



Universidad
de La Laguna

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

SECCIÓN DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO DE FIN DE GRADO

FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE FILAMENTOS PARA IMPRESORA 3D A PARTIR DE MATERIALES RECICLADOS

Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica

Alumna: Laura Arteaga Medina

Tutora: María Milagros Laz Pavón

Julio 2015

Resumen

El trabajo de fin de grado que a continuación se presenta tiene como objetivo fabricar y caracterizar filamentos para impresoras 3D a partir de materiales reciclados. Este tipo de proyecto surge tras el imparable auge de las impresoras 3D como nuevo método de conformación y el crecimiento del empleo de materiales termoplásticos o con características especiales que crean a su vez la necesidad de encontrar una solución viable y responsable a todos los excedentes que este proceso crea durante su desarrollo.

Para llevar a cabo el estudio, se seleccionaron distintos tipos de materiales para generar filamento válido para la impresión 3D. Se parte de un material base, en este caso el PLA, y se le añade como carga distintos materiales como PET, PLA reciclado y fibra natural de platanera, que por su excesivo consumo, su no concebida vía de reaprovechamiento y su compatibilidad se consideran de interés para el estudio.

Durante el proceso de desarrollo del trabajo, se empleará una extrusora para llevar a cabo el proceso de fabricación de filamento, además de una impresora 3D de tipología RepRap para generar piezas a partir del filamento confeccionado para ensayarlas mecánicamente y caracterizar así el filamento y sus propiedades. Por todo ello, se ampliarán los conocimientos en la tecnología de fabricación 3D, desde la obtención de materia prima a través de trituración y extrusión de material, hasta la impresión y el trabajo mecánico de las piezas conformadas.

Abstract

The final degree project that we are presenting aims to fabricate and characterize filaments for 3D printers from recycled materials. This type of project comes after the unstoppable rise of 3D printers as a new method of forming and employment growth of thermoplastic materials or special characteristics that in turn create the need to find a viable and responsible solution to everything surplus created during the development process.

To conduct the study, different types of materials were selected to generate valid for 3D printing filament. Is part of a base material, in this case the PLA, and added as filler different materials such as PET, PLA recycling and natural banana fiber, which by their excessive consumption, not intended route of reuse and compatibility are considered interest for the study.

During development work, an extruder is used to carry the filament manufacturing process, along with a 3D printer type RepRap to generate pieces from rehearsing and made to mechanically characterize the filament and filament and their properties. Therefore, knowledge is expanded in 3D technology manufacturing, from raw material obtained by crushing and extrusion material to printing and the mechanical work of the molded parts.

Índice

Introducción	9
Objeto del trabajo	10
Alcance	11
Definiciones y abreviaturas	12
Antecedentes del proyecto.....	16
Memoria	23
1. Introducción filamentos impresora 3D	25
1.2 Filamentos para impresoras 3D	28
1.3 Tipos de filamentos para impresión 3D	31
2. Materiales para filamento 3D	41
2.1 Filamento para impresora 3D	41
2.2 PLA (Ácido Poliláctico)	44
2.3 PET (Polietileno Tereftalato)	52
2.4 Fibra de platanera	58
3. Obtención de filamento	63
3.1 Extrusora Filabot	63
3.2 Filamento a partir de pellets de PLA	71
3.3 Filamento a partir de pellets de PET	76
3.4 Filamento a partir de pellets de PLA + PLA reciclado	80
3.5 Filamento a partir de Fibras de platanera	84
4. Fabricación de probetas	89
4.1 Probetas a Tracción	90

4.2 Probetas a Flexión	98
5. Ensayos	105
5.1 Ensayos mecánicos en polímeros	106
5.2 Ensayo a Flexión	107
5.3 Ensayo a Tracción	110
6. Análisis y resultados	115
6.1 Ensayo a Flexión	115
6.2 Ensayo a Tracción	120
7. Diagnóstico de fallas y mantenimiento	125
7.1 Fallas en el filamento obtenido a partir del uso de la extrusora	126
7.1.1 Diámetro muy fino del filamento	126
7.1.2 Diámetro muy grueso del filamento	128
7.1.3 Irregularidades en la superficie del filamento	128
7.2 Fallas en la extrusión del filamento por colapso de boquilla	130
7.3 Fallas en la extrusión por incorporación de materiales	137
7.4 Fallas en la extrusión por obstrucción en el interior	139
7.5 Protocolos de mantenimiento para Filabot Original™	149
8. Conclusiones	153
Normas y Programas	155
Bibliografía	157
Anexo	165

1. Anexo de Materiales para filamento de impresión 3D	165
1.1 PLA (Ácido Poliláctico)	165
1.2 PET (Polietileno Tereftalato)	172
2. Anexo de Obtención del filamento para impresión 3D	176
3. Anexo de Impresión de las Probetas	179
3.1 Fotografías probetas para ensayo de Flexión	179
3.2 Fotografías probetas para ensayo de Tracción.....	180
3.3 Falla en la impresión de las probetas	181
4. Anexo de Ensayos	187
4.1 Ensayo mecánico de Flexión	187
4.1.1 Probetas PLA comercial con relleno honey comb	187
4.1.2 Probetas PLA fabricado con relleno honey comb	192
4.1.3 Probetas PLA comercial con relleno rectangular	200
4.2 Ensayo mecánico de Tracción	205
4.2.1 Probetas PLA comercial con relleno rectangular	205
4.2.2 Probetas PLA fabricado con relleno rectangular	210
5. Anexo de Puntos cuestionables de la impresión 3D.....	217
6. Anexo de Fabricación de probetas (Planos)	221

Introducción

El mundo evoluciona de manera constante a la par y gracias, a la economía y al sector industrial. Gran parte de este desarrollo se fundamenta en el uso y mejora de tecnologías para la fabricación de bienes y productos que mejoran los procesos industriales y la vida diaria. Una de estas tecnologías que están revolucionando el campo del prototipado y de la conformación de productos es la impresión 3D.

Es un ámbito complejo, que no solo presta atención a la maquinaria de impresión o el resultado final de las piezas. En este proyecto expondremos y estudiaremos todo el ciclo de conformación 3D, poniendo especial interés en el acopio y generación de materiales para llevar a cabo el proceso de impresión.

Objeto del proyecto

Este proyecto ha sido propuesto por el Área de Materiales del Departamento de Ingeniería Industrial de la Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología de la Universidad de La Laguna, con el propósito de utilizar y caracterizar el producto obtenido con un equipo de extrusión de filamentos para impresoras 3D de modo que se pueda solventar la necesidad que existe de encontrar una alternativa responsable a la cantidad de productos derivados del petróleo que se emplean en esta tecnología y los desechos que se producen.

Para ello, estudiaremos y propondremos mejoras en todos los puntos y factores que afectan a la calidad del producto, la puesta en funcionamiento del proceso de fabricación del filamento y la utilidad y resultado del mismo a través de ensayos mecánicos que nos permitan generar una valoración de sus características.

Los filamentos que elaboremos en este trabajo, se conformarán con materiales propios de la impresión 3D, como PLA o ABS, además se recuperaran piezas defectuosas de otras impresiones o ya ensayadas y se utilizarán otros polímeros con composición adecuada y materiales en forma de cargas como fibras naturales o polvo de residuos.

Alcance del proyecto

Este proyecto de fabricación y caracterización de fibras se engloba dentro de un proyecto de mayores dimensiones, en el que coexisten un estudio de materiales reciclados a partir de una máquina trituradora y una extrusora de plásticos, para finalizar con la posibilidad de la impresión 3D. Con estos tres trabajos, se completaría un proceso sostenible, que optimiza recursos y genera menos residuos.

El alcance del proyecto recoge el estudio de los materiales propuestos a priori como alternativa a los comerciales ya existentes, de modo que se generen piezas elaboradas con tecnología de impresión 3D y su posterior estudio de caracterización mecánica.

La fabricación y el estudio característico de los resultados obtenidos tras el empleo de diversos materiales considerados como apropiados para la fabricación tridimensional, no contempla la mejora del proceso de trituración o del funcionamiento de la máquina de extrusión y la recopilación de filamento. A pesar de eso, sí se aportan consejos y perspectivas de como deberían mejorarse estos aspectos de producción, puesto que a través de nuestra experiencia podemos ayudar y asesorar a personas o entidades cuya misión sea el estudio y trabajo con estas máquinas y procesos.

Definiciones y abreviaturas

RepRap: (*Replication Rapid prototyper*). Impresora 3D, que ha sido generada a su vez por otra impresora 3D y que es capaz de imprimir objetos de plástico con diferentes propiedades y con diferentes formas.

CAD: (*Computer Aided Design*). Diseño Asistido por Ordenador que se basa en el uso de programas informáticos para crear y/o parametrizar representaciones gráficas de objetos físicos en dos o tres dimensiones. En nuestro caso se emplea el software SolidWorks [3].

FFF: (Fabricación por Filamento Fundido). Técnica aditiva que deposita el material en capas, para conformar piezas en tres dimensiones.

Termoplástico: Material plástico que a temperaturas relativamente altas, se vuelve deformable o flexible, se derrite cuando se calienta y se endurece en un estado de transición vítrea cuando se enfría lo suficiente.

PLA: Ácido Poliláctico. Polímero biodegradable con características equivalentes a muchos plásticos derivados del petróleo, lo que hace que sea eficaz para una gran variedad de usos. Tiene una gran demanda en el mundo de la impresión 3D.

ABS: Acrilonitrilo Butadieno Estireno. Polímero con diversas propiedades, como resistencia a los impactos y dureza. Se emplea en la impresión 3D cuando son piezas que posteriormente se quieren mecanizar.

PET: Polietileno Tereftalato. Pertenece al grupo de materiales sintéticos denominados poliésteres.

PC: Policarbonato. Las cualidades estéticas del policarbonato se encuentran en los niveles más altos entre la gama de polímeros de ingeniería y es apto tanto para el moldeo tanto por inyección como por extrusión.

PHA: Poliésteres lineales producidos en la naturaleza por la acción de las bacterias por fermentación del azúcar o lípidos. Pueden ser materiales termoplásticos o elastómeros, con puntos de fusión de entre 40 y 180°C.

PVA: Poliacetato de vinilo. Es un termoplástico, sintético gomoso que es usado de adhesivo, al que se refiere como cola para madera o cola blanca.

Poliamida: poliamida es un tipo de polímero que contiene enlaces de tipo amida. Puede ser natural o sintético. Uno de los más conocidos es el Nylon.

HIPS: Poliestireno de Alto Impacto. Posee mayor resistencia al impacto que el poliestireno convencional.

Bendlay: Tipo de filamento flexible, duro y resistente diseñado por la empresa Orbi-Tech.

FDM: Modelado por Deposición Fundida. Es un proceso de fabricación a partir de materiales, generalmente plásticos, que se emplea para prototipos y producciones a pequeña escala. Se emplea la técnica aditiva depositando material en capas. Un filamento plástico o metálico que inicialmente se almacena en rollos, es introducido en una boquilla. La boquilla se encuentra por encima de la temperatura de fusión del material y puede desplazarse en tres ejes controlada electrónicamente. La pieza es construida con finos hilos del material que solidifican inmediatamente después de salir de la boquilla. Esta tecnología fue desarrollada por S. Scott Crump a finales de la década de 1980 y fue comercializada en 1990. [32]

Warping: Tipo de fallo en impresión 3D. El material producido por la extrusora, sale a una temperatura bastante superior a la de la plataforma, y al chocar se enfría y se produce la contracción de la pieza fabricada.

Tratamiento Corona: Tratamiento que intenta incrementar la permeabilidad de los objetos de plástico para favorecer a la adhesión de las tintas, cubiertas y adhesivos. Con él, se persigue aumentar la calidad y la productividad ya que, al realizar el tratamiento, se obtiene mayor calidad y rapidez en la impresión y además de disminuir el número de desperdicios.

Lignina: Sustancia que aparece en los tejidos leñosos de los vegetales y que mantiene unidas las fibras de celulosa que los componen. Se caracteriza por proporcionar rigidez a la pared celular, y resistencia a el ataque de los microorganismos, impidiendo la penetración de las enzimas destructivas en la pared celular.

Hemicelulosa: Forma parte de las paredes de las diferentes células de los tejidos del vegetal, recubriendo la superficie de las fibras de celulosa y permitiendo el enlace de pectina.

Pectina: Mezcla de polímeros ácidos y neutros muy ramificados. Constituyen el 30% del peso seco de la pared celular primaria de células vegetales. En presencia de aguas forman geles. Determinan la porosidad de la pared, y por tanto el grado de disponibilidad de los sustratos de las enzimas implicadas en las modificaciones de la misma.

Hidrofilica: Molécula que puede enlazarse temporalmente con el agua a través de un enlace hidrógeno. Esto es favorable termodinámicamente, y hace solubles a las moléculas no sólo en agua sino también en otros disolventes polares.

Badana: Proyecto que desarrolla un proceso automatizado para extraer fibras de desechos plataneros para su aprovechamiento como refuerzo sostenible en productos moldeados por rotación e inyección.

HDT: Baja Temperatura de Distorsión, puede implicar una alteración de las características físicas de los materiales durante y después de haber sido sometidos al efecto de diversas temperaturas extremas.

Pronterface: Software que permite controlar la impresión y los parámetros de ésta, en impresoras de proyectos RepRap.

G-code: Extensión del archivo que se genera cuando realizamos un diseño en un programa CAD y lo convertimos en un STL (archivo que se emplea en el software Pronterface) para poder imprimirlo con la impresora 3D.

Antecedentes del proyecto

Antes de comenzar con toda la descripción de los distintos procesos que se han llevado a cabo para realizar este proyecto de fabricación y caracterización de filamentos para impresora 3D a partir de materiales reciclados, queremos invitar a conocer el ámbito en el que se enmarca este proyecto: el mundo de la impresión 3D.

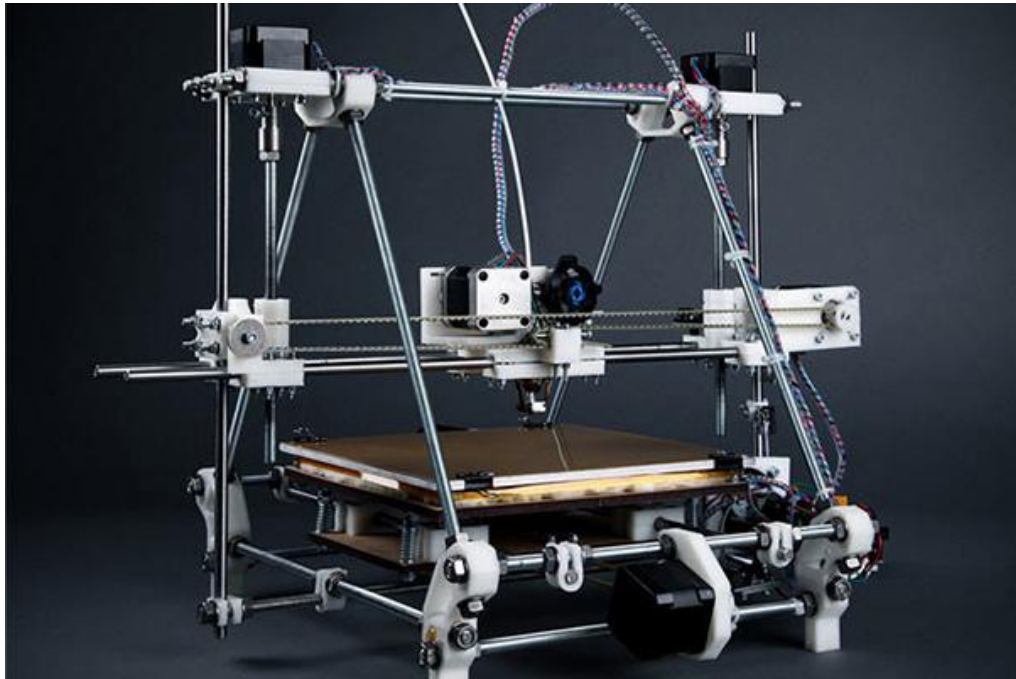


Figura 1: Impresora 3D proyecto RepRap. [54]

La impresión 3D es grupo de tecnologías que fabrican piezas a partir de la adición de material, en lugar de mecanizado por pérdida de material, y permite obtener un objeto en tres dimensiones previamente parametrizado a través de su diseño por ordenador. Este tipo de tecnología, ha experimentado un crecimiento vertiginoso en los últimos años, no solo a nivel evolutivo en lo que a perfeccionamiento de la técnica se refiere, sino también a número de adeptos que apuestan por el uso de sus productos, a nivel industrial y también de forma particular.

En los últimos años, se ha observado un crecimiento exponencial desde que en 2005 El Dr. Adrian Bowyer fundara RepRap, en la Universidad de Bath, una iniciativa de código abierto para construir una impresora 3D que puede imprimir la mayoría de sus propios componentes [19]. Este acontecimiento fue el pistoletazo de salida a todo el desarrollo que día a día acontece alrededor del mundo de la impresión 3D.



Figura 2: Proyecto RepRap. [55]

El objetivo de este proyecto nace de la idea de crear una máquina de prototipado rápido “Replicating Rapid Prototyper” que sea capaz de replicarse a sí misma, es decir, de fabricar la mayor cantidad de sus propios componentes. La filosofía del proyecto RepRap es Open Source, esto quiere decir que los diseños y desarrollos de la comunidad se cuelgan en distintas páginas web, donde se pueden comentar, copiar, estudiar, distribuir y mejorar los diseños y códigos fuente que la comunidad realiza, esto se traduce en el auge que ha habido en los últimos años en la venta de dispositivos de impresión 3D debido a la bajada del precio de las máquinas, ya que grandes compañías con precios altos no pueden competir con esta filosofía que promueve más autonomía, más desarrollo tecnológico local, menos fábricas y menos transporte de bienes.

La primera impresora RepRap se creó en febrero de 2008, llamada Darwin. Se considera la impresora madre de todas las demás porque a partir de este primer diseño, se fueron creando mejoras y variantes, siempre buscando la simplicidad en el montaje y la menor cantidad de piezas posibles.

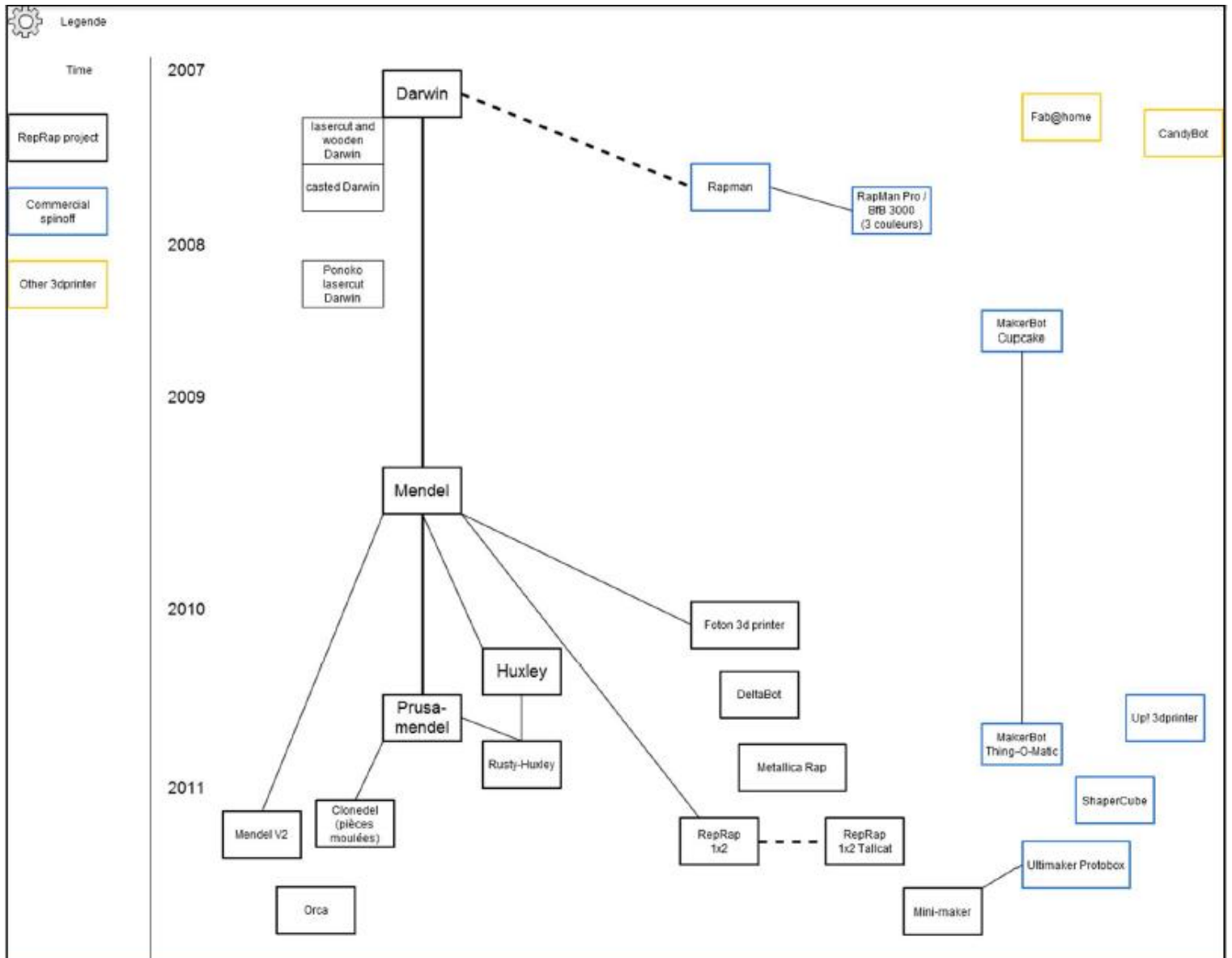


Figura 3: Árbol genealógico de las impresoras RepRap [18]

A partir de fabricación de la impresora Darwin, se han ido mejorando las impresoras para que sean más fáciles de montar [18]. El mundo de la impresión 3D está en constante avance y la información se actualiza prácticamente a diario.

La fabricación 3D, éste es un proceso de elaboración por el cual un objeto tridimensional es creado mediante la superposición de capas de material, generalmente plástico. La impresión 3D destaca por que es un proceso más rápido, barato y fácil de usar en comparación con otros procedimientos de adición. Las impresoras reciben información de los archivos CAD que previamente se han tenido que crear y en los que se puede albergar cualquier tipo de forma geométrica.

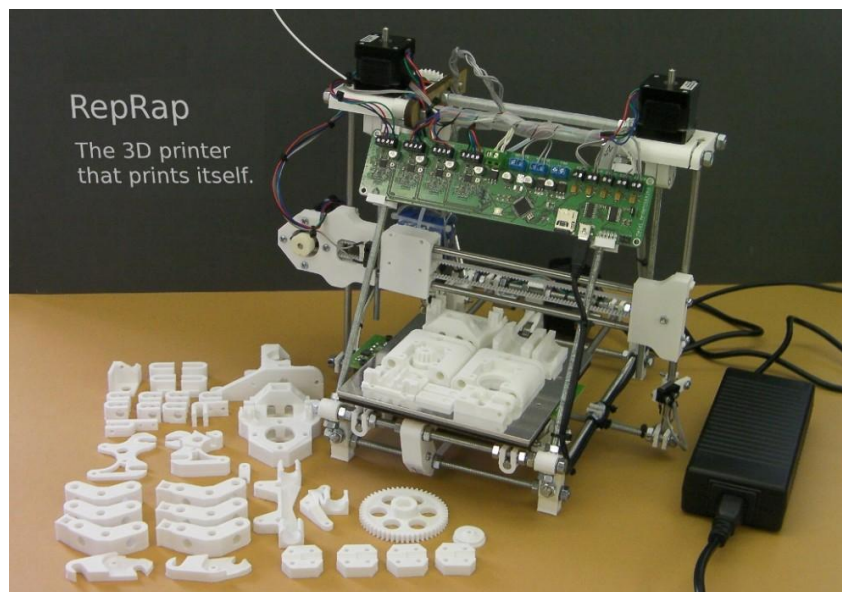


Figura 4: Impresora 3D con sus piezas replicadas. [56]

Pero, ¿qué métodos de impresión existen? Existen distintos métodos de impresión 3D: extrusión, hilado, granulado, laminado y fotoquímicas [32]. En este proyecto nos vamos a centrar en el modelado por deposición fundida, ya que la impresora que disponemos y con la cual llevaremos a cabo el desarrollo del trabajo, opera con este tipo de método.

Este procedimiento utiliza un filamento, generalmente de plástico, que se almacena en bobinas de 3 mm ó 1,75 mm, dependiendo de la precisión de impresión que se desee. Se empuja el filamento a través de un extrusor, que es calentado hasta temperaturas capaces de fundir el plástico pero sin llegar a derretirlo. Además, el extrusor es capaz de moverse en los tres ejes de forma controlada gracias a la electrónica de la impresora y a los motores de la misma.

Tipo	Tecnologías	Materiales comunes
Adición	Modelado por deposición fundida	Termoplásticos (PLA, ABS) HDPE, metales eutécticos, materiales comestibles
Hilado	Fabricación por haz de electrones	Casi cualquier aleación
Granulado	Sinterizado directo de metal por láser	Casi cualquier aleación
	Fusión por haz de electrones	Aleaciones de titanio
	Sinterizado selectivo por calor	Polvo termoplástico
	Sinterizado selectivo por láser	Termoplástico, polvos metálicos, polvos cerámicos
	Proyección aglutinante	Yeso
Laminado	Laminado de capas	Papel, papel de aluminio, capa de plástico
Fotoquímicos	Estereolitografía	Fotopolímero
	Fotopolimerización por luz ultravioleta	Fotopolímero

Tabla 1: Métodos de impresión según tecnología y materiales empleados. [32]

Con este proceso, el plástico se deposita en una base caliente para que el hilo de plástico se quede pegado y solidifique, mientras el extrusor irá dando la forma que se ha creado en el archivo CAD.

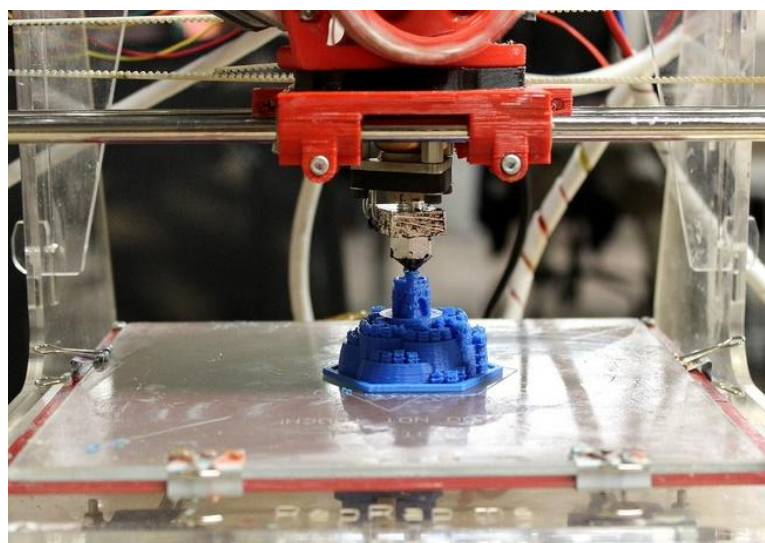


Figura 5: Detalle de impresión 3D por método FDM. [57]

Los campos de actuación de las impresoras 3D son muy diversos, desde la medicina, donde se generan prótesis, órganos y células sanguíneas hasta fabricación de aviones, coches y hogares; sin olvidarnos de la manufactura de objetos como juguetes, carcasas, partes de cámaras de fotos, prendas textiles, etc.

Para generar cualquier elemento en 3D a partir de esta tecnología, además de poseer una impresora y el diseño digital, es fundamental la materia prima. Actualmente, la mayoría de piezas y elementos se imprimen a partir de filamento de plásticos como PLA, ABS o incluso PET [20]. En función de los requerimientos de impresión y de los resultados finales que se persigan, se empleara un material u otro. Cierto es que existen distintos materiales que siguen en fase de prueba o que su uso en esta tecnología no está tan extendido bien por el precio o bien porque la finalidad del producto no demanda exigencias específicas en el material, como el ULTEM, PC, Nylon, fibras naturales, etc.

Los filamentos de plástico pueden encontrarse en el mercado, con especificación de color, diámetro del hilo (1,75 mm ó 3 mm) y peso del carrete. Sin embargo, cada vez más usuarios optan por producir su propio filamento, ya que el coste se reduce y el tiempo de espera para adquirirlo, si se desea un filamento específico, disminuye.



Figura 6: Empresas dedicadas al suministro de filamento con tiendas en España. [57]

Cuando se desea fabricar de manera personalizada el filamento, el usuario tiene varias opciones: comprar la materia primera en forma de pellets (granulado) y crear el mismo la combinación de color y de cantidad de material, o generar la materia prima a partir de materiales reciclados con la ayuda de una trituradora.



Figura 7: Pellets obtenidos a partir de la trituración de piezas de plástico. [58]

Una vez obtenido el material, ya bien sea por adquisición o propia fabricación de pellets, se emplea una extrusora, que posibilita la fabricación de filamento a partir del uso de un tornillo sin fin y un dado extrusor. A nivel económico este método de fabricación de filamento compensa, pues aunque el desembolso inicial es alto, la posibilidad de generar exactamente la cantidad de filamento que uno necesita y el empleo de materiales reciclados disminuye el coste del proceso global de impresión.

Este proyecto pretende evaluar la viabilidad a otros niveles, como prestaciones del diseño, resultado superficial y rendimiento mecánico, de esta forma no comercial de generar filamento.

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

SECCIÓN DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

MEMORIA

Fabricación y caracterización de filamentos para impresora 3D a partir de materiales reciclados

Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica

Autor: Laura Arteaga Medina

Tutora: María Milagros Laz Pavón

1. Introducción al Filamento para impresora 3D

A pesar de ser una tecnología que está en constante evolución y su empleo, tanto en el sector industrial como en el de consumo, está en auge, muchos creen que su proyección fuera del sector profesional y de investigación para prototipado, no tiene salida. Sin embargo, en España ya se han vendido cerca de 3.000 impresoras 3D domésticas y su número va en aumento [20]¹. En cuanto a las impresoras comerciales que vienen ya montadas, las previsiones para nuestro país es que se vendan unas 1.500, lo que supone el 1,5% de las ventas mundiales, estimadas en 108.000.

Además de las máquinas de impresión 3D, los repositorios de archivos tridimensionales también crecen, al igual que los usuarios de CAD que comparten libremente sus diseños. En unos años, con el mejor acceso a los programas de diseño en 3D, el número de personas con capacidad para realizar sus propios diseños abrirá muchas más posibilidades al ámbito doméstico.

Cuando elegimos impresora debemos tener en cuenta muchos factores. Uno de los más importantes es el tipo de material que necesitamos para imprimir en función de los requerimientos que necesite la pieza. Al principio los materiales estaban limitados a termoplásticos como ABS o PLA para llevar a cabo las impresiones, pero en muy poco tiempo se han desarrollado y aplicado nuevos materiales además de nuevas técnicas de impresión en función de las distintas aplicaciones que tiene esta nueva tecnología de conformación.

¹ *Datos publicados el 28 de Noviembre de 2014.*

	Proceso de generación de la pieza	Resistencia mecánica de la pieza	Precio comparativo de la técnica	Velocidad del proceso
Impresión 3D POLVO	Fijación de polvo cerámico por medio de aglomerante líquido	Baja	Alto	Lento
Impresión 3D LÍQUIDO	Solidificación de fotopolímero líquido por medio de luz	Medio	Alto	Lento
Impresión 3D FILAMENTO	Fusión y extrusión de filamento	Alta	Medio	Lento

Tabla 2: Comparativa entre algunas de las técnicas de impresión 3D en función del material. [21]

Los materiales de impresión pueden ser muy diversos. En España existen empresas que llevan tiempo investigando en diversas tecnologías y conocimientos transferibles a otras empresas. Uno de esos ámbitos es el de los nuevos materiales, y una de esas empresas es el Centro Tecnológico Gaiker, en Vizcaya, donde, desde su departamento de filamento, se explica que para los equipos de impresión de sobremesa se está ampliando continuamente el catálogo de filamentos que pueden utilizarse. Lo más habitual es que las piezas que se imprimen con este tipo de máquinas sean de ABS, PLA o PLA/PHA. Luego hay otros materiales como filamentos de poliestireno, policarbonato, PVA, poliamida o PET. También hay grados especiales con los que se consigue que las piezas tengan un acabado similar a la madera o la cerámica.

Otros filamentos que despiertan mucho interés son los que permiten la impresión de piezas flexibles, usualmente basados en elastómeros termoplásticos de poliuretano o poliolefinicos. Recientemente han aparecido filamentos que contienen cargas metálicas con los que se

obtienen piezas con aspecto de bronce o filamentos diseñados para conseguir piezas con una cierta porosidad.



Figura 1: Detalle de impresora 3D de resina líquida. [59]

En estos momentos, el proceso de desarrollo de materiales para impresión 3D se encuentra en proceso de expansión. En Europa dentro del programa horizonte 2020 se contemplan temas de estudio específicos de desarrollo de materiales en los que especialmente se fomenta la obtención de materiales con funcionales adicionales como puede ser la conductividad térmica o eléctrica, mediante el empleo de la nanotecnología [19]. Y ya han surgido empresas cuyo objetivo es el desarrollo de materiales de impresión que contengan en su composición sustancias como el grafeno.

El proyecto que se desarrolla a continuación está basado en el empleo de filamento para la generación de piezas en 3D, por lo tanto, nos adentraremos con más profundidad en la materia, a modo de crear una visión general del asunto y poder a posteriori comenzar con el desarrollo del trabajo.

1.2 Filamento para impresoras 3D

El filamento para confeccionar piezas en 3D suele emplear impresoras de extrusión que además cuentan con un sistema para regular la temperatura de fundido del filamento, que es uno de los parámetros vitales para la impresión. El filamento no es más que material, por lo general plástico, que se presenta en estado sólido y tiene la apariencia de un tallarín largo que suele almacenarse en bobinas.



Figura 1.2.1.: Filamento de impresión recopilado en bobinas. [60]

Las impresoras se basan en la FFF (Fabricación por Filamento Fundido) [33]. La boquilla extrusora funde el filamento termoplástico de manera progresiva y lo va depositando capa a capa hasta conformar la pieza sobre una superficie que generalmente está caliente para evitar problemas de conformación. Al contacto con el aire, este material se solidifica rápidamente, consolidando la capa.

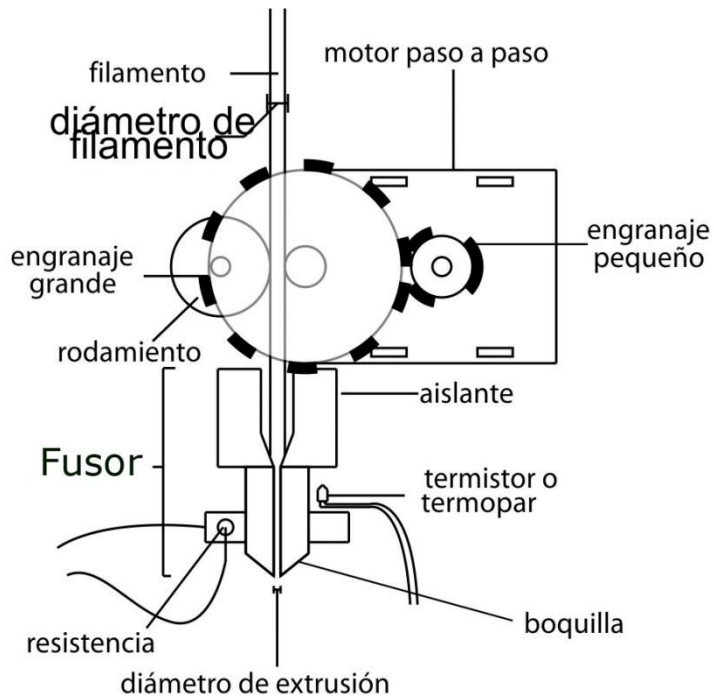


Figura 1.2.2.: Detalle del proceso de impresión 3D donde se muestra el recorrido que realiza el filamento. [21]

Como toda tecnología presenta una serie de ventajas e inconvenientes que son importantes tener en cuenta y analizar a la hora de seleccionarla o no para la conformación de productos tanto a nivel industrial como no comercial.

Impresión 3D a partir de filamentos termoplásticos	
Ventajas	Inconvenientes
Menor costo	Baja resolución en los acabados
Crea objetos sólidos a partir de gran número de termoplásticos como ABS o PLA	Presenta complicaciones a la hora de crear objetos con espacios vacíos o no autosoportables
Hardware y Software para prototipado es Opensource	Alto nivel contaminante

Tabla 3: Cuadro comparativo entre las ventajas e inconvenientes de la impresión con filamento. [21]

Como hemos comentado, dependiendo del tipo de requerimiento de la pieza, el acabado superficial que queramos de la misma, etc. dependerá un uso u otro de filamento. A nivel global, lo más importante es evitar las deformaciones de las primeras capas. Si profundizamos más en los fallos que se pueden dar a lo largo de las impresiones, como veremos en el *Anexo 3.1*, no son tanto provocadas por el filamento sino por los parámetros de impresión y la calibración y ajuste de la impresora. A continuación desarrollaremos un apartado que servirá para introducir los distintos tipos de filamento que hay en el mercado, especificando su uso y sus parámetros de impresión, para obtener una visión global de la competencia mercantil que hay en este sector.

1.3 Tipos de filamentos para impresión 3D

_ **ABS:** (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) Su uso es muy extendido ya que es muy barato, además de muy resistente a los golpes, por eso es uno de los más empleados en ingeniería, industria e impresión 3D de prototipado. Aparte de su dureza y rigidez, es resistente a la abrasión y los elementos químicos. Es bastante versátil: Permite lijarse, admite también el pulido con baño de acetona y realizar un acabado muy liso. Produce gases generalmente tolerables aunque pueden ser peligrosos para personas o animales domésticos muy sensibles [23] [29].

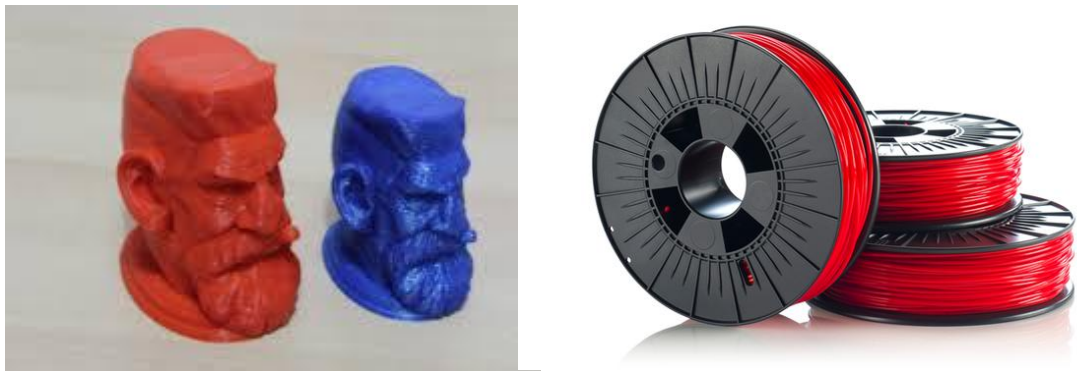


Figura 1.3.1.: Filamento de ABS y piezas en 3D del mismo material. [62]

Temperatura de fusión: 215° - 250° C (según fabricante puede cambiar)

Temperatura plataforma: 90° - 130° C (para evitar warping)

Necesario el uso de cinta kapton (también conocida como cinta de poliamida, es una cinta eléctricamente aislante y resistente al calor, usada en impresión 3D) o laca sobre superficie de cristal para fijar la pieza

No biodegradable

Reciclable

_ **PLA:** (Ácido Poliláctico o Poliláctido) Plástico biodegradable a causa de su origen natural (se obtiene a partir del almidón de maíz y es apto para imprimir objetos destinados a contener alimentos), especialmente en contacto con agua y óxido de carbono. No necesita plataforma caliente, aunque en raras ocasiones puede producirse warping durante el proceso de enfriamiento. Importante diferenciar el “PLA flexible” del normal, que necesita otra configuración para ser impreso (diferente temperatura y una superficie de cristal es lo más recomendable para el PLA flexible). La textura final no es tan suave como la del ABS ni tan resistente, pero si no se necesita que la pieza tenga mucha resistencia como en adornos o similares, es una buena elección [23] [29].



Figura 1.3.2.: Ejemplo de impresión 3D con filamento de PLA. [21]

Temperatura fusión: 160-230°

Temperatura plataforma: Temperatura ambiente hasta 60°

En plataforma, cinta azul de pintor para mejor adhesión o laca.

Biodegradable.

Reciclable.

_ **PVA:** (Alcohol Polivinilo) Es un polímero plástico 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 objetos en PLA y ABS, ya que ayuda a que se mantengan las figuras cuando hay que imprimir algunas de sus partes “en el aire”, pero su coste es elevado [23] [29].

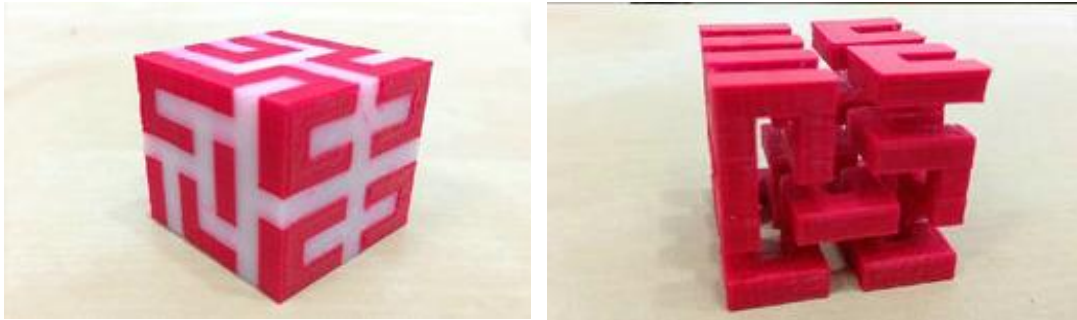


Figura 1.3.3.: Ejemplo de impresión con PVA para generar estructuras de apoyo. [21]

Temperatura fusión: 180-200°

Temperatura plataforma: 50°

En plataforma, laca para mejorar la adhesión.

Biodegradable.

_ **HIPS:** (Poliestireno de alto impacto) Se parece al ABS y los perfiles de temperatura son los mismos. Por eso se usa como soporte desechable en los espacios huecos de las piezas impresas en ABS o para evitar deformaciones en estructuras voladizas, ya que se elimina fácilmente con D-Limoneno [23] [29].



Figura 1.3.4.: Ejemplo de empleo de HIPS en impresión 3D. [29]

_ **PET**: (Tereftalato de polietileno) Destaca en el empleo para botellas y otros envases. Su principal ventaja es la transparencia, además de ser resistente a los impactos y bastante fuerte. Las temperaturas de fusión son similares a las del PLA. No es un material flexible, sin embargo, no se deforma cuando se enfría [23] [29] [39].



Figura 1.3.5.: Resultados de impresión 3D a partir de filamento PET. [62]

Temperatura de impresión: 210° - 255° C (valores específicos Taulman 3D)

Temperatura de la plataforma: 55° C

Recomendable usar laca para mejorar la adhesión de las piezas.

_ **PC**: (Policarbonato) Es un material plástico de gran resistencia y durabilidad. Se usa para fabricar CDs y DVDs. Las pruebas para impresión de bajo coste con este material comenzaron en 2012, y no es fácil de encontrar, porque los fabricantes de este filamento son escasos todavía y resulta caro. Las temperaturas de fusión son altas, oscilando entre los 270 °C y los 300 °C. La superficie de impresión debe estar entre 90° - 105° C y es recomendable el uso de laca para favorecer la adhesión. [62]

_ **NYLON**: Se está empleando como alternativa al ABS y al PLA ya que es más resistente y flexible, natural, resistente al agua y reutilizable. Por otro lado presenta una serie de desventajas como que no se adhiere bien a la bandeja. Además, coge humedad fácilmente, y hay que secarlo en un horno tres o cuatro horas antes de imprimir. Por eso los fallos a la hora de trabajar con este material aún son importantes, y se hace complicado controlar las deformaciones de las piezas [23].



Figura 1.3.6.: Usos del Nylon en impresión 3D. [23]

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.

_ **LAYBRICK**: Mezcla de yeso y plástico que genera texturas visualmente similares a la piedra en lugar de al plástico. Puede tener acabados como de piedra, pudiendo realizar objetos desde muy lisos a muy ásperos. Indicado para trabajos de arquitectura, fácilmente modificable [49].



Figura 1.3.7.: Ejemplo de impresión 3D a partir de filamento de Laybrick. [49]

Temperatura extrusión: 175°C – 250°C

Cama caliente: no necesaria, recomendable a 50° C.

No rellenar (infill %) por encima de 25%.

Resistencia temperatura: 50° C

LAYWOOD: Este material mezcla plástico y viruta de madera, por lo que los objetos impresos con él muestran un aspecto muy natural, incluso con los anillos propios de la madera y su olor. Está fabricado con maderas recicladas. Puede ser fácilmente modificable [49].



Figura 1.3.8.: Ejemplo de piezas impresas con filamento Laywood. [63]

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 tops, juntas, plantillas de calzado, zapatillas, ruedas neumáticas, pulseras de relojes y, en definitiva, todo lo que pueda precisar doblarse mucho sin romperse. [23]



Figura 1.3.9.: Zapatillas de impresión 3D a partir de Filaflex. [23]

_ **TCP FLEX:**(Co-Poliéster Termoplástico) De carácter flexible, su mayor ventaja está en la fuerza estructural y en su memoria flexible. Básicamente imprime piezas que vuelven a su forma original a pesar de que se arruguen, doblen, etc. Su resistencia térmica, química es excelente y resulta bastante fácil imprimir con él [29].

_ **NINJAFLEX:** Las características de este elastómero termoplástico son similares a las del FILAFLEX, pero con un nivel de estiramiento más bajo. Su consistencia es como la de una cuerda de goma y soporta muy bien las deformaciones. Las temperaturas de fusión se parecen a las del PLA: 215 °C en el cabezal y 40 °C en la superficie de impresión [29].



Figura 1.3.10.: Muestra de la flexibilidad del Ninjaflex.[29]

Otra opción es, como hemos visto en el *Apartado de Antecedentes* adquirir los pellets de los materiales deseados y conformar nosotros mismos el filamento con la combinación óptima para nuestras piezas. Los pellets se emplean en sistemas de extrusión que funde y con ayuda de un dado que les proporciona la forma y las dimensiones deseadas, se extruye el plástico sin tener que adquirir de forma comercial bobinas de filamento. Con este material se pueden usar extrusoras como la Filastruder para generar filamentos de 0,3 ó 1,75 mm. O máquinas como Filabot Original™ que es capaz de producir filamento de 1,75 mm, 2,75 mm y 3 mm de diámetro.



Figura 1.3.11: Muestra de la fabricación de filamento para impresión 3D a partir de máquina extrusora. [64]

Como vemos, existe una amplia gama de materiales que se suministran en forma de filamento o de pellets para generar la materia prima de impresoras 3D en función de las prestaciones que estemos buscando. Filamento de PLA o ABS termosensible, que cambia de color según la temperatura, Bendlay, TPE, Modlay, ABS conductor, Fibra de carbono reforzada con PLA o PLA con acero o hierro son algunas de las muchas variaciones de filamento que podemos encontrar en el mercado con precios oscilantes entre los 25 y 50 € [49].

En este trabajo abriremos un poco más el abanico de posibilidades generando y estudiando nuevas combinaciones de materiales para la fabricación de filamento, comparando las ventajas y las prestaciones que ofrecen los productos comerciales y los productos de fabricación no industrializada.

2. Materiales para la fabricación de filamento

El presente proyecto se plantea con el propósito de utilizar y caracterizar el producto obtenido con un equipo de extrusión de filamentos para impresora 3D, a partir de materiales reciclados. Nuestra propuesta consiste en la aplicación directa en el ajuste experimental de todos los factores que afectan a la calidad del producto, la puesta en funcionamiento del proceso de fabricación del filamento y la valoración posterior del resultado final y su posible utilidad.

Dichos filamentos se fabrican mayoritariamente con polímeros termoplásticos de las familias ABS y PLA. En el proyecto proponemos la utilización, como propulsores para la fabricación de los filamentos, de los residuos de la propia impresión 3D (excedentes, recortes, piezas defectuosas de PLA) así como otros polímeros con composición adecuada (PET) además de la posible incorporación de cargas como polvo de metales, de minerales de residuos, excedentes con interés para su reciclado... (Vidrio y Fibras de Plataneras). A continuación se expondrán los requerimientos de los filamentos y los materiales que vamos a emplear para llevar a cabo el estudio del proyecto.

2.1 Filamento para impresoras 3D

El filamento es el homólogo del cartucho de tinta de las impresoras convencionales para la impresora 3D. Al igual que pasa con las impresoras de papel, en función de los resultados que se persigan, se emplean una serie de cartuchos con unas características determinadas. En impresión 3D, los materiales resultantes tienen que ofrecer una buena terminación, ser sólidos y duraderos, por tanto, se persigue que el filamento que se emplee, produzca una impresión de piezas con buen acabado, duraderas y resistentes. Es por ello por lo que en este proyecto se caracterizará el acabado de las piezas impresas con el filamento procesado y su resistencia a esfuerzos de tracción y flexión.

Las impresoras 3D que están disponibles en el mercado utilizan básicamente materiales termoplásticos. Los materiales termoplásticos por excelencia empleados en impresión 3D son el ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) y el PLA (Ácido Poliláctico) [27]. Aunque no son los más utilizados, también las impresoras 3D utilizan fotopolímeros por las cualidades de los mismos y otro tipo de materiales, de los más diversos y en función del objetivo que se quiere conseguir.

Los materiales termoplásticos tienen la propiedad de poder fundirse, ser moldeables si se les aplica cierto calor y solidificarse cuando se enfrían. Este tipo de materiales se pueden reblandecer muchas veces y por lo tanto se pueden reutilizar proporcionando nuevas utilidades. Esta propiedad de poder calentarse y moldearse una y otra vez hace que los termoplásticos sean unos de los materiales más utilizados en la actualidad. Los más utilizados como se ha dicho anteriormente son el ABS y el PLA, por su disponibilidad y economía.

Hay que tener en cuenta que no todos los termoplásticos sirven para imprimir en 3D. Para que un termoplástico o cualquier material puedan servir para realizar impresiones en 3D debe los test de extrusión sobre calidad de filamentos, los test de segunda extrusión cuando se imprime y las pruebas del material solidificado una vez impreso.



Figura 2.1.1.: Pellets de PLA de distintos colores. [65]

Al igual que pasa con la tinta de los cartuchos, existen materiales termoplásticos de marca (de la misma marca de la impresora u otras competidoras) y también existen materiales termoplásticos fabricados por terceros. Estos últimos tienen un precio más barato y la calidad de los mismos suele variar.

ABS y PLA son dos plásticos totalmente diferentes. ABS es un plástico que suele utilizarse para fabricar piezas mecánicas. Su principal cualidad es la resistencia, por lo tanto una vez enfriado se puede taladrar, lijar, suavizar con acetona, etc. Sin embargo, uno de los problemas que plantea es que es muy sensible al calor, luego para obtener un resultado óptimo hace falta experiencia con la impresora y con el material.

Por el contrario, el PLA es mucho más frágil que el ABS, luego es menos indicado para la creación de piezas mecánicas pero por el contrario es más fácil de imprimir, es más rígido y también tiene la ventaja de ser biodegradable.

El PLA se crea a partir del procesamiento de plantas como las papas, el maíz, remolacha, etc. Por lo que no es un derivado del petróleo, como le pasa al ABS, por tanto es ideal para utilizarlo en embases y contenedores de comida. Es transparente pero puede colorearse jugando con la transparencia y la opacidad que le confiere el pigmento al material. Los materiales impresos con PLA son más agradables al tacto y más brillantes. Otra diferencia entre estos materiales es la resistencia a la temperatura. El ABS resiste temperaturas más elevadas que el PLA.

Una diferencia entre ABS y PLA a la hora de imprimir es el olor que desprenden las impresiones una vez realizadas. El ABS huele a plástico caliente mientras que el PLA como es un derivado del azúcar tiene un olor más agradable. Hay que tener en cuenta que si se hacen muchas impresiones con ABS, es deseable tener el lugar de impresión lo más ventilado posible.

Los materiales que vamos a emplear para producir filamento serán los que se recogen en la siguiente tabla y que a posteriori explicaremos con detenimiento.

Materia Prima (material base)	PLA
Material Reciclado (material carga)	PET Fibra de platanera

2.2 PLA (Ácido Poliláctico)

Como se ha comentado anteriormente, el PLA es uno de los termoplásticos más empleados en el mundo de la impresión 3D, por su precio y su disponibilidad. Su mayor competidor es el ABS, pero este último posee propiedades que creemos incompatibles con el fin del proyecto.

Una de las finalidades del proyecto es obtener una vía útil de reciclado para los excedentes de este nuevo método de fabricación, además de generar otra vía de reciclado para elementos comunes como las botellas de plástico o vidrio y el residuo que se genera en la industria del plátano en Canarias; es por ello por lo que un producto derivado del petróleo como el ABS, cuyo proceso térmico genera gases nocivos no nos resulta consecuente con la finalidad del proyecto. Es por ese motivo por lo que seleccionamos el PLA, aunque no posea cualidades mecánicas tan excepcionales en comparación con el ABS en resistencia y mecanizado.



Figura 2.2.1.: Ejemplo de impresión con PLA. [28]

ABS	PLA
Temperatura de extrusión ~ 240° C	Temperatura de extrusión ~ 200° C
Requiere cama caliente > 70° C	Poca temperatura de cama caliente
Funciona bien sin refrigeración de capas	Se beneficia enormemente de refrigeración de capa durante la impresión
Peor adherencia. Precisa de cinta de poliamida o laca	Buena adherencia en gran variedad de superficies
Resistente a altas temperaturas	Poco resistente a altas temperaturas
Propenso a grietas, delaminación y deformación	Propenso a la ondulación de esquinas y salientes
Más flexible	Más frágil
Se pueden unir piezas usando adhesivos o disolventes	Se pueden unir piezas usando adhesivos específicos
Humos desagradables y nocivos	Humos no nocivos y de olor más agradable
Plástico derivado del petróleo	Plástico de origen vegetal

Tabla 4: Comparativa entre ABS y PLA para extrusión. [28]

El PLA (Ácido Poliláctico) es un biopolímero termoplástico cuya molécula precursora es el ácido láctico. Puede obtenerse por dos vías: la química o la biotecnológica. La producción química está basada en la reacción de acetaldehído con ácido cianhídrico para dar así lactonitrilo, el cual se hidroliza para obtener ácido láctico. La parte biotecnológica está basada en la fermentación de sustratos ricos en carbohidratos por microorganismos [7]. En el *Anexo 1.1* se incluye información asociada a las reacciones que se emplean para obtener PLA. La degradación del PLA es más lenta si la cristalinidad es elevada y si el peso molecular es elevado.

La biodegradación del PLA se basa en la presencia de microorganismos que colonizan la superficie del polímero y son capaces de segregar enzimas que rompen en pequeños fragmentos el polímero; la colonización de la superficie depende de factores tales como la tensión superficial, porosidad y textura superficial y accesibilidad a las cadenas de polímeros. Las condiciones necesarias para que se pueda producir la biodegradación son: Presencia de microorganismo, oxígeno, humedad, nutrientes minerales, temperaturas entre 20 a 60 °C dependiendo del microorganismo y un pH entre 5-8 [7].

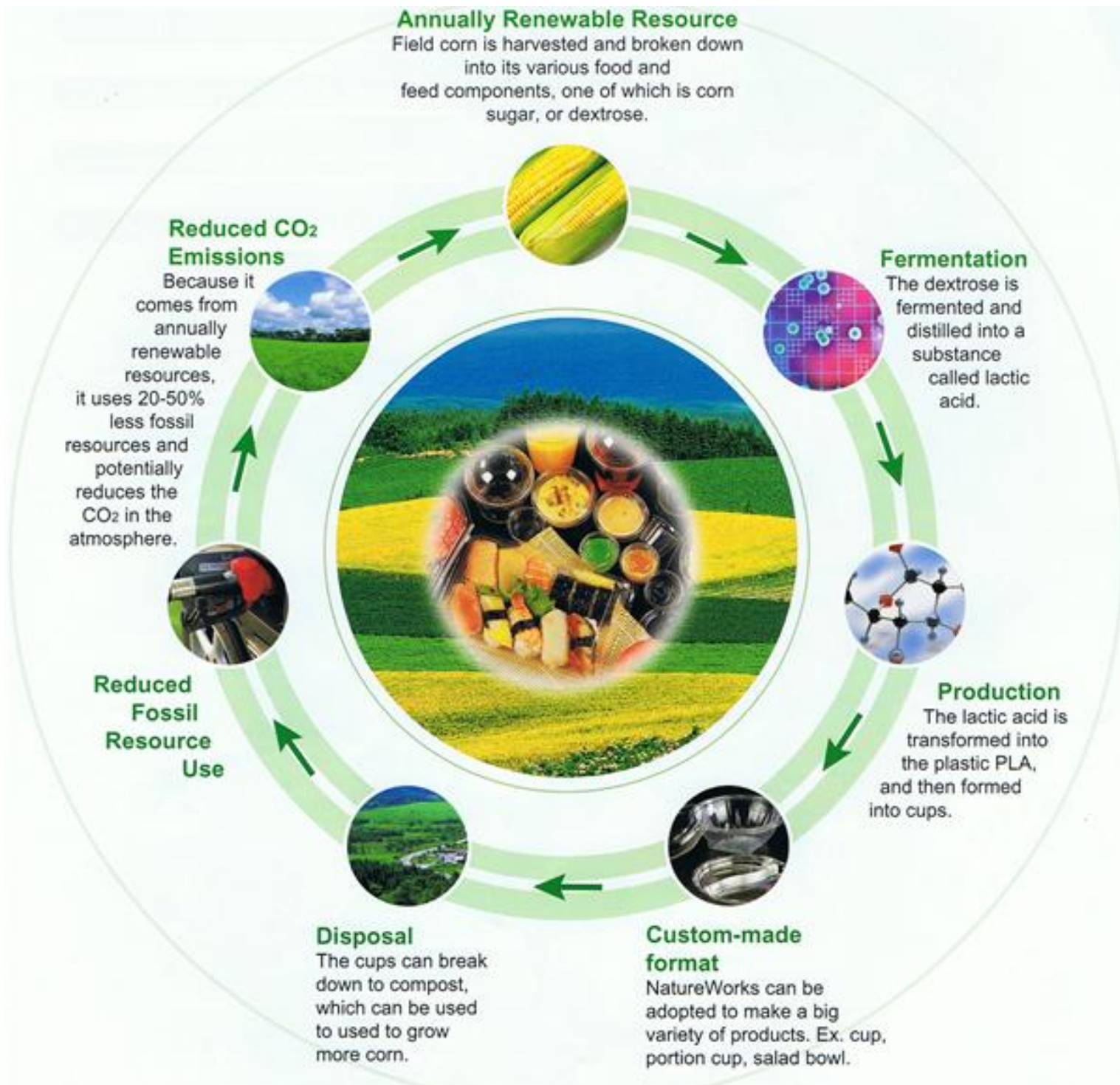


Figura 2.2.2.: Proceso de obtención del PLA. Nature Works. [66]

El PLA como polímero, ofrece numerosas propiedades tanto mecánicas como químicas; principalmente destacamos su biocompatibilidad (puede ser utilizado en algún implante o prótesis) y las buenas propiedades de barrera que posee. Tiene una densidad baja, es permanente e inodoro.

Las propiedades físicas y mecánicas dependen de la composición del polímero, de su peso molecular y de su cristalinidad. Tiene propiedades mecánicas en el mismo rango de los polímeros petroquímicos, a excepción de una baja elongación; posee propiedades semejantes a la fuerza extensible y el módulo de elasticidad del PET. Es rígido y frágil, con una baja deformación por rotura y buena plasticidad térmica. Sus acabados son suaves, resistentes al rayado y al desgaste.

Por todo ello, sus usos son diversos. En industria alimentaria (envases de plástico, recipientes extruidos o termoformados), química (como sustituto de la glicerina), farmacéutica, médica, textil, de la agricultura, alimentación animal y del plástico, que es la que nos ocupa. Para impresión 3D bajo proceso FDM.

En el caso de la impresión 3D, son múltiples sus ventajas. Además de un precio competitivo, la barrera que presenta al H₂O, al O₂ y al CO₂ es bastante buena, lo cual permite imprimir con mayor calidad (sin presencia de humedad) y puede incluso no necesitar tratamientos corona antes de la impresión. Puede ser tan duro como el acrílico o tan blando como el polietileno o flexible como un elastómero. Puede además ser formulado para dar una variedad de resistencias. Sin embargo, también presenta algunos inconvenientes como material para impresión; el proceso posterior de su uso en impresión (mecanizado, pintar y pegar) es mucho más complicado que el de su competidor, ABS. Puede producirse *warping* durante el procedimiento de enfriamiento. Baja temperatura de distorsión (HDT) y es fotodegradable, por tanto ha de ser aditivado para mejorar su resistencia fotoquímica.

Actualmente la producción mundial de PLA se encuentra entre 100 000 y 140 000 toneladas [15], aunque con el auge que sufre la impresión 3D estos datos varían constantemente por la demanda del producto.

En el caso particular de este proyecto, el PLA que se ha empleado es el suministrado por Filabot, que cuenta a su vez con un proveedor de pellets de PLA, Nature Works. Esta empresa empezó siendo un proyecto de investigación que perseguía innovar en los usos de los hidratos de carbonos de las plantas para generar, a partir de materia prima, plásticos más sostenibles. Actualmente, la empresa ofrece una amplia familia de biopolímeros comerciales (derivados 100% de recursos renovables) a un coste y un rendimiento que compite con los materiales derivados del petróleo.

Aplican tecnología única para la transformación de azúcares vegetales naturales en polímero polilactida (PLA) y su comercialización, de la cual nos hemos apoyado en este proyecto, se realiza bajo la marca Ingeo [36].



Figura 2.2.3.: Ingeo de Nature Works, proveedor de pellets de PLA.
[67]

La fabrica, situada en Nebraska, EE.UU., tiene una capacidad nominal de 300 millones de libras (140.000 toneladas métricas) de Ingeo biopolímero.



Figura 2.2.4.: Pellets de PLA empleados para la fabricación de filamento en el proyecto. [68]

El biopolímero que empleamos de Nature Works es el denominado 4043D. Se dispone en forma de gránulo (pellets) que serán introducidos posteriormente en la tolva de la máquina extrusora. El secado antes de su procesamiento es esencial, pues si tuviéramos humedad, afectaría al proceso de extrusión.

PLA 4043D de Natura Works		
Propiedades	Ingeo 4043D	ASTM Method
Densidad	1,24 g/cc	D1505
Resistencia a la tracción	110 MPa	D882
Módulo de tensión	3310 MPa	D882
Alargamiento a la rotura	160%	D882

Tabla 5: Propiedades de 4043D para film, entre otros usos. [36]

Processing Temperature Profile		
Melt Temp.	410±15°F	210±8 °C
Feed Throat	113°F	45°C
Feed Temp.	355°F	180°C
Compression Section	375°F	190°C
Metering Section	390°F	200°C
Adapter	390°F	200°C
Die	390°F	200°C
Screw Speed	20-100 rpm	
MD Draw Temp.	140-160°F	60-70°C
TD Draw Temp.	160-175°F	70-80°C

Figura 2.2.5.: Temperaturas de procesos con 4043D. [36]

En el *Anexo 1.1*, se aportan más datos acerca de las propiedades mecánicas del PLA.

2.3 PET (Polietileno Tereftalato)

El Polietileno Tereftalato es el polímero termoplástico de uso doméstico por excelencia. Químicamente el PET es un polímero que se obtiene mediante una reacción de policondensación entre el ácido tereftálico y el etilenglicol. Pertenece al grupo de materiales sintéticos denominados poliésteres.

Como todos los termoplásticos, que pueden calentarse desde el estado sólido hasta el estado líquido viscoso, y al enfriarse vuelven a adoptar el estado sólido sin degradar al polímero, pueden ser procesados mediante extrusión, inyección, inyección y soplado, soplado de preforma y termoconformado.



Figura 2.3.1.: Símbolo de reciclaje del PET. [70]

El PET presenta numerosas propiedades, tanto químicas como mecánicas que hacen de él un termoplástico muy demandado. A nivel químico, posee un alto grado de cristalinidad. Muy transparente (cualidad que adquiere al enfriarse rápido). Aunque también admite cargas colorantes. Alta resistencia química y térmica.

Puede ser reciclado, pero las propiedades del PET- reciclado se van devaluando progresivamente si se comparan con el PET original, puesto que a pesar de ser un polímero termoplástico que no sufre una gran degradación tras tratamientos térmicos, sus valores originales de capacidad se van alterando. Es permeable también a los gases, irrompible, liviano y no tóxico, además, el consumo de energía es bajo en su proceso de transformado.

A nivel mecánico, destaca su resistencia al impacto y el buen comportamiento frente a esfuerzos permanentes. Dependiendo de su biorientación se conseguirán unas características u otras. La biorientación es el proceso que modifica la estructura molecular, pasando de estructura amorfa a tipo laminar. Esto se consigue estirando la molécula en dos direcciones, la axial y la radial. Gracias a esto, se puede lograr propiedades mecánicas como gran resistencia al impacto y al aplastamiento, también presenta elevada pureza y tenacidad.

Propiedades del PET	
Método de polimerización	Por pasos (condensación)
Grado de cristalinidad	De Amorfo a 30% de Cristalinidad
Densidad	1,34 - 1,39 g/cm ³
Módulo de Elasticidad	2300 MPa
Resistencia a la Tensión	59 - 72 MPa
Resistencia a la Compresión	76 - 128 MPa
Resistencia al impacto Izod	0,01 – 0,004 J/mm
Elongación	200%
Dureza	Rockwell M94 M101
Dilatación Térmica	15,2 - 24 (10 ⁻³ /C°)
Calidad de mecanizado	Excelente

Tabla 6: Propiedades del PET. [37]

Para la impresión de una pieza buscamos un material que cumpla las siguientes características:

- _ Precio bajo.
- _ Reciclable.
- _ Ecológico
- _ Ligerero.
- _ Acabado y visualización estético.

Estos requisitos se ajustan a las características del PET, material que muchas veces queda en segundo plano por el dominio que ejercen en estos momentos el ABS y el PLA en el mercado de filamentos [39].

Sin embargo, las grandes compañías de fabricación de filamento, se van dando cuenta que el PET es un material que entre otras cosas, ofrece características como las excelentes propiedades mecánicas, baja absorción del agua, óptima resistencia al desgaste, superficie de las piezas muy brillante, buena resistencia química y térmica, óptima dureza superficial, propiedades antifricción muy buena, además de que es un material transparente con acabado translúcido que es capaz de colorearse con aditivos. Todo esto hace que se vaya abriendo paso su explotación comercial, y las grandes empresas de impresión, además de los aficionados a esta nueva tecnología, empleen más este material. (Ver *Anexo 1.2* para más datos del filamento de PET).

Como sabemos, el PET no solo está ligado al campo de la impresión 3D. Este termoplástico siempre ha estado orientado al mundo de las industrias alimentarias, envases de agua, refrescos con gas y sin gas, aceites, salsas... También en la industria textil, fibra textil, cintas de video, geotextiles... Este amplio abanico de utilización se debe a sus incontables ventajas como material sintético ya antes comentadas, pero también posee algunos inconvenientes que son importantes tener en cuenta, como por ejemplo que se decolora ligeramente, debe de ser secado para que no pierda propiedades y el coste del equipamiento necesario para su procesado es alto. Además, no mantiene buenas propiedades cuando se somete a temperaturas superiores a 70° (salvo si es PET cristalizado, opaco, que tiene buena resistencia a temperaturas de hasta 230°) y no se estira. Sin embargo, se ha seleccionado este material

como carga para la fabricación de filamento, porque supone un nuevo camino hacia la producción de más vidas útiles de su conformación. Actualmente el PET es uno de los materiales sintéticos más reciclados del mundo, sin embargo, su uso solo se destina a la producción de envases, cuando hemos visto que como material para impresión es más que válido y está altamente demandado.

Según datos del PIRS (Planta Insular de Residuos Sólidos) en Tenerife ha aumentado de forma exponencial el reciclaje de PET. En el año 2005 se recuperaban 515300 kg de envases de este polímero, mientras que en el 2014 la cifra alcanzaba 1497410 kg. Esto supone que el PET representa un 38,05% de los envases y el 21,60% de todos los residuos tratados en el complejo [51]. Aunque a nivel ambiental estos datos todavía reflejen la falta de concienciación a nivel social del tratamiento de los residuos, a nivel productivo son bastante buenos, ya que existe una gran cantidad de material aprovechable no solo para el reciclaje convencional de este material, sino también para aplicarlo al mundo de la impresión 3D, proporcionando así una nueva vía en el mercado de residuos.

RESIDUOS TRATADOS (Kg) EN LA PLANTA DE CLASIFICACIÓN DE ENVASES DEL COMPLEJO											
AÑO	RESIDUOS RECIBIDOS EN PLANTA	RECHAZO	PET	CARTÓN BEBIDAS	PEBD (FILM)	PEAD COLOR	PEAD NATURAL	PLASTICO MEZCLA	ACERO	ALUMINIO	ENVASES
2005	2.510.252	1.104.308	515.300	128.800	86.320	97.360	81.820	88.480	299.490	9.500	1.307.070
2006	3.131.760	1.253.220	588.953	190.740	161.016	133.891	107.475	130.750	348.470	26.920	1.688.215
2007	2.852.275	1.182.100	558.095	134.966	162.559	149.373	72.390	105.665	324.780	28.620	1.536.448
2008	4.728.390	1.737.580	870.439	187.171	288.238	216.140	93.446	128.562	555.320	33.640	2.372.956
2009	5.105.050	1.189.440	762.246	209.448	277.669	173.096	63.857	121.361	357.800	23.270	1.988.747
2010	5.384.840	1.725.970	1.156.783	394.494	452.621	302.916	105.780	200.927	596.600	50.653	3.260.774
2011	5.668.370	1.819.678	1.240.796	424.894	479.149	326.183	107.706	213.658	633.900	56.493	3.482.779
2012	5.597.450	1.685.280	1.402.698	436.521	440.432	311.701	106.896	184.314	614.760	63.240	3.560.562
2013	5.612.210	1.582.860	1.439.639	443.671	432.202	296.380	102.995	185.668	565.970	62.510	3.529.035
2014	5.861.850	1.701.740	1.497.410	441.581	462.457	303.753	103.781	197.709	579.090	57.150	3.642.931
TOTAL	46.452.447	14.982.176	10.032.359	2.992.286	3.242.663	2.310.793	946.146	1.557.094	4.876.180	411.996	26.369.517
		% envases	38,05	11,35	12,30	8,76	3,59	5,90	18,49	1,56	100,00
		% del total	21,60	6,44	6,98	4,97	2,04	3,35	10,50	0,89	56,77

Figura 2.3.2.: Datos de los residuos tratados en el PIRS. [51]

En el caso de las botellas de agua generadas con PET, el proceso de reciclaje es largo, minucioso y se basa en una serie de normas para garantizar la salubridad, no solo del proceso, sino también del resultado. (Ver *Anexo 1.2*)



Figura 2.3.3.: Granulado de PET para la posterior transformación en botellas. [70]

En este proyecto el PET que se emplea como carga en la elaboración de filamento para impresora 3D y que se consigue a partir de botellas de agua, no sufre ningún proceso de transformación, a priori, salvo el de ser triturado con una máquina especial para ello. De esta forma, se propone la aplicación y el uso casi directo del residuo para la confección de filamento.

2.4 Fibra de platanera

Las fibras naturales se clasifican según su origen, en animales o vegetales. Las que estudiamos a continuación son fibras naturales, procedentes de la platanera, y están constituidas por materiales fibrosos que pueden extraerse de la naturaleza, y que están constituidos principalmente por celulosa y lignina (fibras lignocelulósicas) [8]. Existen distintos productos vegetales de los cuales se puede extraer fibra para diversos usos, como por ejemplo cáñamo, sisal, piña o plátano. En este proyecto se ha seleccionado la planta de la platanera por ser un cultivo con una gran producción en la región, del cual solo se aprovecha el fruto y se cree que puede existir una aplicación nueva para todas las partes desechadas de la planta, ya que la propia planta y el racimo que no generan más frutos son eliminados y su única utilización tiene que ver con el alimento del ganado o el relleno de sus pesebres.

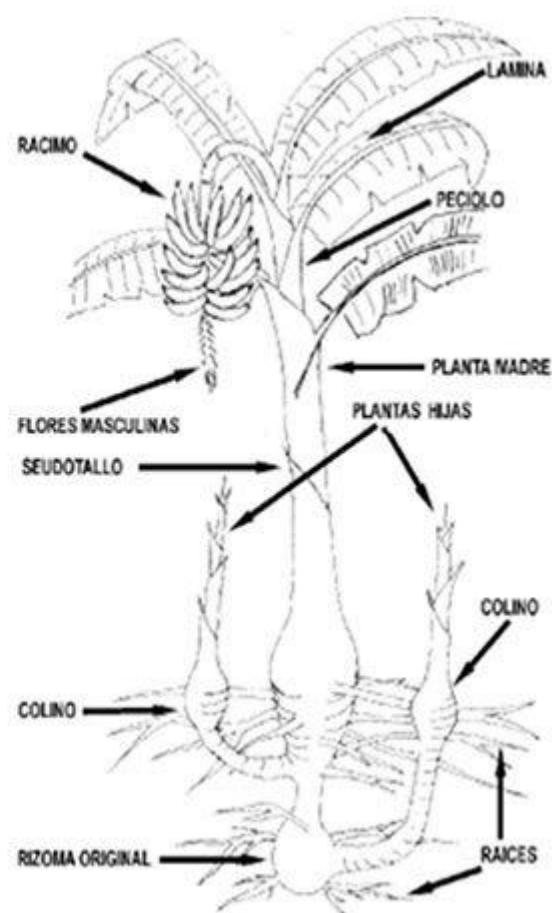


Figura 2.4.1.: Esquema de las partes de la platanera. [71]

Las fibras naturales de origen vegetal están formadas por microfibrillas de celulosa enlazadas entre sí por puentes de hidrógeno, incrustadas en una matriz de lignina e insertada en una red formada por hemicelulosa semicristalina y pectina. La obtención de la fibra de la platanera se realiza a partir del trabajo de distintas partes de la planta: el péndulo floral, que como vemos en la Figura 2.4.1 es el tallo donde cuelgan los frutos y el falso tallo o badana que son las hojas secas que rodean el tronco de la platanera. Seleccionamos esta última puesto que la badana presenta un aspecto más seco y no necesita ningún tratamiento de secado ni de laminación previo a su uso directo como carga aplicada para el filamento, salvo su corte o trituración para disminuir su tamaño.



Figura 2.4.2.: Aspecto de la badana.

Las fibras naturales de la platanera ofrecen numerosas ventajas debido a sus propiedades como fibras. Las fibras mejoran las propiedades de resistencia de compresión de diversos materiales, como cemento celulósico. Son semiconductoras y resistentes a altos niveles de acidez. Poseen alta resistencia y flexibilidad, baja dureza y baja densidad. Destacan por su capacidad de actuar como aislante térmico y acústico, por lo que se está investigando y desarrollando proyectos en este ámbito [8] [43]. Además, por su origen vegetal, es biodegradable y tiene una gran capacidad de ser reciclable y renovable, por lo que su uso en el campo de la impresión 3D es muy interesante.

Debido a todas estas propiedades sus usos son muy diversos y se extienden a numerosos campos y especialidades: creación de interiores de vehículos, electrodomésticos, refuerzos para embarcaciones, juguetes, moldes rotativos sostenibles, composite termoplástico de inyección, sustitución de fibra de vidrio, cabrón o procedentes de derivados del petróleo, reemplazar el uso de la madera para conformado de muebles, empaques de alimentos, utensilios de cocina... También tiene opciones en el mundo geotextil.

Propiedades de la fibra de plátano	
Densidad	1,35 g/cm ³
Celulosa	64 %
Hemicelulosa	19 %
Lignina	5 %
Humedad	10 %
Módulo de elasticidad	20000 MPa
Resistencia a tracción	550 MPa
Alargamiento	6 %

Tabla 7: Propiedades de la fibra de platanera. [47]

Las propiedades mecánicas de las fibras naturales, dependen mucho de las condiciones en las que se encuentra la fibra, como humedad, cantidad de celulosa, etc.

Las ventajas que presentan las fibras naturales frente a las sintéticas, y en especial las procedentes de las plataneras son diversas. La primera es que es capaz de sustituir a algunas fibras sintéticas o artificiales, lo que hace que disminuya el costo de obtención de esas fibras, pues se emplea menos energía para generarlas, lo que se traduce también en una disminución del efecto invernadero y todos los problemas medioambientales relacionados con la industrialización. También se mejora la productividad agrícola pues se trabaja conociendo que toda la planta será útil para la producción, mejorando y valorizando así el proceso de cultivo. Favorece el desarrollo de nuevas máquinas para procesar e industrializar fibras naturales directamente en el campo, generando una fuente de ingresos tanto para la industria maquinaria como para las zonas rurales encargadas de la producción de la planta.

A nivel mecánico también encontramos diversos beneficios, como su alta resistencia mecánica y bajo alargamiento en la dirección de tracción y en la que se alinean las fibras que la convierten en un producto óptimo para numerosas aplicaciones y que además reducen la demanda de productos derivados del petróleo que poseían las mismas funciones. Las fibras naturales hacen posible aplicar altos niveles de esfuerzos en procesos como extrusión y moldeo por inyección que con las fibras sintéticas no se podían plantear. Tiene buena relación peso-resistencia, lo que hace que se reduzcan consumos como el combustible en industrias como las del automóvil. Además, las fibras naturales pueden ser recicladas varias veces sin que se produzcan pérdidas notorias de propiedades mecánicas.

Si tuviéramos que mencionar un punto negativo, sería el coste inicial que supone llevar a cabo el proceso de recogida de la fibra, pues debe hacerse con maquinaria especializada para mejorar el aprovechamiento. Pero esta inversión inicial se ve compensada con todas las ventajas que nos aporta antes comentadas. La resistencia química no es muy alta y su estructura es algo inconsistente, pero las propiedades mecánicas compensan estos pequeños inconvenientes.

Este tipo de fibra natural despertó nuestro interés por la gran cantidad de recursos que promueve en nuestro territorio, ya que el sector agrícola de Canarias está dominado por la producción y exportación de plátano. En Canarias existen 9.100 hectáreas de cultivo, divididas en 5 islas del archipiélago. Tenerife es la isla de mayor producción de plátanos de Canarias, con casi un 42%, seguido por La Palma, con el 34%, y Gran Canaria, con el 22%. Tanto La Gomera como El Hierro representan en torno al 2%. En total se cuenta con una producción anual de aproximadamente 370.000 toneladas, de los cuales 25.000 toneladas de plataneros son desechadas [45].

Este desecho se está aprovechando en los últimos años a partir de proyectos como Bandana, para la fabricación de bioplásticos o refuerzos en otros materiales como conglomerados de maderas, etc. Es por ello por lo que con este proyecto se pretende generar una nueva línea de

investigación y que las propiedades de la fibra de platanera mencionada anteriormente se introduzcan en el mundo de la impresión 3D, para mejorar de esta manera el proceso y calidad de las piezas en 3D, haciendo de esta nueva tecnología un método de conformación más económico y respetuoso con el medio. Como ejemplo se puede hablar del aprovechamiento de fibras como la de coco en algunos casos de fabricación de filamentos para impresión digital como se puede ver en la Figura 2.4.3 siguiente:

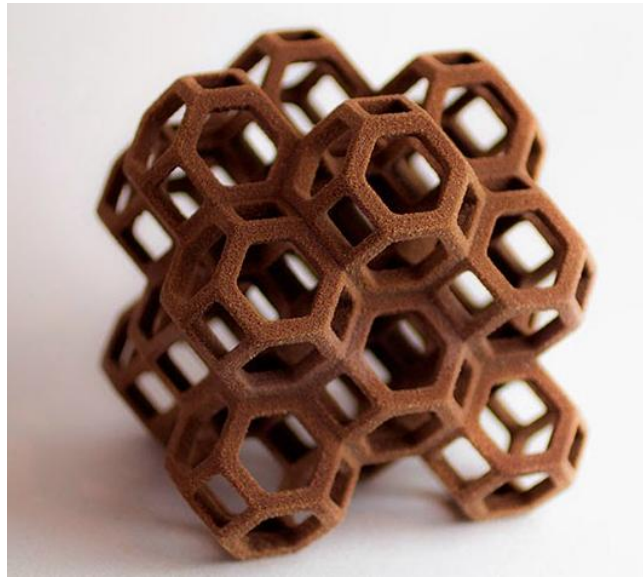


Figura 2.4.3.: Ejemplo de impresión 3D con fibra natural (coco). [72]

3. Obtención de filamento para impresoras 3D

3.1 Extrusora Filabot

Una maquina extrusora o de extrusión es aquella que, alimentada por medio de una tolva, hace pasar el material por un husillo (un tornillo sin fin), que calentado derrite el material para al final, al ser expulsado a presión por la maquina, y por medio de un dado, obtener una forma solicitada bajo diseño. Se puede trabajar con todo tipo de materiales, desde metal, plásticos, hasta comida. En el caso que nos ocupa, la impresión 3D, emplearemos en la extrusión polímeros termoplásticos y fibras naturales.

Los filamentos que se emplean para llevar a cabo la impresión 3D de cualquier objeto que se pueda imaginar y diseñar, pueden obtenerse de forma comercial, es decir, comprando el filamento del material que queremos ya procesado, con las características y color deseado, o se pueden conseguir a partir de la extrusión casera empleando material en forma de pellets o con el tamaño prescrito por la máquina extrusora. De esta forma, uno mismo puede controlar los parámetros de extrusión, como la temperatura y velocidad (dependiendo de la máquina que se adquiera), color, combinación de materiales, etc.



Figura 3.1.1.: Filamento comercial para la impresión 3D. [73]

Como hemos comentado anteriormente, este proyecto pretende estudiar la fabricación y caracterización de filamentos a partir de materiales reciclados, y para ello, se apoyará en el uso de una extrusora comercial de filamento, denominada Filabot Original™. [50]



Figura 3.1.2.: Filabot Original™. [50]

La extrusora Filabot nos permite, de forma personalizada no industrializada, fabricar nuestro propio filamento, con las características deseadas, y abaratando costes, puesto que la materia prima con la que se fabrica el filamento (pellets, escamas, etc.), es más barata que la compra del filamento comercial, luego para aquellas personas cuyo negocio o entretenimiento sea la impresión 3D, es una buena opción adquirir una extrusora y fabricar ellos mismos el filamento.

La Filabot Original™ está compuesta por un motor-reductor de 1/15 HP, que gira a 35 rpm y funciona con 24 VDC y 3,5A con un torque de 9 Nm; un tornillo sin fin que gira concéntricamente; un controlador digital de temperatura con un intervalo comprendido entre los 20° y 1300 °C con indicación y control de precisión de 0,1 °C; una tolva donde se introduce el material y tres dados, de 3 mm, 2,85 mm y 1,75 mm [50].

Dado que la impresora que vamos a usar para la fabricación de probetas tiene un extrusor de 3 mm, emplearemos el dado de las mismas dimensiones para producir el filamento.

La extrusora Filabot es capaz de confeccionar filamento a partir de gránulos 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 Filabot Original™, advirtiendo además que otros plásticos no verificados por ellos, pueden dar lugar a dificultades durante el proceso de extrusión. Además 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 7: Materiales testados por Filabot Original™. [50]

La operatividad de la máquina es sencilla. Comienza con una importante referencia al uso de plásticos y a las temperaturas de funcionamiento de los mismos. Cuando se emplean plásticos comerciales debemos fijarnos en la identificación por parte del fabricante, pero cuando se trata de plástico reciclado, es importante tener en cuenta cualquier referencia que se haga acerca de los componentes, ya que se recomienda no mezclar distintos tipos de plásticos, pues puede llegar a causar problemas de obstrucción o afectar al tiempo de procesamiento, tanto en la extrusora como en la impresora 3D.

El control de la temperatura es muy importante durante el proceso, también las condiciones ambientales de temperatura y humedad de la sala donde se disponga la extrusora, y dependiendo del material del filamento que se quiera obtener, etc... Por ello, deberemos manejar un rango de temperaturas determinado. Para los plásticos propuestos por la marca

comercial para el uso de la Filabot Original™, también se presenta un rango de temperaturas orientativo:

Tipo de Plástico	Temperatura del proceso
PLA	150° C – 190° C
ABS	160° C – 190° C
HIPS	190° C – 210° C
ULTEM	350° C – 400° C
PC	170° C – 220° C

Tabla 8: Temperaturas recomendadas para la extrusión de plásticos. [50]

A continuación explicaremos exhaustivamente el procedimiento a seguir para llevar a cabo con éxito la técnica de extrusión de plásticos en forma no comercial. Los primeros pasos que se exponen deberían ser realizados siempre cuando se opere con la extrusora, pues además de prepararla para el proceso, esta secuencia de operaciones ayudará a la limpieza y mantenimiento de la máquina.

Etapas para el proceso de extrusión de Filabot Original™:

Una vez instalada la extrusora en un área bien ventilada y limpia, se conecta a la corriente eléctrica. Se selecciona la boquilla adecuada para las condiciones de extrusión, en nuestro caso de 3 mm y con ayuda de una llave, se coloca en su disposición correcta en el extremo de la extrusora y se aprieta.



Figura 3.1.3.: Detalle de extremo de la extrusora y boquillas. [50]

Con todo el sistema apagado, se cambian los interruptores de Conexión (“Main Power”) y Control de temperatura (“Temperature Controller”) de apagado a encendido, iniciándose así la secuencia de control de temperatura por parte del dispositivo digital.



Figura 3.1.4.: Vista del control manual de la extrusora.

Para iniciar el proceso de extrusión, en primer lugar se selecciona la temperatura deseada con ayuda del control digital de temperatura; una vez seleccionada la temperatura en la parte inferior de la pantalla, debemos seleccionar el botón “Set” para guardar la temperatura de consigna, normalmente se selecciona una temperatura elevada, en nuestro caso 180° C, para

de esa manera iniciar el proceso de calentamiento de la cámara, que durará aproximadamente 20 minutos. El indicador de que ha llegado a la temperatura deseada se reflejará en la parte superior de la pantalla.



Figura 3.1.5.: Controlador de Temperatura.
Valor en verde: Temperatura de consigna.

El controlador de temperatura permite la modificación de la temperatura siempre que se desee, con la ayuda de los botones de Abajo (“Run Down”) o Arriba (“Run Up”) para dicho cambio que incluso se podrá hacer una vez iniciada la extrusión.

Transcurrido el tiempo de calentamiento de la extrusora, y cuando el dispositivo señale que se ha alcanzado el valor de consigna, se procede a llenar la tolva de la extrusora hasta la mitad con el material deseado. Acto seguido encendemos el botón “Extrude” y se inicia el movimiento del husillo, alimentando de esa forma la cámara de fusión. El proceso no es instantáneo, llevará unos segundos que los pellets lleguen hasta la parte de la boquilla. Durante esta parte del proceso puede salir humo de la extrusora, por eso es recomendable una buena ventilación.

Se deja dimanar filamento, puesto que al principio es posible que salga contaminado, con burbujas internas y superficie totalmente irregular. Una vez se consiga filamento homogéneo y limpio, se para la extrusión para establecer las características requeridas. Como comentamos al principio, estos pasos hay que seguirlos siempre que se inicie una extrusión, pues nos ayuda a mantener limpia la extrusora de cualquier resto o mezcla que se haya quedado en el interior de la cámara de extrusiones anteriores.

Etapas para la producción de filamento con Filabot Original TM:

A continuación pasamos a explicar el proceso que hemos llevado a cabo para fabricar filamento con la Filabot Original TM, que se localiza en el laboratorio de Ingeniería de Materiales que ésta área posee en la Escuela Superior de Ingeniería Informática. Durante el procedimiento, dado que lo único que hemos modificado ha sido el material y consecuentemente los valores de temperatura del trabajo, que más adelante indicaremos para cada caso concreto, el resto de los parámetros y la metodología de trabajo con la extrusora, serán las mismas.

Una vez puesta en marcha y purgada la máquina, siguiendo los pasos descritos en el punto anterior, procedemos a seleccionar la boquilla con la que queremos extruir el filamento; el cambio de boquilla para el diámetro de filamento requerido, siempre se debe hacer con la máquina caliente, pues así evitaremos el apriete excesivo de la boquilla con la rosca del extremo de la extrusora y por tanto diversos daños como barrido en las roscas o desgastes del perfil. El proceso de cambio de dado se realizará siempre con el botón “Extrude” apagado y el procedimiento siempre se realizará con ayuda de un alicate para sujetar la boquilla y una llave, puesto que no se deben tocar con las manos tanto el dado como el extremo de la extrusora por sus altas temperaturas.

En este caso, como queremos obtener filamento con un diámetro de 3 mm, dejamos la boquilla seleccionada para la puesta a punto de la extrusora. Una vez colocada la boquilla, se modifica la temperatura de consigna. Para el caso de PLA, el fabricante nos recomienda un rango de temperatura de extrusión comprendido entre 150° C y 190° C. Seleccionada la temperatura de extrusión, comenzamos el proceso.

Para recoger el filamento fabricado existen dos posibilidades, la primera es recogerlo en bobinas y la segunda, si no disponemos de bobinas, es guiar el filamento hasta el suelo y recogerlo una vez finalizada la extrusión. Si no se usan bobinas, la parte delantera de la extrusora debe quedar en el borde de una mesa, cuya separación con el suelo sea de al menos medio metro de altura; de esta forma, se guiará el filamento hacia el suelo y se irá depositando en forma de espiral natural. Nosotros vamos a emplear una bobina para recoger el filamento. Existe la opción de configurar un sistema de bobinado mecánico, pues es un accesorio que distribuye Filabot, pero en nuestro caso, el sistema de bobinado será manual.



Figura 3.1.6.: Proceso de extrusión de PLA y su recogida en bobina.

Una vez el filamento se haya enrollado un par de veces, debemos medir el diámetro del filamento para comprobar que cumple con las especificaciones requeridas. Si el filamento es demasiado grueso, debemos aumentar la temperatura del proceso un par de grados, y por el contrario, si el filamento es demasiado fino, debemos disminuir la temperatura de extrusión.

Cuando hayamos obtenido el filamento deseado, procedemos a apagar la máquina. El cuidado y el mantenimiento de la máquina son procedimientos muy sencillos. Consiste en limpiar el dispositivo cuando sea necesario, aspirar la tolva para eliminar cualquier resto de material o polvo generado del barrido del tornillo y purgar el plástico alojado dentro de la cámara de extrusión.

3.2 Filamento a partir de pellets de PLA

Comenzamos la extrusión de filamento para impresora 3D a partir de pellets de PLA. Estos pellets no solo se emplearán para la fabricación de un único tipo de filamento, sino que además, el material de PLA proporcionado por Filabot, será la base para los demás filamentos que se fabriquen. Es decir, cuando elaboremos filamento con materiales reciclados como PET o fibra de plátano, el material reciclado que se use, estará mezclado en proporciones determinadas con los pellets originales de PLA.

Para iniciar la extrusión del filamento, se deben seleccionar una serie de parámetros para el funcionamiento de la extrusora, ya comentados en el apartado anterior. Durante todo el proceso de extrusión de filamento con PLA, se han ido probando y corrigiendo temperaturas y métodos de extrusión; a continuación, mostramos una pequeña tabla con las temperaturas y modos de extrusión empleados, a modo de resumen, para posteriormente explicar las incidencias acontecidas, pues en este apartado finalmente se describirá el proceso que se siguió para obtener el filamento de PLA óptimo para la caracterización de piezas y ensayos.

Temperatura empleada	Método de extrusión	Servicio/Utilidad
180° C	Recogida simple en bobina	Puesta a punto de la extrusora
160° C	Recogida en bobina con refrigeración exterior	No presenta
150° C	Recogida simple en bobina	No presenta
170° C	Recogida simple en bobina con refrigeración exterior	Si presenta
175° C	Recogida en bobina con refrigeración exterior centralizada	Si presenta

Tabla 9: Temperatura empleadas en la extrusión de PLA y servicio

Para obtener filamento a partir de los pellets de PLA proporcionados por la empresa Filabot, se debe poner la extrusora a funcionar a una temperatura inicial de 180° C. Este paso es importante puesto que pone a punto la máquina y sirve para purgar cualquier resto anterior de extrusión y que durante el inicio de la nueva extrusión, el filamento salga de forma homogénea, sin burbujas ni intrusiones.



Figura 3.2.1.: Pellets de PLA empleados en al extrusión.

Introducidos los pellets hasta la mitad de la tolva, se alcanza la temperatura, y se purga durante unos 5 minutos, se para la extrusión y se disminuye el valor de consigna hasta 170° C; como queremos recoger el filamento de forma que no presente pequeñas deformaciones, sino que sea totalmente regular y liso para que no haya problemas durante el proceso de impresión, recogemos el filamento que se genera con ayuda de una bobina que giramos de forma manual, además hacemos uso de un ventilador convencional, situado en la parte posterior de la bobina, de forma que enfríe el filamento a medida que este va girando, consiguiendo que no se peguen entre ellos los hilos de filamento. Cada vez que se completa una bobina, se para la extrusión, se extrae el filamento de la bobina y se comprueba que el diámetro del filamento es apto para la posterior impresión.



Figura 3.2.2.: Filamento de PLA obtenido con Filabot Original™.

Recordemos que se emplea una boquilla de 3 mm de diámetro, con la finalidad de producir un filamento que obtenga ese valor de diámetro, pero debido a la recogida del material de forma manual, las condiciones ambientales del laboratorio, y el valor de consigna de la temperatura para la extrusión, el diámetro del filamento puede verse afectado, no consiguiendo por tanto el valor exacto. Es por ello por lo que se toma un rango de valores para el diámetro del filamento que nos proporciona la certeza de que posteriormente cuando se imprima con él, no presentará dificultades. Ese rango dimensional se encuentra entre 2,75 mm y 2,9 mm.

Antes de terminar con la extrusión, se incrementa 5 grados la temperatura, pues se observa que si no se refrigera tanto el filamento, este sale con un diámetro mucho más uniforme; por tanto, como necesitamos mantener el aire del ventilador para evitar un mal almacenamiento del filamento en la bobina, decidimos aumentar el valor de temperatura de extrusión. A continuación presentamos una tabla donde se recogen los datos y parámetros del filamento de PLA fabricado y dado como aceptable para emplearlo en la impresión 3D:

FILAMENTO	PARÁMETROS DE EXTRUSIÓN	OBSERVACIONES	USO
2	Temp: 170° Boquilla: 3 mm 23 g de PLA	Filamento con diámetro aceptable (bastante regular).	<input checked="" type="checkbox"/>
6	Temp: 175° Boquilla: 3 mm 14 g de PLA	Filamento con diámetro aceptable (bastante regular).	<input checked="" type="checkbox"/>
2	Temp: 175° Boquilla: 3 mm 31 g de PLA	Filamento con diámetro aceptable.	<input checked="" type="checkbox"/>
5	Temp: 175° Boquilla: 3 mm 32 g de PLA	Filamento con diámetro aceptable.	<input checked="" type="checkbox"/>

Tabla 10: Parámetros y características de extrusión del filamento de PLA

En el *Anexo 2* se recoge toda la información referente al filamento de PLA fabricado con la extrusora Filabot, donde se indican los parámetros de extrusión y los motivos por los cuales no se han empleado para imprimir.

3.3 Filamento a partir de pellets de PET

Iniciamos la fabricación de filamento para impresora 3D a partir de materiales reciclados. El primero de ellos va a ser el PET, termoplástico empleado en las botellas de plástico de agua.



Figura 3.3.1.: Ejemplo de impresión 3D que emplea botellas de agua (PET). [74]

Para llevar a cabo el proceso de obtención de filamento, lo primero que vamos a hacer es preparar la máquina extrusora a una temperatura de 180°C y disponer de la boquilla de 3 mm. Una vez dispuesta la temperatura, rellenamos la tolva con los pellets necesarios para elaborar el filamento. Como se ha mencionado anteriormente, en el proyecto se ha tomado la decisión de iniciar cualquier filamento con mezcla de materiales reciclados con PLA, por tanto, el material que se va a depositar en la tolva será una mezcla en proporción de PLA y PET. Colocaremos unos 70 g de pellets, donde un 10% serán de PET (7 g) y el 90% restante (63 g) será PLA. Se inicia el proceso con tan poca cantidad de material adyacente reciclado, pues se quiere realizar un estudio progresivo de la caracterización del filamento cuando se le añade carga; una vez estudiado el comportamiento del filamento con dicha carga, se puede considerar la posibilidad de aumentar el porcentaje de mezcla.

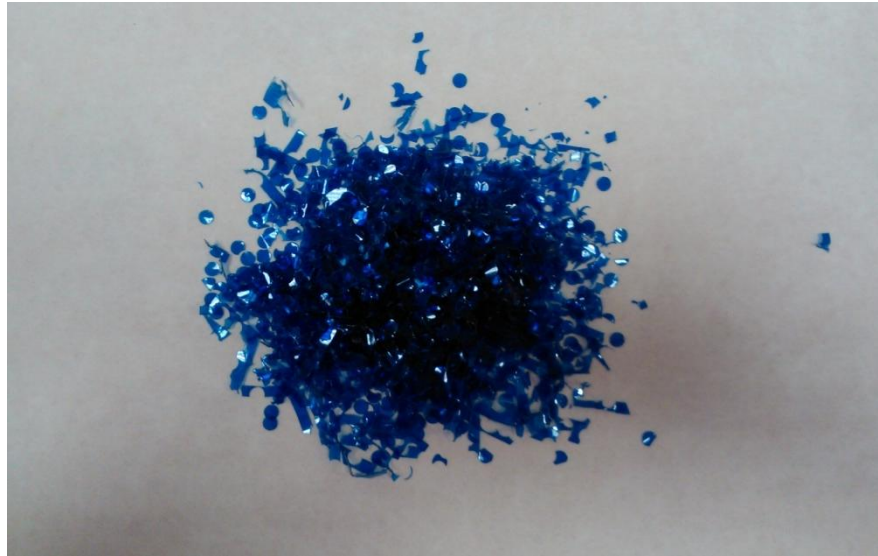


Figura 3.3.2.: Escamas de PET empleadas como carga para filamento

Para obtener las escamas de PET que se emplearán en el proceso, se hace acopio de una botella de agua y una trituradora de papel y CD de corte cruzado y de 12 hojas, para poder obtener así un tamaño considerablemente pequeño para que sea admisible por la extrusora. Elegimos una botella de color añil para que el filamento obtenido adquiriera coloración, puesto los pellets de PLA son transparentes.

La extrusión se inicia a 180° C y purgando para ver como sale la mezcla PET – PLA; A esta temperatura se aprecian problemas de fusión entre los dos materiales, puesto que no se alcanza la temperatura necesaria para que el PET se funda completamente. Es por eso por lo que se aumentan 20° a la temperatura de consigna, aun sabiendo que afectará a las propiedades del PLA (pues su máxima temperatura recomendada para la extrusión en la Filabot es de 190° C).

A 200° C conseguimos que los dos materiales se fundan, proporcionando una tonalidad azul al filamento que sale de la extrusora; pero sale burbujeante y con baja consistencia, además con un diámetro más fino del requerido. Es imposible controlar el diámetro y recoger el filamento tal y como sale de la máquina.

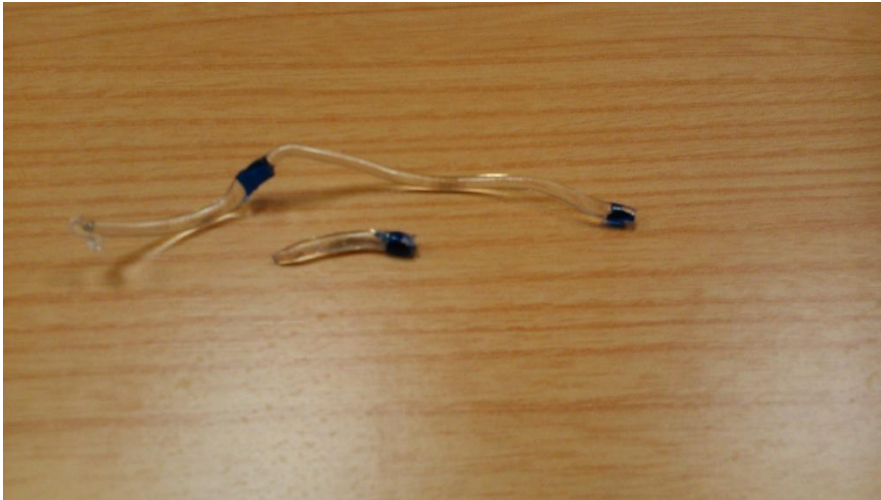


Figura 3.3.3.: Resultado de la extrusión a 180° C. Los dos materiales no se mezclan de forma proporcional.

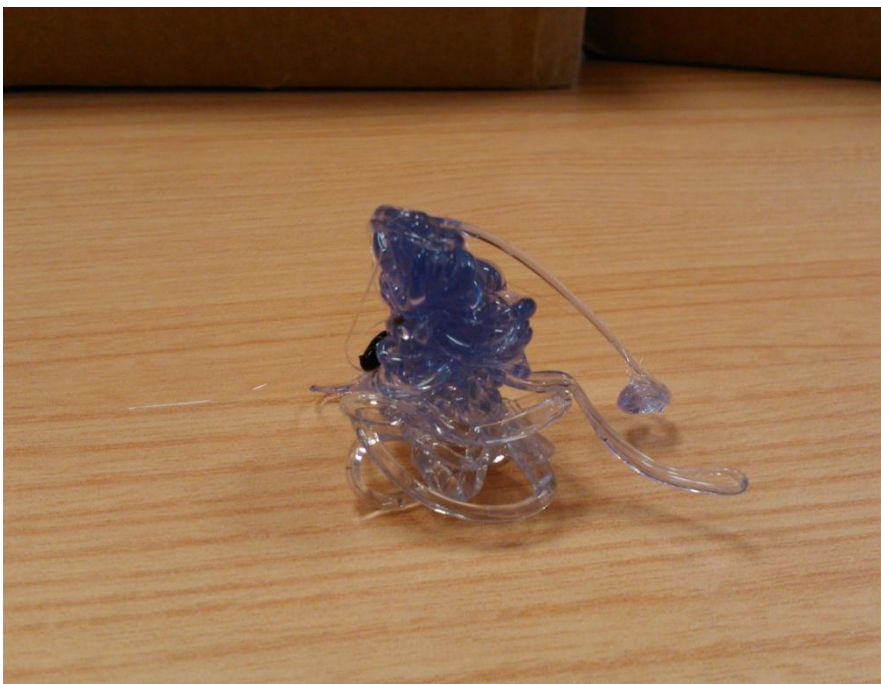


Figura 3.3.4.: Resultado de la extrusión a 200° C. Los materiales se funden entre sí pero el filamento no es válido para la posterior impresión.

Tras probar con distintas temperaturas, comprobamos que el filamento no se genera con la forma ni la sección requerida, y además observamos que el filamento sale a una velocidad más baja de lo normal, lo cual nos puede indicar que hay una posible obstrucción en el interior de la extrusora.

Cuando desmontamos la boquilla de la rosca de la extrusora, vemos como escamas de PET, todavía sin fundir, se han alojado en las paredes de la boquilla, impidiendo el paso de filamento, lo cual no hace concluir dos cosas:

- Que el PET en escamas que hemos empleado para la fabricación de filamento 10% PET no cumple las dimensiones óptimas para el proceso tal y como lo llevamos a cabo, es decir, sin ningún tratamiento térmico anterior, por tanto, deberíamos realizar un proceso térmico que permita reblandecer el PET y hacer que a una temperatura de fusión comprendida entre 170° C (temperatura óptima para la obtención de filamento de PLA) y 190° C (temperatura máxima de fusión del PLA) se funda sin ningún tipo de dificultad con el material elegido como base.

_ Si no se dispone de ningún medio para realizar el procedimiento que varíe las propiedades térmicas del PET, este material debe añadirse en forma de polvo o raspaduras, para que al añadirse como carga, se deposite al filamento de PLA como inclusiones de un tamaño inferior a 125 μm . Esto se consigue triturando y tamizando el PET, pero presenta el problema de que con las máquinas disponibles en el laboratorio, la consistencia del material no lo permite, sin embargo si se puede adquirir polvo o ralladura de PET de forma industrial, pero no permitiría el uso casero de reutilización de materiales, tal y como se pretende en este proyecto.

(Ver *Apartado 7.3* para la diagnosis del fallo)

3.4 Filamento a partir de pellets de PLA + PLA reciclado

Uno de los principales objetivos del proyecto, era reducir los residuos de la propia impresión 3D, excedentes, recortes, piezas defectuosas, etc. Es por eso por lo que vamos a generar filamento con piezas fabricadas con PLA que han tenido defectos o que han sido ensayadas a posteriori y ya no se pueden emplear para otro uso. Queremos estudiar por tanto si el excedente de PLA de piezas se puede volver a reutilizar para elaborar filamento y emplearlo de nuevo en impresión 3D.

Partimos de piezas de PLA que han sido usadas como probetas de ensayos a compresión y flexión. Como necesitamos obtener escamas de PLA reciclado, procedemos a desarmar las piezas para poder pasarlas por la trituradora y obtener así el tamaño óptimo para la extrusora.



Figura 3.4.1.: Piezas de PLA impresas y ensayadas que usarán para generar carga de PLA reciclado.

Una vez obtenido el PLA reciclado en forma de escamas, mezclamos en proporción con el PLA de base, obteniendo una mezcla total de 70 g. Repetimos las proporciones de 10% de PLA reciclado (7 g) y 90% de PLA base (63 g).



Figura 3.4.2.: PLA reciclado tras el paso de las piezas por la trituradora.



Figura 3.4.3.: Mezcla de PLA que se emplea para el proceso de extrusión.

Preparamos la extrusora a 180° C y alcanzado el valor de consigna, comenzamos a producir filamento. Al principio el proceso no es muy bueno, obtenemos un filamento irregular, de diámetro variable, pero se consigue recoger filamento.

PARÁMETROS DE EXTRUSIÓN	OBSERVACIONES
Temp: 180° C Boquilla: 3 mm 9 g de PLA + PLA rojo	No sirve para impresión puesto que el diámetro es muy variable, además de estar por debajo del valor buscado (no llega a los 2 mm de diámetro).

Tras haber probado nuevamente las condiciones de extrusión, esta vez variando la temperatura entre los rangos de 175° C - 180° C, comprobamos que el filamento no es regular, ya que presenta variaciones en la viscosidad, a veces sale burbujeante y no conseguimos el diámetro requerido. Por ello, vamos a mantener la temperatura de 180° C y procedemos a cambiar la boquilla a 3,5 mm, para intentar equilibrar la elongación del filamento al salir de la extrusora con el dado empleado.

PARÁMETROS DE EXTRUSIÓN	OBSERVACIONES
Temp: 180° C Boquilla: 3,5 mm 3 g de PLA + PLA rojo	Diámetro muy pequeño, no sirve para impresión.



Figura 3.4.4.: Filamento de PLA + PLA reciclado que se obtiene pero que no sirve para la impresora que se dispone.

Determinamos por tanto que el PLA reciclado del que disponemos no es útil para reciclarlo y utilizarlo como carga en la fabricación de filamento con base de PLA. Esto puede estar motivado porque el PLA, durante el proceso de impresión, alcanza temperaturas de superiores a 200° C (dependiendo de la configuración de impresión) y ese tratamiento térmico puede afectar a las propiedades del termoplástico. Se conoce que un calentamiento y enfriamiento repetido en un termoplástico, puede causar degradación, es decir, el envejecimiento térmico del termoplástico [5].

Aun así este hecho nos resulta curioso, puesto que Filabot Original™ está especialmente diseñada para la reutilización de piezas de impresión 3D y más cuando se trata de piezas fabricadas con el mismo material, luego no debería resultar problemático generar filamento a partir de piezas de PLA, sean pellets nuevos (como los que usamos como base) como reciclados. Por tanto planteamos dos posibilidades, que el PLA reciclado haya sido expuesto a un proceso térmico o unas condiciones ambientales no tenidas en cuenta en primer momento, lo cual nos revelaría un análisis térmico; o por el contrario, que haya algún tipo de fallo en el funcionamiento del dispositivo de extrusión del que no seamos conscientes, como una obstrucción, rotura interna, etc.

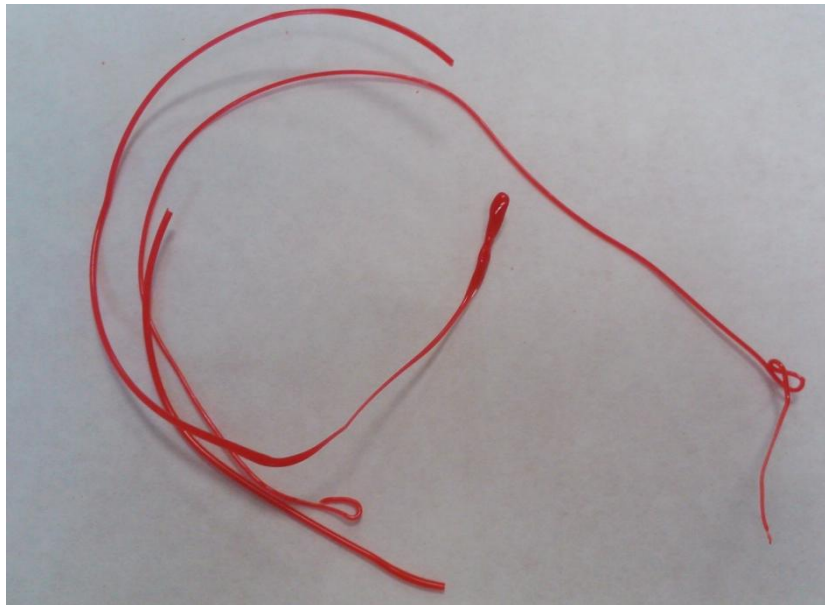


Figura 3.4.5.: Filamento inutilizable para impresión 3D.

3.5 Filamento a partir de Fibras de platanera

Como hemos comentado anteriormente, resulta interesante encontrar un uso útil al excedente de fibra de platanera que se genera en Canarias. Muchas investigaciones se han encaminado a estudiar y proponer usos para los desechos que produce la industria del plátano, sin embargo, este proyecto es pionero en proponer el uso de la fibra de platanera para la impresión 3D.



Figura 3.5.1.: Badana de platanera empleada en el procedimiento experimental.

El procedimiento para obtener el material que se va a emplear en la extrusora comienza con el Pedúnculo Floral de la platanera totalmente seco. Una vez esté seco, se tritura hasta el mínimo tamaño posible, de esa forma podemos pasarlo por una tamizadora y obtener material de fibra de platanera de 1 mm de espesor.



Figura 3.5.2.: Aspecto de la fibra de platanera una vez triturada.

Perseguimos obtener polvo de fibra de plátano para emplearlo como carga para el filamento con base PLA, puesto que la extrusora tolerará mejor el material si se dispone en forma de limadura.



Figura 3.5.3.: Fibras de platanera en proceso de tamización para alcanzar dimensiones de 1 mm.

Una vez tamizadas, observamos que además de polvo de fibra tenemos también fibras pequeñas que no hemos conseguido romper, luego tendremos que volver a tamizar el producto obtenido, esta vez con un tamiz menor, para conseguir el resultado deseado. El segundo tamizado se realizará con unas dimensiones de 125 μm .

Para finalizar el proceso de obtención de material óptimo para la extrusión, procedemos a realizar un pequeño análisis térmico, para cerciorarnos de que la fibra de platanera dispuesta, soportará las temperaturas que se emplean para fabricar filamento de PLA y que no provocarán ningún daño a la máquina.

Por ello se prepara una muestra de 0,300 g de fibra en un vaso de precipitado (*beaker*) y se introduce en la mufla a 175° C (temperatura considerada como óptima para la obtención de filamento de PLA en nuestro proyecto) durante 30 minutos.



Figura 3.5.4.: Aspecto de la muestra de fibra de platanera antes del proceso térmico en mufla.

Transcurridos los 30 minutos, se retira la muestra de la mufla y se observa que no hay fibras quemadas ni grandes cambios perceptibles, tan solo el cambio de tonalidad a un marrón más oscuro de la fibra. Pesamos la muestra para comprobar si ha habido un cambio de masa, y comprobamos que durante el proceso térmico se pierde 0,07 g (0,230 g pesa la muestra después del proceso térmico). También se aprecia que tras el calentamiento, aquellas fibras que no fueron capaces de romperse y quedarse en forma de polvo con la tamizadora, se han degradado, pues aparece más cantidad de polvo de platanera que antes.



Figura 3.5.5.: Muestra de la fibra de platanera después del proceso térmico.



Figura 3.5.6.: Muestra de la fibra de platanera después del proceso térmico.

Finalmente la prueba de este material de carga al PLA para la producción de filamento no comercial no se pudo realizar por problemas que se desarrollaran en el *Apartado 7* de esta memoria.

4. Fabricación de probetas

Para la caracterización de los filamentos, fabricados a partir de materiales reciclados y con el soporte de Filabot Original™, debemos estudiar cómo se comportan mecánicamente, de ese modo conoceremos su respuesta ante esfuerzos y podremos determinar si estos filamentos conformados con materiales que suponen un excedente, son óptimos para su uso en impresión y aportan además ventajas frente a sus competidores comerciales.

Los estudios mecánicos a los que se van a someter los filamentos serán esfuerzos de flexión y esfuerzos de tracción. Para realizar correctamente el ensayo de los filamentos, vamos a utilizarlos para, a partir de la impresión 3D, generar probetas normalizadas para los estudios mecánicos. De este modo, completaremos el proceso que llevaría a cabo un usuario de la impresión 3D partidario de obtener el filamento para la impresión por sí mismo y no de manera comercial.

4.1 Probetas para Tracción

La resistencia a tracción de los filamentos, se obtienen conforme a la Norma UNE-EN-ISO 527:2012. “Plásticos. Determinación de los propiedades a tracción” [2]. Esta norma propone que las probetas tengan las siguientes medidas:

	Tipo de probetas	1A	1B
l_3	Longitud total	170	≥ 150
l_1	Longitud de la parte estrecha de caras paralelas	80 ± 2	$60 \pm 0,5$
r	Radio	24 ± 1	$60 \pm 0,5$
l_2	Distancia entre las paredes anchas de caras paralelas	$109,3 \pm 3,2$	$108 \pm 1,6$
b_2	Anchura de los extremos	$20 \pm 0,2$	
b_1	Anchura de la parte estrecha	$10 \pm 0,2$	
h	Espesor recomendado	$4 \pm 0,2$	
L_0	Longitud de referencia (recomendada) Longitud de referencia (aceptable si se requiere para el control de calidad o cuando se especifique)	$75 \pm 0,5$ $50 \pm 0,5$	$50 \pm 0,5$
L	Distancia inicial entre las mordazas	115 ± 1	115 ± 1

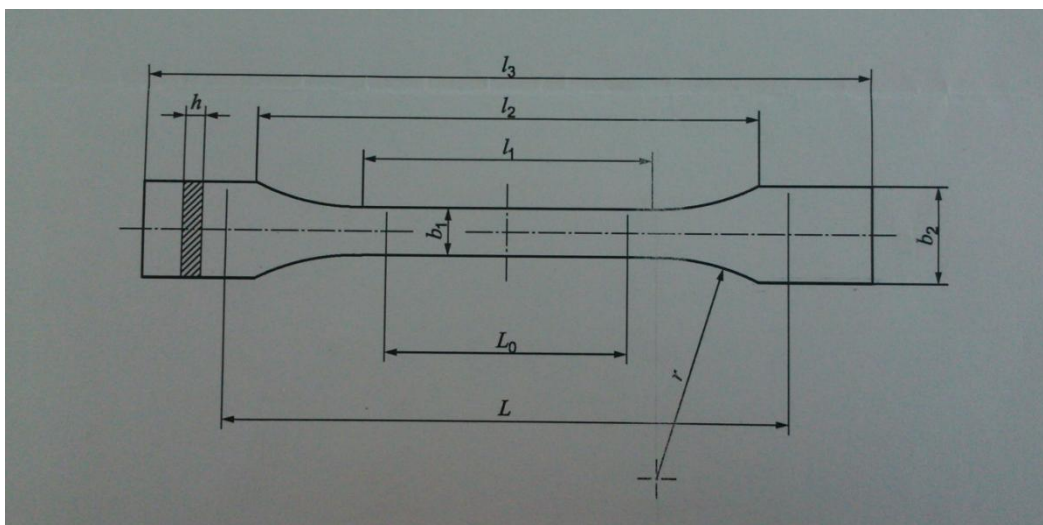


Figura 4.1.1.: Dibujo acotado de las probetas a tracción según Norma. [2]

En nuestro caso, seleccionamos las probetas de tipo 1A, luego a partir del SolidWorks diseñamos la probeta con las medidas correspondientes, para posteriormente obtener el archivo STL. [3]

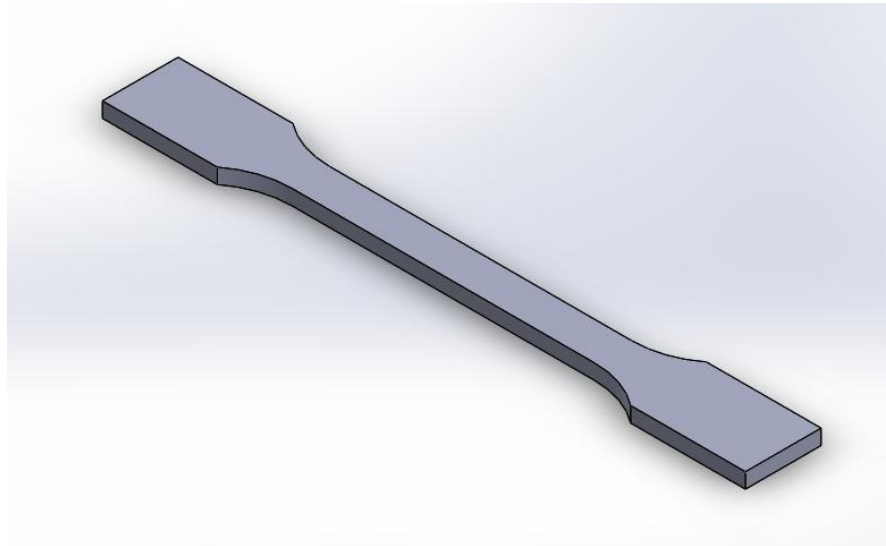


Figura 4.1.2.: Vista en 3D del diseño probeta tracción en SolidWorks.

Una vez generado el diseño en SolidWorks se crea el STL, archivo que se emplea en el software de impresión Pronterface. El Pronterface es un programa que permite controlar la impresión en impresoras de proyectos RepRap (impresoras autoreplicables para prototipado rápido y manufactura). Este programa, además de ser capaz de interpretar el G-Code (se genera cuando cargamos el archivo STL), nos permite controlar parámetros de posicionamiento de ejes, las condiciones de impresión como temperatura de la cama, temperatura de la extrusora, tipo de relleno, velocidad, etc.

Las probetas impresas con el filamento de PLA que hemos conformado se han impreso en el Laboratorio de Fabricación Digital (FABLAB), dependiente del SEGAI, que posee la Universidad de La Laguna en la Facultad de Bellas Artes, donde se localiza la impresora 3D de tipo RepRap.

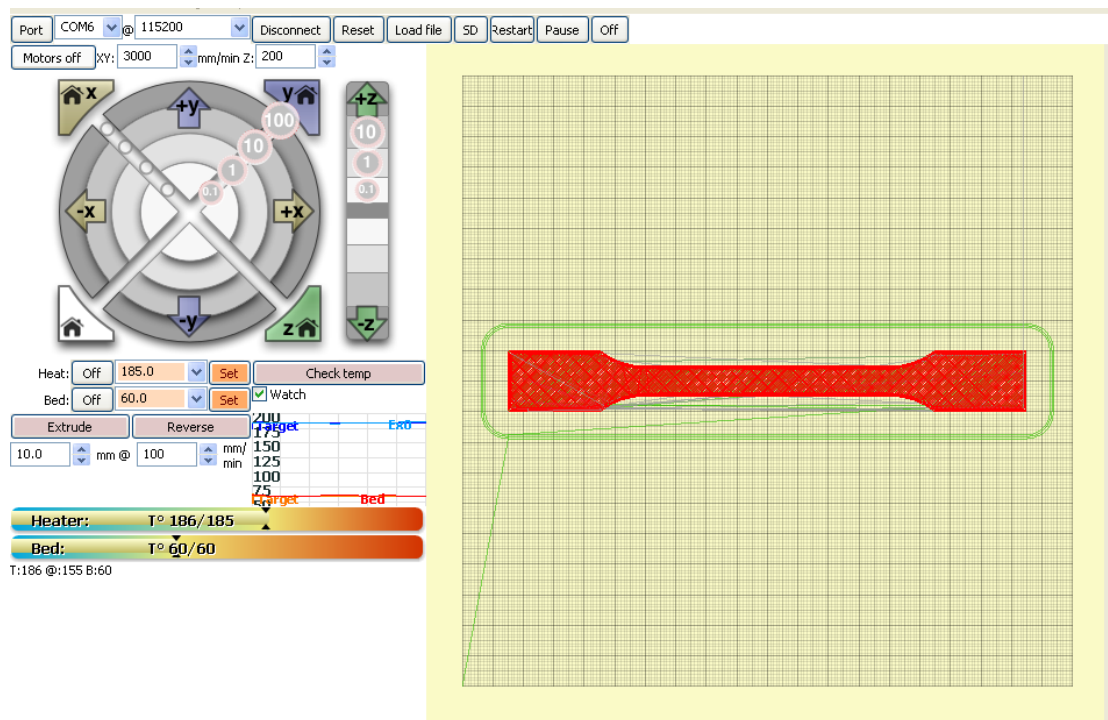


Figura 4.1.3.: Interfaz del Pronterface donde se genera el archivo STL y se ajustan los parámetros de impresión.

CONDICIONES DE IMPRESIÓN	
Densidad del relleno	10%
Patrón de relleno	Rectilínea
Patrón de relleno en parte superior e inferior	Rectilínea
Velocidad Perímetro	30 mm/s
Velocidad de relleno	40 mm/s
Temperatura de la cama	60° C
Temperatura de la extrusora	185° C

Tabla 11: Parámetros de impresión para las probetas de tracción

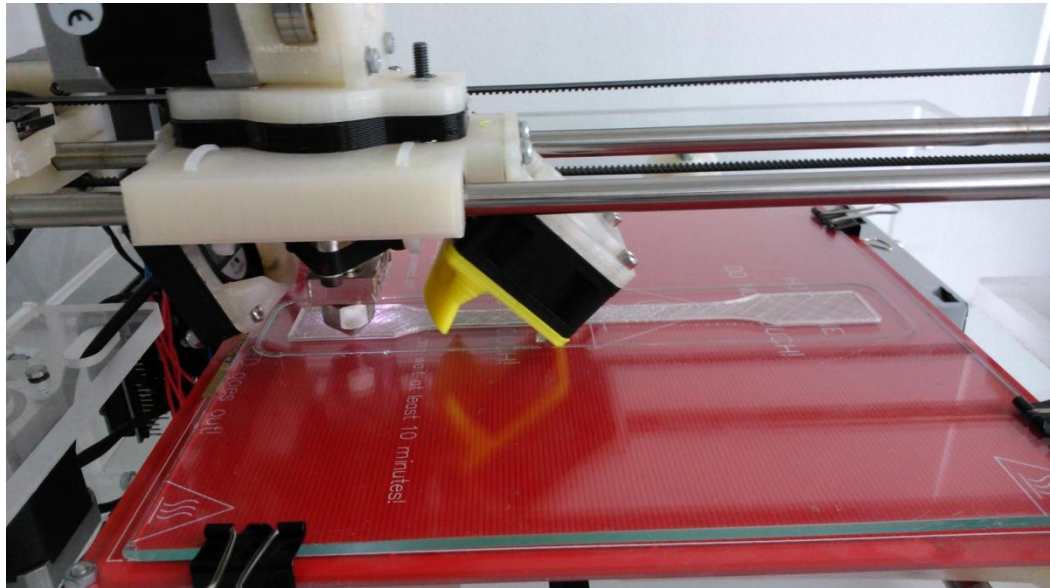


Figura 4.1.4.: Detalle de impresión de probeta a tracción.

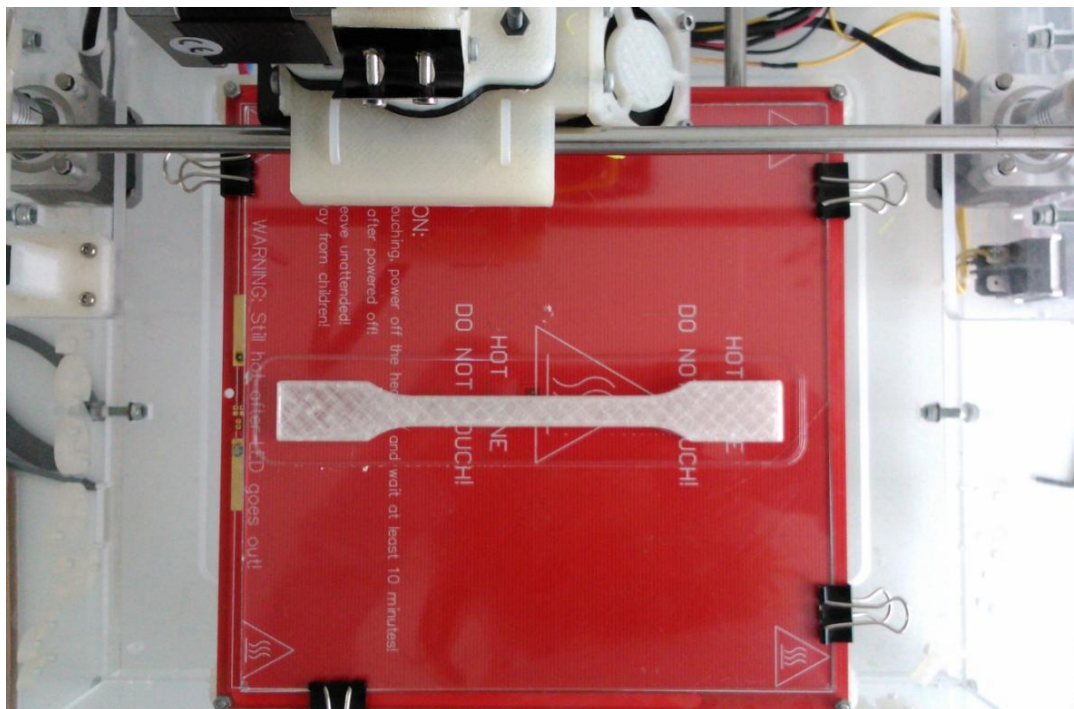







Figura 4.1.5.: Final de la impresión de probetas a tracción.

A continuación recogemos en la *Tabla 12* los resultados obtenidos tras la impresión de las probetas a tracción, comentando la inspección visual realizada de cada una de las probetas tras el procedimiento de conformación.

PROBETA	PARÁMETROS DE IMPRESIÓN	OBSERVACIONES	USO
A	Filamento nº 2, 23 g de PLA (14.04.15) Temp. Impresión: 185° C Tipo de relleno: Rectilíneo Densidad de relleno: 10% Tiempo de impresión: 0:31:28 Peso probeta: 5,359 g	Problemas en el inicio de la impresión puesto que el diámetro del filamento era menor de 2,75 mm, lo cual provocaba falta de presión en el extrusor. Este hecho puede influir en los resultados de los ensayos.	
B	Filamento nº 2, 23 g de PLA (14.04.15) Temp. Impresión: 185° C Tipo de relleno: Rectilíneo Densidad de relleno: 10% Tiempo de impresión: 0:31:28 Peso probeta: 5,175 g	Buena impresión salvo en el inicio. Ligeramente sin depositar material en el centro de la probeta. La primera capa de relleno final quedó algo levantada.	
C	Filamento nº 2, 23 g de PLA (14.04.15) Temp. Impresión: 185° C Tipo de relleno: Rectilíneo Densidad de relleno: 10% Tiempo de impresión: 0:31:28 Peso probeta: 6,037 g	Impresión perfecta.	
D	Filamento nº 6, 14 g de PLA (14.04.15) Temp. Impresión: 185° C Tipo de relleno: Rectilíneo Densidad de relleno: 10% Tiempo de impresión: 0:31:28 Peso probeta: 6,171 g	Buena impresión salvo en uno de los extremos, donde la capa de relleno no se depositó correctamente.	
E	Filamento nº 6, 14 g de PLA (14.04.15) Temp. Impresión: 185° C Tipo de relleno: Rectilíneo Densidad de relleno: 10% Tiempo de impresión: 0:31:28 Peso probeta: 4,726 g	Extremo con poca capa de deposición de material al inicio de la impresión.	
F	Filamento nº 2, 31 g de PLA (17.04.15) Temp. Impresión: 185° C Tipo de relleno: Rectilíneo Densidad de relleno: 10% Tiempo de impresión: 0:31:28 Peso probeta: 5,673 g	Salvo una ligera mala deposición en el extremo superior de la probeta, el resto de la impresión ha sido perfecta.	


G	Filamento nº 2, 31 g de PLA (17.04.15) Temp. Impresión: 185° C Tipo de relleno: Rectilíneo Densidad de relleno: 10% Tiempo de impresión: 0:31:28 Peso probeta: 5,560 g	Pequeña falta de material en uno de los extremos de la probeta, de resto, impresión correcta.	
---	--	---	---

Tabla 12: Resultados de la impresión de probetas para el ensayo de tracción.

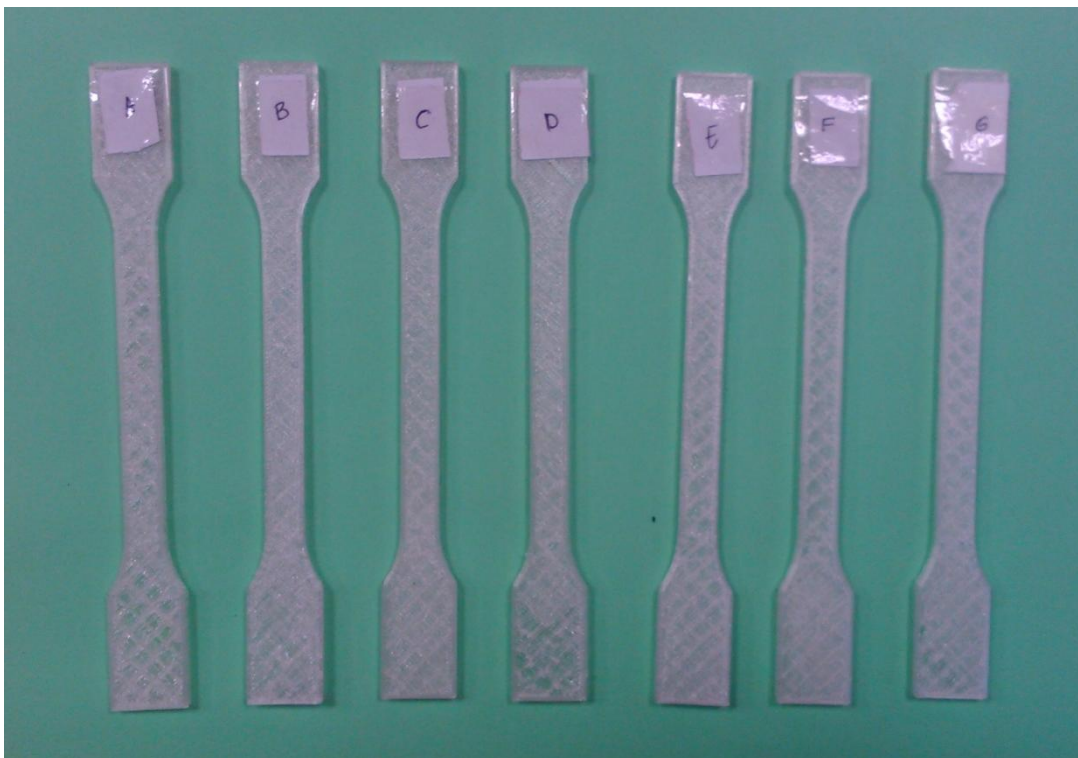


Figura 4.1.6.: Probetas de tracción de PLA al 10%.

Ya disponibles las probetas de PLA podemos caracterizar sus propiedades mecánicas de tracción. Se usarán aquellas cuya impresión haya sido correcta y no presenten tramos sin materiales y otras deficiencias, para obtener una muestra representativa.

Las probetas que se ha descartado considerar dentro del estudio mecánico han tenido problemas en la impresión debido a la variación del diámetro del filamento. Aunque se ha señalado que la tolerancia de la impresora admitía un valor comprendido entre 2,75 mm y 2,9 mm, es cierto que cuando el valor diametral se acerca más al límite inferior, podía producirse una mala deposición del material, puesto que el rodamiento que forzaba al filamento a pasar a través de la extrusora de la impresora, no podía ejercer la presión necesaria sobre el hilo de material, generando un pequeño vacío en la extrusión, lo que provocaba, como hemos dicho, zonas con menos deposición del material en la probeta.

4.2 Probetas a Flexión

La resistencia a flexión de los filamentos, se obtienen conforme a la Norma UNE-EN-ISO 178:2010. “Plásticos. Determinación de los propiedades de flexión” [1]. Esta norma propone que las probetas tengan unas medidas recomendadas de 80 mm de largo, 10 mm de ancho y 4 mm de espesor nominal.

Por tanto, esas son las medidas que se emplearán para el diseño y posterior impresión de las probetas de flexión. El diseño de las probetas se realizará a partir del software SolidWorks, con el cual se podrá generar un STL, archivo que se emplea para la impresión 3D. [3]

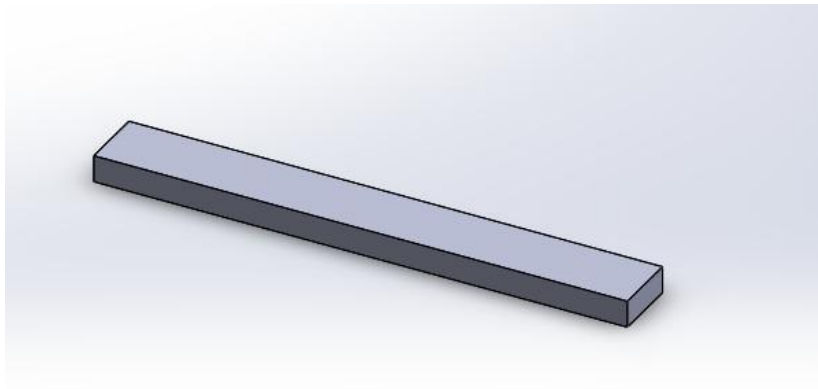


Figura 4.2.1.: Vista en 3D del diseño probeta flexión en SolidWorks.

Una vez generado el diseño en SolidWorks y se crea el STL, como en el caso de la probeta a tracción. Se fijan los parámetros de impresión y se inicia la impresión.

CONDICIONES DE IMPRESIÓN	
Densidad del relleno	10%
Patrón de relleno	Honey comb
Patrón de relleno en parte superior e inferior	Rectilínea
Velocidad Perímetro	30 mm/s
Velocidad de relleno	40 mm/s
Temperatura de la cama	60° C
Temperatura de la extrusora	185° C

Tabla 13: Parámetros de impresión para las probetas de flexión

Inicialmente la primera probeta que se imprimió tenía las mismas condiciones, salvo el *fill pattern* (patrón de relleno) que era rectangular; este tipo de relleno, que sale por defecto en cualquier impresión, dejaba grandes partes interiores sin material, lo cual generaba debilidad en la estructura. Es por eso por lo que se procedió al cambio de relleno, y se optó por un *honey comb* puesto que así la estructura interior estaba mucho más repartida, luego es más eficaz a la hora de redistribuir la carga que se le vaya a aplicar.

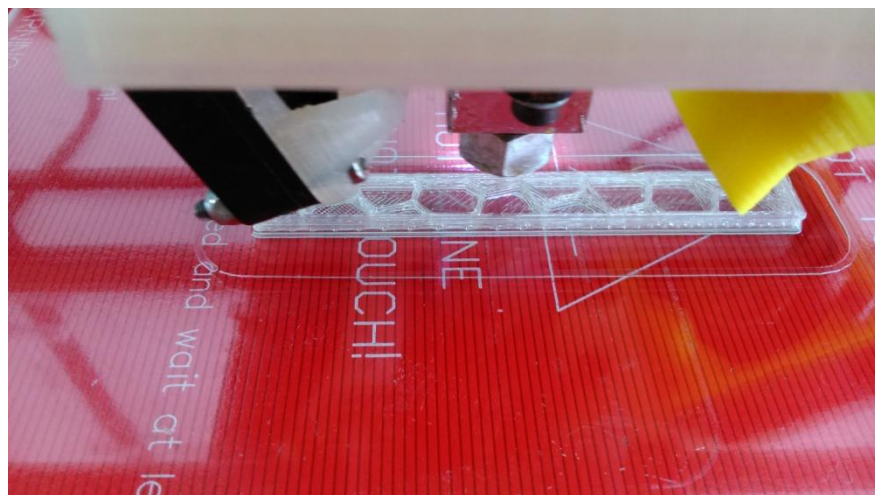


Figura 4.2.2.: Detalle de la impresión de probeta para ensayo a flexión al 10% de relleno.

PROBETA	PARÁMETROS IMPRESIÓN	OBSERVACIONES	USO
	Filamento nº 2, de 31 g de PLA (17.04.15) Temp. Impresión: 185° C Tipo de relleno: rectilíneo Densidad relleno: 10% Tiempo impresión: 0:11:28 Peso probeta: 2,021 g	Hacemos una primera impresión para conocer el resultado de probeta. El tipo de relleno rectilíneo no es el más idóneo para la probeta. Luego cambiaremos el tipo de relleno y la temperatura de impresión.	
A	Filamento nº 2, de 31 g de PLA (17.04.15) Temp. Impresión: 185° C Tipo de relleno: honeycomb Densidad relleno: 10% Tiempo impresión: 0:12:22 Peso probeta: 2,178 g	Impresión y relleno perfecto. Se aprecia más resistencia gracias al relleno tipo “panal de abeja” que ayuda a redistribuir la carga. Seguimos por tanto con estos parámetros para las siguientes impresiones.	<input checked="" type="checkbox"/>
B	Filamento nº 2, de 31 g de PLA (17.04.15) Temp. Impresión: 185° C Tipo de relleno: honeycomb Densidad relleno: 10% Tiempo impresión: 0:12:22 Peso probeta: 1,953 g	Pequeño problema en la primera capa de relleno, que no se deposita correctamente. Por lo demás, impresión correcta.	<input checked="" type="checkbox"/>
C	Filamento nº 2, de 31 g de PLA (17.04.15) Temp. Impresión: 185° C Tipo de relleno: honeycomb Densidad relleno: 10% Tiempo impresión: 0:12:22 Peso probeta: 2,148 g	La capa final tiene algunas zonas con falta de material. De resto buena impresión.	<input checked="" type="checkbox"/>

D	<p>Filamento nº 2, de 31 g de PLA (17.04.15)</p> <p>Temp. Impresión: 185° C Tipo de relleno: honeycomb Densidad relleno: 10% Tiempo impresión: 0:12:22 Peso probeta: 2,076 g</p>	Impresión correcta.	<input checked="" type="checkbox"/>
E	<p>Filamento nº 2, de 31 g de PLA (17.04.15)</p> <p>Temp. Impresión: 185° C Tipo de relleno: honeycomb Densidad relleno: 10% Tiempo impresión: 0:12:22 Peso probeta: 2,011 g</p>	Impresión correcta.	<input checked="" type="checkbox"/>
F	<p>Filamento nº 2, de 31 g de PLA (17.04.15)</p> <p>Temp. Impresión: 185° C Tipo de relleno: honeycomb Densidad relleno: 10% Peso probeta: 1,647 g</p>	Impresión correcta.	

Tabla 14: Resultados de la impresión probetas de flexión.

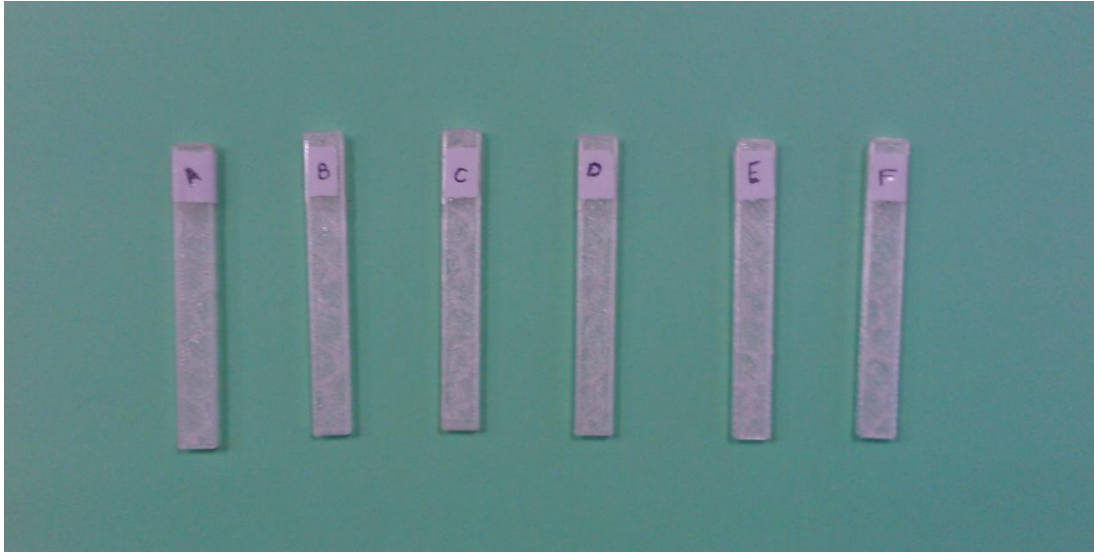


Figura 4.2.3.: Probetas de flexión de PLA al 10% de relleno.

Además de las probetas antes comentadas, se imprimieron dos probetas más, esta vez al 20% de densidad de relleno, para estudiar su resistencia cuando se aumentaba esta condición. Los demás parámetros (temperatura, velocidad, etc.) permanecerán constantes.

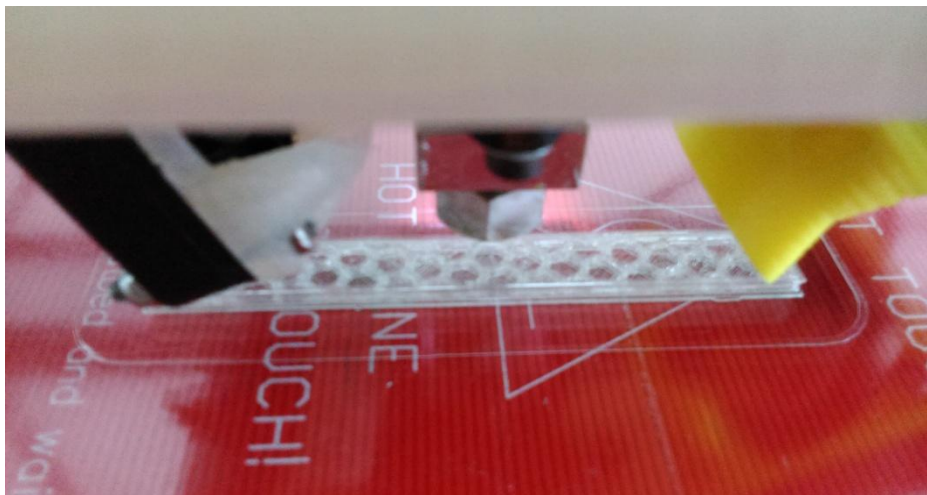


Figura 4.2.4.: Detalle de la impresión de probeta para ensayo a flexión al 20% de relleno.

PROBETA	PARÁMETROS DE IMPRESIÓN	OBSERVACIONES	USO
20% 1	Filamento nº 5, de 32 g de PLA (17.04.15) Temp. Impresión: 185° C Tipo de relleno: honeycomb Densidad relleno: 20% Tiempo impresión: 0:13:21 Peso probeta: 2,115 g	Impresión correcta.	<input checked="" type="checkbox"/>
20% 2	Filamento nº 5, de 32 g de PLA (17.04.15) Temp. Impresión: 185° C Tipo de relleno: honeycomb Densidad relleno: 20% Tiempo impresión: 0:13:21 Peso probeta: 2,256 g	Impresión correcta.	<input checked="" type="checkbox"/>

Tabla 15: Resultados de la impresión probetas de flexión.

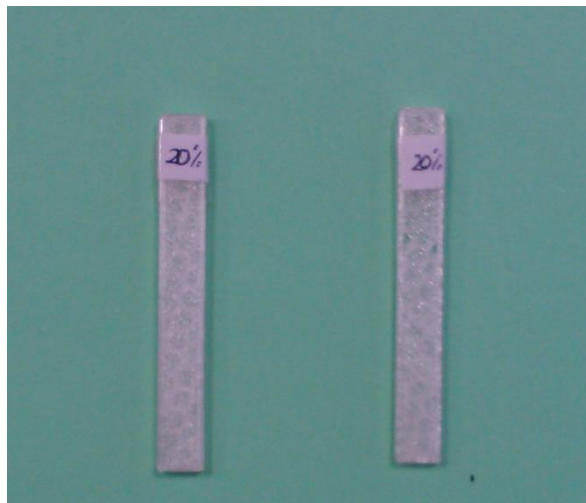


Figura 4.2.5.: Probetas de flexión de PLA al 20%.

De esta forma, ya tenemos las probetas de PLA que emplearemos en la caracterización de propiedades mecánicas de flexión. Se usarán aquellas cuya impresión haya sido correcta y no presenten tramos sin materiales y otras deficiencias, para obtener una muestra representativa (se muestra en tabla).

5. Ensayos de probetas

Las probetas que hemos diseñado y conformado a partir de la tecnología de impresión 3D se van a caracterizar a partir de ensayos mecánicos. Los ensayos mecánicos de materiales, son ensayos esenciales que nos permiten conocer propiedades mecánicas como Tensión de Rotura, Límite Elástico, Alargamiento, Estricción, Dureza, Resistencia al Impacto, Capacidad de doblado, 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 (leyes de comportamiento del material bajo distintas situaciones), 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, etc.; pero además también se realizan ensayos mecánicos en plásticos, cerámicos, biomateriales, materiales compuestos y termoplásticos, de los cuales nos ocupamos en este proyecto.

Todos los ensayos se deben realizar sobre muestras completas o probetas previamente preparadas, como las nuestras, y siguiendo los requerimientos y parámetros de ensayo de normas como ISO, ASTM, EN o en nuestro caso UNE (Normas Españolas).

Los ensayos son muy diversos, encontramos: Ensayos de doblado, de dureza Rockwell, Vickers o Brinell, ensayos de flexión por choque (Charpy), ensayos de rotura o fractura, ensayos de aplastamiento de tubos, de abocardado, de desgarrado o de pelado. Nosotros nos centraremos en ensayos de tracción y flexión en tres puntos.

5.1 Ensayos mecánicos en polímeros

En el caso de los polímeros, los ensayos son variados, dependiendo de la caracterización que se quiere realizar. Podemos encontrar: resistencia a la tracción, para determinar propiedades de resistencia mecánica y elongación; rasgado que nos permite evaluar la resistencia que ofrece una película polimérica para oponerse a la propagación de una fisura; punzonamiento; impactos, para determinar la resistencia al impacto de películas poliméricas a través de una carga aplicada sobre la película por un dispositivo; compresión, para determinar la resistencia y cambio de forma de materiales sometidos a una sollicitación de compresión monoaxial; dureza Shore (A y D); flexión, para determinar propiedades de resistencia al doblamiento; También ensayos que miden la adherencia, la presión hidrostática, Peeling, Sheare (geomembrana), el envejecimiento artificial y la identificación de materia prima con permeabilidad al vapor de agua (polietileno, PVC, PP, PS, PET, Policarbonato).

Nos centraremos especialmente en la caracterización de las probetas de PLA a partir de los ensayos de flexión y tracción, siguiendo las normas UNE-EN-ISO 178 y UNE-EN-ISO 527:2012 respectivamente.



Figura 5.1.1.: Ensayos de polímero a flexión.
[14]

5.2 Ensayo a Flexión

Los ensayos a flexión son un determinado tipo de ensayos que poseen un gran interés tecnológico, pues permiten conocer la respuesta del material en condiciones de flexión. Se emplean además para distintos tipos de materiales, aunque nos centraremos en los materiales poliméricos como el PLA. Se emplea este tipo de ensayos cuando el ensayo a tracción no es directamente aplicable, o bien porque se desea determinar su comportamiento en modo flexión o compresión.

Los ensayos son realizados por la máquina Autograph Shimadzu [75], (Ver “Figura 5.2.2”), aunque hay numerosas máquinas que permiten este tipo de ensayo. Esta máquina permite aplicar una fuerza transversalmente al eje de la probeta, en un punto intermedio, provocando la flexión de la pieza, que estará apoyada sobre dos puntos del brazo inferior horizontal de la máquina.

La máquina se encuentra en el laboratorio de Ingeniería de Materiales que ésta área posee en la Escuela Superior de Ingeniería Informática.

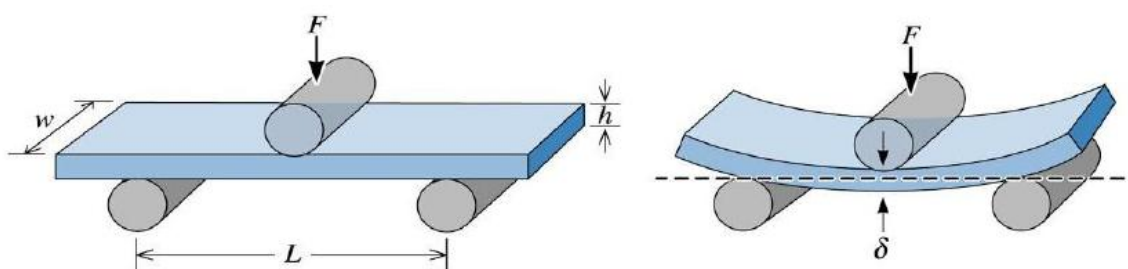


Figura 5.2.1.: Esquema de ensayo flexión en tres puntos. [14]

En el punto central de la probeta, donde vemos que se aplica la carga, la cara superior de la probeta experimenta un esfuerzo de compresión mientras la cara inferior se encuentra a tracción. La máxima tensión se encuentra en la cara inferior de la probeta, en este caso de tracción directamente bajo el punto de aplicación de la carga.

Para el cálculo de la resistencia a la flexión, el módulo de elasticidad a flexión y la deformación en flexión a partir de los valores obtenidos mediante este ensayo, se utilizó la normativa correspondiente, que es la norma UNE-EN-ISO 178:2010 [1], donde se establece que:

	Ecuación	Parámetros
Tensión de fractura en flexión (Módulo de rotura; MOR)	$MOR(MPa) = \frac{3FL}{2wh^2}$	F: Fuerza aplicada (N) L: Distancia entre soportes(mm) w: Anchura de la probeta(mm) h: Espesor de la probeta (mm)
Módulo de flexión E_{fl}	$E_{fl}(MPa) = \frac{L^3 m}{4wh^3}$	L: Distancia entre soportes(mm) m: pendiente de la curva fuerza/deflexión w: Anchura de la probeta(mm) h: Espesor de la probeta (mm)
Deformación de la flexión	$E_{fl}(\%) = \frac{6\delta h}{L^2}$	L: Distancia entre soportes(mm) δ : Deflexión/Desplazamiento (mm) h: Espesor de la probeta (mm)

Tabla 16: Ecuaciones para el ensayo a flexión. [1]

Las condiciones de ensayo que hemos empleado son las del Método A de flexión, que se basan en la aplicación de una fuerza a velocidad constante durante todo el ensayo hasta la rotura del material. La velocidad del ensayo es de 2 mm/min, con una separación entre los apoyos de 60 mm.

Solo nos queda determinar las dimensiones de la probeta, que como hemos comentado en el *Apartado 4* de la memoria, según normativa, son 80 mm x 10mm x 4 mm, y se ensayaran al menos 5 probetas para un resultado fiable con un intervalo de confianza del 95%.



Figura 5.2.2.: Máquina Autograph para los ensayos a flexión y a tracción. [75]

Para poder analizar correctamente los datos obtenidos posteriormente del ensayo de las probetas impresas a partir del filamento fabricado, vamos a ensayar también probetas impresas a partir de filamento comercial, pudiendo así realizar una comparativa entre los resultados obtenidos, conociendo si el filamento casero presenta o no mejores propiedades que el convencional.

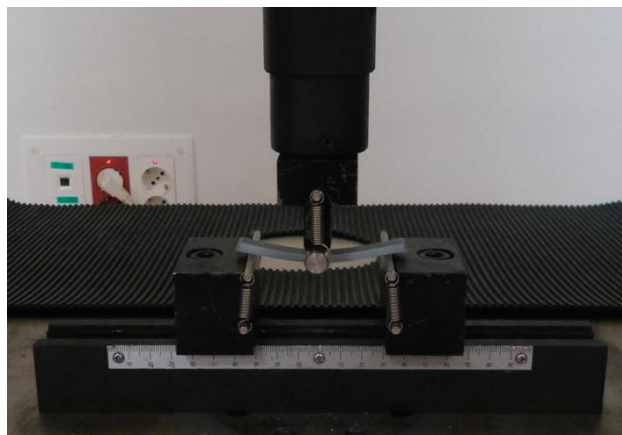


Figura 5.2.3.: Detalle de ensayo a flexión de las probetas.

5.3 Ensayo a Tracción

El ensayo a tracción es la forma básica de obtener información sobre el comportamiento mecánico de los materiales. Mediante la máquina de ensayos se deforma la probeta a estudiar, aplicando una fuerza uniaxialmente en el sentido del eje de esta. A medida que se va deformando la probeta, se va registrando la fuerza, llegando generalmente hasta la rotura de la pieza. Así pues, el resultado inmediato es una curva de carga frente a alargamiento, obteniendo con ello información relevante para nuestro estudio.

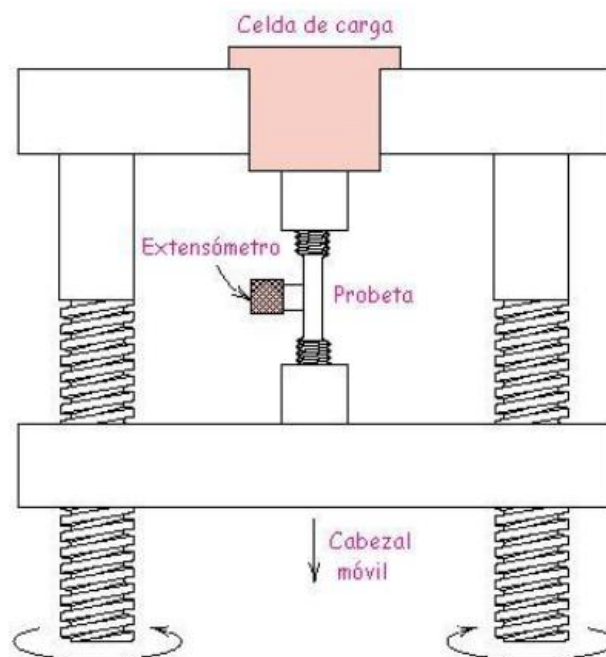


Figura 5.3.1.: Esquema de ensayo a tracción. [13]

Las condiciones de ensayo están establecidas también por normativa, conforme a la Norma UNE-EN-ISO 527:2012. “Plásticos. Determinación de los propiedades de Tracción” [2] Además refleja la velocidad de ensayo, que será de 2 mm/min de manera constante hasta el punto de rotura de la pieza y también establece que:

	Ecuación	Parámetros
Lo	Longitud de referencia en mm	
e	Ancho en mm	
h	Espesor en mm	
L	Longitud de la probeta en mm	
A	Sección transversal ($b * h$) en mm	
Esfuerzo	$\sigma(MPa) = \frac{F}{A}$	F: Fuerza/Carga aplicada (N) A: Sección transversal (mm ²)
Deformación (en el extensómetro)	$\varepsilon = \frac{\Delta Lo}{Lo}$	Lo: Longitud separada (mm)
Método A para Módulo Elástico	$\varepsilon t = \frac{Lt}{L}$	εt : Deformación nominal Lo: Distancia entre mordazas (mm) Lt: Incremento de la distancia entre mordazas (mm)
Método B para Módulo Elástico	$\varepsilon t = \frac{\sigma 2 - \sigma 1}{\varepsilon 2 - \varepsilon 1}$	$\sigma 1$: Esfuerzo (MPa) medido cuando $\varepsilon 1=0,005\%$ $\sigma 2$: Esfuerzo (MPa) medido cuando $\varepsilon 2=0,0025\%$
Pendiente de la recta de regresión	$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$	Pendiente de la recta de regresión ajustada por mínimos cuadrados a la parte de la curva σ/ε en $0,0005 \leq \varepsilon \leq 0,00025$

Tabla 17: Ecuaciones para el ensayo a Tracción. [2]

También en la normativa se recogen las dimensiones que deben tener las probetas, que ya se han comentado en el *Apartado 4* de la presente memoria. Para poder analizar correctamente los datos obtenidos a posteriori del ensayo de las probetas impresas a partir del filamento fabricado, y como en el caso de ensayo a flexión, vamos a ensayar también probetas impresas a partir de filamento comercial, pudiendo así realizar una comparativa entre los resultados obtenidos.



Figura 5.3.2.: Detalle del ensayo a tracción de las probetas.

El filamento comercial que emplearemos para obtener probetas tanto de flexión como de tracción, será filamento de PLA de la marca comercial ColorFabb. Las especificaciones de dicho filamento son [49]:

- _Color: Shining Silver (Plateado)
- _ Diámetro del filamento: 1,75 mm ($\pm 0,05$ mm)
- _ Precio de mercado: 35, 95€

Con este filamento obtendremos probetas de impresión 3D para comparar sus características mecánicas con las del filamento de fabricación propia.

Las probetas de PLA comercial fueron impresas en la tienda de diseño y servicio de impresión 3D “Manzanas y 3D” que se encuentra en la Calle Robayna, en Santa Cruz de Tenerife. La máquina que se empleó para su impresión fue una impresora comercial, la MakerBot Replicator 2 [53].

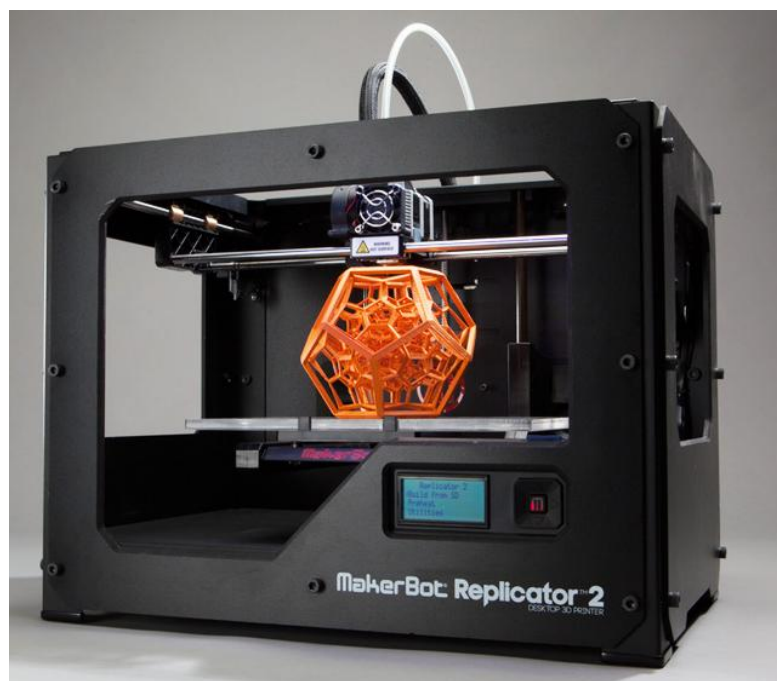


Figura 5.3.3.: Impresora MakerBot Replicator 2. [53]

6. Análisis y resultados

6.1 Ensayo a Flexión

Ensayamos a flexión las probetas de PLA, tanto las impresas con filamento comercial, como con filamento fabricado a partir de Filabot Original™. Vamos a ensayar tanto las probetas con patrón de relleno de honey comb, como las rectangulares, para comprobar cómo afecta la disposición del filamento en las propiedades mecánicas de la probeta.

PLA Comercial Flexión		RECTANGULAR						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Valor Medio	Desviación	
Carga max.(N)	95,19	93,77	94,09	99,11	90,70	94,57	3,03	
Alarg max.(mm)	9,39	8,36	11,23	9,12	12,04	10,03	1,54	
MOR(Mpa)	53,81	55,48	52,93	54,65	50,51	53,48	1,91	
Efl(Mpa)	1705,92	1886,66	1692,73	1705,02	1610,90	1720,25	101,05	
efl (%)	6,25	5,43	7,48	6,14	8,07	6,67	1,07	
m(N/mm)	20,07	20,73	20,06	20,82	19,38	20,21	0,58	

Tabla 18: Valores obtenidos tras el estudio de flexión en probetas de PLA comercial con relleno rectangular.

PLA Fabricado Flexión		HONEY COMB						
	Muestra A	Muestra B	Muestra C	Muestra D	Muestra E	Valor Medio	Desviación	
Carga max.(N)	100,03	48,52	81,09	88,28	73,16	78,22	19,32	
Alarg max.(mm)	7,63	5,24	9,78	7,60	7,90	7,63	1,61	
MOR(Mpa)	57,99	31,38	54,48	59,31	42,63	49,16	11,92	
Efl(Mpa)	1610,03	1517,14	1676,35	1909,52	1351,64	1612,94	205,82	
efl (%)	5,01	3,26	5,97	4,64	5,18	4,81	0,99	
m(N/mm)	18,24	14,58	15,22	17,34	15,19	16,11	1,58	

Tabla 19: Valores obtenidos tras el estudio de flexión en probetas de PLA comercial con relleno honey comb.

PLA Comercial Flexión	HONEY COMB						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Valor Medio	Desviación
Carga max.(N)	119,13	110,30	118,14	108,17	117,86	114,72	5,09
Alarg max.(mm)	6,69	8,30	6,28	6,36	6,38	6,80	0,85
MOR(Mpa)	64,41	58,20	66,45	61,77	65,31	63,23	3,30
Efl(Mpa)	2062,69	1646,71	2391,69	2312,47	2027,14	2088,14	292,27
efl (%)	4,55	5,71	4,18	4,21	4,29	4,59	0,64
m(N/mm)	25,94	21,48	28,35	26,80	24,57	25,43	2,60

Tabla 20: Valores obtenidos tras el estudio de flexión en probetas de PLA fabricado con relleno honey comb.

Como indica la Norma UNE-EN-ISO 178:2010, los ensayos de flexión se realizan sobre 5 probetas fabricadas en las mismas condiciones, y en la misma serie y con el mismo filamento, para poder obtener después un valor promedio que tenga representatividad estadística. Además se presenta la desviación estándar de cada uno de los parámetros calculados (Carga, alargamiento, Módulo de rotura, Módulo de flexión...) obtenida mediante la *Fórmula 6.1.1*. Esta medida de dispersión la empleamos para conocer cuánto tienden a alejarse los valores concretos del promedio. Cada uno de los valores de las desviaciones estándar hace referencia al valor medio total calculado y presentados también en las tablas antes mostradas.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (\text{Fórmula 6.1.1.})$$

A continuación vemos de forma más gráfica los datos que hemos obtenido para realizar la comparación entre los 3 tipos de probeta que hemos ensayado, donde el eje Y representa los valores del módulo de rotura en MPa.

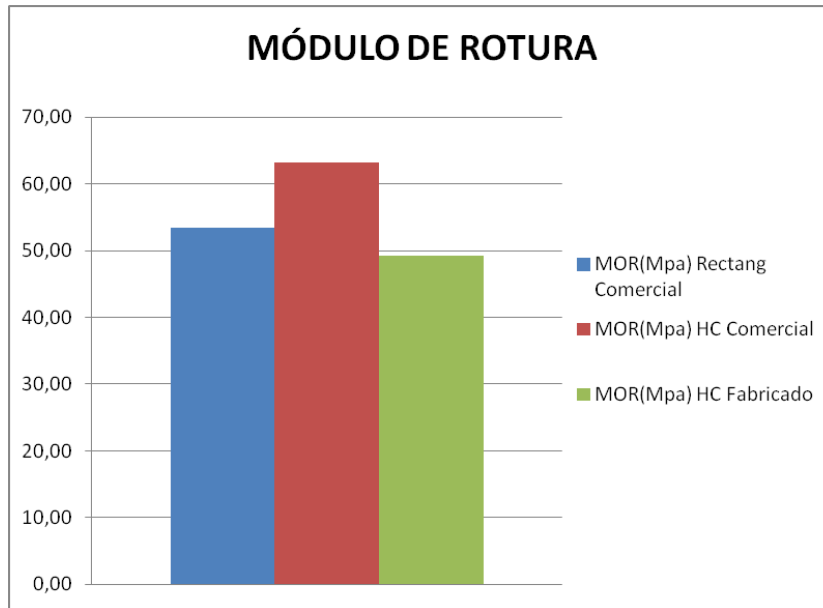


Gráfico 1: Comparativa del módulo de rotura de las probetas ensayadas a flexión.

Si observamos la gráfica, comprobamos que la media del módulo de rotura, es decir, la tensión máxima que es capaz de soportar la probeta antes de producirse el fallo, es mayor en el caso de las probetas con filamento comercial y con patrón de relleno tipo honey comb, con respecto al resto de las probetas ensayadas. Esto se debe a que el patrón de relleno honey comb está mejor distribuido en el interior de la probeta, lo cual hace que el filamento abarque mayor superficie y haga posible una mejor distribución de cargas que el patrón rectangular. Si comparamos las probetas con diseño honey comb de filamento comercial con las honey comb de filamento fabricado haciendo uso de nuestra extrusora Filabot Original™, vemos como estas últimas soportan menos tensión de rotura. Esto se debe a los problemas que hubo en la impresión de las probetas, ya que se imprimen algunas partes que quedaron algo desprovistas de material de deposición por la variación del valor diametral del filamento, produciéndose así una impresión poco regular, también depende del tipo de impresora con la que se obtuvieron las probetas etc.

Todos estos factores pueden influir en el resultado mecánico de las probetas, es por ello por lo que se tiene una diferencia de aproximadamente 14,06 MPa de tensión de rotura entre el filamento comercial y el filamento fabricado con la extrusora a partir de pellets comerciales.

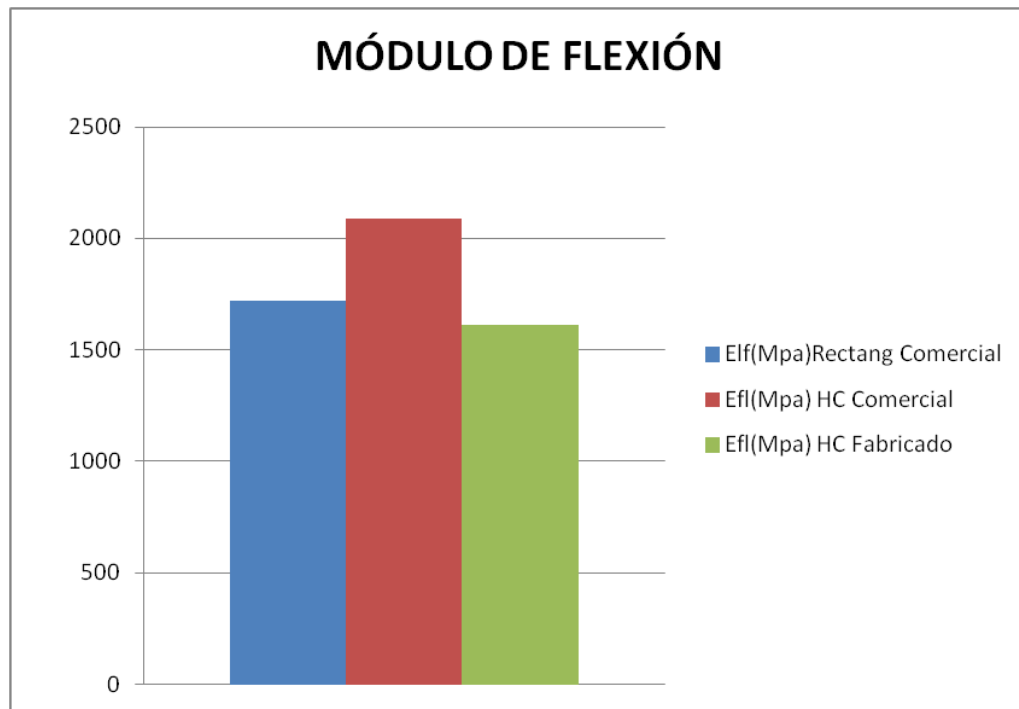


Gráfico 2: Comparativa del módulo de flexión de las probetas ensayadas a flexión.

Al igual en el módulo de rotura, observamos que existe una clara diferencia entre el módulo de flexión entre las probetas diseñadas con relleno rectangular y las diseñadas con relleno honey comb. La flexión que soporta la probeta es mayor si esta tiene relleno en panal de abeja y además si su impresión es realizada con filamento comercial, pues vemos como existe una diferencia notoria de 754,21 MPa de flexión entre filamento comercial y filamento a partir de pellets; el motivo es el mismo explicado anteriormente.

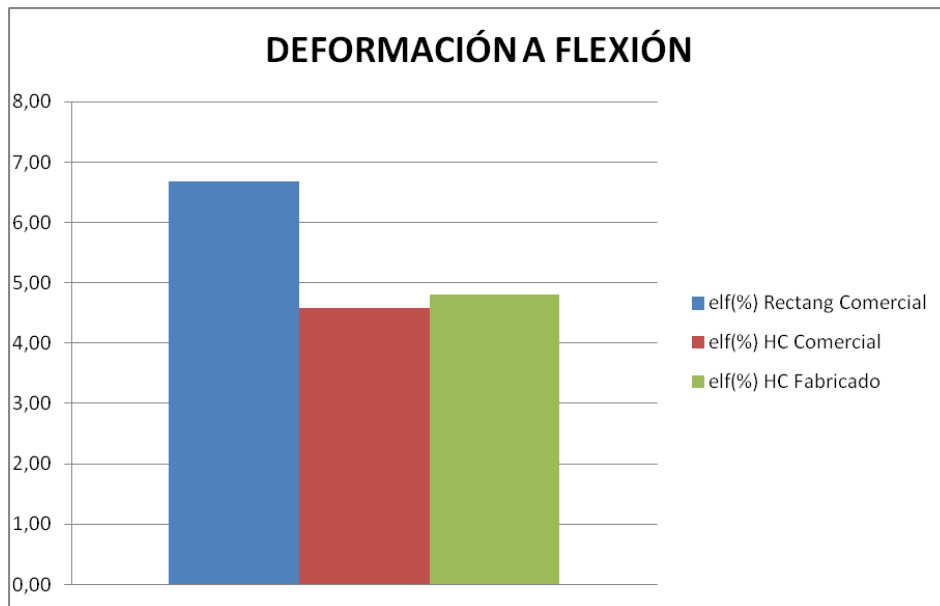


Gráfico 3: Comparativa de la deformación a flexión de las probetas ensayadas.

Comentamos por último que la deformación a flexión es menor cuando se trata de probetas con relleno honey comb impresas con filamento comercial, tal y como era de esperar analizando los resultados anteriores de módulo de rotura y módulo de flexión, ya que las probetas antes comentadas son más resistentes y por ello menos deformables.

6.2 Ensayo a Tracción

Del mismo modo que ensayamos las probetas a flexión, ensayamos a tracción las probetas de PLA; las impresas con filamento comercial y las de filamento fabricado en este proyecto, para comprobar cómo afecta la disposición del filamento en las propiedades mecánicas de la probeta cuando trabaja a tracción. Recordemos que estas probetas se han impreso solo con patrón de relleno tipo rectangular, pues por las condiciones dimensionales de la probeta, el diseño tipo honey comb no era válido.

PLA Comercial Tracción	RECTANGULAR					Valor Medio	Desviación
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5		
Largo (mm)	170	170	170	170	170	170	
Ancho (mm)	10,26	10,2	10,18	10,12	10,15	10,18	0,05
Espesor (mm)	3,92	3,97	4	4,05	3,96	3,98	0,05
Area (mm ²)	40,22	40,49	40,72	40,99	40,19	40,52	0,34
Lo (mm)	50	50	50	50	50	50	
Esfuerzo (Mpa)	22,2	22,97	24,23	23,51	23,95	23,37	0,81
Deformación Ext. (%)	0,015	0,017	0,022	0,017	0,021	0,018	0,003
Mód. Elástico	1689,4	1569,8	1555,4	1571,5	1447	1566,62	85,94
Resistencia a tracción (MPa)	22,21	22,97	24,23	23,51	23,96	23,38	0,81

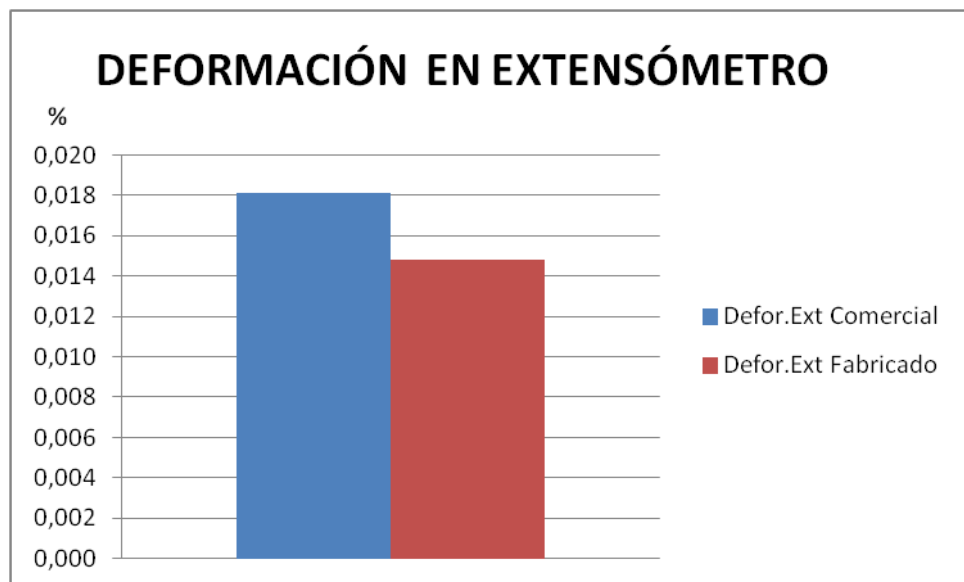
Tabla 21: Valores obtenidos tras el ensayo a tracción de probetas con filamento comercial.

PLA Fabricado Tracción	RECTANGULAR					Valor Medio	Desviación
	Muestra A	Muestra C	Muestra D	Muestra F	Muestra G		
Largo (mm)	170	170	170	170	170	170	
Ancho (mm)	10,26	10,35	10,67	10,49	10,23	10,4	0,18
Espesor (mm)	3,88	3,87	3,7	3,78	3,6	3,77	0,12
Area (mm ²)	39,81	40,05	39,48	39,65	36,83	39,16	1,32
Lo (mm)	50	50	50	50	50	50	
Esfuerzo (Mpa)	16,36	20,81	23,85	19,43	18,61	19,81	2,78
Deformación Ext. (%)	0,018	0,014	0,017	0,012	0,014	0,015	0,002
Mód. Elástico	1112,2	1507,5	1556,6	1549	1356,1	1416,3	188,22
Resistencia a tracción (MPa)	16,37	20,82	23,85	19,44	18,62	19,82	2,77

Tabla 22: Valores obtenidos tras ensayo a tracción de probetas con filamento generado en extrusora.

Como indica Norma UNE-EN-ISO 527:2012, los ensayos de tracción se realizan sobre series de 5 probetas fabricadas en las mismas condiciones, y con el mismo filamento, para poder obtener después un valor promedio de los parámetros obtenidos que tenga representatividad estadística. Además se presenta la desviación estándar obtenida mediante la *Fórmula 6.1.1* señalada anteriormente.

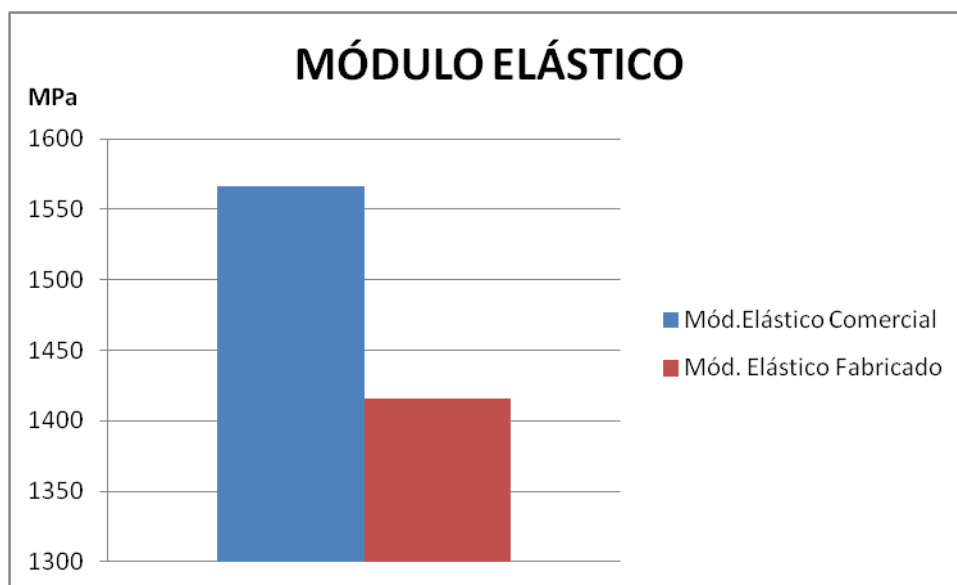
Vemos de forma más gráfica los datos que hemos obtenido para realizar la comparativa entre los dos tipos de filamento empleados.



Gráfica 4: Comparativa de la deformación del extensómetro de los dos filamentos.

Como vemos en la gráfica, la deformación del extensómetro, es decir, entre la longitud de referencia al centro de la probeta, es mayor en el caso de probetas impresas con filamento comercial, aunque no es un valor muy significativo, tan solo 0,018 %, lo cual nos indica que el filamento comercial soporta mayor alargamiento antes de romperse que el filamento fabricado a partir de pellets en la extrusora.

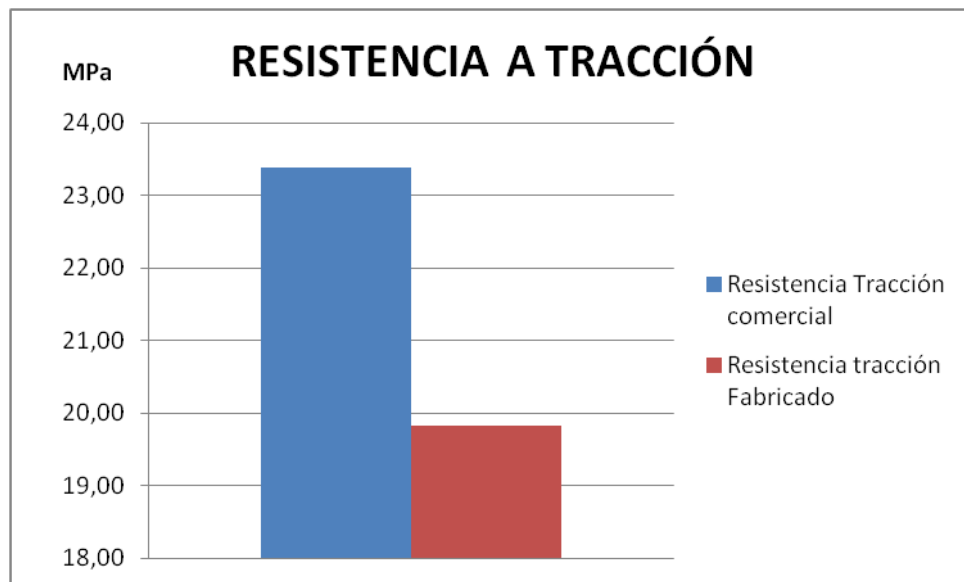
Esto nos indica que las probetas impresas con filamento fabricado por nosotros son más frágiles que las de filamento comercial, puesto que al aplicarle la fuerza de tracción se rompe fácilmente sin apenas deformarse. Esto puede estar motivado por las condiciones de impresión del material, cuando el filamento fluctuaba en valor dimensional, las capas de impresión no eran regulares en algunos puntos de la probeta, lo cual hace posible el hecho de que no se produzca una gran deformación antes de la rotura. También puede ser debido a que la probeta fabricada con filamento no comercial sino fabricado con nuestra extrusora, proviene del ablandamiento de los pellets de PLA para su deformación posterior en hilos, de manera que dicho material (fabricación en pellets + estirado en hilo) ha sido sometido a un ciclo térmico más que el hilo comercial (fabricación en hilos).



Gráfica 5: Comparativa del módulo de elasticidad de las probetas sometidas a tracción.

El módulo de elasticidad nos indica la relación entre la tensión aplicada a la probeta y la deformación que sufre, lo cual nos permite conocer cuál es la rigidez del material. Como vemos en la gráfica, las probetas impresas con filamento comercial son más rígidas que las impresas con el filamento generado en el proyecto, puesto que su módulo elástico es mayor.

Existe una gran diferencia entre la rigidez de ambos, aproximadamente 150 MPa; esto, al igual que en las comparativas anteriores, acontece entre otras cosas, tanto por los fallos de impresión que se hayan podido producir, como por las causas antes mencionadas que tienen que ver con el número de ciclos térmicos a los que el material haya sido sometido.



Gráfica 6: Comparativa de la resistencia a tracción de las probetas sometidas a tracción.

La resistencia a tracción representa la carga máxima que hay que aplicar para que se produzca rotura en las probetas ensayadas, debido a un esfuerzo de tracción. Se observan tanto en las *Tablas 21 y 22*, como en el *Gráfico 6*, que las probetas con PLA comercial, impresas también en impresora comercial, soportan un esfuerzo a tracción superior frente a las probetas de tracción con PLA conformado tras la extrusión de pellets. Las probetas comerciales soportan un esfuerzo de casi 23,4 MPa antes de producirse la rotura, mientras que las de PLA fabricado, sólo soportan 19,82 MPa de media. Esto, como hemos explicado en los parámetros anteriores comparados, se puede deber a los fallos de impresión o el ciclo térmico sufrido por el PLA en pellets.

En el *Anexo 4* se describen con más detenimiento todos los ensayos realizados, con los parámetros obtenidos para cada una de las muestras junto con las gráficas de propiedades mecánicas, de cara a una mejor explicación y comprensión de los resultados comentados en este apartado.

7. Diagnóstico de fallos y mantenimiento

Durante el proceso de fabricación de filamentos para impresora 3D a partir de materiales reciclados se produjeron una serie de fallos que a continuación exponemos, llevándose a cabo un análisis de las causas que los provocaron a partir de la observación de sus signos característicos y explicando la solución que se tomó.

A partir de un árbol de fallos del filamento podremos determinar las distintas causas que producen este hecho y proponer medidas correctoras.

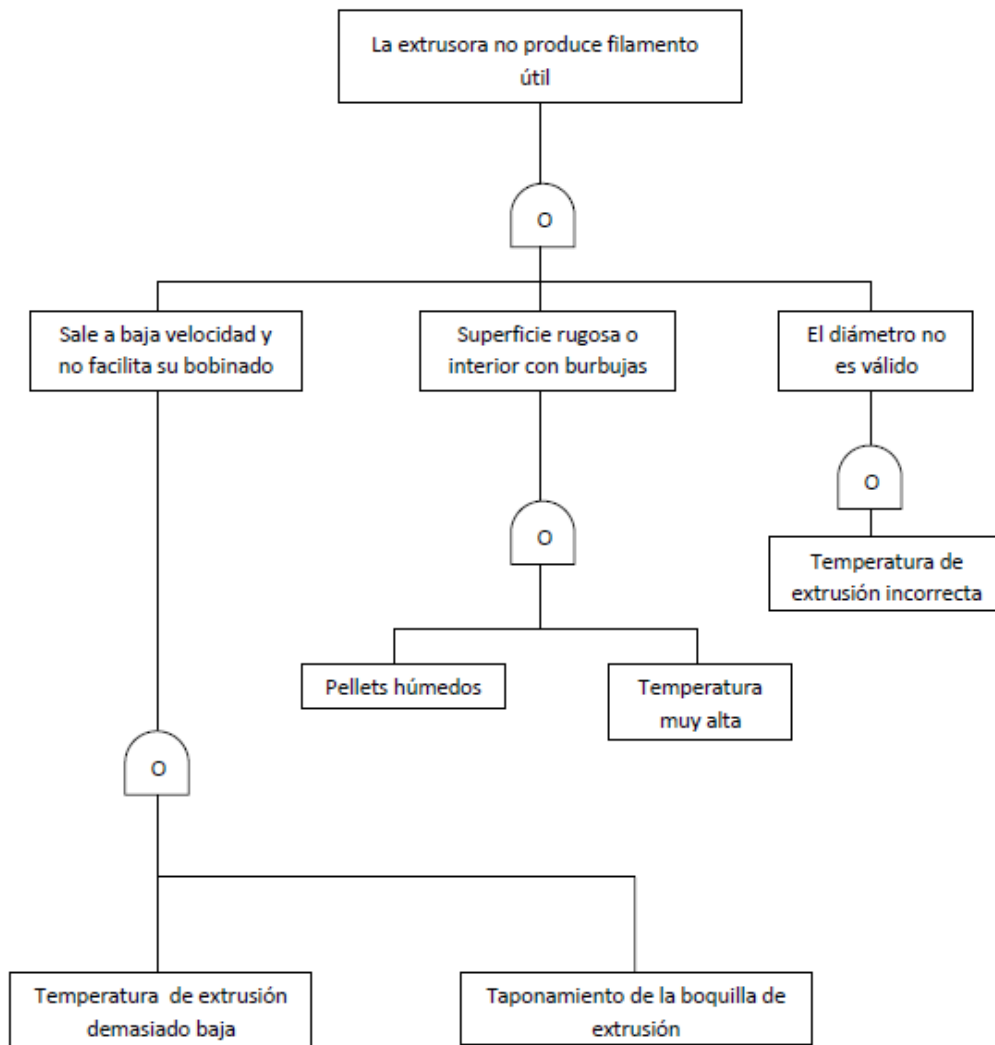


Figura 7.1.: Árbol de fallos para la extrusión de filamento no útil.

7.1 Fallos dimensionales en el filamento obtenido a partir del uso de la extrusora

Durante el proceso de extrusión, muchos de los filamentos elaborados se calificaron como inadecuados para el proceso de impresión posterior. Esto fue debido a que no cumplían con alguno de los requerimientos exigidos; a continuación se exponen los fallos potenciales que motivaron este hecho y el diagnóstico que se efectuó.

Los estrictos requerimientos dimensionales del filamento que se fabrican dependen casi exclusivamente de los mismos requerimientos de la impresora que se iba a emplear para la elaboración de las probetas; esta impresora RepRap posee un extrusor de impresión con un dado de 3 mm de diámetro, por lo tanto, el filamento empleado en dicha impresión tendría que tener este mismo valor dimensional. Así se empleó la boquilla de 3 mm que posee Filabot Original™, aunque hay que tener en cuenta que al ser un proceso manual es muy difícil mantener ese valor exacto. Aun así, se permite un rango dimensional para el diámetro del filamento fabricado comprendido entre 2,75 mm y 2,9 mm, valores tolerables para la impresora.

7.1.1 Diámetro muy fino del filamento.

Durante la extrusión de filamento de PLA se empleó la boquilla de 3 mm de espesor, y una temperatura inicial de 180° C (la máxima temperatura de extrusión recomendada es de 190° C para este material); al recoger el filamento en la bobina, se observaban dos cosas, la primera es que el filamento que salía del extremo de la extrusora, salía con una sección menor a la requerida, y la segunda es que en el tramo que separaba la extrusora de la bobina, el filamento pandeaba, lo cual producía aun más reducciones en el diámetro del filamento.

Por lo tanto, se tomaron las siguientes soluciones: Disminuimos la temperatura de consigna, tal y como recomendaban desde el manual de instrucciones de Filabot Original™ para aumentar el valor del diámetro del filamento. Y además de disminuir el valor de la temperatura (hasta 170° C), acercábamos lo más posible la bobina al extremo de la extrusora,

colocando un ventilador de pequeño tamaño y de 12V, justo en la parte inferior del tramo, para que la refrigeración a la salida ayudara a mantener el diámetro del filamento (enfría y solidifica el filamento justo a la salida de la extrusora).

Sin embargo, la ayuda puntual de refrigeración con el ventilador de 12V, hacia que el filamento saliera con un diámetro superior al rango definido como válido, generando así un problema en distintas secciones del filamento, ya que un valor mayor a 2,9 mm podría producir una obstrucción en el extrusor de la impresora. En el siguiente apartado abordaremos con más detalle este tipo de fallo.

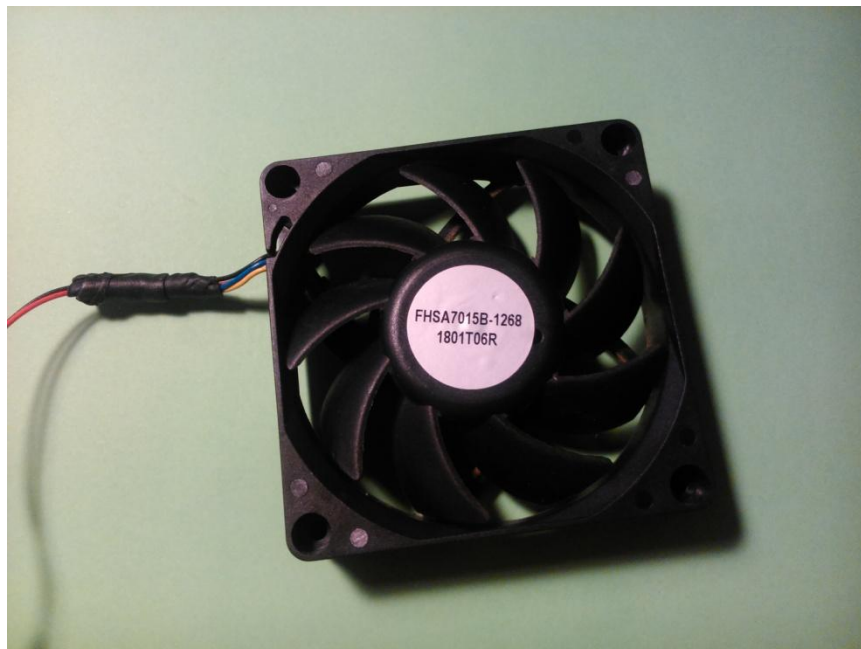


Figura 7.1.1.1.: Ventilador de 12V empleado en la refrigeración del filamento extruido.

7.1.2 Diámetro muy grueso del filamento.

En otros casos, acontecía que el diámetro del filamento era mayor en algunas secciones de la bobina, 3,1 mm ó 3,5 mm, esto puede deberse a que la temperatura de extrusión es muy baja para el diámetro que se quiere conseguir o que la refrigeración externa que se hace del filamento es muy crítica.

Para solucionarlo y obtener una bobina de filamento dentro de los parámetros establecidos a priori como correctos (2,75 mm – 2,9 mm), se aumentó la temperatura de consigna hasta 175° C.

7.1.3 Irregularidades en la superficie del filamento.

El filamento que se emplea en la impresora RepRap disponible para el proyecto, al igual que cualquier otra impresora que encontremos en el mercado, tiene que presentar una superficie lisa, sin irregularidades, para no provocar saltos en la impresión que produzcan zonas desprovistas de material u obstrucciones en el dado de extrusión de la impresora.

Al inicio del proceso de producción de filamento, el producto obtenido presentaba numerosas irregularidades debidas a la forma de recogerlo en la bobina. El filamento se iba enrollando tal cual salía de la extrusora, pegándose entre sí a medida que se completaban vueltas de carrete, esta disposición de uso, unida a que el filamento se iba enfriando a medida que giraba el carrete, hacía que al desenrollarse la bobina, el filamento presentara marcas de unión entre distintas zonas.

Este hecho se corrigió añadiendo un ventilador tipo suelo/mesa de 50V justo detrás de la bobina, de manera que fuera refrigerando el filamento a medida que se bobinaba. Es un ventilador de mayores dimensiones que el usado en el caso anterior (Ver “Apartado 7.1.1”) de

manera que refrigera el filamento de forma menos directa que el de 12V, a medida que el producto de la extrusora se va recogiendo en la bobina. Además, se dispuso el filamento ordenado y enfriado, completando de esa manera la bobina, enrollando el filamento de un extremo a otro, para evitar la posibilidad de que se adhirieran entre sí. Una vez completada una capa de bobina, se detiene la extrusión y se reserva el filamento hasta que esté perfectamente solidificado y refrigerado.

7.2 Fallos en la extrusión de filamento por colapso de boquilla

Durante el proceso de extrusión del filamento de PLA a 170° C, se observó que no era válido para su posterior uso en impresora.

Comenzamos estudiando la parte izquierda del árbol, comprobando que el diámetro del filamento extruido es correcto, en caso de no serlo tendríamos que variar la temperatura como hemos visto en el apartado anterior; pero el filamento tiene un diámetro comprendido entre el rango expuesto como aceptable, luego descartamos que la inoperatividad del filamento sea por cuestiones dimensionales.

Del mismo modo, observamos ahora la apariencia del filamento. La superficie es rugosa, lo cual indica que su bobinado no es el más adecuado, pero lo solucionamos tomando las medidas que hemos estudiado en el *Apartado 7.1.3*; así que queda descartado que la inutilidad del filamento sea por ese motivo.

Examinamos nuevamente el filamento y observamos en su interior pequeñas burbujas de aire, lo cual nos indica que la sección interior del filamento no parece ser regular. Como se observa en el árbol de fallos (Véase “*Figura 7.1*”) esto puede estar motivado porque los pellets que se emplean para la extrusión están húmedos.

Comprobamos el empaquetado de los pellets y está completamente seco; aun así, para asegurarnos en futuras ocasiones que esto se mantiene, procedemos a guardarlo en una localización más seca del laboratorio. Otra de las opciones causantes del burbujeo del filamento puede ser la alta temperatura, pero este hecho lo descartamos puesto que estamos trabajando a una temperatura de 170° C, y es una temperatura aceptable por el fabricante para llevar a cabo el proceso de extrusión.

Por tanto, lo único que quedaba por estudiar era la velocidad de extrusión del filamento. Esta era más baja de lo normal, lo cual provocaba problemas a la hora de recoger el filamento en la bobina. Tal y como se ve en el árbol de fallos, este hecho podría estar motivado por dos cosas: que la temperatura de operación sea demasiado baja, lo cual se descarta puesto que ha sido la temperatura empleada hasta el momento para obtener buenos resultados en la extrusión y la segunda, que haya un obstrucción en la boquilla que impide que el filamento salga con libertad.

La única forma de conocer realmente si el dado de extrusión sufre una obstrucción es desmontando el extremo de la extrusora, para ello previamente apagamos la máquina. Desarmamos la boquilla y se observa como todo el PLA está derretido en el interior de la cámara de temperatura que no fluye puesto que la boquilla tiene una gran parte de PLA solidificado en sus paredes.

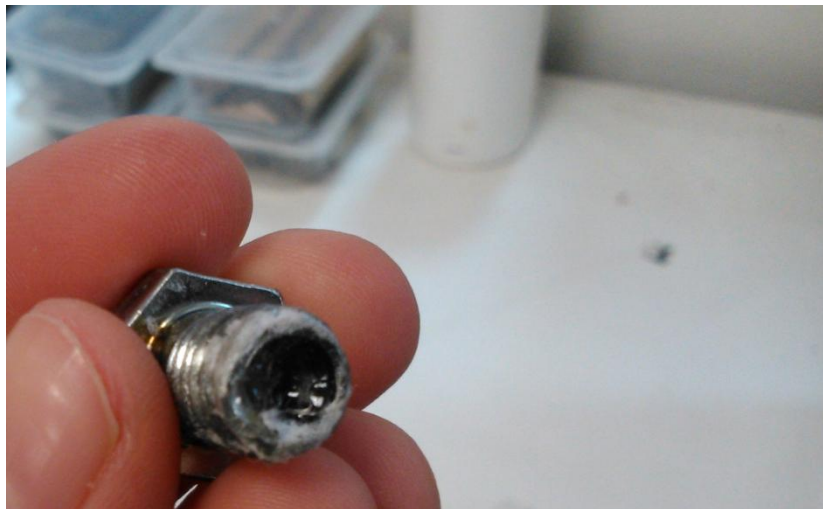


Figura 7.2.1.: Detalle de la obstrucción de la boquilla de 3 mm.

Para solucionar la extrusión de la boquilla se opta por fundir en un horno todo su contenido. Como conocemos que la temperatura de fusión del PLA está comprendida entre 150° C - 190° C (según fabricante), depositaremos la boquilla en un vaso o depósito de vidrio y lo introduciremos en una mufla a 200° C durante media hora, para que el PLA se funda y se separe de la boquilla a una temperatura suficientemente alta pero sin llegar a quemarse. El proceso durará alrededor de media hora.



Figura 7.2.2.: Interior de la mufla con la boquilla dispuesta para el precipitado de PLA.

Tras pasar los 30 minutos en la mufla y esperar posteriormente a que se enfríe, observamos como gran parte del PLA se ha depositado en el vaso de vidrio, pero aun sigue quedando restos de material taponando la boquilla. Empleamos por tanto un pequeño taladro eléctrico portátil para eliminar y limpiar los restos de PLA adheridos a las paredes internas de la boquilla y al orificio de extrusión.

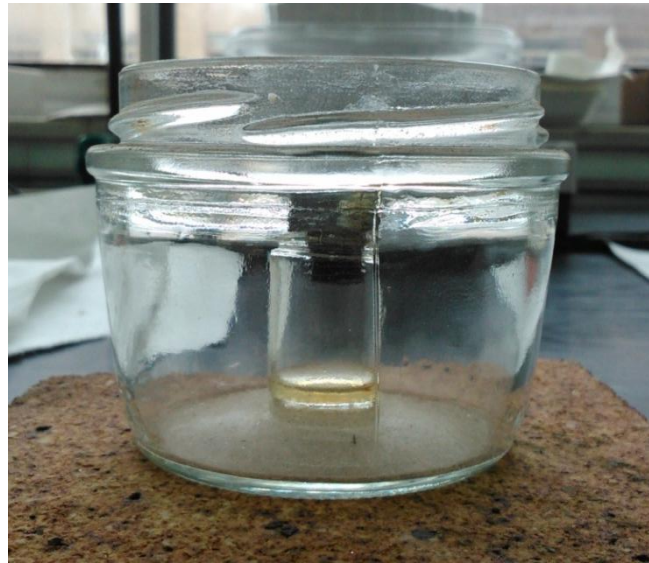


Figura 7.2.3.: Detalle del PLA separado tras el calentamiento en mufla.

Tras el proceso de mecanizado de la boquilla seguimos sin obtener una superficie interior completamente lisa, por lo tanto nos vemos en la obligación de adquirir unas nuevas boquillas. Tras realizar la compra de los tornillos (Tornillo Hexagonal M9x12), encargamos a un tornero (Taller García Ramos, Calle Volcán Vesubio, Santa Cruz de Tenerife) que nos vacíe su interior y que realice un aligeramiento en la cara exterior para su uso como dado.

Desde el manual de instrucciones de Filabot Original™ [50] exponen que el único mantenimiento de limpieza que se debe realizar a la extrusora tras su uso, es aumentar 20° o 50° C a la temperatura de extrusión para eliminar cualquier resto de material extruido alojado en el interior de la máquina. Como hemos comprobado tras este fallo, no es suficiente una operación de limpieza para la extrusora, pues pueden quedar restos de material en el interior de la boquilla. Luego se propone que tras cada operación de extrusión, la extrusora debe seguir funcionando, aunque no queden pellets en la tolva, a una temperatura superior a la de extrusión empleada, y una vez no salga más filamento, se procederá a apagar la máquina y a desmontar la boquilla del extremo de la extrusora, a fin de poder limpiarlo con una varilla

metálica, asegurándonos así de que no queda nada alojado en su interior, y también se limpiará el interior del tornillo cónico que ejerce presión sobre el material fundido. De esa manera nos aseguraremos que la extrusora está perfectamente liberada de cualquier resto de material.

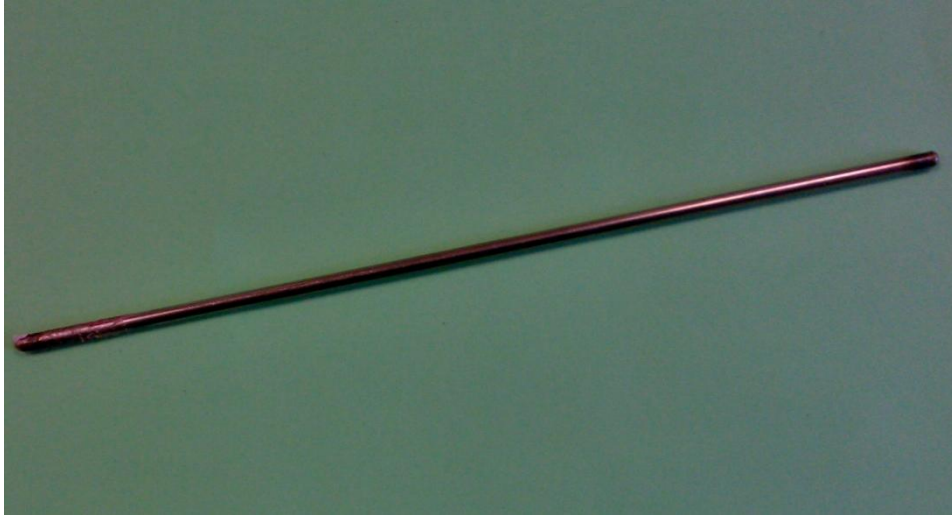


Figura 7.2.4.: Varilla metálica para limpiar el interior de la extrusora.



Figura 7.2.5.: Desmontaje del tornillo cónico para su limpieza.

Con el uso de tornillos comerciales comprados para reemplazar las boquillas de la extrusora, tomamos la precaución de llevar a cabo una serie de medidas preventivas para prolongar la vida útil de los tornillos. Conocemos que los potenciales modos de fallos de los tornillos son deformaciones, fatigas, ludimientos, daños en roscas y tuercas... A continuación exponemos las principales causas de fallos de los tornillos en un uso como el nuestro, de forma que aportamos una solución preventiva para evitar el fallo.



Figura 7.2.6.: Tornillo y arandela adquiridos para el uso en la extrusora.

MODO DE FALLO	DESCRIPCIÓN	CAUSA	SOLUCIÓN
Ludimiento en rosca	Daño superficial y formación de depósitos en rosca del tornillo.	Carga lateral elevada; Torque de apriete insuficiente; pérdida de torque en servicio.	Asegurar el buen contacto entre la superficie de alojamiento y el tornillo.
Barrido en rosca	Se tienen pérdidas de los filetes de rosca al ser arrancados de raíz.	Pocos hilos de rosca ensamblados; diferencia dimensional con tuerca; rosca de baja resistencia.	Asegurarnos de que no existan diferencias dimensionales entre tuerca y tornillo. Ajustar dimensiones.
Desgaste del perfil de la rosca	Pérdida del perfil original de los filetes de la rosca y se tienen marcas de desgaste adhesivo sobre las superficies de apriete, llegando a perderse los hilos completamente.	Diferencias dimensionales con tuerca; grado de tuerca superior al tornillo; Ensamblajes y desensambles frecuentes.	Dimensiones de la tuerca y el tornillo compatibles.
Rotura de la tuerca o desgaste de la rosca	Desgaste del perfil de la rosca o que ya no haya contacto entre tuerca y tornillo	Fuerzas de apriete descompensadas; inestabilidad entre tornillo y pieza a apretar.	Uso de arandela de contacto entre boquilla y tuerca

Tabla 23: Fallos potenciales en tornillos.

7.3 Fallos en la extrusión por incorporación de materiales

Tal y como se comentó en el *Apartado 3.1* de la memoria, el manual de uso de Filabot Original™ recomienda no utilizar mezclas de materiales para la configuración de filamento. Esta recomendación es a priori omitida puesto que la base de nuestro proyecto es conseguir fabricar filamento a partir de materiales reciclados, uniendo en un solo filamento las propiedades de materiales ventajosos y compatibles para la impresión 3D.

Durante el primer procedimiento de introducción de un material reciclado (PET) al PLA que usamos como base del filamento, se observaron fallos en el proceso de extrusión.

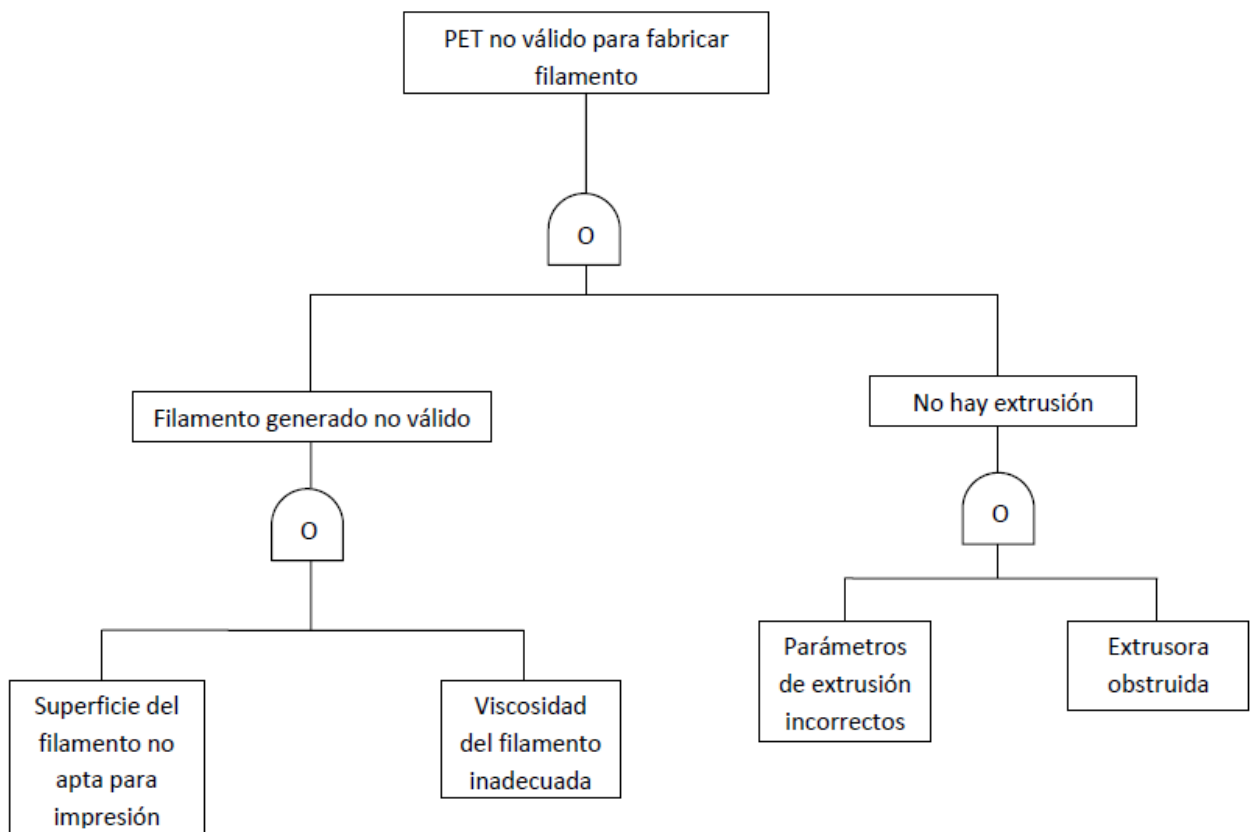


Figura 7.3.1.: Árbol de fallos para la extrusión de filamento PLA + PET.

Estos fallos fueron diversos y progresivos. Al principio, se observan problemas de fusión entre PLA y PET, lo cual provocaba que el filamento no tuviera la apariencia ni la superficie óptima para su posterior uso en impresión. Esto, tal y como se explico en el *Apartado 3.3* de la memoria, puede estar motivado por una incompatibilidad térmica de los materiales, lo cual nos hizo pensar en un paso intermedio en el proceso de reciclaje del PET antes de emplearlo como material reciclado para la fabricación de filamento.

Otro problema que aconteció en el proceso de extrusión fue la alta viscosidad del filamento cuando salía de la boca de la extrusora, con apariencia líquida y burbujeante. Esto se produce cuando se aumenta la temperatura de extrusión se aumenta y uno de los materiales no está capacitado para soportarla, en este caso el PLA, cuya temperatura máxima de fusión es 190° C (valor asignado al PLA comercial empleado en el proyecto)

Por último, se analizó la velocidad de extrusión, que empezó a ser más baja de lo normal, lo cual indica que la extrusora no está operando de forma usual, síntoma de que existe una obstrucción en la máquina. Al desmontar la boquilla y desajustar el tornillo cónico, se observaron restos de PET aun sin fundir adheridos en las paredes de los elementos, explicando así el por qué de la no extrusión de la máquina.

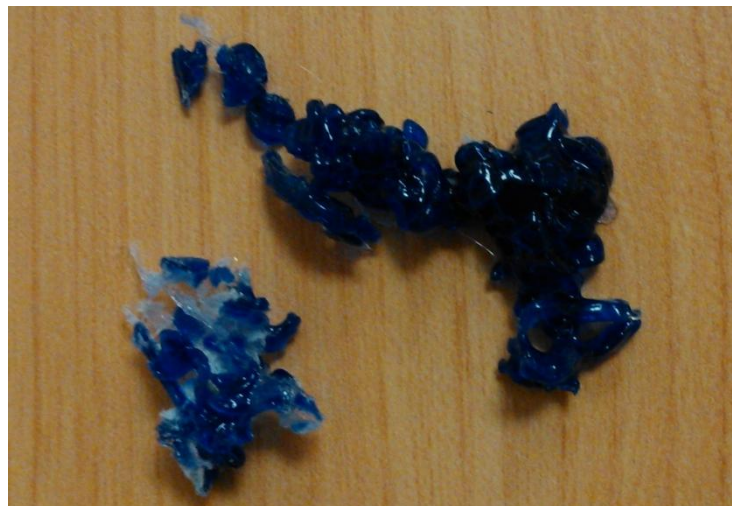


Figura 7.3.2.: Restos de PET extraídos del interior de la extrusora.

Por este motivo, se desechó la idea de introducir materiales de distinta índole en forma de pellets o escamas; sólo se podrán introducir materiales como cargas a la base del material para generar filamento cuando estos sean en forma de limaduras, de modo que su fusión e incorporación al material base sea lo más simple posible.

7.4 Fallos en la extrusión por obstrucción en el interior

Durante todo el proceso de extrusión de filamento se han observado distintos modos de fallos producidos por ciertos parámetros de extrusión, gestión del material empleado, elementos desmontables de la máquina, etc. Esos fallos los hemos podido diagnosticar y contrarrestar gracias a las propias instrucciones de Filabot Original™ y al ingenio y experiencia desarrollado a lo largo del proceso de operación con la extrusora. Sin embargo, existen problemas que pueden acontecer y que no quedan recogidos en el manual de instrucciones, que son los problemas debidos a la mala praxis de mantenimiento para con la máquina. El fallo en la extrusora que provocó no poder operar más con ella, ni terminar de estudiar los materiales reciclados propuestos como cargas en la base de PLA se produjo por el mal mantenimiento llevado a cabo en la máquina y en cuyo manual no se recoge y desde la realización del proyecto, creemos conveniente enfatizar y elaborar un protocolo.

El fallo que se produjo fue la no extrusión de filamento. Se intentaba purgar la extrusora con PLA para posteriormente generar la fabricación de filamento con carga de fibra de platanera, pero se observaba que tras más de 15 minutos de puesta en marcha de la máquina, esta no operaba. Desde el manual de instrucciones se especifica que transcurren 1 o 2 minutos hasta el inicio de la extrusión, lo cual nos hizo sospechar que algún tipo de incidencia ocurría tras pasar tantos minutos sin respuesta de la máquina.

Ante este hecho, se revisaron los árboles de fallos expuestos anteriormente (Ver” *Figura 7.3.1*”) para seguir el protocolo establecido para solucionar la fallo. Se varió la temperatura de extrusión, aumentando 50° C la temperatura establecida para fundir cualquier resto que haya podido quedar adosado en el interior de la extrusora; al no variar el resultado, se optó por

desmontar boquilla y tornillo cónico, en busca de restos de materiales solidificados, pero la boquilla y el tornillo estaban completamente limpios, lo cual nos hacía sospechar que había algún tipo de obstrucción en una parte más interna de la máquina.

Observamos el tornillo sin fin, que gira sin problema en el fondo de la tolva, donde se depositan los materiales a fundir; a pesar de seguir girando con normalidad, advertimos que la cantidad de PLA se mantiene constante trascurridos unos minutos, lo que sugiere que el tornillo sin fin no desplaza los pellets desde la tolva hasta la cámara de extrusión, es decir, existe un tapón entre el final del tornillo sin fin y la cámara de fusión, posiblemente provocado por acumulación de material en un punto de no se logra alcanzar una temperatura lo suficientemente alta como para fundirlo.

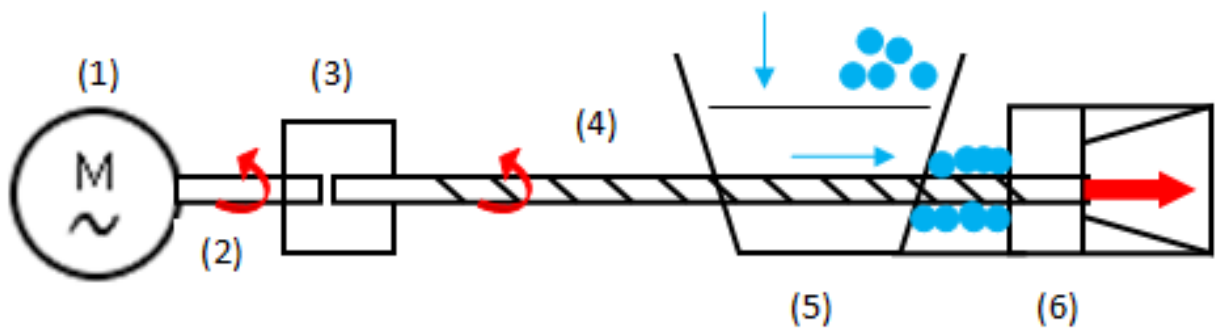


Figura 7.4.1.: Croquis descriptivo del proceso de operación de la extrusora y obstrucción antes de la cámara de fusión.

Para comprobar esta suposición se vació la tolva de la extrusora, se limpió para asegurarnos de que no quedaban restos de pellets, y se dejó un único PLA marcado con permanente. Tras iniciar la extrusión y dejar pasar unos minutos se observa como la bola de PLA sigue dando vueltas, sin ser introducida a la cámara de fusión, por lo que concluimos que existe un obstrucción justo entre el final de la tolva y la entrada a la cámara, puesto que la bola de PLA permanece en el tornillo sin fin y el final de la cámara (tornillo cónico) está limpio de material fundido.

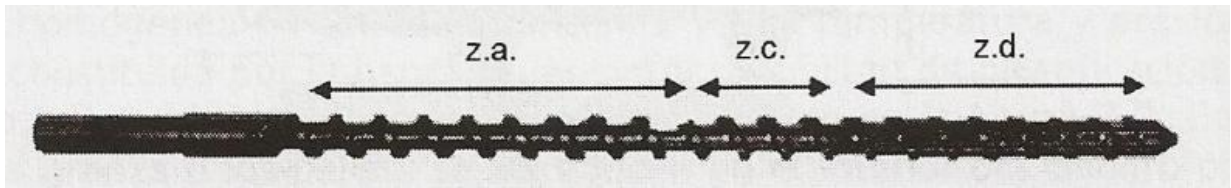


Figura 7.4.2.: Detalle del husillo de la máquina extrusora. Se distinguen 3 zonas: zona de alimentación (z.a), zona de compresión (z.c) y zona de dosificación (z.d). [13]

A partir de un croquis que muestra el funcionamiento de la extrusora (Ver “Figura 7.4.1”) observamos donde se encuentra exactamente ese punto.

MARCA	DENOMINACIÓN Y CARACTERÍSTICAS
1	Motor alterno para funcionamiento de la extrusora.
2	Eje solidario al motor.
3	Rodamiento; Une eje del motor con eje del tornillo sin fin.
4	Tornillo sin fin.
5	Tolva alimentación de la extrusora.
6	Cámara de fusión conectada al tornillo cónico.

Tabla 24: Cajetín piezas croquis.

El único modo que tenemos de asegurarnos de que la avería está motivada por lo que hemos planteado, será desmontando por completo la extrusora Filabot Original™ y conseguir llegar al punto donde se acumulan las bolitas azules alojadas alrededor del tornillo sin fin tal y como se muestra en el croquis.

Para ello se procede a apagar la máquina y a dejar que se enfríe. A partir de aquí, hacemos acopio de herramientas y procedemos al desmontaje progresivo y ordenado de la máquina.



Figura 7.4.3.: Herramientas empleadas en el desmontaje de Filabot Original™.

Una vez desajustada la carcasa de la máquina y desconectado todo el circuito eléctrico, se comienzan a desacoplar las partes que componen el circuito recogido en el croquis realizado. Quitamos la malla protectora y la fibra de vidrio que actúa como aislante térmico de la cámara de fusión, al igual que la sonda de temperatura (Ver “Figura 7.4.5”), de forma que dejamos totalmente desconectada del resto de la máquina la cámara de fusión.

Observamos cómo el interior de la cámara tiene manchas de restos de fusión de material, pero ningún resto sólido, luego se descarta que la obstrucción esté en este elemento.

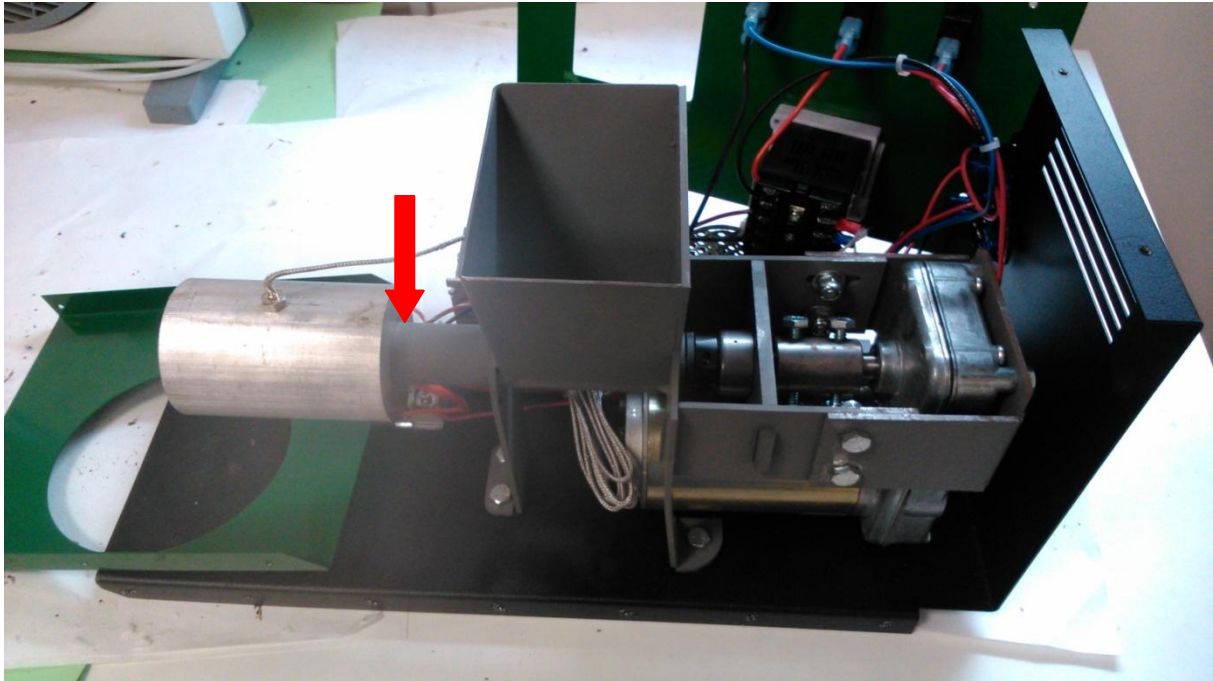


Figura 7.4.4.: Vista de la extrusora una vez se han desacoplado las carcasas. La flecha señala el punto donde creemos que se encuentra la obstrucción.

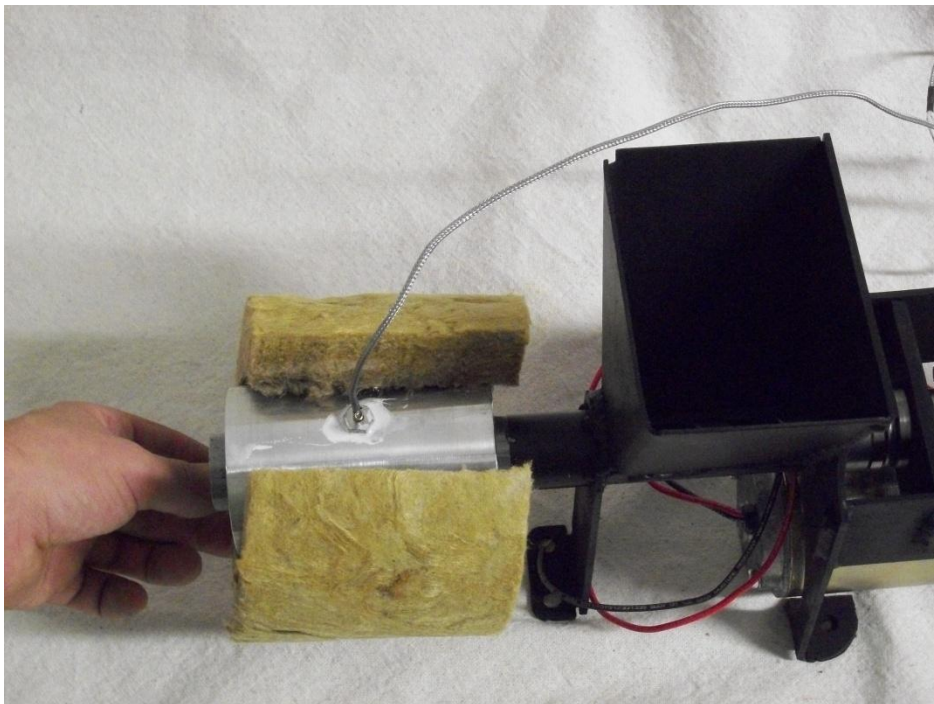


Figura 7.4.5.: Aislante térmico de la cámara de combustión y sonda de temperatura.

Como el tornillo sin fin está sujeto gracias a la actuación de un prisionero al finalizar el rodamiento, tendremos que desmontar la sujeción del eje solidario del motor al tornillo sin fin. Este proceso se dilata por la cantidad de tornillos que hay en la unión entre el motor y el tornillo sin fin.

Primero desatornillamos la unión del motor con el acople. Esta unión está formada por tornillos denominados “*cap head screw*” M6x11. El afloje del tornillo se realizará con una llave “Allen”.



Figura 7.4.6.: Cap head screw.

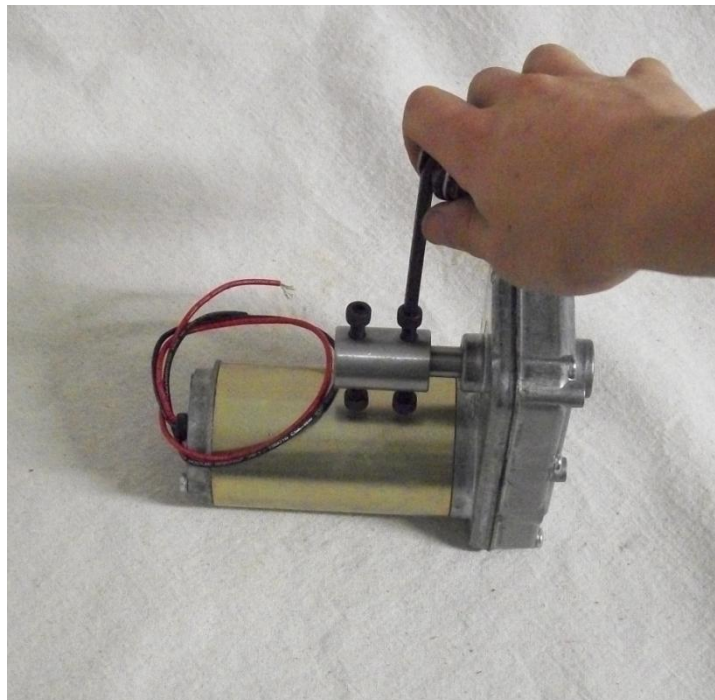


Figura 7.4.7.: Desajuste de los tornillos del acople del motor.

Tras desacoplar el eje solidario del motor y sacar el rodamiento, nos encontramos con el prisionero del tornillo sin fin. Este prisionero consta de un tornillo de difícil acceso que hace casi imposible poder quitarlo sin griparlo o romperlo tal y como está dispuesta la máquina (con la estructura soldada sin desmontar).



Figura 7.4.8.: Prisionero del tornillo sin fin de difícil acceso para su desunión.

Generamos una primera alternativa que es emplear una llave Allen, de tamaño 5/32 inch (3,97 mm), para recortar parte de su vástago y tener un mejor acceso al tornillo.



Figura 7.4.9.: Llaves Allen empleadas para intentar liberar el tornillo prisionero.

Esta opción no es del todo válida porque seguimos teniendo problemas a la hora de acceder por culpa del soporte del mecanismo, luego debemos desmontar todo el soporte para acceder de forma más cómoda al prisionero. Una vez desmontamos toda la estructura, procedemos a desatornillar el tornillo, pero este se rompe por culpa de la fuerza a la que lo hemos sometido. Una vez desmontado el prisionero, podemos sacar el tornillo sin fin del interior de la estructura y observamos como efectivamente, se encontraba alojado en él una gran capa de material solidificado que actuaba como tapón e impedía la extrusión de material. Esta capa estaba compuesta por las distintas mezclas de material efectuadas.



Figura 7.4.10.: Interior de la estructura que soporta el tornillo sin fin donde se aprecian pequeños restos de material adosado a las paredes.



Figura 7.4.11.: Prisionero del tornillo sin fin con la cabeza de tornillo rota.



Figura 7.4.12.: Muecas realizadas en la superficie de asiento del tornillo.

El exceso de material solidificado se encontraba justo en el límite de entrada de la cámara de fusión, lo cual provocaba que no entrara material desde la tolva. Que haya existido una acumulación de material en esa zona de la extrusora puede deberse a una mala distribución de la temperatura, pero se comprobó que el termopar funcionaba en perfectas condiciones.

Lo que posiblemente haya ocurrido es que al no seguir las instrucciones de uso, que recomendaba que no se mezclasen materiales, hayamos provocado dicha avería, pues el material que se colocó en la tolva para la mezcla, no se introdujo en forma de limadura, lo cual hubiera hecho más fácil su transformación, sino en escamas y pellets que dificultaban la fusión entre los materiales y provocara que se quedaran con esa forma en las paredes interiores de la extrusora.

Por tanto, concluimos que siempre que se desee mezclar materiales para fabricar filamento a partir de combinación de materiales, se podrían ignorar las recomendaciones de uso, siempre y cuando éstos materiales se introduzcan en forma de limaduras o polvos. Además, se deberá generar una limpieza exhaustiva tras la producción de filamento con cada material, para asegurarnos que en un nuevo uso, no habrá restos ni obstrucciones de la operación anterior. No solo se limpiará adoptando los consejos del manual de instrucciones, que propone un aumento de temperatura, sino que además de esto, se limpiará el interior con una varilla metálica y se procederá al desmontaje y limpieza con taladro eléctrico portátil, siempre que se sospeche de que puede haberse motivado una obstrucción, o cuando se mezclen materiales con distintos parámetros termoquímicos.



Figura 7.4.13.: Detalle de tornillo sin fin limpio tras el proceso de desmontaje y limpieza.

7.5 Protocolos de Mantenimiento para Filabot Original™

Tras el trabajo con la máquina extrusora de filamento y el estudio de todos los fallos acontecidas durante la operación con ella, hemos generado una tabla a modo de protocolo de mantenimiento que pretende servir de guía para el futuro uso de la Filabot Original™, de modo que se pueda realizar un mantenimiento preventivo de la misma, a fin de evitar los fallos que han sido reportados, estudiándose las causas potenciales de los mismos y llevando a cabo acciones que eviten o minimicen sus efectos nocivos. Y en caso de que el fallo no haya podido evitarse, establecer un posible mantenimiento correctivo que se debe aplicar.

DIAGNÓSTICO	CAUSA	SOLUCIÓN
Diámetro de filamento fino.	Alta temperatura de extrusión, distancia amplia entre extremo de la extrusora y bobina.	Disminuir la temperatura de extrusión y disminuir la distancia entre boquilla y carrete.
Diámetro de filamento grueso.	Baja temperatura de extrusión	Aumentar la temperatura de extrusión.
Irregularidades en la superficie del filamento.	Contacto del filamento cuando todavía permanece caliente y mal bobinado del mismo.	Acoplar ventilador en la parte posterior de la bobina y completar una vuelta de carrete colocando el filamento uno al lado del otro.
Extrusión lenta	Temperatura baja de extrusión. Posible obstrucción de la boquilla por material solidificado.	Aumentar la temperatura de extrusión para facilitar la salida de material. Desmontar la boquilla y limpiarla después de cada uso para evitar obstrucciones.
Burbujas en el interior del filamento	Temperatura demasiado alta de extrusión o plástico húmedo.	Conservar el plástico en un lugar seco para evitar que se humedezca. Disminuir la temperatura a parámetros de buen funcionamiento para su correcta fusión.
No se genera extrusión de filamento	Parámetros de extrusión incorrectos. Temperatura de extrusión baja. Incompatibilidad de materiales para establecer	Asegurarse de que los materiales son compatibles o disponerlos en formato de que sean concordantes entre ellos (ejemplo: limaduras)

	parámetros de temperatura.	
	Obstrucción en la boquilla (dado) de extrusión por solidificación de material en las paredes.	Aumentar la temperatura de extrusión 20° - 50° C para facilitar su fusión y tras cada operación de extrusión limpiar la boquilla con una varilla metálica, dejando las paredes totalmente limpias.
	Obstrucción en la zona previa de la cámara de fusión por acumulación de material.	Asegurarse de que se consume todo el material dispuesto en la tolva. Limpiar bien los conductos de salida y desmontar componentes para su limpieza con taladro eléctrico portátil.

Tabla 25: Tabla resumen de diagnóstico – mantenimiento de la extrusora.

Conclusiones

El estudio que hemos llevado a cabo con este trabajo de fin de grado, pretendía estudiar el grado de utilización y la caracterización del filamento obtenido a través de un equipo de extrusión de filamento para impresora 3D, a partir de material en forma de pellets y materiales reciclados, procedentes de excedentes y residuos. Tras el trabajo realizado durante estos meses, podemos llegar a una serie de conclusiones que a continuación exponemos.

- Es posible realizar filamento de buenas características con el equipo de extrusión seleccionado Filabot Original™ y adquirido para este estudio con financiación del Vicerrectorado de Calidad Institucional e Innovación Educativa (proyecto RECYFIL3D). Para ello hemos ajustado los parámetros de temperatura del proceso, tanto de extrusión como de refrigeración, hemos establecido el mejor método de recogida de filamento, y determinado el diámetro óptimo del hilo para su uso en la impresora RepRap del Laboratorio de Fabricación Digital de la Universidad de La Laguna.

- Con nuestro material extruido hemos conseguido imprimir correctamente piezas en 3D para poder realizar los ensayos mecánicos que permiten su caracterización.

- Tras la impresión de las piezas fabricadas, probetas para los ensayos de tracción y flexión, con hilo extruido, se procedió a su ensayo mecánico y se compararon los resultados con los obtenidos para piezas con el mismo diseño, pero impresas con una máquina comercial y con filamento comercial. Los resultados dictaminan mejores características mecánicas a las piezas fabricadas con filamento comercial.

- Precisamente la experimentación con mezcla de materiales y la falta de un manual de mantenimiento más específico y completo, provocó una avería en la máquina que impidió que se pudieran fabricar otros filamentos para impresión 3D, como estaba previsto: residuos de PET o PLA, fibra o viruta de plátano, residuos de vidrio...

- A partir de esta avería y de algunos fallos puntuales que se presentaron en la máquina, se ha realizado un protocolo de actuación y mantenimiento que facilitará el futuro empleo de Filabot Original™ en otras prácticas y proyectos. Dicho protocolo consta no solo de la identificación del fallo o avería, las causas y las soluciones que se pueden emplear, sino que también recoge fallos de extrusión debidos a un mal ajuste de los parámetros de operación y medidas correctivas. De este modo, y aunque no fuera objeto del proyecto, se ilustra y facilita un mejor uso y aprovechamiento de la máquina extrusora.

Con este trabajo de fin de grado, aunque al principio sólo se pretendía estudiar la parte de la tecnología de impresión 3D que se ocupa de los materiales para impresión, hemos podido ampliar nuestros conocimientos, y sobretodo nuestra experiencia, en todo lo relacionado con el proceso de conformación tridimensional. Desde la obtención y preparación de materiales a través de la trituración, hasta el proceso diseño de piezas y ajustes de impresión. Hemos desarrollado y adquirido competencias que nos permiten llevar a cabo desde el principio y hasta el final el proceso de fabricación de piezas en impresoras 3D.

Normas y Referencias

- Normas consultadas:

[1] Norma UNE-EN-ISO 178:2010. “Plásticos. Determinación de los propiedades de flexión”

[2] Norma UNE-EN-ISO 527:2012. “Plásticos. Determinación de los propiedades a tracción”

- Programas:

A continuación hacemos referencia a los programas de diseño y cálculo utilizados en este proyecto.

[3] **SolidWorks** es un software CAD (diseño asistido por ordenador) para modelado mecánico en 3D, desarrollado en la actualidad por SolidWorks Corp. El programa permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos técnicos como otro tipo de información necesaria para la producción.

En concreto, con la ayuda del Solidworks, hemos podido diseñar las probetas para su posterior impresión 3D a partir de archivos STL generados por el software.

[4] **Microsoft Excel** es un programa que permite crear tablas, calcular y analizar datos. Se denomina también software de hoja de cálculo. Puede crear tablas que calculan de forma automática los valores numéricos totales que se le especifican, imprimir tablas con diseños cuidados, y crear gráficos simples.

Con este producto de Microsoft Office se han podido realizar algunos cálculos de manera más sencilla, directa y ordenada. Ha facilitado la iteración de resultados, mediante la modificación directa de los datos de partida y con ello, la muestra de los mismos de forma tabulada. En concreto, con este software hemos podido trabajar e interpretar los datos obtenidos tras los ensayos mecánicos de tracción y flexión. Conocer la media de los parámetros que necesitábamos para el estudio de los materiales y generar gráficas que nos permitieran entender y valorar mejor los resultados obtenidos.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [5] Kalpakjian, Serope. “Manufactura, ingeniería y tecnología”. Prentice Hall. p186 – p187.
- [6] F. Ashby, Michael. “Materials and the Environment. Eco-Informed Material Choice”.

Referencias estudios

- [7] Serna C, L; Rodríguez de S,A; Albán A, F. “Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y aplicaciones”. En: Volumen 5 –No. 1- Octubre 2003.
- [8] Flores Manrique N; González O. “Efecto del tratamiento químico en las propiedades físicas y mecánicas de las fibras naturales como sustitutas de la fibra de vidrio en composites”. Instituto de Ciencias Químicas y Ambientales. Agosto 2011.
- [9] Polímeros y Elastómeros. Ingeniería de Materiales. Curso 2013/14.
- [10] Tecnología de polímeros. Estructura y propiedades de los polímeros. Ingeniería de Materiales. Curso 2013/14.
- [11] Estructura de polímeros y elastómeros. Ingeniería de Materiales. Curso 2013/14.
- [12] Fabricación y procesado de polímeros y elastómeros. Ingeniería de Materiales. Curso 2013/14.
- [13] Polímeros plásticos. Ingeniería de Materiales. Curso 2013/14.
- [13] Propiedades mecánicas de los materiales. Tracción y dureza. Ingeniería de Materiales. Curso 2012/13.
- [14] Propiedades mecánicas de los materiales. Flexión. Ingeniería de Materiales. Curso 2012/13.

Referencias Proyectos

- [15] Richard, T. “Preparación y caracterización de nanocompuestos en base de PLA”. Universidad Politécnica de Cataluña. Febrero 2008.
- [16] Real, M. “Preparación térmica y mecánica de mezcla PET- reciclado”. Universidad Politécnica de Cataluña”. Febrero 2009.
- [17] Pellerin de Manual, V. “Gestión y reciclaje del PET”. Universidad Politécnica de Cataluña. Febrero 2007.
- [18] Huertas González, J. “Rediseño y fabricación de una impresora 3D RepRap”. Universidad Politécnica de Cataluña. Julio 2014.

Referencias webs

- [19] Breve historia de la impresión 3D. Disponible en la URL: <http://www.impresoras3d.com/breve-historia-de-la-impresion-3d/>
- [20] Filamentos termoplásticos. Así son. Disponible en la URL: <http://www.teknlife.com/reportaje/asi-son-los-distintos-y-nuevos-filamentos-termoplasticos-para-impresoras-3d/>
- [21] Filamentos impresión 3D. ¿Qué son? Disponible en la URL: <http://fabricame.com/impresora-3d/>
- [22] La impresión 3D comienza a entrar en las casas. Disponible en la URL: <http://www.elperiodico.com/es/noticias/dominical/impresion-comienza-entrar-las-casas-3604713>
- [23] Guía de plásticos y otros materiales para impresión 3D. Disponible en la URL: <http://formizable.com/2014/09/02/guia-de-plasticos-y-otros-materiales-para-impresion-3d/>

- [24] Lecciones para una buena impresión 3D. Disponible en la URL: <http://iniciativa3d.blogspot.com.es/2013/09/lecciones-para-una-buena-impresion.html>
- [25] Impresión 3D. ¿Qué materiales usar y donde comprarlos? Disponible en la URL: <http://iniciativa3d.blogspot.com.es/2013/09/lecciones-para-una-buena-impresion.html>
- [26] Materiales de impresión 3D, situación y previsión. Disponible en la URL: <http://www.impresoras3d.com/materiales-de-impresion-3d-situacion-y-prevision/>
- [27] Materiales de impresión termoplásticos. Disponible en la URL: <http://myfpschool.com/impresoras-3d-ii-los-materiales-de-impresion-termoplasticos/>
- [28] ABS y PLA. Diferencias. Disponible en la URL: <http://makershopbcn.com/abs-vs-pla-que-diferencia-existe-entre-estos-dos-filamentos-para-impresora-3d>
- [29] Comparación de filamentos. Disponible en la URL: <http://www.matterhackers.com/3d-printer-filament-compare>
- [30] 10 Problemas o peligros de la impresión 3D. Disponible en la URL: <http://eduardopaz.com/10-problemas-o-peligros-de-las-impresoras-3d/>
- [31] Defectos en piezas fabricadas por impresión 3D FFF: causas y soluciones. Disponible en la URL: <http://www.dima3d.com/defectos-en-piezas-fabricadas-por-impresion-3d-fff-causas-y-soluciones/>
- [32] Métodos de impresión. Disponible en la URL: https://es.wikipedia.org/wiki/Impresi%C3%B3n_3D
- [33] Tecnologías de impresión 3D. Disponible en la URL: <http://www.xataka.com/perifericos/estas-son-las-tecnologias-de-impresion-3d-que-hay-sobre-la-mesa-y-lo-que-puedes-esperar-de-ellas>

- [34] The dark side of 3D printing. Disponible en la URL: <http://www.techrepublic.com/article/the-dark-side-of-3d-printing-10-things-to-watch/>
- [35] Tecnología de los plásticos. Tratamiento corona. Disponible en la URL: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.es/2012/05/tratamiento-corona.html>
- [36] PLA. Nature Works. Disponible en la URL: <http://www.natureworksllc.com/Technical-Resources/4-Series>
- [37] PET. Propiedades y características. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales Universidad de Valladolid. Disponible en la URL: http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05-06/pet/propiedades_y_caracteristicas.htm
- [38] Tecnología de los plásticos. PET. Disponible en la URL: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.es/2011/05/pet.html>
- [39] Imprimiendo con PET. Disponible en la URL: <https://plabs3d.wordpress.com/>
- [40] Plataneras de Canarias utilizadas para producir plástico. Disponible en la URL: <https://plabs3d.wordpress.com/>
- [41] Proyecto de investigación badana. Disponible en la URL: <http://2.139.191.72/portal/viewcontent.rails?Id=381>
- [42] Fibra de plátano mejora las propiedades del concreto: <http://www.manizales.unal.edu.co/index.php/noticias/39-ano-2015/4379-fibra-de-platano-mejora-propiedades-del-concreto>
- [43] Influencia del Tratamiento con Vapor Sobre la Estructura y Comportamiento Físico-Mecánico de Fibras de Plátano. Disponible en la URL: http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642005000200003&script=sci_arttext

- [44] Valorización de residuos de la producción de plátano para fabricar cemento. Disponible en la URL: <http://www.residuosprofesional.com/residuos-platano-cemento/>
- [45] Estadística de exportación de productos agrarios Canarias. Disponible en la URL: <http://www.gobiernodecanarias.org/istac/jaxi-istac/menu.do?uripub=urn:uuid:7c4f58dd-4a11-47a3-8105-5cba881b8a3f>
- [46] El cultivo del plátano. Disponible en la URL: http://www.infoagro.com/frutas/frutas_tropicales/platano2.htm
- [47] Aprovechamiento de residuos de fibras naturales como elementos de refuerzo de materiales poliméricos. Instituto tecnológico del plástico. Disponible en la URL: <http://personales.upv.es/~vamigo/Vicente/Presentacion%20Fibras%20naturales.pdf>
- [48] Fibras naturales vegetales. Disponible en la URL: <http://www.redtextilargentina.com.ar/index.php/fibras/f-diseno/fibras-vegetales>
- [49] Lista filamentos impresoras 3D. Disponible en la URL: http://3dproditive.com/es/market_place/lista/filamento-impresoras-3d
- [50] Filabot Original. Disponible en la URL: <http://www.filabot.com/collections/components/filabot-original>
- [51] Plan de Residuos de Tenerife. Estadísticas de Residuos. Disponible en la URL: http://www.reste.es/Portals/0/Docs/O01_Detalle_HISTORICO_PSCE_TENERIFE_2005-2014.pdf
- [52] Filamento PLA plateado ColorFabb. Disponible en la URL: <http://colorfabb.com/shining-silver>
- [53] Impresora Makerbot Replicator 2. Disponible en la URL: <https://store.makerbot.com/europe>

Referencias Figuras

- [54] Impresora RepRap. Planet Ubuntu. Disponible en la URL: <http://planetubuntu.es/post/las-impresoras-3d-se-pueden-rentabilizar-en-un-ano>
- [55] Logo RepRap. RepRap org. Disponible en la URL: <http://reprap.org/wiki/Reachout>
- [56] 10 Amazing new uses of 3D printers. Disponible en la URL: <http://realitypod.com/2013/07/10-amazing-new-uses-of-3d-printers/3/>
- [57] Impresión 3D: Qué materiales usar y dónde comprarlos. Disponible en la URL: <http://www.siliconweek.es/workspace/impresion-3d-que-materiales-usar-y-donde-comprarlos-50135>
- [58] From Bottle Caps to 3D-Printing: An open guide. Disponible en la URL: <http://scifablab.ictp.it/2014/11/25/from-bottle-caps-to-3d-printing-an-open-guide/>
- [59] La impresora 3D inspirada en la película Terminator 2. Disponible en la URL: <http://www.omicrono.com/2015/03/impresora-3d-liquida/>
- [60] Nuevo filamento para impresora 3D. Disponible en la URL: <http://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-567726108-nuevo-filamento-elastico-3mm-para-impresoras-3d-500gr- JM#redirectedFromSimilar>
- [61] Materiales de impresión 3D. Disponible en la URL: <http://reprapacademy.com/blog3d/materiales-impresion-3d/>
- [62] 3DSoma. Disponible en la URL: <http://www.3dsoma.com/wp-content/uploads/2014/04/red.png>
- [63] Laywood. Disponible en la URL: <https://plabs3d.wordpress.com/laywood-2/>
- [64] Máquina extrusora de filamento. Disponible en la URL: <http://myfpschool.com/maquina-extrusora-de-filamento-3d/>

- [65] ColorFabb pellets. Disponible en la URL: <http://www.3ders.org/articles/20140703-colorfabb-offers-pellets-for-3d-printing.html>
- [66] Proceso de obtención de PLA. Disponible en la URL: <http://www.greenisgreeninc.com/prosheets/PLA%20how%20made.bmp>
- [67] Ingeo Nature Works. Disponible en la URL: http://www.greenchemistryandcommerce.org/assets/media/images/logos/Ingeo%20by%20NatureWorks_CMYK_L.jpg
- [68] PLA pellets. Disponible en la URL: <http://www.filabot.com/products/pla-pellets>
- [69] Reporte Ecológico. PET. Disponible en la URL: <https://reportecologico.wordpress.com/2014/07/23/es-una-idea-pero-funcionara/>
- [70] PET reciclado. Pellets. Disponible en la URL: <https://ecosectores.com/DetalleArticulo/tabid/64/ArticleId/1037/Sanidad-regula-el-uso-de-PET-reciclado-para-envases-de-bebidas-refrescantes.aspx>
- [71] Investigación sobre la platanera. Esquema de sus partes. Disponible en la URL: <http://claraysuclase.blogspot.com.es/2014/10/ciencias-naturales-investigo-sobre-la.html>
- [72] Impresión con fibras naturales. Disponible en la URL: <http://www.imprimalia3d.com/noticias/2014/09/26/003275/filamento-coco-impresi-n-3d>
- [73] Filamento para tu impresora 3D. Disponible en la URL: <http://www.hwlibre.com/n-vent-un-nuevo-filamento-para-tu-impresora-3d/>
- [74] Impresora 3D con botellas de PET. Disponible en la URL: <http://ecoinventos.com/ekocycle-cube-3d-printer/>

- [75] Máquina de ensayos mecánicos. Autograph Shimadzu. Disponible en la URL:
<http://www.shimadzu.com/an/test/universal/ags-x/ags-x.html>

Anexos

1. Anexo de Materiales para filamento de impresión 3D

1.1 PLA (Ácido Poliláctico)

Como hemos comentado en el *Apartado 2.2* de la presente memoria, el PLA es un termoplástico procedente de la molécula de ácido láctico. A continuación presentamos información sobre dicha molécula que hace posible su sintetización en PLA.

Propiedades del Ácido Láctico	
CAS Number	General: 50 - 21 - 5 Ácido (S) -Láctico: 79 - 33 - 4 Ácido (R) -Láctico: 10326 - 41 - 7
Peso Molecular	90,08 g/mol
Fórmula	$C_3H_6O_3$
Punto de Fusión	18 °C (Mezcla cerámica) 53 °C (Quiral)
Densidad	1,33 g/ml (20°C, sólido) 1,224 g/ml (20°C, líquido)
Solubilidad en Agua	Ácido (S) -Láctico: 86% (20 °C)
Calor de Fusión	Ácido (S) -Láctico: 16,8 KJ/mol
Punto de Ebullición	122 °C (a 14 mmHg presión)
Viscosidad	28,5 mPa·S (25° C en solución al 85% en agua)
pKa (Fuerza de Disociación Molecular)	3,86
Calor Específico	Ácido (S) -Láctico Cristalino: 1,41 J/gk (25 °C) Ácido (S) -Láctico Líquido: 2,34 J/gk (25 °C)

Tabla 26: Propiedades del Ácido Láctico. [6][15]

También queremos señalar algunos datos que no se han empleado específicamente en este proyecto, pero si resultan interesantes para conocer y comparar el PLA con otro tipo de polímeros termoestables.

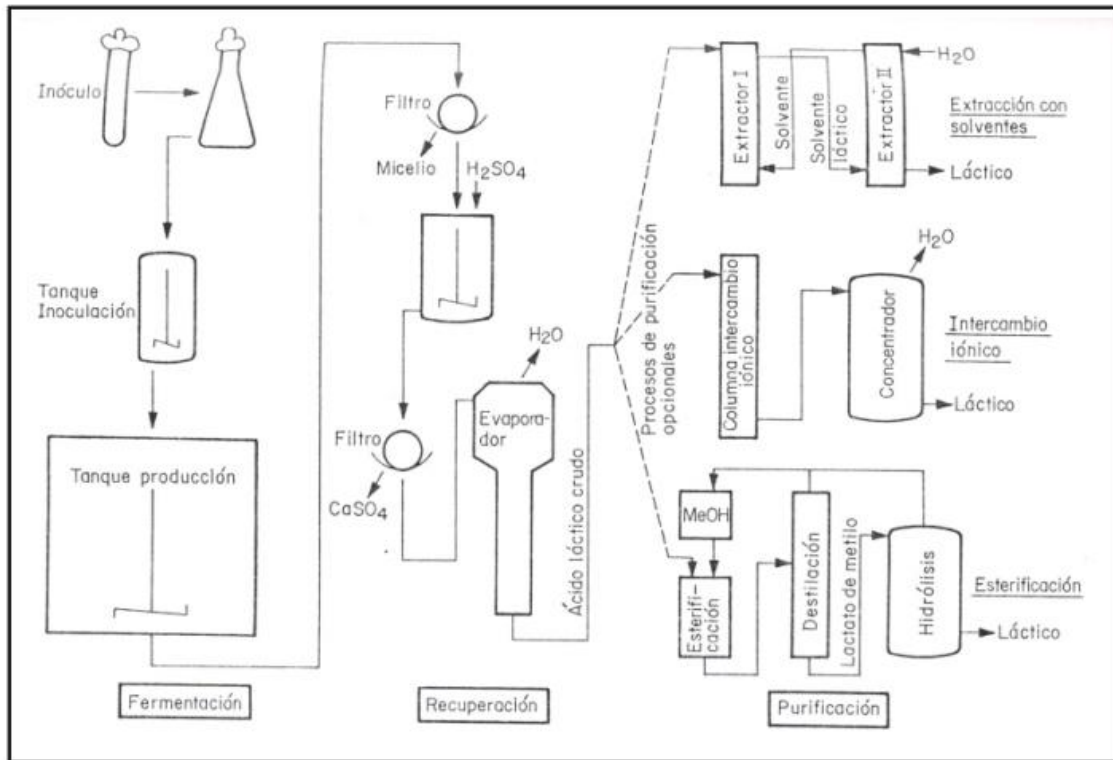


Figura 1.1.1.: Esquema de producción del Ácido Láctico. [7]

El ácido láctico utilizado en la polimerización para la producción de PLA debe ser de alta pureza. A continuación mostramos la síntesis del Ácido Poliláctico.

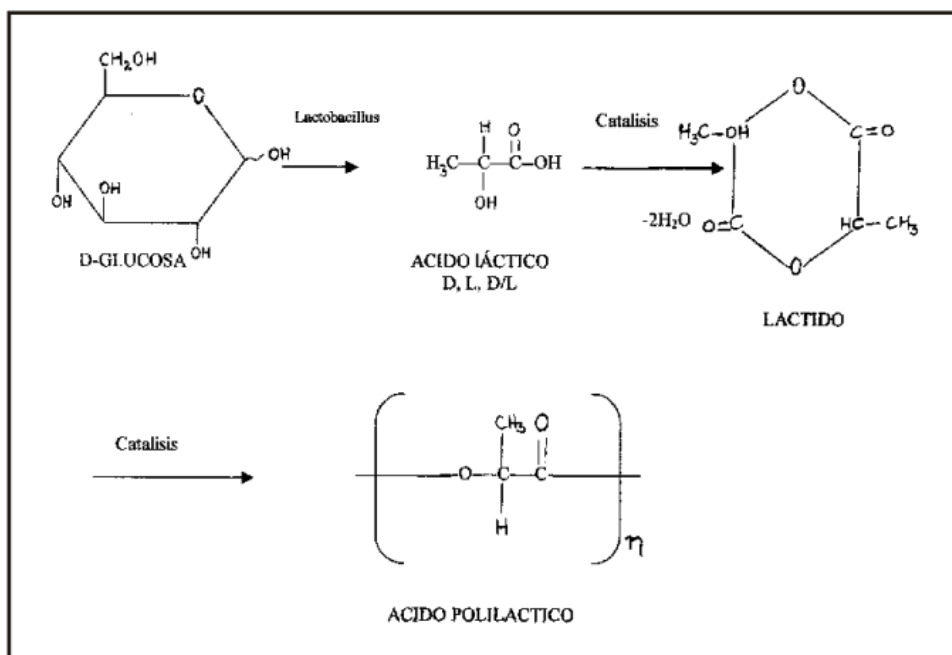


Figura 1.1.2.: Síntesis del Ácido Poliláctico. [7]

PLA (Ácido Poliláctico)	
Dureza Rockwell	70 – 90 Escala H 120 Escala L
Módulo de Elasticidad	3000 – 4000 MPa
Resistencia a la Flexión	100 MPa
Módulo de Flexión	4000 – 5000 MPa
Fuerza de Tensión	40 – 60 MPa
Módulo de Tensión	3000 – 4000 MPa

Tabla 27: Propiedades mecánicas del Ácido Poliláctico. [6][15]

Por último, adjuntamos Technical Datasheet de PLA 4043D de Nature Works.



Ingeo™ Biopolymer 4043D Technical Data Sheet

Biaxially Oriented Films – General Purpose

Film Characteristics/ Applications

Ingeo 4043D – a product from NatureWorks LLC – can be converted into a biaxially oriented film with use temperatures up to 265°F (130°C). This film has excellent optics, good machinability and excellent twist and deadfold. These properties make 4043D film an ideal candidate for candy twist wrap and other packaging applications. Additional properties include advantageous barrier to flavor and grease and superior oil resistance.

Polymer Characteristics

4043D polymer is available in pellet form. Drying prior to processing is essential. The polymer is stable in the molten state, provided that the extrusion and drying procedures are followed.

Machine Configuration

Ingeo polymers will process on conventional extruders using general purpose screws with L/D ratios from 24:1 to 30:1 and compression

Typical Material & Application Properties ^(1, 2, 3)			
Film Properties		Ingeo 4043D	ASTM Method
Density		1.24 g/cc	D1505
Tensile Strength	MD	16 kpsi	D882
	TD	21 kpsi	D882
Tensile Modulus	MD	480 kpsi	D882
	TD	560 kpsi	D882
Elongation at Break	MD	160%	D882
	TD	100%	D882
Elmendorf Tear	MD	15 g/mil	D1922
	TD	13 g/mil	D1922
Spencer Impact		2.5 joules	
Transmission Rates	Oxygen	675 cc-mil/ m ² -24hr-	D1434
	Carbon Dioxide	2,850 cc-mil/ m ² -24hr-atm	Internal
Dioxide	Water Vapor	375 g-mil/ m ² -24hr	F1249
Optical Characteristics	Haze	2.1%	D1003
	Gloss, 20°	90	D1003
Thermal Characteristics	Melting Point	145-160°C	D3418

ratio of 2.5:1 to 3:1. Smooth barrels are recommended. Ingeo resins will process on conventional cast tenter equipment that has been designed for OPS or OPET with minimal modifications. Optimization to your specific equipment may require NatureWorks LLC technical support

- (1) Typical properties; not to be construed as specifications.
- (2) All properties measured on 1.0 mil film.
- (3) Typical values for a film oriented 3.5x in MD and 5x in TD.

Process Details

Startup and Shutdown

Ingeo 4043D is not compatible with a wide variety of polyolefin resins, and special purging sequences should be followed:

1. Clean extruder and bring temperatures to steady state with low-viscosity, general-purpose polystyrene or high MFR polypropylene.
2. Vacuum out hopper system to avoid contamination.
3. Introduce Ingeo polymer into the extruder at the operating conditions used in Step 1.
4. Once Ingeo polymer has purged, reduce barrel temperatures to desired set points.
5. At shutdown, purge machine with high-viscosity polystyrene or polypropylene.

conditions after drying. Keep the package sealed until ready to use and promptly reseal any unused material.

Food Packaging Status

U.S. Status

On January 3, 2002 FCN 000178 submitted by NatureWorks LLC to FDA became effective. This effective notification is part of list currently maintained on FDA's website at

<http://www.fda.gov/food/ingredientspackaginglabeling/packagingfcs/notifications/default.htm>

This grade of Ingeo biopolymer may therefore be used in food packaging materials and, as such, is a permitted component of such materials pursuant to section 201(s) of the Federal, Drug, and Cosmetic Act, and Parts 182, 184, and 186 of the Food Additive Regulations. All additives and adjuncts contained in the referenced Ingeo biopolymer formulation meet the applicable sections of the Federal Food, Drug, and Cosmetic Act. The finished polymer is approved for all food types and B-H use conditions. We urge all of our customers to perform GMP (Good Manufacturing Procedures) when constructing a package so that it is suitable for the end use. Again, for any application, should you need further clarification, please do not hesitate to contact NatureWorks LLC.

Processing Temperature Profile		
Melt Temp.	410±15°F	210±8 °C
Feed Throat	113°F	45°C
Feed Temp.	355°F	180°C
Compression Section	375°F	190°C
Metering Section	390°F	200°C
Adapter	390°F	200°C
Die	390°F	200°C
Screw Speed	20-100 rpm	
MD Draw Temp.	140-160°F	60-70°C
TD Draw Temp.	160-175°F	70-80°C

Drying

In-line drying is required. A moisture content of less than 0.025% (250ppm) is recommended to prevent viscosity degradation. Typical drying conditions are 4 hours at 175°F (80°C) or to a dew point of -30°F (-35°C), with an airflow rate greater than 0.5 cfm/lb of resin throughput. The resin should not be exposed to atmospheric

finished articles placed into contact with the foodstuff or appropriate food simulants for a period and at a temperature which are chosen by reference to the contact conditions in actual use, according to the rules laid down in Plastics Regulation 10/2011.

Please note that it is the responsibility of both the manufacturers of finished food contact articles as well as the industrial food packers to make sure that these articles in their actual use are in compliance with the imposed specific and overall migration requirements.

This grade as supplied meets European Parliament and Council Directive 94/62/EC of 20 December 1994 on packaging and packaging waste heavy metal content as described in Article 11.

Should you need further clarification, contact NatureWorks LLC.

Bulk Storage Recommendations

The resin silos recommended and used by NatureWorks LLC are designed to maintain dry air in the silo and to be isolated from the outside air. This design would be in contrast to an open, vented to atmosphere system that we understand to be a typical polystyrene resin silo. Key features that are added to a typical (example: polystyrene)

European Status

This grade of Ingeo biopolymer complies with Plastics Regulation 10/2011 as amended. No SML's for the above referenced grade exist in Plastics Regulation 10/2011 as amended. NatureWorks LLC would like to draw your attention to the fact that the EU- Plastics Regulation 10/2011, which applies to all EU-Member States, includes a limit of 10 mg/dm² of the overall migration from finished plastic articles into food. In accordance with Plastics Regulation 10/2011 the migration should be measured on

resin silo to achieve this objective include a cyclone and rotary valve loading system and some pressure vessel relief valves. The dry air put to the system is sized to the resin flow rate out of the silo. Not too much dry air would be needed and there may be excess instrument air (-30°F dew point) available in the plant to meet the needs for dry air. Our estimate is 10 scfm for a 20,000 lb/hr rate resin usage. Typically, resin manufacturers specify aluminum or stainless steel silos for their own use and avoid epoxy-lined steel.

Safety and Handling Considerations

Safety Data Sheets (SDS) for Ingeo biopolymers are available from NatureWorks. SDS's are provided to help customers satisfy their own handling, safety, and disposal needs, and those that may be required by locally applicable health and safety regulations. SDS's are updated regularly; therefore, please request and review the most current SDS's before handling or using any product.

The following comments apply only to Ingeo biopolymers; additives and processing aids used in fabrication and other materials used in finishing steps have their own safe-use profile and must be investigated separately.

Hazards and Handling Precautions

Ingeo biopolymers have a very low degree of toxicity and, under normal conditions of use, should pose no unusual problems from incidental ingestion or eye and skin contact. However, caution is advised when handling, storing, using, or disposing of these resins, and good housekeeping and controlling of dusts are necessary for safe handling of product. Pellets or beads may present a slipping hazard.

No other precautions other than clean, body-covering clothing should be needed for handling Ingeo biopolymers.

Use gloves with insulation for thermal protection when exposure to the melt is localized. Workers should be protected from the possibility of contact with molten resin during fabrication.

Handling and fabrication of resins can result in the generation of vapors and dusts that may cause irritation to eyes and the upper respiratory tract. In dusty atmospheres, use an approved dust respirator.

Good general ventilation of the polymer processing area is recommended. At temperatures exceeding the polymer melt

decomposition producing flammable vapors containing acetaldehyde and carbon monoxide can occur in almost any process equipment maintaining PLA at high temperature over longer residence times than typically experienced in extruders, fiber spinning lines, injection molding machines, accumulators, pipe lines and adapters. As a rough guideline based upon some practical experience, significant decomposition of PLA will occur if polymer residues are held at temperatures above the melting point for prolonged periods, e.g., in excess of 24 hours at 175°C, although this will vary significantly with temperature.

Combustibility

Ingeo biopolymers will burn. Clear to white smoke is produced when product burns. Toxic fumes are released under conditions of incomplete combustion. Do not permit dust to accumulate. Dust layers can be ignited by spontaneous combustion or other ignition sources. When suspended in air, dust can pose an explosion hazard. Firefighters should wear positive-pressure, self-contained breathing apparatuses and full protective equipment. Water or water fog is the preferred extinguishing medium. Foam, alcohol-resistant foam, carbon dioxide or dry chemicals may also be used. Soak thoroughly with water to cool and prevent re-ignition.

Disposal

DO NOT DUMP INTO ANY SEWERS, ON THE GROUND, OR INTO ANY BODY OF WATER. For unused or uncontaminated material, the preferred option is to recycle into the process otherwise, send to an incinerator or other thermal destruction device. For used or contaminated material, the disposal options remain the same, although additional evaluation is required. Disposal must be in compliance with Federal, State/Provincial, and local laws and regulations.

temperature (typically 175°C), polymer can release fumes, which may contain fragments of the polymer, creating a potential to irritate eyes and mucous membranes. Good general ventilation should be sufficient for most conditions. Local exhaust ventilation is recommended for melt operations. Use safety glasses (or goggles) to prevent exposure to particles, which could cause mechanical injury to the eye. If vapor exposure causes eye discomfort, improve localized fume exhausting methods or use a full-face respirator.

The primary thermal decomposition product of PLA is acetaldehyde, a material also produced during the thermal degradation of PET. Thermal decomposition products also include carbon monoxide and hexanal, all of which exist as gases at normal room conditions. These species are highly flammable, easily ignited by spark or flame, and can also auto ignite. For polyesters such as PLA, thermal

Customer Notice

NatureWorks encourages its customers and potential users of its products to review their applications from the standpoint of human health and environmental quality. To help ensure our products are not used in ways for which they

NOTICE:

No freedom from infringement of any patent owned by NatureWorks LLC or others is to be inferred. No information in this publication can be considered a suggestion to infringe patents.

The technical information, recommendations and other statements contained in this document are based upon tests or experience that NatureWorks believes are reliable, but the accuracy or completeness of such information is not guaranteed. Many factors beyond NatureWorks control can affect the use and performance of a NatureWorks product in a particular application, including the conditions under which the product is used and the time and environmental conditions in which the product is expected to perform. Since these factors are uniquely within the user's knowledge or control, it is essential that the user evaluate the NatureWorks product to determine whether it is fit for a particular purpose and suitable for the user's method of application. In addition, because use conditions are outside of NatureWorks control and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, Customer is solely responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for Customer's use and for ensuring that Customer's workplace, use and disposal practices are in compliance with applicable laws and regulations. NatureWorks LLC assumes no obligation or liability for the information in this document.

NATUREWORKS MAKES NO WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING THE INFORMATION CONTAINED HEREIN OR ITS PRODUCTS, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ANY WARRANTY AS TO ACCURACY OR COMPLETENESS OF INFORMATION, OR ANY IMPLIED WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE.

NOTICE REGARDING PROHIBITED USE RESTRICTIONS: Unless specifically agreed to in writing by NatureWorks, NatureWorks LLC will not knowingly sell or sample any product into any of the following commercial or developmental applications (i) components of or packaging for tobacco products, (ii) components of products intended for human or animal consumption, (iii) any application that is intended for any internal contact with human body fluids or body tissues, (iv) as a critical component in any medical device that supports or sustains human life, (v) in any product that is designed specifically for ingestion or internal use by pregnant women, (vi) in any application designed specifically to promote or interfere with human reproduction, (vii) in microbeads, including those used in personal care/cosmetic applications, or (viii) to manufacture bottles or bottle pre-forms in North America.

For additional information please contact NatureWorks via our [website](#) on the tab called [FAQ's](#) or by clicking [here](#).

Environmental Concerns

Generally speaking, lost pellets, while undesirable, are benign in terms of their physical environmental impact, but if ingested by wildlife, they may mechanically cause adverse effects. Spills should be minimized, and they should be cleaned up when they happen. Plastics should not be discarded into the environment.

Product Stewardship

NatureWorks has a fundamental duty to all those that use our products, and for the environment in which we live. This duty is the basis for our Product Stewardship philosophy, by which we assess the health and environmental information on our products and their intended use, and then take appropriate steps to protect the environment and the health of our employees and the public.

were not intended or tested, our personnel will assist customers in dealing with ecological and product safety considerations. Your sales representative can arrange the proper contacts. NatureWorks literature should be consulted prior to the use of the company's products.



15305 Minnetonka Blvd., Minnetonka, MN 55345

1.2 PET (Polietileno Tereftalato)

El reciclaje y uso del PET en este proyecto ha sido sencillo, pues se ha empleado directamente el producto de desecho (botella de agua) y se ha transformado en pellets gracias al uso de una trituradora. Sin embargo, el proceso de reciclado del PET es mucho más complejo cuando se orienta a otras transformaciones. Tal y como señalábamos en el *Apartado 2.3* de esta memoria, procedemos a explicar las distintas etapas por las que pasa una botella de PET en una planta de reciclado.

Hay tres maneras de aprovechar los envases de PET una vez que terminó su vida útil: someterlos a un reciclado mecánico, a un reciclado químico, o a un reciclado energético empleándolos como fuente de energía.

El reciclado mecánico es el proceso de reciclado más utilizado, el cual consiste en varias etapas de separación, limpieza y molido.

Primero, se realiza una selección manual en las bandas transportadoras (si el PET se contamina con otros plásticos, su valor comercial disminuye y dependiendo de su nivel de contaminación puede quedar inservible). Acto seguido, se pasan las botellas por un equipo rascador de etiquetas y perforación de botellas. Se realiza en un baño de agua, para que esta entre en su interior y se aplasten con facilidad. El agua está a temperatura ambiente, sin detergentes y sin aditivos químicos.



Figura 1.2.1.: Pellets de PET tras proceso de trituración. [69]

Otra alternativa al rascador sería un equipo turbo lavador. Este equipo desgarrar y lava directamente las botellas o la molienda de las botellas. El siguiente paso es pasar el producto por una banda transportadora para inspección. Se van triturando botellas bajo el agua, produciendo de esta forma hojuelas que se secarán y serán trituradas en un molino triturador para que adquieran el tamaño apropiado para la extrusión o la inyección (pellets).

Por último, y tras varios procesos intermedios de silos homogeneizadores, se transporta las hojuelas a un silo de almacenaje a través de un turboventilador que además eliminar la posible humedad remanente del material, lo conserva hasta su uso.

A continuación mostramos una tabla comparativa de las propiedades del PET con el RPET (PET reciclado) en la que se observa la degradación de sus propiedades.

Propiedad	PET virgen	RPET
Módulo de Young [MPa]	1890	1630
Resistencia a la rotura [MPa]	47	24
Elongación a la rotura [%]	3,2	110
Resistencia al impacto [J m^{-1}]	12	20
IV (dl g^{-1})	0.72 – 0.84	0.46 – 0.76
Temperatura de fusión ($^{\circ}\text{C}$)	244 - 254	247 - 253
Peso molecular (g mol^{-1})	81600	58400

Tabla 28: Propiedades PET – PETreciclado. [38].

Por último, adjuntamos Technical Datasheet de filamento para impresora 3D a partir de PET.



Technical Data

Physical (When Injection Molded)

Water Absorption	>.015%
Rockwell Hardness	102-112 R-Scale

Mechanical

Tensile Strength - Yield	6640 psi
Tensile Strength - Break	2630 psi
Elongation - Break	18%
Flexural Strength	9880 psi
Flexural Modulus	267,000 psi
Izod Impact Strength	0.69 ft lb/in
Impact Resistance Energy	20-25 lbf

Thermal

Heat Distortion Temp	
/@ .455 Mpa (66 psi)	71.8 C
/@ 1.82 Mpa (264 psi)	65 C
Vicat Softening Temp	84 C
Glass Transition Temp	82 C

Electrical

Dielectric Strength	14-18 kV/mm
Volume Resistivity	10 ¹⁵ Ohm cm
Surface Resistivity	10 ¹⁶ Ohm

Flammability

UL Flammability Classification	
/@ min. 1.6 thickness	HB
/@ min. 3.2 thickness	V-2



2. Anexo de Obtención del filamento para impresión 3D

En el *Apartado 3.2* de la memoria, se señalaban que filamentos de PLA se emplearon para la posterior impresión de las probetas a ensayar mecánicamente. A continuación recogemos los datos de todos los filamentos que se han extruido a lo largo del proyecto, indicando los problemas que presentan y por lo tanto no se han catalogado como válidos.

FILAMENTO	PARÁMETROS DE EXTRUSIÓN	OBSERVACIONES
10.03.15	Temp: 180° Boquilla: 3 mm 40 g de PLA	Filamento con diámetro irregular y muy fino. Problemas al inicio de la extrusión.
10.03.15	Temp: 160° Boquilla: 3 mm 25 g de PLA	Filamento con aspecto aceptable pero diámetro por debajo del valor requerido.
12.03.15	Temp: 160° Boquilla: 3 mm 50 g de PLA	Filamento con diámetro por debajo del valor requerido (2,15 mm – 2,73 mm) y superficie irregular.
12.03.15	Temp: 150° Boquilla: 3 mm 50 g de PLA	Filamento con diámetro por debajo del valor requerido (2,24 mm – 2,62 mm).
18.03.15	Temp: 160° Boquilla: 3 mm 50 g de PLA	Filamento totalmente irregular y de diámetro muy por debajo del solicitado.
14.04.15	Temp: 170° Boquilla: 3 mm 40 g de PLA	Superficie irregular y diámetro muy por encima de los valores solicitados.

14.04.15	Temp: 175° Boquilla: 3 mm 23 g de PLA	Filamento aceptable en superficie y diámetro. No se emplea para la impresión porque presenta alguna sección de 3,1 mm.
14.04.15	Temp: 170° Boquilla: 3 mm 38 g de PLA	Filamento con diámetro muy grueso. Buena apariencia superficial.
14.04.15	Temp: 170° Boquilla: 3 mm 35 g de PLA	Filamento con diámetro muy grueso. Buena apariencia superficial.
14.04.15	Temp: 175° Boquilla: 3 mm 22 g de PLA	Filamento con superficie óptima pero no se emplea en impresión por tener algunas secciones con diámetro 3,1 mm.
14.04.15	Temp: 175° Boquilla: 3 mm 14 g de PLA	Filamento regular con diámetro aceptable. No se empleó en impresión por presentar alguna sección superior a 3 mm.
14.04.15	Temp: 170° Boquilla: 3 mm 32 g de PLA	Filamento regular pero el diámetro por debajo del valor requerido.
15.04.15	Temp: 175° Boquilla: 3 mm 28 g de PLA	Filamento con aspecto regular pero no cumplía valores diametrales.
17.04.15	Temp: 175° Boquilla: 3 mm 17 g de PLA	Filamento aceptable pero algunas partes tienen diámetro inferior al requerido.
17.04.15	Temp: 175° Boquilla: 3 mm 16 g de PLA	Filamento aceptable pero algunas partes tienen diámetro inferior al requerido.

17.04.15	Temp: 175° Boquilla: 3 mm 30 g de PLA	Filamento con aspecto óptimo pero algunas secciones presentan más de 3 mm de grosor.
17.04.15	Temp: 175° Boquilla: 3 mm 11 g de PLA	Filamento con superficie regular pero no se emplea en impresión por poseer partes con 3,1 mm de espesor.

El proceso de fabricación de filamento de manera no industrializada ha sido complejo, pues con los materiales que se tenían no se podía operar ni obtener un producto con precisión, tal y como vemos en las observaciones realizadas.

3. Anexo de Impresión de las probetas

3.1. Fotografías probetas para ensayo de flexión

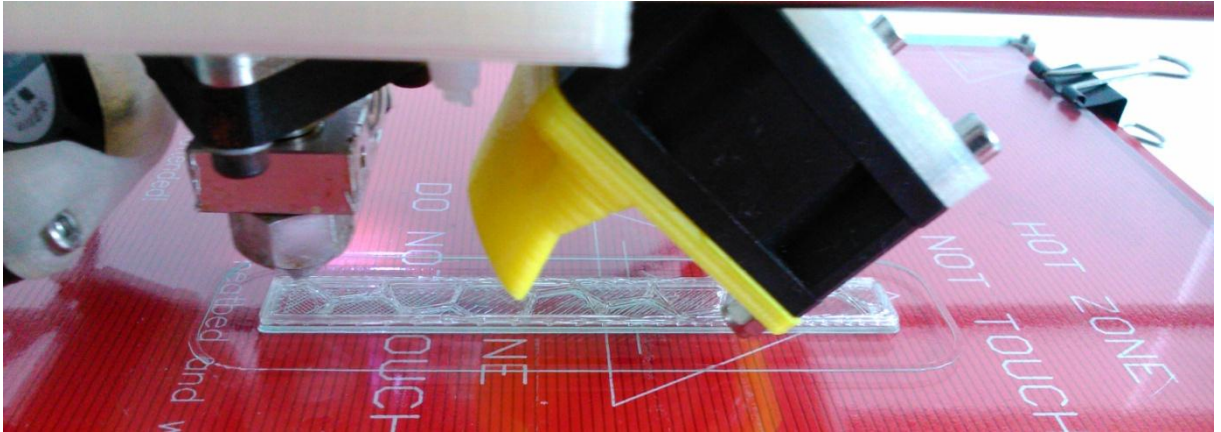


Figura 3.1.1.: Detalle del inicio de la impresión de las probetas de flexión al 10% con relleno honey comb.

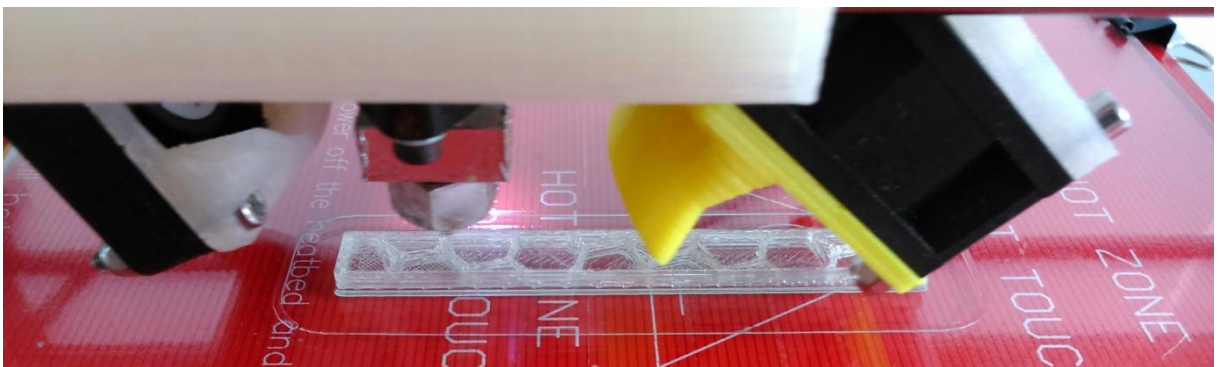


Figura 3.1.2.: Detalle de la impresión de probeta a flexión al 10% con relleno honey comb a la mitad del proceso.

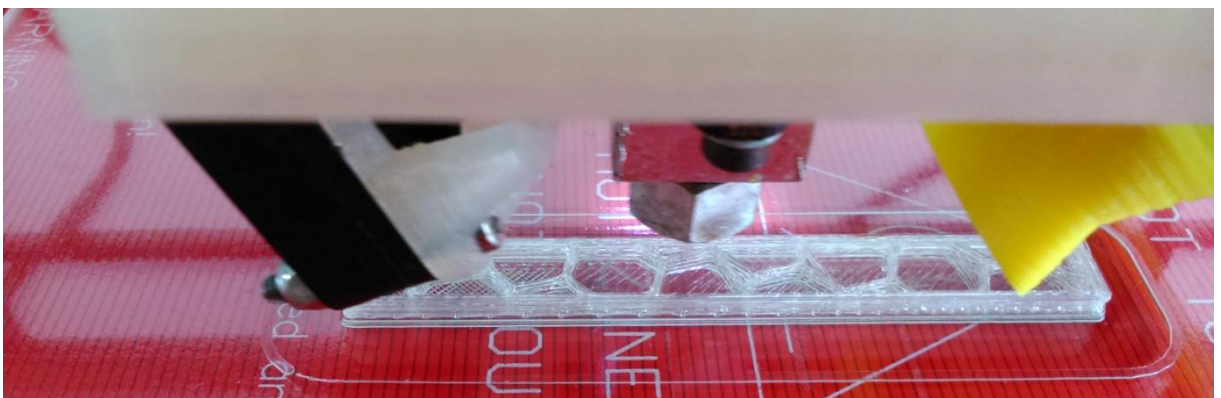


Figura 3.1.3.: Probeta de flexión al 10% con relleno honey comb.

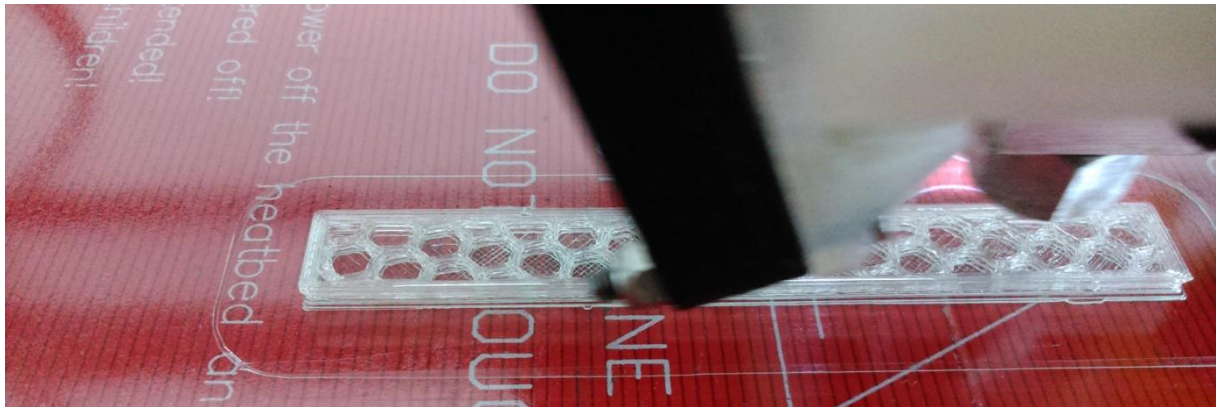


Figura 3.1.4.: Probeta de flexión al 20% de relleno durante la impresión.

3.2. Fotografías probetas para ensayo de tracción

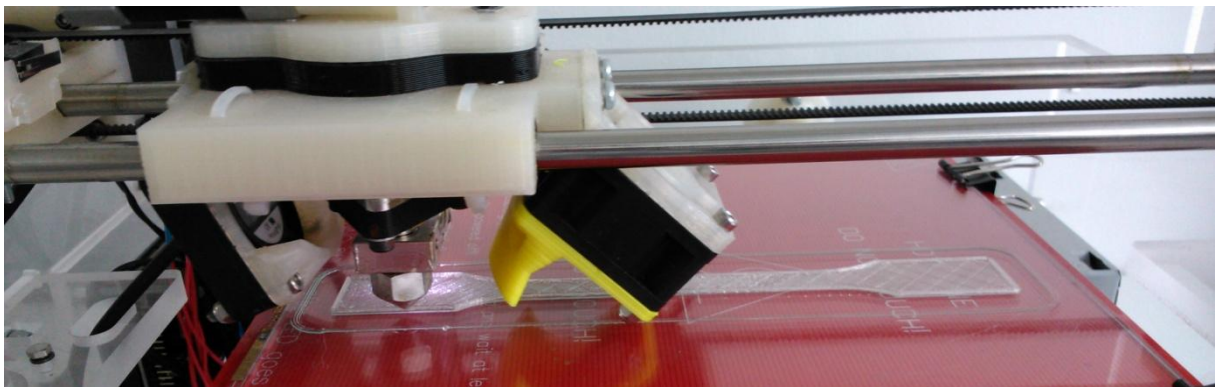


Figura 3.2.1.: Inicio de la impresión de probetas para ensayo a tracción al 10% de relleno.

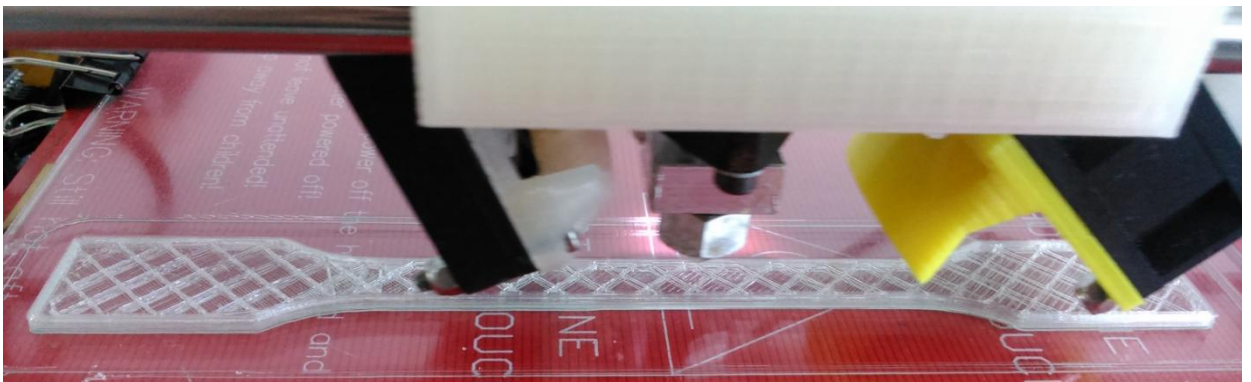


Figura 3.2.2.: Detalle de la impresión de las probetas para el ensayo de tracción.

3.3 Fallas en la impresión de las probetas

Durante la impresión de las probetas, acontecieron una serie de fallos, que consideramos importante reflejar en esta memoria.

La parte menos divulgada de la impresión 3D son las innumerables ocasiones en las que los objetos no terminan de imprimirse como se esperaba. Con frecuencia ocurre que, tras un tiempo de impresión, el usuario encuentra ciertos errores inesperados. Las causas pueden ser varias y de diferente naturaleza. Depende mucho del tipo de impresora y del material empleado, además de los parámetros empleados en la impresión. Es importante saber identificar algunos errores comunes, conocer su procedencia y determinar cuáles son los componentes de la impresora que están ligados a ellos.

Debemos distinguir los distintos fallos en función del equipo y material que estemos usando. Normalmente una impresora RepRap puede cometer más fallos de impresión que una impresora comercial, puesto que el usuario debe ajustarla y calibrarla por sí mismo. La nivelación y calibración de una máquina, y en este caso, de una impresora RepRap como la que hemos usado para imprimir las probetas que ensayaremos mecánicamente, son unos de los puntos más importantes y en el que se invierte más tiempo. La nivelación influye directamente en la calidad de piezas. Se puede tener un software perfectamente calibrado, pero si físicamente la máquina no está bien calibrada y nivelada, no obtendremos buenos resultados.

También influye directamente el material empleado para imprimir. El filamento comercial posee una sección diametral mucho más regular que el filamento no comercial, además los márgenes de tolerancia están más cuidados y son más fiables. Cuanto más estricto sea el margen de tolerancia, más consistentes y precisos serán los resultados de la impresión.

Por tanto, partimos de una impresora 3D fabricada con piezas replicadas (RepRap) y con un filamento obtenido a partir de una extrusora, cuyo valor de diámetro fluctúa entre 2,75 mm y

2,9 mm, por tanto tiene una tolerancia de 0,15 mm (valor muy alto, cuando el valor de tolerancia del filamento comercial está a $\pm 0,05$ mm). Por tanto, partimos siendo conocedores de que existirán problemas de impresión.

Como hemos comentado anteriormente, los defectos o fallos en las piezas pueden estar asociados a diferentes causas, desde la configuración de parámetros en el software utilizado, hasta posibles fallos mecánicos o eléctricos de la máquina. Normalmente la causa de los fallos es fácil de identificar, aunque hay excepciones que diagnosticar la causa del fallo puede ser una tarea complicada. A continuación, y antes de proceder a explicar con detenimiento los fallos que hemos contemplado durante el procedimiento de impresión de las probetas, comentamos los fallos generales que se pueden presentar durante un proceso de impresión 3D.

Tipo de Fallo	Especificación	Causas
Deformación	Desplazamiento de capas; Deformación en las capas; Warping; Pérdida de forma.	Sistema de transmisión mal ajustado en el eje correspondiente; Falta de tiempo entre las pasadas del cabezal extrusor; Problemas de adherencia; Geometrías singulares; Cama mal nivelada.
Capas	Delaminación; Hendidura de capas.	Tensiones internas; Filamento de plástico poco apretado; Velocidad excesiva; Temperatura de extrusión demasiado baja.

<p>Extrusión</p>	<p>Falta de plástico; Conformación parcial; Acumulación de material.</p>	<p>Mal apriete en los engranajes del extrusor; Temperatura de extrusión baja; Atasco parcial de plástico; Funcionamiento inapropiado del driver del motor.</p>
<p>Acabado superficial</p>	<p>Hilos separados; Hilos solapados; Bultos o agujeros.</p>	<p>La cantidad de material plástico depositado es insuficiente; Flujo de plástico excesivo; defecto en el porcentaje de relleno aplicado.</p>

Tabla 26: Clasificación de fallos en impresión 3D. Fuente referencia [31]



Figura 3.2.1.: Ejemplos de fallo durante la impresión 3D. [31]

Estos son los distintos problemas que nos podemos encontrar a la hora de elaborar una pieza con tecnología de impresión 3D. Durante el proceso de impresión de las probetas con filamento de PLA no nos hemos encontrado tantos problemas como los vistos en la *Tabla 26*, pero si algunos que creemos importantes comentar:

Fallas en la Extrusión:

Durante la impresión de las piezas, se observaron problemas en la extrusión que originaron una serie de fallos como los que vamos a describir a continuación:

– Falta de plástico:

Se observaron que algunas de las probetas, como la probeta de tracción A (Tabla 12 del *Apartado 4.1*) poseían una deposición del plástico intermitente, lo cual provocaba que la probeta no tuviera la misma cantidad de plástico en toda la superficie.

Esto podía estar motivado por distintas causas, como un mal apriete en los engranajes del extrusor (los engranajes giran pero no transmiten el movimiento al filamento), una temperatura de extrusión baja, haciendo que el plástico no se funda lo suficiente como para pasar por la pieza que contiene la resistencia, o incluso un funcionamiento inapropiado del driver del motor (movimiento intermitente pero solidario entre eje y engranajes. Puede provocarse por una mala calibración o fallo del componente) pero todo esto se descartó porque eran zonas puntuales de la pieza y no en toda su superficie.

Por tanto, se determinó que el problema residía en el filamento empleado. Como su tolerancia era de $\pm 0,15$ mm, las partes del filamento que se acercaban al límite inferior del diámetro (2,75 mm) no generaban la cantidad de material necesario para que la deposición del mismo cubriera de manera regular toda la pieza, provocando piezas desprovistas de material.



Figura 3.2.2.: Extremo de probeta donde se aprecia la falta de material durante la impresión.

Fallas en el Acabado superficial:

Algunas probetas no poseían el acabado superficial que se requería. En comparación con las probetas impresas con impresora y filamento comercial, algunas de las caras de las probetas de PLA fabricado no eran tan lisas ni tan compactas. Esto es provocado por:

– Hilos solapados:

La capa presenta una cierta rugosidad, generada por la acumulación de rebabas que siguen el movimiento de deposición del extrusor. Esto está motivado por un flujo de plástico excesivo, de manera que los hilos fundidos quedan superpuestos.

En nuestro caso esto se produjo por intentar solventar el fallo del apartado anterior. Dado que el diámetro del filamento era pequeño y no ejercía la presión necesaria para que su extrusión fuera correcta, manualmente ejercíamos dicha presión para guiar al filamento. Esto provocó que, en las secciones donde el filamento poseía un valor diametral correcto, el flujo de filamento que pasaba por el extrusor de la impresora fuera excesivo, y al depositarse, los hilos de material quedarán superpuestos.

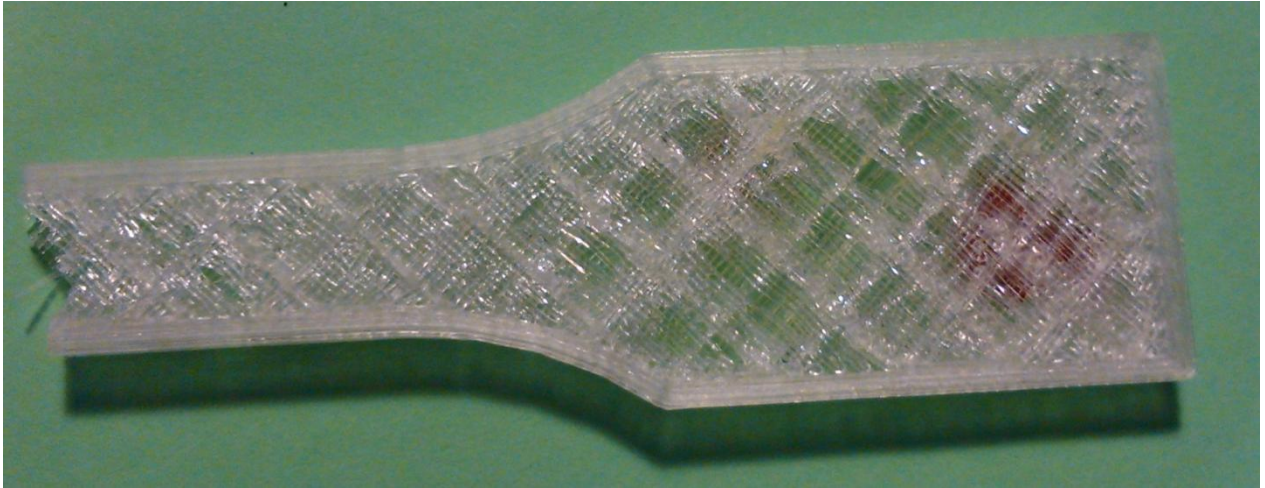


Figura 3.2.3.: Extremo de probeta donde se aprecia la acumulación de hilos, lo que provoca un mal acabado superficial.

4. Anexo de Ensayos

En el *Apartado 5* de la memoria, explicamos los ensayos mecánicos que se iban a realizar a las probetas y de igual modo, en el *Apartado 6* analizamos y comentamos los resultados obtenidos tras el estudio de las cinco probetas seleccionadas para los ensayos. En este anexo podremos ver con mayor detenimiento el resultado de cada una de las probetas ensayadas, tanto las seleccionadas como muestra representativa, como las que no.

4.1. Ensayo mecánico de Flexión

4.1.1 Probetas PLA Comercial con relleno honey comb.

Muestra	1				
Largo (L)	60 mm			Carga max.(N)	119,13
Ancho (b)	10 mm			Alarg max.(mm)	6,69
Espesor (h)	4,08 mm			MOR(Mpa)	64,41
				Efl(Mpa)	2062,69
				eFl (%)	4,55
				m(N/mm)	25,94

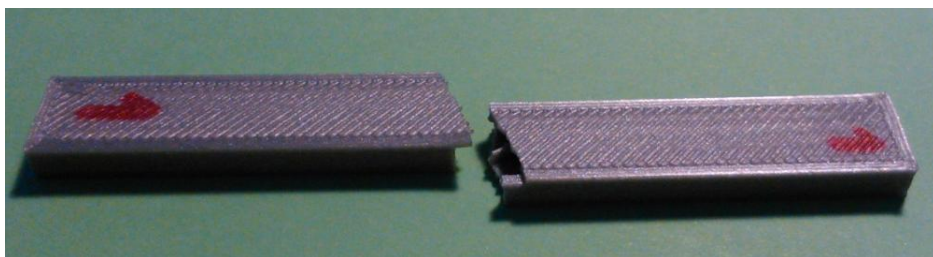
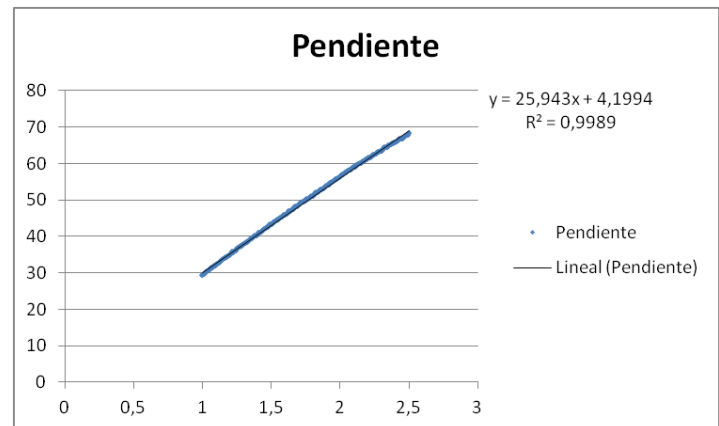


Figura 4.1.1.1.: Probeta PLA comercial tras el ensayo de flexión.

Muestra	2				
Largo (L)	60 mm			Carga max.(N)	110,30
Ancho (b)	10 mm			Alarg max.(mm)	8,30
Espesor (h)	4,13 mm			MOR(Mpa)	58,20
				Efl(Mpa)	1646,71
				efl (%)	5,71
				m(N/mm)	21,48

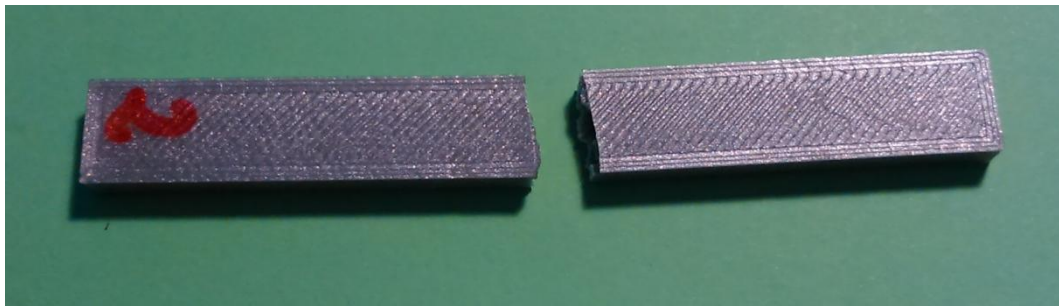
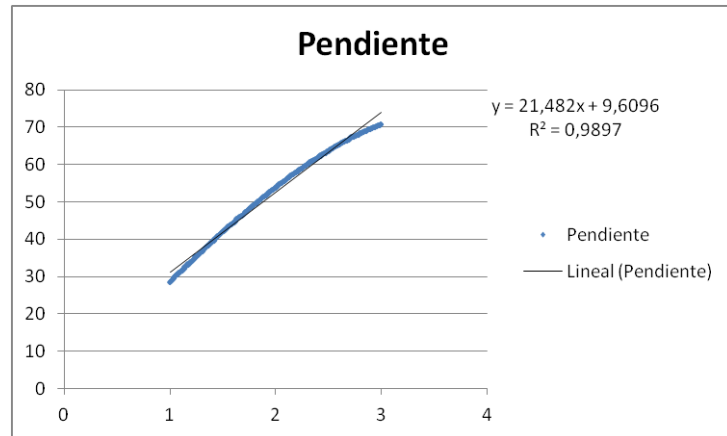
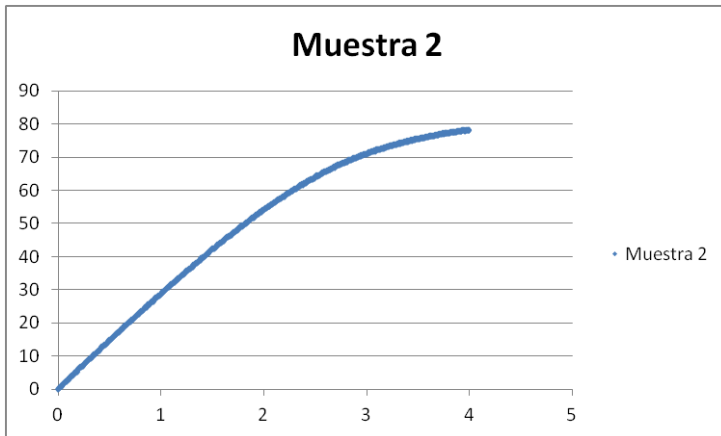


Figura 4.1.1.2.: Probeta PLA comercial tras el ensayo de flexión.

Muestra	3				
Largo (L)	60 mm			Carga max.(N)	118,14
Ancho (b)	10 mm			Alarg max.(mm)	6,28
Espesor (h)	4 mm			MOR(Mpa)	66,45
				Efl(Mpa)	2391,69
				efl (%)	4,18
				m(N/mm)	28,35

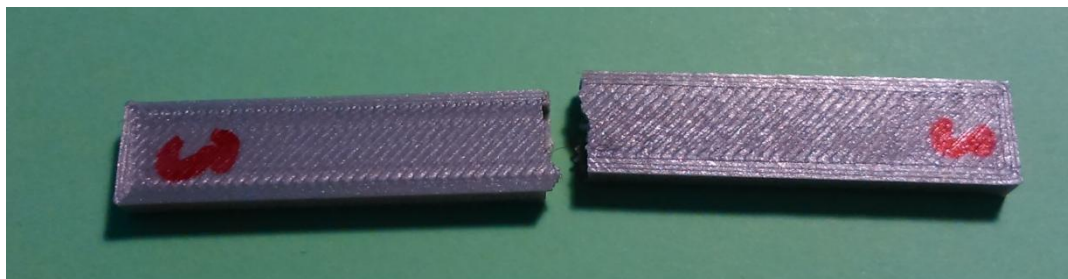
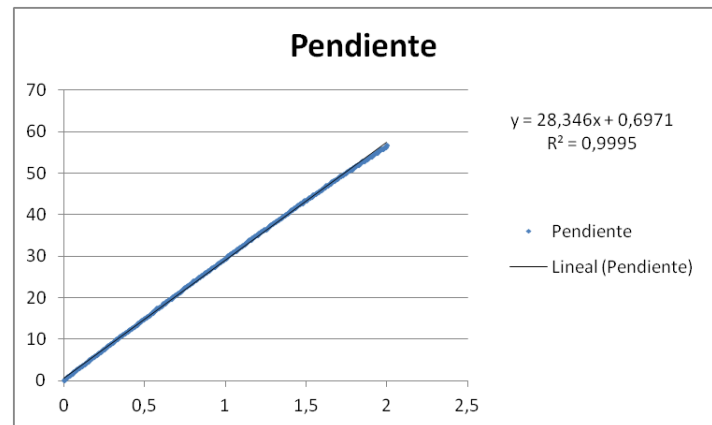


Figura 4.1.1.3.: Probeta PLA comercial tras el ensayo de flexión.

Muestra	4				
Largo (L)	60 mm			Carga max.(N)	108,17
Ancho (b)	10 mm			Alarg max.(mm)	6,36
Espesor (h)	3,97 mm			MOR(Mpa)	61,77
				Efl(Mpa)	2312,47
				efl (%)	4,21
				m(N/mm)	26,80

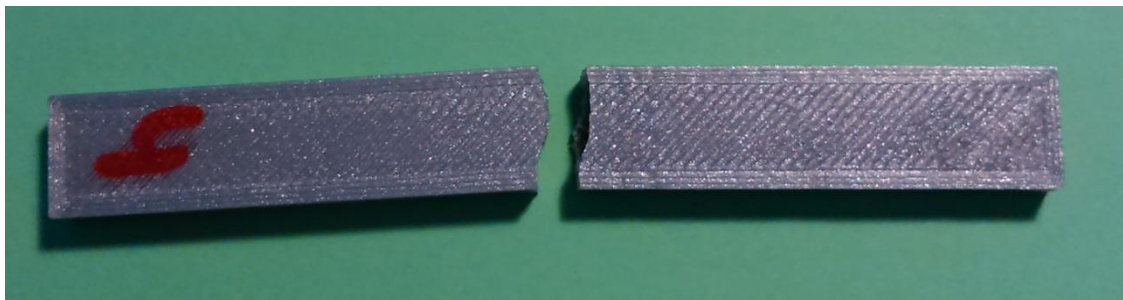
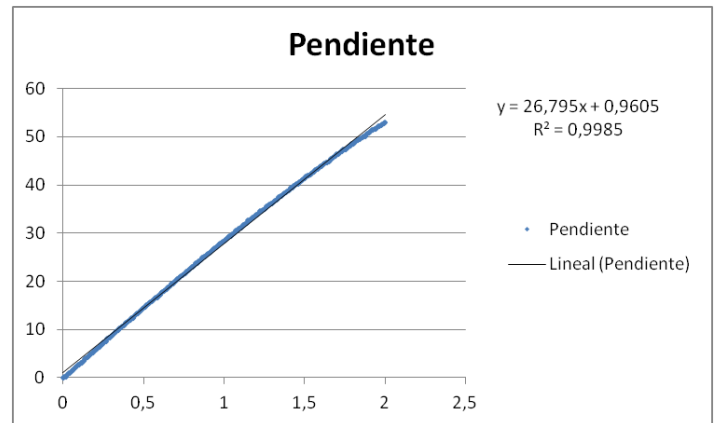


Figura 4.1.1.4.: Probeta PLA comercial tras el ensayo de flexión.

Muestra	5				
Largo (L)	60 mm			Carga max.(N)	117,86
Ancho (b)	10 mm			Alarg max.(mm)	6,38
Espesor (h)	4,03 mm			MOR(Mpa)	65,31
				Efl(Mpa)	2027,14
				efl (%)	4,29
				m(N/mm)	24,57

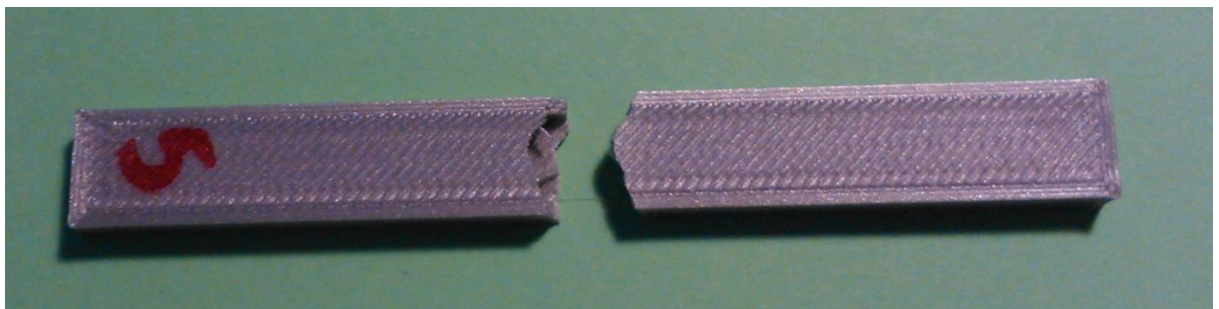
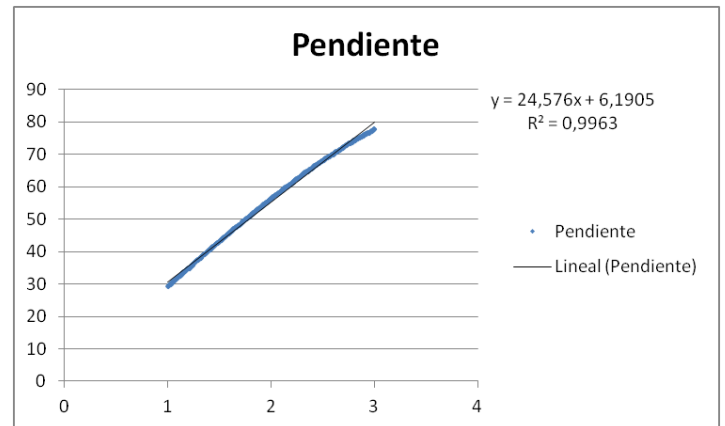


Figura 4.1.1.5.: Probeta PLA comercial tras el ensayo de flexión.

Como observamos en todas las fotografías de la tanda de probetas ensayadas, tras el esfuerzo a flexión, la probeta tiende a la rotura total en su parte central.

4.1.2 Probetas PLA Fabricado con relleno honey comb.

Muestra	A				
Largo (L)	60 mm			Carga max.(N)	100,03
Ancho (b)	10 mm			Alarg max.(mm)	7,63
Espesor (h)	3,94 mm			MOR(Mpa)	57,99
				Efl(Mpa)	1610,03
				efl (%)	5,01
				m(N/mm)	18,24

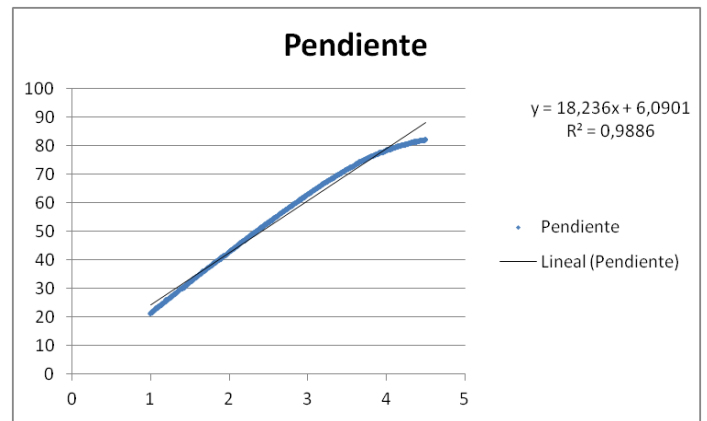


Figura 4.1.2.1.: Probetas de PLA fabricado tras el ensayo de flexión.

Como se observa en la Figura X, la probeta A no soporta el esfuerzo a flexión y termina por romper completamente en el punto central de flexión.

Muestra	B				
Largo (L)	60 mm			Carga max.(N)	48,52
Ancho (b)	10 mm			Alarg max.(mm)	5,24
Espesor (h)	3,73 mm			MOR(Mpa)	31,38
				Efl(Mpa)	1517,14
				efl (%)	3,26
				m(N/mm)	14,58

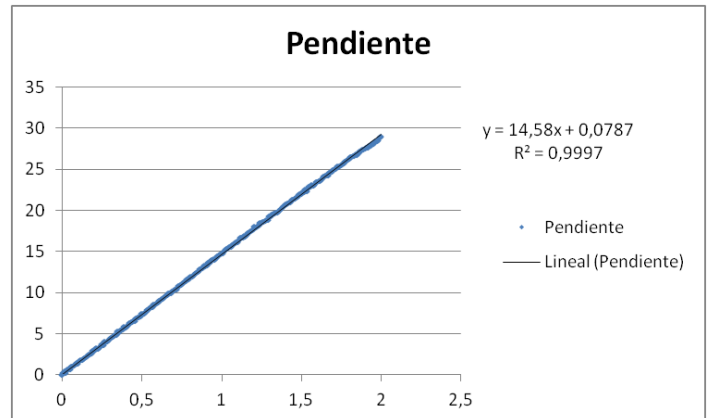


Figura 4.1.2.2.: Probeta PLA fabricado tras el ensayo de flexión.

Tras el ensayo, solo la probeta no rompe, pero si sufre una separación entre sus capas, que se aprecia en la cara inferior de la probeta.



Figura 4.1.2.3.: Separación de capa inferior de la probeta de PLA fabricado tras el ensayo de flexión.

Muestra	C				
Largo (L)	60 mm			Carga max.(N)	81,09
Ancho (b)	10 mm			Alarg max.(mm)	9,78
Espesor (h)	3,66 mm			MOR(Mpa)	54,48
				Efl(Mpa)	1676,35
				efl (%)	5,97
				m(N/mm)	15,22

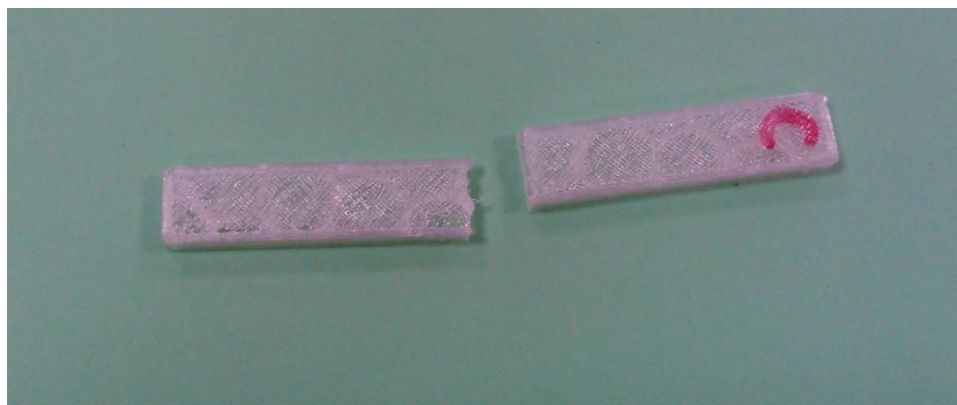
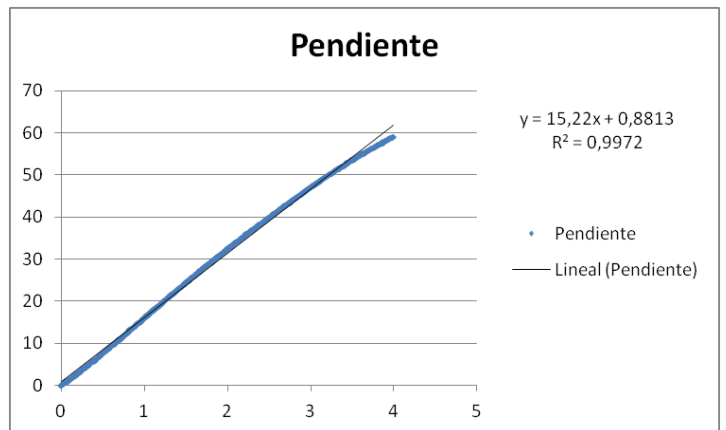
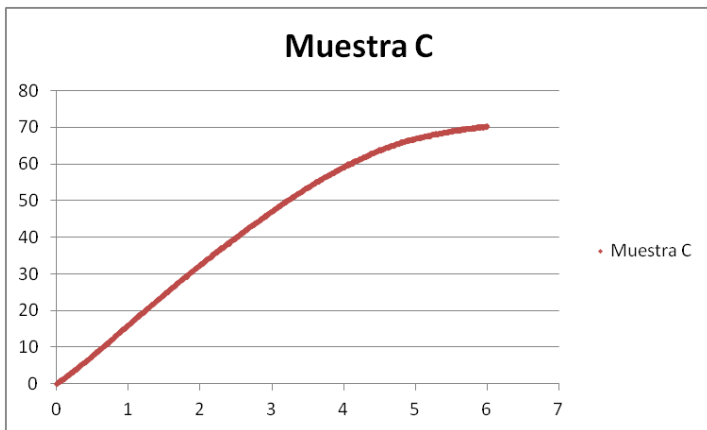


Figura 4.1.2.4.: Probeta PLA fabricado tras el ensayo de flexión.

La probeta no soporta el esfuerzo a flexión al que se la somete y termina por romper en su parte central.

Muestra	D				
Largo (L)	60 mm			Carga max.(N)	88,28
Ancho (b)	10 mm			Alarg max.(mm)	7,60
Espesor (h)	3,66 mm			MOR(Mpa)	59,31
				Efl(Mpa)	1909,52
				efl (%)	4,64
				m(N/mm)	17,337

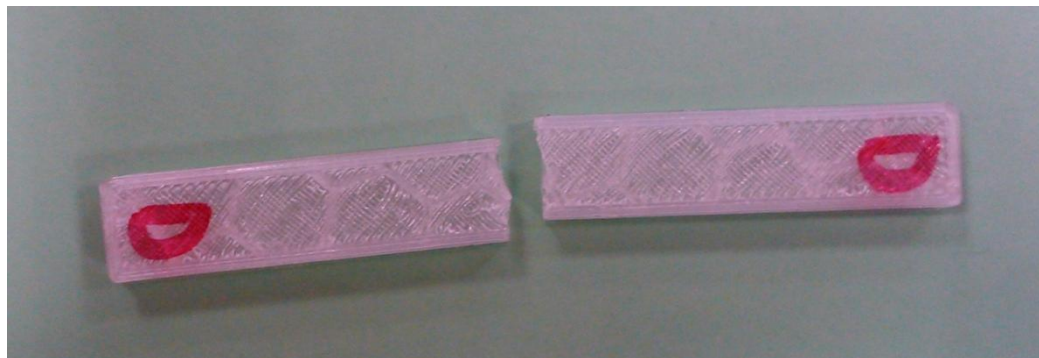
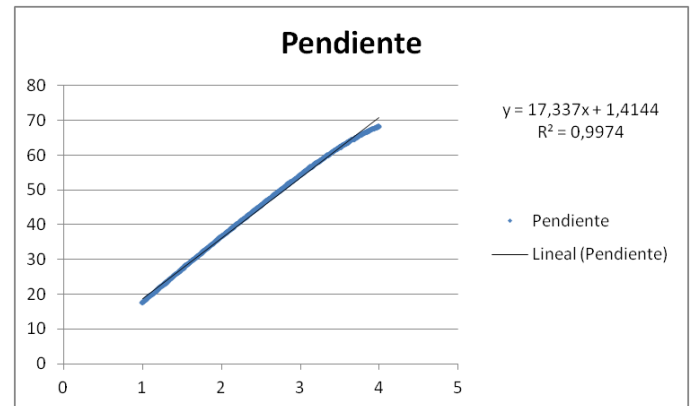


Figura 4.1.2.5.: Probeta PLA fabricado tras el ensayo de flexión.

Al igual que las probetas anteriores, no soporta el esfuerzo de flexión y termina por romper por la parte central.

Muestra	E				
Largo (L)	60 mm			Carga max.(N)	73,16
Ancho (b)	10 mm			Alarg max.(mm)	7,90
Espesor (h)	3,93 mm			MOR(Mpa)	42,63
				Efl(Mpa)	1351,64
				efl (%)	5,18
				m(N/mm)	15,193

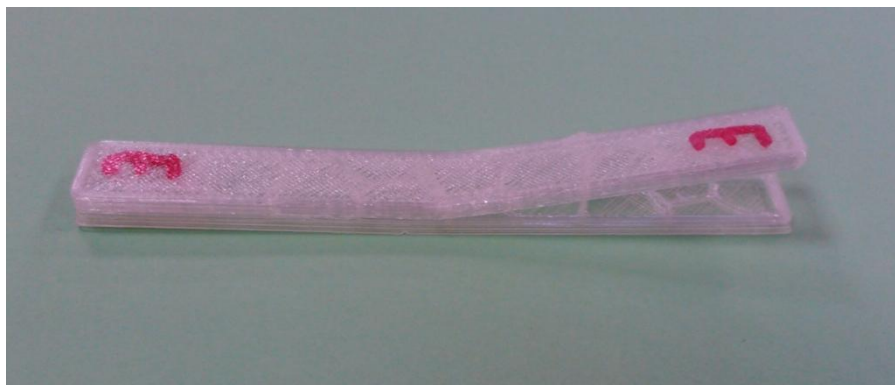
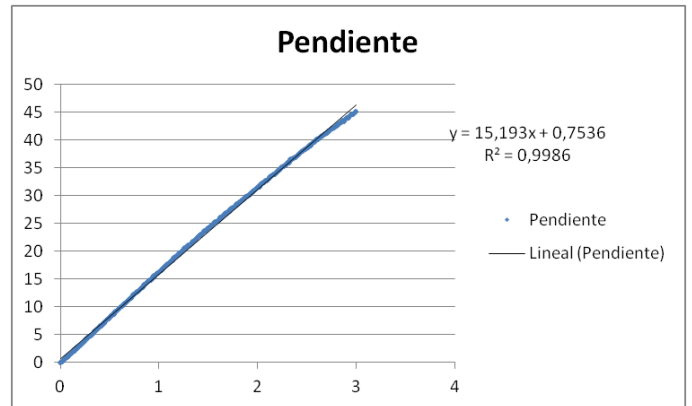


Figura 4.1.2.6.: Probeta PLA fabricado tras el ensayo de flexión.

Tal y como se observa en la imagen, la probeta no sufre rotura por el esfuerzo de flexión pero si hay una separación de capas. Esto puede deberse a una mala unión entre capas durante la impresión.

Muestra	F				
Largo (L)	60 mm			Carga max.(N)	46,97
Ancho (b)	10 mm			Alarg max.(mm)	7,33
Espesor (h)	3,8 mm			MOR(Mpa)	29,27
				Efl(Mpa)	906,65
				efl (%)	4,65
				m(N/mm)	9,2129

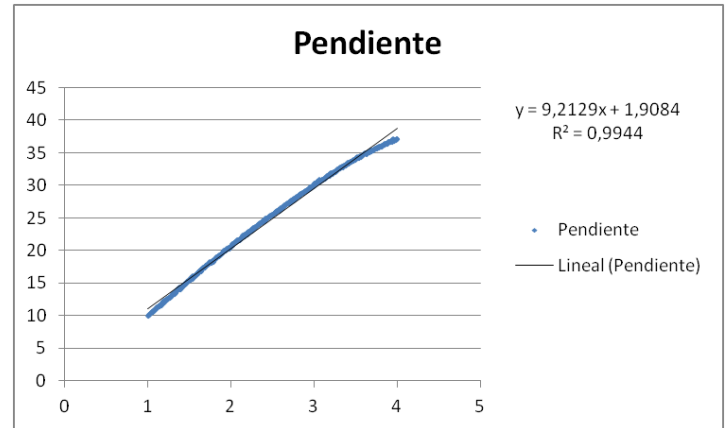
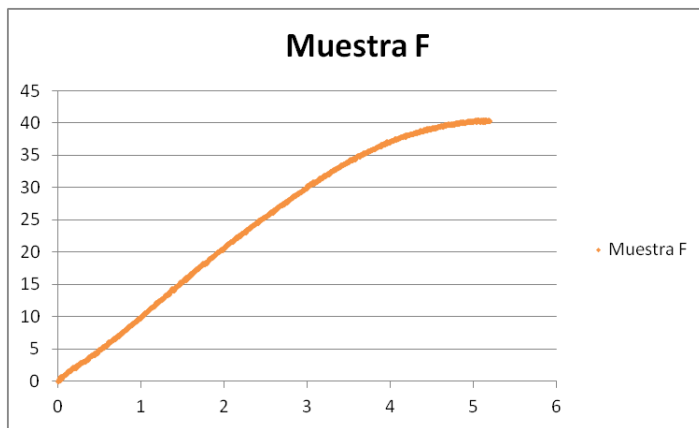


Figura 4.1.2.7.: Probeta PLA fabricado tras el ensayo de flexión.

Rotura en la mitad de la pieza ensayada tras el esfuerzo de flexión.

Muestra	20% (1)				
Largo (L)	60 mm			Carga max.(N)	55,42
Ancho (b)	10 mm			Alarg max.(mm)	14,58
Espesor (h)	3,9 mm			MOR(Mpa)	32,79
				Efl(Mpa)	965,86
				efl (%)	9,48
				m(N/mm)	10,61

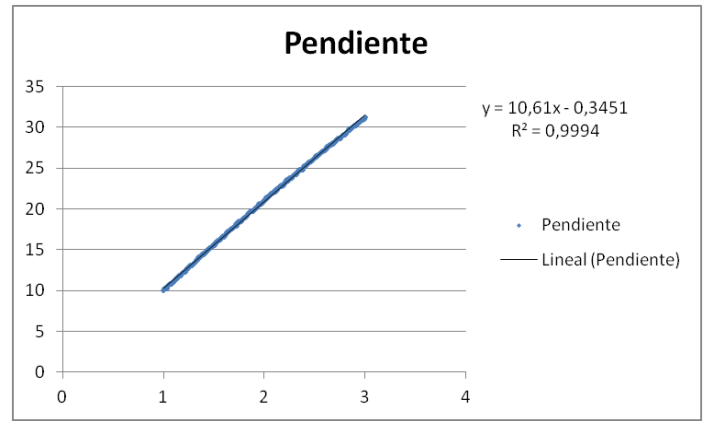


Figura 4.1.2.8.: Probeta PLA fabricado al 20% de relleno tras el ensayo de flexión.

Se observa separación de las capas en el punto de rotura tras el ensayo a flexión en la zona media de la probeta.

Muestra	20% (2)				
Largo (L)	60 mm			Carga max.(N)	65,72
Ancho (b)	10 mm			Alarg max.(mm)	6,21
Espesor (h)	3,73 mm			MOR(Mpa)	42,51
				Efl(Mpa)	1604,02
				efl (%)	3,86
				m(N/mm)	15,42

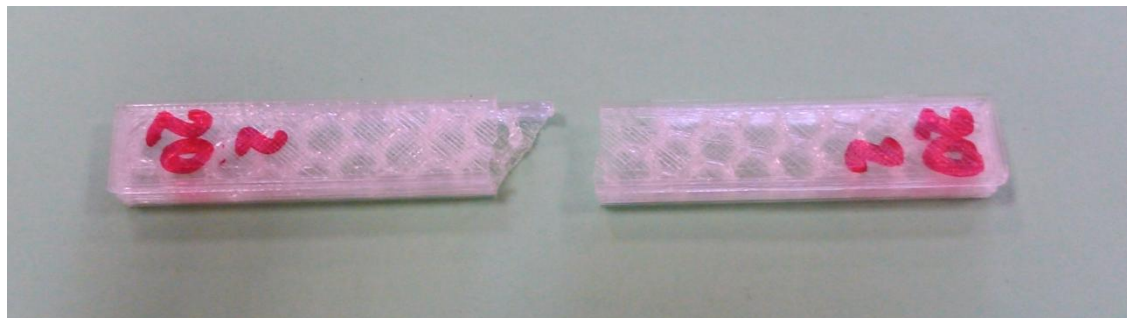
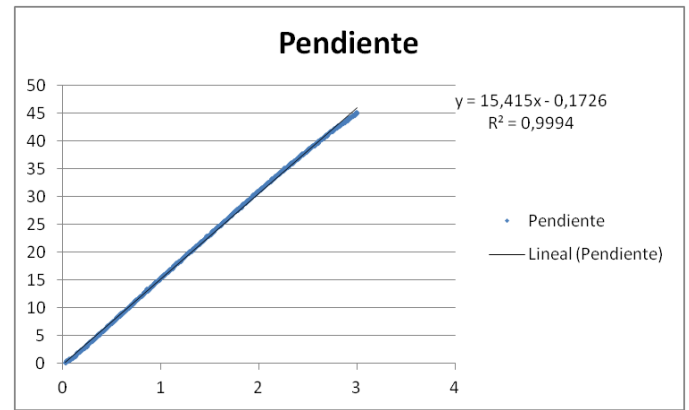
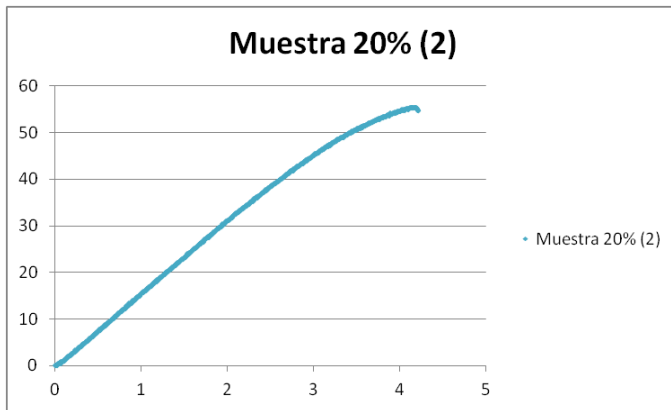


Figura 4.1.2.9.: Probeta de PLA fabricado al 20% de relleno tras el ensayo de flexión.

Se observa separación de las capas en el punto de rotura tras el ensayo a flexión en la zona media de la probeta. Si atendemos al módulo de rotura (MOR) de las probetas con relleno al 10% y las de 20%, se observa que la tensión que es capaz de soportar la probeta, es mayor cuando la densidad de relleno es menor.

4.1.3. Probetas PLA Comercial con relleno rectangular.

Muestra	1				
Largo (L)	60 mm			Carga max.(N)	95,19
Ancho (b)	10 mm			Alarg max.(mm)	9,39
Espesor (h)	3,99 mm			MOR(Mpa)	53,81
				Efl(Mpa)	1705,92
				efl (%)	6,25
				m(N/mm)	20,067

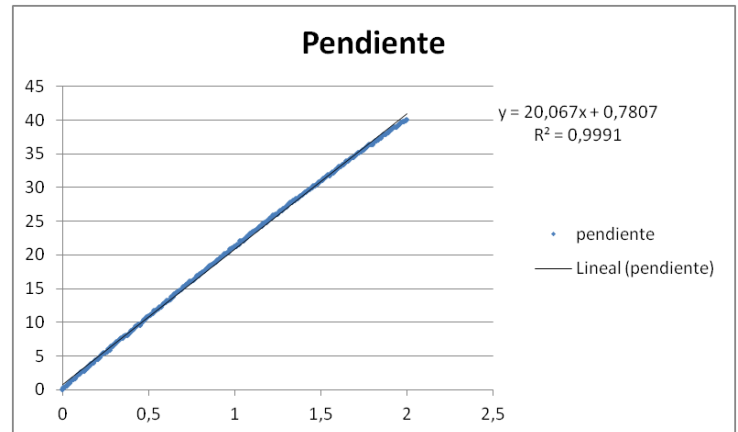


Figura 4.1.3.1.: Probeta PLA comercial tras el ensayo de flexión.

No se produce rotura total de la probeta tras el ensayo a flexión.

Muestra	2				
Largo (L)	60 mm			Carga max.(N)	93,77
Ancho (b)	10 mm			Alarg max.(mm)	8,36
Espesor (h)	3,9 mm			MOR(Mpa)	55,48
				Efl(Mpa)	1886,66
				efl (%)	5,43
				m(N/mm)	20,725

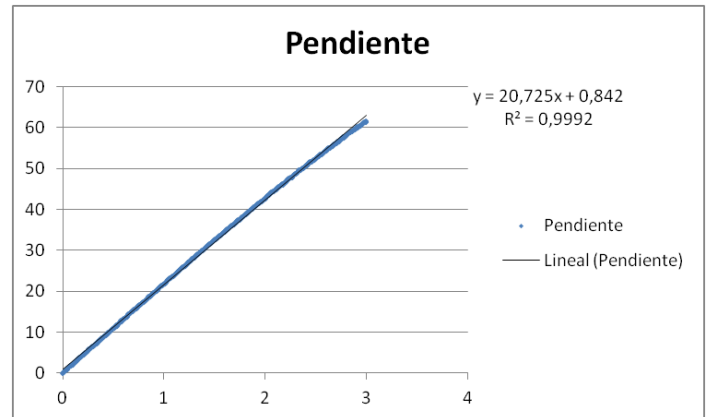


Figura 4.1.3.2.: Probeta PLA comercial tras el ensayo de flexión.

La probeta no es capaz de soportar el esfuerzo a flexión y se produce su rotura en la parte central.

Muestra	3				
Largo (L)	60 mm			Carga max.(N)	94,09
Ancho (b)	10 mm			Alarg max.(mm)	11,23
Espesor (h)	4 mm			MOR(Mpa)	52,93
				Efl(Mpa)	1692,73
				efl (%)	7,48
				m(N/mm)	20,062

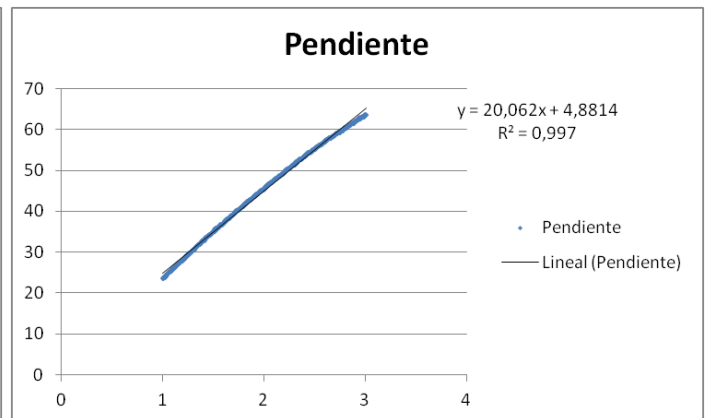


Figura 4.1.3.3.: Probeta PLA comercial tras el ensayo de flexión.

El esfuerzo de flexión no provoca la rotura total de la pieza.

Muestra	4				
Largo (L)	60 mm			Carga max.(N)	99,11
Ancho (b)	10 mm			Alarg max.(mm)	9,12
Espesor (h)	4,04 mm			MOR(Mpa)	54,65
				Efl(Mpa)	1705,02
				efl (%)	6,14
				m(N/mm)	20,82

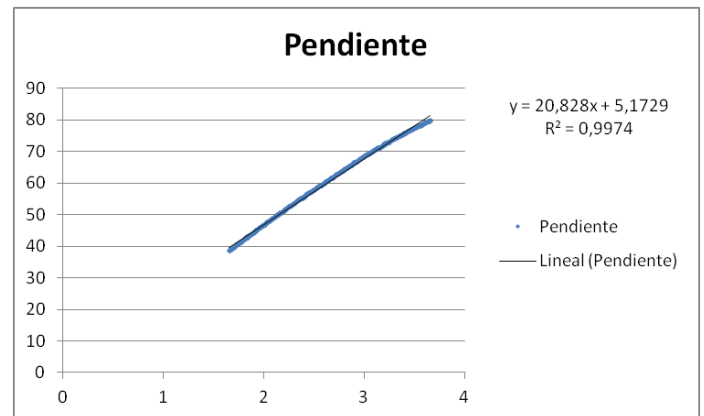


Figura 4.1.3.4.: Probeta PLA comercial tras el ensayo de flexión.

Comienza la rotura la probeta pero solo permanece flectada tras el ensayo.

Muestra	5				
Largo (L)	60 mm			Carga max.(N)	90,70
Ancho (b)	10 mm			Alarg max.(mm)	12,04
Espesor (h)	4,02 mm			MOR(Mpa)	50,51
				Efl(Mpa)	1610,90
				efl (%)	8,07
				m(N/mm)	19,38

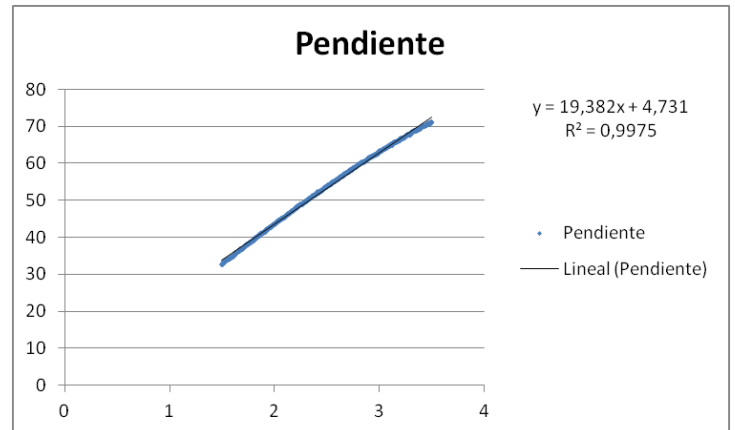
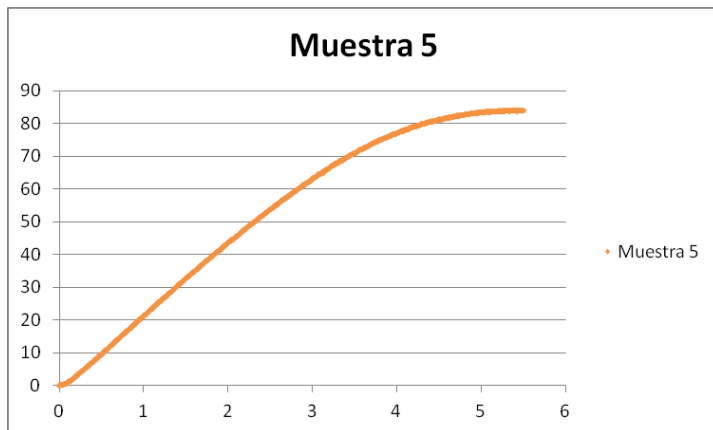


Figura 4.1.3.5.: Probeta PLA comercial tras el ensayo de flexión.

Se produce rotura en la cara inferior de la probeta tras el esfuerzo de flexión.

4.2. Ensayo mecánico de Tracción

4.2.1. Probetas PLA Comercial con relleno rectangular.

Muestra	1				
Largo (L)	170 mm			Esfuerzo (Mpa)	22,21
Ancho (b)	10,26 mm			Deformación Ext. (%)	1,45
Espesor (e)	3,92 mm			Mód. Elástico	1689,4
Area	40,2192 mm ²			Resistencia a tracción (MPa)	22,21
Lo	50 mm				

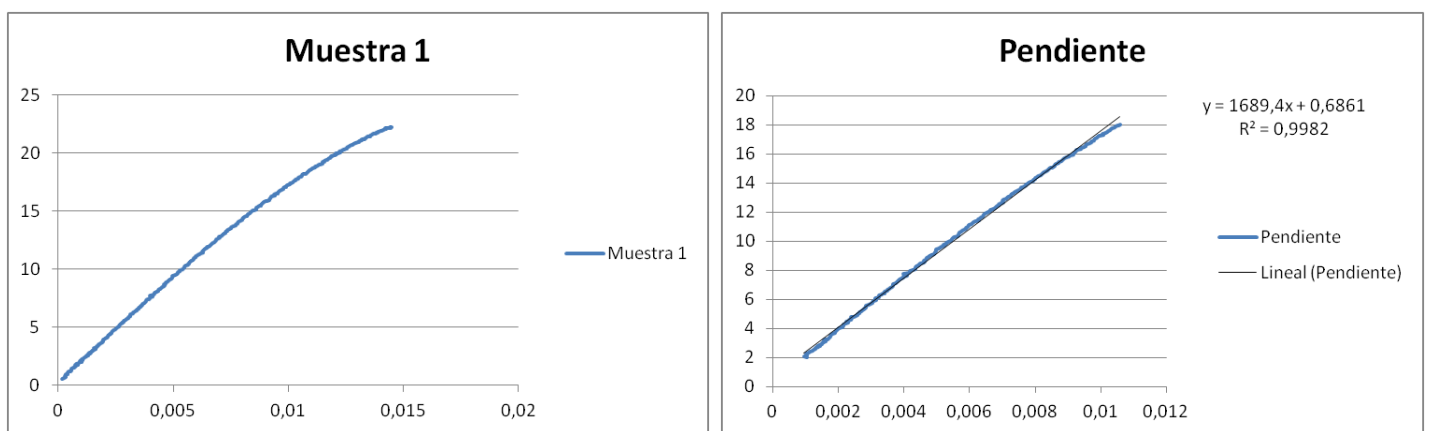


Figura 4.2.1.1.: Probeta PLA comercial tras el ensayo de tracción.

Tras el esfuerzo de tracción, la probeta sufre rotura en el extremo superior.

Muestra	2				
Largo (L)	170 mm			Esfuerzo (Mpa)	22,97
Ancho (b)	10,2 mm			Deformación Ext. (%)	1,69
Espesor (e)	3,97 mm			Mód. Elástico	1569,8
Area	40,494 mm ²			Resistencia a tracción (MPa)	22,97
Lo	50 mm				

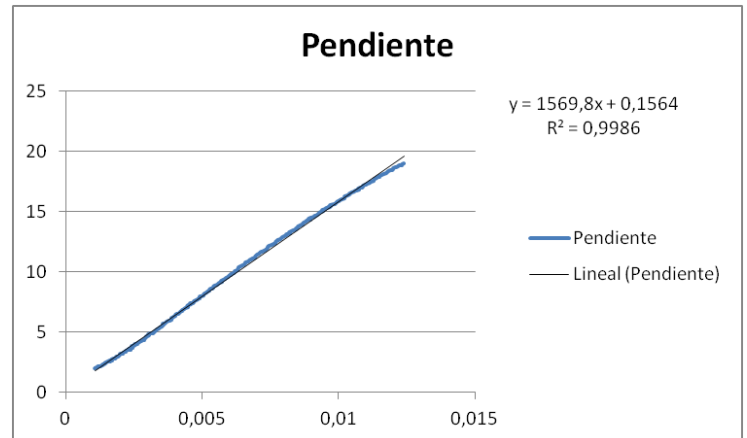


Figura 4.2.1.2.: Probeta PLA comercial tras el ensayo de tracción.

Tras el esfuerzo de tracción, la probeta sufre rotura en el extremo superior.

Muestra	3				
Largo (L)	170 mm			Esfuerzo (Mpa)	24,23
Ancho (b)	10,18 mm			Deformación Ext. (%)	2,17
Espesor (e)	4 mm			Mód. Elástico	1555,4
Area	40,72 mm ²			Resistencia a tracción (MPa)	24,23
Lo	50 mm				

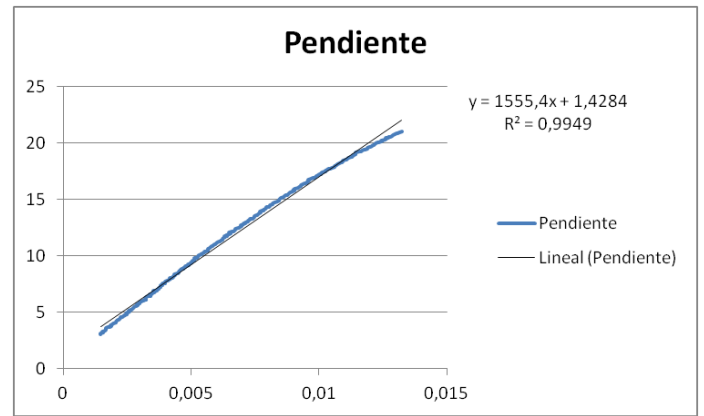
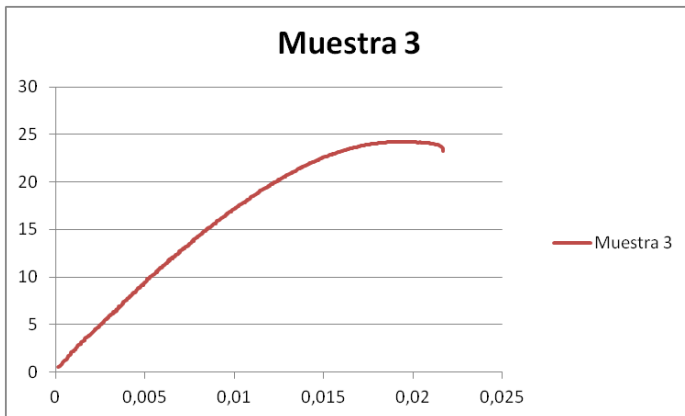


Figura 4.2.1.3.: Probeta PLA comercial tras el ensayo de tracción.

Al igual que las anteriores, la probeta tras el esfuerzo de tracción, sufre rotura en su extremo superior.

Muestra	4				
Largo (L)	170 mm			Esfuerzo (Mpa)	23,51
Ancho (b)	10,12 mm			Deformación Ext. (%)	1,67
Espesor (e)	4,05 mm			Mód. Elástico	1571,5
Area	40,986 mm ²			Resistencia a tracción (MPa)	23,51
Lo	50 mm				

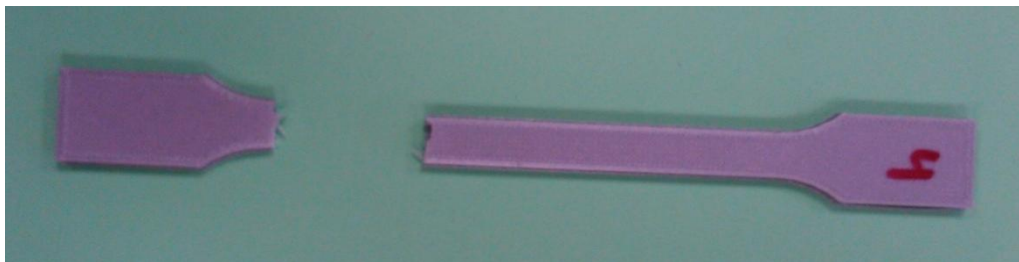
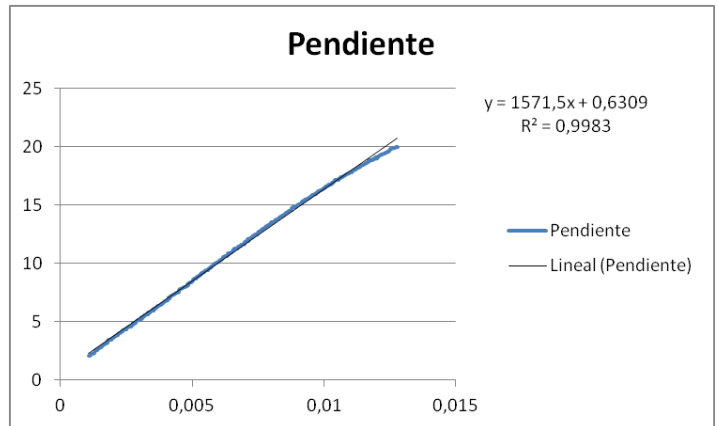
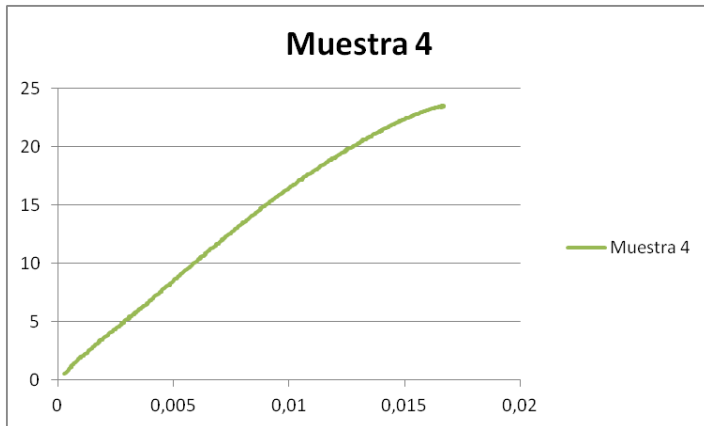


Figura 4.2.1.4.: Probeta PLA comercial tras el ensayo de tracción.

Tras el esfuerzo de tracción, la probeta sufre rotura en el extremo superior.

Muestra	5				
Largo (L)	170 mm			Esfuerzo (Mpa)	23,96
Ancho (b)	10,15 mm			Deformación Ext. (%)	2,09
Espesor (e)	3,96 mm			Mód. Elástico	1447
Area	40,194 mm ²			Resistencia a tracción (MPa)	23,96
Lo	50 mm				

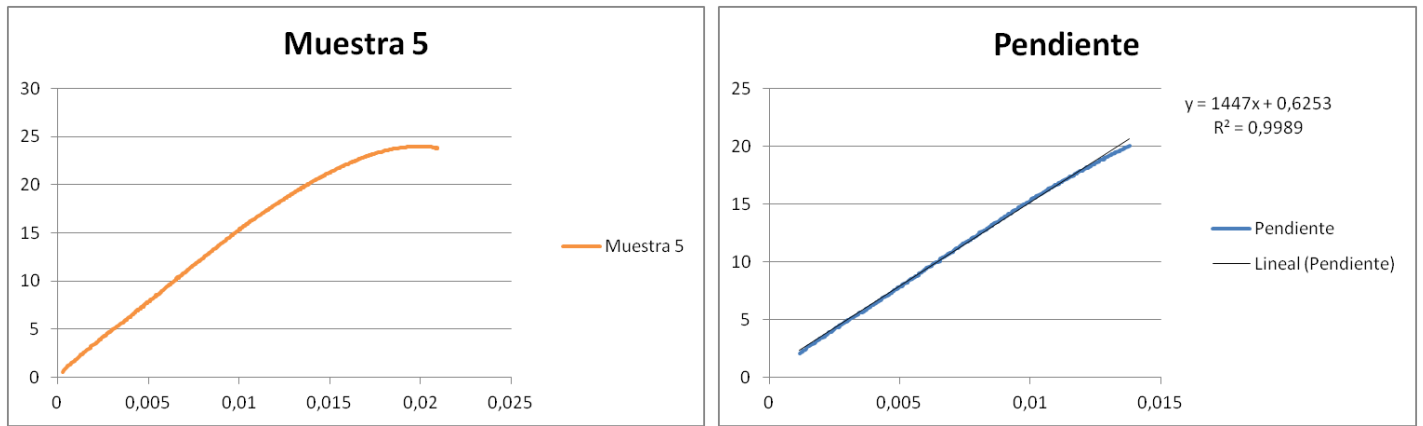


Figura 4.2.1.5.: Probeta PLA comercial tras el ensayo de tracción.

4.2.2. Probetas PLA Fabricado con relleno rectangular.

Muestra	A				
Largo (L)	170 mm			Esfuerzo (Mpa)	16,37
Ancho (b)	10,26 mm			Deformación Ext. (%)	1,79
Espesor (e)	3,88 mm			Mód. Elástico	1112,2
Area	39,8088 mm ²			Resistencia a tracción (MPa)	16,37
Lo	50 mm				

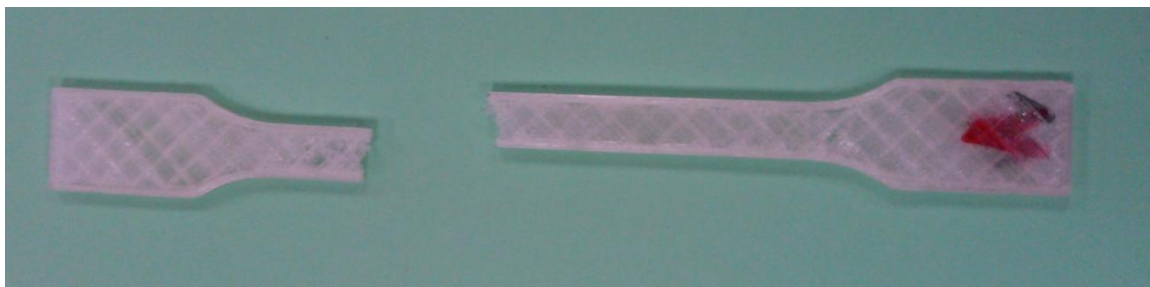
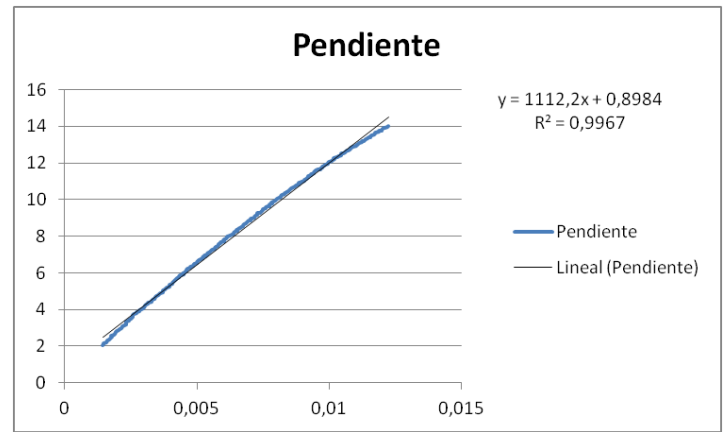
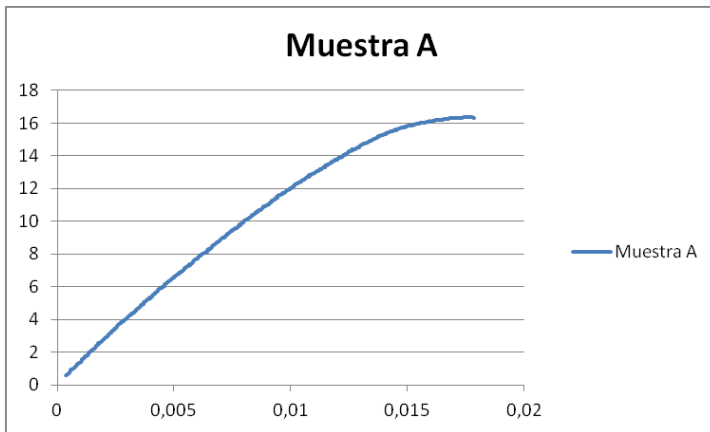


Figura 4.2.2.1.: Probeta PLA fabricado tras el ensayo de tracción.

Tras el ensayo de tracción la pieza sufre rotura en el extremo superior.

Muestra	B				
Largo (L)	170 mm			Esfuerzo (Mpa)	15,07
Ancho (b)	10,3 mm			Deformación Ext. (%)	1,85
Espesor (e)	3,83 mm			Mód. Elástico	999,39
Area	39,449 mm ²			Resistencia a tracción (MPa)	15,07
Lo	50 mm				

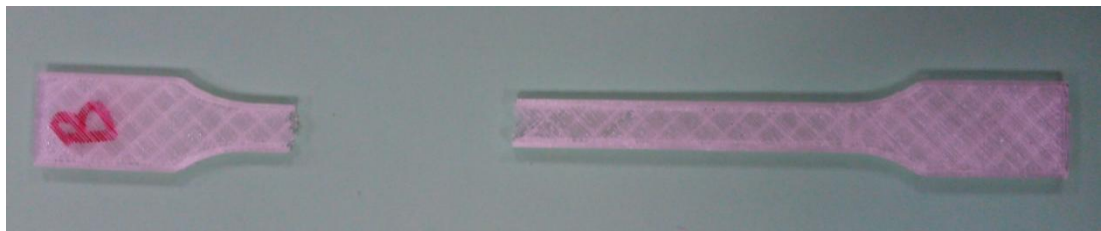
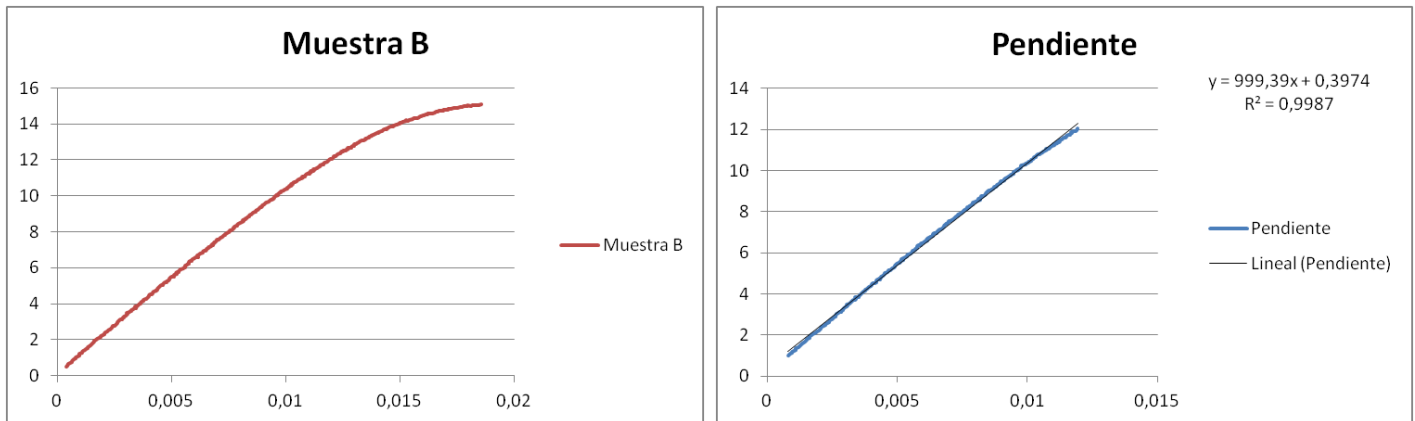


Figura 4.2.2.2.: Probeta PLA fabricada tras el ensayo de tracción.

Tras el ensayo de tracción la pieza sufre rotura en el extremo superior.

Muestra	C				
Largo (L)	170 mm			Esfuerzo (Mpa)	20,82
Ancho (b)	10,35 mm			Deformación Ext. (%)	1,37
Espesor (e)	3,87 mm			Mód. Elástico	1507,5
Area	40,0545 mm ²			Resistencia a tracción (MPa)	20,82
Lo	50 mm				

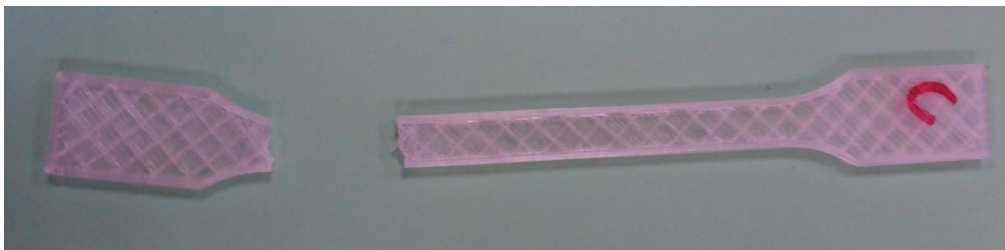
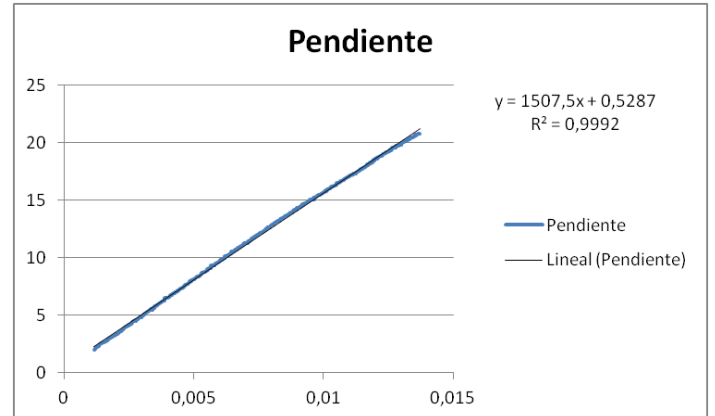
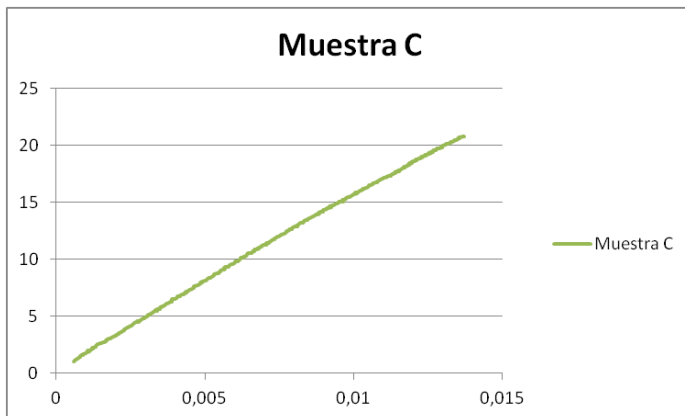


Figura 4.2.2.3.: Probeta PLA fabricado tras el ensayo de tracción.

Tras el ensayo de tracción la pieza sufre rotura en el extremo superior.

Muestra	D				
Largo (L)	170	mm			Esfuerzo (Mpa)
Ancho (b)	10,67	mm			Deformación Ext. (%)
Espesor (e)	3,7	mm			Mód. Elástico
Area	39,479	mm ²			Resistencia a tracción (MPa)
Lo	50	mm			

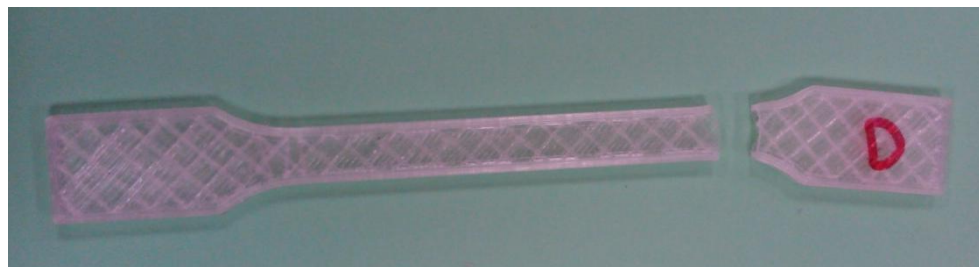
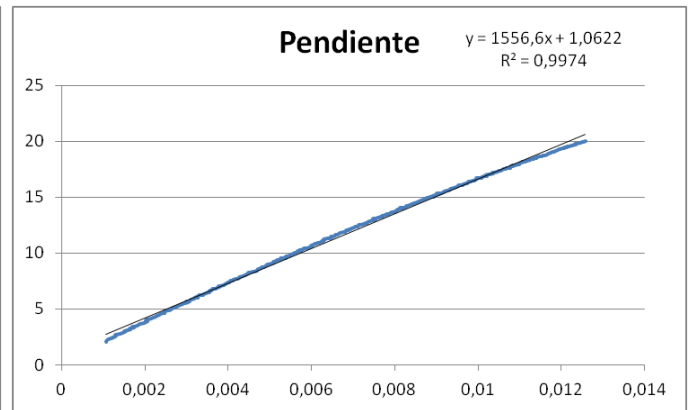
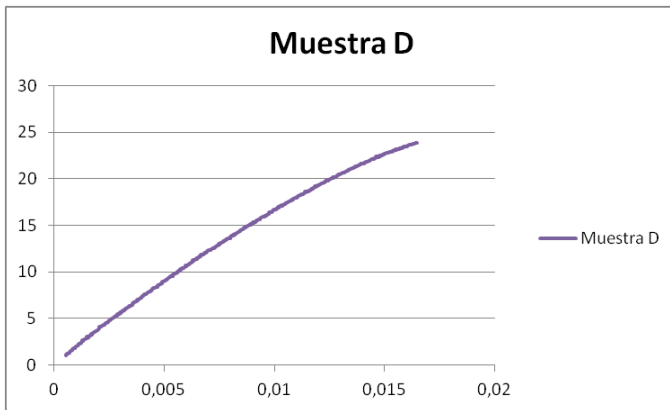


Figura 4.2.2.4.: Probeta PLA fabricada tras el ensayo de tracción.

Como en los casos anteriores, tras el esfuerzo de tracción la probeta sufre rotura en su extremo superior.

Muestra	E				
Largo (L)	170 mm			Esfuerzo (Mpa)	8,60
Ancho (b)	10,27 mm			Deformación Ext. (%)	0,75
Espesor (e)	3,76 mm			Mód. Elástico	1095,5
Area	38,6152 mm ²			Resistencia a tracción (MPa)	8,598461228
Lo	50 mm				

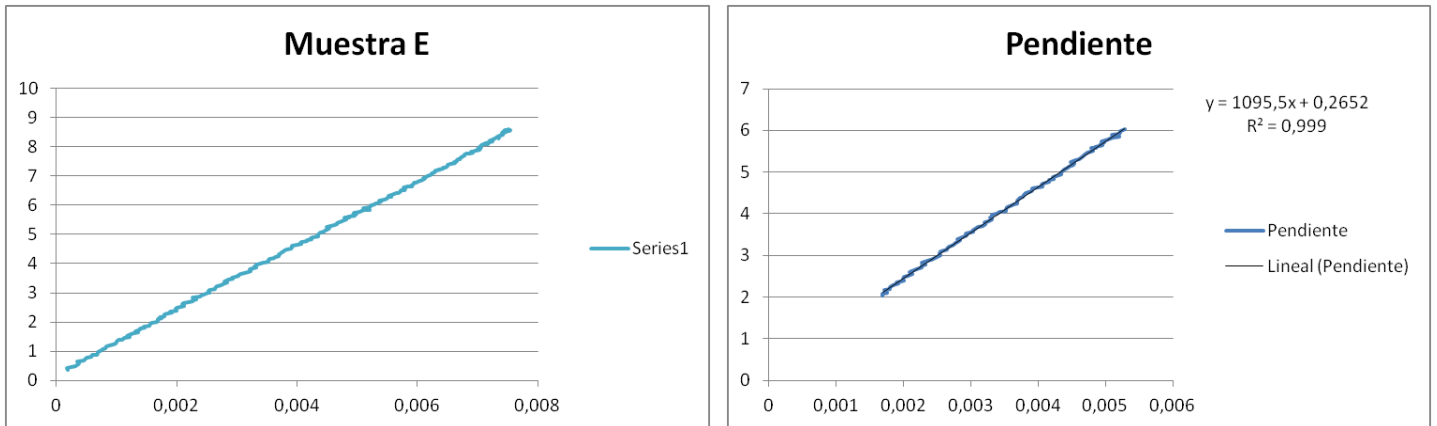


Figura 4.2.2.5.: Probeta PLA fabricado tras el ensayo de tracción.

Como en los casos anteriores, tras el esfuerzo de tracción la probeta sufre rotura en su extremo superior.

Muestra	F				
Largo (L)	170 mm			Esfuerzo (Mpa)	19,44
Ancho (b)	10,49 mm			Deformación Ext. (%)	1,22
Espesor (e)	3,78 mm			Mód. Elástico	1549
Area	39,6522 mm ²			Resistencia a tracción (MPa)	19,44
Lo	50 mm				

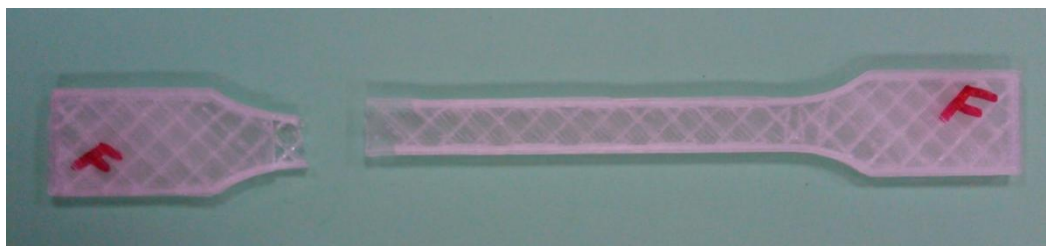
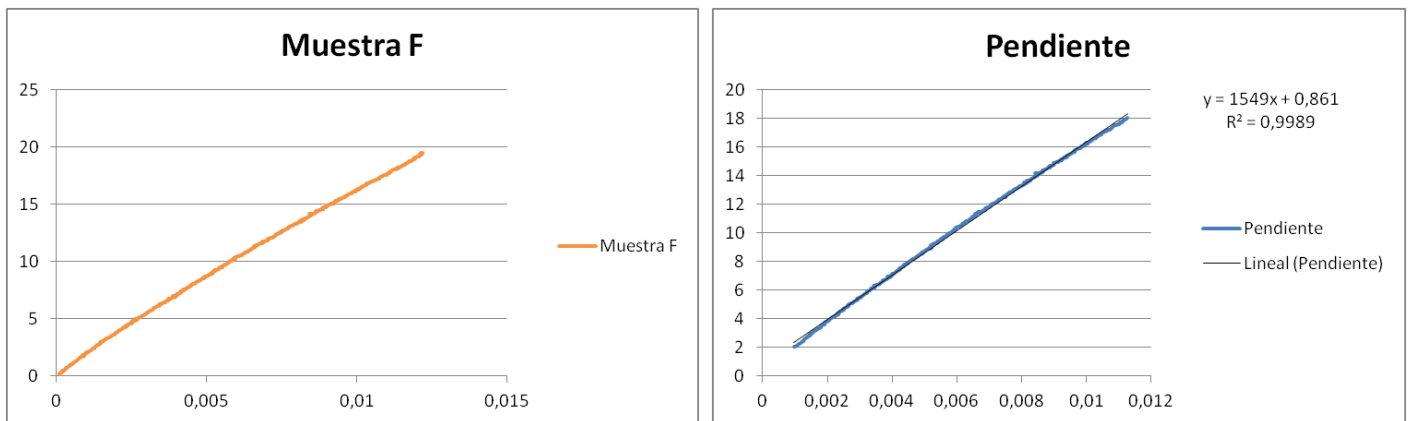


Figura 4.2.2.6.: Probeta PLA fabricado tras el ensayo de tracción.

La probeta, tras el esfuerzo de tracción, sufre rotura en su extremo superior.

Muestra	G				
Largo (L)	170 mm			Esfuerzo (Mpa)	18,62
Ancho (b)	10,23 mm			Deformación Ext. (%)	1,39
Espesor (e)	3,6 mm			Mód. Elástico	1356,1
Area	36,828 mm ²			Resistencia a tracción (MPa)	18,62
Lo	50 mm				

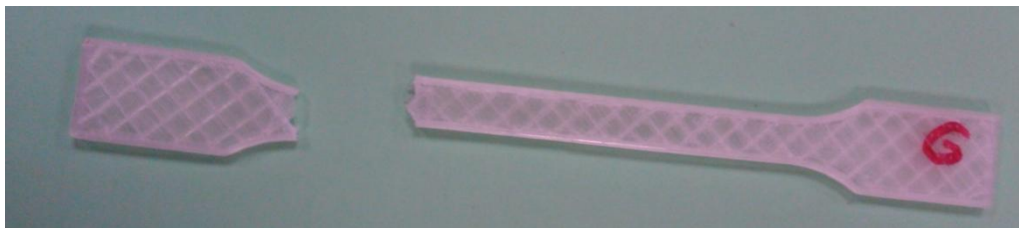
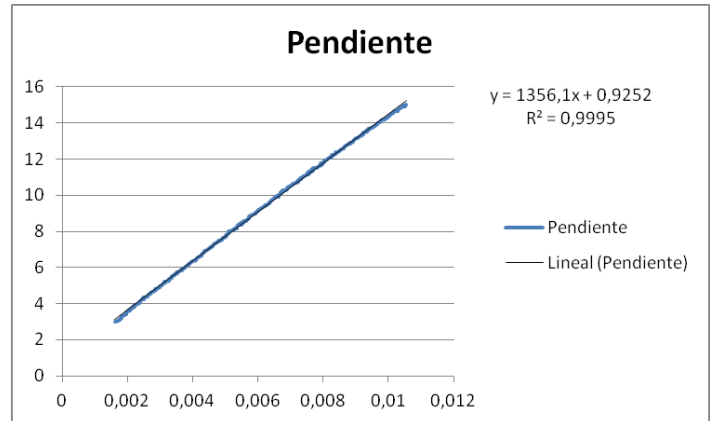
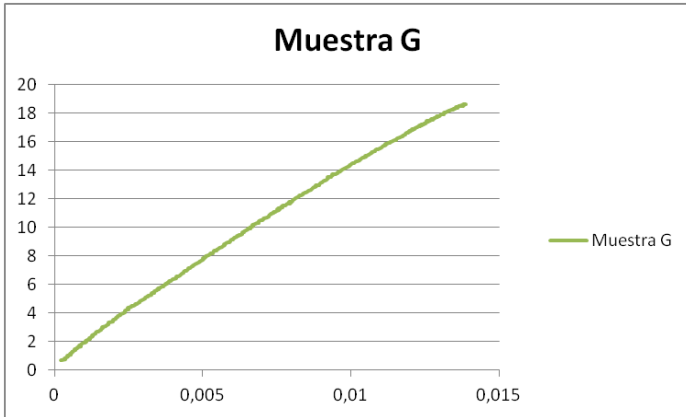


Figura 4.2.2.7.: Probeta PLA fabricado tras el ensayo de tracción.

Como en los casos anteriores, la probeta sufre rotura en su extremo tras el esfuerzo de tracción.

5. Anexo de Puntos cuestionables de la impresión 3D

A lo largo de la memoria hemos presentado y comentado todas las ventajas que aporta la tecnología de impresión 3D, tanto al mundo comercial como al mundo no industrializado. Es perceptible para todos, el enorme impacto positivo de la impresión 3D en la economía en general y, en particular, en sectores industriales, campos de medicina y salud, cultural, defensa, construcción, alimentación y moda. Esto se debe a que existen muy pocas barreras para que cualquiera pueda diseñar e imprimir lo que quiera, de manera que se ofrecen grandes oportunidades a los emprendedores y empresas pero, al mismo tiempo, pone en riesgo el status quo imperante desde la Revolución Industrial.

Existen varios puntos relacionados con la impresión 3D que son cuestionables, puesto que plantean aspectos muy negativos para el desarrollo y ya muchos foros y blogs de impresión 3D debaten en torno a estos temas.

La fabricación tridimensional permite un prototipado rápido de una idea industrial, el uso eficiente de los recursos, la producción en pequeños lotes y de forma rápida y ágil. Reduce la necesidad de producción en fábricas alentando la producción remota y móvil y anima al uso de materia prima local (acortando el canal de aprovisionamiento). Todo son ventajas pero la verdad es que hay problemas a resolver, no solo a nivel de calidad de proceso, como la mejora de los fallos de impresión que hemos visto anteriormente. A continuación, mostramos un breve resumen de estos puntos que nos parecen interesantes reflejar en el proyecto para generar cierto debate y que se evidencien todos los puntos de vista que engloba el mundo de la impresión en tres dimensiones [30] [34].

- ✓ **Alto consumo de energía:** Según un estudio de la Universidad de Loughborough para fabricar un objeto del mismo peso y tamaño las impresoras 3D consumen entre 50 y 100 veces más energía eléctrica que los sistemas de moldeo por inyección. Es cierto que impresoras de pequeñas dimensiones, como las que comúnmente se suelen tener en hogares o pequeñas empresas que puntualmente precisan de este tipo de tecnología, el

consumo de energía es mucho menor y hacen que esta técnica de conformación sea responsable, pero en el ámbito industrial, de producción en cadena, no podría competir.

- ✓ **Derechos de Propiedad Intelectual y Patentes:** La expansión a la que se encuentra actualmente la impresión 3D preocupa a diversos sectores industriales, puesto que se distribuyen objetos protegidos con patentes. La expansión con licencias favorecerá a los creadores y eliminará muchos actores de la cadena de valor y distribución; y si se fomenta la distribución en mercados menos lícitos, las grandes marcas sufrirán una desventaja competitiva que pueden no llegar a hacer frente. Esto recuerda la situación de la industria de la música y el cine que se muestran agredidos por la piratería digital y las descargas de canciones y películas compartidas en internet.

- ✓ **Alto nivel contaminante:** Los materiales más utilizados para la impresión 3D son el PLA y el ABS. Son termoplásticos estables adaptados a los extrusores. Según un estudio del Instituto de Tecnología de Illinois, cuando la impresora 3D trabaja con materiales como estos, emite 20 mil millones de micro-partículas por minuto, que se depositan en los pulmones o en el torrente sanguíneo y plantean riesgos para la salud, especialmente, para los enfermos de asma. Los filamentos ABS son los más utilizados y son más contaminantes, por un lado, emiten hasta 200 mil millones de micro-partículas por minuto; y por otro, al llegar al punto de fusión el ABS desprende gases que en concentraciones altas pueden ser nocivos. Se pueden utilizar sin problemas en casa o en la oficina, pero para evitar las concentraciones altas no se recomienda tener varias impresoras funcionando en un espacio pequeño y sin ventilar.

✓ **Vacío legal relacionado con la impresión de armas:** La primera pistola confeccionada con impresora 3D, hizo reflexionar a los gobiernos sobre el peligro que podría implicar el descontrol sobre este tipo de objetos para el orden público. No obstante no hay que olvidar, que también existen páginas en internet que explican e ilustran cómo fabricar armas con elementos de bricolajes. La diferencia es que las armas creadas mediante impresión 3D son más fáciles de fabricar y muchas son invisibles a los detectores de metales ni rayos X.

✓ **Responsabilidad de los fabricantes:** Cuando se diseña y fabrica un producto los fabricantes deben cumplir con una compleja normativa de calidad tendente a proteger la salud, el medioambiente, la seguridad... Cuando un usuario particular imprime en 3D un diseño realizado por otro particular surgen muchas dudas sobre quién o quienes deben responder por la responsabilidad civil derivada de daños a terceros provocados por el producto de la impresión.

✓ **Impresión 3D de Drogas:** El investigador químico y ponente de TEDTalks Lee Cronin, contaba que habían desarrollado un prototipo de impresora 3D capaz de integrar componentes químicos a nivel molecular con el fin de implementar un sistema de distribución de medicamentos de prescripción médica. El peligro que puede suponer este avance es que este sistema sea utilizado por el narcotráfico para distribuir sustancias como cocaína, éxtasis, LSD y otras drogas de diseño.

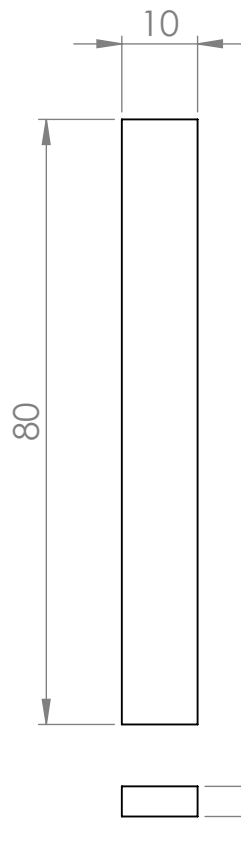
Además de estos puntos comentados, también podríamos hablar de la dependencia de materiales plásticos para la impresión, los debates que se generan en torno a la bioimpresión, los riesgos que se plantean alrededor de la seguridad nacional o la problemática de los objetos que se ponen en contacto con comestibles. Todo avance supone generar una reflexión acerca de las cosas que se han hecho o se pueden hacer mal. Todo depende del grado de compromiso que el individuo o las instituciones quieran hacer en favor al desarrollo, sin pretender lucrarse o favorecer a un sector reducido de la población.




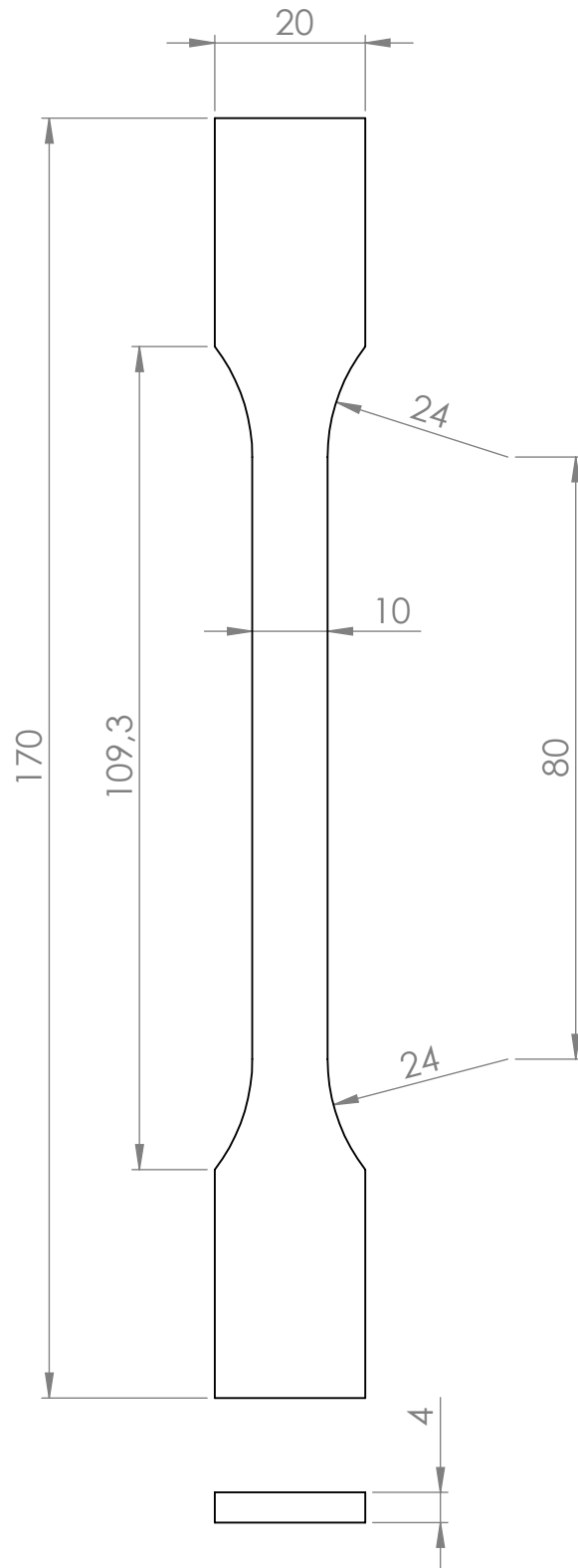
Figura 5.1.: Ejemplo de biotecnología con impresión 3D que actualmente es objeto de debate.
[34]

6. Anexo de Fabricación de probetas (Planos)

Para la fabricación de las probetas se han seguido las normas UNE-EN-ISO 178:2010 [1] y Norma UNE-EN-ISO 527:2012 [2]. A continuación se presentan los planos del diseño CAD de las probetas que se han tenido que imprimir para el estudio mecánico del filamento.



PRACTICA N°			
	Fecha	Autor	 ESCUELA SUPERIOR INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Nombre	JULIO	LAURA	
Apellidos		ARTEAGA MEDINA	
Id. s. normas	UNE-EN-DIN		
ESCALA: 1:1	Probeta para ensayo de Flexión Norma UNE-EN-ISO 178:2010		Nº P. :1 Nom.Arch: Probeta de Flexión



Fabricación y caracterización de filamentos para impresora 3D a partir de materiales reciclados				
	Fecha	Autor		ESCUELA SUPERIOR INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Nombre	JULIO	LAURA		
Apellidos		ARTEAGA MEDINA		
Id. s. normas	UNE-EN-DIN			
ESCALA: 1:1	Probeta para ensayo de Tracción Norma UNE-EN-ISO 527:2012			Nº P. :2 Nom.Arch: ProbetaTracción