:

- Madreperla o nácar.
- Concreto asfáltico.

Madera mejorada:

- Contrachapado.
- Tableros de fibra orientada (OSB).
- Trex.
- Weatherbest (fibra de madera reciclada en matriz de polietileno).
- Pykrete (aserrín en matriz de hielo).

Otro ejemplo de material compuesto sería el filamento de PLA más el hueso de cerdo para impresiones 3D, material que ha cambiado técnicas, procedimientos y tecnologías que resuelve los problemas cotidianos.

2.1.3 Ácido poliláctico PLA

Este polímero cuenta con grandes características y es de gran uso en la impresión 3D debido a lo siguiente:

- Inodoro, permanente, claro y brillante.
- Altamente resistente ante la humedad y la grasa.
- Similar al polietileno en cuanto a desarrollar barreras para sabores y olores.

- Suficientemente extensible y elástico.
- Su nivel de inflamabilidad es muy bajo lo que lo hace estable a la luz UV.
- Aunque es flexible el PLA 3D puede formularse a fin de que sea rígido.
- Puede polimerizarse con otros materiales.
- Su proceso de fabricación puede variar a fin de adoptar características mecánicas.

Este material es considerado como un fluido pseudoplástico no newtoniano, esto significa que su viscosidad (resistencia al flujo) cambiará dependiendo de la tensión a la que esté sometido. Específicamente, el PLA es un material de corte fino, lo que significa que la viscosidad disminuye con la tensión aplicada. El PLA es un material eco-amigable, ya que no es dañino para la salud, es biodegradable también y no se necesita mucha potencia durante la impresión lo cual hace que adquiera una gran aprobación por las personas. La temperatura de impresión es relativamente baja (su temperatura ideal de impresión suele ser de 180°C) eso significa que en el momento de la impresión es poco probable su deformación y tampoco emite humos olorosos ni nocivos durante el proceso. Asimismo, el producto final está facilitado para lijar y/o pintar, es muy relevante mantener las herramientas constantemente frías para evitar que la pieza se derrita.

Este material no es seguro para la comida una vez impreso. Esto se debe a que la impresión deja pequeños huecos y poros entre las capas donde se puede almacenar humedad y pedazos de comida, resultando en un acumulado de bacterias y moho. Incluso pueden causar derrames de plástico provenientes del extrusor mientras se mueven entre capas. Esto crea hilos entre áreas separadas de su impresión, lo que puede ocasionar una impresión fallida. Para evitar esto, un ventilador frío es necesario y se recomienda programarlo para que funcione después de las

primeras capas para evitar adhesión en ellas, es decir, siempre imprimir con el ventilador encendido.

Este biopolímero es ideal para casos donde la estética y forma son más importantes que la fuerza y durabilidad, por eso tienden a ser más decorativos.

Hay unos requerimientos básicos y especificaciones, detalladas a continuación, que aseguran una impresión exitosa:

- Punto de fusión: 150-160°C.
- Temperatura de impresión: 180-230°C.
- Cama de impresión calentada: No es necesaria.
- Enfriamiento: Un ventilador frío es necesario.
- Cabina de impresión cerrada: No es necesaria.
- Almacenaje de filamentos: Contenedor hermético.

La temperatura del extrusor de su impresora depende del diámetro de sus filamentos PLA (hay 2 grosores estándar: 1.75mm y 2.85mm) y varía entre 180°C y 230°C. La velocidad de impresión 3D puede llegar a 90 mm por segundo e imprimir a una velocidad menor (40-50 mm/s).

Pero no todo es color de rosa con este biomaterial, resulta que a pesar de que se realiza a partir de materiales naturales pues puede degradarse rápidamente al someterlo a proceso de compostaje industrial, de no ser así puede tardar hasta 80 años en su descomposición, convirtiéndose así en un contaminante plástico más.

Las empresas que más preponderan son: la austriaca WeforYou, desarrollador de polímeros y soluciones sostenibles, la empresa alemana Evonik centrada en el desarrollo de PLA para el sector médico, la empresa estadounidense NaturaWorks gran productor de biopolímeros, y la

empresa Corbion, con sede en los Países Bajos, centrada en el desarrollo de resinas de alto rendimiento con PLA. En general, el precio de un filamento de uso doméstico se encuentra entre 20€ – 70€ el kilogramo. En conclusión, este filamento es muy buena opción para empresas y personas del común que les guste generar prototipos ya que tiene un bajo precio en el mercado y al momento de su impresión es muy fácil.

2.1.4 Hueso de cerdo

El cerdo es un animal mamífero que puede encontrarse en estado salvaje o doméstico. El nombre científico de la especie en estado natural es *Sus scrofa* y coloquialmente se lo conoce como jabalí o cerdo silvestre.

Todos los huesos están hechos por colágeno y fosfato cálcico lo que hace que transfiera la resistencia y dureza al esqueleto, los huesos acaparan calcio, un mineral que se libera en la sangre cuando el cuerpo lo pida. Es decir, su homeostasis mineral son el calcio, el fosfato, el magnesio y el sodio. Existen de tejidos compactos y esponjosos también de tejido reticular, no laminar y fibroso.

2.1.5 Extrusión de polímeros

Desde la existencia del plástico y su auge en la vida cotidiana, el reciclaje se ha convertido en el mayor exponente salvador para el planeta y el medio ambiente, antes de que se crearan los polímeros el planeta tierra brindaba todo lo necesario hasta que fue inevitable seguir evolucionando y se comienza a mezclar ciertas sustancias para suplir esas carencias, como la goma.

No fue sino hasta el siglo XIX que se descubre el caucho, luego en 1820 se crea masa plástica al triturar y mezclándolo con goma cruda, después viene la creación del neumático transformando el caucho crudo en 1839, mucho después en el desarrollo industrial de polímeros en 1930 se crea el poliestireno (PE) y el policloruro de vinilo (PVC) y en 1951 se produce espuma rígida de poliestireno en laboratorios. En 1953, el polietileno comienza a tener más fuerza por Karl Ziegler y un año después el polipropileno.

En 1970 empiezan las nuevas tecnologías a implementarse en esta área de creación de polímeros, incluyendo la extrusora que es la más común en la transformación dentro de las industrias ya que mediante este equipo se puede elaborar materiales compuestos ya sean de procedencia mineral o vegetal, algunos con ciertos aditivos para ciertos polímeros especiales, como lo son los biodegradables.

2.1.5.1 Tipos de extrusoras. Las extrusoras ‘húmedas’ de tornillo segmentado o barril de un solo tornillo son el diseño de extrusión por cocción que más se aplica en las industrias de procesamiento de alimentos, ‘húmedo’ significa que el vapor y el agua pueden ser inyectados en el barril durante el procesamiento.

Una extrusora típica de un solo tornillo consiste en un contenedor directo, un tornillo de alimentación, cilindro de pre-acondicionamiento, barril de la extrusora, matriz y cuchilla. El contenedor proporciona un búfer de la materia prima por lo que la extrusora puede funcionar sin interrupción.

Para garantizar el buen funcionamiento de la extrusora es importante que la velocidad sea variable, es decir, que los materiales sean añadidos uniformemente. La primera aplicación comercial importante de la extrusora de simple tornillo en la industria del procesamiento de

alimentos fue la conversión de harina de sémola en pasta usando tornillos sólidos. Este proceso de formado de baja cizalla y temperatura encontró por primera vez la producción comercial en las décadas de 1920 y 1930, y sigue siendo un proceso estándar a pesar de que el equipo ha mejorado.

El transporte de material de la extrusora de tornillo único se basa principalmente en la fricción, lo que limita el rendimiento de alimentación de la extrusora, tampoco es adecuada para algunos procesos, como la coloración de polímeros, el procesamiento de polvo termo endurecible, etc.

Las ventajas de la extrusora de un tornillo son: diseño avanzado, alta calidad, buena plastificación, bajo consumo de energía, bajo ruido, funcionamiento suave, gran capacidad de carga, larga vida útil y otras características. La temperatura de plastificación de alto cizallamiento y baja masa fundida garantiza el alto rendimiento, la baja temperatura y la extrusión de medición de baja presión de los materiales. Además, el precio de diseño de la extrusora de un solo tornillo es barato, por lo que la extrusora de un solo tornillo es ampliamente utilizada.

En las extrusoras de doble tornillo engranado, los tornillos se solapan parcialmente entre sí en una pista de barril en forma de ocho, lo que resulta en el bombeo positivo, una mezcla eficiente y una acción de limpieza automática (aunque sólo en máquinas co-rotativas: la mezcla está limitada en las máquinas que giran en sentido contrario). Esto es lo que diferencia a este tipo de extrusoras de las máquinas no engranadas y de un solo tornillo. El término "de doble tornillo" se aplica a extrusoras con dos tornillos de igual longitud, ambos colocados en el interior del mismo barril. Las extrusoras de doble tornillo son mucho más complicadas que las extrusoras de un solo tornillo, pero al mismo tiempo proporcionan mucha más flexibilidad y un mejor control.

En comparación con la extrusora de un solo tornillo, la extrusora de doble tornillo tiene muchas ventajas para reducir el costo de producción y mejorar la eficiencia. En el mantenimiento del equipo, la extrusora a menudo necesita quitar primero el sistema de calefacción, enfriamiento y luego extraer el tornillo y como es fácil de abrir, se puede encontrar el grado de desgaste del elemento del tornillo y el revestimiento interno del cilindro en cualquier momento, para llevar a cabo un mantenimiento o reemplazo efectivo. En la actualidad, la tendencia de desarrollo de la extrusora de doble tornillo del mundo es hacia un alto par, alta velocidad, bajo consumo de energía, el efecto de la alta velocidad es la alta productividad. La extrusora de doble husillo dividido pertenece a esta categoría, su velocidad es de hasta 500 RPM. Por lo tanto, tiene ventajas únicas en el procesamiento de materiales de alta viscosidad y sensibles al calor.

2.1.5.2 Proceso de extrusión. Las extrusoras son máquinas industriales que aplican presión sobre medios sólidos y viscosos para forzar su paso a través de la abertura de una boquilla. La extrusión, también conocida como trefilado, es una tecnología de fabricación que se utiliza para producir todo tipo de productos.

Usualmente se emplean estas máquinas para la creación de hilos PET son las siglas de polietileno tereftalato. RPET, las de PET reciclado. Esta tecnología permite reciclar poliéster para, por ejemplo, dar una segunda vida a las botellas desechables de agua. Esos hilos generalmente miden 25 metros de largo en una dimensión industrial, la producción química o síntesis del PET se lleva a cabo mediante dos etapas:

- La síntesis del monómero de poliéster –bis hidroxietil tereftalato (BHET)–.
- La reacción de Policondensación del monómero.

El compuesto de plástico de ingeniería implica principalmente la extrusora de doble tornillo que puede aplicarse en numerosas situaciones.

En el proceso de extrusión, por lo general, el polímero se alimenta en forma sólida y sale de la extrusora en estado fundido. En algunas ocasiones el polímero se puede alimentar fundido, procedente de un reactor. En este caso la extrusora actúa como una bomba, proporcionando la presión necesaria para hacer pasar al polímero a través de la boquilla. En otras ocasiones se extruyen los materiales sólidos, como es el caso del procesado de fibras en el que se requieren elevadas orientaciones en el material. Para el caso más corriente de la extrusión de un polímero inicialmente sólido que funde en el proceso, la extrusora, y en concreto una de husillo único, puede realizar seis funciones principales:

- Transporte del material sólido hacia la zona de fusión.
- Fusión o plastificación del material.
- Transporte o bombeo y presurización del fundido.
- Mezclado.
- Desgasificado.
- Conformado.

Debe tenerse en cuenta que no todas las funciones anteriores tienen lugar necesariamente durante la operación de todas y cada una de las extrusoras. Por ejemplo, el desgasificado o venteo únicamente se produce en las máquinas preparadas para ello. Por otra parte, el conformado no tiene por qué ser definitivo; en muchas ocasiones el producto obtenido adquiere su forma final en un proceso secundario puesto que las extrusoras se emplean con frecuencia para mezclar los componentes de formulaciones que se procesarán posteriormente mediante otras técnicas o bien

para obtener preformas que serán procesadas mediante soplado o termo conformado. (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, 2012).

3. Revisión Bibliográfica

Para poder conocer el estado actual del desarrollo de filamentos biocompatibles para la manufactura aditiva, es de fundamental importancia llevar a cabo una revisión del estado del arte a nivel internacional, nacional y regional. Para esto se analiza información relevante, recolectada de trabajos de grado, resultados de proyectos institucionales, seminarios de investigación y artículos en revistas especializadas.

3.1 Antecedentes internacionales

En el artículo de investigación desarrollado por Dixit & Jain(2021), se resumen los estudios realizados sobre compuestos reforzados con fibra de carbono en matrices de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), ácido poli láctico (PLA), polietere tercetona (PEEK) y de nylon, donde se encontró mediante la recopilación de bibliografías que los polímeros termoplásticos que con mayor frecuencia se utilizan son el ABS y el PLA al igual que el método más utilizado para formar los compuestos es la técnica de extrusión por fusión.

Dentro de los compuestos reforzados con fibra de carbono en matriz de ABS se encontró que las propiedades mecánicas mejoraban a bajos porcentajes de fibra, donde la muestra con un contenido del 5% en peso tuvo el mayor valor medio de la resistencia a la tracción y la muestra con 7,5% en peso obtuvo el mayor valor medio del módulo de Young. De igual manera, se encontró

que después de cierto límite (10% en peso) al seguir agregando más fibra a la matriz la porosidad se convierte en el mayor problema al elaborar piezas por FFF (Ning et al., 2015).

En otra investigación realizada por Tekinalp et al. (2014), se preparó resina de ABS con refuerzo de fibra de carbono con diferentes concentraciones 10, 20, 30 y 40% en peso, mediante FDM (modelado por deposición fundida) y CM (compression-molding). Se encontró que en las muestras hechas por FDM presentaban una porosidad considerable pero una alta orientación de fibra en la dirección de impresión, en cambio las muestras elaboradas por CM presentaban una menor orientación de fibra en dirección de la carga de tracción y no presentaban porosidad. En conclusión, tanto las muestras hechas por FDM y CM presentaron una mejora significativa en las propiedades mecánicas, pero las muestras de CM obtuvieron mejores resultados mostrando el efecto dominante de la porosidad sobre la orientación de las fibras en propiedades de tracción. Además, se analizaron las muestras bajo microscopio electrónico de barrido donde se observó que las fibras se habían salido de la matriz indicando una adhesión débil entre las fibras y la matriz.

Por otra parte, dentro de los compuestos reforzados con fibra de carbono en matriz de PLA se encontró que Liu et al. (2019) analizó como variaban las propiedades mecánicas según el tipo de refuerzo (madera, cerámico, cobre y fibra de carbono) y comparó el efecto de la orientación de construcción y los ángulos de trama en los compuestos de PLA. Se observó que los refuerzos de cerámico, cobre y aluminio presentaron las mejores propiedades mecánicas mientras que la madera y la fibra de carbono disminuyeron dichas propiedades mecánicas, respecto a los ángulos de trama se observó que las muestras con ángulos de 45° presentaban mayor resistencia mecánica ya que las muestras de 0° presentaron la resistencia mecánica y el módulo más bajo debido a que esta configuración genera una unión débil entre las capas.

De manera similar, en el artículo de investigación de Ferreira et al. (2017), se caracterizaron las propiedades mecánicas del PLA solo y del PLA con refuerzo de CF (fibra de carbono) y se analizó las muestras bajo microscopio electrónico de barrido, estas muestras se elaboraron mediante impresión 3D basada en FFF con orientaciones de 0°, 90° y 45°, las fibras de carbono que se añadieron eran de una longitud de 60 micrómetros con una composición del 15% en peso. En los resultados se observó que el módulo de Young aumentó 2.2 veces, el módulo de cizalladura aumentó 1.16 veces, pero la resistencia a la tracción y al corte permanecieron casi constantes, por lo que se podría decir que el PLA es quien soporta en mayor proporción los esfuerzos, también se observa que la falla ocurre a cargas menores en el material reforzado, indicando que la adición de fibra de carbono en 15% en peso genera una mayor fragilidad.

En el artículo de investigación de Heidari-Rarani et al. (2019), se presenta el diseño, manufactura e instalación de un nuevo extrusor para impresoras comunes de impresión 3D, basado en el método de incrustación en el componente, para así poder generar elementos con fibras continuas de fibra de carbono como refuerzo de la matriz de PLA. Se evaluó exhaustivamente parámetros de procesamiento como lo es la mejora de la unión entre las fibras y la matriz con el uso de una solución de PVA, la inyección simultánea de las fibras con el polímero derretido, el enfriamiento rápido de los elementos mediante el uso de un ventilador. En los resultados se obtuvo que la resistencia a la tracción y a la flexión aumentaron un 35% y un 108% respectivamente en comparación con el PLA puro, además mediante un análisis morfológico se comprobó que la solución de PVA fue efectiva y que la falla se produce por delaminación.

Otro artículo de investigación que se enfoca en mejorar la unión entre las fibras y la matriz es el de Tian et al. (2016), donde también proponen el desarrollo de piezas impresas con fibras

continuas de refuerzo de fibra de carbono, pero esta vez, plantean que la impregnación de las fibras en el termoplástico es posible cuando la temperatura del extrusor se encuentra entre 200 a 230°C, además que la fuerza entre las capas se puede garantizar mediante un espesor de capa de 0.4 a 0.6 mm y un espaciado de trama de 0.6 mm. Finalmente proponen que con los parámetros de impresión óptimos y con un porcentaje de refuerzo del 27% se puede obtener la máxima resistencia a la flexión de 335 MPa y un módulo de flexión de 30 GPa.

Un artículo de investigación reciente (Sivagnanamani et al., 2021) plantea el desarrollo de un filamento compuesto a base de PLA y polvo de cascara de huevo variando el porcentaje en peso del refuerzo desde 4% hasta el 12% aumentando en un 2% respectivamente. En los resultados se obtuvo que la muestra del 4% de refuerzo tuvo una mayor resistencia a la tracción con 49.29 MPa mientras que las muestras con mayor porcentaje obtenían peores propiedades mecánicas, por lo que se plantea que el aumento de cascara de huevo genera una disminución en dichas propiedades.

3.2 Antecedentes nacionales

Dentro de los antecedentes nacionales encontramos un artículo científico por parte de La Universidad del Norte y una tesis por parte de La Universidad de los Andes ambas se enfocan en el desarrollo de compuestos a base de polvo de hueso y un biopolímero.

En el artículo de investigación de Quevedo et al. (2006), se presenta la posibilidad de desarrollar objetos a partir de biomateriales híbridos para aplicaciones ortopédicas y odontológicas en un futuro, para realizar dicho estudio se hizo una caracterización mecánica de propiedades como el módulo de elasticidad, la resistencia a la tracción y dureza mediante el desarrollo de probetas por medio de presión y termoformado a partir de polvo de hueso y ABS, la

morfología y el porcentaje de polvo fueron las variables de diseño del estudio. En los resultados se obtuvo que la morfología del hueso no era relevante para las propiedades mecánicas pero que el porcentaje de polvo de hueso si lo era, de manera que a mayor porcentaje de polvo de hueso en las probetas generaban menores propiedades mecánicas, concluyendo que se debe a que las partículas de ambos compuestos no tienen afinidad química dando lugar a fallas estructurales debido a la existencia de dos fases en la mezcla sólida.

En la tesis de Moreno Ramos (2018), se desarrolló un implante óseo veterinario mediante manufactura aditiva de un compuesto de polvo de hueso y biopolímero con una concentración de 20% de hueso en proporción de peso. Para esto se desarrolló probetas por medio de impresión 3D para su posterior caracterización mecánica. En los resultados se observa un aumento en las propiedades mecánicas suficientes para su aplicación, pero se explica que siguen siendo inferiores a las propiedades esperadas, además se reporta que las propiedades de flexión no dependen de la proporción de polvo de hueso, sin embargo, las propiedades de dureza y rugosidad si depende de dicha proporción.

4. Metodología Experimental

4.1 Materiales

Debido a que el presente proyecto pretende la optimización de un proceso de manufactura previo, se trabajó con los mismos insumos de dicho proyecto (García López & Paredes Torres, 2022), en el cual se usó ácido poliláctico como material base y polvo de hueso de cerdo como

material de refuerzo. Estos elementos presentan características mecánicas y biológicas aceptables, además de brindar propiedades biocompatibles indispensables para los objetivos del proyecto.

4.1.1 Acido poliláctico (PLA)

El material usado como matriz es un biopolímero termoplástico, este presenta un amplio rango de propiedades como lo es la biodegradabilidad, la biocompatibilidad y sus propiedades de barrera, siendo utilizado en industrias como la alimenticia, química, farmacéutica, textil, agraria entre otras (García López & Paredes Torres, 2022)

El ácido poliláctico utilizado es el Ingeo biopolymer 20003D de la compañía NatureWorks LLC, este producto se encuentra en forma de pellets, que son partículas de plástico ecológicas fabricadas a partir de recursos naturales, como el almidón extradido del maíz, la remolacha y el trigo. A continuación, se presenta la ficha técnica de este producto en la tabla 1.

Tabla 1

Ficha técnica Ingeo biopolymer 2003D NatureWorks

Ingeo Biopolymer 2003D - NatureWorks	
Densidad	1,25
Temperatura de descomposición	428 F (250 °C)
Temperatura de transición vítrea (Tg)	131 - 140 F (55 - 60 °C)
Temperatura de rango de fusión	320 - 356 F (160 - 180 °C)
Temperatura de autoignición	388 °C
Estado físico	Solido
Solubilidad en agua	Insoluble

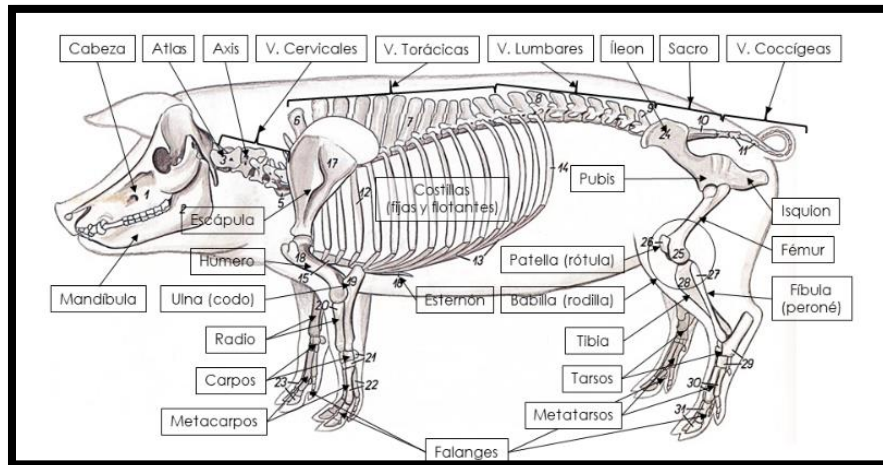
Nota. Esta tabla presenta las propiedades físicas del PLA utilizado. Adaptado de NatureWorks Cargill LLC.

Teniendo en cuenta la información presentada en la tabla 1, se realizó el análisis de transferencia de calor para hallar el punto de operación óptimo de la extrusora, permitiendo unas mejores características del filamento.

4.1.2 Hueso de cerdo

El elemento reforzante utilizado para este proyecto es el hueso de cerdo. Según Díaz (2020), los cerdos son los animales más empleados como reservorios orgánicos para trasplantes en humanos debido a su cercanía genética con el ser humano. Adicionalmente, su estructura ósea es rica en nutrientes minerales, como el calcio y el fósforo (Benítez, 2008). Por otra parte, es un elemento de fácil adquisición en la región donde se desarrolla el proyecto (Bucaramanga, Santander).

Para la obtención del polvo de hueso, primero se hizo la selección de este. Debido a las características mecánicas y su alto volumen, se seleccionaron las vértebras cervicales, torácicas y lumbares, como se presenta en la figura 2. Estas vértebras contienen hueso cortical, cuya estructura está diseñada para soportar principalmente cargas axiales. Además, dicha estructura ósea es resistente a la vez que ligera.

Figura 2*Esqueleto Porcino*

Nota. Esta imagen presenta el esqueleto del cerdo, donde se puede observar los grupos óseos seleccionados. Tomado de Veterinaria ECD LTDA. Esqueleto de cerdo (Fantoma).

4.2 Limpieza del hueso de cerdo

El hueso utilizado para este proyecto se obtuvo directamente de la empresa Carnes Santacruz de la ciudad de Bucaramanga, garantizando la calidad y salubridad de los elementos. Para esto, se solicitaron las vértebras de cerdo en un estado fresco y con la menor cantidad de residuos de carne.

Esta fase de limpieza es de gran importancia, ya que, si se garantiza una materia libre de impurezas, su proceso de extrusión será óptimo y sus propiedades mecánicas no se verán afectadas. Para realizar la limpieza del hueso de cerdo, se llevó a cabo en tres etapas. En la primera etapa, se realizó una sumersión en desengrasante industrial durante 24 horas, lo que permitió que las partículas de carne del hueso de cerdo se desprendieran. Luego, el hueso se lavó con agua y se

realizó una limpieza con un cepillo de acero para retirar algunos restos aún presentes de carne. Para asegurar una total limpieza, este proceso se repitió una segunda vez.

Una vez finalizada la primera etapa, los huesos quedaron sin carnosidades, pero aún presentaban grasa en su estructura interna. En esta segunda etapa se eliminaron dichos residuos al fragmentar el hueso con la ayuda de un martillo en partes más pequeñas y sumergirlas en alcohol al 96% durante un tiempo no mayor a 24 horas. Luego, fue necesario lavar el hueso con agua y proceder a realizar otra sumersión del hueso en peróxido de hidrogeno durante 18 horas, permitiendo obtener un hueso totalmente puro y sin ningún tipo de contaminante que pueda afectar las propiedades mecánicas.

Finalmente se llevó a cabo la etapa de secado mediante radiación solar por un periodo de 4 horas durante 2 días. En la figura 3 se presenta el proceso de limpieza del hueso.

Figura 3

Proceso de limpieza del hueso de cerdo



Nota. En la imagen se muestra el proceso que se llevó a cabo para la limpieza total del hueso de cerdo.

4.3 Molienda y tamizado del hueso de cerdo

Para el proceso de molienda se utilizó el laboratorio de ensayos no destructivos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander, el cual cuenta con los instrumentos necesarios para este proceso. Estos instrumentos se encuentran listados a continuación:

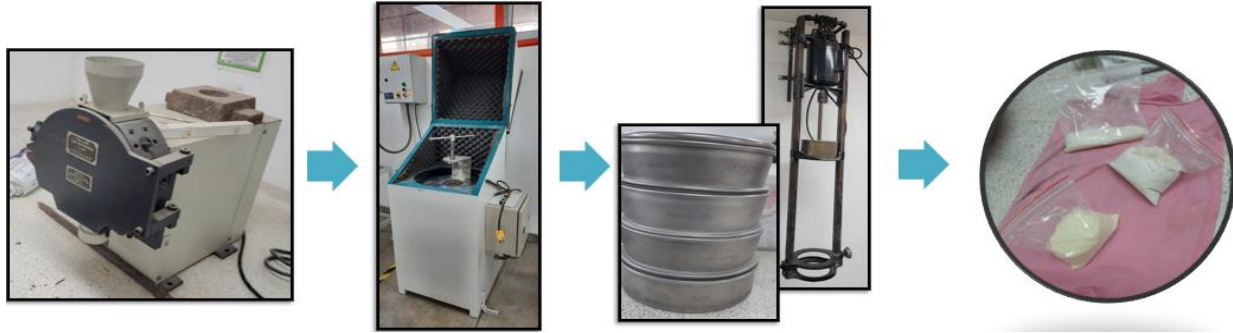
- Molino de Cuchillas.
- Molino de Anillos.
- Tamizador Mecánico.

Este proceso inició con el molino de cuchillas, este dispone de una pequeña tolva de alimentación en el parte superior, por donde se ingresa el material. Dado a su limitada capacidad, fue necesario fragmentar las muestras en pedazos más pequeños y alimentar el molino de manera proporcional para evitar el atascamiento de las cuchillas. Después de completar este proceso, se obtiene un tamaño de polvo de hueso de aproximadamente 600 μm , tamaño adecuado para su introducción en el molino de anillos.

El proceso de molienda en este molino se lleva a cabo mediante unos anillos y una masa desequilibrada en rotación, los cuales, cuando son accionados fragmentan las partículas que se encuentran entre ellos. Este proceso se repitió un total de 4 veces debido a la capacidad volumétrica de los anillos. Una vez concluido este proceso, se utilizó un tamiz mecánico para separar el polvo de hueso en tamaños de 600 μm , 250 μm y 125 μm a través de 3 filtros distintos, que se denominaron tamaño grueso, medio y fino, respectivamente. La figura 4 muestra el proceso de molienda y tamizado.

Figura 4

Proceso de molienda y tamizado del hueso de cerdo



Nota. La imagen presenta el proceso realizado al hueso para obtener los 3 tamaños de polvo de hueso.

4.4 Proceso de extrusión

Para el proceso de extrusión del filamento, fue necesario determinar las variables de entrada de la máquina, como las RPM y los perfiles de temperatura, ya que las configuraciones utilizadas en el proyecto anterior no eran adecuadas, debido a las modificaciones realizadas por Romero y colaboradores (2022). En su estudio, agregaron un aislante térmico a lo largo de la extrusora para mantener una temperatura constante en las resistencias térmicas y asegurar un perfil de temperaturas uniforme en toda la máquina. Por lo tanto, se realizó un análisis de transferencia de calor de sistemas concentrados, en el cual se iteró mediante el software “EES” con la temperatura máxima, es decir, la primera resistencia. Teniendo en cuenta que se buscaba lograr una mejor integración del hueso de cerdo con el PLA, se decidió aumentar la temperatura en las dos primeras resistencias de la máquina extrusora y establecer una temperatura más baja en las resistencias finales, lo que resultó en un filamento con mayor consistencia. Esta temperatura inicial se

consideró como la que alcanzaría la partícula de hueso en contacto con la extrusora, partiendo de una temperatura inicial de 25°C. El objetivo era determinar el tiempo máximo de contacto entre la partícula de hueso y la pared de la extrusora antes de que esta última alcanzara una temperatura de 60°C (Moreno, 2018). Las ecuaciones que se utilizaron se presentan a continuación.

$$\frac{T(t)-T_{\infty}}{T_i-T_{\infty}} = e^{-bt} \quad (1)$$

$$b = \frac{h \cdot A_s}{\rho V C_p} \quad (2)$$

Donde: $h = 0.2$ [w °C /m²], $\rho_{hueso} = 1850$ [Kg/m³], $C_p = 1.3124(10^3)$ [J/Kg K]

La ecuación (1) describe la temperatura de la partícula de hueso en el tiempo y la ecuación (2) es el número de Biot, este es un parámetro adimensional que relaciona la transferencia de calor en su superficie respecto a la transferencia de calor en su interior. Este valor debe ser menor o igual a 1 para aplicar este análisis, en este caso el biot es de 0.004.

Se trabajó con un rango de temperaturas desde 140°C hasta 170°C, lo que resultó en un rango de tiempos de 1.5 minutos a 1.2 minutos. Para asegurarse de que estos tiempos no se superaran, se ajustaron las RPM de la máquina en un rango de 860 a 900 RPM.

En resumen, se puede afirmar que trabajando con temperaturas entre 140°C y 170°C y RPM de 860 a 900, las partículas de polvo no se verían afectadas. Una vez que se determinaron las variables de entrada de la máquina, se procedió al proceso de extrusión. Para esto, se realizó un proceso de purgado en el que se calentó la máquina a 260°C y se ajustó a 500 RPM para expulsar las impurezas presentes en el tornillo, como se ilustra en la figura 5. Una vez se expulsó el material, se introdujeron los pellets de PLA para garantizar la ausencia de otros materiales contaminantes.

Figura 5

Proceso de purgado



Nota. La imagen representa el proceso de limpieza de la extrusora, para garantizar una extrusión libre de impurezas.

Para la obtención de los filamentos, se dividió el proceso en etapas. En primer lugar, se fabricaron los filamentos sin aditivos, comenzando con los de menor tamaño de grano, es decir, $125\mu\text{m}$, seguidos por los de $250\mu\text{m}$ y, finalmente, los de $600\mu\text{m}$. Esto se hizo para evitar que el polvo de mayor tamaño se mezclara con los de menor tamaño. Después de finalizar cada filamento, se realizó una purga de la máquina. Una vez completada la primera etapa, se procedió a fabricar los filamentos con aditivos.

4.4.1 Filamento sin aditivo (PLA + polvo de hueso de cerdo)

Para iniciar el proceso de extrusión, es necesario calentar la máquina a una temperatura de aproximadamente 170°C durante 30 minutos. Luego, se introdujo el perfil de temperaturas, como

se muestra en la figura 6. Una vez que las resistencias alcanzaron las temperaturas deseadas, se agregó únicamente PLA para verificar que el filamento saliera de manera consistente. Después de esto, se pesaron las cantidades correspondientes para cada tipo de filamento. Comenzando con el filamento fino de 10% en peso sin aditivos (F10SC), se utilizó 10 gramos de polvo fino de hueso y 90 gramos de pellets de PLA, los cuales se mezclaron en un recipiente para garantizar una distribución uniforme de los componentes. Este proceso se repitió para todos los filamentos, incluyendo F20SC, F30SC, M10SC, M20SC, M30SC, G10SC, G20SC y G30SC.

Figura 6

Perfil de temperaturas para la extrusión de filamentos



Nota. Esta imagen muestra el perfil de temperaturas utilizado para una mejor calidad del filamento.

Posteriormente, se vierte la mezcla correspondiente en la tolva de la extrusora de manera proporcional para evitar posibles atascos del tornillo. Después de aproximadamente 60 segundos, el filamento comienza a salir por la boquilla.

Finalmente se hace el proceso de enrollado utilizando carretes, donde se debe garantizar una tensión constante y una velocidad uniforme para obtener un diámetro consistente. Además de

realizar un baño en agua a temperatura ambiente, denominado como proceso templado, para solidificar el filamento permitiendo su manipulación, mejorar su resistencia y su dureza.

4.4.2 Filamento con aditivo (PLA + polvo de hueso de cerdo + PVA)

Considerando tanto los antecedentes nacionales como internacionales, se puede observar que las investigaciones coinciden en que la unión entre la matriz de PLA y el material de refuerzo es débil debido a su falta de compatibilidad. Con el objetivo de mejorar este aspecto, se encontró que Heidari-Rarani et al. (2019) logró mejorar la compatibilidad mediante el uso de acetato de polivinilo (PVA), al preparar la superficie del elemento de refuerzo con dicho aditivo. Por esta razón, se optó por utilizar este agente compatibilizante para mejorar la interacción entre la matriz y el elemento de refuerzo.

Para esta etapa se consideró 3 métodos diferentes para añadir el agente compatibilizante al filamento:

- A. Desarrollar un cordón de PVA al cual se le añadiría el polvo de hueso y una vez seca la mezcla se fragmentaría en pedazos más pequeños para ser vertidos en la tolva de la extrusora junto a los pellets de PLA.
- B. Recubrir los pellets de PLA con PVA y dejarlos secar para luego ser vertidos en la tolva de la extrusora junto al polvo de hueso.
- C. Verter y esparcir una capa muy delgada de PVA en una superficie lisa para luego cubrir completamente con polvo de hueso, una vez secada esta capa se agrega una capa más de PVA sobre el polvo de hueso, obteniendo láminas de polvo de hueso recubiertas por PVA,

estas se fragmentarían en pequeños pedazos para luego ser vertidos en la tolva de la extrusora junto a los pellets de PLA.

Para su selección se desarrolló la siguiente matriz de selección, en la tabla 2 se presenta los criterios de calificación y en la tabla 3 la matriz de selección.

Tabla 2

Criterios de calificación

Numeración	Valoración
1	Bajo
2	Medio
3	Alto

Nota. Esta tabla contiene los valores numéricos con los que se evaluarán las diferentes alternativas.

Tabla 3

Matriz de selección

MATRIZ DE SELECCIÓN			
Criterio	Métodos		
	A	B	C
I. Capacidad para cuantificar la cantidad de aditivo.	3	1	3
II. Concentración uniforme del elemento reforzante (PH).	2	2	3
III. Mayor presencia del elemento reforzante que de aditivo.	1	1	2
Total	6	4	8

Nota. En esta tabla se evalúan las tres alternativas para el método de adición del aditivo.

A través de la matriz de selección, se determinó que el método más eficaz era el "C", destacándose por una presencia más significativa del elemento reforzante en comparación con el aditivo, además de una mejor uniformidad.

Para la elaboración de este tipo de filamento, se procedió a preparar el polvo de hueso junto con el aditivo, tal como se describe en el método seleccionado. Luego, se siguió el mismo procedimiento mencionado anteriormente. La figura 7 ilustra el proceso de extrusión de los filamentos con aditivo.

Figura 7

Proceso de extrusión filamento con aditivo



Nota. Esta imagen presenta el proceso de extrusión para los filamentos con PVA.

Durante este proceso, se observó una mejor fluidez del material a través de la extrusora, presumiblemente debido a que el polvo de hueso se encuentra completamente recubierto de PVA. Es relevante señalar que, en general, durante el proceso de extrusión, se evidencia una recirculación interna del material, ya que existe un amplio espacio entre el tornillo sin fin y el cilindro, lo que impide obtener tramos de filamento con concentraciones uniformes de polvo de hueso.

5. Caracterización Mecánica

5.1 Ensayo de Tracción

A través del ensayo de tracción, se busca analizar el comportamiento de los filamentos ante cargas axiales, obteniendo como resultado los esfuerzos máximos, los esfuerzos de fluencia y los módulos elásticos de cada tipo de filamento. Esto posibilita la comparación entre ellos mediante el análisis de los datos, generando conclusiones en relación con el proceso de optimización.

El ensayo de tracción se ejecutó siguiendo la norma ASTM D638, que detalla la importancia de obtener un mínimo de 5 muestras por cada tipo de filamento para garantizar la confiabilidad de los datos, como se muestra en la figura 8. Además, la prueba se llevó a cabo a una velocidad de 5 mm/min, analizando un total de 95 muestras, cada una con una longitud de 150 mm. Para este propósito, se empleó la máquina universal MTS de Bionix, con una capacidad de 25 kN.

Figura 8

Muestras de filamento

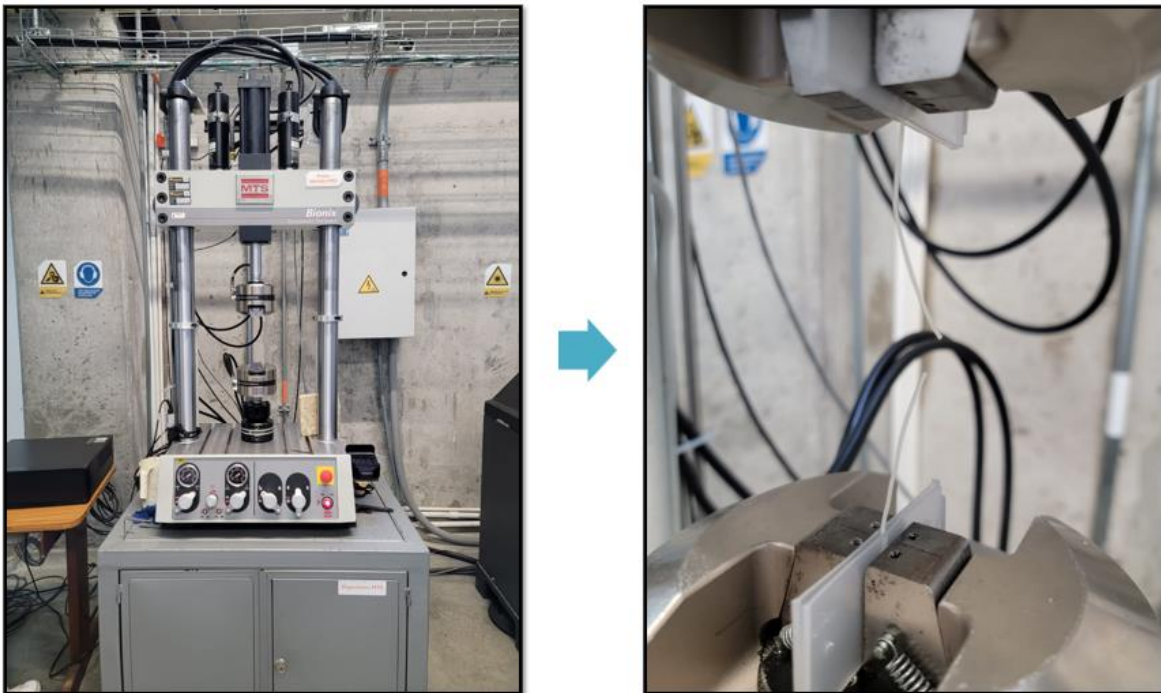


Nota. En la imagen se puede observar las muestras según la norma ASTM D638 con una longitud de 150 mm y un diámetro de 1.75 mm.

Debido a la presión ejercida por las mordazas sobre el filamento, las primeras muestras presentaban fallos en la zona de agarre. Para abordar este problema, se utilizaron láminas de acetato para aumentar el área de contacto, permitiendo que la zona de falla se ubique a lo largo del filamento en lugar de la base. En la figura 9 se muestra la máquina junto con el montaje utilizado para los ensayos de tracción.

Figura 9

Maquina Universal MTS Bionix



Nota. En la imagen se puede observar la maquina Universal MTS de Bionix con la que se realizaron los ensayos mecánicos a tracción y el montaje experimental de las muestras.

6. Resultados

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de tracción realizadas en los siete tipos de filamentos desarrollados. Para ello, se construyeron las respectivas gráficas de esfuerzo-deformación. En primer lugar, se determinó el módulo de elasticidad (YM), seguido del esfuerzo de fluencia (YS) mediante el método del offset al 0.2%. Finalmente, se calculó el esfuerzo máximo a tracción para cada ensayo de laboratorio.

Concluido el tratamiento de datos de los ensayos de tracción, se implementó el modelo de Ramberg-Osgood para obtener una representación gráfica más precisa del promedio de cada tipo de filamento. En este proceso, se calcularon los factores "Alpha" y "n" a partir de los valores promedio del módulo de elasticidad y el esfuerzo de fluencia. Este enfoque permitió una evaluación más detallada de las propiedades mecánicas de los filamentos, contribuyendo así a la comprensión integral de su comportamiento bajo carga axial.

6.1 Filamento de PLA

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el filamento base de PLA en la tabla 4. Estos datos servirán como referencia para la comparación con los demás filamentos desarrollados. En la tabla, se observa que los valores obtenidos para el módulo de elasticidad y el esfuerzo de fluencia concuerdan con los valores reportados en la literatura, lo que valida su idoneidad para el análisis comparativo.

Tabla 4*Propiedades de tracción del PLA*

PLA							
	1	2	3	4	5	PROM	Dv.Estandar
YM [Mpa]	4267,2	3448,4	3553,9	3495,5	4545,3	3691,25	507,78901
YS [Mpa]	37,7581	34,3152	31,3368	33,1319	49,8389	34,1355	7,4039327
Esf.max[Mpa]	39,5972	38,9486	35,7499	42,0445	59,7276	39,0851	9,500712

Nota. La tabla presenta los valores de YM, YS y Esf. Máximo para las cinco muestras sometidas a tracción de PLA.

6.2 Filamento fino sin aditivo (FSC)

Este filamento cuenta con tres proporciones de polvo de hueso (PH) diferentes, estos varían entre 10%, 20% y 30%. Los resultados de los ensayos de tracción para estos tipos de filamentos se presentan en la tabla 5 y sus representaciones gráficas en la figura 10.

Tabla 5*Propiedades de tracción de FSC*

F10SC							
	1	2	3	4	5	PROM	Dv.Estandar
YM [Mpa]	3736,5	2870,9	3023,2	3279,9	3847,6	3351,62	429,5998
YS [Mpa]	38,1814	24,1068	29,043	30,1726	33,4798	30,9967	5,2381415
Esf.max[Mpa]	43,9192	24,1068	30,6837	30,1726	36,6193	33,1003	7,4954406

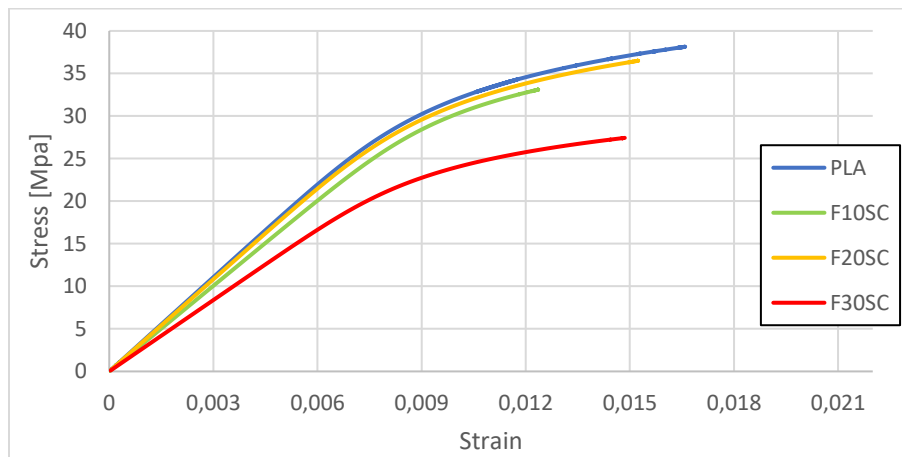
F20SC							
	1	2	3	4	5	PROM	Dv.Estandar
YM [Mpa]	2857	4087,7	4065,7	3920	3103,8	3606,84	582,05612
YS [Mpa]	26,7188	38,7747	35,8703	33,6694	27,9529	32,5972	5,1514418
Esf.max[Mpa]	30,5748	43,2326	40,5293	36,0891	32,0486	36,4949	5,400385

F30SC							
	1	2	3	4	5	PROM	Dv.Estandar
YM [Mpa]	3349,4	1931,6	3414	2172,3	3102,9	2794,04	692,5556
YS [Mpa]	24,9072	21,3071	29,6379	24,0809	24,7866	24,9439	3,0012835
Esf.max[Mpa]	27,5951	22,722	33,1582	26,9759	26,7239	27,435	3,7319561

Nota. La tabla presenta los valores de YM, YS y Esf. Máximo para los filamentos FSC.

Figura 10

Gráfica esfuerzo vs deformación FSC



Nota. En la imagen se grafican las curvas esfuerzo-deformación para los tres filamentos de tamaño fino sin aditivo en comparación con la curva base de PLA.

En la Figura 10, se aprecia que los filamentos F10SC y F20SC exhiben propiedades mecánicas ligeramente inferiores al filamento de PLA. Sin embargo, debido a la mínima disparidad, se puede considerar que permanecen relativamente constantes. En contraste, el filamento F30SC muestra una disminución significativa en sus propiedades, con una reducción del 24% en su módulo de elasticidad, un 27% en su esfuerzo de fluencia y un 30% en el esfuerzo máximo a tracción.

6.3 Filamento fino con aditivo (FCC)

Este filamento cuenta con tres proporciones de (PH) diferentes, estos varían entre 10%, 20% y 30%. Los resultados de los ensayos de tracción para estos tipos de filamentos se presentan en la tabla 6 y sus representaciones gráficas en la figura 11.

Tabla 6

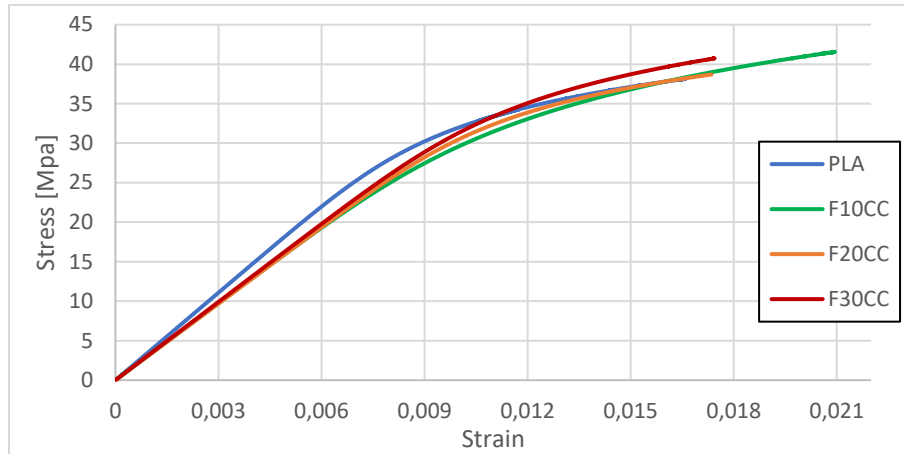
Propiedades de tracción de FCC

F10CC							
	1	2	3	4	5	PROM	Dv.Estandar
YM [Mpa]	3994,8	3908,9	3190	2267,9	2841,6	3240,64	728,585817
YS [Mpa]	37,7864	48,7	41,1	29,82	23,93	36,2673	9,66968629
Esf.max [Mpa]	39,5826	54,8713	44,9592	32,4429	35,9392	41,559	8,76600793
F20CC							
	1	2	3	4	5	PROM	Dv.Estandar
YM [Mpa]	3613,4	2807,3	3101,3	4058	2559,9	3227,98	607,624915
YS [Mpa]	36,0475	30,6728	36,8877	41,0574	31,8815	35,3094	4,16304479
Esf.max [Mpa]	39,8415	31,7642	40,4731	47,6371	33,7741	38,698	6,25875514
F30CC							
	1	2	3	4	5	PROM	Dv.Estandar
YM [Mpa]	2573,1	3495,3	3845,7	3573,9	3017	3301	504,831507
YS [Mpa]	32,816	37,9595	40,0108	37,09	38,9948	37,3742	2,77392037
Esf.max [Mpa]	36,597	38,5838	46,5966	41,9935	39,9081	40,7358	3,82025367

Nota. La tabla presenta los valores de YM, YS y Esf. Máximo para los filamentos FCC.

Figura 11

Gráfica esfuerzo vs deformación FCC



Nota. En la imagen se grafican las curvas esfuerzo-deformación para los tres filamentos de tamaño fino con aditivo en comparación con la curva base de PLA.

En la gráfica anterior, se evidencia que los filamentos con aditivo muestran un incremento en los esfuerzos de fluencia y esfuerzos máximos en comparación con el filamento de PLA. Sin embargo, sus módulos de elasticidad son inferiores, indicando un aumento en su capacidad de absorción de energía antes de deformarse plásticamente, es decir, presentan un mayor módulo de resiliencia. Destaca el filamento F10CC, que exhibe las mejores propiedades mecánicas con un aumento del 6% tanto en el esfuerzo de fluencia como en el esfuerzo máximo a la tracción, y una disminución del 12% en su módulo de elasticidad.

6.4 Filamento medio sin aditivo (MSC)

Este filamento cuenta con tres proporciones de (PH) diferentes, estos varían entre 10%, 20% y 30%. Los resultados de los ensayos de tracción para estos tipos de filamentos se presentan en la tabla 7 y sus representaciones gráficas en la figura 12.

Tabla 7

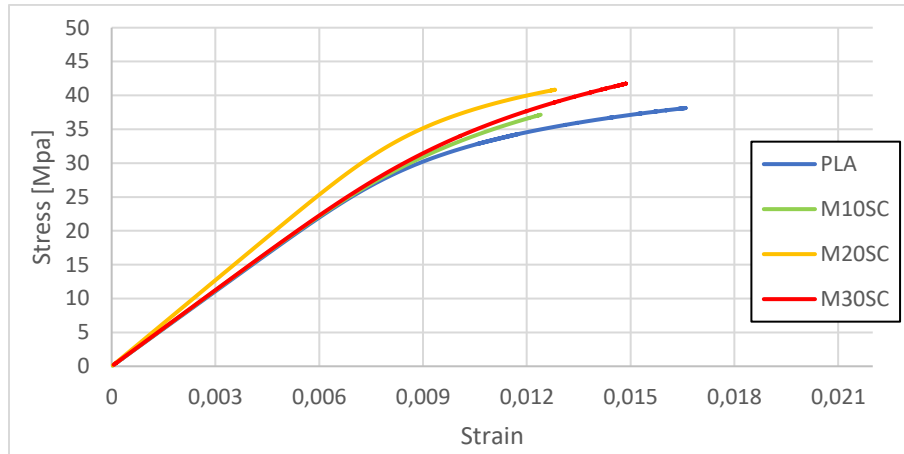
Propiedades de tracción de MSC

M10SC							
	1	2	3	4	5	PROM	Dv.Estandar
YM [Mpa]	3770,3	4125,6	2964,2	3519,8	4330	3741,98	535,733032
YS [Mpa]	30	38,568	27,2	35,4027	43,1	34,8541	6,40773781
Esf.max [Mpa]	29,9505	40,7549	29,1793	40,5658	45,2917	37,1485	7,18183602
M20SC							
	1	2	3	4	5	PROM	Dv.Estandar
YM [Mpa]	4353,4	3988,2	5044,8	4060	3762	4241,68	496,19445
YS [Mpa]	42,615	37,3119	42,6797	40,2453	35,0786	39,5861	3,34173169
Esf.max [Mpa]	43,1248	39,2221	45,6869	40,5605	35,6154	40,8419	3,83093812
M30SC							
	1	2	3	4	5	PROM	Dv.Estandar
YM [Mpa]	4004,1	2760	4017,8	4538,3	3448,9	3753,82	676,089637
YS [Mpa]	39,6968	29,0881	44,2617	45,5938	28,1	37,3481	8,2924782
Esf.max [Mpa]	43,166	33,3969	48,9596	50,3186	32,8405	41,7363	8,31502183

Nota. La tabla presenta los valores de YM, YS y Esf. Máximo para los filamentos MSC.

Figura 12

Gráfica esfuerzo vs deformación MSC



Nota. En la imagen se grafican las curvas esfuerzo-deformación para los tres filamentos de tamaño medio sin aditivo en comparación con la curva base de PLA.

En la Figura 12, se observa que el módulo de elasticidad se mantiene constante para los filamentos M10SC y M30SC, aunque su esfuerzo de fluencia aumentó en un 2% y 9%, respectivamente. El esfuerzo máximo a la tracción disminuyó en un 5% para el filamento M10SC, pero aumentó en un 4% y 7% para los filamentos M20SC y M30SC, respectivamente, siendo este último el que exhibe las mejores características.

6.5 Filamento medio con aditivo (MCC)

Este filamento cuenta con tres proporciones de (PH) diferentes, estos varían entre 10%, 20% y 30%. Los resultados de los ensayos de tracción para estos tipos de filamentos se presentan en la tabla 8 y sus representaciones gráficas en la figura 13.

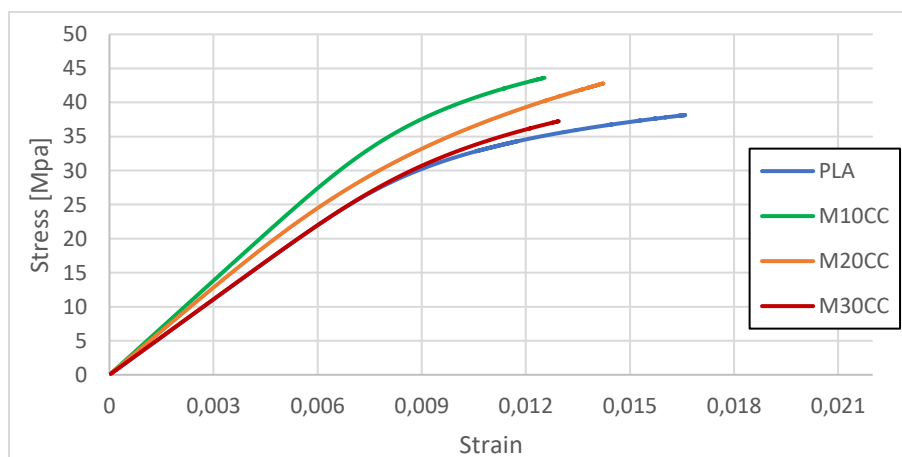
Tabla 8*Propiedades de tracción de MCC*

M10CC							
	1	2	3	4	5	PROM	Dv.Estandar
YM [Mpa]	4339,4	4514,2	4501	3637,6	6065,5	4611,54	888,582179
YS [Mpa]	40,4826	39,0712	40,8	39,2468	50,7397	42,0681	4,90560082
Esf.max [Mpa]	42,8547	41,0611	41,95	37,9891	54,223	43,6156	6,20592453

M20CC							
	1	2	3	4	5	PROM	Dv.Estandar
YM [Mpa]	4669	3605,9	4468	3887,8	4833,1	4292,76	524,404942
YS [Mpa]	41,5239	39,6155	44,7977	34,2	37,7896	39,5853	3,97348054
Esf.max [Mpa]	43,8646	43,3346	49,2641	37,4094	40,0812	42,7908	4,46245687

M30CC							
	1	2	3	4	5	PROM	Dv.Estandar
YM [Mpa]	3930,6	3236,2	4772,5	3776,7	2772,5	3697,7	755,753885
YS [Mpa]	38,14	29,7908	44,7	34,941	34,4027	36,3949	5,51626926
Esf.max [Mpa]	41,1888	31,6496	44,2806	34,6641	34,4027	37,2372	5,27022839

Nota. La tabla presenta los valores de YM, YS y Esf. Máximo para los filamentos MCC.

Figura 13*Gráfica esfuerzo vs deformación MCC*

Nota. En la imagen se grafican las curvas esfuerzo-deformación para los tres filamentos de tamaño medio con aditivo en comparación con la curva base de PLA.

En la gráfica anterior, se aprecia una mejora considerable en los filamentos con respecto al filamento base de PLA. También, se observa que a medida que se reduce el porcentaje de polvo de hueso (PH), sus propiedades mecánicas aumentan. En este sentido, el filamento M10CC destaca por sus mejores características mecánicas, con un aumento del 25% en su módulo elástico, un 23% en su esfuerzo elástico y un 12% en su esfuerzo máximo. En segundo lugar se encuentra el filamento M20CC, que experimenta un aumento del 16% en su módulo elástico y esfuerzo de fluencia, y un aumento del 9% en su esfuerzo máximo. Por otro lado, el filamento M30CC no muestra cambios en su módulo elástico, presenta un modesto aumento del 7% en el esfuerzo de elasticidad y una disminución del 5% en su esfuerzo máximo.

6.6 Filamento grueso sin aditivo (GSC)

Este filamento cuenta con tres proporciones de (PH) diferentes, estos varían entre 10%, 20% y 30%. Los resultados de los ensayos de tracción para estos tipos de filamentos se presentan en la tabla 9.

Tabla 9

Propiedades de tracción de GSC

	G10SC					PROM	Dv.Estandar
	1	2	3	4	5		
YM [Mpa]	3826,3	2529,7	5373,1	5337,2	2546,2	3922,5	1409,69539
YS [Mpa]	33,5004	25,4382	47,0935	35,7525	26,4863	33,6542	8,71669014
Esf.max [Mpa]	34,5	25,8	47,8	37,2	26,5	34,36	8,99683278

G20SC							
	1	2	3	4	5	PROM	Dv.Estandar
YM [Mpa]	3703,7	4716	3196	4001,5	4556,4	4034,72	622,579615
YS [Mpa]	30,4	31,1028	24,0621	32,2791	39,6828	31,5054	5,57349068
Esf.max [Mpa]	32,6	31,8	24,6	37,02	41,3	33,464	6,24767797

G30SC							
	1	2	3	4	5	PROM	Dv.Estandar
YM [Mpa]	2672,6	4072,5	1832,3	3339,4	1546,8	2692,72	1045,92637
YS [Mpa]	40,4228	21,079	25,7669	31,4524	27,7729	29,2988	7,25860127
Esf.max [Mpa]	40,83	22,1	27,02	32,12	28,2	30,054	7,00533939

Nota. La tabla presenta los valores de YM, YS y Esf. Máximo para los filamentos GSC.

En la Tabla 9, se observa que los filamentos con polvo de hueso (PH) grueso sin aditivo experimentaron una disminución en sus propiedades mecánicas en comparación con el filamento base de PLA. Asimismo, se evidencia que a medida que aumenta el porcentaje del elemento reforzante, sus propiedades disminuyen progresivamente. En el caso del filamento G10SC, hubo una reducción del 1% en su esfuerzo de fluencia y una disminución del 12% en su esfuerzo máximo a la tracción. Para el filamento G20SC, se observó una disminución en dichas propiedades del 8% y 14% respectivamente. Finalmente, el filamento G30SC exhibe las peores características mecánicas, ya que su módulo elástico, esfuerzo de fluencia y esfuerzo máximo a la tracción disminuyeron en un 27%, 14% y 23% respectivamente.

6.7 Filamento grueso con aditivo (GCC)

Este filamento cuenta con tres proporciones de (PH) diferentes, estos varían entre 10%, 20% y 30%. Los resultados de los ensayos de tracción para estos tipos de filamentos se presentan en la tabla 10.

Tabla 10

Propiedades de tracción de GCC

G10CC							
	1	2	3	4	5	PROM	Dv.Estandar
YM [Mpa]	3759,8	3506,8	3742,8	2916,6	3708,9	3526,98	355,966743
YS [Mpa]	33,8942	26,1745	35,827	32,058	36,4189	32,8745	4,11935941
Esf.max [Mpa]	40	31,9	43,5	36,7	42,9	39	4,8
G20CC							
	1	2	3	4	5	PROM	Dv.Estandar
YM [Mpa]	2933	2754,5	2349,2	1121,5	2518,5	2335,34	714,149811
YS [Mpa]	34,7441	31,0671	35,34	10,8	32,9	28,9702	10,2945223
Esf.max [Mpa]	36,3	33,4	42,9	11,9	34,6	31,82	11,7246322
G30CC							
	1	2	3	4	5	PROM	Dv.Estandar
YM [Mpa]	3674,3	3432,3	3183,3	4120,7	4075,6	3697,24	405,378968
YS [Mpa]	36,4	32,658	26,0786	35,3195	35,7614	33,2435	4,25122603
Esf.max [Mpa]	43,2	38,3	28,1	45,4	44,9	39,98	7,20950761

Nota. La tabla presenta los valores de YM, YS y Esf. Máximo para los filamentos GCC.

Finalmente, en los filamentos gruesos con aditivo, se observa en la Tabla 10 un comportamiento análogo al mencionado anteriormente, donde las propiedades mecánicas se ven afectadas por el aumento del porcentaje del elemento reforzante. En el caso del filamento G10CC,

se registra una disminución del 4% tanto en su módulo elástico (YM) como en su esfuerzo de fluencia (YS), mientras que su esfuerzo máximo permanece constante. En cuanto al filamento G20CC, se observa una disminución significativa en comparación con el filamento base; su módulo elástico se vio afectado en un 37%, su esfuerzo de fluencia en un 15%, y su esfuerzo máximo en un 19%. Por último, el filamento G30CC mantuvo constante sus propiedades mecánicas.

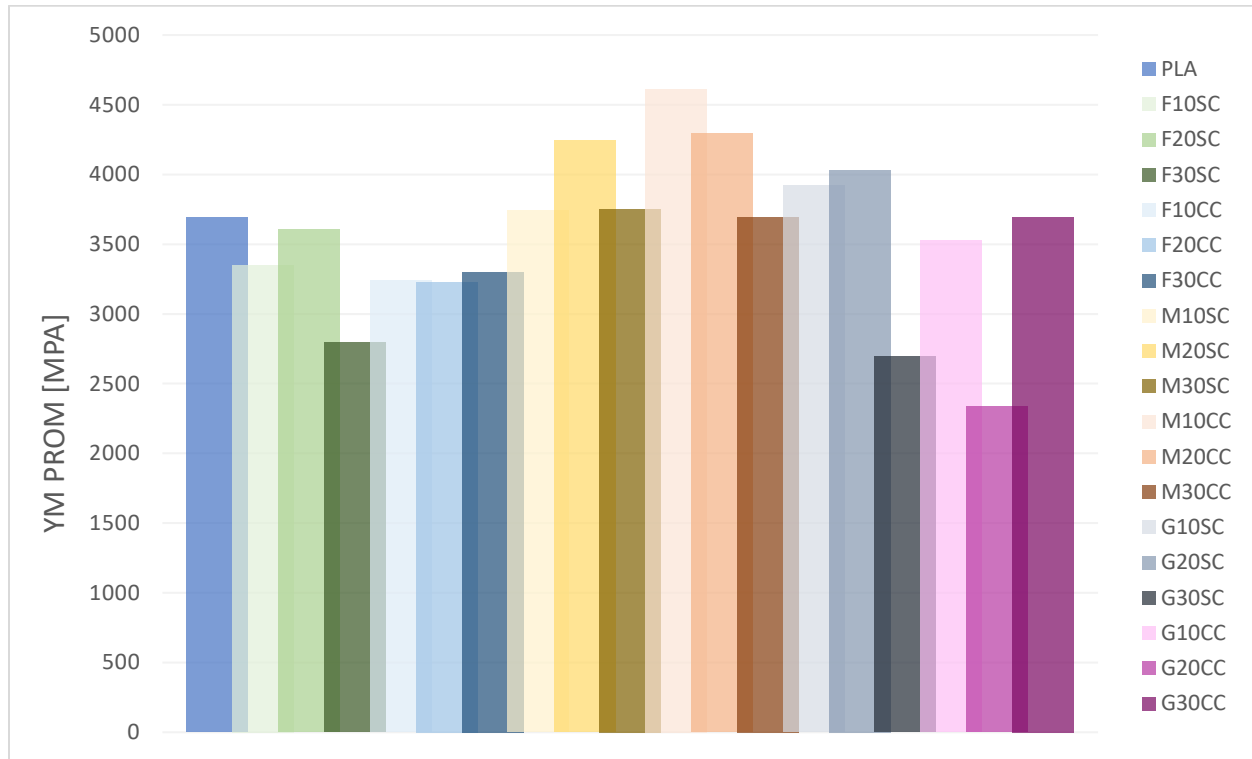
7. Análisis de los resultados

En el proceso de análisis de resultados, es imperativo examinar los datos de manera consolidada y presentarlos de forma gráfica. Esta metodología busca facilitar la identificación de patrones o comportamientos inherentes a las variaciones en los distintos parámetros estudiados. Este enfoque analítico proporciona una visión más completa y estructurada de los resultados obtenidos, permitiendo una interpretación más detallada y precisa de las relaciones entre las variables investigadas.

A continuación en la figura 14 se presenta un gráfico de barras en donde se analizan los módulos de elasticidad para tanto los filamentos con aditivo como sin aditivo, para esto se tomaron los valores promedio de cada tipo de filamento.

Figura 14

Módulo elástico promedio de los filamentos



Nota. Este gráfico presenta los módulos elásticos promedio de los 19 tipos de filamentos desarrollados.

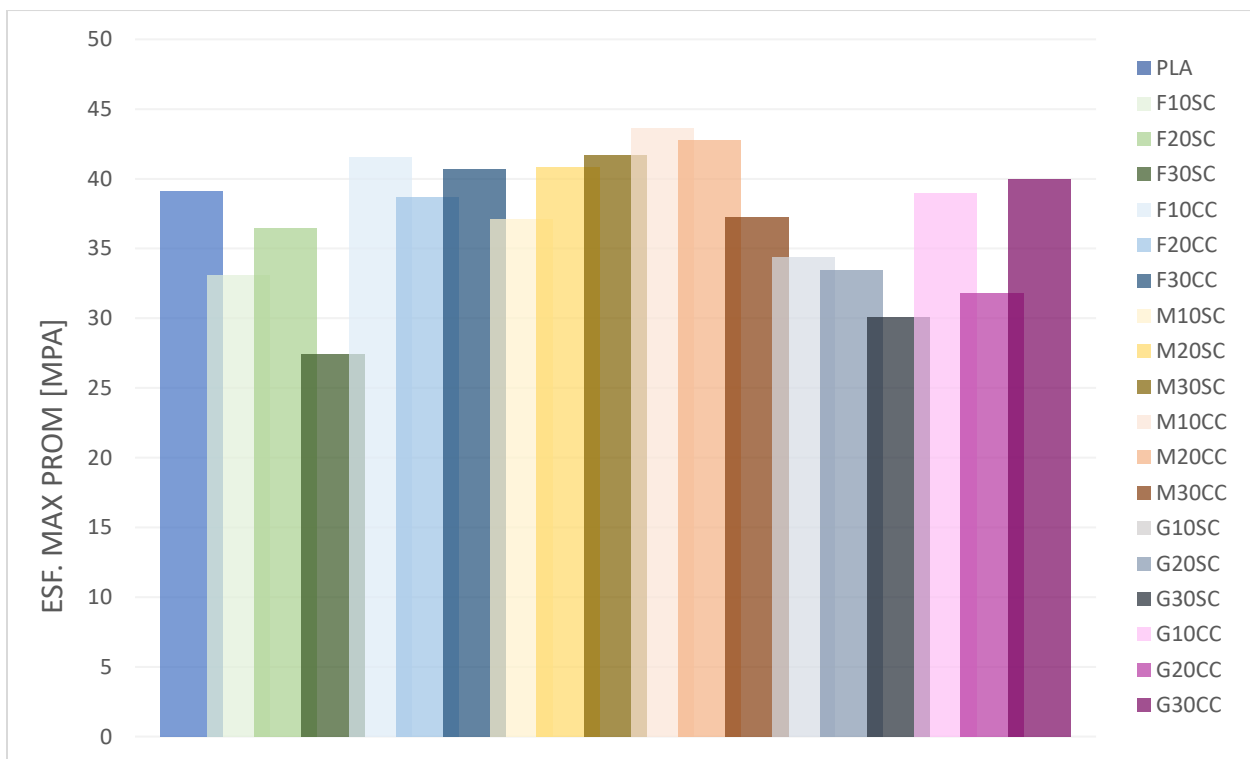
En el gráfico anterior, se evidencia que los filamentos con tamaños de polvo de hueso, tanto fino como medio, que incorporan PVA en su estructura experimentan una mejora en el módulo de elasticidad en comparación con los filamentos de igual tamaño de polvo de hueso que no incorporan PVA. Por otro lado, se observa un efecto contrario en los filamentos GSC y GCC. Esta disparidad podría atribuirse a la recirculación presente en la máquina extrusora. Dado que los tamaños de polvo son mayores, existe la posibilidad de que se queden atascados en la boquilla, generando tramos de filamento sin polvo de hueso y con burbujas internas. Este fenómeno resultaría en un filamento con menor rigidez.

En relación con el porcentaje del elemento reforzante, no es posible extraer conclusiones definitivas, ya que no se identifica ningún patrón o comportamiento significativo al variar este parámetro. De manera similar, no se puede afirmar con certeza que los filamentos exhiban una concentración uniforme debido a la recirculación previamente mencionada.

Con el fin de analizar y caracterizar el comportamiento del esfuerzo máximo a tracción, se organizaron los valores promedio de esta propiedad para los 19 tipos de filamento en un diagrama de barras, tal como se presenta en la Figura 15.

Figura 15

Esfuerzo máximo promedio de los filamentos



Nota. Este gráfico presenta los esfuerzos máximos promedio de los 19 tipos de filamentos desarrollados.

Analizando la figura 15, se puede inferir que los filamentos con PVA de tamaños de polvo fino y medio exhiben una mayor resistencia al esfuerzo máximo a la tracción en comparación con aquellos que no lo contienen. Es relevante destacar que el filamento M10CC se distingue por presentar la máxima resistencia a la tracción, alcanzando los 43.62 MPa. Además, como se evidenció en la figura 14, los filamentos con tamaño de polvo grueso tienden a disminuir su resistencia a la tracción. Como se mencionó anteriormente, este fenómeno se atribuye a la recirculación en la máquina extrusora.

8. Conclusiones

Las propiedades mecánicas de los filamentos compuestos por PLA, polvo de hueso de cerdo y PVA, experimentaron mejoras sustanciales en comparación con los filamentos compuestos solo por PLA y polvo de hueso de cerdo. Esta mejora sustancial sugiere que el PVA desempeña un papel significativo como agente compatibilizante, mejorando la adhesión entre el PLA y el polvo de hueso de cerdo. Como resultado, se logró una matriz más sólida y resistente.

Se identificó que el porcentaje óptimo de polvo de hueso de cerdo es del 10%, y se observó que el tamaño medio de partículas (250 μm) exhibió las mejores propiedades mecánicas. Este tamaño específico de partículas demostró un aumento del 25% en el módulo de elasticidad, un incremento del 23% en el esfuerzo de fluencia y, finalmente, un aumento del 12% en el esfuerzo máximo a la tracción.

El proceso de limpieza aplicado al hueso de cerdo fue efectivo, resultando en un polvo libre de lípidos e impurezas que facilitó la adhesión a la matriz de PLA y mejoró el proceso de extrusión.

En relación con las variables críticas para el óptimo funcionamiento de la máquina extrusora, el perfil de temperaturas y las RPM se destacaron como factores clave para la producción eficiente del filamento biocompatible. El análisis de sistemas concentrados aseguró que las partículas de hueso mantuvieran sus propiedades mecánicas, mejorando la incorporación del polvo de hueso en la matriz de PLA.

No obstante, se identificó una discrepancia en las propiedades mecánicas de los filamentos con polvo de mayor tamaño, donde estas propiedades disminuyen a causa de la recirculación en la extrusora. Dado que las partículas de polvo son más grandes, tienden a obstruir la boquilla, originando segmentos de filamento sin polvo de hueso y con inclusiones de burbujas internas. Esto resulta en un filamento con una menor rigidez.

Se concluye que el presente estudio ha logrado exitosamente la creación de un filamento biocompatible de bajo costo, con mejoras sustanciales en sus características mecánicas. Estas mejoras se atribuyen a la optimización del proceso de limpieza, la identificación del punto óptimo de operación de la máquina extrusora y la incorporación eficaz del PVA como agente compatibilizante. Aunque aún presenta niveles de resistencia mecánica inferiores en comparación con otros materiales, este filamento emerge como una alternativa viable en el ámbito de la ingeniería biomecánica y de tejidos. Estos resultados abren nuevas posibilidades para investigaciones futuras y aplicaciones prácticas en el campo de los biomateriales.

9. Recomendaciones

Se recomienda la mejora o adaptación de la máquina extrusora de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UIS, con el propósito de abordar la recirculación del material causada por el espacio entre el cilindro y el tornillo sin fin. Esta mejora es esencial para evitar la formación de tramos de filamento con concentraciones no uniformes de polvo de hueso. Además, se aconseja implementar el proceso de molienda para los pellets de PLA, con el objetivo de mejorar la homogenización de la mezcla.

Se aconseja llevar a cabo un estudio de diseño detallado del sistema de enrollado para asegurar una consistencia óptima en el diámetro del filamento. Asimismo, se sugiere realizar un análisis exhaustivo del comportamiento matriz-refuerzo mediante el uso del microscopio electrónico de barrido. Esta técnica permitirá una caracterización más precisa de la composición de los filamentos desarrollados y facilitará un análisis más profundo de la mecánica de la fractura.

Estas recomendaciones son cruciales para avanzar en la eficiencia y calidad del proceso, así como para proporcionar una base sólida para futuras investigaciones en el campo de los biomateriales.

Referencias Bibliográficas

- Beltrán Rico, M., & Marcilla Gomis, A. (2012). *Tecnología de polímeros: procesado y propiedades*. Universidad de Alicante, Alicante, España.
- Benitez Benitez, R. (2008). *Hidrólisis enzimática de la proteína del hueso de cerdo, composición, propiedades funcionales y usos del hidrolizado* (Tesis de pregrado). Universidad de Lleida, Cataluña, España.
- Díaz, J. E. M. (2020). Tecnologías disruptivas como alternativa a la obtención de órganos y tejidos artificiales. *Revista Colombiana de Bioética*, 15(1).
<https://doi.org/10.18270/rcb.v15i1.2624>
- Dixit, N., & Jain, P. K. (2021). 3D printed Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composites: a review. *Materials Today: Proceedings*, 43, 678-681.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.609>
- Ferreira, R. T. L., Amatte, I. C., Dutra, T. A., & Bürger, D. (2017). Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers. *Composites Part B: Engineering*, 124, 88-100.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.05.013>
- García López, L. N., & Paredes Torres, B. J. (2022). *Desarrollo de hilo de material biocompatible para impresión 3D* (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

- Heidari-Rarani, M., Rafiee-Afarani, M., & Zahedi, A. (2019). Mechanical characterization of FDM 3D printing of continuous carbon fiber reinforced PLA composites. *Composites Part B: Engineering*, 175, 107147. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107147>
- Liu, Z., Lei, Q., & Xing, S. (2019). Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(5), 3741-3751. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.034>
- Moreno Ramos, J. A. (2018). *Manufactura, aplicación y caracterización de un implante óseo veterinario mediante manufactura aditiva de un compuesto de hueso y biopolímeros* (tesis de pregrado). Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
- Ning, F., Cong, W., Qiu, J., Wei, J., & Wang, S. (2015). Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. *Composites Part B: Engineering*, 80, 369-378. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.013>
- Orozco, J. (2019, 24 agosto). *¿Qué es la manufactura aditiva?* Laminas y Aceros. <https://blog.laminasyaceros.com/blog/qu%C3%A9-es-la-manufactura-aditiva>
- Quevedo-B., S., Rojas-M., F. A., & Sanabria, A. M. (2006). Desarrollo de una metodología para la fabricación de injertos compuestos de polvo de hueso y un biopolímero. *Ingeniería y Desarrollo*, (20), 45-63.
- Rojas-Lozano, J., Díaz-Rodríguez, P., Barreiro, P., López-Senraa, E., Rodríguez-Valencia, C., López-Álvarez, M., Landín, M., González, P., & Serra, J. P. (2019). Desarrollo de nuevos filamentos para impresión 3D basados en cerámicas bioinspiradas. *Materiales Compuestos*, 3(4), 65-69. <https://revista.aemac.org/materiales-compuestos/article/download/347/235>

- Romay Romero, M., & Hernández Díaz, J. (2019, 29 abril). *Innegra: el nuevo refuerzo en la industria de los materiales compuestos*. Interempresas. <https://www.interempresas.net/Aeronautica/Articulos/244627-Innegra-el-nuevo-refuerzo-en-la-industria-de-los-materiales-compuestos.html>
- Saroya, J., Wang, Y., Wei, Q., Lei, M., Li, X., Guo, Y., & Zhang, K. (2019). A review on 3D printed matrix Polymer Composites: Its potential and future challenges. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(5-6), 1695-1721. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04534-z>
- Sivagnanamani, G. S., Begum, S. R., Siva, R., & Kumar, M. S. (2021). Experimental investigation on influence of waste eggshell particles on polylactic acid matrix for additive manufacturing application. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(5), 3471-3480. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06464-y>
- Tekinalp, H., Kunc, V., Vélez-García, G. M., Duty, C., Love, L. J., Naskar, A. K., Blue, C. A., & Ozcan, S. (2014). Highly oriented carbon fiber–polymer composites via additive manufacturing. *Composites Science and Technology*, 105, 144-150. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.10.009>
- Tian, X., Liu, T., Yang, C., Wang, Q., & Li, D. (2016). Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 88, 198-205. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.05.032>