



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

Trabajo Final de Máster

Diseño y puesta en marcha de nuevos filamentos
cargados para su uso en impresión 3D

**Máster Universitario en Ingeniería, Procesado y
Caracterización de Materiales**

Septiembre 2017

Tutor: Santiago Ferrándiz Bou

Alumna: María Palacios Alamillo

Contenido

Introducción	5
Objetivo del proyecto	5
Memoria	7
1. Introducción al filamento destinado a impresoras 3D	9
1.1. Tipos de materiales destinados a impresoras 3D	9
2. Material para la fabricación de filamento	16
2.1. PLA + Serrín (FilaWood).....	16
2.2. PLA + Bambú (BambooFill)	17
2.3. PLA + Cáscara de almendra	17
3. Obtención de filamento para impresoras 3D	17
3.1. Extrusora Filabot	17
3.2. Devanadora	20
3.3. Proceso de extrusión.....	21
3.3.1. Etapas para el proceso de extrusión	21
3.3.2. Etapas para la producción de filamento	22
3.3.3. Problemas ocasionados.....	24
4. Caracterización	25
4.1. Ensayo del filamento a tracción	25
4.2. DSC (Calorimetría diferencial de barrido)	26
5. Análisis y resultados	28
5.1. Ensayo de tracción	28
5.2. DSC (Calorimetría diferencial de barrido)	32
6. Conclusiones	34
ANEJO I	35
Bibliografía	38

Introducción

Si se echa un vistazo tiempo atrás, la impresión 3D ha ido avanzando hasta ahora y lo seguirá haciendo a pasos agigantados. Esta tecnología es una de las que está revolucionando el sector industrial, no solo a nivel de prototipado, sino en tantos otros como sanidad, joyería, alimentación, etc.

Pero esto no es solo debido a la maquinaria que constituye la impresión 3D, sino a la innovación en los materiales desarrollados para obtener los diferentes productos deseados.

Actualmente, en el ámbito de la impresión por extrusión de polímeros, existe una gama muy amplia tanto de maquinaria como de materiales, accesible tanto a nivel doméstico como industrial.

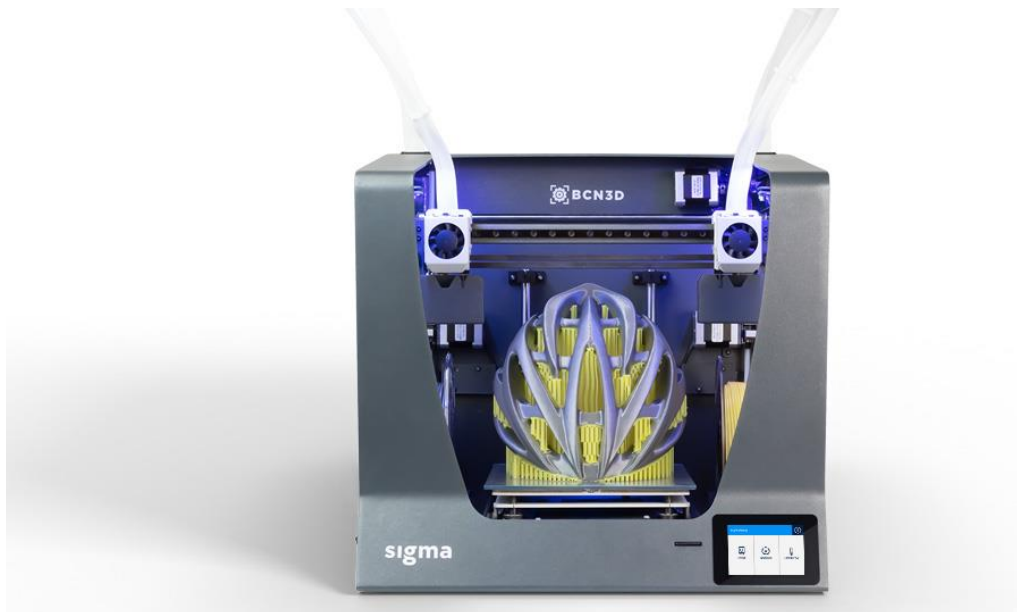


Figura 1. BCN3D Sigma

Objetivo del proyecto

El objeto de este trabajo es la realización de diversos filamentos compuestos por PLA (Ácido poliláctico) y carga orgánica, que pueda tener el aspecto de la madera, mediante una extrusora Filabot y así realizar una comparativa entre el filamento realizado en taller y uno comercial obtenido de un proveedor, para así observar si en efecto es rentable realizar este tipo de trabajo y si las características de ambos filamentos son similares.

Para ello se han seleccionado dos filamentos comerciales, uno con carga de madera y otro de bambú, con un porcentaje de carga del 30% y un 70% de PLA.

Memoria

1. Introducción al filamento destinado a impresoras 3D

La impresión 3D es una tecnología que se encuentra actualmente en constante evolución, dándose ya aplicación en multitud de campos y que poco a poco su uso va más allá de la industria.

En este caso, las impresoras por extrusión de plástico se nutren de este material para obtener las diferentes piezas. Principalmente se utilizaban ABS o PLA, aunque actualmente siguen siendo los más utilizados, pero la progresión de esta industria ha permitido la inclusión de nuevos tipos de filamentos, como los flexibles o algunos que imitan tonalidades y texturas como por ejemplo la de la madera.

1.1. Tipos de materiales destinados a impresoras 3D

ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno): El ABS es el nombre dado a una familia de termoplásticos. Se le llama plástico de ingeniería, debido a que es un plástico cuya elaboración y procesamiento es más complejo que los plásticos comunes, como son las polioleofinas (polietileno, polipropileno). El acrónimo deriva de los tres monómeros utilizados para producirlo: acrilonitrilo, butadieno y estireno. Por estar constituido por tres monómeros diferentes se lo denomina terpolímero (copolímero compuesto de tres bloques).

Los bloques de acrilonitrilo proporcionan rigidez, resistencia a ataques químicos y estabilidad a alta temperatura así como dureza.

Los bloques de butadieno, que es un elastómero, proporcionan tenacidad a cualquier temperatura. Esto es especialmente interesante para ambientes fríos, en los cuales otros plásticos se vuelven quebradizos.

El bloque de estireno aporta resistencia mecánica y rigidez.

Esta mezcla de propiedades, llamada sinergia, indica que el producto final contiene mejores propiedades que la suma de ellos. Es un termoplástico amorfo muy resistente al impacto, muy utilizado en automoción y otros usos tanto industriales como domésticos. Se le llama plástico de ingeniería, debido a que su elaboración y procesamiento es más complejo que los plásticos comunes.

El ABS se puede mecanizar, pulir, lijar, limar, agujerear, pintar, pegar etc. con extrema facilidad, y el acabado sigue siendo bueno. Gracias a su extrema resistencia y su pequeña flexibilidad hace que sea el material perfecto para infinidad de aplicaciones industriales.

Principales características:

- Temperatura de fusión: 215º - 250º C (puede cambiar según el fabricante)
- Temperatura cama: 90º - 130º C (para evitar pandeo y retracción de la pieza)
- Necesario el uso de laca o similares sobre la cama de impresión para fijar la pieza.
- No biodegradable

- Reciclable



Figura 2. Ranas de ABS

PLA (Ácido Poliláctico): El PLA es creado a partir de recursos renovables, tales como almidón de maíz, raíces de tapioca o la caña de azúcar. La gran ventaja de este material es que es biodegradable y no emite gases nocivos, es por ello que es ampliamente utilizado en el envasado de los productos alimenticios.

Como recoge la base de datos *Web of Science*, de forma aproximada puede decirse que se empezó a investigar con este material en la década de los 80 y que se popularizó a mediados de los 2000, registrando su punto álgido sobre el 2015.

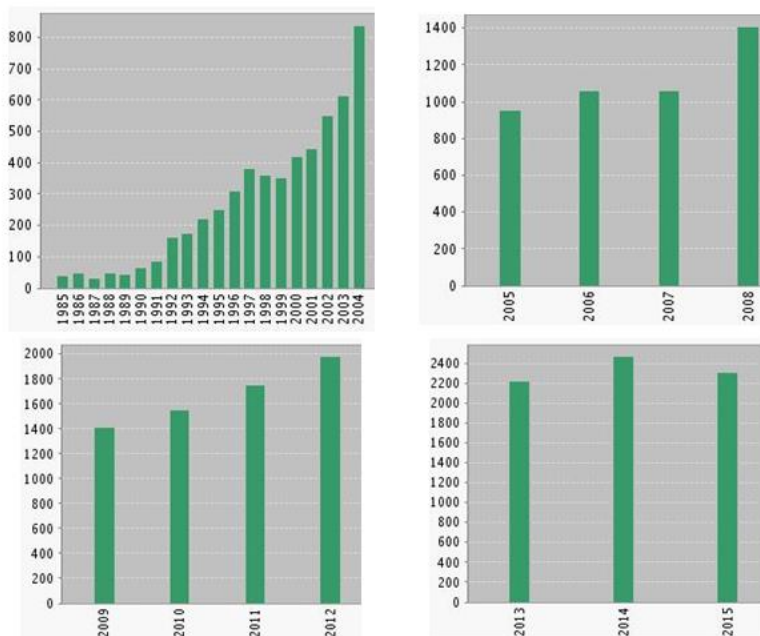


Figura 3. Elementos publicados con PLA

Una de las características que ha suscitado gran interés en el PLA es su capacidad de biodegradarse bajo condiciones adecuadas a diferencia del resto de los polímeros. Lo que le confiere una gran ventaja desde el punto de vista ecológico. Además es un polímero obtenido de recursos renovables.

Una crítica importante del polímero ocurre durante su fase de interrupción biológica. El PLA lanza dióxido de carbono y metano durante este proceso, sustancias que participan al efecto invernadero. Siendo nulo el balance neto en dióxido de carbono, pues el CO₂ lanzado a la atmósfera es aquel que fue absorbido durante la fotosíntesis de la planta.

Otra crítica es que los combustibles fósiles todavía son necesarios para producir el PLA. Aunque los combustibles fósiles no se utilizan en el polímero sí mismo, son necesarios en los procesos de cosechas y recogida de la planta así como en su producción química.

El ácido láctico, y por tanto el PLA, también pueden derivar del trigo, de la remolacha y otras cosechas permitiendo adaptarse a los climas específicos de cada región.

El PLA se ha convertido en un material un poco más fácil de imprimir, debido a su capacidad de impresión en temperaturas más bajas que el ABS y la no necesidad de adherirse a una plataforma de impresión a una temperatura demasiado elevada.

Principales características:

- Temperatura fusión: 180-220º
- Temperatura plataforma: Temperatura ambiente hasta 60º
- Uso de laca en cama para mejor adhesión.
- Biodegradable.
- Reciclable.



Figura 4. Ranas de PLA

PVA (Acetato de Polivinilo): El PVA es un polímero sintético gomoso con fórmula abreviada $(C_4H_6O_2)_n$. Perteneciente a la familia de los polímeros polivinil éster más fácilmente obtenible y de más amplio uso. Se trata de un tipo de termoplástico.

El acetato de polivinilo es un componente de un tipo de adhesivo ampliamente usado, al que se le refiere indistintamente como cola para madera, cola blanca, cola PVA o cola vinílica.

El PVA es un polímero que se disuelve fácilmente en agua caliente y deja la superficie del objeto lista para realizar una fácil retirada del soporte. Su uso se destina en crear estructuras de apoyo para piezas en PLA y ABS, ya que ayuda a que el crecimiento de la pieza sea estable cuando hay que imprimir algunas de sus partes “en el aire”, pero su coste es elevado.

Es un material muy útil, pero a la hora de realizar soportes muy pequeños puede acarrear problemas generando deformaciones en la pieza principal como huecos, mala adherencia entre capas o directamente un montón de plástico sin forma alguna, lo que conlleva a realizar repeticiones del proceso hasta que la pieza se imprima correctamente.

Principales características:

- Temperatura fusión: 180-200°
- Temperatura plataforma: 50°
- En plataforma, laca para mejorar la adhesión.
- Biodegradable.



Figura 5. Pieza con soportes de PVA

HIPS (Poliestireno de Alto Impacto): En estado natural del filamento HIPS es de color blanco brillante, aunque suele comercializarse en varios colores. Como es sabido, es un plástico biodegradable, por lo que no hay efectos adversos cuando se pone en contacto con el medio ambiente. Se utiliza con frecuencia en prototipos, ya que tiene una excelente estabilidad dimensional, y sin mencionar que también es muy fácil de fabricar, pintar, y pegar.

Muy similar al ABS, el poliestireno de alto impacto es muy compacto y también necesita las mismas temperaturas. De hecho, se combina con él como práctica

habitual para hacer piezas que tienen espacios huecos en su interior. Tiene una densidad de 1,04 g/cm y aguanta mal la luz ultravioleta. Además, para evitar el warping y los problemas de adhesión, es recomendable el uso de cama calefactada durante la impresión.

También es muy usado como estructura de soporte durante la impresión gracias a que se disuelve fácilmente en un hidrocarburo líquido incoloro llamado limoneno.

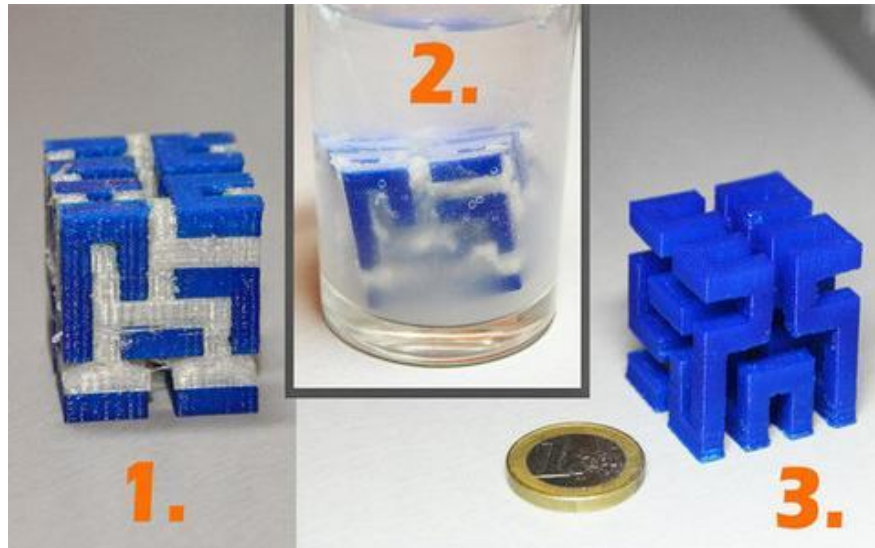


Figura 6. Pieza con soportes de HIPS

Principales características:

- Temperatura de fusión: 215° - 250° C
- Temperatura plataforma: 90° - 130° C
- No biodegradable
- Reciclable



Figura 7. Rodamiento de HIPS

PET (PolietilénTereftalato): El PET es un poliéster aromático y forma parte del grupo de los termoplásticos, razón por la cual es posible reciclarlo.

Con especial protagonismo en la industria embotelladora y envases similares, su principal virtud es que puede cristalizar y dar lugar a piezas transparentes y tremendamente resistentes. Posee una densidad de 1,45 g/cm y actúa con temperaturas de fusión idénticas a las del PLA.

Principales características:

- Temperatura de impresión: 210° - 255° C
- Temperatura de la plataforma: 55° C
- Recomendable usar laca para mejorar la adhesión de las piezas.



Figura 8. Piezas de PET

Nylon: El nylon es una fibra textil elástica y resistente, no la ataca la polilla, no requiere de planchado y se utiliza en la confección de medias, tejidos y telas de punto, también cerdas y sedales. El nailon moldeado se utiliza como material duro en la fabricación de diversos utensilios, como mangos de cepillos, peines, etc.

Teniendo una serie de características relevantes:

- Buenas propiedades mecánicas.
- Gran resistencia al desgaste.
- Tenacidad elevada.
- Gran deslizamiento.
- Presenta un peso menor al de los filamentos PLA y ABS.
- Terminación de la superficie lisa (apto para componentes que deban soportar fricción).

No obstante, el mercado nos ofrece una amplia gama de filamento de Nylon, encontramos los dos extremos, el blando y flexible o el duro y tenaz. Se trata de un material idóneo para la creación de piezas flexibles y a la vez resistentes. Por otro lado, en referencia al componente artístico, el filamento de Nylon puede ser tintado con cualquier tinte de ropa. Permitiendo unos acabados personalizados y con un elevado grado de perfección.

Con esta fibra sintética obtendremos muy buenos acabados en impresión 3D pero presenta algunos inconvenientes: tiende a encogerse, curvarse, no se adhiere bien al aluminio ni al cristal, y tampoco es biodegradable.

Principales características:

- Temperatura de extrusión: 235° - 270° C
- Temperatura de la plataforma: 60° - 80° C
- Para mejorar la adhesión de la pieza, se recomienda usar pegamento de base PVA.

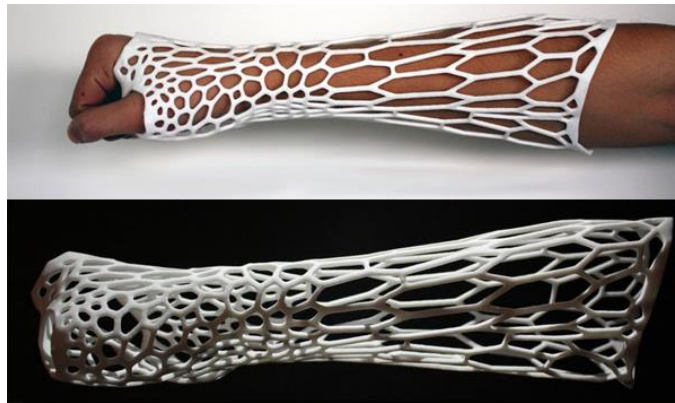


Figura 9. Pieza de Nylon

Filaflex: El filamento flexible es un compuesto plástico al que se le añade un agente químico (plastificante), para aumentar su flexibilidad, reducir la temperatura de fundido y la viscosidad que permite que las impresoras 3d puedan fundirlo y darle la forma deseada, quedando el producto final como una pieza consistente que presenta como propiedad principal a destacar su flexibilidad. Cualidad de la que carecen otros compuestos como puede ser el PLA o el ABS.

El Filaflex es un elastómero desarrollado en España con una capacidad de estiramiento de 700% respecto a su tamaño original. Esa propiedad lo hace idóneo para fabricar topes, plantillas de calzado, zapatillas, ruedas neumáticas, pulseras de relojes y, en definitiva, todo lo que pueda precisar doblarse mucho sin romperse.



Figura 10. Zapatillas de Filaflex

2. Material para la fabricación de filamento

En este caso los materiales a estudiar son bastante específicos, ya que se obtienen de la mezcla de un polímero y una carga orgánica.

Ya que el PLA es obtenido de recursos renovables, y bajo la misma orientación hacia el cuidado medioambiental y aprovechamiento económico por medio del reciclado de residuos, las cargas añadidas al polímero principal provienen de excedentes de la propia naturaleza. En este caso, la carga no está enfocada a mejorar las propiedades del material, sino simplemente a abaratar su coste y obtener un aspecto visual que emule el de la madera.

Las proporciones para la obtención de filamento han sido las siguientes:

2.1. PLA + Serrín (FilaWood)

PLA: 6201D Natureworks

Ingeo biopolymer 6201D, un producto de NatureWorks LLC, es una resina termoplástica derivada principalmente de recursos renovables. Disponible en forma de granza, el 6201D está diseñado para extrusión en fibras cortadas mecánicamente o en filamentos continuos, utilizando equipos convencionales de hilado y estirado de fibras.

Ingeo biopolymer 6201D se puede convertir en una amplia gama de productos.

Typical Material & Application Properties ¹		
Physical Properties	Ingeo 6201D	ASTM Method
Specific Gravity	1.24	D792
Relative Viscosity	3.1	CD Internal Viscotek Method
Melt Index, g/10 min (210°C)	15-30	D1238
Melt Density (230°C)	1.08	
Glass Transition Temperature (°C)	55-60	D3417
Crystalline Melt Temperature (°C)	155-170	D3418
Typical Fiber Properties		
Denier per Filament	≥0.5 dpf	g/9000 m
Tenacity (g/d)	2.5-5.0	D2256/D3822
Elongation (%)	10-70	D2256/D3822
Modulus (g/d)	30-40	D2256-D3822
Boiling Water Shrinkage (%)	5-15	D2102
Hot Air Shrinkage (%) (130°C. 10 min)	5-15	D2102

(1) Typical properties; not to be construed as specifications.

Tabla 1. Propiedades del PLA 6201 Natureworks

Serrín: Mezcla de pino y haya principalmente obtenida de una carpintería, tamizada y examinada adecuadamente para evitar trazas de otros desechos del establecimiento.

Granulometría: <250µm

Mezcla 1: 70%PLA+30%Serrín

Mezcla 2: 85%PLA+15%Serrín

2.2. PLA + Bambú (BambooFill)

PLA: 6201D Natureworks

Bambú: Variedad Guadua Angustifolia suministrado por el departamento, analizado y tamizado para evitar partículas de un tamaño inadecuado.

Granulometría: <250µm → 45%

250µm-500µm → 55%

Mezcla 1: 70%PLA+30%Bambú

Mezcla 2: 85%PLA+15%Bambú

2.3. PLA + Cáscara de almendra

PLA: 6201D Natureworks

Almendra: Suministrado por el departamento, se obtiene del descascarado de la almendra y de una molienda posterior.

Granulometría: <250µm

Mezcla 1: 70%PLA+30%Almendra

Mezcla 2: 85%PLA+15%Almendra

3. **Obtención de filamento para impresoras 3D**

3.1. Extrusora Filabot

Una máquina extrusora es aquella, en la que mediante el uso de una tolva, se hace pasar la granza por un husillo previamente calentado, derrite el material con la finalidad de expulsarlo a presión por la boquilla, obteniendo una forma determinada. Se puede trabajar con todo tipo de materiales, desde metal, plásticos, hasta comida. En este caso, se extruirán polímeros termoplásticos para la impresión 3D.

Los filamentos para impresión 3D pueden adquirirse de manera comercial cumpliendo los parámetros establecidos por el fabricante a la hora de imprimir, pero cabe la posibilidad de realizarlos mediante el uso de la extrusora Filabot y polímero suministrado en granza. Esta forma de fabricación, permite al usuario controlar sus propios parámetros, como la velocidad, la temperatura...

Esta extrusora permite fabricar filamento de forma personalizada y no industrializada, con las características deseadas y pudiéndose abaratar costes ya que el material con el que se fabrica el filamento es más asequible que la compra directa del filamento comercial.



Figura 11. Controles y display de la extrusora Filabot

La Filabot Original™ está compuesta por un motor-reductor de 1/15 HP, que gira a 35 rpm y funciona con 24 VDC y 3.5 A con un par de 9 Nm. Cuenta además con una tolva en la que introducir el material y un tornillo sin fin que gira concéntricamente y un display para controlar la temperatura con un intervalo comprendido entre los 20º y 450 ºC con indicación y control de precisión de 0,1 ºC.



Figura 12. Extrusora Filabot

Esta extrusora es capaz de confeccionar filamento a partir de granza de plástico estándar en una gran variedad de presentaciones ampliamente disponible, como de plástico reciclado procedente de distintas fuentes. Aun así, la empresa fabricante y marca de la extrusora, indica un listado de plásticos verificados por la compañía, que se pueden procesar con la ayuda de la Filabot, advirtiendo además que otros plásticos no verificados por ellos, pueden dar lugar a dificultades durante el proceso de extrusión. Advierten que se desaconseja el uso de PVC y otros Vinilos en las extrusiones, puesto que los gases que se desprenden durante el proceso son tóxicos.

PLA (Ácido Poliláctico)
ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno)
HIPS (Poliestireno de Gran Impacto)
ULTEM (Resina)
PC (Policarbonato)

Tabla 2. Plásticos compatibles con la Filabot

Durante todo el proceso es muy importante seguir un control de la temperatura, dependiendo del material a extruir y de las condiciones ambientales de humedad y temperatura de la sala donde se disponga la máquina.

Por ello, se ha de manejar un rango de temperaturas determinado para los plásticos propuestos y testados por la casa comercial, mostrándose a continuación:

Plastic Type	Processing Temperature
PLA	175°C - 195°C
ABS	165°C - 185°C
HIPS	175°C - 195°C
Uitem	350°C - 400°C
PC	250°C - 320°C

Tabla 3. Tabla de temperaturas recomendadas por el fabricante

3.2. Devanadora

Esta máquina es el complemento ideal de la extrusora con la finalidad de realizar una correcta recogida del filamento fabricado. Además de realizar la recogida, permite ajustar el diámetro del filamento extruido y reducir el posible error cometido en la extrusión. Este ajuste se puede llevar a cabo gracias al regulador de velocidad que posee, mediante el cual podemos ajustar la velocidad de arrastre que ejercen los rodillos al filamento que proviene de la extrusora. Estos rodillos han sido diseñados para que no se produzca una compresión excesiva del filamento y que no afecte a la calidad del producto fabricado.



Figura 13. Devanadora

Una vez el filamento es guiado entre los rodillos, este se dirigirá a la bobina que se colocará a continuación en el cilindro que posee la máquina, y la cual irá girando para ir enrollando el filamento, pudiéndose regular mediante el controlador de velocidad.



Figura 14. Controles de la devanadora

3.3. Proceso de extrusión

3.3.1. Etapas para el proceso de extrusión

- a. Secado: Para eliminar la humedad existente, se somete el material a un secado de 80°C durante 5 horas.
- b. Pesado y mezclado: Se forman las mezclas según las proporciones abajo citadas y se depositan en bolsas con cierre hermético para evitar que vuelvan a absorber de nuevo humedad.

Se procede a elaborar una cantidad de 600g por cada mezcla, por tanto:

- Mezclas con un 70% de PLA se obtienen 420g PLA + 180g de carga.
- Mezclas con un 85% de PLA se obtienen 510g PLA + 90g de carga



Figura 15. Bandejas con mezclas de PLA + carga

- c. Etiquetado: Cada bolsa es etiquetada con un nombre y su porcentaje de componentes.

PLA+Almendra → PlaAlm: 1. 70%PLA-30%Almendra
2. 85%PLA-15%Almendra

PLA+Serrín → PlaSer: 1. 70%PLA-30%Serrín
2. 85%PLA-15%Serrín

PLA+Bambú → PlaBam: 1. 70%PLA-30%Bambú
2. 85%PLA-15%Bambú

- d. Extrusión: Una vez mezclado se procede a una primera extrusión para que la carga se integre con el PLA.



Figura 16. Extrusora

- e. Peletizado: Endurecido el material se introduce a la peletizadora para obtener el material en forma de pellets.

3.3.2. Etapas para la producción de filamento

Preparación extrusora Filabot: Una vez enchufada a la corriente, se fija la temperatura según el material a extruir. Cuando el display marca la temperatura deseada se activa el husillo, que empieza a girar. Una vez se comprueba que tiene la temperatura adecuada y gira el husillo correctamente, se puede proceder a verter el material en la tolva.

Prueba con pequeñas cargas ABS: Debido a que el departamento no disponía de PLA para esta prueba, se procede a realizarlo con ABS.

Llegada a la temperatura programada de 180°C, se van insertando pequeñas cantidades de material en la tolva, para retirar los residuos que puedan haber quedado de una anterior extrusión. Se va observando si el material se extruye de manera adecuada y si efectivamente hay restos de un anterior trabajo.

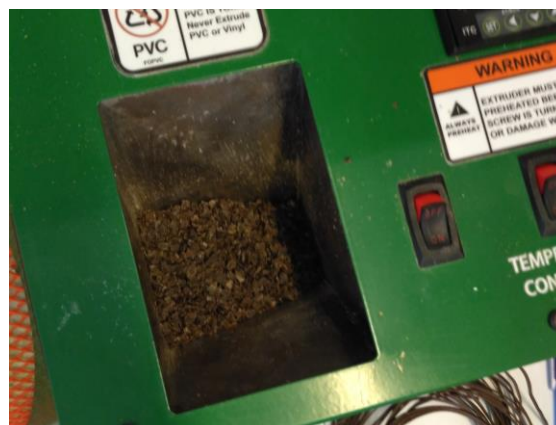


Figura 17. Tolva cargada

Prueba con grandes cargas ABS: Una vez la extrusora funcione con normalidad, se procede a una extrusión de prueba con una mayor cantidad de ABS. Cuando el filamento que se extruye es continuo, se une a una devanadora para que enrolle el material en un tambor y así facilitar la recogida del filamento.

Pruebas con PLA+Carga: Comprobado el correcto funcionamiento de la extrusora, se procede a la extrusión de los filamentos a ensayar.

PLA+Bambú

- PlaBam1 (70%PLA + 30%Bambú)

Como en el proceso con ABS, se introdujo una pequeña cantidad de PlaBam1 (70% PLA + 30%Bambú) en la tolva a una temperatura programada de 180°C, que se fue mezclando con los residuos de ABS. Una vez limpio el canal, la extrusión de PlaBam1 comenzaba de manera incorrecta obstruyéndose la boquilla. En todo el proceso no se obtuvo filamento alguno.

Debido a los incidentes acaecidos en este proceso, no se extruyó de nuevo el PlaBam1 (70%PLA + 30%Bambú) por precaución y evitar posibles efectos adversos en la máquina. Posteriormente se realizó un proceso de limpieza con ABS.

- PlaBam2 (85%PLA + 15%Bambú)

De nuevo, se introduce una pequeña cantidad de PlaBam2 (85%PLA + 15%Bambú).

180°C - 170°C → En este caso, el material era muy fluido imposibilitando la formación de una continuidad en el filamento, ya que se rompía por su propio peso.

165°C - 160°C → A esta temperatura el filamento se enfriaba muy rápido, era demasiado frágil y no podía enlazarse con la devanadora.

PLA+Serrín

- PlaSer2 (85%PLA + 15%Serrín)

Se añade una pequeña carga, que inmediatamente se mezcla con los residuos de ABS. Al contrario que en el proceso anterior, una vez es eliminado todo el ABS del canal, el filamento comienza a extruirse con normalidad.

165°C → En esta ocasión el filamento es extruido correctamente, pudiéndose enlazar con la devanadora y facilitar la recogida.

- PlaSer1 (70%PLA + 30%Serrín)

Al igual que el proceso anterior, este discurre con normalidad habiendo utilizado los mismos parámetros de temperatura y velocidad.



Figura 18. Extrusión de PLA+Serrín

Pla+Almendra

- PlaAlm1 (70%PLA + 30%Almendra)

165°C → En este caso el filamento es muy frágil y fluido, por lo que no puede enlazarse con la devanadora.

- PlaAlm2 (85%PLA + 15%Serrín)

165°C → De manera similar al PlaAlm1, el filamento es frágil, fluido y difícilmente puede enrollarse.

3.3.3. Problemas ocasionados

- Al iniciar el proceso de extrusión, el husillo de la extrusora no funcionaba, por lo que esto retrasó su comienzo.
- En la extrusión de PlaBam1 se produjo una obstrucción que derivó en una expulsión brusca del material.
- Debido a que el PLA+Bambú y PLA+Almendra no pudieron ser extruidos de manera adecuada por la elevada carga que poseían, se propuso repetir todo el proceso con una menor cantidad de carga y la posibilidad de añadir algún compatibilizante, que aunara adecuadamente tanto el PLA como las cargas.

Esta propuesta no pudo llevarse a cabo debido a la falta de existencias de PLA en el departamento, de las cuales se pretendía reponer, pero que el proveedor no pudo suministrar. Por lo que, no pudo comprobarse su comportamiento, propiedades, etc.

4. Caracterización

4.1. Ensayo del filamento a tracción

Los filamentos que hemos conformado a partir de la extrusora Filabot se van a caracterizar a partir de ensayos mecánicos. Estos ensayos esenciales son los que nos permiten conocer propiedades mecánicas como la tensión de rotura, el límite elástico, alargamiento, estiración, dureza, resistencia al Impacto, etc.

De esa manera se pueden clasificar los distintos materiales atendiendo a las especificaciones normativas de cada uno, además de comprobar que dicho material corresponde con el requerimiento del cliente y la calidad que este exige.

Los ensayos mecánicos se pueden utilizar en cualquier fase del proceso productivo, desde el diseño de componentes hasta el control de calidad de la producción, pasando por la selección de materiales, y si es necesaria su modificación por necesidad de cumplir con nuevas solicitudes.

Los ensayos pueden realizarse a cualquier tipo de material metálico: aceros al carbono, aleados e inoxidables, aluminio y sus aleaciones, aleaciones de cobre (bronces, latones), titanio... Pero además también se realizan ensayos mecánicos en plásticos, cerámicos, biomateriales, materiales compuestos y termoplásticos, los cuales ocupan en este proyecto.

Todos los ensayos se deben realizar sobre muestras completas o probetas previamente preparadas y siguiendo los requerimientos y parámetros de ensayo de normas como ISO, ASTM, EN o en nuestro caso UNE (Normas Españolas). Existen ensayos mecánicos de diversa índole, pero en este caso se realizarán ensayos de tracción.

El ensayo de tracción de un material, consiste en someter una probeta normalizada a un esfuerzo axial incremental hasta que esta se rompe. Este ensayo mide la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada lentamente.

La resistencia a tracción de los filamentos, se obtienen conforme a la Norma UNE-EN-ISO 527:2012. "Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción".

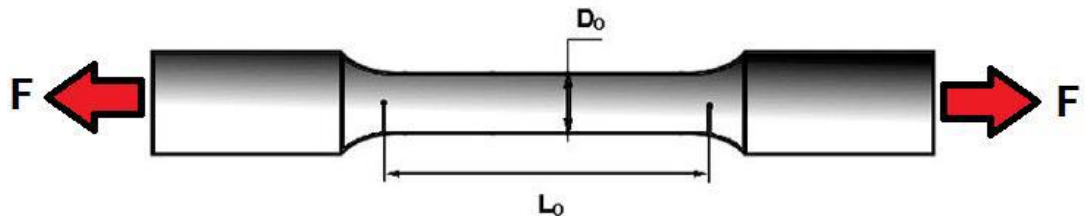


Figura 19. Probeta de tracción

En este caso, debido a las dificultades acaecidas durante la extrusión de los diferentes materiales, se decide no realizar probetas normalizadas y ensayar directamente los filamentos obtenidos.

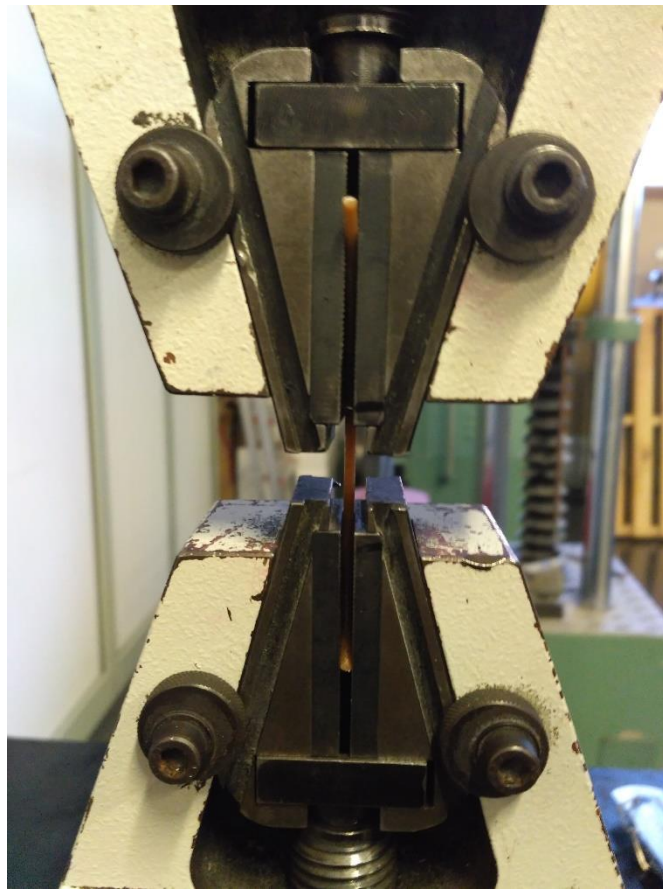


Figura 20. Ensayo de tracción

4.2. DSC (Calorimetría diferencial de barrido)

La calorimetría diferencial de barrido (DSC, Differential Scanning Calorimetry) permite el estudio de aquellos procesos en los que se produce una variación entálpica, por ejemplo determinación de calores específicos, puntos de ebullición y fusión, pureza de compuestos cristalinos, entalpías de reacción y determinación de otras transiciones de primer y segundo orden.

En general, el DSC puede trabajar en un intervalo de temperaturas que va desde la temperatura del nitrógeno líquido hasta unos 600 °C. Por esta razón esta técnica de análisis se emplea para caracterizar aquellos materiales que sufren transiciones

térmicas en dicho intervalo de temperaturas. La familia de materiales que precisamente presenta todas sus transiciones térmicas en ese intervalo es la de los polímeros.



Figura 21. DSC

El resultado de un experimento DSC es una curva de flujo calorífico *versus* temperatura o *versus* tiempo. Existen dos convenciones diferentes al representar los efectos térmicos: las reacciones exotérmicas que exhibe la muestra pueden ser mostradas como picos positivos o negativos dependiendo del tipo de tecnología o de instrumentación utilizadas en la realización del experimento.

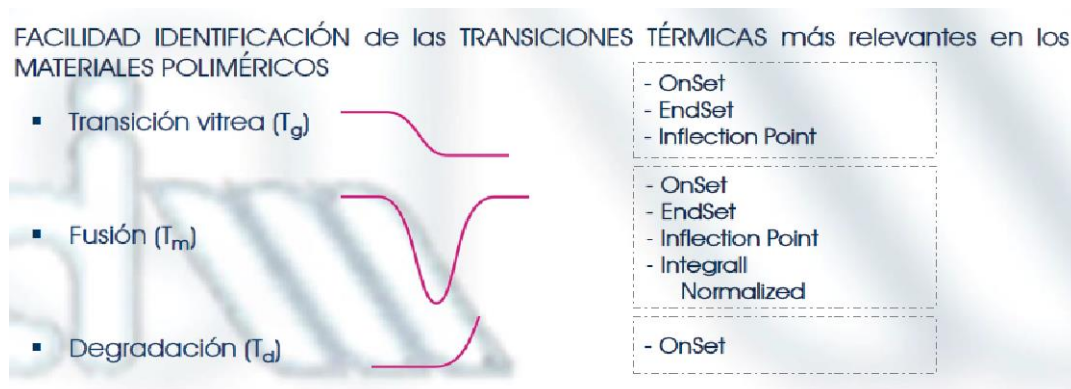


Ilustración 1. Identificación de las transiciones térmicas en materiales poliméricos

En el campo de polímeros pueden determinarse transiciones térmicas como la temperatura de transición vítrea T_g , temperatura de fusión T_m , etc.

Temperatura de transición vítrea: La T_g se da cuando el polímero es enfriado por debajo de esa temperatura, se vuelve rígido y quebradizo, igual que el vidrio.

Temperatura de fusión: Temperatura o pequeño intervalo de temperaturas en los cuales los cristales desaparecen en un polímero semicristalino y éste pasa rápidamente de sólido semicristalino a un líquido muy viscoso.

5. Análisis y resultados

Se ensayaron a tracción los filamentos tanto comerciales como los obtenidos a partir de la Filabot. Para la obtención de los resultados, se introdujeron una serie de parámetros en el software de la máquina de ensayos, como el diámetro del filamento, la velocidad del ensayo, la longitud inicial, y tras la rotura del filamento, se introducía también la elongación sufrida.

Con esos parámetros introducidos, el software es capaz de realizar el cálculo y proporcionarnos los valores de las propiedades mecánicas con las que se ha comportado el filamento.

A continuación se muestran esos valores para cada uno de los filamentos ensayados, además de las gráficas tensión-deformación que podemos obtener con ellos.

5.1. Ensayo de tracción

PlaAlm1:

	Valor	Unidad
Alargamiento porcentual de rotura (A)	5.35	%
Longitud inicial entre puntos (Lo)	28	mm
Resistencia máxima	39.5	MPa
Módulo de elasticidad (E)	1800	MPa

PlaAlm2: No se pudo ensayar

PlaSer1:

	Valor	Unidad
Alargamiento porcentual de rotura (A)	5.82	%
Longitud inicial entre puntos (Lo)	28	mm
Resistencia máxima	35.4	MPa
Módulo de elasticidad (E)	820	MPa

PlaSer2:

	Valor	Unidad
Alargamiento porcentual de rotura (A)	2.1	%
Longitud inicial entre puntos (Lo)	28	mm
Resistencia máxima	46.7	MPa

Módulo de elasticidad (E)	2439	MPa
---------------------------	------	-----

PlaBam1: No se pudo ensayar

PlaBam2: No se pudo ensayar

BambooFill (Comercial):

	Valor	Unidad
Alargamiento porcentual de rotura (A)	20.3	%
Longitud inicial entre puntos (Lo)	28	mm
Resistencia máxima	28.7	MPa
Módulo de elasticidad (E)	283	MPa

CorkFill (Comercial):

	Valor	Unidad
Alargamiento porcentual de rotura (A)	46	%
Longitud inicial entre puntos (Lo)	28	mm
Resistencia máxima	22.5	MPa
Módulo de elasticidad (E)	409	MPa

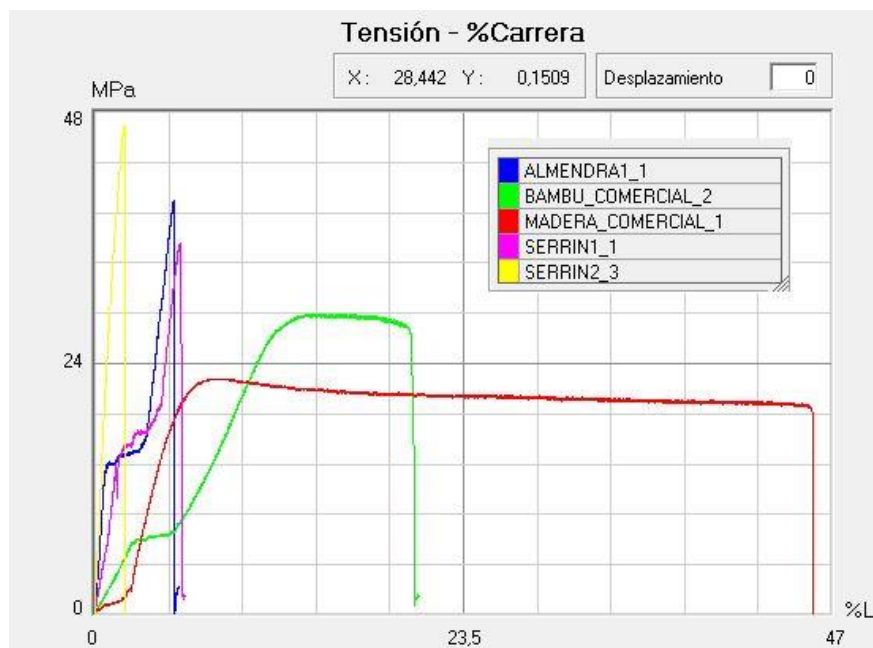


Ilustración 2. Gráfica tensión/carrera de los filamentos ensayados

Esta gráfica conjunta de las curvas obtenidas en el ensayo de tracción, muestra como los filamentos extruidos mediante el uso de la Filabot presentan una mayor resistencia pero menor plasticidad que los comerciales.

Resistencia máxima

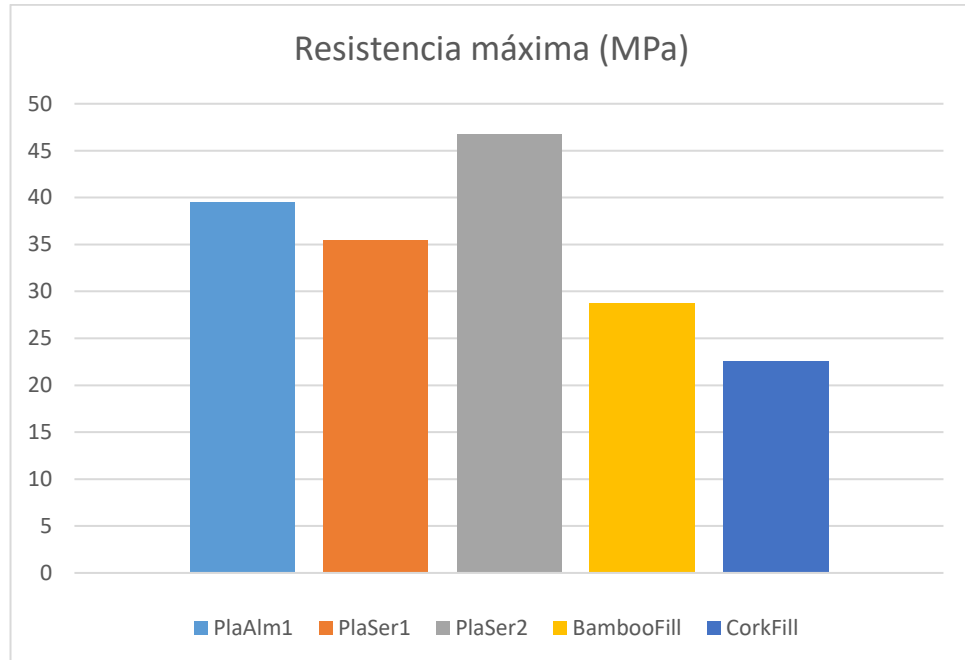


Ilustración 3. Gráfico de barras de Resistencia máxima

En la gráfica anterior se puede observar que el filamento extruido posee mayor resistencia que el filamento. En este caso, el filamento extruido ofrece unas mejores cualidades que el comercial.

Módulo de elasticidad

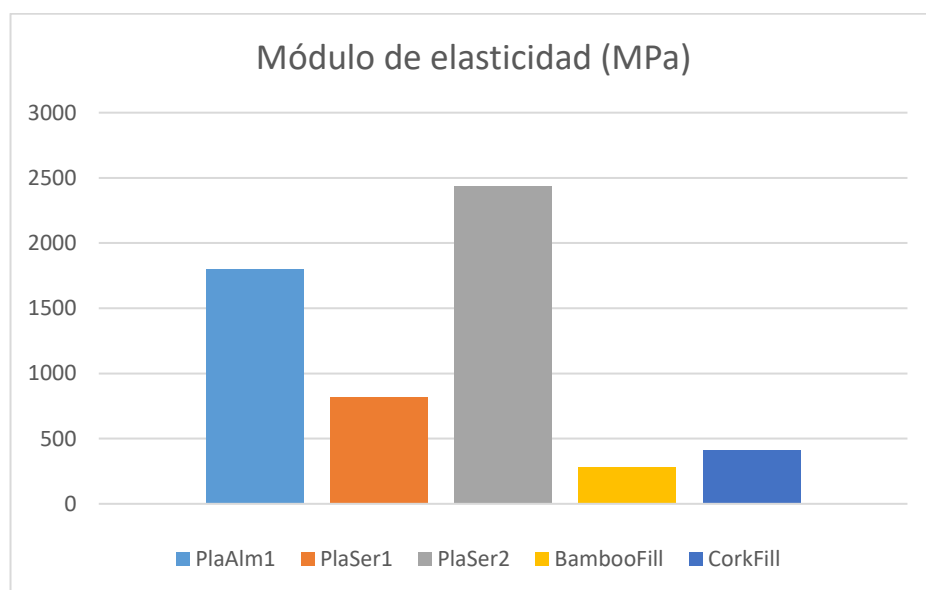


Ilustración 4. Gráfico de barras del Módulo de elasticidad

En la gráfica se observa que el filamento extruido posee mayor módulo de elasticidad que el filamento comercial con un valor de 2439Mpa del PlaSer2 frente a 283Mpa del BambooFill. En este caso, el filamento extruido ofrece unas mejores cualidades que el filamento comercial.

Alargamiento

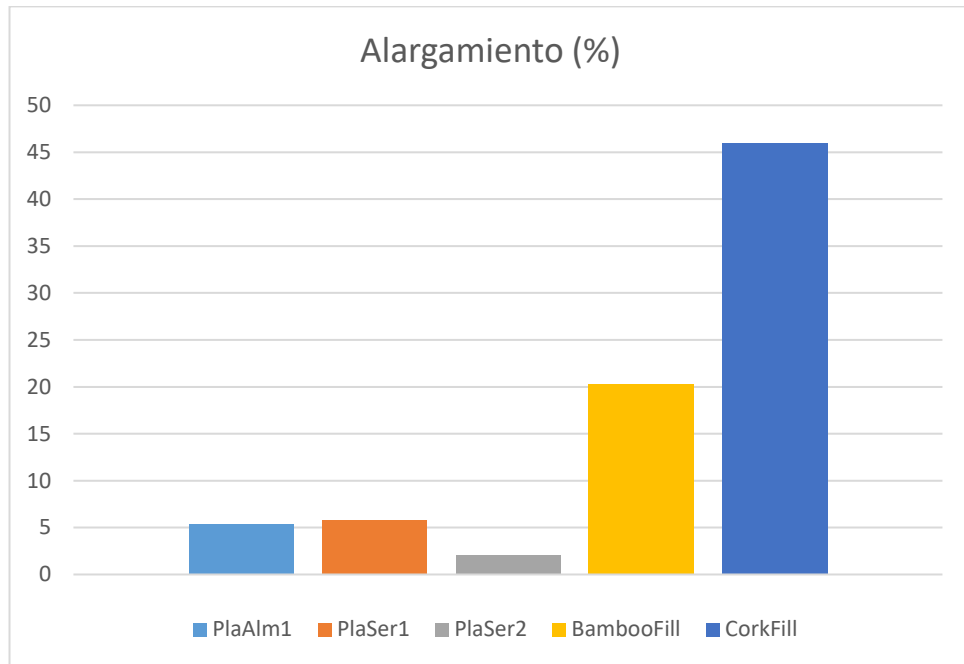


Ilustración 5. Gráfico de barras de Alargamiento

En la gráfica se puede observar como el filamento comercial ofrece un mayor alargamiento que el filamento extruido. El valor del alargamiento que puede soportar el filamento comercial es de un 46 % del CorkFill frente al 2.1 % del PlaSer2. Por lo tanto en este factor el filamento comercial posee mejores cualidades que el extruido.

5.2. DSC (Calorimetría diferencial de barrido)

En la gráfica siguiente se tienen dos curvas obtenidas por el método de la DSC, la primera de color negro es del filamento comercial BambooFill y la segunda de color rojo es del filamento comercial CorkFill. Analizando la imagen se obtiene lo siguiente:

BambooFill

Tg (temperatura de transición vítrea) = 62.26°C

Tm1 (temperatura de fusión) = 156.59°C

Tm2 (temperatura de fusión) = 174.68°C

Observando los datos se tiene una temperatura de transición vítrea de 62.26°C, que concuerda con la del PLA (Ácido poliláctico) que oscila en un rango de entre 60°C y 65°C, y lo confirma además la temperatura de fusión que ronda los 150°C para el PLA.

Se observa además, un pico de 174.68°C que podría ser el PHA (Polihidroxicapronato) que menciona el fabricante en sus especificaciones.

CorkFill

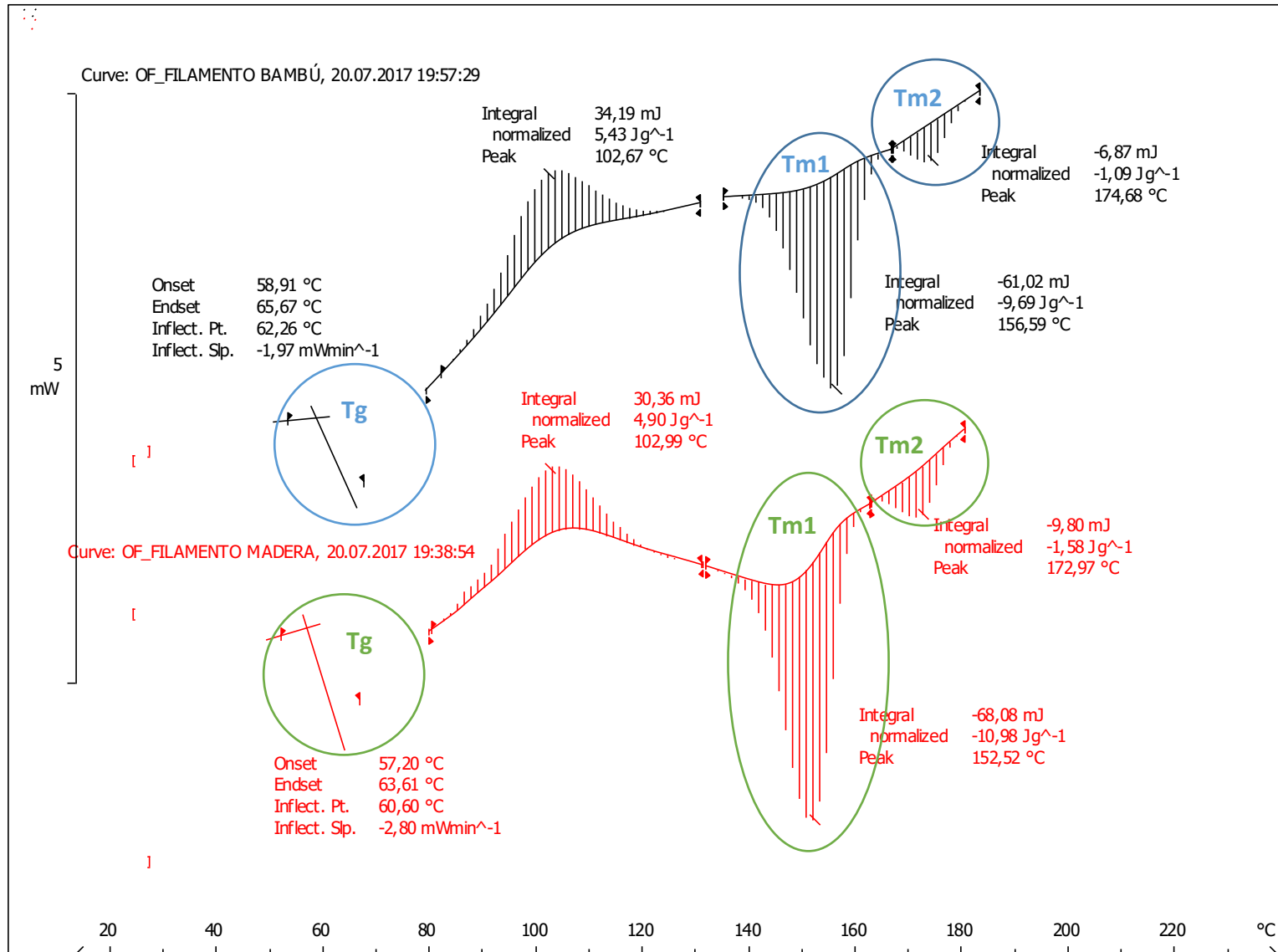
Tg (temperatura de transición vítrea) = 60.60°C

Tm1 (temperatura de fusión) = 152.52°C

Tm2 (temperatura de fusión) = 172.97°C

Si se analizan estos datos, se puede afirmar que son prácticamente iguales a los anteriores, por lo que, se tiene una composición de PLA (Ácido poliláctico) y PHA (Polihidroxicapronato) en ambos casos.

exo



Lab: METTLER

STAR^e SW 10.00

Ilustración 6. Gráfica DSC

6. Conclusiones

El estudio que se ha llevado a cabo en este trabajo final de máster, pretendía analizar si efectivamente se podía obtener filamentos compuestos similares a los comerciales y así conseguir de una manera más económica material para la impresión 3D.

En este caso, los resultados obtenidos no han sido los esperados, ya que se ha observado que la cantidad de carga aportada a la mezcla ha sido excesiva en las composiciones con almendra y bambú, por lo que, para próximos estudios se pretende reducir esta cantidad y cambiar las unidades de medida a volumen en vez de en masa.

En el caso del bambú, las partículas eran muy fibrosas, secas y al pesarlas ocupaban gran volumen. Esto podría haber provocado que la cantidad de PLA fuera insuficiente para interaccionar adecuadamente con la carga.

En el caso del serrín, aportar que se pudo extruir prácticamente de forma correcta, debido a que en la muestra de serrín recibida, la gran parte pertenecía a madera de pino siendo ésta muy resinosa y esto pudo actuar como compatibilizante ante el PLA.

Para finalizar, añadir que los filamentos iban a ser usados para imprimir un determinado tipo de pieza, para analizar su aspecto, características de impresión y características mecánicas. Para evitar desperfectos en la impresora, la posible obstrucción o rotura del hotend se decidió eliminar este proceso y prevenir el coste añadido del cambio de componentes o la impresora en su totalidad.

ANEJO I

En el caso de que este proyecto hubiese seguido su curso, el proceso habría sido el siguiente:

Una vez obtenidos los filamentos de PLA con almendra, serrín y bambú, se procede a realizar una impresión mediante una Prusa i3 del departamento.

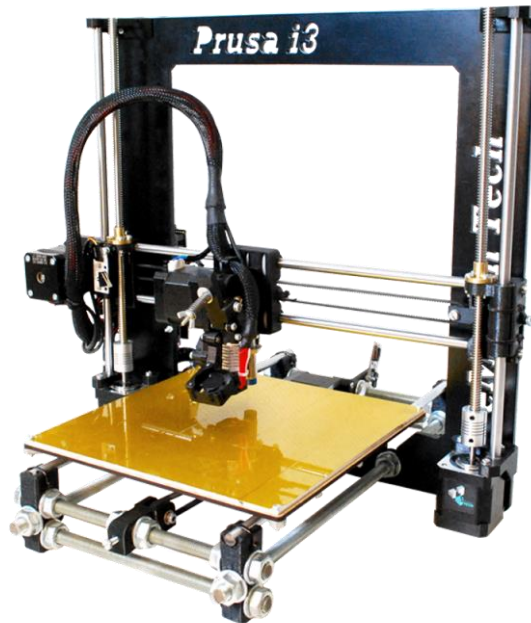


Figura 22. Imagen Prusa i3

El primer paso sería diseñar mediante un programa de diseño 3D, el modelo de pieza a imprimir. En este caso se optó por realizar probetas normalizadas, iguales a las utilizadas en ensayos de tracción, para poderlas analizar posteriormente mediante diferentes procesos.

Una vez obtenido el diseño, este ha de guardarse en un formato compatible con el software de impresión y que proporcione toda la información de la pieza. El tipo de archivo más usual es el STL.

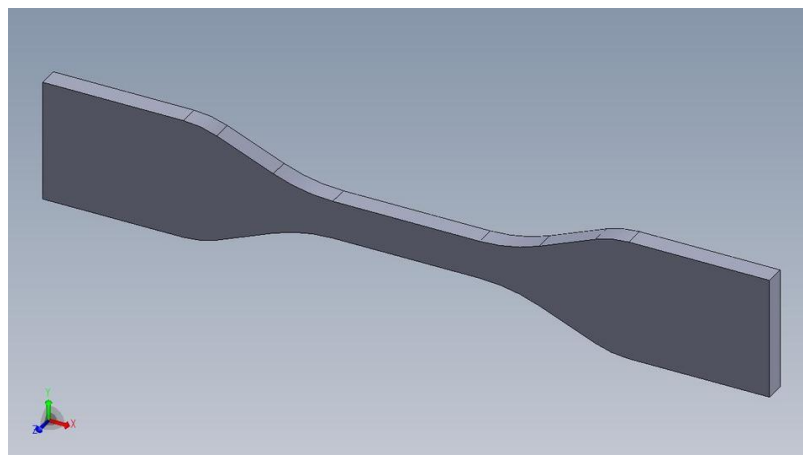


Figura 23. Probeta Software 3D

Los programas que se han de usar con esta impresora son el Slic3r, que genera un archivo denominado GCODE con la información del objeto a imprimir a capas a partir de un STL, y el PronterFace, que permite al usuario establecer los parámetros de impresión deseados y controlar diferentes funciones como, mover los ejes libremente, lanzar ficheros para impresión, etc.

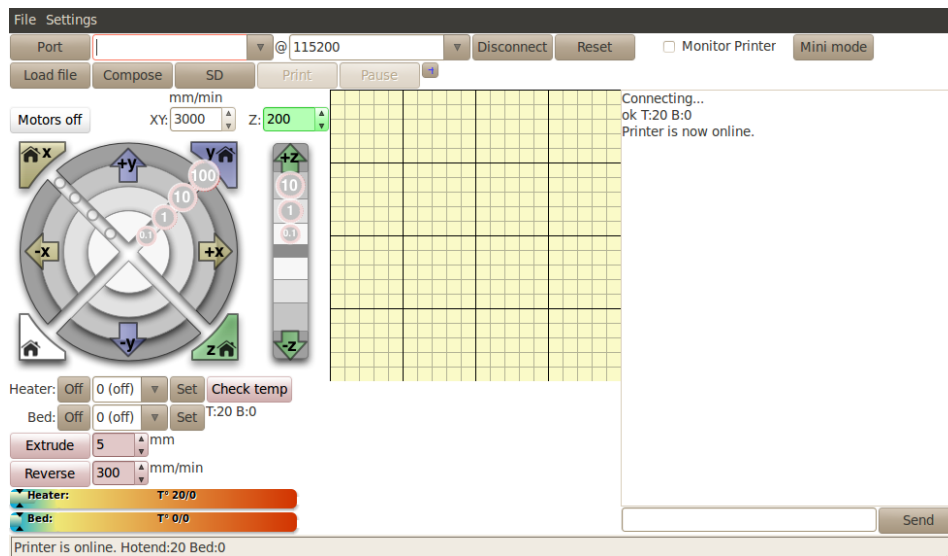


Figura 24. Captura PronterFace

Si la impresora dispone de display, mediante el programa Cura se enlaza la pieza junto con los parámetros de temperatura y velocidad, se obtiene el archivo GCODE con toda la información necesaria que se ha de guardar en una tarjeta SD y se imprime directamente desde la impresora sin tener un ordenador conectado a la impresora.

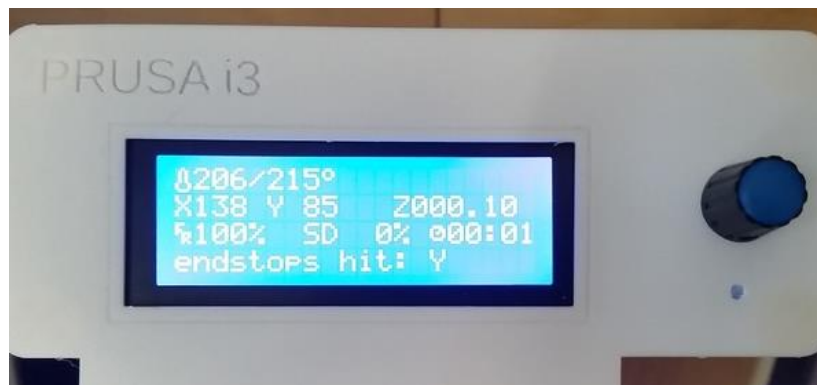


Figura 25. Display Prusa i3

Finalmente, impresas todas las piezas se analizarían los siguientes parámetros:

- Color
- Deformación
- Homogeneidad
- Resistencia

- Tacto
- Quemaduras
- Adherencia entre capas

Analizado lo dicho anteriormente se podría concluir si efectivamente los filamentos obtenidos son adecuados para la impresión y si económicamente hablando, es viable realizar todo este proceso.

Bibliografía

- Blogs relacionados con impresión 3D
- BCN3D Technologies
- Documentos MUIPCM
- NatureWorks
- Web of Science