

TRABAJO FIN DE GRADO

CARACTERIZACIÓN DE FILAMENTO DE PLA RECICLADO PARA IMPRESIÓN 3D

Titulación

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor

Fernando Delgado Ayala

Tutores

María Milagros Laz Pavón

José Antonio Valido García



ÍNDICE GENERAL

1. HOJA DE IDENTIFICACIÓN	1
2. RESUMEN	2
3. ABSTRACT	3
4. OBJETO DEL PROYECTO	4
5. ALCANCE DEL PROYECTO	5
6. ANTECEDENTES DEL PROYECTO	6
7. LA FABRICACIÓN ADITIVA	7
7.1 INTRODUCCIÓN IMPRESIÓN 3D.....	7
7.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS.....	8
7.3 APLICACIONES	10
7.4 TÉCNICAS DE IMPRESIÓN 3D.....	11
7.4.1 Estereolitografía (SLA)	12
7.4.2 Multi-Jet Modeling (MJM).....	13
7.4.3 Creación rápida de prototipos por congelación (RFP).....	13
7.4.4 Sinterizado selectivo (SLS).....	13
7.4.5 Fabricación de objetos laminados (LOM)	14
8. MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA (FDM)	15
8.1 DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA DE IMPRESIÓN	15
8.2 PARÁMETROS DE IMPRESIÓN	16
8.3 MATERIALES PARA MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA	18
8.3.1 PLA	18
8.3.2 Otros materiales	19
8.4 TIPOS DE IMPRESORAS FDM	20
8.4.1 Impresora 3D cartesiana	21
8.4.2 Impresora 3D delta	21
8.4.3 Impresora 3D polar	22
8.4.4 Impresora 3D de brazo robótico.....	23
9. PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO	24
10. EQUIPO EMPLEADO	26
10.1 EXTRUSORA FILABOT ORIGINAL	26
10.2 IMPRESORA FORMBOT T-REX 2+	27
10.3 MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYO	28
10.4 CALIBRADOR DIGITAL	28
10.5 TRITURADORA	29
11. REQUERIMIENTOS DE DISEÑO	30
12. ANÁLISIS DE SOLUCIONES	31
12.1 SITUACIÓN DE PARTIDA Y DISEÑO FINAL.....	31

12.2	SUBCONJUNTO 1: ACOPLE DEL SISTEMA EXTRUSOR MOTORIZADO	33
12.3	SUBCONJUNTO 2: GUÍA DE FILAMENTO MEDIANTE TUBO PTFE	35
12.4	SUBCONJUNTO 3: SISTEMA DE RAÍLES PARA LA EXTRUSORA	37
12.5	SUBCONJUNTO 4: GUÍA DE FILAMENTO PREVIA AL BOBINADO	39
12.6	OTRAS PIEZAS DISEÑADAS	40
12.6.1	<i>Electrónica y regulación del motor</i>	40
12.6.2	<i>Pasador de cable.....</i>	41
13.	PLAN EXPERIMENTAL DE PROBETAS.....	42
13.1	DISEÑO DE PROBETAS.....	42
13.2	IMPRESIÓN DE PROBETAS	44
14.	OBTENCIÓN DE FILAMENTO	46
14.1	TRITURADO DE PLA	46
14.2	OBTENCIÓN DE FILAMENTO EN EL LABORATORIO	47
14.3	DETERMINACIÓN DEL FILAMENTO IMPRIMIBLE	48
15.	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA.....	51
15.1	ENSAYO DE TRACCIÓN	51
15.1.1	<i>Introducción al ensayo de tracción.....</i>	51
15.1.2	<i>PLA industrial.....</i>	53
15.1.3	<i>PLA reciclado.....</i>	55
15.1.4	<i>Ensayo de tracción: PLA industrial vs PLA reciclado.....</i>	58
15.2	ENSAYO DE COMPRESIÓN.....	60
15.2.1	<i>Introducción.....</i>	60
15.2.2	<i>PLA industrial.....</i>	62
15.2.3	<i>PLA reciclado.....</i>	64
15.2.4	<i>Ensayo de compresión: PLA industrial vs PLA reciclado</i>	66
15.3	ENSAYO DE FLEXIÓN	68
15.3.1	<i>Introducción.....</i>	68
15.3.2	<i>PLA industrial.....</i>	70
15.3.3	<i>PLA reciclado.....</i>	72
15.3.4	<i>Ensayo de flexión: PLA industrial vs PLA reciclado</i>	75
16.	CONCLUSIONES.....	78
17.	LÍNEA FUTURA	80
18.	NORMATIVA	81
19.	BIBLIOGRAFÍA	82
20.	ANEXO I: DIMENSIONES Y MASAS DE LAS PROBETAS.....	85
20.1	ENSAYO DE TRACCIÓN	85
20.2	ENSAYO DE COMPRESIÓN.....	86
20.3	ENSAYO DE FLEXIÓN	87
21.	ANEXO II: FICHA TÉCNICA FILAMENTO PLA BQ.....	88
22.	ANEXO III: GRÁFICAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN	89
22.1	ENSAYO A TRACCIÓN	89

22.2	ENSAYO A COMPRESIÓN.....	94
22.3	ENSAYO A FLEXIÓN	99
23.	ANEXO IV: CARACTERIZACIÓN FILAMENTO RECICLADO	104
24.	ANEXO V: RENDERS CONJUNTO	106
25.	ANEXO VI: PRESUPUESTO.....	108
25.1	PRESUPUESTO DE IMPRESIÓN 3D.....	108
25.2	PRESUPUESTO DE MATERIAL.....	109
25.3	PRESUPUESTO TOTAL	109
26.	ANEXO VII: PLANOS	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Pasos de un proceso de fabricación aditiva [4]	8
Figura 2. Liberator, primer diseño de arma de fuego para impresión 3D [7]	10
Figura 3. Prótesis funcional de dedo de la empresa Naked Prosthetics [12]	11
Figura 4. Tipos de fabricación aditiva [2]	12
Figura 5. Esquema descriptivo de una máquina SLA [14]	12
Figura 6. Esquema descriptivo de una máquina MJM [14]	13
Figura 7. Esquema descriptivo de una máquina SLS [14]	14
Figura 8. Esquema descriptivo de una máquina LOM [14]	14
Figura 9. Esquema descriptivo de una máquina FDM [14]	15
Figura 10. Diferentes espesores de pared [19]	16
Figura 11. Distintos porcentajes de relleno [20]	17
Figura 12. Diferentes tipos de relleno [21]	17
Figura 13. Unidad estructural del polímero PLA [23]	18
Figura 14. Filamento comercial de PLA empleado [25]	19
Figura 15. Características de los principales materiales para impresión FDM [28]	20
Figura 16. Impresoras 3D Delta y Cartesiana [30]	22
Figura 17. Impresora 3D polar	22
Figura 18. Impresora 3D de brazo robótico [31]	23
Figura 19. Extrusora Filabot [33]	26
Figura 20. Impresora Formbot T-REX 2+ [35]	27
Figura 21. T-Rex 2+ Extruder Plastic [36]	28
Figura 22. HotEnd V6 Volcano [37]	28
Figura 23. Calibrador digital. Fuente: propia.	29
Figura 24. Conjunto situación inicial. Fuente: propia	31
Figura 25. Visión global conjunto inicial. Fuente: propia	32
Figura 26. Ubicación del subconjunto 1. Fuente: propia	33
Figura 27. Vista explosionada del subconjunto 1. Fuente: propia	34
Figura 28. Diseño descartado acople del motor. Fuente: propia	35
Figura 29. Ubicación del subconjunto 2. Fuente: propia	35
Figura 30. Vista explosionada del subconjunto 2. Fuente: propia	36
Figura 31. Ubicación del subconjunto 3. Fuente: propia	37
Figura 32. Vista explosionada del subconjunto 3. Fuente: propia	38
Figura 33. Diseño descartado para soportes de la extrusora. Fuente: propia	38
Figura 34. Ubicación del subconjunto 4. Fuente: propia	39
Figura 35. Pieza final con tubo PTFE. Fuente: propia	39

Figura 36. Elementos motor DC	40
Figura 37. Soporte placa electrónica. Fuente: propia	40
Figura 38. Marco. Fuente: propia	41
Figura 39. Pasador de cable. Fuente: propia.....	41
Figura 40. Dimensiones de la pieza para el ensayo a tracción [38] [39].....	42
Figura 41. Dimensiones de la pieza para el ensayo a flexión [40]	43
Figura 42. Dimensiones de la pieza para el ensayo a compresión [41]	43
Figura 43. Diseño probetas. 1, Tracción; 2, Compresión; 3, Flexión. Fuente: propia	44
Figura 44. Proceso de triturado. Fuente: propia.....	46
Figura 45. PLA triturado. Fuente: propia.....	46
Figura 46. Tramos de filamento obtenidos. Fuente: Propia	48
Figura 47. Impresión fallida por atasco del extrusor. Fuente: Propia.....	49
Figura 48. Tipos de barrel.....	49
Figura 49. Montaje de la probeta en el ensayo de tracción. Fuente: propia.....	51
Figura 50. Probetas tracción PLA industrial pre-ensayo.	53
Figura 51. Probetas tracción PLA industrial post-ensayo.....	53
Figura 52. Gráfico comparativo. Resistencia a tracción PLA industrial.....	54
Figura 53. Gráfico comparativo. Módulo de elasticidad a tracción PLA industrial.....	54
Figura 54. Gráfico comparativo. Deformación PLA industrial.....	55
Figura 55. Probetas tracción PLA reciclado pre-ensayo. Fuente: propia	56
Figura 56. Probetas tracción PLA reciclado post-ensayo. Fuente: propia	56
Figura 57. Gráfico comparativo. Resistencia a tracción PLA reciclado.	56
Figura 58. Gráfico comparativo. Módulo de elasticidad a tracción PLA reciclado.	57
Figura 59. Gráfico comparativo. Deformación PLA reciclado.	57
Figura 60. Gráfico comparativo. Resistencia a tracción para ambos tipos de PLA.....	58
Figura 61. Gráfico comparativo. Deformación en tracción para ambos tipos de PLA...	59
Figura 62. Gráfico comparativo. Módulo elástico a tracción para ambos tipos de PLA.	59
Figura 63. Montaje de la probeta en el ensayo de compresión. Fuente: propia.....	61
Figura 64. Probetas compresión PLA industrial pre-ensayo.	62
Figura 65. Probetas compresión PLA industrial post-ensayo.....	63
Figura 66. Gráfico comparativo. Módulo de elasticidad a compresión PLA industrial..	63
Figura 67. Gráfico comparativo. Límite de fluencia PLA industrial.	64
Figura 68. Probetas compresión PLA reciclado pre-ensayo. Fuente: propia	65
Figura 69. Probetas compresión PLA reciclado post-ensayo. Fuente: propia	65
Figura 70. Gráfico comparativo. Módulo de elasticidad a compresión PLA reciclado. .	65
Figura 71. Gráfico comparativo. Límite de fluencia PLA reciclado.....	66
Figura 72. Gráfico comparativo. Módulo elástico compresión para ambos tipos PLA..	67
Figura 73. Gráfico comparativo. Límite de fluencia para ambos tipos de PLA.	67

Figura 74. Montaje de la probeta en el ensayo de flexión. Fuente: propia.....	69
Figura 75. Probetas flexión PLA industrial pre-ensayo.	71
Figura 76. Probetas flexión PLA industrial post-ensayo.....	71
Figura 77. Gráfico comparativo. Módulo de rotura PLA industrial.....	71
Figura 78. Gráfico comparativo. Módulo de elasticidad a flexión PLA industrial.	72
Figura 79. Gráfico comparativo. Deformación a flexión PLA industrial.....	72
Figura 80. Probetas flexión PLA reciclado pre-ensayo. Fuente: propia	73
Figura 81. Probetas flexión PLA reciclado post-ensayo. Fuente: propia.....	73
Figura 82. Gráfico comparativo. Módulo de rotura PLA reciclado.	73
Figura 83. Gráfico comparativo. Módulo de elasticidad a flexión PLA reciclado.....	74
Figura 84. Gráfico comparativo. Deformación a flexión PLA reciclado.	74
Figura 85. Gráfico comparativo. Módulo de rotura para ambos tipos de PLA.	75
Figura 86. Gráfico comparativo. Módulo elástico a flexión para ambos tipos de PLA. .	76
Figura 87. Gráfico comparativo. Deformación en flexión para ambos tipos de PLA.	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Temperaturas recomendadas por el fabricante [34]	27
Tabla 2. Dimensiones de la pieza para el ensayo a tracción [38] [39]	42
Tabla 3. Dimensiones de la pieza para el ensayo a flexión [40].....	43
Tabla 4. Dimensiones de la pieza para el ensayo a compresión [41]	43
Tabla 5. Principales parámetros de impresión seleccionados.	45
Tabla 6. Pérdida de material durante el triturado manual	46
Tabla 7. Tramos de filamento obtenidos	47
Tabla 8. Resultados del ensayo a tracción para el PLA industrial.	53
Tabla 10. Resultados del ensayo a tracción para el PLA reciclado.....	55
Tabla 11. Valores promedio obtenidos en el ensayo a tracción.	60
Tabla 12. Resultados del ensayo a compresión para el PLA industrial.	62
Tabla 13. Resultados del ensayo a compresión para el PLA reciclado.....	64
Tabla 14. Valores promedio obtenidos en el ensayo a compresión.	68
Tabla 15. Resultados del ensayo a flexión para el PLA industrial.	70
Tabla 16. Resultados del ensayo a flexión para el PLA reciclado.....	73
Tabla 17. Valores promedio obtenidos en el ensayo a flexión.	77

1. HOJA DE IDENTIFICACIÓN

PROYECTO

TÍTULO: Caracterización de filamento de PLA reciclado para impresión 3D

PETICIONARIO

NOMBRE: Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología de la Universidad de La Laguna

**DIRECCIÓN: Avenida Astrofísico Francisco Sánchez, s/n. San Cristóbal de La Laguna,
Tenerife**

AUTOR

NOMBRE: Fernando Delgado Ayala

DNI: 79072716X

TELÉFONO: 696829068

CORREO ELECTRÓNICO: alu0100964837@ull.edu.es

2. RESUMEN

La impresión 3D es, sin lugar a duda, una de las tecnologías de mayor crecimiento en los últimos años. Se trata de un proceso que permite la creación de piezas mediante diferentes técnicas como el modelado por deposición fundida (FDM) a unos costes más bajos que el mecanizado tradicional, ya que consume menos material para fabricar piezas y reduce la generación de residuos.

Sin embargo, actualmente existe una creciente preocupación por la influencia negativa en el medio ambiente de los desechos plásticos impresos en 3D, y para reducir este impacto negativo el reciclaje de plásticos se vuelve esencial. Una de las principales ventajas del modelado por deposición fundida es que el material de las piezas impresas desechadas se puede reutilizar, siendo triturado y reextrusionado en filamentos de impresión 3D.

Dicho esto, el trabajo expuesto a continuación tiene como objetivo la producción de filamento de PLA (Ácido Poliláctico) a partir de piezas impresas. Se comenzará imprimiendo probetas normalizadas a partir de filamento industrial sobre las que se llevarán a cabo diferentes ensayos que aportarán información sobre las propiedades del material.

Posteriormente, estas probetas serán trituradas de forma manual para fabricar filamento de PLA reciclado mediante extrusión del material. Además, se diseñarán e instalarán los elementos necesarios para un correcto funcionamiento de la extrusora.

Finalmente, se realizará el mismo proceso imprimiendo y ensayando probetas fabricadas con el filamento de PLA reciclado obtenido, para concluir comparando el comportamiento de ambos materiales.

3. ABSTRACT

3D printing is undoubtedly one of the fastest growing technologies in recent years. It is a process that allows the creation of parts using different techniques such as fused deposition modeling (FDM) at lower costs than traditional machining, as it consumes less material to manufacture parts and reduces waste generation.

However, there is currently a growing concern about the negative influence on the environment of 3D printed plastic waste, and to reduce this negative impact plastic recycling becomes essential. One of the main advantages of fused deposition modeling is that the material from discarded printed parts can be reused, being shredded and re-extruded into 3D printing filaments.

That said, the work presented below aims to produce PLA (Polylactic Acid) filament from printed parts. We will start by printing standardized test pieces from industrial filament on which different tests will be carried out to provide information on the properties of the material.

Subsequently, these samples will be manually crushed to manufacture recycled PLA filament by extrusion of the material. In addition, the necessary elements for the correct operation of the extruder will be designed and installed.

Finally, the same process will be carried out by printing and testing samples manufactured with the recycled PLA filament obtained, to conclude by comparing the behavior of both materials.

4. OBJETO DEL PROYECTO

Este proyecto nace a partir de una propuesta del Área de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica del Departamento de Ingeniería Industrial de la Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología de la Universidad de La Laguna, teniendo como objetivos la producción de filamentos de PLA para impresión en 3D a partir de piezas impresas, y la posterior discusión sobre cómo se ven afectadas las propiedades mecánicas de las impresiones si en su fabricación se ha utilizado filamento reciclado.

El proyecto se divide en dos etapas bien diferenciadas, una primera que comprende la producción del filamento, y una segunda que abarca la caracterización del material resultante.

Para la primera etapa, se diseñarán e instalarán una serie de elementos que servirán como mejora para la puesta en marcha de la extrusora, con el objetivo de obtener un filamento de mayor calidad. Tras ello se fabricará, a partir de los residuos triturados de impresiones anteriores, un filamento con unas determinadas características y que será empleado posteriormente para imprimir probetas normalizadas.

En cuanto a la segunda etapa, se tratarán de determinar las propiedades del material resultante comparándolas con las de los filamentos industriales. Para ello se realizarán en el laboratorio diferentes ensayos tanto a probetas impresas con PLA industrial como posteriormente a las probetas fabricadas con el PLA reciclado.

5. ALCANCE DEL PROYECTO

Este proyecto de fabricación y caracterización de filamento propone, a partir de piezas impresas desechadas, una vía de reciclaje para el PLA. Viene además acompañado del acople de un sistema extrusor motorizado y del diseño de diversos elementos que tienen como finalidad la obtención de un filamento de características similares al ofrecido por las diferentes empresas proveedoras de filamento de PLA industrial.

El proyecto contempla el diseño de los elementos necesarios para la mejora de la obtención de filamento, con el objetivo de poder obtener grandes longitudes de filamento y con un diámetro más homogéneo. La mayor parte de estos elementos serán fabricados mediante deposición fundida.

Por otro lado, se aporta una visión constructiva basada en la experiencia obtenida, de cómo podrían mejorarse los diferentes aspectos que conforman el reciclado de PLA para la fabricación de filamento para impresión 3D.

A pesar de que comúnmente la palabra PLA viene acompañada del término “biodegradable”, hay que tener en cuenta que al aire libre lleva al menos 80 años descomponer el PLA, y al hacerlo en una planta de compostaje industrial se produce un considerable impacto ambiental. Por ello este proyecto complementa un proceso sostenible de reciclaje, que puede resultar útil de cara a disminuir la cantidad de desechos plásticos generados.

6. ANTECEDENTES DEL PROYECTO

La industria global de la impresión 3D lleva años creciendo de forma exponencial, y se espera que continúe haciéndolo. Sin embargo, pese a la variedad de materiales que se pueden utilizar, los datos sobre el reciclaje de estos son relativamente escasos.

El término “biodegradable”, comúnmente asignado al PLA por fabricantes y distribuidores puede resultar un tanto engañoso. Y es que este material se puede describir como biodegradable, pero en las condiciones particulares del compostaje industrial, tardando al menos 80 años en descomponerse al aire libre. Por ello resulta interesante el reciclaje del PLA con el objetivo de disminuir los desechos plásticos generados.

En un artículo publicado el 1 de junio de 2017 sobre Impresión 3D y Fabricación aditiva, Isabelle Anderson desarrolló un estudio sobre las propiedades mecánicas del PLA reciclado en el que concluyó que las muestras impresas con material reciclado mostraban propiedades similares a las del PLA industrial [1], siempre y cuando se consiga un filamento reciclado de unas determinadas características geométricas.

En el artículo *A comparison between mechanical properties of specimens 3D printed with virgin and recycled PLA* de Antonio Lanzotti et al., publicado en Julio de 2019 también se concluyó que en una primera etapa de reciclado, el PLA muestra propiedades mecánicas similares a las del filamento virgen [2]

Hoy en día, ya hay empresas como *Sakata* comercializando bobinas de PLA reciclado con un precio y propiedades similares al PLA industrial. Sin embargo, este proyecto busca una vía para fabricar filamento reciclado propio, haciendo uso de una extrusora, para darle una segunda vida a los residuos de impresiones anteriores.

El precedente más directo de este proyecto es el Trabajo de Fin de Grado *Fabricación y caracterización de PLA reciclado* [3], realizado en el año 2018 por el ingeniero Carlos Díaz Encinosa en la Universidad de La Laguna, en el cual fue capaz de fabricar filamento imprimible a partir de desechos de piezas impresas con PLA. Sin embargo, debido a las dificultades encontradas no se obtuvieron grandes longitudes de filamento y la caracterización de este se vio reducida al ensayo de tracción, ensayando además las probetas de menor tamaño recogidas en la norma.

7. LA FABRICACIÓN ADITIVA

7.1 INTRODUCCIÓN IMPRESIÓN 3D

La fabricación aditiva (*Additive Manufacturing* o AM) es el nombre técnico que engloba a todas las tecnologías de “impresión 3D”. De hecho, ambos términos se suelen utilizar indistintamente tanto en el ámbito industrial como empresarial, siendo este último considerado actualmente como una denominación informal del término fabricación aditiva.

Dicho esto, las tecnologías de impresión 3D son todas aquellas que comparten un mismo principio: fabricación directa de un modelo físico generado a partir de un programa de diseño asistido por ordenador en tres dimensiones (3D CAD), sin necesidad de tener en cuenta o llevar a cabo la planificación para los procesos de fabricación [4]. Los procesos de AM crean piezas tridimensionales agregando materiales capa por capa, de forma opuesta a los clásicos procesos de fabricación sustractiva en los cuales se elimina el material no deseado para lograr las formas requeridas [5].

Estas tecnologías, además de permitir una amplia gama de diseños con geometrías complejas y de brindar la posibilidad de individualizar y personalizar la fabricación de bienes, reducen en gran medida la cantidad de materias primas utilizadas y minimizan la huella de carbono en comparación con las tecnologías de fabricación tradicionales [6].

Cualquiera de las tecnologías AM o de fabricación aditiva sigue el mismo proceso de fabricación [7]:

1. CAD. Las piezas parten de un modelo virtual realizado mediante cualquier software de diseño CAD. Hoy en día existen incluso escáneres 3D que permiten escanear un objeto y verlo directamente en nuestro ordenador sin necesidad de dibujarlo.
2. Conversión a formato *stereolithography* (STL). Este archivo describe las superficies externas cerradas del modelo CAD original y constituye la base para el cálculo de las capas.
3. Transferencia del archivo STL a la máquina AM. En este paso puede haber alguna manipulación del archivo para que tenga el tamaño o la posición adecuados.
4. Configuración de la máquina. Ajustes como los parámetros de fabricación y materiales.

5. Fabricación, la cual es principalmente un proceso automatizado. Primero se fabrica la capa inferior de la pieza encima de la superficie de fabricación de la máquina. Posteriormente se fabrica la siguiente capa encima de la anterior, repitiendo este proceso hasta lograr la geometría final.
6. Extracción de las piezas, una vez la máquina de AM ha concluido la fabricación.
7. Post procesado. Las piezas se deben limpiar y/o eliminar las estructuras de soporte, lo cual requiere una manipulación manual cuidadosa.
8. Uso. Finalmente, las piezas ya pueden ser utilizadas.

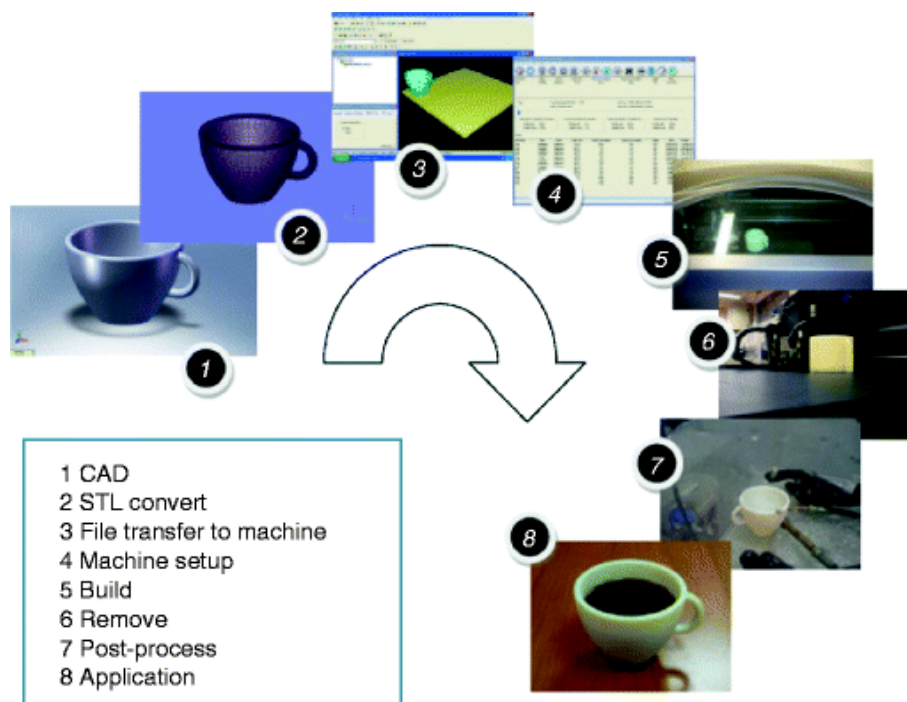


Figura 1. Pasos de un proceso de fabricación aditiva [7]

7.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

La aparición de la fabricación aditiva brinda nuevas posibilidades a diferentes sectores, ayudando a mejorar y optimizar procesos, y resolviendo problemas a los que la manufactura tradicional no ha sabido dar respuesta. Dicho esto, algunas de las ventajas más destacables de esta tecnología tan innovadora son las siguientes:

- **Time-to-Market:** la fabricación aditiva permite que los proyectos se desarrollen más rápido que nunca. La posibilidad de imprimir un diseño en 3D el mismo día en que se crea permite reducir un proceso de desarrollo que podría haber supuesto semanas.

- Versatilidad: una impresora 3D puede realizar infinidad de productos diferentes, mientras que hasta ahora muchos de ellos se realizan a través de máquinas específicas y exclusivas para un solo producto o pieza.
- Prototipado rápido y flexibilidad: la creación de prototipos es un elemento esencial de la mayoría de los procesos de diseño e ingeniería, y en general, hacerlo utilizando métodos tradicionales requiere casi los mismos procesos, costos, herramientas y configuración que el producto final, haciendo de los prototipos una apuesta difícil para muchas empresas [8]. La aparición de la impresión 3D permite solucionar este problema.
- Reducción de los costes: la fabricación aditiva permite reducir los costes de diferentes modos, ya sea por el casi inexistente desperdicio del material utilizado, por la disminución de los costes de logística y almacenamiento, por el ahorro en mano de obra, etc.
- Personalización: se puede fabricar casi cualquier producto de forma exclusiva, sin la necesidad de reconfigurar los procesos de producción para obtener un producto personalizado.

Este sector tiene un amplio margen de mejora, pues aún puede avanzar mucho en cuanto a tiempo de impresión, precisión o costes, por lo que a lo largo de los años las ventajas serán aún mayores. Sin embargo, pese a ser una tecnología útil y positiva, presenta ciertos inconvenientes, tales como:

- Disminución de puestos de trabajo en la manufactura, debido a la elaboración propia de los productos. No obstante, al mismo tiempo se crearán nuevos empleos y formas de negocio.
- Vulneración de los derechos de autor. Los objetos con copyright pueden tener numerosas réplicas debido a la facilidad para copiar casi cualquier cosa.
- Menor variedad de materiales con respecto a los procesos convencionales.
- Mal uso del producto debido a la libertad existente para diseñar e imprimir cualquier objeto. Utilizando esta tecnología se han fabricado por ejemplo armas, que aún siendo de plástico disparan balas de verdad, además de no tener número de serie [9]. Esto supone un grave peligro pues se teme que pueda facilitar el acceso a las armas de fuego.



Figura 2. Liberator, primer diseño de arma de fuego para impresión 3D [10]

7.3 APLICACIONES

Las raíces de la fabricación aditiva moderna se remontan a unos 40 años, aunque los métodos topográficos y de fotoescultura comparten mucho en común y tienen más de un siglo de historia [11].

La impresión en 3D ha sido comúnmente utilizada para el “prototipado rápido”. La creación de prototipos es un elemento esencial de la mayoría de los procesos de diseño e ingeniería, y en general, hacerlo utilizando métodos tradicionales requiere casi los mismos procesos, costos, herramientas y configuración que el producto final, haciendo de los prototipos una apuesta difícil para muchas empresas. La impresión 3D comenzó principalmente solucionando este problema, y aunque aún sigue siendo la aplicación más extendida para estas tecnologías, son cada vez más las industrias que están apostando por ellas aprovechando sus ventajas para diferentes usos.

Algunas de las industrias que apuestan por la fabricación aditiva son [12]:

- Aeroespacial y defensa: es una de las primeras industrias en adoptar la impresión 3D. Algunos ejemplos de piezas que se pueden producir son conductos de aire, paneles de pared, e incluso componentes metálicos estructurales.
- Automotriz: hoy en día, la empresa alemana BMW utiliza tecnologías de fabricación aditiva para producir repuestos para sus vehículos clásicos, herramientas e incluso piezas de uso final. Así, MINI, perteneciente desde el año 2000 a la compañía alemana, ofrece cierta personalización en sus coches gracias a la impresión 3D [13]. Y esto son solo algunos ejemplos.

- Médico y dental: la capacidad de personalización que permite la impresión 3D es importante para los dispositivos médicos diseñados con el objetivo de ser usados por el paciente durante un tiempo prolongado, ya que mejora la comodidad y la adherencia del tratamiento, como pueden ser los casos de las plantillas ortopédicas o los audífonos. También se ha implantado en el sector dental para la producción de prótesis dentales, guías quirúrgicas, coronas, etc. [14].



Figura 3. Prótesis funcional de dedo de la empresa Naked Prosthetics [15]

La impresión 3D avanza enormemente, y el enorme potencial de esta tecnología apunta a oportunidades aún más emocionantes en el horizonte.

7.4 TÉCNICAS DE IMPRESIÓN 3D

Las tecnologías que se pueden emplear para construir una pieza mediante fabricación aditiva son bastante variadas y se encuentran en diferentes etapas de desarrollo. Para adaptarse a diferentes materiales, así como tratar de mejorar los tiempos de construcción o la resistencia de las piezas, han surgido numerosas tecnologías. Estos diferentes métodos de fabricación pueden clasificarse de distintas formas, pero la más común es atendiendo al tipo de material empleado: líquido, filamento, polvo y lámina sólida, tal y como se muestra en la *Figura 4*.

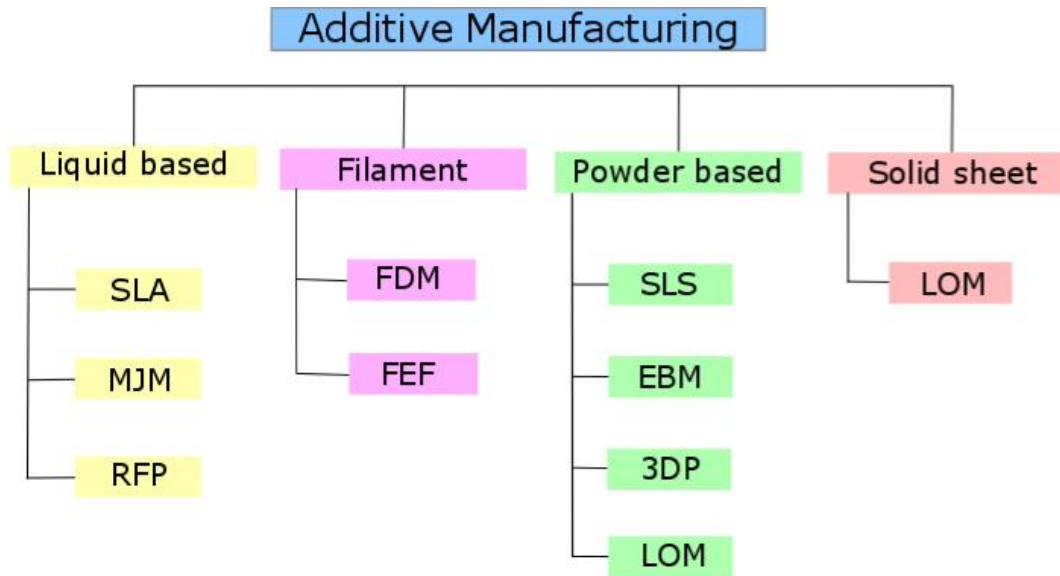


Figura 4. Tipos de fabricación aditiva [5]

A continuación, se describen algunas de las técnicas de impresión más importantes, más allá del modelado por deposición fundida.

7.4.1 Estereolitografía (SLA)

La estereolitografía o *stereolithography* se basa en el curado de una resina fotosensible en estado líquido, la cual se convierte en estado sólido utilizando una luz ultravioleta. El fotopolímero se dispone capa a capa mientras la plataforma del sistema desciende. Entre capa y capa, el objeto es escaneado por la luz ultravioleta [16].

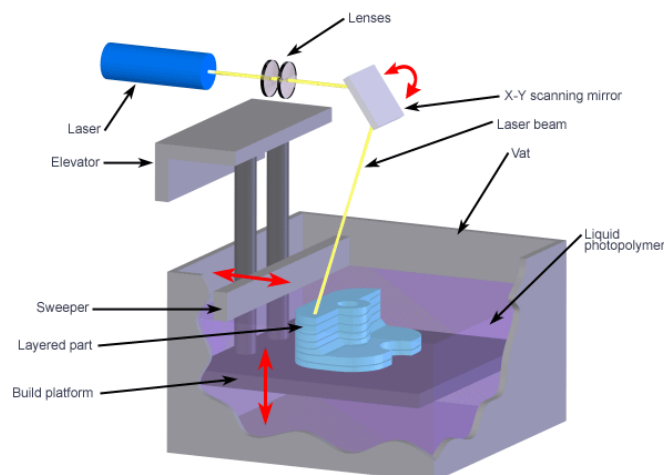


Figura 5. Esquema descriptivo de una máquina SLA [17]

7.4.2 Multi-Jet Modeling (MJM)

El Multi-Jet Modeling (MJM) es otro tipo de proceso líquido. Se utilizan varias boquillas dispuestas en una matriz para inyectar polímero curable por rayos ultravioleta. Después de cada capa, la plataforma desciende para continuar con la siguiente [18].

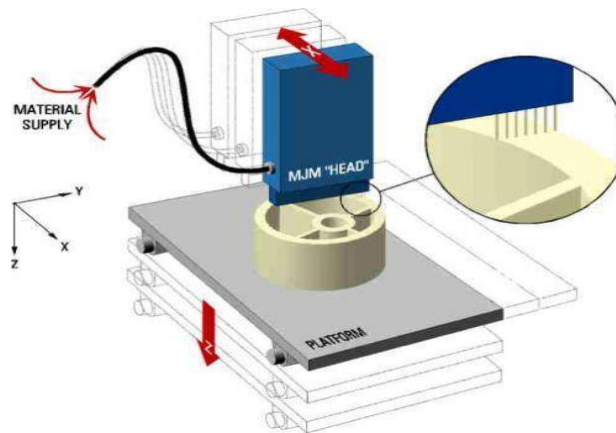


Figura 6. Esquema descriptivo de una máquina MJM [17]

7.4.3 Creación rápida de prototipos por congelación (RFP)

La creación rápida de prototipos por congelación o *Rapid Freeze Prototyping* (RFP) es un proceso de fabricación aditiva líquida. Consiste en mantener el nivel de temperatura del sistema por debajo del punto de congelación del agua, la cual es inyectada por la boquilla en la superficie. Una vez que el agua se convierte en hielo, la boquilla comienza con la siguiente capa [19].

7.4.4 Sinterizado selectivo (SLS)

El sinterizado selectivo por láser o *Selective Laser Sintering* (SLS) se basa en la aplicación de material en forma de polvo y la formación de la pieza mediante el uso de una fuente de calor, que en este caso es un rayo láser, para realizar cada capa. El láser dibuja selectivamente una sección transversal del objeto sobre la capa de polvo, haciendo que la primera capa se sinterice creando una masa sólida. Seguidamente se esparce otra capa de polvo y se repite el proceso hasta finalizar la totalidad de la pieza.

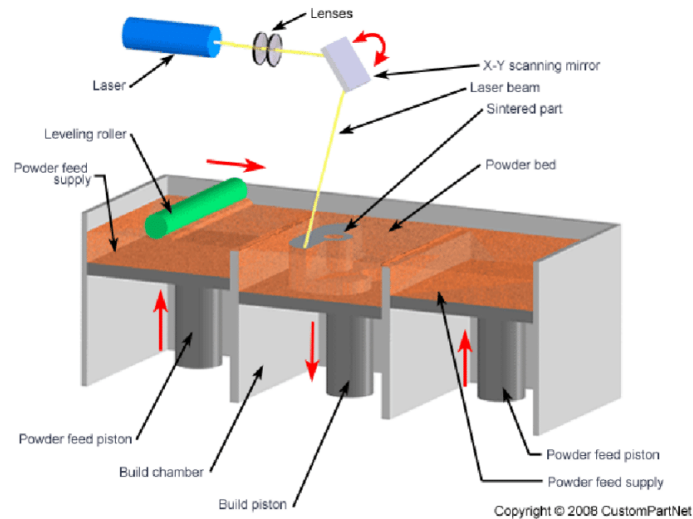


Figura 7. Esquema descriptivo de una máquina SLS [17]

7.4.5 Fabricación de objetos laminados (LOM)

En la fabricación de objetos laminados o *Laminated Object Manufacturing* (LOM) el material se suministra en forma de láminas sólidas. En el proceso se extiende una lámina de material sobre un sustrato móvil y un láser de dióxido de carbono la corta siguiendo los contornos de la geometría de la pieza. Las capas se unen cuando un rodillo caliente comprime la lámina y activa un adhesivo sensible al calor [5].

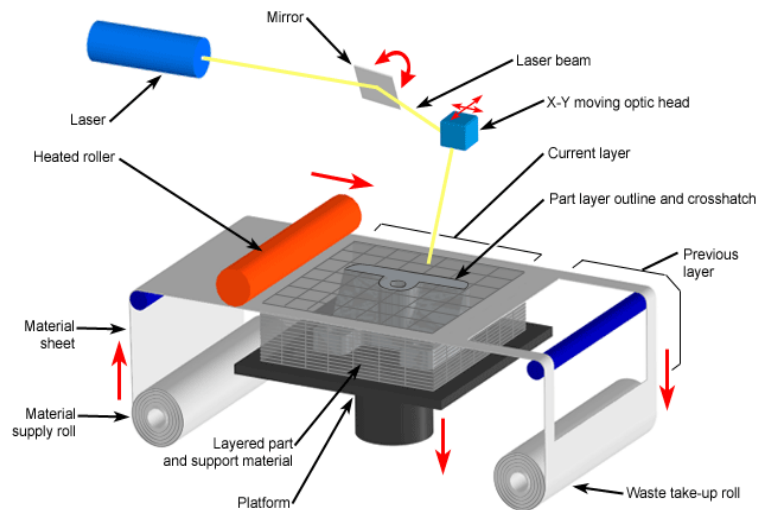


Figura 8. Esquema descriptivo de una máquina LOM [17]

8. MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA (FDM)

8.1 DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA DE IMPRESIÓN

El modelado por deposición fundida es la tecnología de impresión 3D utilizada durante el desarrollo de este trabajo.

El FDM es una de las tecnologías más simples de fabricación aditiva. Consiste en utilizar un filamento termoplástico suministrado por un carrete o bobina y que es fundido por un cabezal calentado hasta el punto de fusión. El material fundido es depositado en la superficie de trabajo mediante una boquilla extrusora o capilar de extrusión. De esta forma se van aplicando las capas hasta formar la pieza. La calidad final de las piezas depende directamente del espesor de capa [20].

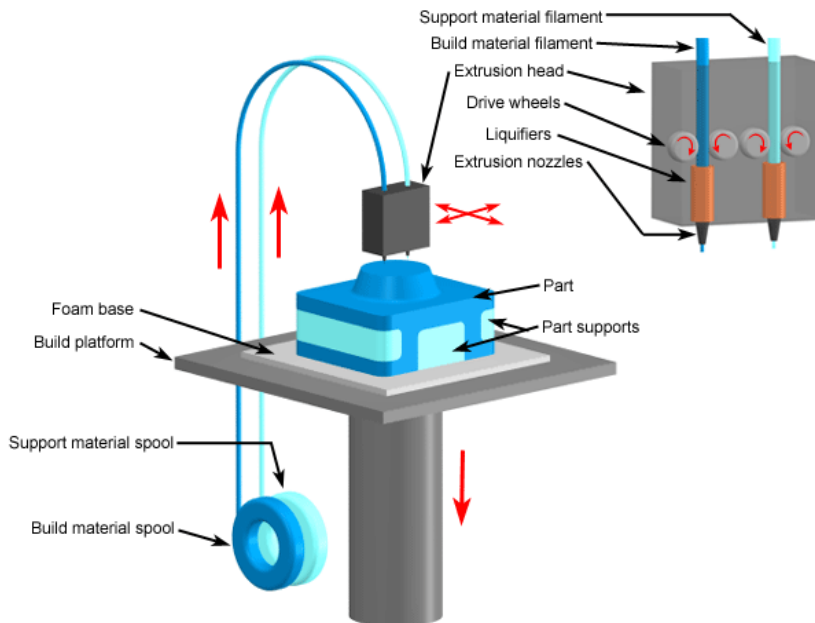


Figura 9. Esquema descriptivo de una máquina FDM [17]

En 2009 expiró la patente de FDM, acaparada durante 30 años por las grandes corporaciones, abriendo la puerta de la impresión 3D a millones de personas, empresas e instituciones que hasta entonces no tenían acceso a ella. Hoy en día es la tecnología más popular del mundo, y eso se debe en gran parte a que las impresoras son accesibles a nivel económico para muchas empresas e individuos, con un rango de precios que oscila entre los 400€ y los 3000€ [21].

8.2 PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

A la hora de utilizar una impresora de FDM, resulta fundamental ajustar correctamente los parámetros de impresión, de cara a evitar problemas y errores a la hora de imprimir una pieza, logrando una impresión exitosa y de buena calidad. Además de los ajustes de la propia impresora, como pueden ser la velocidad de impresión, la orientación de la pieza o el diámetro de la boquilla; es importante controlar también los parámetros del software de impresión 3D utilizado. Así, vamos a definir a continuación algunos de los más importantes:

- **Altura de capa o resolución.** Depende de las características de cada equipo y puede ajustarse libremente o a través de valores preestablecidos. Mientras más pequeña sea la medida de la capa, mayor será la resolución vertical de la impresión, aunque afectando directamente al tiempo de fabricación.
- **Espesor de pared.** Se refiere, tal y como su nombre indica, al espesor que tendrán las paredes del objeto impreso. Hay que tener en cuenta que normalmente no se imprimen objetos completamente sólidos, sino que se imprime una especie de caparazón con una estructura interna. Así, este parámetro controlará el espesor que tendrán estas caras externas de la pieza.

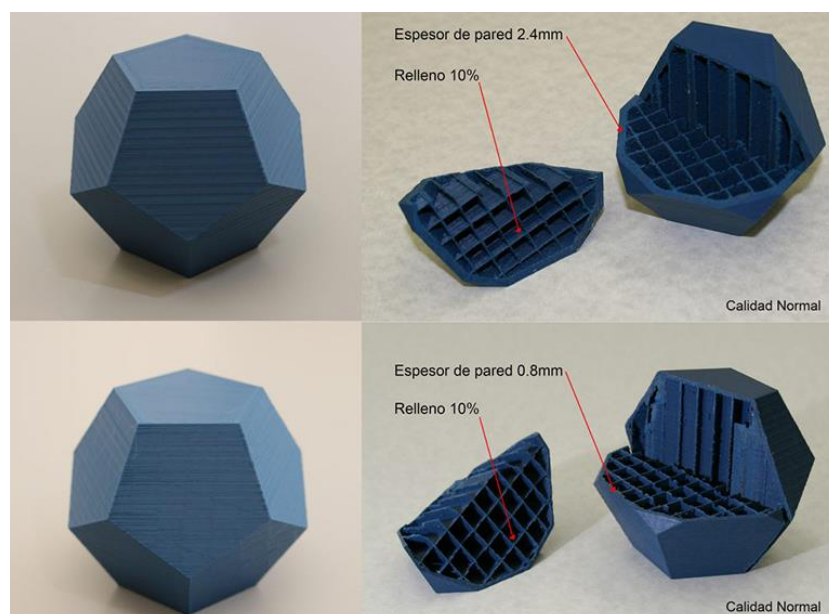


Figura 10. Diferentes espesores de pared [22]

- **Capa sólida inferior y superior.** Se refiere al espesor que tendrán las caras horizontales del modelo en su parte superior e inferior. Esta opción varía con la rigidez de dichas caras.

- **Densidad del relleno.** Se refiere al relleno que se utilizará como estructura interna. La impresora crea una retícula que dará fortaleza a la pieza, pero este parámetro permite dejar espacios vacíos al interior del objeto, ahorrando material y disminuyendo tanto el peso de la pieza como los tiempos de impresión. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el porcentaje de relleno tiene efectos en la resistencia final de la pieza pese a que su apariencia exterior no se vea afectada.

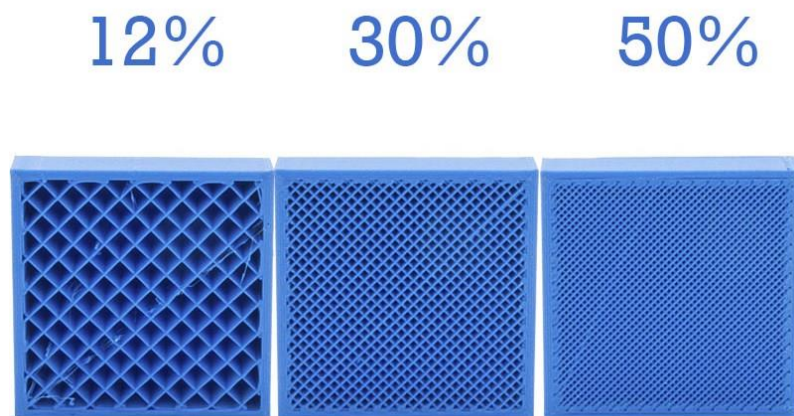


Figura 11. Distintos porcentajes de relleno [23]

- **Tipo de relleno.** Los rellenos forman una parte importante del proceso de creación de una pieza. Aunque el relleno rectangular o rectilíneo es el más utilizado actualmente, ya que suele venir por defecto configurado en los softwares de impresión 3D, hay otros tipos como el relleno triangular o el de panel de abeja. Cabe destacar que, dependiendo del tipo de relleno, el tiempo de impresión puede variar considerablemente.

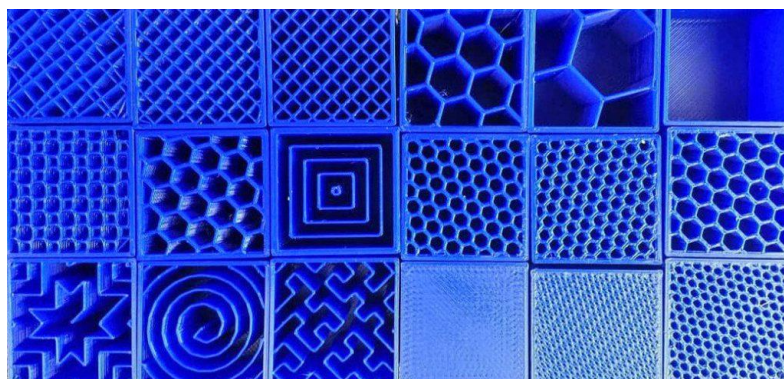


Figura 12. Diferentes tipos de relleno [24]

- **Tipo y emplazamiento de soportes.** En casos en los que se requiere soportes para la impresión de una pieza, es necesario definir el tipo de soporte a utilizar.

Además, dependiendo de la pieza a realizar, convendrá poner soportes en todos lados o sólo desde la base.

- **Temperatura del extrusor.** Todos los fabricantes de filamentos facilitan un rango de temperaturas entre las cuales su impresión es óptima. Normalmente esta temperatura ideal se debe ir ajustando mediante pruebas hasta obtener el mejor acabado y adherencia, ya que puede variar significativamente en función de que extrusor utilicemos.
- **Temperatura de la cama de impresión.** Normalmente el mismo fabricante suele indicar los valores recomendados, pero se debe determinar el valor mediante pruebas para obtener una adherencia óptima.
- **Velocidad de impresión.** Este es uno de los principales parámetros que afecta directamente al acabado de las piezas. Así, a mayor velocidad, se obtendrá peor acabado.

8.3 MATERIALES PARA MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

8.3.1 PLA

El material que se ha empleado para el desarrollo de este proyecto es el PLA, que a su vez es uno de los materiales más populares para impresión 3D con FDM.

El PLA o Ácido Poliláctico es un termoplástico constituido por moléculas de ácido láctico y es el polímero biodegradable más popular en la industria. Se trata de un polímero muy versátil, que se obtiene utilizando un 100% de recursos renovables como son el maíz, la remolacha, el trigo y otros productos ricos en almidón [20]. Dado que es un polímero proveniente de compuestos derivados de la fijación natural de CO₂, las emisiones netas de esta sustancia al ambiente cuando combustionan son cero [25]. Además, proviene de recursos virtualmente inagotables.

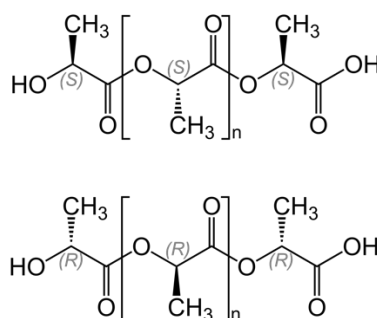


Figura 13. Unidad estructural del polímero PLA [26]

El PLA es el material preferido para las personas que dan sus primeros pasos dentro de la industria de la impresión, ya que resulta fácil imprimir con él. Tiene una temperatura de fusión de 180 °C, algo relativamente bajo en comparación con los filamentos de otros materiales, lo que permite imprimir PLA sin necesidad de utilizar una cama de impresión calefactada ni de disponer de cámara cerrada [27].

Se trata de un material consistente, fácil de usar y disponible en una amplia variedad de colores, lo que lo hace adecuado para la impresión 3D FDM. Además, no desprende olores desagradables como otros materiales, por lo que es ideal para uso doméstico. Es muy rígido y bastante fuerte, pero muy frágil.

Para este trabajo se ha utilizado un filamento comercial de PLA *Easy Go* de la marca *BQ*, de color amarillo y con un diámetro de 1,75 milímetros. En el *Anexo II* se muestra la ficha técnica del producto.



Figura 14. Filamento comercial de PLA empleado [28]

8.3.2 Otros materiales

Junto con el PLA, el ABS es el material más empleado en el campo de la impresión 3D. El ABS es un termoplástico que contiene una base de elastómeros a base de polibutadieno, lo que lo hace más flexible y resistente a los golpes.

Para imprimir ABS la temperatura del extrusor debe estar entre 230 °C y 260 °C. Es un material capaz de soportar fácilmente temperaturas de -20 °C a 80 °C, reutilizable y que se puede soldar con procesos químicos. Sin embargo, no es biodegradable y se contrae en contacto con el aire, por lo que la cama de impresión debe calentarse para evitar deformaciones. Además, se recomienda utilizar una impresora 3D de cámara cerrada porque el plástico ABS emite partículas que pueden ser peligrosas para el usuario [29]. Generalmente se elige sobre el PLA cuando se requiere una mayor resistencia a la temperatura y una mayor tenacidad.

El tereftalato de polietileno, o PET, es el filamento ideal para cualquier pieza destinada al contacto con alimentos. Es un polímero que posee interesantes propiedades adicionales con pocos inconvenientes importantes. A diferencia del ABS, el PET no emite vapores olorosos cuando se funde, ni requiere de una plataforma calefactable [30]. Para obtener los mejores resultados, se debe imprimir entre 225 y 245 °C.

El nylon, el TPU y el PC son algunos de los materiales que también se utilizan en impresión FDM. El nylon posee grandes propiedades mecánicas y la mayor resistencia al impacto para un filamento no flexible, aunque la adhesión a las capas puede ser un problema. El TPU o poliuretano termoplástico se usa principalmente para aplicaciones flexibles, pero su muy alta resistencia al impacto puede hacerlo útil para otras aplicaciones. En cuanto al PC o policarbonato, es el material más resistente de todos y puede ser una interesante alternativa al ABS, dada la similitud de sus propiedades [31].

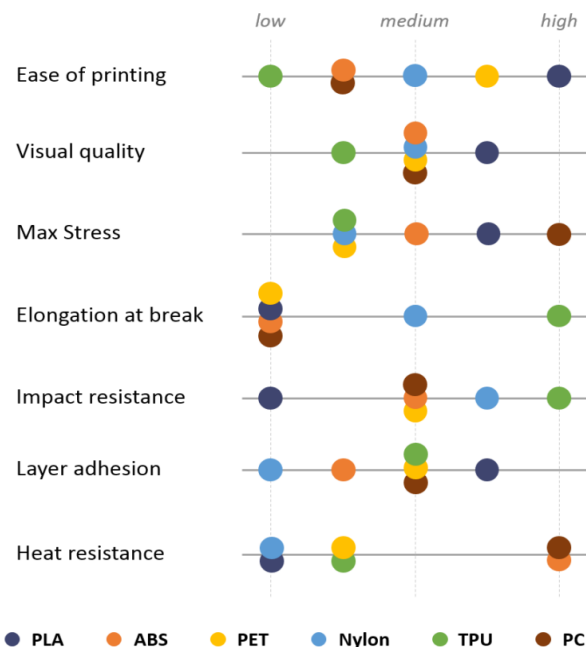


Figura 15. Características de los principales materiales para impresión FDM [31]

Cabe destacar que nos hemos centrado en los principales polímeros puros que existen en el mercado hoy en día. Sin embargo, los proveedores de materiales también ofrecen mezclas o aditivos que modifican las propiedades del polímero puro.

8.4 TIPOS DE IMPRESORAS FDM

En los últimos tiempos, las impresoras 3D FDM se han convertido en opciones de impresora 3D asequibles para el usuario medio, extendiéndose así su uso. Por ello, es

importante tener en cuenta que existen 4 principales tipos de impresora dentro de esta tecnología: cartesiana, polar, delta y de brazo robótico.

8.4.1 Impresora 3D cartesiana

Las impresoras 3D cartesianas son el tipo de impresora 3D FDM más común, y llevan el nombre del sistema matemático de coordenadas cartesianas descubierto en el siglo XVII por el célebre filósofo y matemático francés René Descartes [32]. Este tipo de impresoras siguen el mismo patrón matemático, basándose en las coordenadas X, Y y Z para colocar un cabezal de impresión en el lugar correcto para imprimir el filamento de plástico.

El cabezal de impresión se mueve, por lo general, en los ejes X e Y. En cuanto al eje Z, algunas impresoras 3D mueven el extrusor hacia arriba y hacia abajo, mientras que otras hacen que sea la cama de impresión la que se mueve en el eje Z.

Una de las principales ventajas es que, al ser el tipo de impresora más popular, resulta fácil encontrar información y ayuda para solucionar posibles problemas, además de piezas de repuesto.

8.4.2 Impresora 3D delta

Las impresoras 3D delta son el segundo tipo de impresora más común, y a medida que la tecnología FDM avanza son cada vez más utilizadas. Trabajan también con coordenadas cartesianas.

Están formadas generalmente por una cama de impresión circular, con un extrusor que se fija por encima de tres brazos articulados que se deslizan arriba y abajo sobre unas guías verticales dispuestas en una configuración triangular, permitiendo así que el cabezal de impresión se mueva en cualquier dirección.

Son en general muy similares a las impresoras cartesianas, aunque presentan ciertas diferencias. Por ejemplo, son más delgadas y altas, ofreciendo la capacidad de imprimir piezas de mayor altura. Las impresoras 3D cartesianas se consideran más precisas, pero esta diferencia en la calidad de impresión es mínima, y frente a esto, la velocidad de las impresoras 3D delta es significativamente más alta.

Impresoras 3D Deltas vs Cartesianas

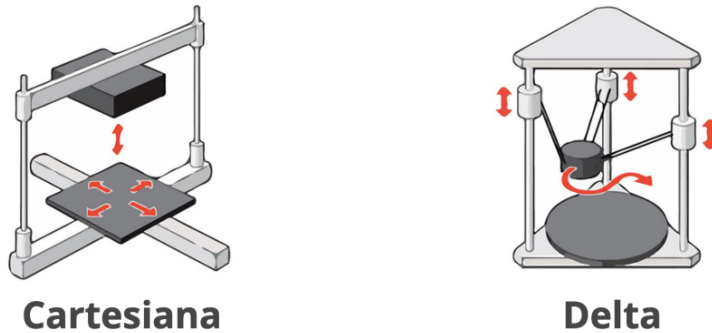


Figura 16. Impresoras 3D Delta y Cartesiana [33]

8.4.3 Impresora 3D polar

A diferencia de los dos tipos anteriores, la impresora 3D polar utiliza un sistema de coordenadas polares en el que todos los puntos de la cama de impresión están determinados por su posición con respecto al punto central, y aunque no se utilizan popularmente, ofrecen un diseño bastante interesante.

Los conjuntos de coordenadas describen puntos en lechos de impresión circulares en lugar de cuadrados, no determinados por los ejes X, Y y Z, pero con ángulo y longitud. Así, la cama de impresión gira mientras que el cabezal de impresión puede moverse hacia arriba, abajo, derecha e izquierda.

Una de las pequeñas ventajas ofrecidas por este tipo de impresora es la posibilidad de funcionar con solo dos motores, mientras que los otros tipos requieren al menos tres (uno por cada eje), lo cual puede suponer un ahorro a largo plazo. Sin embargo, ofrecen una menor precisión.

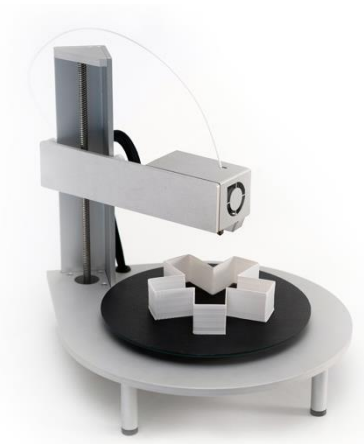


Figura 17. Impresora 3D polar

8.4.4 Impresora 3D de brazo robótico

El último y menos habitual tipo de impresora 3D FDM son las impresoras de brazo robótico, también denominadas impresoras 3D SCARA.

La impresión no está fijada a una placa de impresión, por lo que resulta mucho más móvil, lo cuál facilita la impresión de piezas geoméricamente complejas. Estas impresoras se mueven de la forma más similar a la de las manos humanas e imprimen a una velocidad considerablemente mayor que el resto.

Sin embargo, aunque son interesantes como impresoras 3D industriales para imprimir estructuras de gran tamaño, tienen mucha menor calidad de impresión, por lo que no pueden competir con las impresoras 3D cartesianas o polares de cara a la impresión de piezas pequeñas.



Figura 18. Impresora 3D de brazo robótico [34]

9. PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO

El desarrollo de este trabajo que tiene como objetivo la obtención de filamento reciclado de calidad se ha llevado a cabo siendo estructurado de la siguiente forma:

- ***Puesta a punto de la máquina extrusora.*** Se efectúa una primera toma de contacto con la extrusora, leyendo el manual de esta y comprobando su correcto funcionamiento.
- ***Diseño del acople del sistema extrusor.*** El objetivo principal es la motorización del sistema de extrusión para ser capaces de obtener mayores cantidades de filamento, y que este tenga un diámetro lo más regular posible y correspondiente al que exige la impresora. Por tanto, se debe diseñar un sistema que acople este sistema extrusor motorizado a la mesa de trabajo. Se precisa que el diseño permita la movilidad de este sistema para determinar mediante pruebas cual es su mejor localización de cara a obtener un filamento de la mayor calidad posible.
- ***Fabricación, ensamblaje y montaje del acople del sistema extrusor.*** Todas las piezas correspondientes a este conjunto (a excepción de los tornillos), se fabrican mediante deposición fundida. Posteriormente se deben instalar y comprobar su correcto funcionamiento.
- ***Diseño de diferentes mejoras para el proceso de extrusión y obtención de filamento.*** Una vez acoplado el sistema motorizado, se han de diseñar los elementos necesarios para una obtención óptima de filamento, teniendo en cuenta que se necesitan fragmentos lo suficientemente largos y que, además, estos deben tener un diámetro de 1,75 mm.
- ***Fabricación y montaje de las mejoras para el proceso de extrusión y obtención de filamento.*** Las piezas diseñadas se imprimen mediante deposición fundida, y se añaden a la mesa de trabajo comprobando su operatividad.
- ***Pruebas de obtención de filamento.*** Se realiza una prueba obteniendo diversos tramos de filamento, comprobando el diámetro de este y el correcto funcionamiento tanto de la extrusora como del sistema extrusor motorizado y de las mejoras previamente diseñadas.
- ***Impresión de probetas normalizadas a partir de filamento industrial.*** Las probetas se imprimen atendiendo a la geometría y dimensiones indicadas por la

normativa correspondiente a cada tipo de ensayo. Con respecto al número de probetas, que también se indica en la norma, se deben imprimir en este caso algunas probetas más de las necesarias con el objetivo de tener suficiente material para el triturado y posterior extrusión en filamento reciclado.

- **Caracterización de las probetas fabricadas a partir de filamento industrial.** Se realizan los ensayos correspondientes de tracción, compresión y flexión, utilizando la máquina universal de ensayos del laboratorio del Área de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica del Departamento de Ingeniería Industrial, y atendiendo a la normativa correspondiente, para determinar las propiedades mecánicas del filamento industrial.
- **Triturado manual de las probetas ensayadas.** Debido a la no disponibilidad de una máquina trituradora, se lleva a cabo el triturado de las probetas ya ensayadas de forma manual, utilizando los pellets obtenidos para fabricar un nuevo filamento, esta vez reciclado.
- **Obtención de filamento a partir de las probetas trituradas.** Llegados a este punto, se pone en funcionamiento la extrusora y todo el sistema diseñado para tratar de fabricar el mejor filamento posible, con un diámetro correspondiente al aceptado por la impresora, y con tramos que superen la longitud necesaria para la impresión de las probetas normalizadas.
- **Impresión de probetas normalizadas a partir de filamento reciclado.** Se imprimen probetas de igual forma que se hizo previamente, pero esta vez utilizando el filamento reciclado que hayamos fabricado. La única diferencia es que, en este caso, solo es necesario imprimir el número de probetas reflejado en la norma.
- **Caracterización de las probetas fabricadas a partir de filamento reciclado.** Para determinar las propiedades mecánicas de este nuevo filamento, se han de realizar los correspondientes ensayos de tracción, compresión y flexión, utilizando de nuevo la máquina universal de ensayos.
- **Análisis de los resultados obtenidos.** El trabajo concluye con una interpretación de los datos obtenidos tras los ensayos, realizando una comparación entre las propiedades de las probetas fabricadas a partir del filamento industrial y del filamento reciclado, para de esta forma tratar de determinar si existen diferencias significativas entre el comportamiento mecánico de ambos filamentos.

10. EQUIPO EMPLEADO

10.1 EXTRUSORA FILABOT ORIGINAL

Filabot es una empresa estadounidense cuya línea de productos está diseñada para convertir plástico en filamento para su uso en impresoras 3D, obteniendo grandes ahorros en comparación con el filamento comprado comercialmente.

La Filabot Original TM, que es la extrusora más básica dentro de la gama ofrecida por el fabricante, pesa 13 kg y tiene unas dimensiones de 46cm x 18cm x 24cm. Está compuesta de un motor reductor de 1/15 HP, que gira a 35 rpm y funciona con 24 VDC y 3.5 A con un par de 9 Nm. Cuenta, por otro lado, con una tolva donde introducir el material triturado y un tornillo sin fin que gira concéntricamente, además de un display para controlar la temperatura con un intervalo comprendido entre 20 y 450 °C, con indicación y control de precisión de 0,1 °C [35]

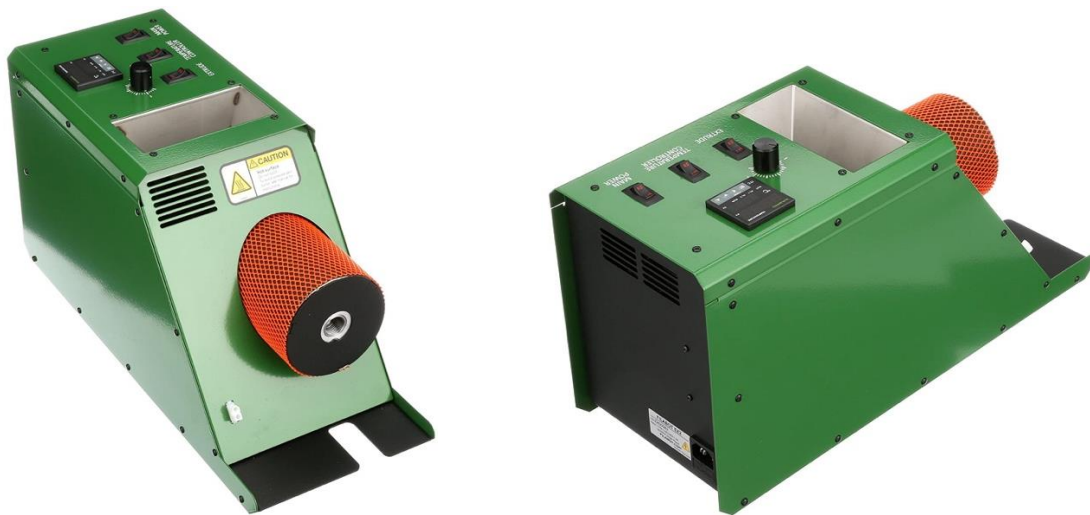


Figura 19. Extrusora Filabot [36]

El fabricante desaconseja el uso de PVC y otros vinilos en las extrusiones, puesto que los gases que se desprenden son tóxicos. Por otro lado, indica que es importante seguir un control de la temperatura durante el proceso de extrusión, dependiendo tanto de las condiciones ambientales de la sala como del material a extruir. Así, en el manual de la extrusora se proponen unos rangos aproximados de temperatura para determinados plásticos. En el caso del PLA, que es el material utilizado en este proyecto, se recomienda una temperatura de entre 175 y 195 °C.

Tabla 1. Temperaturas recomendadas por el fabricante [37]

PLA	175°C – 195°C
ABS	165°C – 185°C
HIPS	175°C – 195°C
Ultem	350°C – 400°C
PC	250°C – 320°C

10.2 IMPRESORA FORMBOT T-REX 2+

La Formbot T-REX 2+ se trata de una impresora de gran tamaño (700 mm x 630 mm x 750 mm) y que pesa 21 kg. La precisión es de 50 micras y su velocidad máxima de 180 mm/s. Posee una entrada de 110-220 V con una salida de 24 V y una potencia de 350 W. Además, es compatible con diferentes materiales, tales como filamento PLA, PVA, ABS, etc.

Una de sus principales ventajas con respecto a otras impresoras es que tiene doble extrusor, lo que le permite, más allá de una impresión simple, hacer una figura mezclando diferentes colores y materiales, o incluso realizar dos figuras iguales al mismo tiempo.



Figura 20. Impresora Formbot T-REX 2+ [38]

Por otro lado, tiene conectividad a través de tarjeta SD o de cable USB y es compatible con diversos programas para impresoras 3D.

La impresora empleada ha sido objeto de algunas modificaciones con respecto al modelo original. El extrusor original (*T-Rex 2+ Extruder Plastic*) fue reemplazado por un modelo *Dual Extruder*. Por otro lado, el kit HotEnd original, que incluye disipador, barrel, boquilla y bloque de aluminio, fue sustituido por un modelo *V6 Volcano*.



Figura 21. *T-Rex 2+ Extruder Plastic* [39]



Figura 22. *HotEnd V6 Volcano* [40]

10.3 MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYO

Máquina de ensayos mecánicos *Shimadzu Autograph* con capacidad hasta 50 kN y accionamiento electromecánico, del laboratorio del Área de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica del departamento de Ingeniería Industrial de la Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología de la Universidad de La Laguna. Está equipada con célula de carga de 50 kN máximo y controlada por ordenador mediante la aplicación *Trapezium* de *Shimadzu*.

Fue utilizada para realizar tres tipos de ensayos mecánicos: de tracción, de compresión y de flexión.

10.4 CALIBRADOR DIGITAL

El calibrador digital o pie de rey es un instrumento que proporciona mediciones precisas y fáciles de leer, usado en carpintería, ingeniería mecánica, metalurgia... y que ha supuesto un avance en el marco de las mediciones de magnitudes propias de la metrología respecto a los calibradores manuales, puesto que no solo permite incrementar la exactitud de los resultados, sino que también implica que estos pueden ser obtenidos con gran rapidez. Es comúnmente utilizado para la medición de diámetros tanto interiores como exteriores, así como de profundidades y longitudes.

A lo largo de este trabajo, el calibrador fue necesario tanto para la toma de medidas necesarias de cara al diseño de las diferentes piezas, como para la caracterización del filamento obtenido.



Figura 23. Calibrador digital. Fuente: propia.

10.5 TRITURADORA

El Área de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica tiene planeada la incorporación al laboratorio de una máquina trituradora. Sin embargo, aún no se encuentra disponible, por lo que la trituración de piezas de PLA para su reciclado convirtiéndolas en filamento imprimible se ha tenido que realizar de forma manual. Para ello se ha utilizado un martillo y unas tenazas, hasta lograr pequeñas piezas que simulan pellets y que pueden ser introducidas en la tolva de la extrusora Filabot.

11. REQUERIMIENTOS DE DISEÑO.

Dada la naturaleza de este proyecto, no existieron unos requerimientos previos a la hora de diseñar las mejoras que se implementaron en la mesa de trabajo. El trabajo se inició con la única idea de encontrar la mejor forma de acoplar el sistema extrusor motorizado y de, posteriormente, desarrollar todas las mejoras posibles de cara a la obtención de filamento.

Cabe destacar que se trató de que la totalidad de las piezas diseñadas pudieran ser fabricadas mediante modelado por deposición fundida evitando acudir a terceros, lo cual supondría un aumento del costo y de los tiempos de ejecución.

12. ANÁLISIS DE SOLUCIONES

En este apartado se expone la geometría de los elementos diseñados, además de explicar las decisiones adoptadas. Asimismo, se ubican las piezas dentro del conjunto facilitando así su comprensión.

12.1 SITUACIÓN DE PARTIDA Y DISEÑO FINAL

En primer lugar, se muestra la situación desde la que se partía (*Figura 24*). La estructura de sujeción es un mueble de madera sobre el cual se apoya la extrusora y el resto de los elementos. La obtención de filamento se realizaba de forma manual haciendo uso de un perfil metálico que guiaba el filamento desde la boquilla de la extrusora hasta el sistema de bobinado del filamento. Este perfil se situaba sobre dos soportes regulables en altura, y se contaba además con cuatro ventiladores que ayudaban al enfriamiento del filamento a lo largo del recorrido.

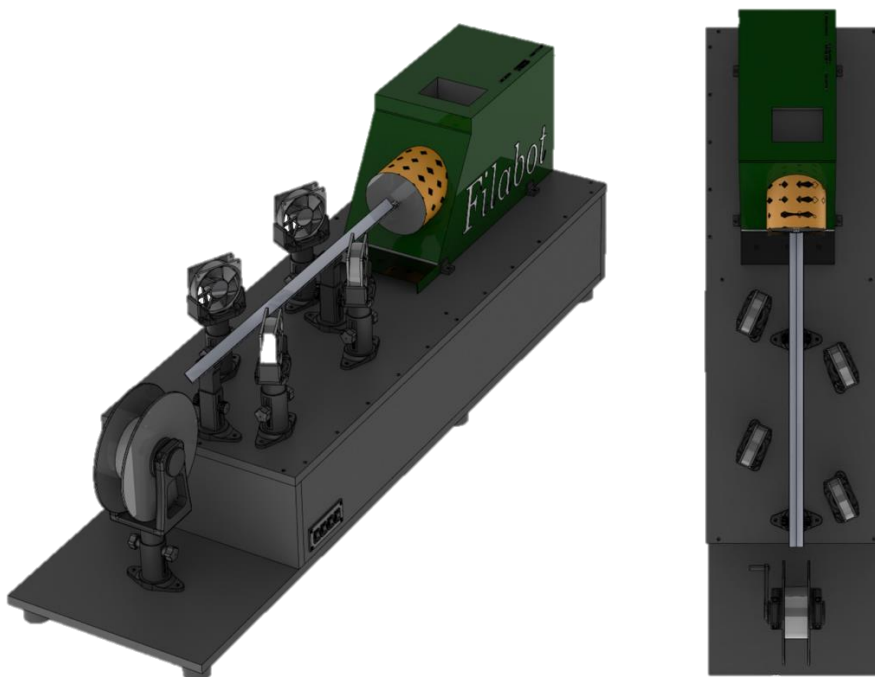


Figura 24. Conjunto situación inicial. Fuente: propia

Sin embargo, los elementos con los que se contaba no permitían obtener grandes cantidades de filamento con características adecuadas para la impresión. Esto se debía principalmente a que al tirar filamento de forma manual resulta muy complicado controlar un parámetro tan importante como la velocidad, la cuál influye directamente en el diámetro del filamento. Por ello, se compró un sistema extrusor motorizado para tratar de paliar este problema. Además, incluye un motor de velocidad regulable, puesto

que la velocidad de extrusión de filamento no es constante debido a la alimentación inestable de la extrusora.

Así, en el desarrollo de este proyecto se diseñó el sistema de acople de este sistema extrusor motorizado al conjunto, así como otra serie de mejoras de cara a aumentar la cantidad y la calidad del filamento obtenido.

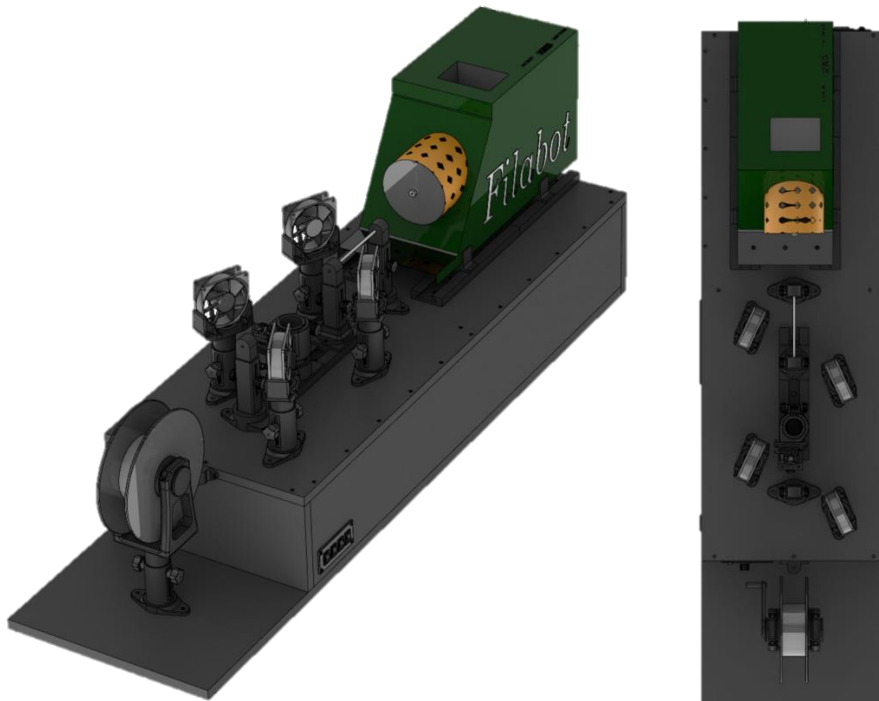


Figura 25. Visión global conjunto inicial. Fuente: propia

Cabe destacar que, con respecto al conjunto inicial desde el cuál se partía, se han mantenido tanto los ventiladores como el sistema de bobinado. El resto de los elementos han sido eliminados u objeto de mejora. En la *Figura 25* se muestra una visión global del diseño final con todos los elementos implementados en este trabajo, los cuáles se dividen en 4 subconjuntos que se explicarán a continuación de forma individual:

- Subconjunto 1: Acople del sistema extrusor motorizado
- Subconjunto 2: Guía de filamento mediante tubo PTFE
- Subconjunto 3: Sistema de raíles para la extrusora
- Subconjunto 4: Guía de filamento previa al bobinado

En el *Anexo VII* se incluyen los planos acotados de todas las piezas que se han diseñado durante la realización de este proyecto.

12.2 SUBCONJUNTO 1: ACOUPLE DEL SISTEMA EXTRUSOR MOTORIZADO

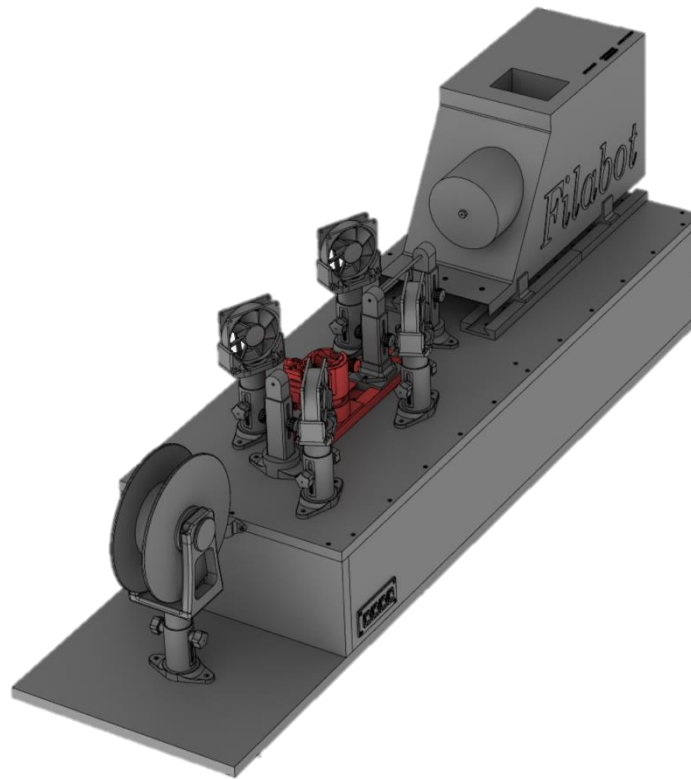


Figura 26. Ubicación del subconjunto 1. Fuente: propia

El primer y principal objetivo fue acoplar el sistema extrusor motorizado a la mesa de trabajo. Sin embargo, éste no podía tener directamente una posición fija, sino que requería que el diseño del sistema permitiese su movilidad de cara a, posteriormente y mediante pruebas, determinar la posición idónea para obtener el mejor filamento posible. Así, se comenzó por diseñar un sistema de raíles que permitiese el movimiento horizontal del motor y del sistema extrusor a lo largo de la mesa, y sobre éste unos ejes con un sistema de abrazadera que permitiesen ajustar la altura.

Se emplea un motor paso a paso *NEMA 17* que permite variar la velocidad de 5 rpm a 22 rpm. El motor paso a paso Nema 17 es de tipo bipolar, con un ángulo de paso de $1,8^\circ$, es decir, puede dividir cada una de las revoluciones o vueltas en 200 pasos. Cada bobinado de los que tiene en su interior soporta 1.2A de intensidad a 4v de tensión, con lo que es capaz de desarrollar una fuerza considerable de 3.2 kg/cm.

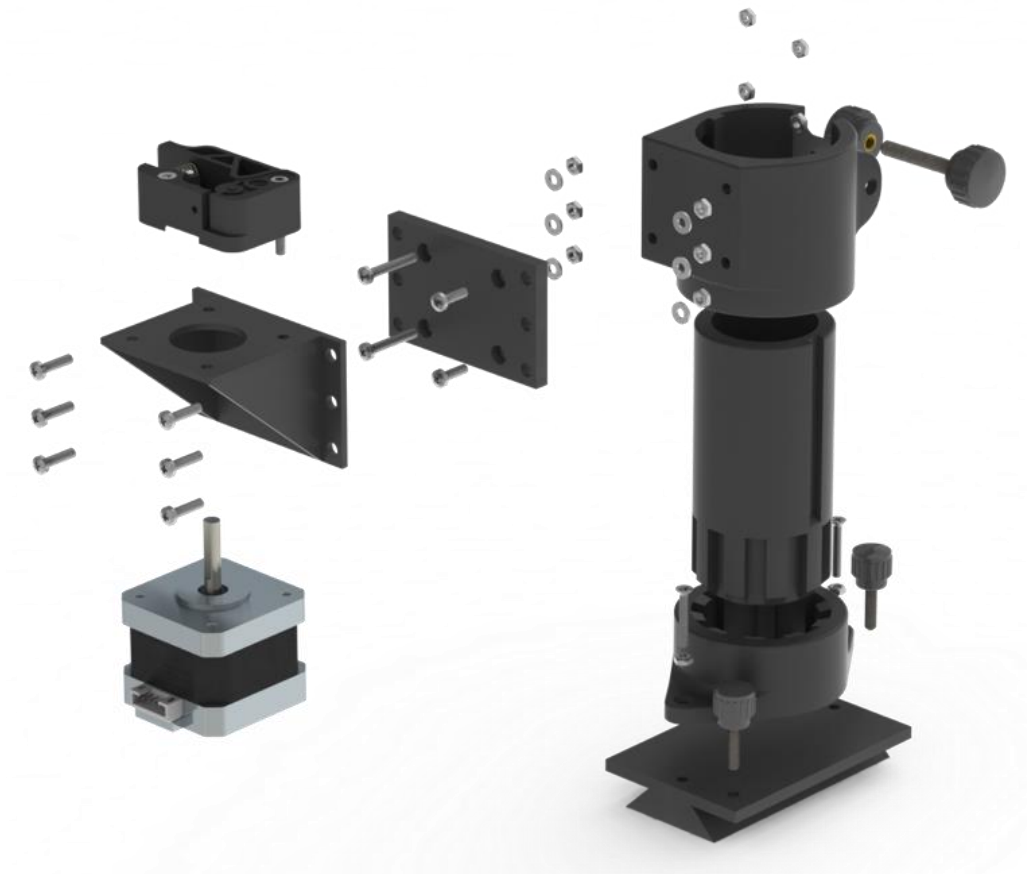


Figura 27. Vista explosionada del subconjunto 1. Fuente: propia

En el diseño podemos encontrar una base con un hueco circular estriado con el fin de tener una buena sujeción, y en el cuál será introducido el eje interior. Esta base cuenta con dos avellanados para permitir el acople mediante tornillos a una base que posibilita su movilidad a través de la cola de milano.

El eje exterior se ha diseñado con un sistema de abrazadera que permita su sujeción a diferentes alturas. Por otro lado, este eje dispone de una cara plana sobre la que unir los elementos que soportan al motor, tal y como se puede apreciar en la *Figura 27*.

Diseños descartados

Al comenzar con el diseño, se pretendía utilizar un motor DC cuya velocidad se podía variar hasta un máximo de 2 rpm. Sin embargo, al iniciar el proceso de extrusión se requería una velocidad mayor, por lo que se pasó a usar el motor *NEMA 17* cuya geometría es diferente, lo cual hizo necesario rediseñar las piezas que acoplan el motor. En la *Figura 28* se muestra el diseño inicial.



Figura 28. Diseño descartado acople del motor. Fuente: propia

12.3 SUBCONJUNTO 2: GUÍA DE FILAMENTO MEDIANTE TUBO PTFE

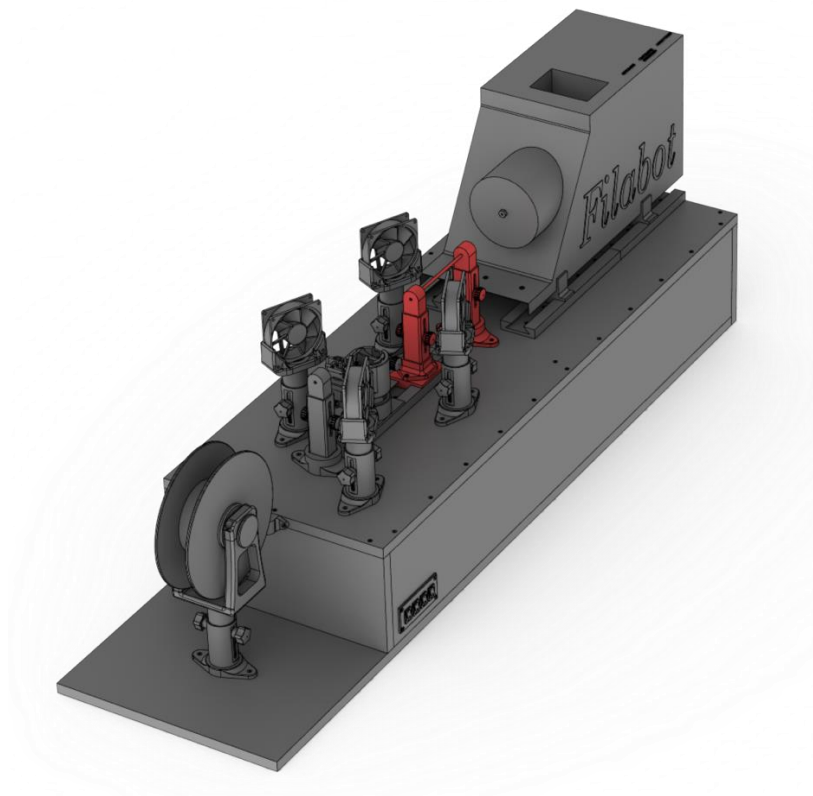


Figura 29. Ubicación del subconjunto 2. Fuente: propia

Para guiar al filamento desde la boquilla de la extrusora hasta el sistema extrusor motorizado se optó por utilizar un tubo de PTFE de 1,75 mm de diámetro, lo cuál nos sirve además para controlar el diámetro del filamento que se está obteniendo.

Se utilizaron dos estructuras de sujeción unidas mediante un tubo de PTFE que haría de puente entre ambas. Para la primera de ellas, situada justo a la salida de la extrusora, se utilizó el diseño del soporte ya existente, que constaba de una base con un hueco circular estriado, un eje exterior rectangular, y un eje interior regulable en altura mediante un tornillo pasador. Sin embargo, se realizaron algunas modificaciones. En primer lugar, se aumentó la altura de la base con el objetivo de obtener una mayor sujeción. Por otro lado, se cambió la geometría del eje interior añadiéndole un agujero en el que introducir el tubo de PTFE.

En cuanto a la segunda estructura de sujeción, fue incluida en el interior de la cola de milano que había sido instalada para el acople del sistema extrusor motorizado. El diseño de este soporte es similar al del anterior, a excepción de la base cuya geometría cambia con el objetivo de poder adaptarla al sistema de raíles.



Figura 30. Vista explosionada del subconjunto 2. Fuente: propia

Diseños descartados

En un principio se pretendía, para guiar el filamento, utilizar el perfil de aluminio del que se disponía junto con los soportes en forma de V sobre los que se apoyaba. Sin embargo,

al realizar la primera prueba de obtención de filamento se llegó a la conclusión de que no era viable, puesto que a la salida de la extrusora el filamento se pegaba al perfil y se acumulaba formándose imperfecciones. Por ello se optó por utilizar el tubo de PTFE de 1,75 mm modificando las estructuras de sujeción para adaptarlas a este.

12.4 SUBCONJUNTO 3: SISTEMA DE RAÍLES PARA LA EXTRUSORA

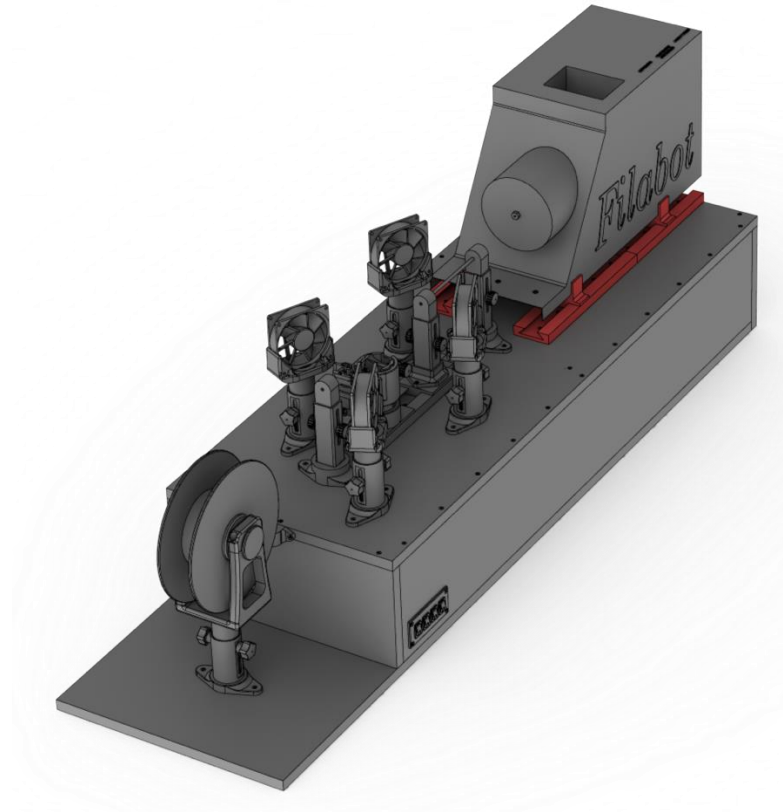


Figura 31. Ubicación del subconjunto 3. Fuente: propia

A pesar de que tanto el sistema extrusor motorizado como los sistemas de sujeción que sirven para guiar el filamento son de altura regulable, resultó necesario aumentar la altura de la extrusora *Filabot*, puesto que la altura mínima de estos elementos superaba la de la boquilla de la extrusora.

Para ello se utilizaron cuatro soportes sobre los que descansa la extrusora y que sirven además como topes evitando el movimiento de ésta. Además, para facilitar la entrada del filamento al tubo de PTFE, estos soportes se situaron sobre un sistema de raíles que permite alejar la extrusora al iniciar el proceso de obtención de filamento. De esta forma hay un cierto margen de enfriamiento para el filamento, el cual hay que introducir en el tubo de forma manual.

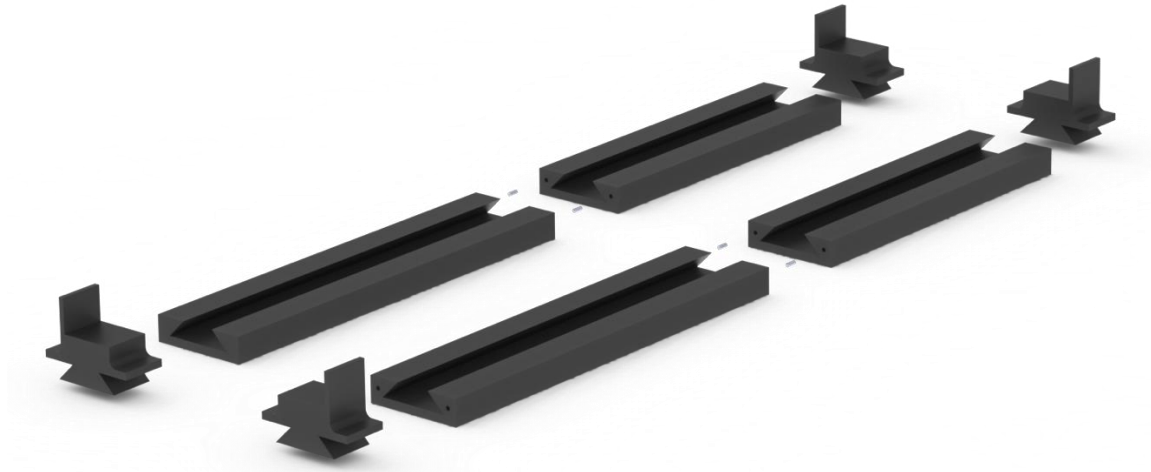


Figura 32. Vista explosionada del subconjunto 3. Fuente: propia

Debido a las dimensiones de esta guía, cuya longitud es superior a la capacidad de impresión, fue necesario imprimirla de dos partes, tal y como se aprecia en la *Figura 32*.

Diseños descartados

Inicialmente, puesto que no se había decidido incluir el sistema de raíles bajo la extrusora, se habían diseñado unos soportes de mayor altura, tal y como se muestra en la *Figura 33*.

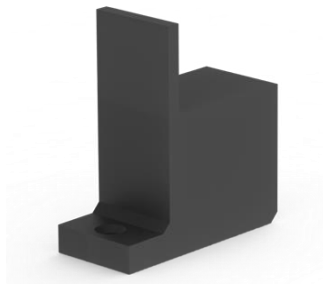


Figura 33. Diseño descartado para soportes de la extrusora. Fuente: propia

12.5 SUBCONJUNTO 4: GUÍA DE FILAMENTO PREVIA AL BOBINADO

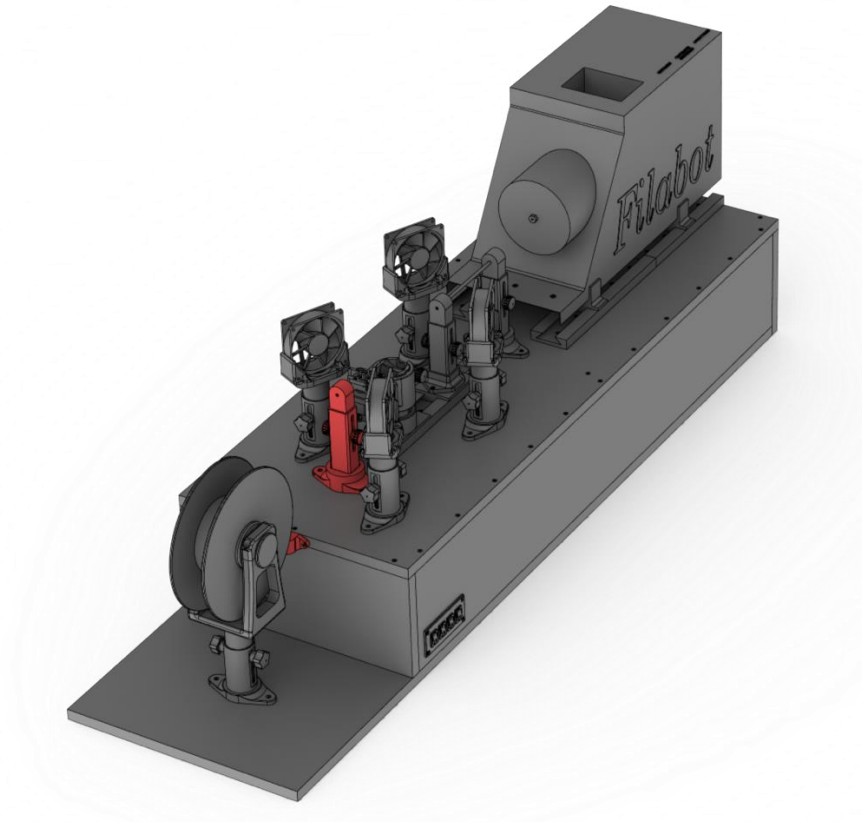


Figura 34. Ubicación del subconjunto 4. Fuente: propia

Finalmente, se decidió diseñar algún sistema que sirviera de guía para el filamento desde el sistema extrusor motorizado hasta la entrada al sistema de bobinado. Para ello, se instaló un soporte idéntico al situado a la salida de la extrusora, cuya geometría se puede apreciar en la *Figura 30*. Este incluye un pequeño tubo de PTFE en el interior del agujero del eje exterior y por el cual se introduce el filamento.

Además, se instaló, sobre la tabla vertical delantera de la mesa de madera, una pequeña pieza que contiene también un agujero en el cual se introduce otro trozo de tubo de PTFE y por el cual debe pasar el filamento.

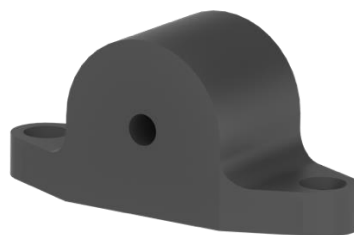


Figura 35. Pieza final con tubo PTFE. Fuente: propia

12.6 OTRAS PIEZAS DISEÑADAS

12.6.1 Electrónica y regulación del motor

El motor DC que en un principio iba a emplearse incluía, además de la electrónica, un *display* de 7 segmentos para indicar de forma porcentual la velocidad del motor en cada instante, un pomo para regular la velocidad, y un interruptor de encendido y apagado que permite además modificar el sentido de giro (véase *Figura 36*); y todos estos elementos debían acoplarse a la mesa de trabajo.

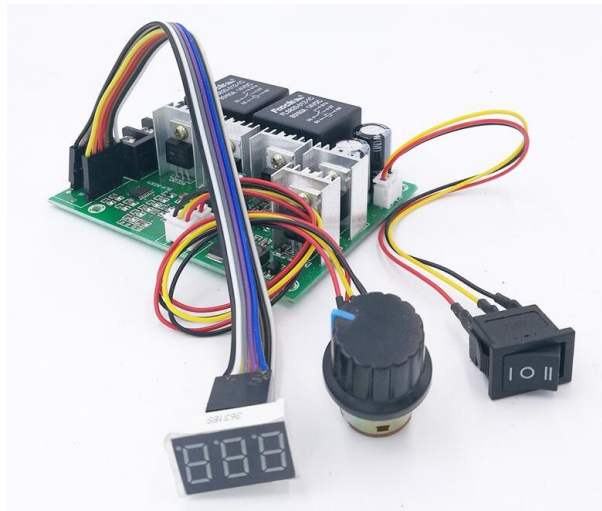


Figura 36. Elementos motor DC

Finalmente se empleó de forma provisional un motor *NEMA 17* debido a que se requería una velocidad mayor que la máxima del motor DC del cuál se disponía y se quiso evitar un aumento del tiempo de ejecución del proyecto, teniendo en cuenta que este tipo de motores se compran por Internet y pueden tardar meses en llegar. Sin embargo, de cara al futuro se adquirieron otros motores DC de velocidades mayores. Por ello se decidió mantener instalados los elementos que se mencionan a continuación.

Para salvar los puntos de soldadura de la placa PCB de la electrónica, se diseñó un soporte elevador atornillable que permite fijarla a la mesa de trabajo garantizando que no esté en contacto con ninguna superficie.

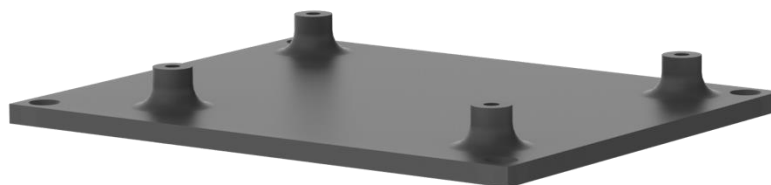


Figura 37. Soporte placa electrónica. Fuente: propia

Por otro lado, se planteó un marco para acoplar a la pared lateral de la mesa el interruptor del motor, el pomo y el *display*, tal y como se muestra en la *Figura 38*.



Figura 38. Marco. Fuente: propia

12.6.2 Pasador de cable

Finalmente, para evitar que el cableado del motor molestara a la hora de obtener filamento, se diseñó un pasador de cable que se adaptó a la mesa de trabajo y que permite el paso de los cables al interior de esta.



Figura 39. Pasador de cable. Fuente: propia

13. PLAN EXPERIMENTAL DE PROBETAS

13.1 DISEÑO DE PROBETAS

El diseño de las probetas para los ensayos de tracción, compresión y flexión se realizó de acuerdo con las normas de los ensayos mecánicos [41] [42] [43] [44].

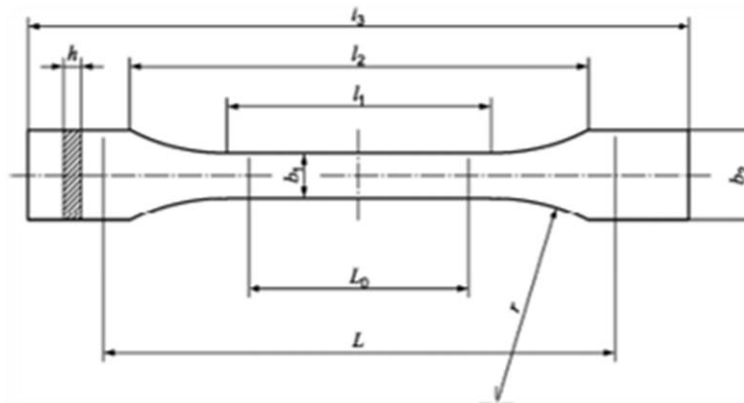


Figura 40. Dimensiones de la pieza para el ensayo a tracción [41] [42]

Tabla 2. Dimensiones de la pieza para el ensayo a tracción [41] [42]

Tracción	l_3	Longitud total (mm)	170 ± 1
	l_1	Longitud de la parte estrecha de caras paralelas (mm)	80 ± 2
	r	Radio (mm)	24 ± 1
	l_2	Distancia entre las partes anchas de caras paralelas (mm)	$109,3 \pm 3,2$
	b_2	Anchura en los extremos (mm)	$20 \pm 0,2$
	b_1	Anchura de la parte estrecha (mm)	$10 \pm 0,2$
	h	Espesor recomendado (mm)	$4 \pm 0,2$
	L_0	Longitud de referencia (mm)	$50 \pm 0,5$
	L	Distancia inicial entre las mordazas (mm)	115 ± 1

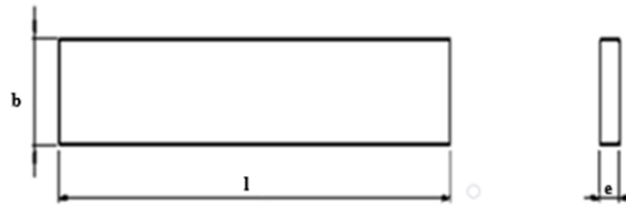


Figura 41. Dimensiones de la pieza para el ensayo a flexión [43]

Tabla 3. Dimensiones de la pieza para el ensayo a flexión [43]

Flexión	b	Base (mm)	$10 \pm 0,2$
	e	Espesor (mm)	$4 \pm 0,2$
	l	Longitud (mm)	80 ± 2

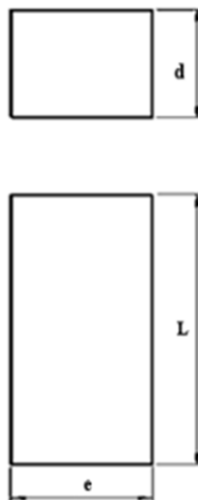


Figura 42. Dimensiones de la pieza para el ensayo a compresión [44]

Tabla 4. Dimensiones de la pieza para el ensayo a compresión [44]

Compresión	d	Espesor (mm)	$16 \pm 0,2$
	e	Base (mm)	$16 \pm 0,2$
	L	Longitud (mm)	40 ± 2

Para el ensayo de tracción, se emplea la recomendación de las normas *UNE-EN ISO 527-1:2019* [41] y *UNE-EN ISO 527-2:2012* [42], utilizando en concreto la probeta de tipo 1A. En cuanto al ensayo de flexión, se adopta la probeta preferente recomendada por la norma *UNE-EN-ISO 178:2020* [43].

Para el ensayo de compresión se establece que las probetas deben tener forma de prisma recto, cilindro o tubo; y la norma *UNE-EN ISO 604:2003* [44] recomienda una probeta preferente. No obstante, se decide, con el fin de minimizar el posible pandeo de la pieza durante el ensayo, realizar otro diseño con forma de prisma recto. Para ello se hizo uso de la siguiente inecuación:

$$\frac{x}{l} \geq 0,4 \quad (1)$$

x es el lado menor de la sección transversal del prisma (mm).

l es la longitud de la probeta (mm).

Una vez especificadas las dimensiones de las distintas probetas, se realiza el modelado 3D haciendo uso del programa *SolidWorks*, tal y como se puede observar en la *Figura 43*.

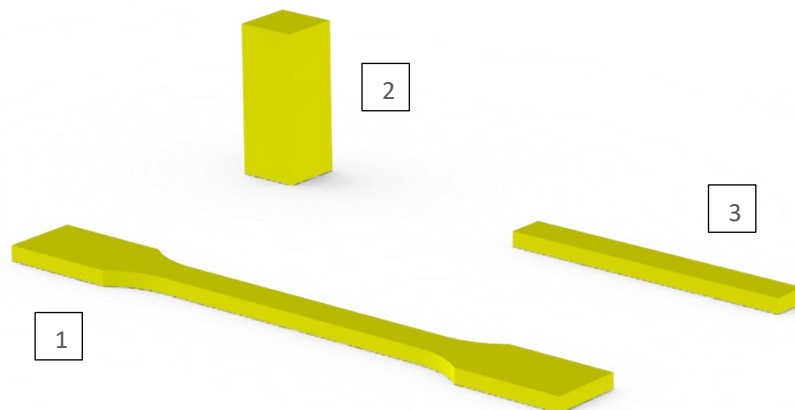


Figura 43. Diseño probetas. 1, Tracción; 2, Compresión; 3, Flexión. Fuente: propia

13.2 IMPRESIÓN DE PROBETAS

Tras tener completados los archivos CAD, estos se guardan en una extensión STL, que es empleada en el software laminador *Simplify 3D*, a través del cual se establecen todos los parámetros de impresión, de cara a lograr una impresión óptima. En la *Tabla 5* se recogen los valores seleccionados de los principales parámetros para la impresión de las probetas.

Tabla 5. Principales parámetros de impresión seleccionados.

PRINCIPALES PARÁMETROS DE IMPRESIÓN SELECCIONADOS	
Altura de capa	0,1 mm
Perímetro	2
Temperatura de impresión	210 °C
Temperatura de la cama de impresión	50 °C
Velocidad de impresión	60 mm/s
Porcentaje de relleno	50%
Patrón de relleno	Grid

14. OBTENCIÓN DE FILAMENTO

14.1 TRITURADO DE PLA

Una vez realizados los correspondientes ensayos a las probetas impresas con el filamento industrial, se procedió a su trituración de cara a la posterior fabricación de filamento reciclado.

Al no disponer de una máquina trituradora, este proceso se tuvo que llevar a cabo de forma manual utilizando diferentes herramientas. En primer lugar, se utilizó una cizalla manual disponible en el laboratorio del Área de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica mediante la cual se pudieron romper las piezas en otras más pequeñas. A partir de ahí, y utilizando unos alicates y unas tenazas, se logró triturar las piezas hasta obtener pequeños trozos de un tamaño similar a los pellets industriales.



Figura 44. Proceso de triturado. Fuente: propia.



Figura 45. PLA triturado. Fuente: propia.

En total se trituraron 18 probetas previamente ensayadas a compresión, 18 ensayadas a flexión y 16 ensayadas a tracción. Como era de esperar, durante el proceso de triturado manual hubo una ligera pérdida de material, la cuál podría evitarse si se contara con una máquina trituradora.

Tabla 6. Pérdida de material durante el triturado manual

<i>PLA antes del triturado</i>	344,631 g
<i>PLA tras el triturado manual</i>	342,105 g
<i>Porcentaje de pérdida de material</i>	0,733 %

14.2 OBTENCIÓN DE FILAMENTO EN EL LABORATORIO

Tras haber triturado todo el material disponible, se procedió a la fabricación de filamento en el laboratorio, haciendo uso de la extrusora Filabot Original y los mecanismos previamente diseñados. Cabe destacar que se utilizó una boquilla de 2 mm a la salida de la extrusora.

En total se obtuvieron 90 metros divididos en 14 tramos. En todo momento se buscó el mayor acercamiento posible al diámetro del filamento industrial (1,75 mm). Sin embargo, obtener un diámetro completamente constante nunca fue viable debido a la alimentación inestable de la extrusora, la cual provoca que el filamento sea extruido a velocidades variables. Pese a ello, modificando la velocidad del motor a lo largo del proceso, se consiguió minimizar el efecto de estas variaciones logrando que todo el filamento obtenido tuviese un diámetro que, pese a su gran variabilidad, rondara entre 1,2 y 2,1 mm.

Tabla 7. Tramos de filamento obtenidos

Tramo	Longitud [m]	\varnothing_{\min} [mm]	\varnothing_{\max} [mm]	$\varnothing_{\text{medio}}$ [mm]
1	5,15	1,36	1,93	1,66
2	7,41	1,20	2,10	1,71
3	8,45	1,31	1,97	1,66
4	7,10	1,34	1,98	1,72
5	6,61	1,22	1,90	1,59
6	7,00	1,27	2,20	1,76
7	5,50	1,24	1,93	1,67
8	16,25	1,24	2,00	1,60
9	1,45	1,61	1,93	1,78
10	2,00	1,60	1,92	1,76
11	2,88	1,25	1,88	1,71
12	8,25	1,27	1,96	1,70
13	10,25	1,30	2,08	1,72
14	2,00	1,20	1,95	1,61



Figura 46. Tramos de filamento obtenidos. Fuente: Propia

En el *Anexo IV* se encuentra disponible toda la información sobre la caracterización de los tramos de filamento.

14.3 DETERMINACIÓN DEL FILAMENTO IMPRIMIBLE

Una vez fabricado todo el filamento, el siguiente paso fue comprobar si éste poseía las características necesarias para una óptima impresión. Debido a la imposibilidad ya mencionada de obtener un filamento con un diámetro constante de 1,75 mm, y de cara a que la mayor parte de éste fuera imprimible, se hicieron ciertas modificaciones para aumentar la tolerancia de la impresora.

Inicialmente, y tras haber llevado a cabo la obtención de filamento, se realizó un proceso de pruebas consistentes en hacer pequeñas impresiones con diferentes tramos con el objetivo de determinar el rango real de diámetros válidos para una impresión óptima de las probetas normalizadas. De esta manera, se obtuvieron dos conclusiones:

1. Si el diámetro era demasiado pequeño afectaba a la calidad de la impresión pues no había suficiente aporte de material. Además, se tenía la incertidumbre de que el filamento pudiera llegar a deslizarse dentro de los engranajes del extrusor, provocando que la impresión continuara sin que se extruyese material.
2. Si el diámetro superaba los 1,75 mm se presentaba el riesgo de que el extrusor se atascara, dejando de extruir PLA.



Figura 47. Impresión fallida por atasco del extrusor. Fuente: Propia

Estas circunstancias nos harían perder grandes cantidades de filamento en posibles impresiones fallidas. Además, obligaría a estar pendientes de la impresión en todo momento.

Se barajó la opción de eliminar previamente los tramos que no se encontraran dentro de un cierto rango de diámetros (1,5 – 1,8 mm). No obstante, nos habríamos quedado con tramos de filamento de poca longitud, que además habría que soldar para poder imprimir las probetas. Por ello, y teniendo en cuenta las longitudes de filamento necesarias para imprimir las diferentes probetas, así como la imposibilidad de cambiar de un tramo a otro en mitad de la impresión, finalmente se decidió tratar de aumentar la tolerancia de la impresora con el objetivo de acrecentar la cantidad de filamento aprovechable.

Para aumentar la tolerancia con respecto a los diámetros mayores de 1,75 mm se llevaron a cabo dos modificaciones:

1. En primer lugar, se pasó una broca de 2 mm a lo largo de todo el Dual Extruder, que anteriormente era de 1,75 mm.
2. Se sustituyó el barrel Full metal de 1,75 mm por uno con tubo de PTFE de 1,9 mm. Este tipo de barrel tiene menor predisposición a atascarse.



Figura 48. Tipos de barrel

Una vez realizadas estas modificaciones se trató de comprobar la validez de todo el filamento obtenido pasándolo por el interior de un tubo de PTFE de igual diámetro que el del barrel. A excepción de pequeños trozos insignificantes que tuvieron que ser eliminados por haberse atascado en el interior del tubo, la mayor parte del filamento resultó ser imprimible.

Con respecto a comprobar los diámetros más pequeños, se modificó temporalmente el sistema extrusor retirando el HotEnd, que implica el bloque de aluminio y el disipador, con el objetivo de hacer pasar el filamento sin necesidad de fundirlo. De esta forma, el filamento que pasara por el conjunto de engranajes y se desplazara sin deslizarse, sería válido mecánicamente para la impresión. De hecho, todos los tramos resultaron serlo.

Sin embargo, habiendo comprobado previamente que un diámetro demasiado pequeño influye negativamente en la calidad de la pieza debido a la falta de material extruido, y teniendo en cuenta que se disponía de más filamento del necesario, se trataron de evitar los diámetros más pequeños aún siendo imprimibles.

15. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

15.1 ENSAYO DE TRACCIÓN

15.1.1 Introducción al ensayo de tracción

El ensayo de tracción consiste en someter una probeta a un esfuerzo axial hasta producir la rotura de esta, o hasta que el esfuerzo o la deformación alcancen un valor predeterminado. Este ensayo ha sido realizado consultando las normas *UNE-EN ISO 527-1:2019* [41] y *UNE-EN ISO 527-2:2012* [42] para la determinación de las propiedades en tracción, y haciendo uso de la máquina de ensayos mecánicos *Shimadzu Autograph*.

En esta máquina, las partes anchas de la probeta son fijadas en las mordazas. La mordaza inferior es fija y la superior es móvil, siendo esta la que aplica la carga axial en sentido ascendente. Se cuenta además con un extensómetro que permite recoger medidas con mucha mayor precisión.

Para el ensayo se debe fijar una velocidad para el ascenso de la mordaza superior, la cuál fue en nuestro caso de 1 mm/min, siguiendo la normativa. También se han de introducir en el software de la máquina los valores de espesor y anchura de las probetas, previamente medidas haciendo uso del calibrador digital.

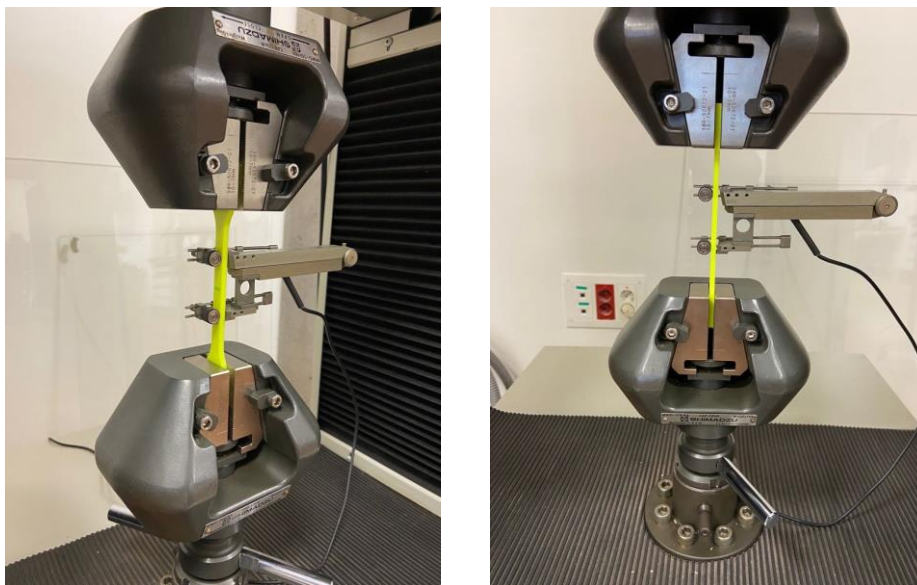


Figura 49. Montaje de la probeta en el ensayo de tracción. Fuente: propia

Tras el ensayo, se obtienen los resultados del tiempo transcurrido, la carga aplicada y el alargamiento medido mediante el extensómetro. Con estos valores, se realiza una representación del esfuerzo frente a la deformación, y de estos diagramas se distinguen zona plástica y zona elástica.

Al finalizar el ensayo, se obtienen los siguientes parámetros:

Esfuerzo de tracción (σ_t) que se define como la fuerza aplicada por unidad de área, expresado por la ecuación:

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \quad (2)$$

σ_t es el valor del esfuerzo (MPa).

F es la fuerza medida (N).

A es el área de la sección transversal inicial de la probeta (mm²).

Deformación en tracción (ϵ_t) que se define como el incremento de la longitud frente a una longitud de referencia:

$$\epsilon_t = \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (3)$$

ϵ_t es el valor de la deformación (%).

L_0 es la longitud de referencia de la probeta ($L_0 = 50$ mm).

ΔL_0 es el incremento de longitud de la probeta entre las marcas de referencia (mm).

Módulo de elasticidad en tracción o Módulo de Young (E_t) que relaciona la tensión según una dirección, con las deformaciones unitarias que se producen en esa misma dirección. Para la obtención del módulo elástico, se han representado en el programa *Microsoft Excel* cada una de las curvas Tensión/Deformación y se ha trazado una recta de tendencia lineal en un rango de la zona elástica de nuestra gráfica, obteniendo la ecuación de esta recta de tipo $y=mx+c$, donde el valor de la pendiente coincide directamente con el modulo elástico (E).

Límite elástico (σ_y) que se define como el máximo esfuerzo que puede soportar un material sin sufrir deformaciones permanentes. Para valores superiores a este esfuerzo, el material experimenta un comportamiento plástico. Normalmente se considera como límite elástico la tensión a la cuál el material tiene una deformación del 0,2%.

Resistencia a tracción (RT) que indica el esfuerzo máximo alcanzado en el ensayo a tracción, y que gráficamente es el mayor valor del eje de ordenadas.

Deformación máxima (ϵ_{max}) que indica la deformación más alta alcanzada, obtenida en el punto en el que la probeta rompe, si llega a hacerlo. Gráficamente es el último valor registrado en el eje de abscisas.

Esfuerzo de rotura (σ_b) que indica el valor del esfuerzo aplicado cuando el material alcanza la fractura.

15.1.2 PLA industrial

Como ya se menciona anteriormente, a partir de PLA industrial se imprimieron y ensayaron 14 probetas de tracción con el objetivo de tener suficiente material para triturar y fabricar filamento reciclado. Sin embargo, se fueron descartando probetas para utilizar una serie de seis de cara al estudio de las propiedades y su posterior comparación con las del PLA reciclado. De esas seis probetas, finalmente se suprimió una más, hasta mantener un total de cinco tal y como indica la norma.

Todos los resultados obtenidos para cada una de las probetas en este ensayo se recogen en la *Tabla 8*, junto con valor promedio, desviación típica y coeficiente de variación.

Tabla 8. Resultados del ensayo a tracción para el PLA industrial.

Valores individuales ensayo tracción. PLA Industrial								
	1	2	3	4	5	MED	SD	CV
RT (MPa)	26,40	26,40	26,50	26,00	25,90	26,24	0,27	1,03
E_t (MPa)	1942,90	1785,10	1783,70	1865,90	1830,80	1841,68	66,17	3,59
ϵ_{max} (%)	2,20	2,30	3,50	3,00	3,10	2,82	0,55	19,65

MED, Valor promedio; SD, Desviación estándar; CV, Coeficiente de variación.

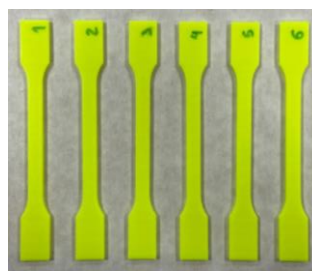


Figura 50. Probetas tracción PLA industrial pre-ensayo.

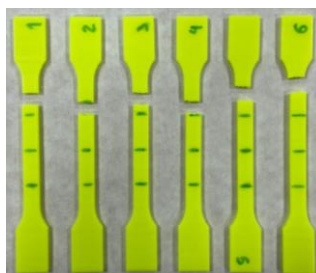


Figura 51. Probetas tracción PLA industrial post-ensayo.

Tal y como se puede observar en la *Figura 52* los resultados de la resistencia a tracción obtenidos tras ensayar las cinco probetas son muy homogéneos, con un valor promedio de 26,24 MPa y con un coeficiente de variación de tan solo un 1,03 %, manteniéndose entre 25,90 y 26,50 MPa.

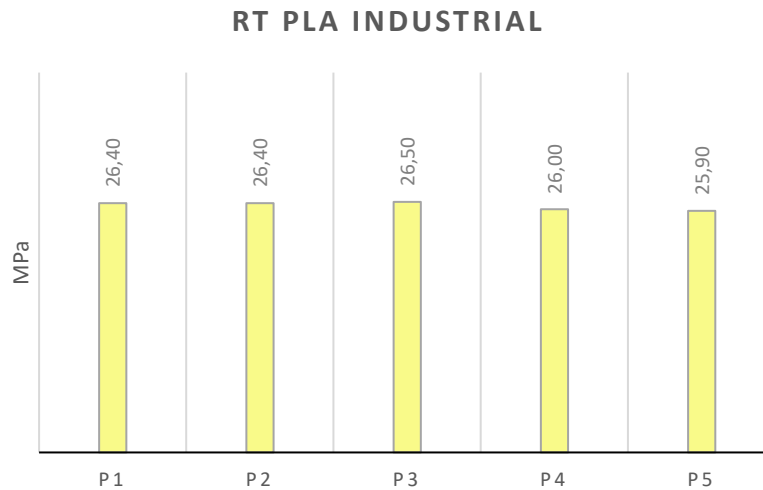


Figura 52. Gráfico comparativo. Resistencia a tracción PLA industrial.

Con respecto al módulo de elasticidad a tracción, el diagrama de barras de la *Figura 53* muestra como se obtuvieron valores bastante similares para las cinco probetas. Así, el coeficiente de variación es tan solo de un 3,59 %, con valores comprendidos entre 1783,70 y 1942,90 MPa.

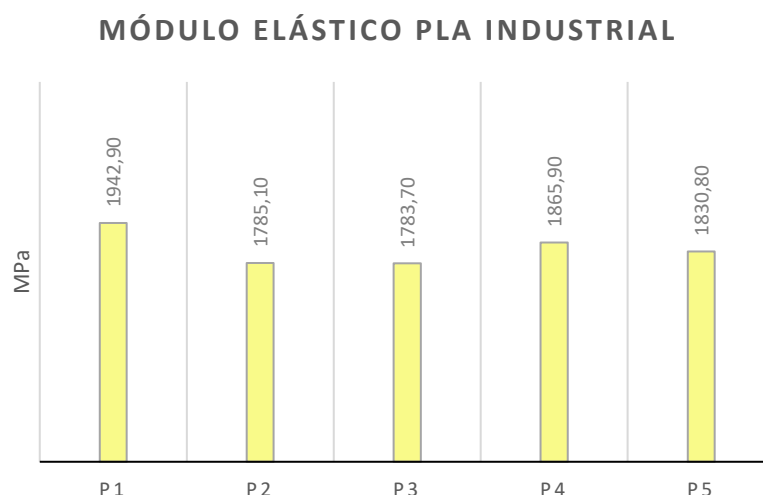


Figura 53. Gráfico comparativo. Módulo de elasticidad a tracción PLA industrial.

Finalmente, atendiendo a los resultados de deformación en tracción recogidos durante el ensayo, se puede observar en la *Figura 54* como los valores son más dispersos que para el resto de los parámetros. Estos valores van desde 2,20 % hasta un máximo de 3,50 %, con un coeficiente de variación del 19,65 %.

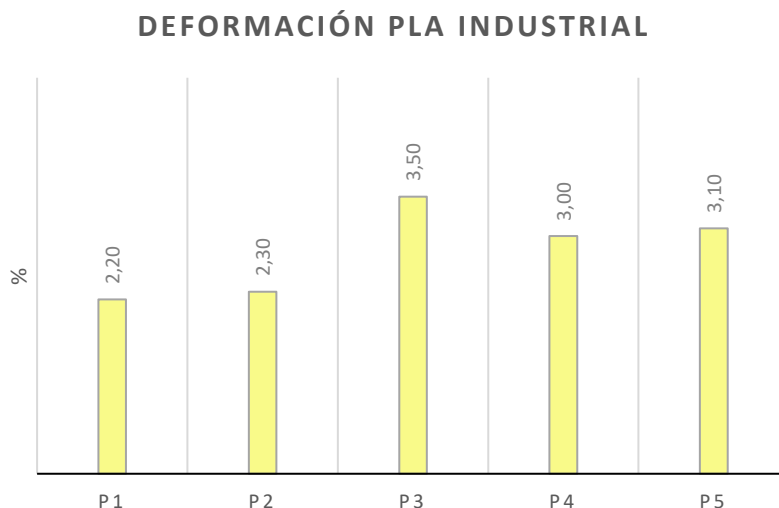


Figura 54. Gráfico comparativo. Deformación PLA industrial.

En el *Anexo III* se encuentran disponibles las gráficas de tensión-deformación obtenidas para cada probeta de PLA industrial en el ensayo a tracción.

15.1.3 PLA reciclado

Con el PLA reciclado se imprimió una serie de un total de 6 probetas para el ensayo a tracción. Sin embargo, de cara a los cálculos se descartó una de ellas. Este descarte se realiza por si en algún caso se da que el resultado de una probeta pueda desviarse drásticamente respecto a las demás. Todos los resultados obtenidos para cada una de las probetas en este ensayo se recogen en la *Tabla 10*, junto con valor promedio, desviación típica y coeficiente de variación.

Tabla 9. Resultados del ensayo a tracción para el PLA reciclado.

Valores individuales ensayo tracción. PLA Reciclado								
	1	2	3	4	5	MED	SD	CV
RT (MPa)	20,90	18,50	15,40	19,90	23,00	19,54	2,84	14,51
E_t (MPa)	1810,00	1735,30	1654,60	1839,80	2001,40	1808,22	129,65	7,17
ε_{max} (%)	1,50	1,40	1,30	1,30	1,60	1,42	0,13	9,18

MED, Valor promedio; SD, Desviación estándar; CV, Coeficiente de variación.



Figura 55. Probetas tracción PLA reciclado pre-ensayo. Fuente: propia



Figura 56. Probetas tracción PLA reciclado post-ensayo. Fuente: propia

Los valores de resistencia a tracción de las probetas de PLA reciclado ensayadas se sitúan entre 15,40 y 23,00 MPa, tal y como queda reflejado en la *Figura 57*. Estos no distan mucho entre sí, con una desviación típica de 2,84 MPa y un coeficiente de variación del 14,51%.

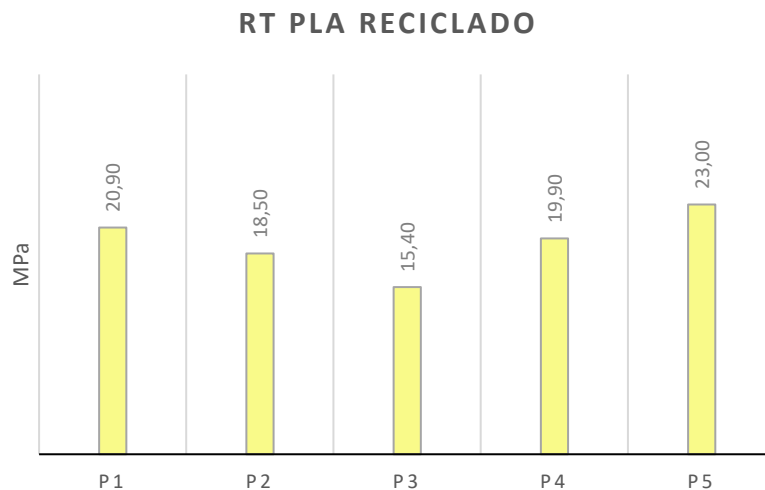


Figura 57. Gráfico comparativo. Resistencia a tracción PLA reciclado.

La *Figura 58* compara los resultados del módulo de elasticidad de las distintas probetas de PLA reciclado ensayadas a tracción. Se puede observar como los valores se

mantienen bastante constantes. El valor promedio es de 1808,22 MPa y el coeficiente de variación tan sólo del 7,17%, con una desviación típica de 129,65 MPa.

MÓDULO ELÁSTICO PLA RECICLADO

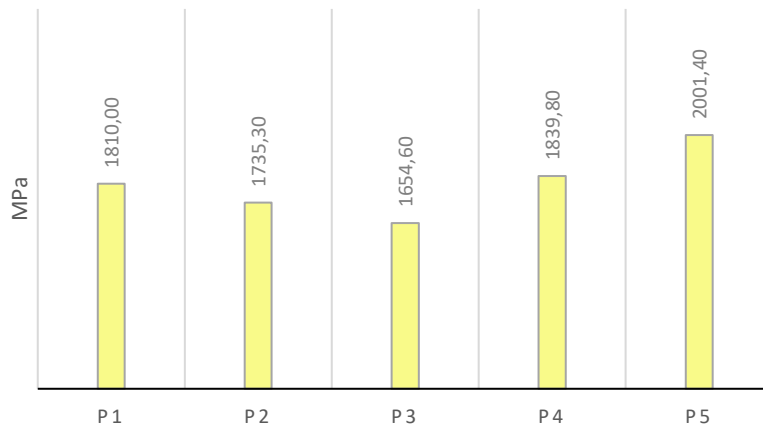


Figura 58. Gráfico comparativo. Módulo de elasticidad a tracción PLA reciclado.

Finalmente, con respecto a los resultados de deformación en tracción recogidos durante el ensayo a las probetas de PLA reciclado, la Figura 59 muestra como los valores están comprendidos entre 1,30 y 1,60 %. En ella queda reflejado como los diferentes valores son considerablemente similares, con un coeficiente de variación que no supera el 0,13 %.

DEFORMACIÓN PLA RECICLADO

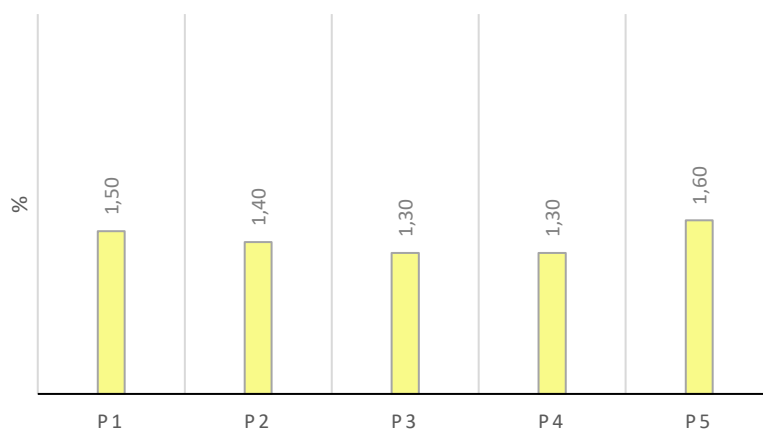


Figura 59. Gráfico comparativo. Deformación PLA reciclado.

En el Anexo III se encuentran disponibles las gráficas de tensión-deformación obtenidas para cada probeta de PLA reciclado en el ensayo a tracción.

15.1.4 Ensayo de tracción: PLA industrial vs PLA reciclado

Una vez expuestos los resultados obtenidos en el ensayo a tracción de las probetas de PLA industrial y de PLA reciclado, en este apartado se realizará una comparación entre los valores recogidos para los diferentes parámetros en el ensayo de cada tipo de probeta.

Como se puede observar en la *Figura 60* los valores de resistencia a tracción distan considerablemente, con un valor promedio de 26,24 MPa para el PLA industrial frente a los 19,54 MPa del PLA reciclado. Además, se aprecia como los resultados obtenidos en las probetas de material industrial son mucho más homogéneos, tal y como era de esperar.

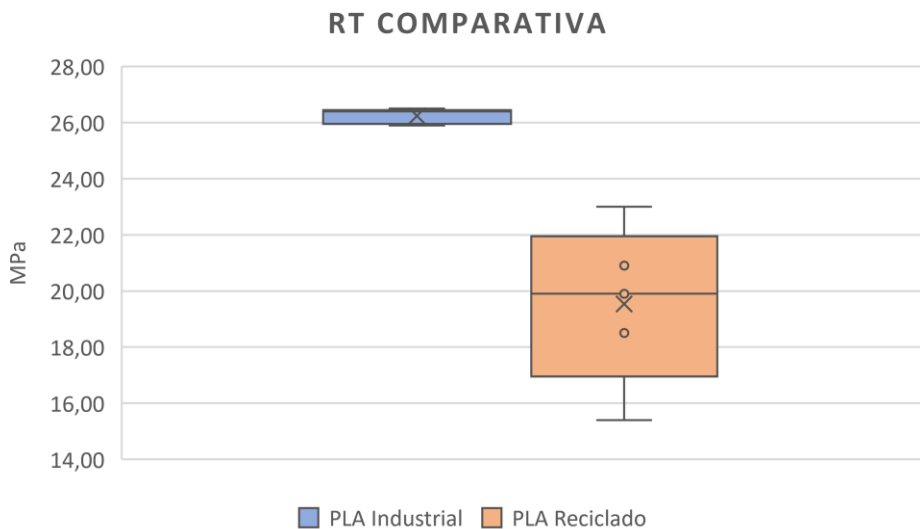


Figura 60. Gráfico comparativo. Resistencia a tracción para ambos tipos de PLA.

Con respecto a la deformación en tracción, de igual forma los resultados obtenidos para el PLA industrial son considerablemente mayores, con un valor promedio de 2,82 % frente a los 1,42 % del material reciclado. Sin embargo, en este caso la desviación típica obtenida para el segundo tipo de probetas es mucho menor, lo cuál indica que los valores de deformación se mantienen mucho más constantes en las probetas fabricadas con PLA reciclado.

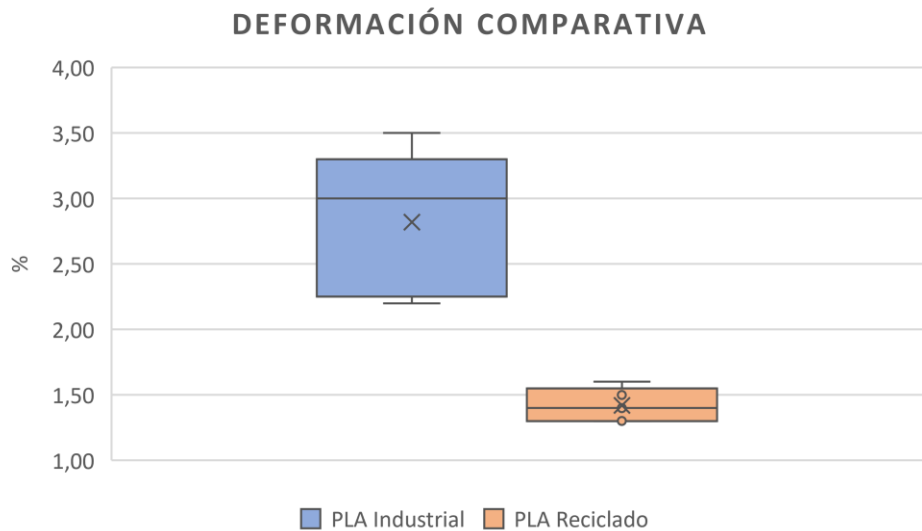


Figura 61. Gráfico comparativo. Deformación en tracción para ambos tipos de PLA.

Por otro lado, si atendemos a la gráfica comparativa del módulo elástico (Figura 62) se puede observar como los resultados obtenidos para el PLA industrial y el PLA reciclado son prácticamente iguales, con unos valores promedio de 1841,68 y 1808,22 MPa respectivamente, si bien es cierto que los valores para las probetas recicladas se muestran ligeramente más dispersos con un coeficiente de variación del 7,17 % frente a un 3,59% para las probetas fabricadas con filamento industrial.

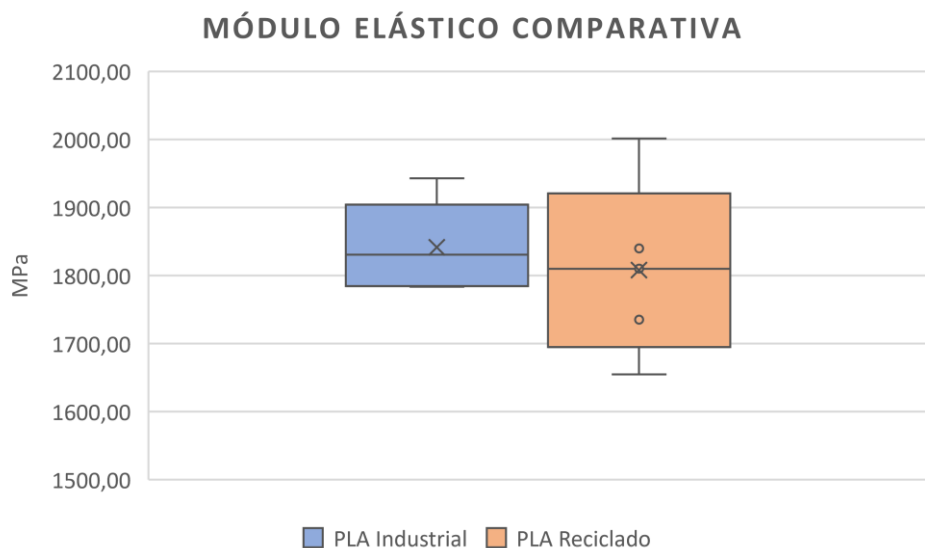


Figura 62. Gráfico comparativo. Módulo elástico a tracción para ambos tipos de PLA.

Finalmente, como resumen de los resultados obtenidos, en la *Tabla 11* se muestran los valores promedio y las desviaciones estándar calculadas.

Tabla 10. Valores promedio obtenidos en el ensayo a tracción.

	Ensayo de tracción	
	<i>PLA industrial</i>	<i>PLA reciclado</i>
σ_t (MPa)	26,24 ^{± 0,27}	19,54 ^{± 2,84}
E_t (MPa)	1841,68 ^{± 66,17}	1808,22 ^{± 129,65}
ϵ_{max} (%)	2,82 ^{± 0,55}	1,42 ^{± 0,13}

σ_t , Resistencia a tracción; E_t , Módulo elástico; ϵ_{max} , Deformación máxima.

15.2 ENSAYO DE COMPRESIÓN

15.2.1 Introducción

En el ensayo de compresión, se aplica un valor de carga sobre una probeta a lo largo de su eje principal, con un movimiento descendente del puente de carga a velocidad constante, hasta que rompe o hasta que la carga o la deformación alcanzan un valor determinado previamente (en nuestro caso de 45 kN y 15 mm). Durante este proceso, se mide la carga soportada por la probeta. Para la realización de este ensayo se ha hecho uso de la norma *UNE-EN ISO 604:2003* [44] para la determinación de las propiedades en compresión.

En cuanto al montaje, la probeta se sitúa entre las superficies de las placas de compresión y se alinea la línea central de dichas superficies. Se asegura que las superficies de los extremos de la probeta son paralelas a las superficies de las placas de compresión, y se ajusta la máquina de forma que estas superficies y las placas de compresión entren en contacto. Además, se debe, al igual que en el resto de los ensayos, introducir en el software de la máquina las dimensiones de las probetas.

Tras el ensayo, se obtienen los resultados del tiempo transcurrido, la carga aplicada y el desplazamiento experimentado por el puente de carga. Con estos valores, se realiza una representación del esfuerzo frente a la deformación, y de estos diagramas se distinguen zona plástica y zona elástica.

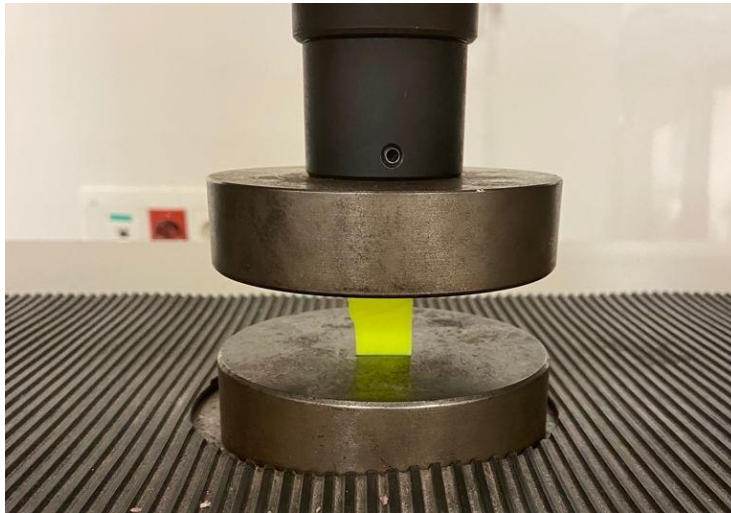


Figura 63. Montaje de la probeta en el ensayo de compresión. Fuente: propia

Los resultados que obtendremos en el ensayo de compresión son los siguientes:

Esfuerzo de compresión (σ_c) que se define como la fuerza aplicada por unidad de área, expresado por la ecuación:

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (4)$$

σ_c es el valor del esfuerzo (MPa).

F es la fuerza medida (N).

A es el área de la sección transversal inicial de la probeta (mm²).

Deformación en compresión (ε_c) que se define como el incremento de la longitud frente a una longitud de referencia:

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta L}{L} \quad (5)$$

ε_c es el valor de la deformación (%).

L es la distancia inicial entre los discos de compresión (mm).

ΔL es la disminución de la distancia entre los discos de compresión (mm).

Módulo de elasticidad en compresión (E_c) que es el resultado de dividir la tensión por la deformación unitaria, dentro de la región elástica de un diagrama esfuerzo-deformación. Se obtiene de manera similar a los ensayos de tracción, mediante la recta de regresión lineal ajustada por el método de mínimos cuadrados.

Resistencia a compresión (σ_m) que indica el esfuerzo máximo alcanzado en el ensayo a compresión.

Límite de fluencia (σ_{yc}), indica la tensión que soporta la probeta en el momento de producirse el fenómeno de la fluencia. Este tiene lugar en la zona de transición entre las deformaciones elásticas y plásticas y se caracteriza por un rápido incremento de la deformación sin aumento apreciable de la carga aplicada.

Deformación máxima (ϵ_{max}) que indica la deformación más alta alcanzada, obtenida en el punto en el que la probeta rompe, si llega a hacerlo.

Esfuerzo de rotura (σ_b) que indica el valor del esfuerzo aplicado cuando el material alcanza la fractura.

15.2.2 PLA industrial

A partir de PLA industrial se imprimieron y ensayaron 18 probetas de compresión con el objetivo de tener suficiente material para triturar y fabricar filamento reciclado, tal y como se explicó anteriormente. No obstante, de cara al estudio de las propiedades y su posterior comparación con las del PLA reciclado se fueron descartando probetas para utilizar una serie de seis, de la cuál se descartó finalmente una más. Todos los resultados obtenidos para cada una de las probetas en este ensayo se recogen en la *Tabla 12*, junto con valor promedio, desviación típica y coeficiente de variación.

Tabla 11. Resultados del ensayo a compresión para el PLA industrial.

Valores individuales ensayo compresión. PLA Industrial								
	1	2	3	4	5	MED	SD	CV
E_c (GPa)	1,92	1,91	1,91	1,90	1,87	1,90	0,02	1,05
σ_{yc} (MPa)	57,49	57,43	57,38	57,20	57,06	57,31	0,18	0,31

MED, Valor promedio; SD, Desviación estándar; CV, Coeficiente de variación.



Figura 64. Probetas compresión PLA industrial pre-ensayo.

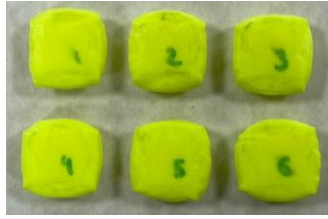


Figura 65. Probetas compresión PLA industrial post-ensayo.

Los resultados del módulo elástico obtenidos para las cinco probetas son muy homogéneos, tal y como refleja el diagrama de barras de la Figura 66, con un valor promedio de 1,90 GPa y con una desviación típica y un coeficiente de variación de tan solo 0,02 GPa y 1,05 % respectivamente.

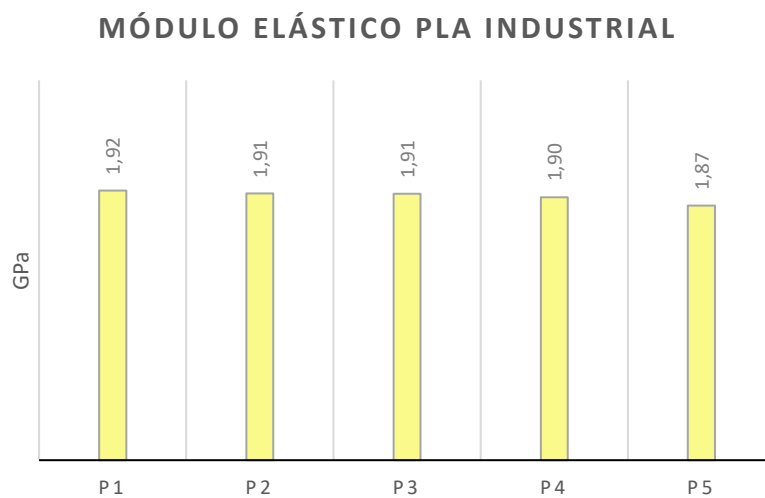


Figura 66. Gráfico comparativo. Módulo de elasticidad a compresión PLA industrial.

Por otro lado, con lo que respecta al límite de fluencia, se puede observar en la Figura 67 como los resultados obtenidos para cada una de las cinco probetas son prácticamente idénticos, con unos valores que van desde 57,06 MPa hasta un máximo de 57,49 MPa, con un valor promedio de 57,31 MPa, y un coeficiente de variación del 0,31%.

LÍMITE FLUENCIA PLA INDUSTRIAL

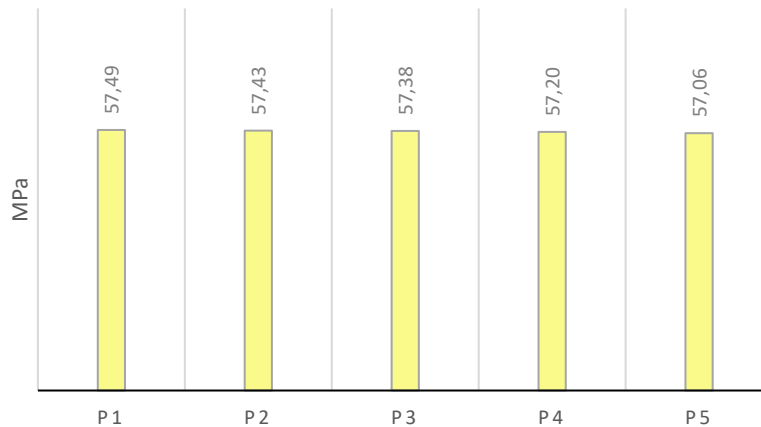


Figura 67. Gráfico comparativo. Límite de fluencia PLA industrial.

En el *Anexo III* se encuentran disponibles las gráficas de tensión-deformación obtenidas para cada probeta de PLA industrial en el ensayo a compresión.

15.2.3 PLA reciclado

Con el PLA reciclado se imprimió y ensayó, al igual que para tracción, una serie de un total de 6 probetas para el ensayo a compresión, y posteriormente se descartó una de ellas de cara a los cálculos.

Todos los resultados obtenidos para cada una de las probetas en este ensayo se recogen en la *Tabla 13*, junto con valor promedio, desviación típica y coeficiente de variación.

Tabla 12. Resultados del ensayo a compresión para el PLA reciclado.

Valores individuales ensayo compresión. PLA Industrial								
	1	2	3	4	5	MED	SD	CV
E_c (GPa)	1,46	1,18	1,77	1,30	1,88	1,52	0,30	19,83
σ_{yc} (MPa)	43,27	22,24	43,92	36,51	48,35	38,86	10,21	26,27

MED, Valor promedio; SD, Desviación estándar; CV, Coeficiente de variación.



Figura 68. Probetas compresión PLA reciclado pre-ensayo. Fuente: propia



Figura 69. Probetas compresión PLA reciclado post-ensayo. Fuente: propia

En la *Figura 69* se puede observar como, a diferencia de lo ocurrido en las probetas de PLA industrial, en el caso del material reciclado las paredes que conforman el perímetro de las piezas se desquebrajan durante el ensayo de compresión.

Los valores del módulo de elasticidad de las probetas de PLA reciclado se sitúan, tal y como refleja el diagrama de la *Figura 70*, entre 1,18 GPa y 1,88 GPa. Se puede concluir que los resultados distan entre si de forma considerable, obteniendo un coeficiente de variación de 19,83 %.

MÓDULO ELÁSTICO PLA RECICLADO

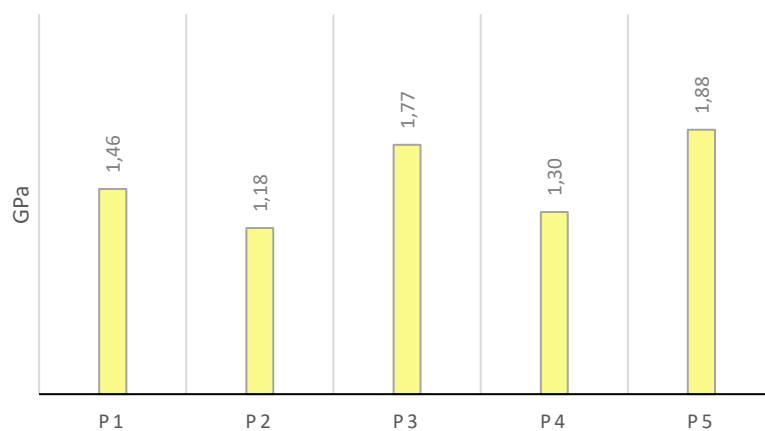


Figura 70. Gráfico comparativo. Módulo de elasticidad a compresión PLA reciclado.

Si atendemos a los valores de límite de fluencia obtenidos en el ensayo, ocurre algo similar, encontrándonos con valores más dispersos para las distintas probetas de PLA reciclado que van desde 22,24 MPa hasta 49,35 MPa, con un coeficiente de variación que asciende hasta un 26,27 %.

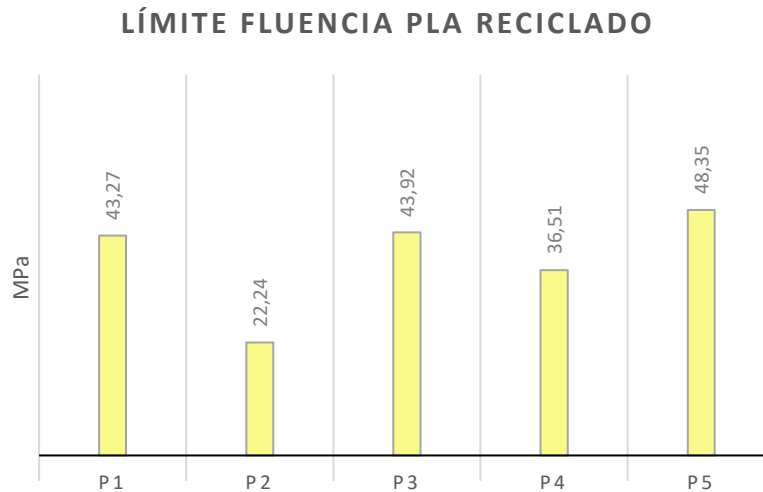


Figura 71. Gráfico comparativo. Límite de fluencia PLA reciclado.

En el *Anexo III* se encuentran disponibles las gráficas de tensión-deformación obtenidas para cada probeta de PLA reciclado en el ensayo a compresión.

15.2.4 Ensayo de compresión: PLA industrial vs PLA reciclado

Tras haber comentado los resultados obtenidos en el ensayo a compresión de las probetas de PLA industrial y de PLA reciclado, en este apartado se llevará a cabo una comparación de los valores recogidos para ambos tipos de probetas.

El valor promedio del módulo elástico a compresión para las probetas de PLA industrial es 1,90 GPa. Pese a que el de las probetas recicladas es considerablemente menor (1,52 GPa), podemos observar en la *Figura 72* como algunas de estas probetas se acercan a los valores de las fabricadas con filamento industrial. Sin embargo, la poca homogeneidad en los resultados provoca que los valores promedios disten entre si.

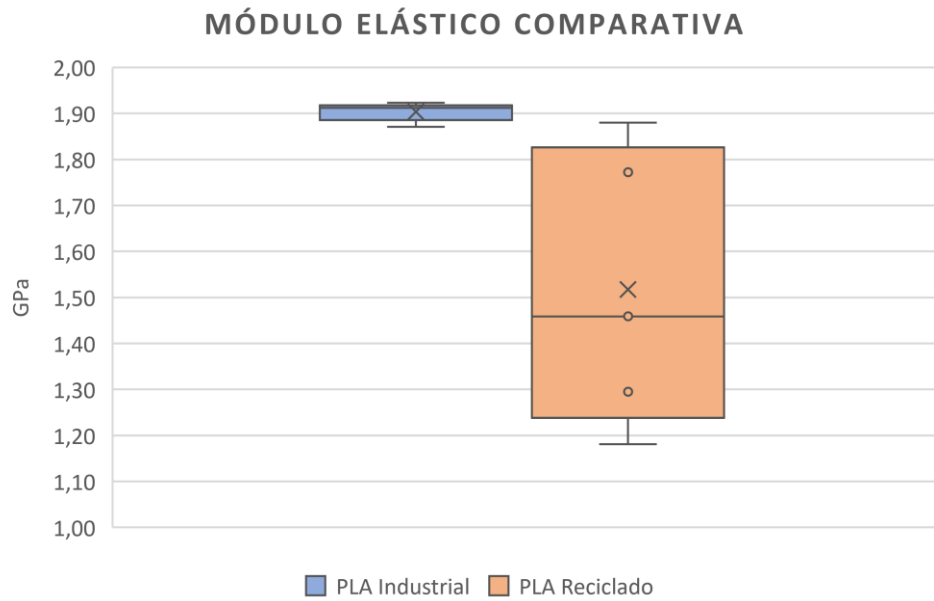


Figura 72. Gráfico comparativo. Módulo elástico compresión para ambos tipos PLA.

Con respecto al límite de fluencia, la *Figura 73* muestra como los resultados obtenidos para las probetas fabricadas con PLA industrial son mayores a los de las probetas de PLA reciclado, con unos valores promedio de 57,31 y 38,86 MPa respectivamente. Se aprecia además como los valores se mantienen mucho más constantes en el primer tipo de probetas, con un coeficiente de variación del 0,31 % frente al 26,27 % de las recicladas.

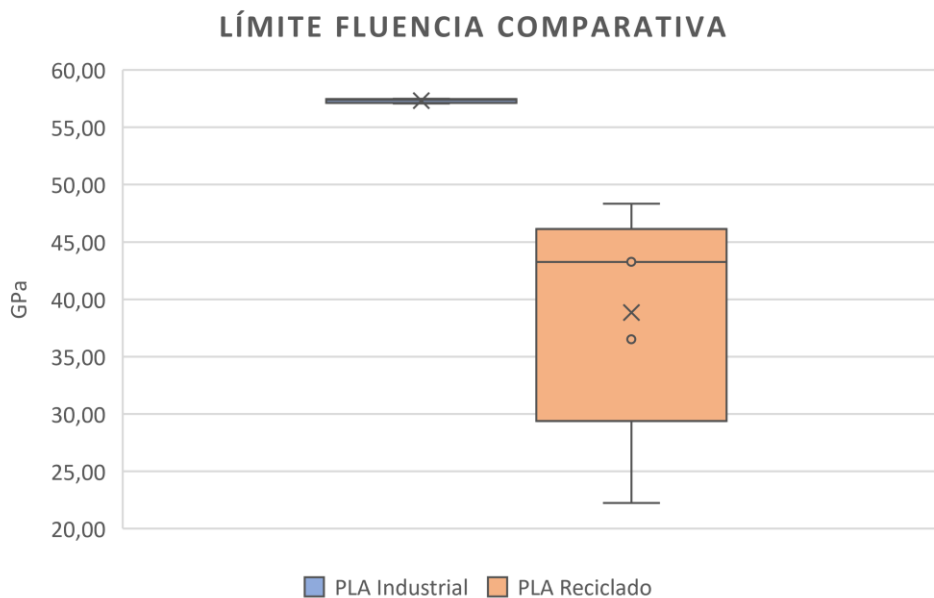


Figura 73. Gráfico comparativo. Límite de fluencia para ambos tipos de PLA.

Finalmente, a modo de resumen, en la *Tabla 14* se recogen los valores promedio obtenidos junto con las desviaciones estándar calculadas.

Tabla 13. Valores promedio obtenidos en el ensayo a compresión.

	Ensayo de compresión	
	<i>PLA industrial</i>	<i>PLA reciclado</i>
σ_{yc} (MPa)	57,31 \pm 0,18	38,86 \pm 10,21
E_c (MPa)	1,90 \pm 0,02	1,52 \pm 0,3
ϵ_{fl} (%)	4,05 \pm 0,21	3,15 \pm 0,85

σ_{yc} Límite de fluencia; E_c Módulo elástico; ϵ_{fl} Deformación en el límite de fluencia.

15.3 ENSAYO DE FLEXIÓN

15.3.1 Introducción

El ensayo de flexión consiste en que una probeta de sección rectangular, que descansa sobre dos soportes, se flexiona por un elemento de carga que actúa sobre el punto medio de la probeta entre los soportes. La probeta se flexiona de esa forma a una velocidad constante, hasta que se rompe o hasta que alcanza un valor máximo de deformación (5%). Durante este procedimiento, se mide la fuerza aplicada sobre la probeta y la flecha resultante de la probeta en el punto medio. El ensayo ha sido realizado consultando la norma *UNE-EN ISO 178:2020* [43] para la determinación de las propiedades en flexión.

Al igual que en el ensayo de tracción, se han de introducir los valores calibrados de espesor y anchura de cada probeta en el software de la máquina antes de iniciar el proceso.

Cabe destacar que se comenzó ajustando la distancia entre los apoyos, haciendo uso de la ecuación recomendada por la norma [43]:

$$L = (16 \pm 1) \cdot h \quad (6)$$

En esta fórmula, h corresponde al espesor de la probeta, que en nuestro caso tiene un valor de 4 mm. Así, se obtuvo que la distancia entre los apoyos (L) sería de 64 mm.

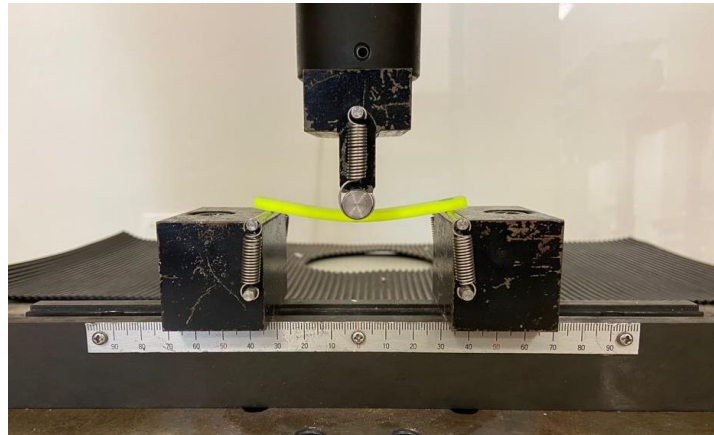


Figura 74. Montaje de la probeta en el ensayo de flexión. Fuente: propia

Tras el ensayo, se obtienen los resultados del tiempo transcurrido, la carga aplicada y el desplazamiento experimentado por el puente de carga. Con estos valores, se realiza una representación del esfuerzo frente a la deformación, y de estos diagramas se distinguen zona plástica y zona elástica.

Los resultados que se obtienen del ensayo a flexión son los siguientes:

Máxima carga (F_{max}) que es el valor máximo de carga que soporta la probeta en el punto de aplicación hasta la rotura o hasta alcanzar un determinado valor de desplazamiento.

Desplazamiento del puente de carga (s) que indica la distancia experimentada por la superficie de la probeta durante el ensayo en el punto de aplicación de la carga.

Módulo de elasticidad en flexión (E_{fl}) que se define como:

$$E_{fl} = \frac{L^3 m}{4bh^3} \quad (7)$$

E_{fl} es el módulo elástico (MPa).

L es la distancia entre soportes (64 mm).

b es el ancho de la probeta (mm).

h es el espesor de la probeta (mm).

m es el valor de la pendiente de la curva (MPa).

Tensión máxima (MOR) que es el esfuerzo flector máximo que sufre la probeta durante el ensayo. Se obtiene con la siguiente expresión, a partir de la carga F más alta registrada:

$$MOR = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (8)$$

MOR es la tensión máxima a flexión (MPa).

F es la fuerza máxima alcanzada durante el ensayo (N).

L es la distancia entre soportes (64 mm).

b es el ancho de la probeta (mm).

h es el espesor de la probeta (mm).

Deformación máxima a flexión (ϵ_f) que es la deformación de flexión más alta alcanzada antes de romper o sufrir la primera fractura.

$$\epsilon_{fl} = \frac{6sh}{L^2} \quad (9)$$

ϵ_{fl} es la deformación máxima (%).

s es la flecha máxima alcanzada por la probeta (mm).

h es el espesor de la probeta (mm).

L es la distancia entre los apoyos (mm).

15.3.2 PLA industrial

Para este proyecto se imprimieron y ensayaron 18 probetas de compresión a partir de PLA industrial con el objetivo de tener suficiente material para triturar y fabricar filamento reciclado. Para el posterior estudio de las propiedades y su posterior comparación con las del PLA reciclado se utilizó una única serie de seis probetas, de la cuál se descartó una última. Todos los resultados obtenidos para cada una de las probetas en este ensayo se recogen en la *Tabla 15*, junto con valor promedio, desviación típica y coeficiente de variación.

Tabla 14. Resultados del ensayo a flexión para el PLA industrial.

Valores individuales ensayo flexión. PLA Industrial								
	1	2	3	4	5	MED	SD	CV
MOR (MPa)	59,96	58,40	58,80	58,92	58,80	58,98	0,59	0,99
E_f (GPa)	2,23	2,03	2,06	2,09	2,21	2,12	0,09	4,19
ϵ_f (%)	3,50	3,88	3,27	3,48	3,84	3,59	0,26	7,23

MED, Valor promedio; SD, Desviación estándar; CV, Coeficiente de variación.

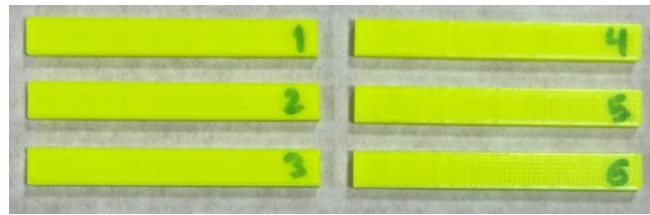


Figura 75. Probetas flexión PLA industrial pre-ensayo.

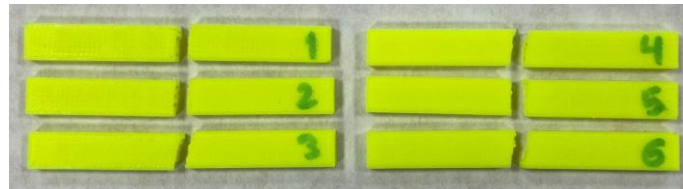


Figura 76. Probetas flexión PLA industrial post-ensayo

Tal y como se puede observar en la *Figura 77*, los resultados del módulo de rotura obtenidos tras ensayar las cinco probetas fabricadas con filamento industrial son muy homogéneos, con un valor promedio de 58,98 MPa y con un coeficiente de variación de tan solo un 0,99 %, con valores comprendidos entre 58,40 MPa y 59,96 MPa.

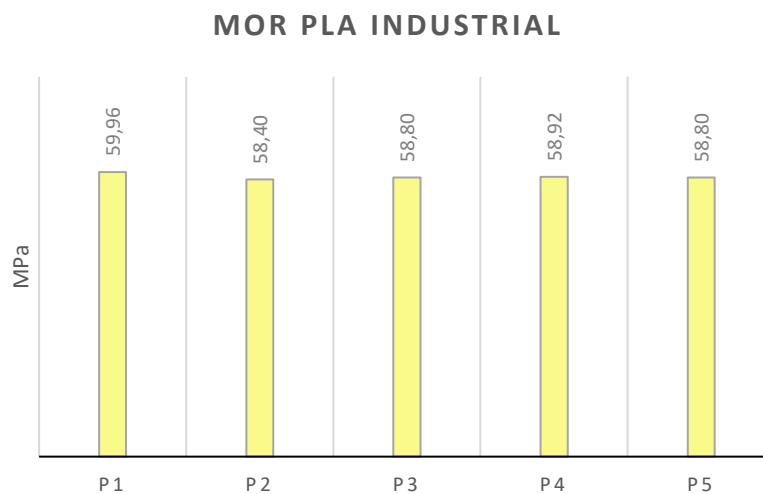


Figura 77. Gráfico comparativo. Módulo de rotura PLA industrial.

En cuanto al módulo de elasticidad a flexión, el diagrama de barras de la *Figura 78* refleja como se obtuvieron valores bastante similares para las distintas probetas de PLA industrial. Así, el coeficiente de variación es de un 4,19 %, y los resultados van desde 2,03 GPa hasta un máximo de 2,21 GPa.

MÓDULO ELÁSTICO PLA INDUSTRIAL

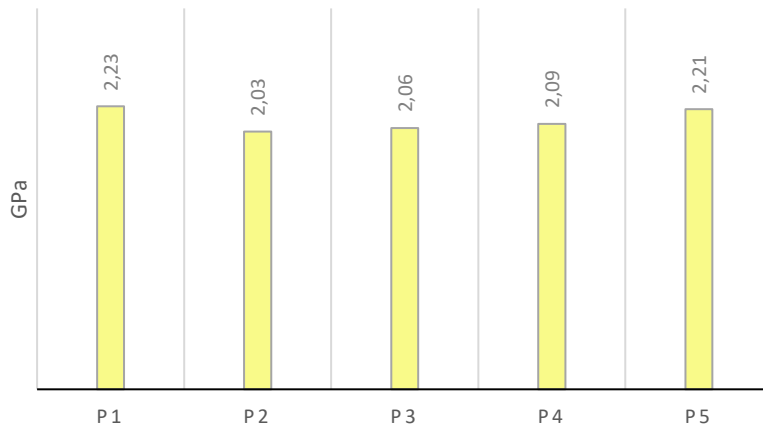


Figura 78. Gráfico comparativo. Módulo de elasticidad a flexión PLA industrial.

Finalmente, atendiendo a los resultados de deformación en flexión recogidos durante el ensayo, se puede observar en la *Figura 79* como los valores son ligeramente más dispersos que para el resto de los parámetros, con un coeficiente de variación del 7,23 %.

DEFORMACIÓN MÁX PLA INDUSTRIAL

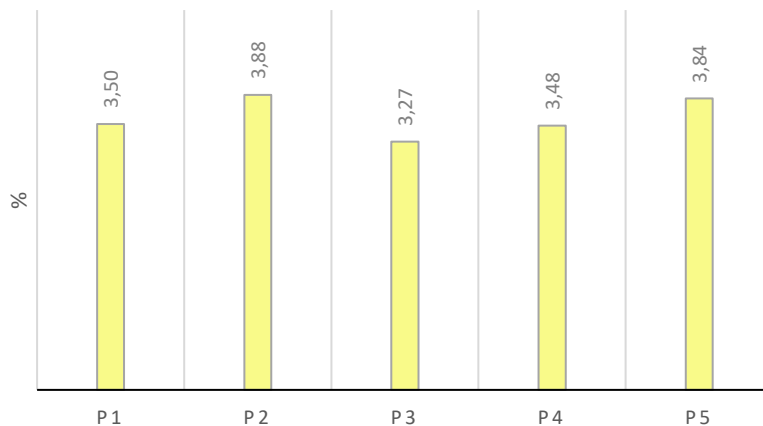


Figura 79. Gráfico comparativo. Deformación a flexión PLA industrial.

En el *Anexo III* se encuentran disponibles las gráficas de tensión-deformación obtenidas para cada probeta de PLA industrial en el ensayo a flexión.

15.3.3 PLA reciclado

Al igual que en el resto de los ensayos, se imprimieron un total de 6 probetas con PLA reciclado para el ensayo a flexión, descartando posteriormente una de ellas.

Todos los resultados obtenidos para cada una de las probetas en este ensayo se recogen en la *Tabla 16*, junto con valor promedio, desviación típica y coeficiente de variación.

Tabla 15. Resultados del ensayo a flexión para el PLA reciclado.

Valores individuales ensayo flexión. PLA Reciclado								
	1	2	3	4	5	MED	SD	CV
MOR (MPa)	41,53	55,31	44,59	36,28	53,74	46,29	8,10	17,51
E_f (GPa)	2,03	2,31	2,08	1,57	2,17	2,03	0,28	13,68
E_f (%)	2,39	2,62	2,18	2,07	2,43	2,34	0,22	9,35

MED, Valor promedio; SD, Desviación estándar; CV, Coeficiente de variación.

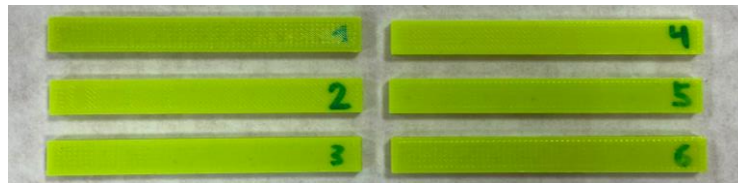


Figura 80. Probetas flexión PLA reciclado pre-ensayo. Fuente: propia

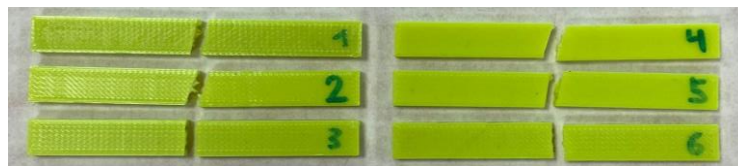


Figura 81. Probetas flexión PLA reciclado post-ensayo. Fuente: propia

Los valores del módulo de rotura de las probetas de PLA reciclado ensayadas a flexión se sitúan, tal y como refleja la *Figura 81*, entre 36,28 y 55,31 MPa. Estos resultados muestran una desviación típica de 8,10 MPa y un coeficiente de variación del 17,51 %.

MOR PLA RECICLADO

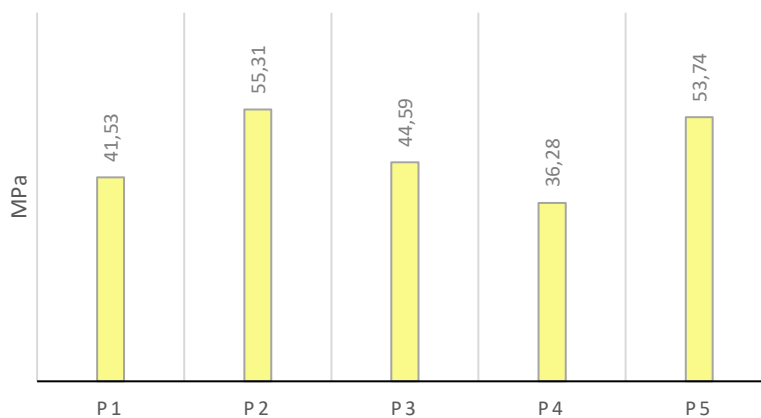


Figura 82. Gráfico comparativo. Módulo de rotura PLA reciclado.

La *Figura 83* compara los resultados del módulo de elasticidad de las cinco probetas de PLA reciclado ensayadas a flexión. Se puede observar como los valores se mantienen bastante constantes (entre 2,03 y 2,31 GPa) a excepción de la probeta 4, cuyo módulo elástico es de 1,57 GPa.

MÓDULO ELÁSTICO PLA RECICLADO

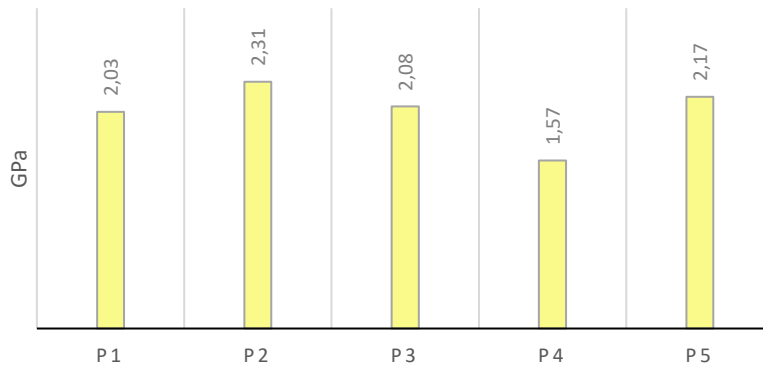


Figura 83. Gráfico comparativo. Módulo de elasticidad a flexión PLA reciclado.

Finalmente, en lo que respecta a los resultados de deformación en flexión recogidos durante el ensayo a las probetas de PLA reciclado, la *Figura 84* refleja como los valores están comprendidos entre 2,07 y 2,62 %. Estos valores no distan demasiado entre si, con un coeficiente de variación de 9,35 %.

DEFORMACIÓN MÁX PLA RECICLADO

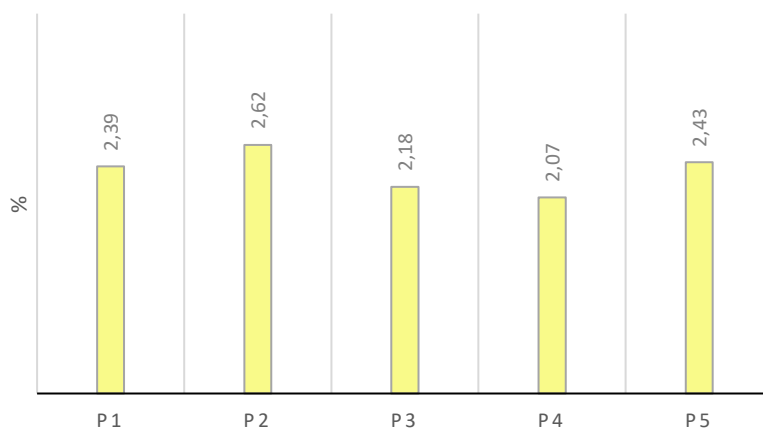


Figura 84. Gráfico comparativo. Deformación a flexión PLA reciclado.

En el *Anexo III* se encuentran disponibles las gráficas de tensión-deformación obtenidas para cada probeta de PLA reciclado en el ensayo a flexión.

15.3.4 Ensayo de flexión: PLA industrial vs PLA reciclado

Tras haber expuesto y comentado los resultados obtenidos para ambos tipos de probeta en el ensayo a flexión, en este apartado se expondrá una comparación entre los valores de cada parámetro recogidos para el PLA industrial y el PLA reciclado.

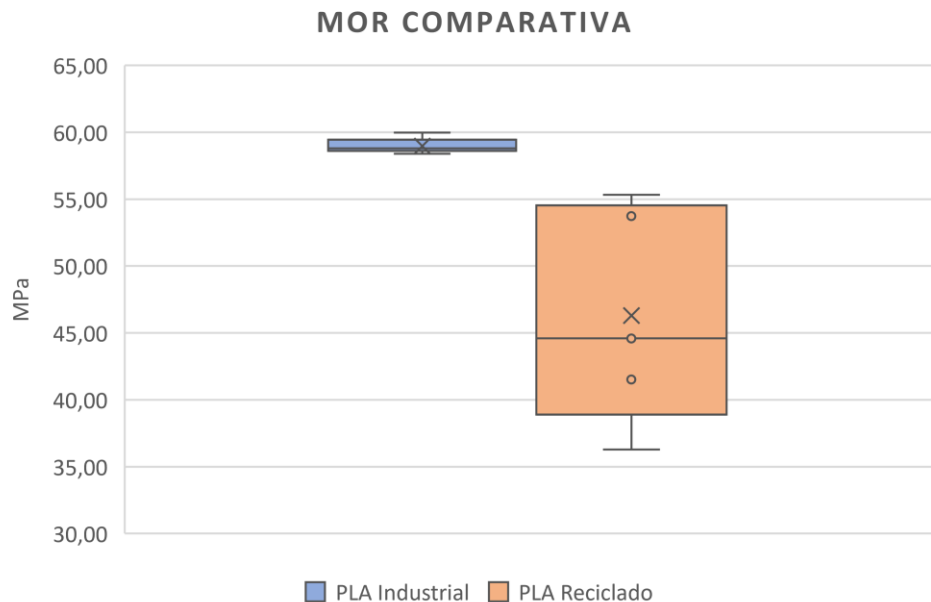


Figura 85. Gráfico comparativo. Módulo de rotura para ambos tipos de PLA.

En la *Figura 85* se puede observar como los valores del módulo de rotura para ambos tipos de probeta distan ligeramente entre si, con un valor promedio de 58,98 MPa para el PLA industrial frente a los 46,29 MPa del PLA reciclado. Sin embargo, para algunas de las probetas recicladas se obtuvieron valores muy similares a los de las fabricadas con filamento original, como es el caso de la probeta 2 (55,31 MPa) o la probeta 5 (53,74 MPa). Sin embargo, otras probetas como la 4 presentan peores resultados (36,28 MPa) y esta falta de homogeneidad es la que provoca el distanciamiento de los valores promedio.

Por otro lado, si atendemos a la gráfica comparativa del módulo de elasticidad a flexión (*Figura 86*) se puede apreciar como los valores promedio obtenidos para el PLA industrial y el PLA reciclado son prácticamente iguales (2,12 y 2,03 GPa respectivamente), aunque cabe destacar que los resultados de las probetas recicladas se muestran más dispersos, con un coeficiente de variación del 13,68 % frente a un 4,19 % para las fabricadas con filamento industrial.

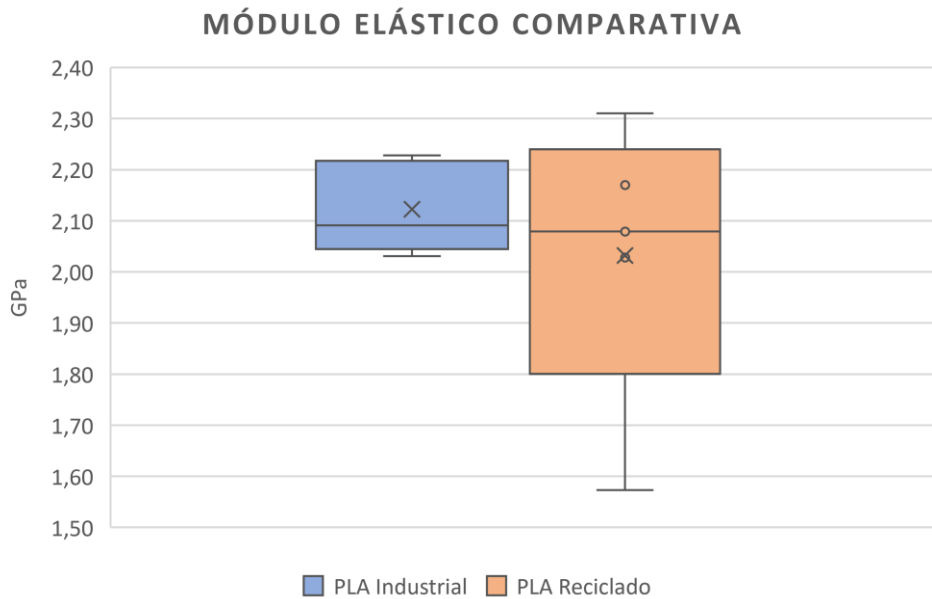


Figura 86. Gráfico comparativo. Módulo elástico a flexión para ambos tipos de PLA.

Con respecto a la deformación en flexión, los resultados obtenidos para el PLA industrial son considerablemente mayores con un valor promedio de 3,59 % y un 2,34 % para las probetas recicladas. No obstante, cabe destacar que los valores se muestran prácticamente igual de constantes para ambos tipos de probetas, con unos coeficientes de variación del 7,23 % y el 9,35 %.

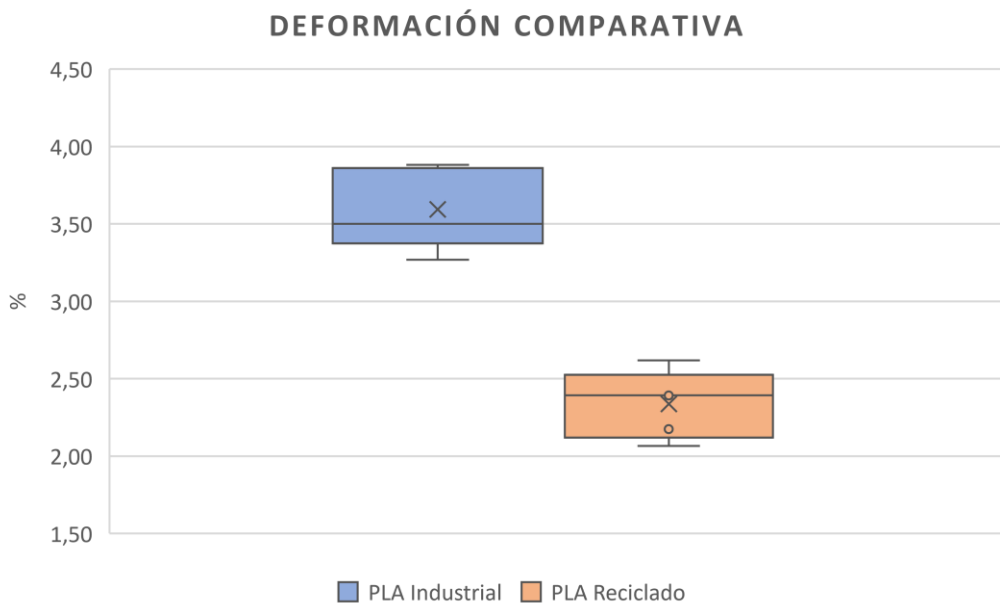


Figura 87. Gráfico comparativo. Deformación en flexión para ambos tipos de PLA.

Finalmente, como resumen de los valores promedio obtenidos, en la *Tabla 17* se muestran los resultados con las desviaciones estándar calculadas.

Tabla 16. Valores promedio obtenidos en el ensayo a flexión.

	Ensayo de flexión	
	<i>PLA industrial</i>	<i>PLA reciclado</i>
<i>MOR (MPa)</i>	59,00 \pm 0,6	46,30 \pm 8,1
<i>E_f (MPa)</i>	2,10 \pm 0,1	2,00 \pm 0,3
<i>ε_f (%)</i>	3,6 \pm 0,3	2,3 \pm 0,2

MOR, Módulo de rotura; E_f, Módulo elástico; ε_f, Deformación a flexión.

16. CONCLUSIONES

A continuación, se presentan las principales conclusiones obtenidas tras el estudio realizado:

Por norma general, si atendemos a los valores promedio obtenidos para cada serie de probetas, se ha podido comprobar como las diferentes propiedades mecánicas son considerablemente mejores en las probetas fabricadas con filamento industrial. Así, se obtuvo una diferencia del 34,29% en los valores promedio de resistencia a tracción, un 47,48% en los de límite de fluencia y un 27,43% en los de módulo de rotura a flexión.

Sin embargo, si en lugar de estudiar los valores promedio, atendemos a los valores de cada probeta reciclada de forma individual, se observa como algunos de ellos se asemejan en gran parte al valor promedio de las probetas de PLA industrial, como, por ejemplo:

- En el ensayo a compresión del PLA reciclado, la probeta 5 obtuvo un valor para el límite fluencia de 48,35 MPa, con un 18,53% de diferencia con respecto al valor promedio de las probetas fabricadas con filamento industrial (57,31 MPa).
- El ensayo a tracción del PLA indicó un valor de 23 MPa para la resistencia a tracción de la probeta 5, frente a los 26,24 MPa de valor promedio del PLA industrial, mostrando tan solo un 14,09 % de diferencia.
- La probeta 2 del ensayo a flexión del PLA reciclado mostró un valor de módulo de rotura de 55,31 MPa, con únicamente un 6,64 % de diferencia en comparación con el valor promedio obtenido para las probetas fabricadas con PLA industrial.

Estos ejemplos muestran como es posible obtener, a partir de PLA triturado y re-extrusionado, piezas con propiedades similares a las impresas mediante filamento industrial.

Al observar las características de las probetas, haciendo uso de los datos de masa de estas (*Anexo I*) y de los de caracterización del filamento (*Anexo IV*), se concluye que las probetas de PLA reciclado que mejores propiedades mecánicas han obtenido en los ensayos muestran un peso similar al de las probetas de material industrial; y fueron impresas a partir de los tramos de filamento de mayor calidad, es decir, aquellos cuyo diámetro se mantiene más constante y cercano a los 1,75 mm (diámetro del filamento

industrial), y esto es debido a que de este modo la impresora extruye en todo momento la misma cantidad de material.

Se puede afirmar que las mejoras desarrolladas en este proyecto de cara a la obtención de filamento han funcionado, cumpliendo el gran objetivo de lograr una considerable cantidad de filamento imprimible a partir de material reciclado. Además, tal y como muestran los resultados de algunas probetas ensayadas, se han conseguido tramos de filamento válidos, con un diámetro que, de forma constante, se mantiene cercano al diámetro que se ha tratado de obtener.

Desarrollando ciertas mejoras en el proceso, de cara a homogeneizar la alimentación de la extrusora y por tanto la velocidad de extrusión de filamento, se puede llegar a lograr que la totalidad del filamento obtenido sea óptimo, y que, así, todas las probetas presenten características mecánicas sin diferencias demasiado significativas con respecto a las probetas impresas con PLA industrial.

17. LÍNEA FUTURA

Para obtener probetas de PLA reciclado de mejor calidad, hay que tratar de conseguir un filamento con una sección aún más regular, de forma que la impresora extruya siempre la misma cantidad de material tal y como sucede en las impresiones con filamento industrial. Así, se lograría piezas homogéneas, y se reducirían las diferencias entre la masa de las probetas de PLA reciclado y PLA industrial, y a su vez entre las propiedades mecánicas de estas. Algunas de las posibles mejoras que podrían adoptarse de cara a lograrlo son las siguientes:

- El diseño de un sistema que, mediante sensores, sea capaz de medir el diámetro del filamento en cada instante y en función de este varíe automáticamente la velocidad del motor para tratar de mantener el diámetro en 1,75 mm. Hasta ahora este proceso se ha hecho de forma manual.
- La implantación de una trituradora que permita obtener trozos de material de un tamaño más constante, reduciendo así las variaciones en la alimentación de la extrusora, lo cuál influye directamente en la variabilidad de la velocidad de extrusión de filamento en la extrusora Filabot.
- Un sistema de bobinado automático motorizado que incluya a su vez un contador que indique los metros de filamento obtenido.

Finalmente, se plantean dos líneas de trabajo abiertas a investigación. Por un lado, se propone comprobar cómo afecta a las propiedades mecánicas una segunda etapa de reciclado del PLA, repitiendo el proceso de triturado y obtención de filamento, pero esta vez sobre probetas ya fabricadas con material reciclado. Por otro lado, sería conveniente estudiar cómo influye la cantidad de material reciclado utilizado para la fabricación del filamento en la calidad de las probetas, estudiando las propiedades de probetas fabricadas con diferentes porcentajes de PLA reciclado.

18. NORMATIVA

Durante el desarrollo de este proyecto se emplea la normativa ISO. Para el diseño de las probetas y la realización de los distintos ensayos mecánicos de tracción, compresión y flexión, se utilizan en concreto las siguientes normas:

- *Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 1: Principios generales (ISO 527-1:2019).*
- *Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 2: Condiciones de ensayo de plásticos para moldeo y extrusión (ISO 527-2:2012).*
- *Plásticos. Determinación de las propiedades en compresión (ISO 604:2003).*
- *Plásticos. Determinación de las propiedades en flexión (ISO 178:2020).*

19. BIBLIOGRAFÍA

- [1] I. Anderson, «Mechanical Properties of Specimens 3D Printed with Virgin and Recycled Polylactic Acid,» *3D Print. Addit. Manuf.*, vol. 4, nº 2, pp. 110-115, 2017.
- [2] A. Lanzotti, M. Martorelli, S. Maietta, S. Gerbino, F. Penta y A. Gloria, «A comparison between mechanical properties of specimens 3D printed with virgin and recycled PLA,» *Science direct*, 2018.
- [3] C. D. Encinoso, «Fabricación y caracterización de PLA reciclado,» Trabajo Fin de Grado, Universidad de La Laguna, 2018.
- [4] F. M. A. Vallejo, «Estudio sobre la aplicación de las tecnologías de fabricación aditiva al sector aeronáutico y espacial. Impresión 3D.,» Trabajo Fin de Grado, Universidad de Sevilla, 2016.
- [5] N. Guo y M. C. Leu, «Additive Manufacturing: Technology, Applications and Research Needs,» *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 8, nº 3, pp. 215-243, 2013.
- [6] Y. Zhai, D. Lados y J. LaGoy, «Additive Manufacturing: Making Imagination the Major Limitation,» *JOM*, vol. 66, nº 5, pp. 1-9, 2014.
- [7] I. Gibson, D. W. Rosen y B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*, Boston: Springer, 2010.
- [8] L. Contreras, «3Dnatives,» 24 Abril 2019. [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/fabricacion-aditiva-prototipado-rapido-240420192/#!>. [Último acceso: 16 Marzo 2021].
- [9] L. Contreras, «3Dnatives,» 28 Mayo 2019. [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/armas-de-fuego-impresas-en-3d-280520192/#!>. [Último acceso: 16 Marzo 2021].
- [10] N. Whigham, «Police seize another batch of 3D printed guns as authorities deal with danger of downloadable firearms,» *news.com.au*, 2016.
- [11] D. L. Bourell, J. J. Beaman, M. C. Leu y D. W. Rosen, «A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead,» *RapidTech2009*, vol. 2, pp. 80-88, 2009.
- [12] «AMFG,» [En línea]. Available: <https://amfg.ai/industrial-applications-of-3d-printing-the-ultimate-guide/>. [Último acceso: 11 Febrero 2021].
- [13] A. M., «3Dnatives,» 8 Octubre 2020. [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/aplicaciones-impresion-3d-automocion-081020202/>. [Último acceso: 16 Febrero 2021].

- [14] «tresdpro,» 21 Noviembre 2018. [En línea]. Available: <https://tresdpro.com/industria-medica-y-dental-con-la-impresion-3d/>. [Último acceso: 16 Febrero 2021].
- [15] «bitfab,» [En línea]. Available: <https://bitfab.io/es/blog/protesis-impresion-3d/>. [Último acceso: 1 Marzo 2021].
- [16] G. A. Brady y J. W. Halloran, «Stereolithography of ceramic suspensions,» *Rapid Prototyping Journal*, vol. 3, nº 2, pp. 61-65, 1997.
- [17] «CustomPartNet,» [En línea]. Available: <https://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication>. [Último acceso: 20 Marzo 2021].
- [18] C. C. K., L. K. F. y L. C. S., *Rapid Prototyping: Principles and Applications*, Singapur: World Scientific Publishing Company, 2010.
- [19] Q. Liu, G. Sui y M. C. Leu, «Experimental study on the ice pattern fabrication for the investment casting by rapid freeze prototyping,» *Computers in Industry*, vol. 48, nº 3, pp. 181-197, 2002.
- [20] D. S. G. Grau, «Funcionalización y caracterización de Ácido Poliláctico aditivado con GNP's y Carbon Black para el desarrollo de filamentos utilizados en la impresión 3D,» Trabajo Fin de Máster, Universidad Politécnica de Valencia, 2019.
- [21] A. J. Ortega, *Fabricación digital: Introducción al modelado e impresión 3D*, Madrid: Ministerio de Educación y Formación Profesional de España, 2017.
- [22] «ArqDis,» [En línea]. Available: <http://www.arqdis.iberomx.com/blog/principales-parametros-fdm/>. [Último acceso: 2 Abril 2021].
- [23] «Filament2Print,» 4 Noviembre 2019. [En línea]. Available: https://filament2print.com/es/blog/71_importancia-relleno-impresion-3d.html. [Último acceso: 4 Abril 2021].
- [24] Peter, «3DWork,» 26 Enero 2019. [En línea]. Available: <https://3dwork.io/rellenos-en-impresion-3d/>. [Último acceso: 4 Abril 2021].
- [25] A. J. Albuquerque, «Optimización y caracterización de piezas de PLA fabricadas mediante técnicas aditivas,» Trabajo Fin de Grado, Universidad Carlos III de Madrid, 2014.
- [26] «Wikipedia,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81cido_polil%C3%A1ctico. [Último acceso: 15 Marzo 2021].
- [27] L. C. Howard, «3Dnatives,» 19 Agosto 2019. [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/guia-filamento-pla-en-la-impresion-3d-190820192/#!>. [Último acceso: 28 Mayo 2021].
- [28] «tutienda3d,» [En línea]. Available: <https://tutienda3d.com/producto/filamento-pla-bq-fluorescente-amarillo/>. [Último acceso: 1 Junio 2021].

- [29] L. C. Howard, «3Dnatives,» 6 Junio 2019. [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/filamento-de-abs-impresion-3d-06062019/>. [Último acceso: 22 Mayo 2021].
- [30] «Formizable,» [En línea]. Available: <https://www.hubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared/>. [Último acceso: 30 Mayo 2021].
- [31] «Hubs,» [En línea]. Available: <https://www.hubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared/>. [Último acceso: 30 Mayo 2021].
- [32] «Wikipedia,» 26 Mayo 2021. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Coordenadas_cartesianas. [Último acceso: 30 Mayo 2021].
- [33] «Bitfab,» [En línea]. Available: <https://bitfab.io/es/blog/tipos-de-impresoras-3d/>. [Último acceso: 18 Mayo 2021].
- [34] «Krear3D,» [En línea]. Available: <https://krear3d.com/productos/robotica/dobot-magician/>. [Último acceso: 30 Mayo 2021].
- [35] M. P. Alamillo, «Diseño y puesta en marcha de nuevos filamentos cargados para su uso en impresión 3D,» Trabajo Fin de Máster, Universidad Politécnica de Valencia, 2017.
- [36] «Amazon,» [En línea]. Available: <https://www.amazon.com/-/es/filabot-extrusora-Extrude-filamento-impresi%C3%B3n/dp/B07BH3ZGHV>. [Último acceso: 19 Mayo 2021].
- [37] *Filabot Original and Filabot EX2 Operation Manual*, 2016.
- [38] «Impresorad3d,» [En línea]. Available: <http://impresorad3d.com/producto/formbot-t-rex-2/>. [Último acceso: 1 Junio 2021].
- [39] «Formbot3D,» [En línea]. Available: <https://www.formbot3d.com/collections/t-rex-2-376>. [Último acceso: 20 Mayo 2021].
- [40] «3DJake,» [En línea]. Available: <https://www.3djake.es/e3d/volcano-hot-end-bowden-300-mm>. [Último acceso: 20 Mayo 2021].
- [41] *Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 1: Principios generales. (ISO 527-1:2019)..*
- [42] *Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 2: Condiciones de ensayo de plásticos para moldeo y extrusión. (ISO 527-2:2012)..*
- [43] *Plásticos. Determinación de las propiedades de flexión. (ISO 178:2020)..*
- [44] *Plásticos. Determinación de las propiedades en compresión. (ISO 604:2003).*

20. ANEXO I: DIMENSIONES Y MASAS DE LAS PROBETAS

20.1 ENSAYO DE TRACCIÓN

PLA PROVEEDOR

	L	W1	W2	W	w1	w2	w3	w	e1	e2	e3	e	Peso
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[gr]
P1	165,00	20,34	20,19	20,27	10,37	10,42	10,34	10,38	3,99	4,00	4,03	4,01	8,52
P2	165,00	20,10	20,09	20,10	10,18	10,15	10,22	10,18	3,98	4,03	4,06	4,02	8,53
P3	165,00	19,96	20,06	20,01	10,15	10,20	10,16	10,17	4,09	4,07	4,05	4,07	8,55
P4	165,00	20,12	20,21	20,17	10,23	10,28	10,29	10,27	4,10	4,03	4,00	4,04	8,55
P5	165,00	20,31	20,27	20,29	10,31	10,34	10,25	10,30	3,89	3,95	4,00	3,95	8,53

PLA RECICLADO

	L	W1	W2	W	w1	w2	w3	w	e1	e2	e3	e	Peso
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[gr]
P1	165,00	20,08	20,06	20,07	10,18	10,29	10,18	10,22	3,99	4,04	4,02	4,02	9,16
P2	165,00	19,88	19,91	19,90	9,96	9,94	10,00	9,97	3,95	3,96	3,97	3,96	8,37
P3	165,00	20,14	20,01	20,08	10,08	10,09	10,08	10,08	3,91	3,92	3,98	3,94	7,87
P4	165,00	20,15	20,20	20,18	10,36	10,34	10,33	10,34	4,17	4,12	4,13	4,14	9,10
P5	165,00	20,14	20,09	20,12	10,16	10,17	10,19	10,17	4,01	4,00	4,02	4,01	9,15

20.2 ENSAYO DE COMPRESIÓN

PLA PROVEEDOR

	L	a1	a2	a	b1	b2	b	Peso
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]
P1	39,98	16,02	16,00	16,01	15,96	15,86	15,91	8,532
P2	39,98	16,04	15,96	16,00	16,03	15,90	15,97	8,569
P3	40,01	16,05	15,95	16,00	16,04	15,96	16,00	8,517
P4	40,04	16,00	15,97	15,99	16,03	16,02	16,03	8,511
P5	40,06	16,07	16,05	16,06	16,09	16,03	16,06	8,558

PLA RECICLADO

	L	a1	a2	a	b1	b2	b	Peso
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]
P1	39,98	16,14	15,85	16,00	16,02	15,85	15,94	8,916
P2	40,10	16,00	15,92	15,96	15,89	15,95	15,92	8,256
P3	39,90	15,85	16,09	15,97	15,84	16,02	15,93	8,661
P4	40,11	15,84	15,78	15,81	15,89	15,78	15,84	8,003
P5	40,03	15,88	16,01	15,95	15,84	15,95	15,90	9,158

20.3 ENSAYO DE FLEXIÓN

PLA PROVEEDOR

	L [mm]	w1 [mm]	w2 [mm]	w3 [mm]	w [mm]	e1 [mm]	e2 [mm]	e3 [mm]	e [mm]	Peso [gr]
P1	80,04	10,08	10,00	10,08	10,05	3,92	3,97	3,98	3,96	3,00
P2	79,96	10,03	10,00	10,06	10,03	4,05	4,10	4,08	4,08	3,02
P3	79,98	9,95	9,96	10,11	10,01	4,07	4,05	4,09	4,07	3,02
P4	79,98	10,05	10,00	10,06	10,04	3,98	4,04	4,05	4,02	3,01
P5	80,07	10,01	10,03	10,10	10,05	4,05	4,03	4,05	4,04	3,01

PLA RECICLADO

	L [mm]	w1 [mm]	w2 [mm]	w3 [mm]	w [mm]	e1 [mm]	e2 [mm]	e3 [mm]	e [mm]	Peso [gr]
P1	80,11	10,20	10,16	10,20	10,19	4,20	4,22	4,22	4,21	3,23
P2	80,20	10,11	10,28	10,20	10,20	4,02	4,07	4,08	4,06	3,26
P3	79,92	10,10	10,04	10,15	10,10	4,05	4,03	4,05	4,04	2,89
P4	79,97	10,25	10,12	10,16	10,18	3,96	4,00	3,98	3,98	3,09
P5	79,99	10,04	10,25	9,96	10,08	4,13	4,14	4,05	4,11	3,22

21. ANEXO II: FICHA TÉCNICA FILAMENTO PLA BQ



PLA filamento: ficha técnica

PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES	MÉTODO DE TESTEO
Propiedades generales			
Densidad	1,24	g/cm ³	ASTM D792
Propiedades mecánicas			
Módulo elástico en flexión	3600	MPa	ISO 178
Resistencia a la flexión	108	MPa	ISO 178
Dureza Sh D	85	Sh D	ASTM D2240
Propiedades térmicas			
Temperatura de flexión bajo carga	56	°C	ISO 75/2B
Temperatura de fusión	145-160	°C	ASTM D3418
Temperatura de transición vítrea	56-64	°C	ASTM D3418

Además de las propiedades descritas, hemos realizado los ensayos de tracción tanto de probetas inyectadas como de probetas impresas con nuestro PLA, para conocer las propiedades mecánicas de la pieza impresa final. En la siguiente tabla se recogen estos resultados:

Propiedades mecánicas	Probetas inyectadas	Probetas impresas ^a	Probetas impresas ^b	Unidades	Método de testeo
Resistencia a la rotura en tracción	52	50	39	MPa	ISO527
Deformación a rotura en tracción	5	9	4	%	ISO527
Módulo elástico en tracción	1320	1230	1120	MPa	ISO527

^a Estirado en dirección paralela a las capas.

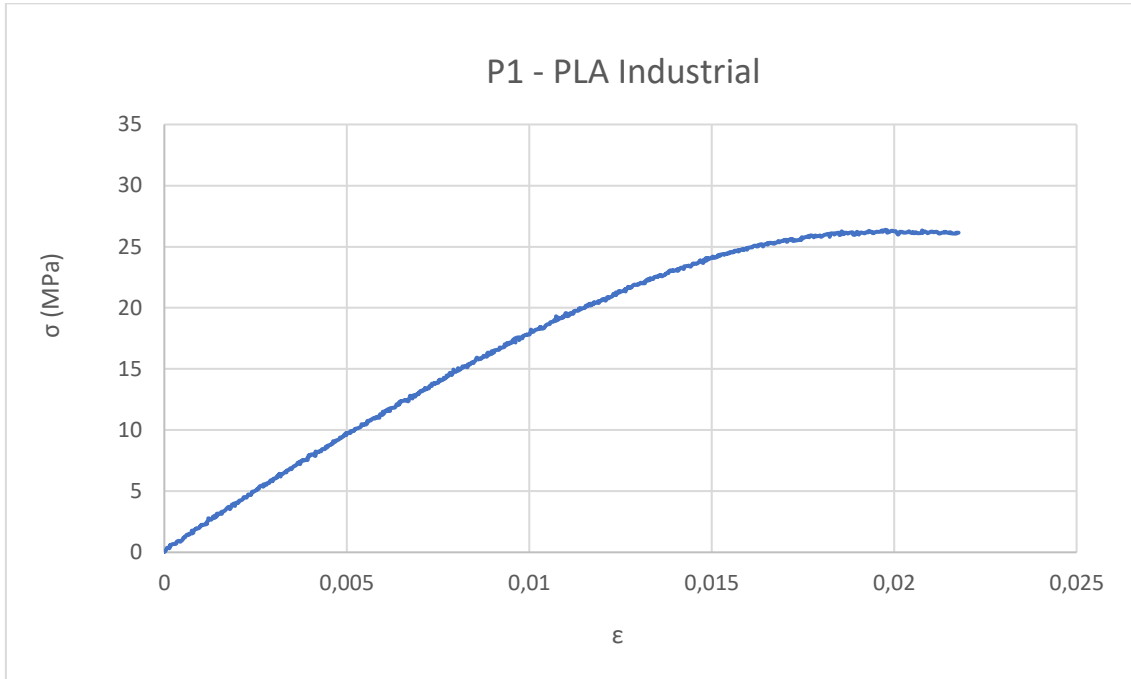
^b Estirado en dirección perpendicular a las capas

Probetas	Altura de capa (mm)	Grosor pared exterior (mm)	Grosor parte inferior/superior (mm)	Densidad del relleno (%)	Diseño de impresión
Probeta impresa en dirección paralela a las capas	0,2	2	0,2	100	
Probeta impresa en dirección perpendicular a las capas	0,3	1	0,3	100	

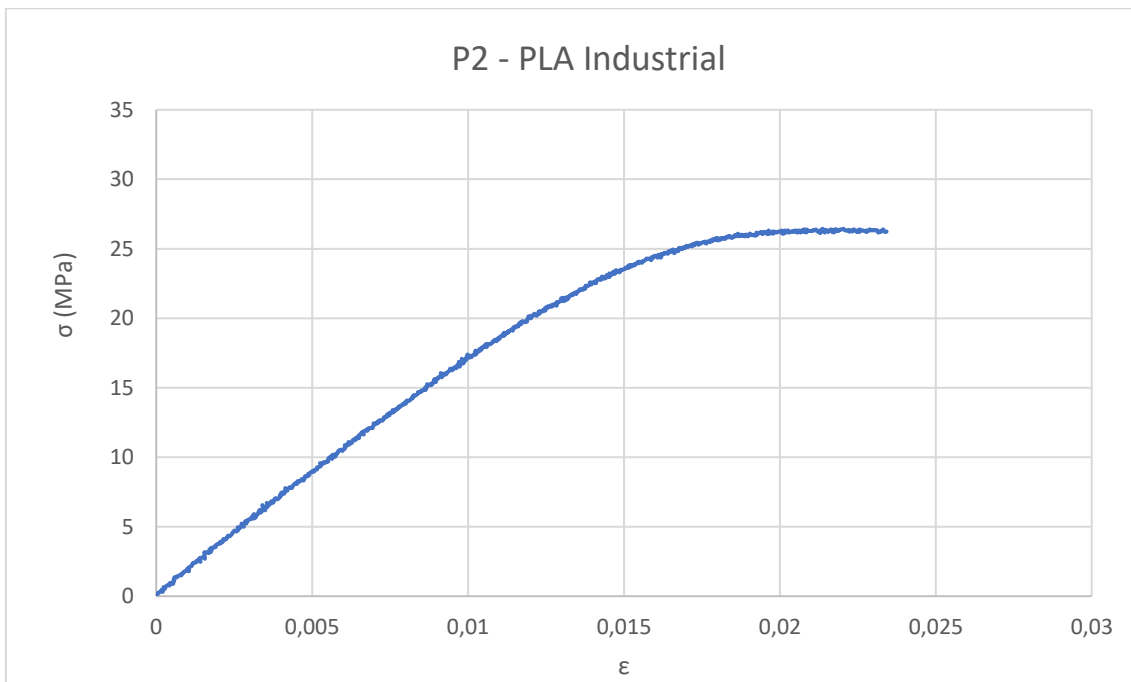
bq

22. ANEXO III: GRÁFICAS TENSION-DEFORMACIÓN

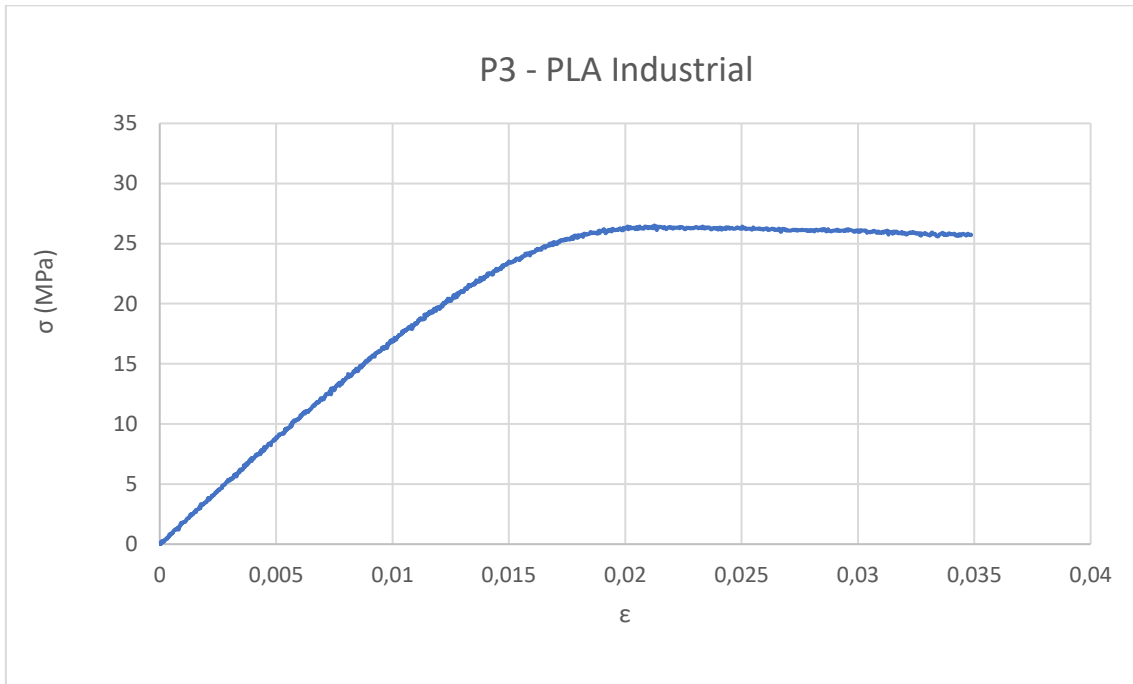
22.1 ENSAYO A TRACCIÓN



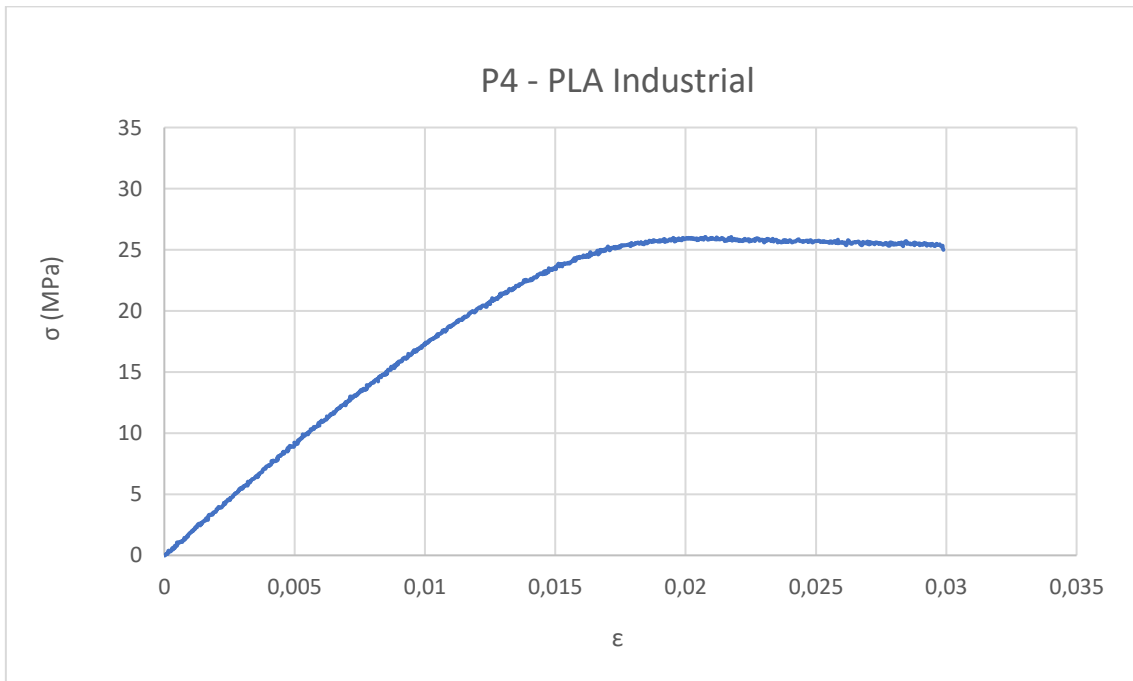
Gráfica esfuerzo-deformación P1 tracción PLA industrial.



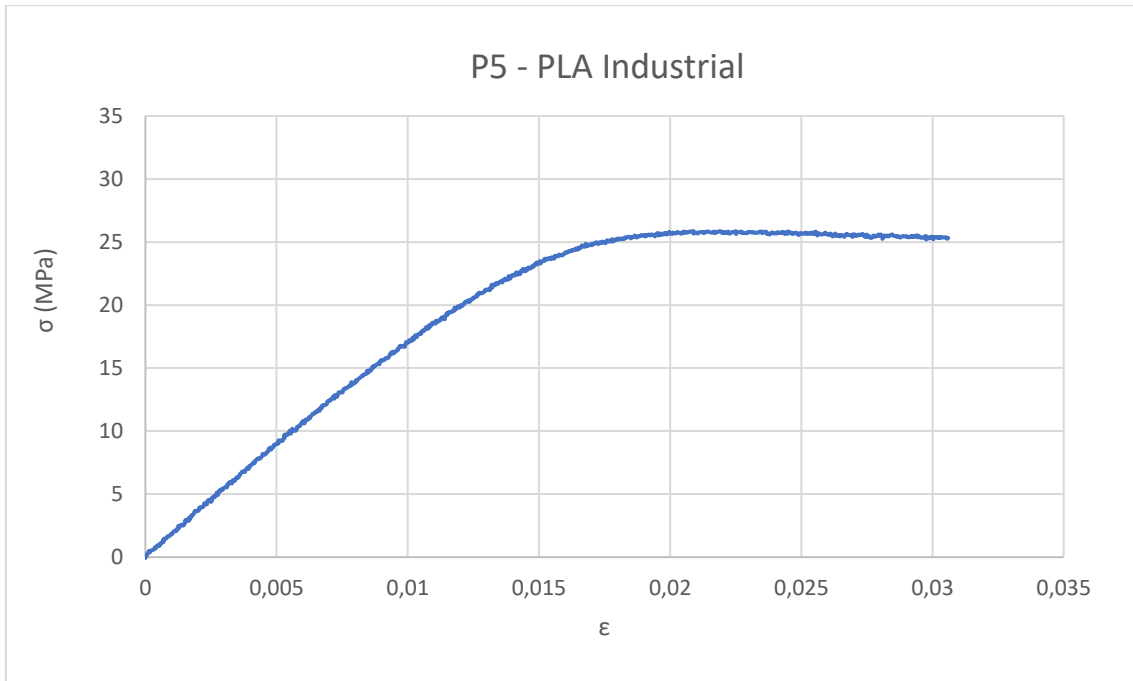
Gráfica esfuerzo-deformación P2 tracción PLA industrial.



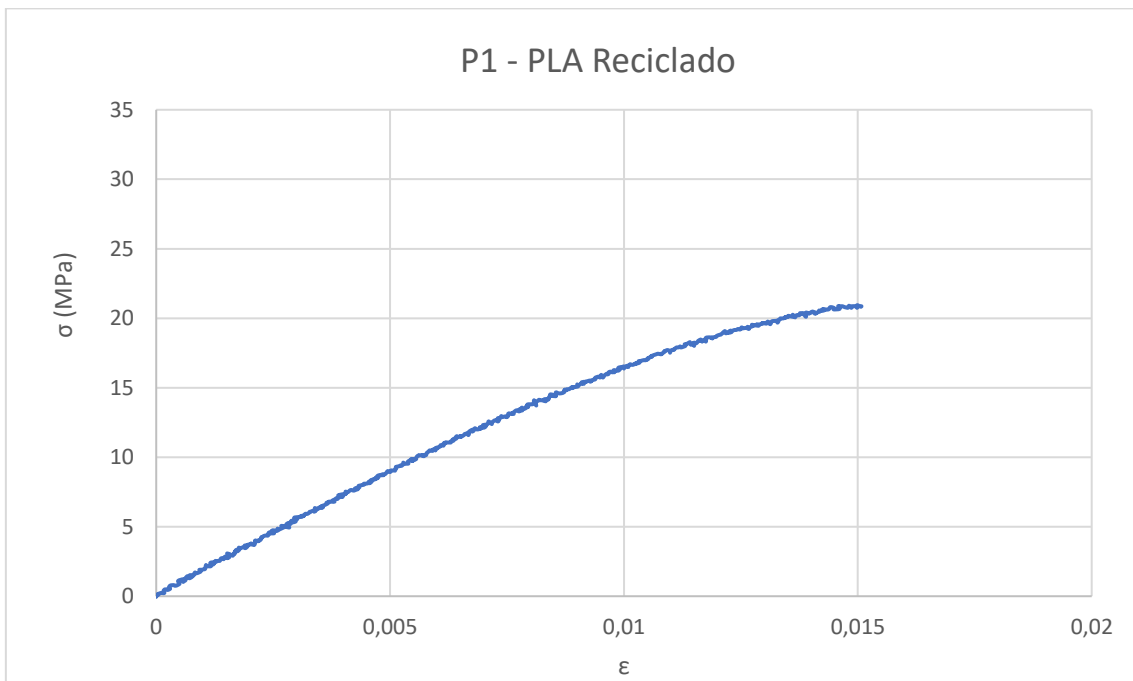
Gráfica esfuerzo-deformación P3 tracción PLA industrial.



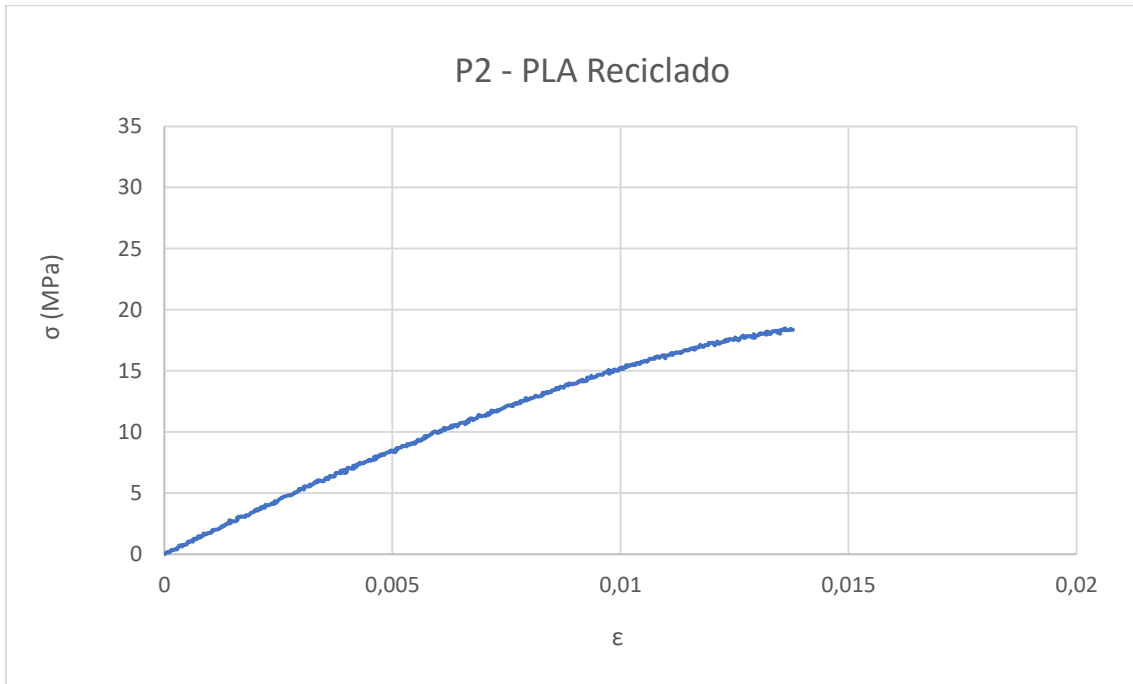
Gráfica esfuerzo-deformación P4 tracción PLA industrial.



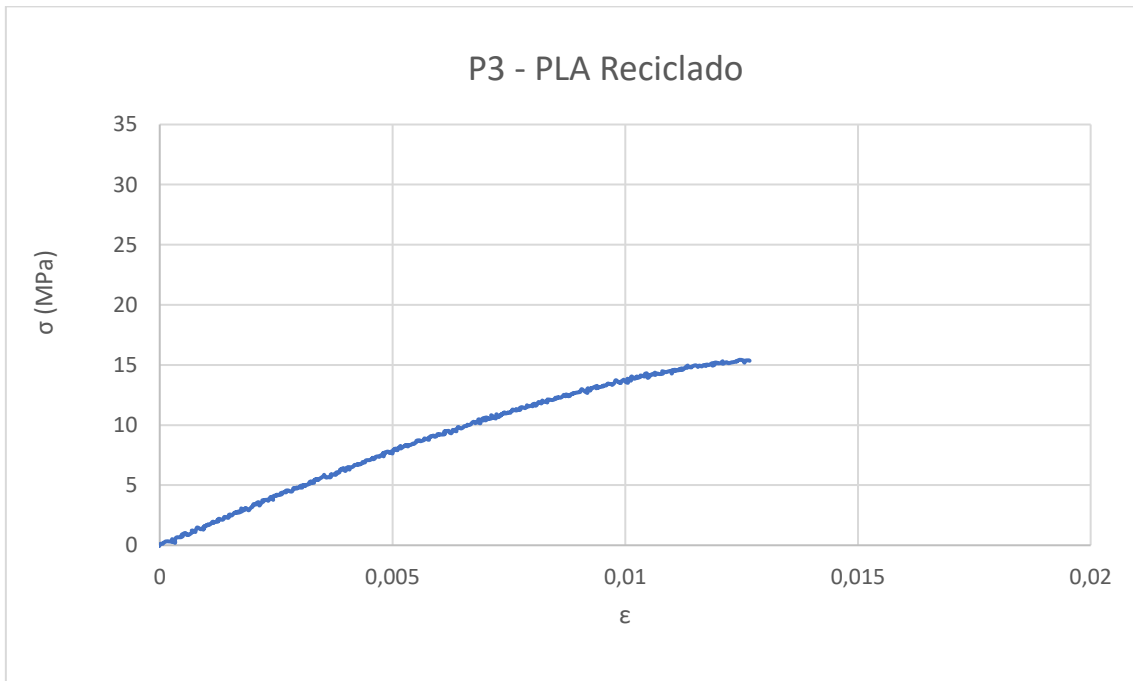
Gráfica esfuerzo-deformación P5 tracción PLA industrial.



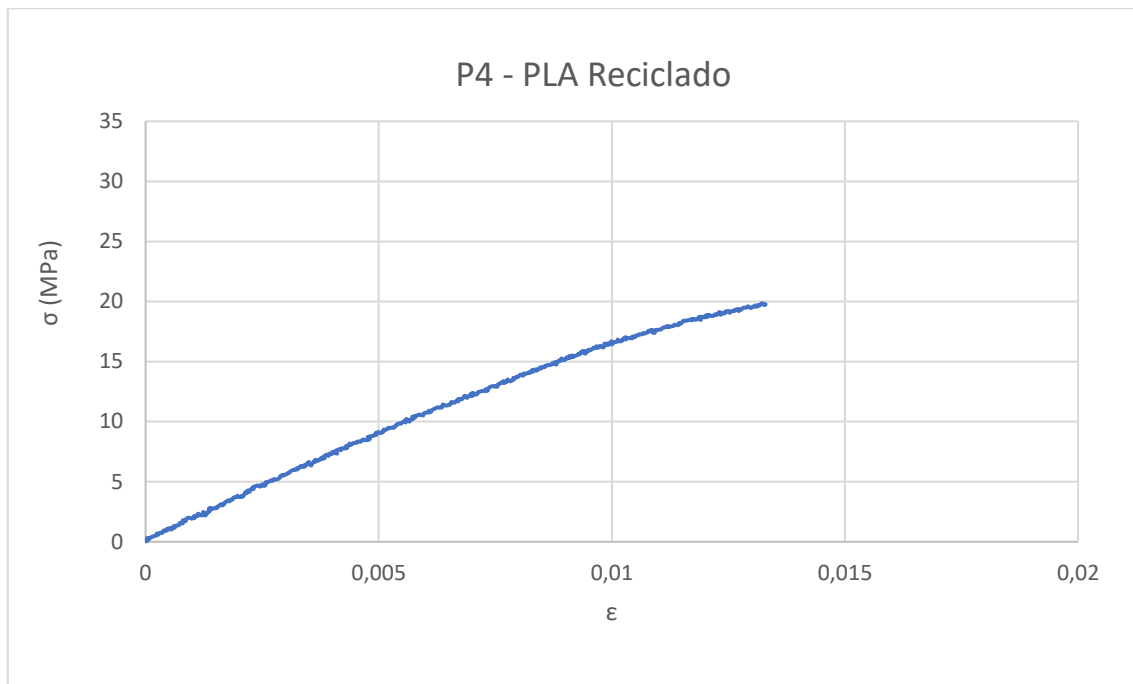
Gráfica esfuerzo-deformación P1 tracción PLA reciclado.



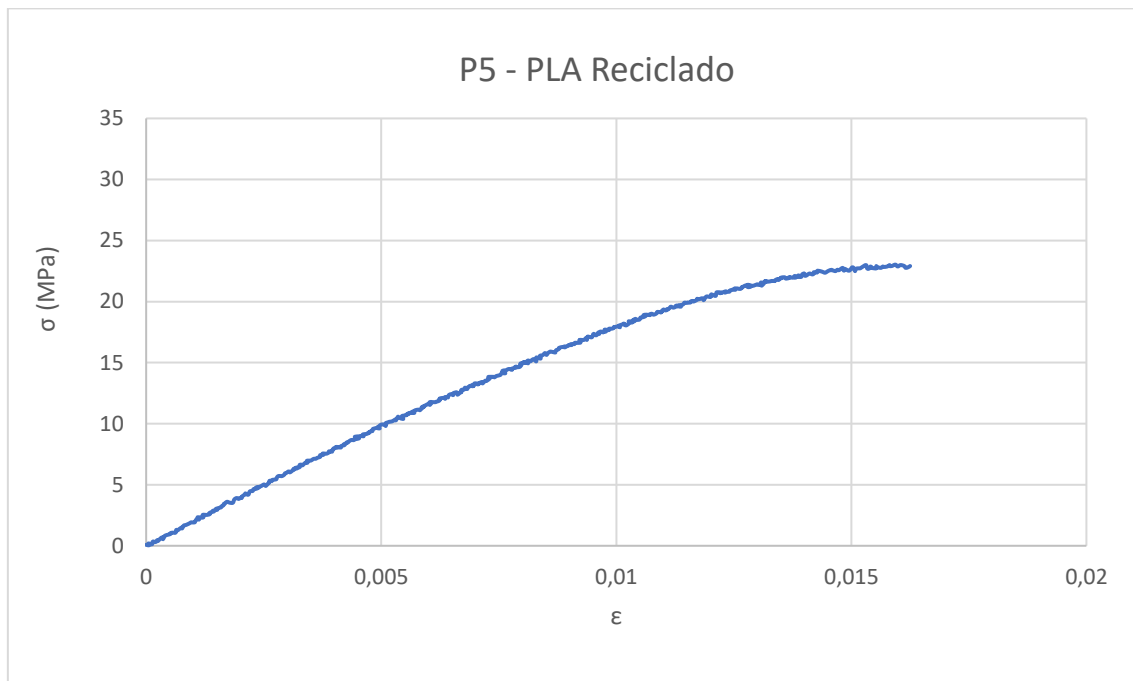
Gráfica esfuerzo-deformación P2 tracción PLA reciclado.



Gráfica esfuerzo-deformación P3 tracción PLA reciclado.

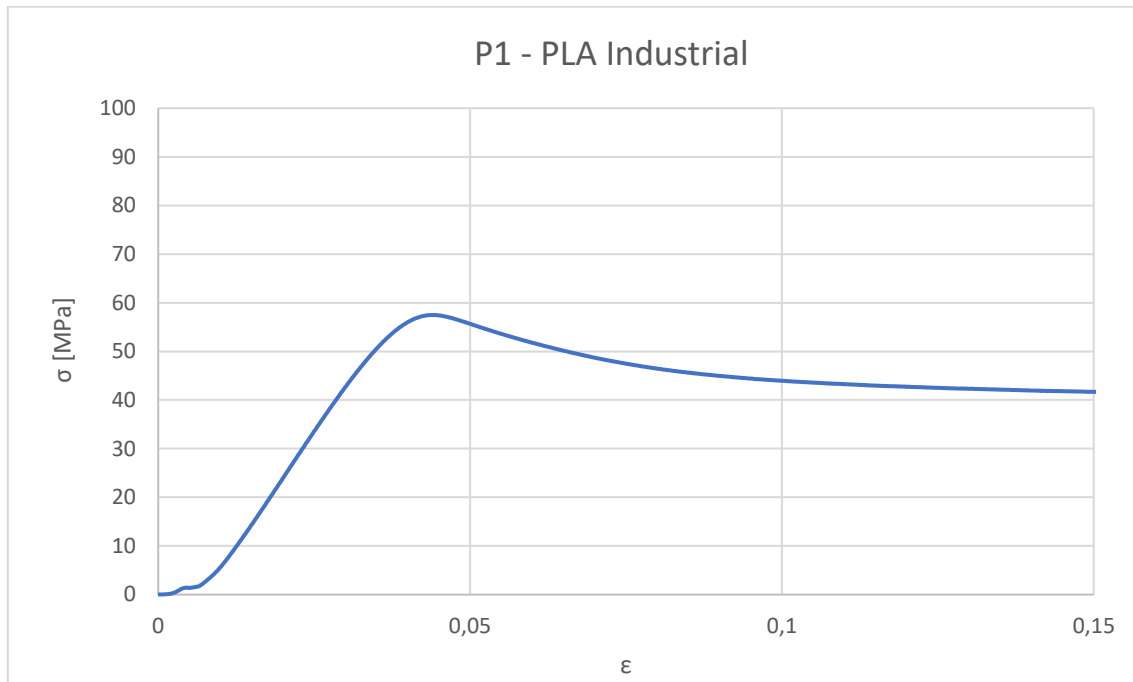


Gráfica esfuerzo-deformación P4 tracción PLA reciclado.

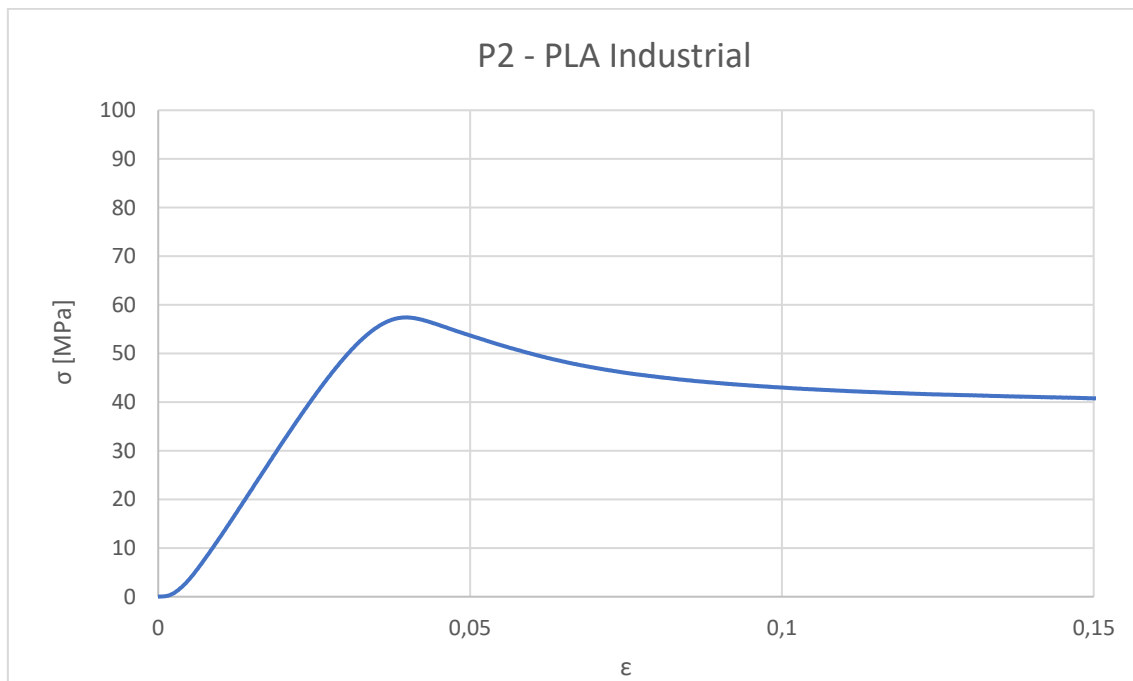


Gráfica esfuerzo-deformación P5 tracción PLA reciclado.

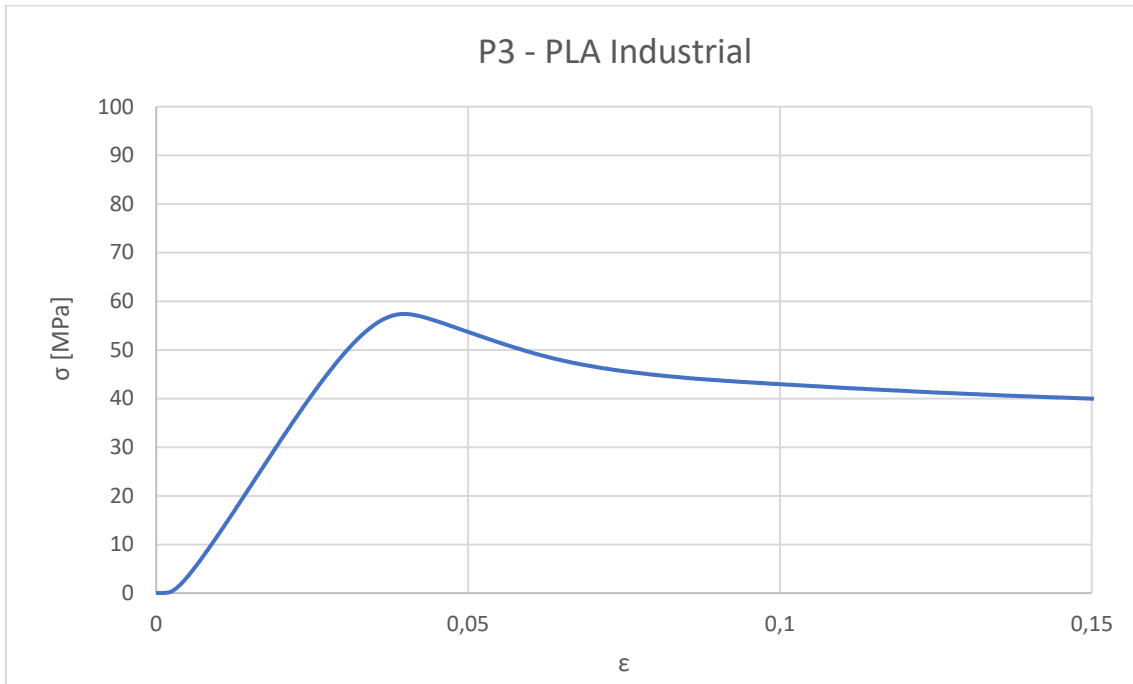
22.2 ENSAYO A COMPRESIÓN



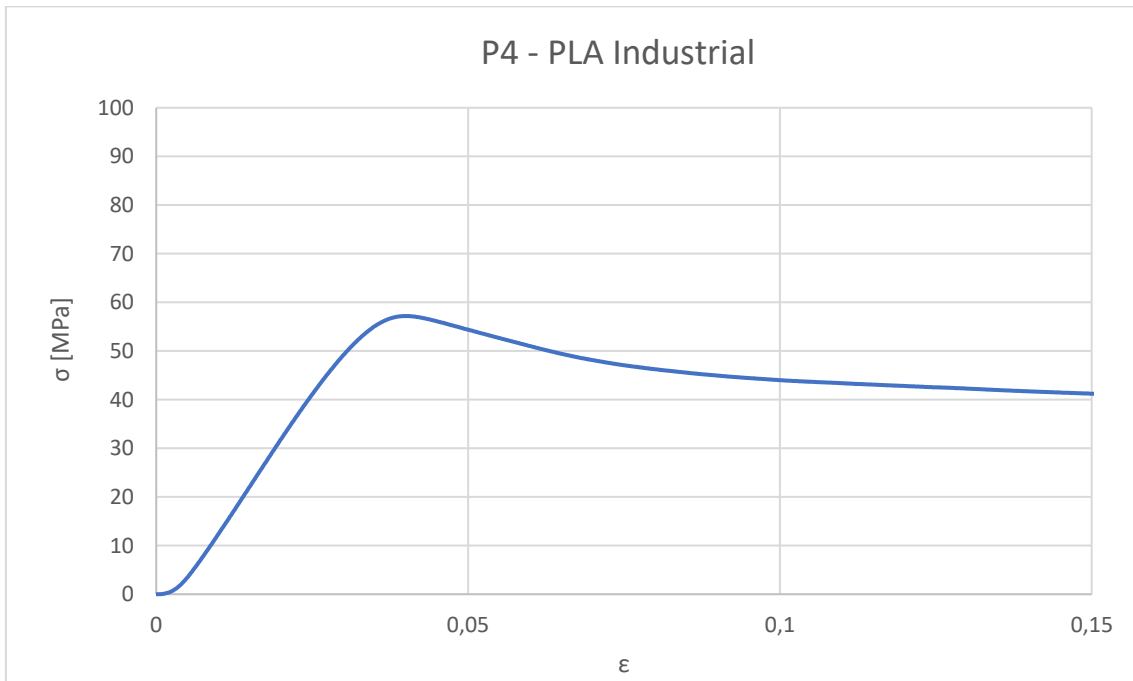
Gráfica esfuerzo-deformación P1 compresión PLA industrial.



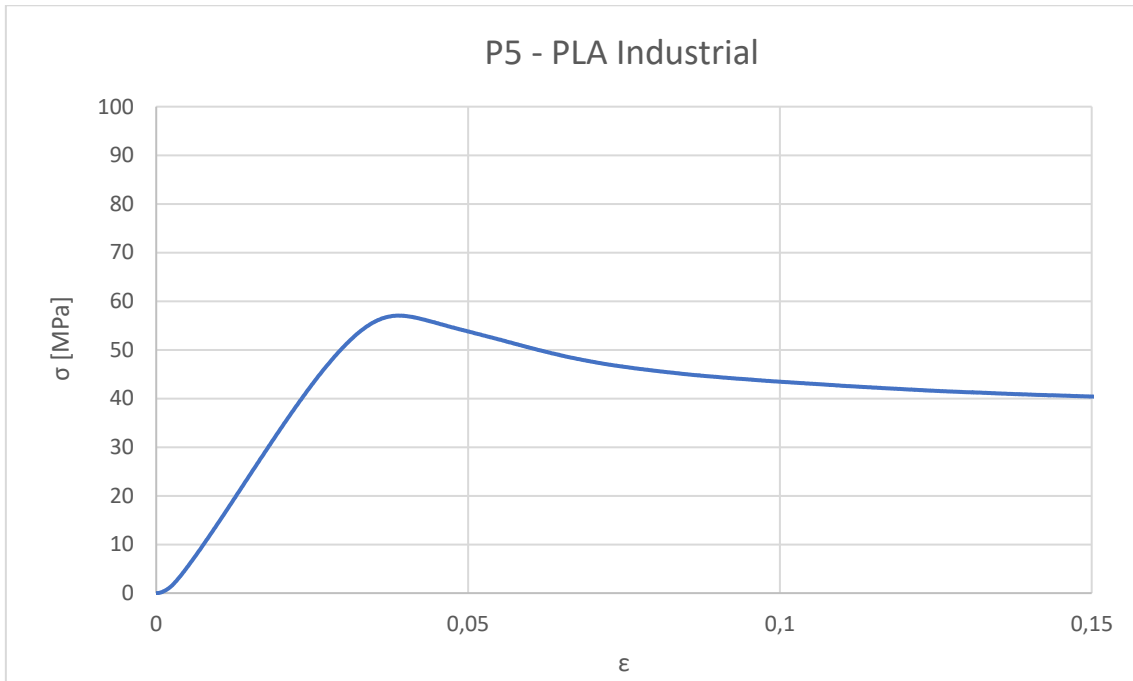
Gráfica esfuerzo-deformación P2 compresión PLA industrial.



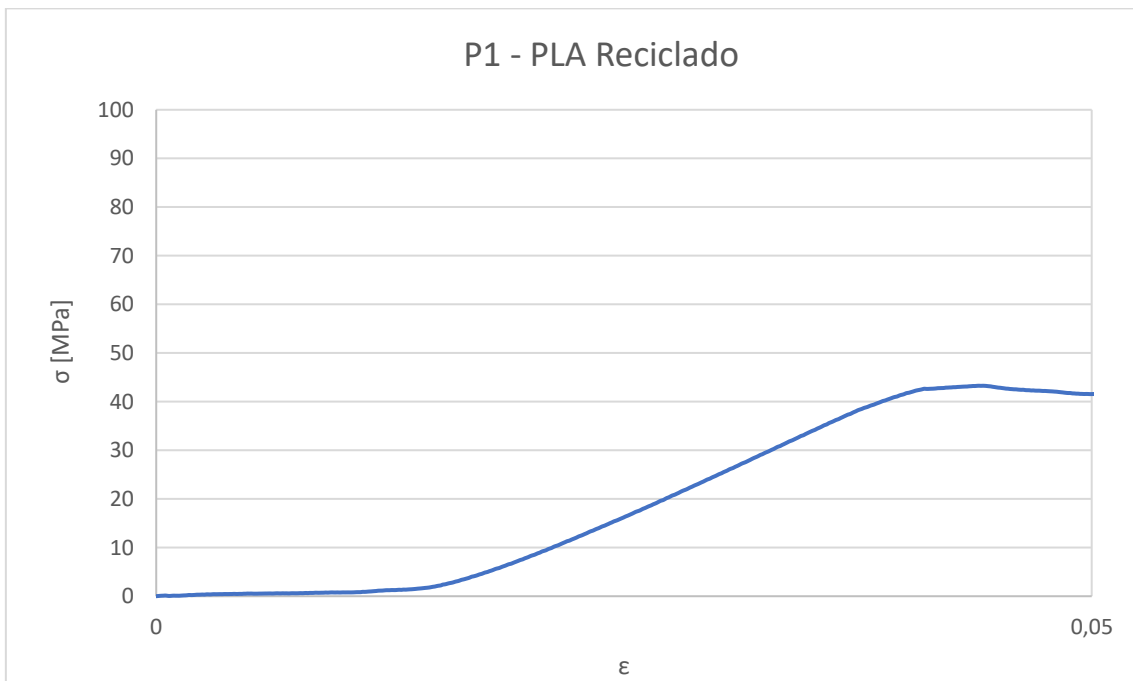
Gráfica esfuerzo-deformación P3 compresión PLA industrial.



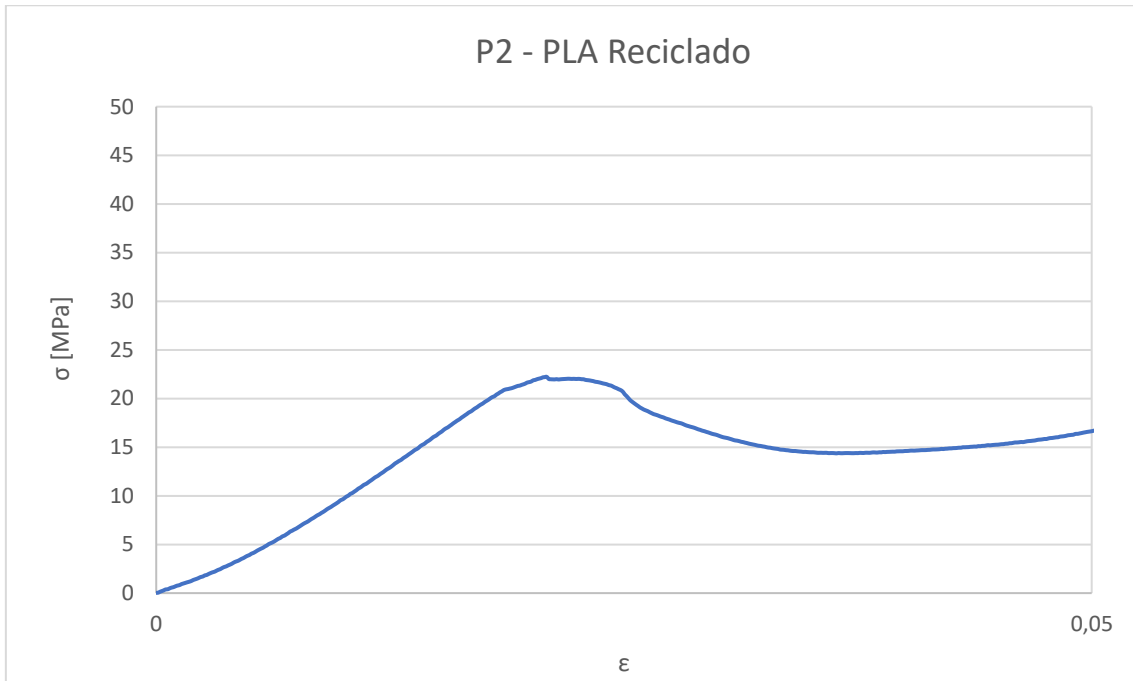
Gráfica esfuerzo-deformación P4 compresión PLA industrial.



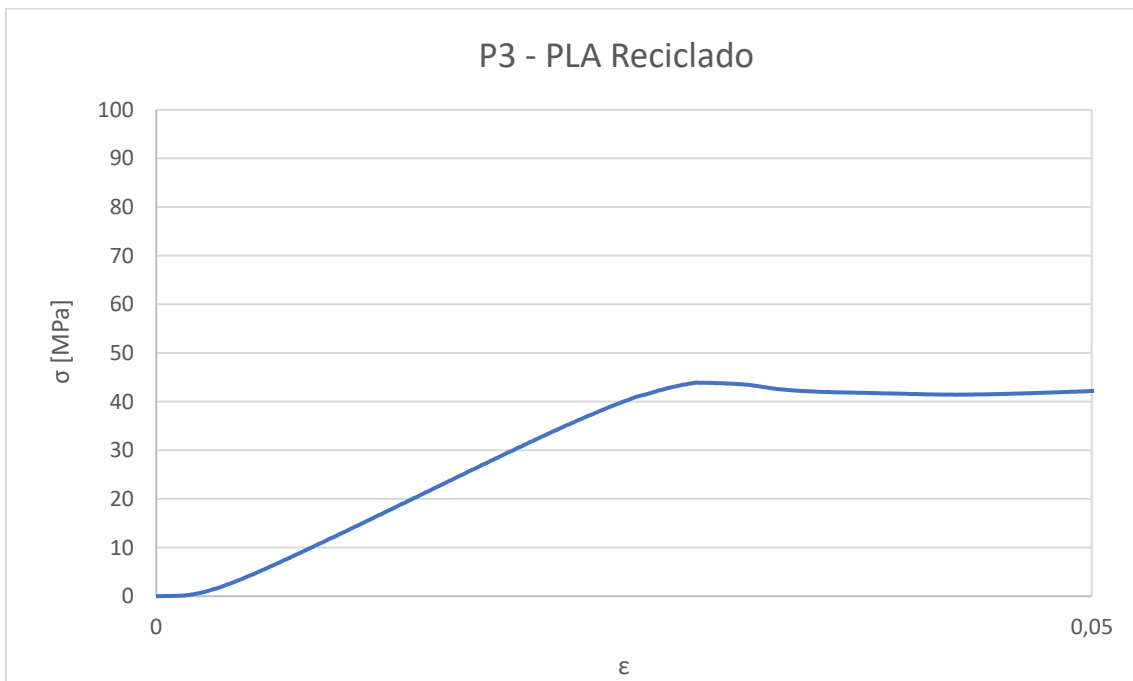
Gráfica esfuerzo-deformación P5 compresión PLA industrial.



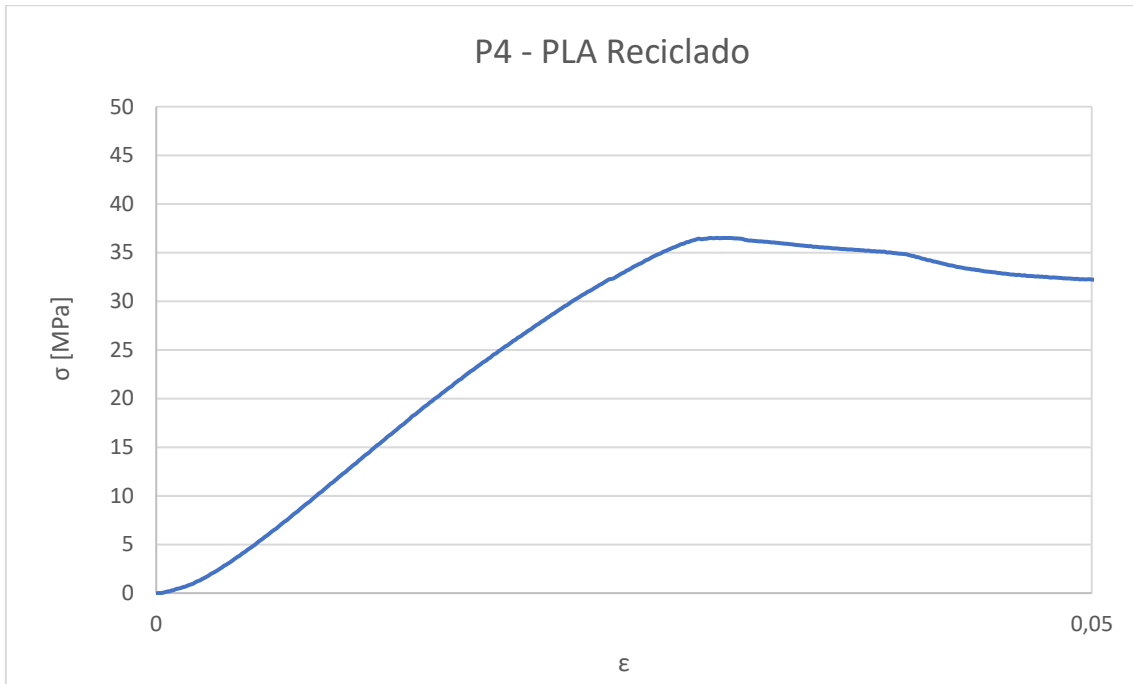
Gráfica esfuerzo-deformación P1 compresión PLA reciclado.



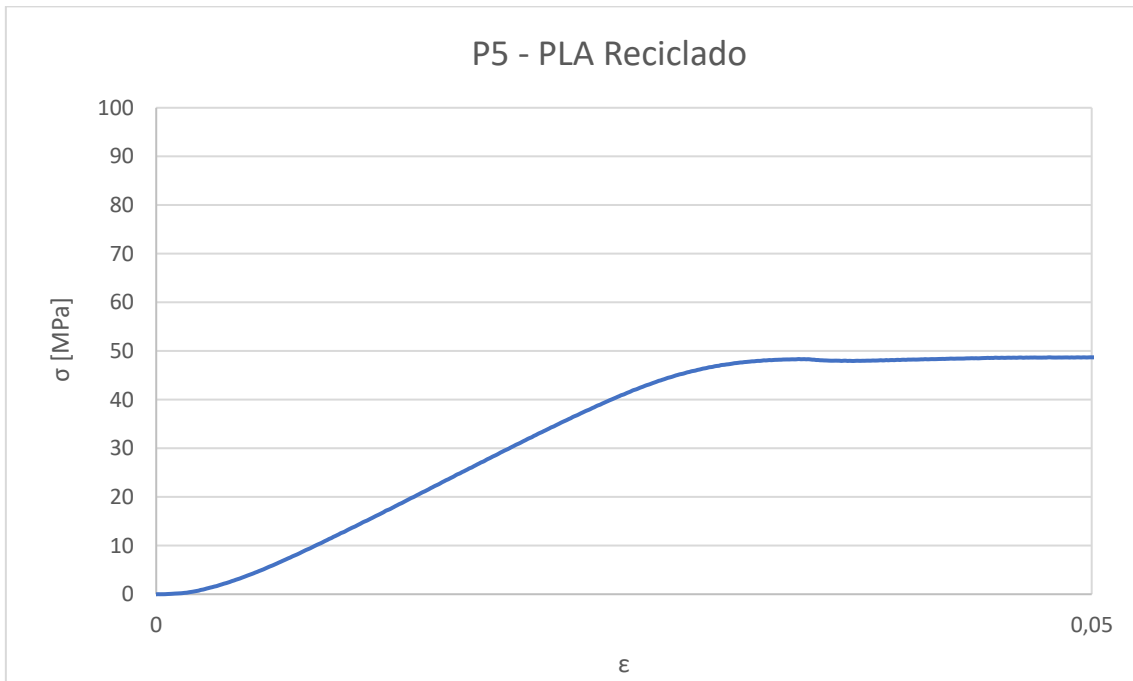
Gráfica esfuerzo-deformación P2 compresión PLA reciclado.



Gráfica esfuerzo-deformación P3 compresión PLA reciclado.

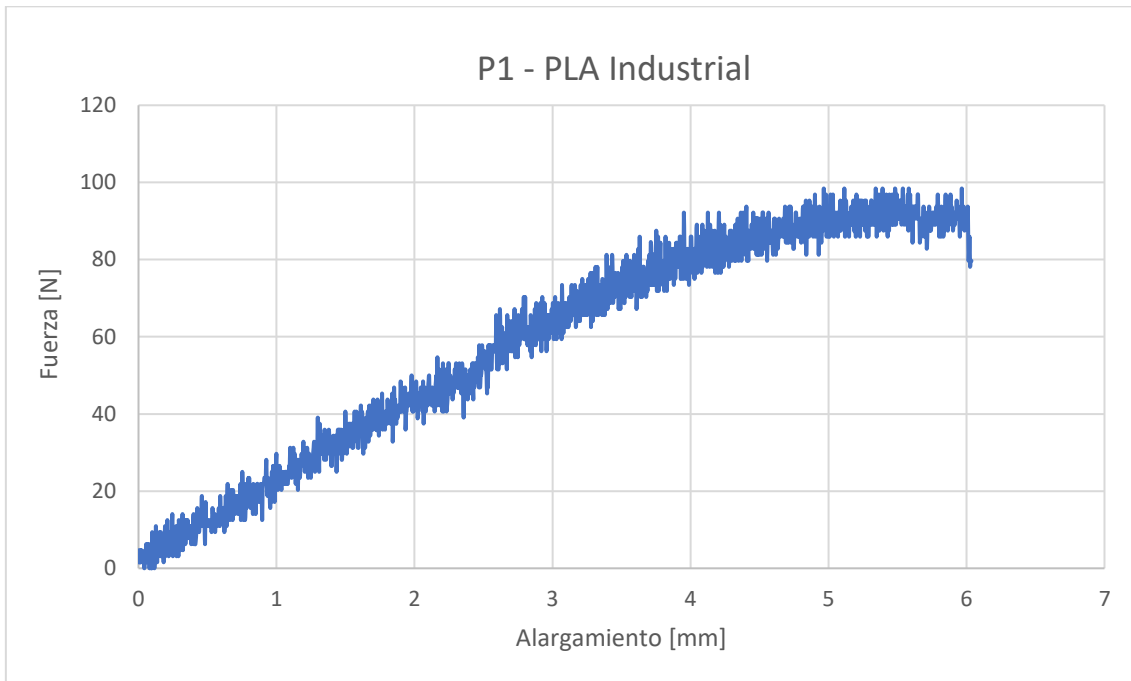


Gráfica esfuerzo-deformación P4 compresión PLA reciclado.

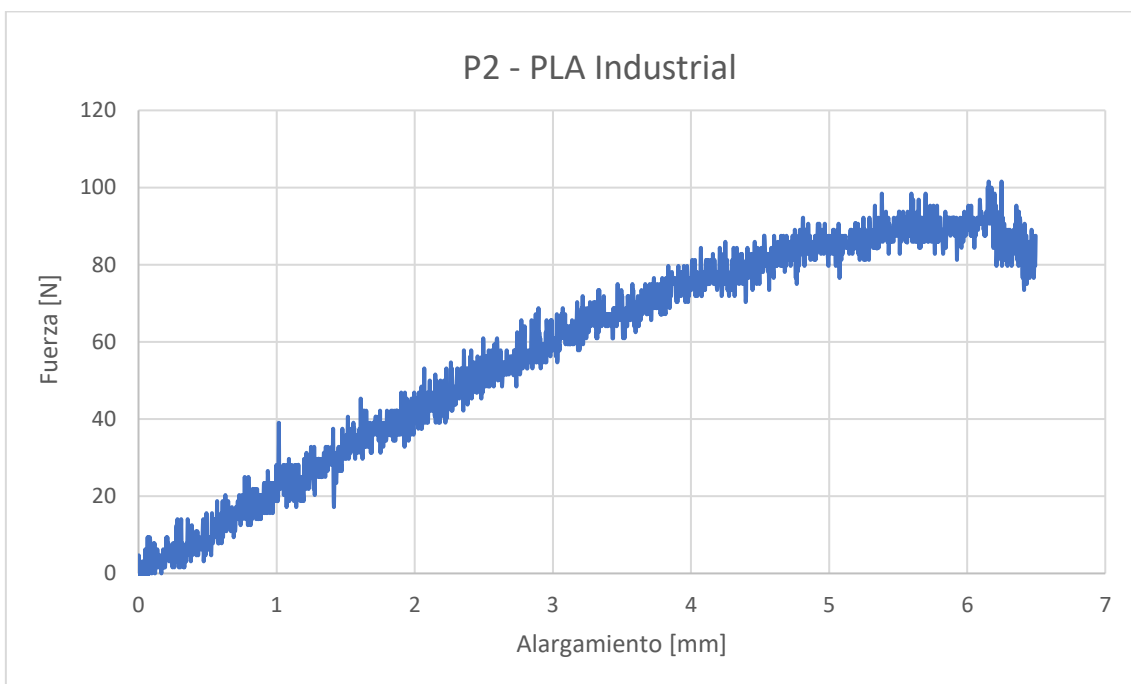


Gráfica esfuerzo-deformación P5 compresión PLA reciclado.

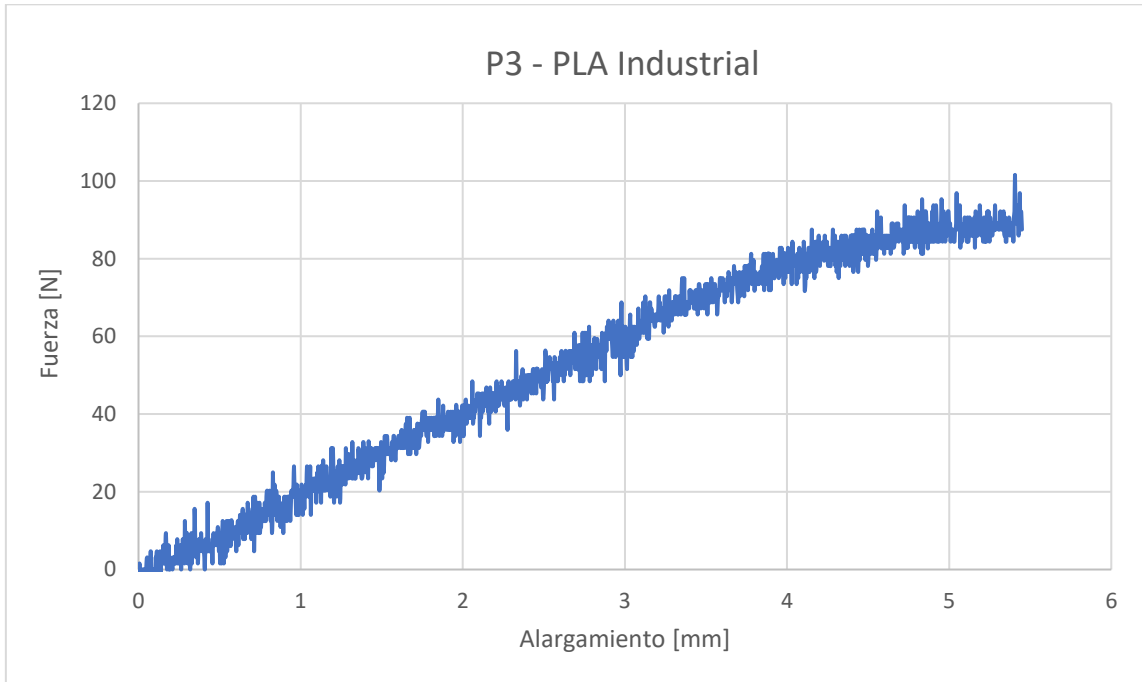
22.3 ENSAYO A FLEXIÓN



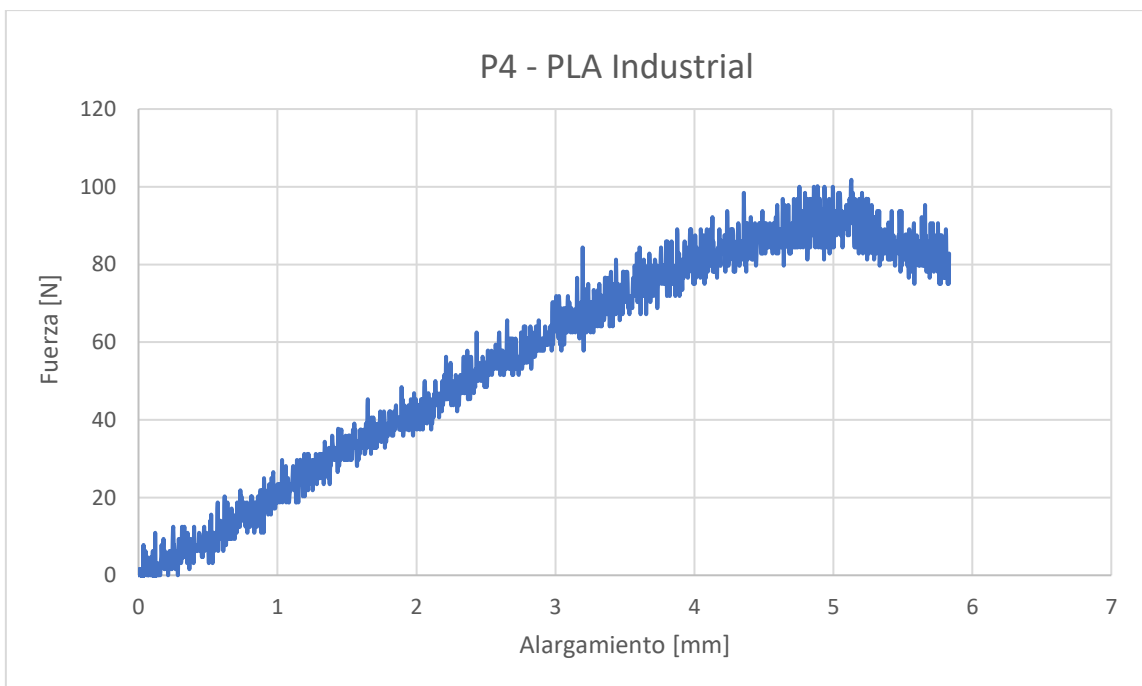
Gráfica esfuerzo-deformación P1 flexión PLA industrial.



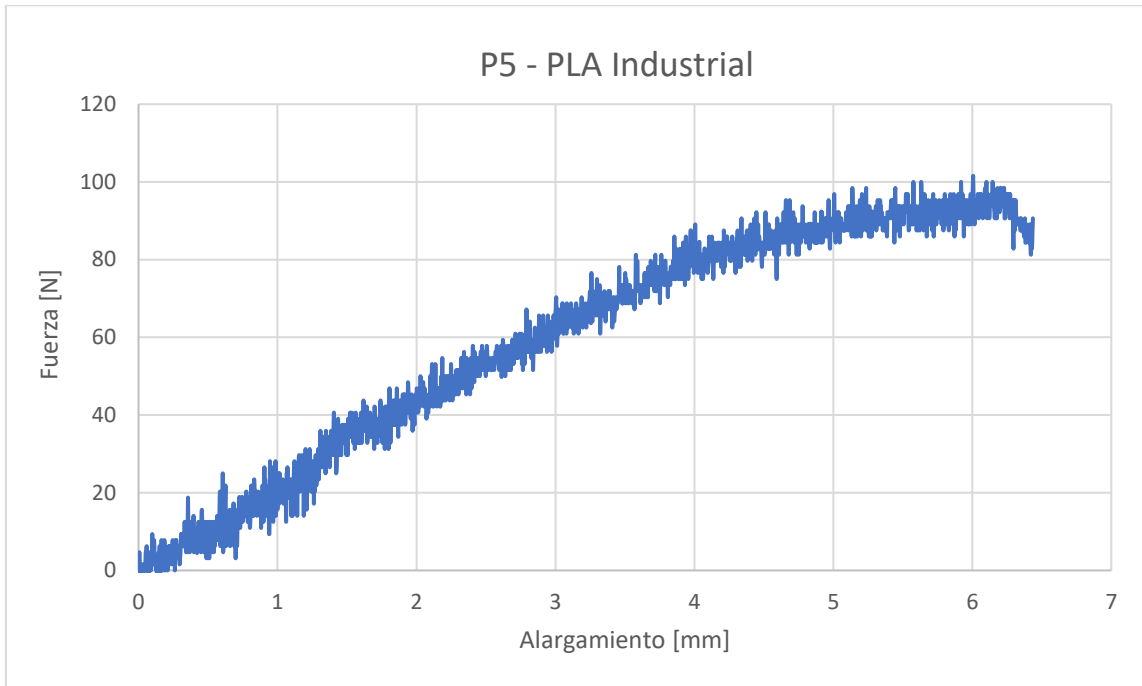
Gráfica esfuerzo-deformación P2 flexión PLA industrial.



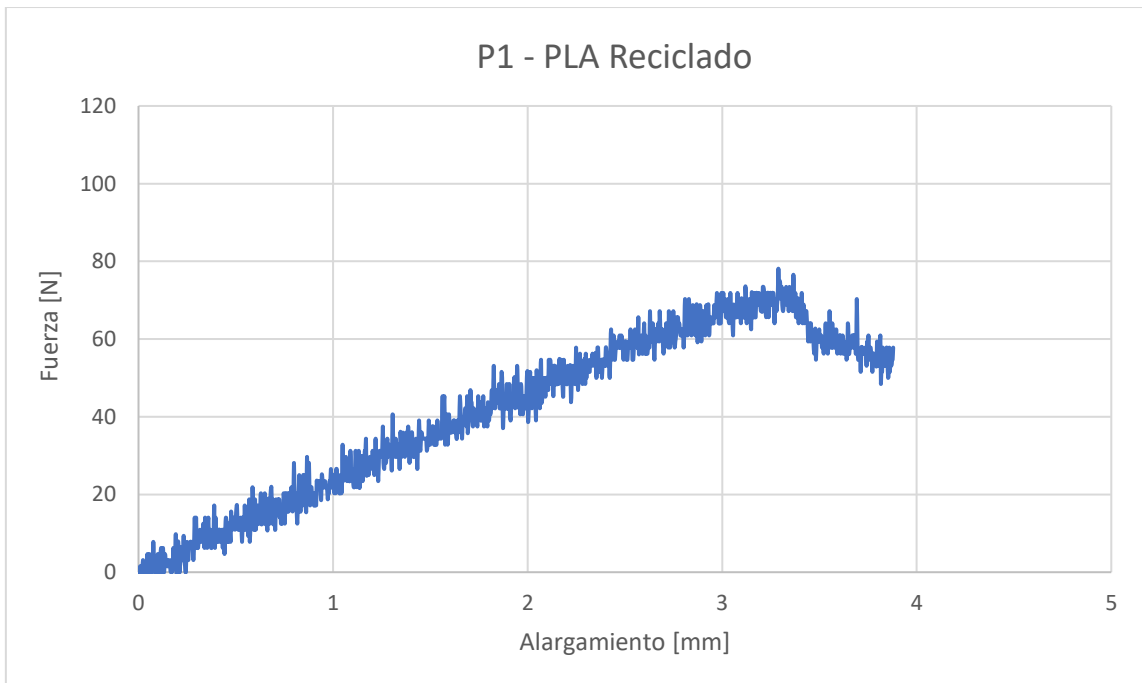
Gráfica esfuerzo-deformación P3 flexión PLA industrial.



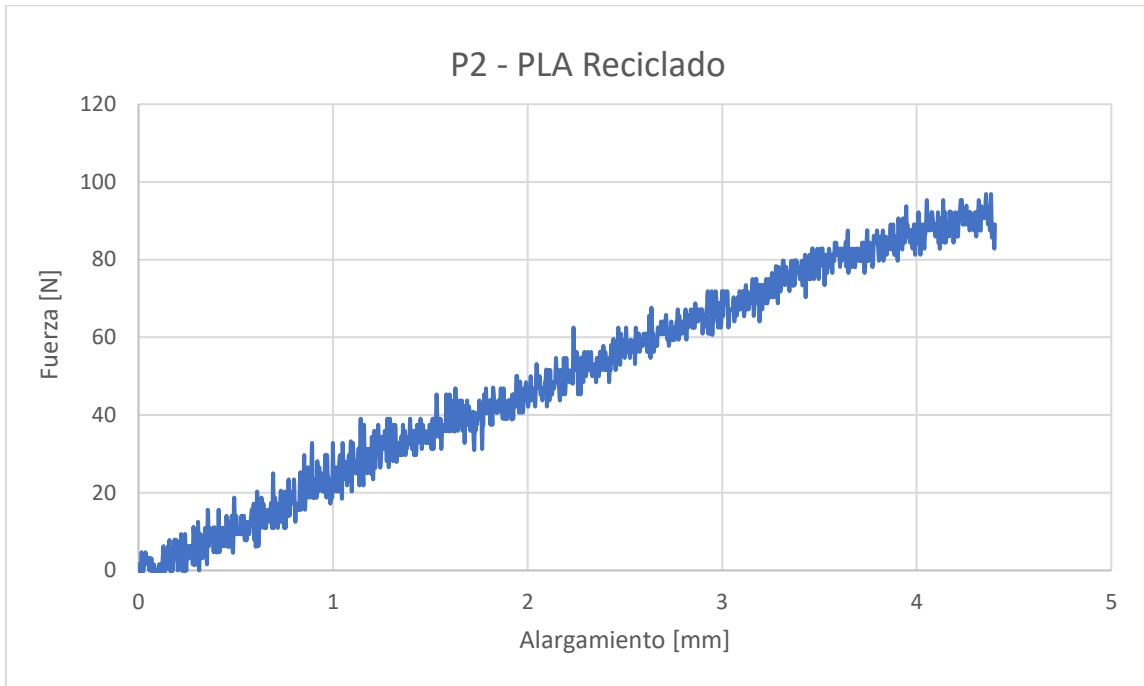
Gráfica esfuerzo-deformación P4 flexión PLA industrial.



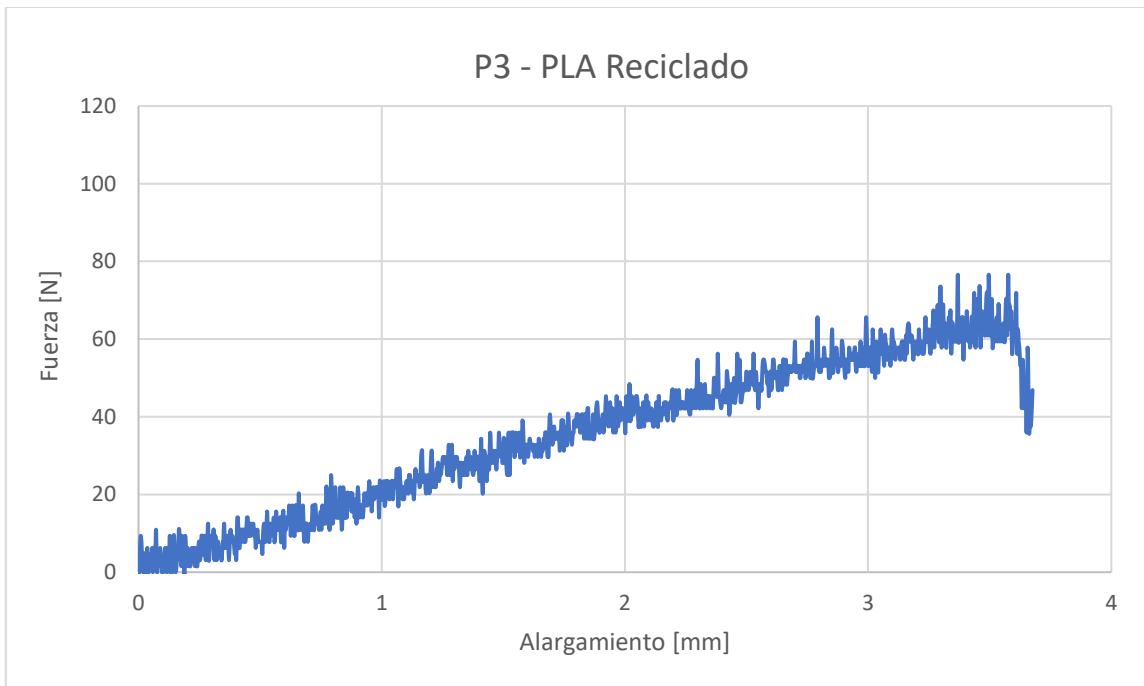
Gráfica esfuerzo-deformación P5 flexión PLA industrial.



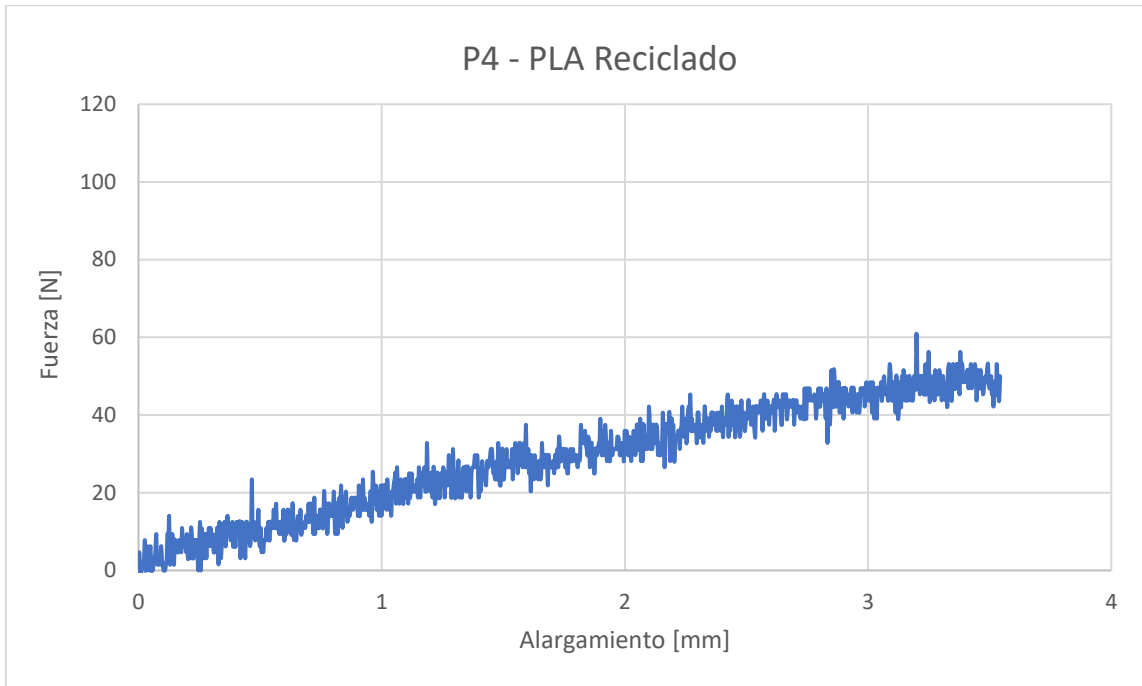
Gráfica esfuerzo-deformación P1 flexión PLA reciclado.



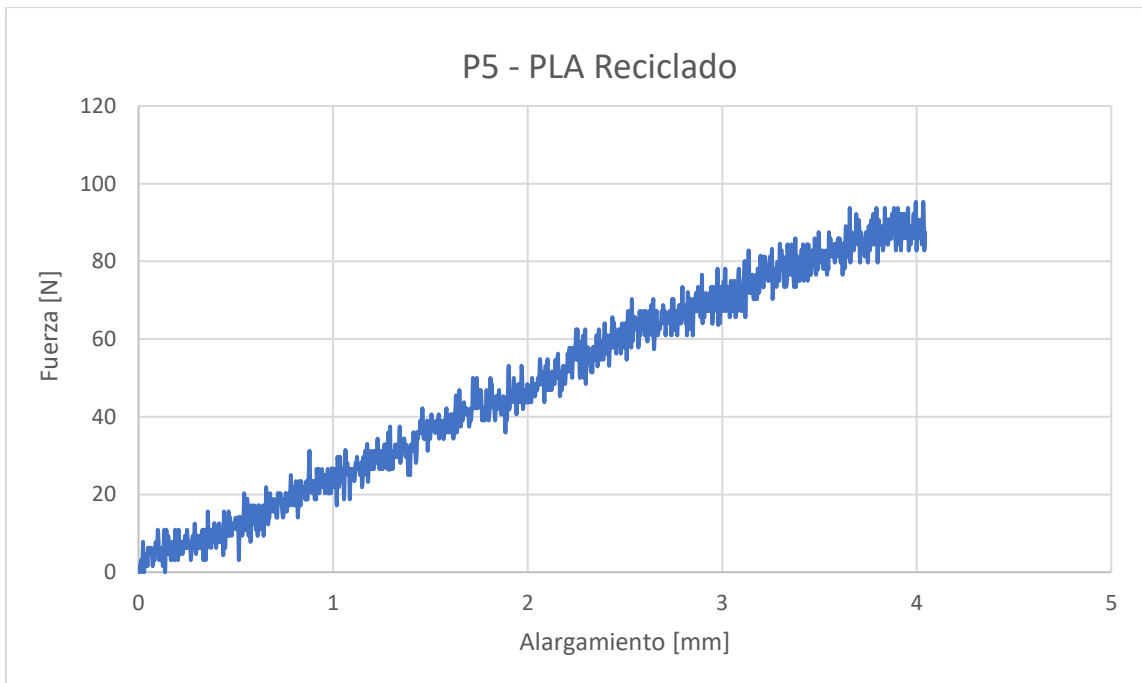
Gráfica esfuerzo-deformación P2 flexión PLA reciclado.



Gráfica esfuerzo-deformación P3 flexión PLA reciclado.



Gráfica esfuerzo-deformación P4 flexión PLA reciclado.



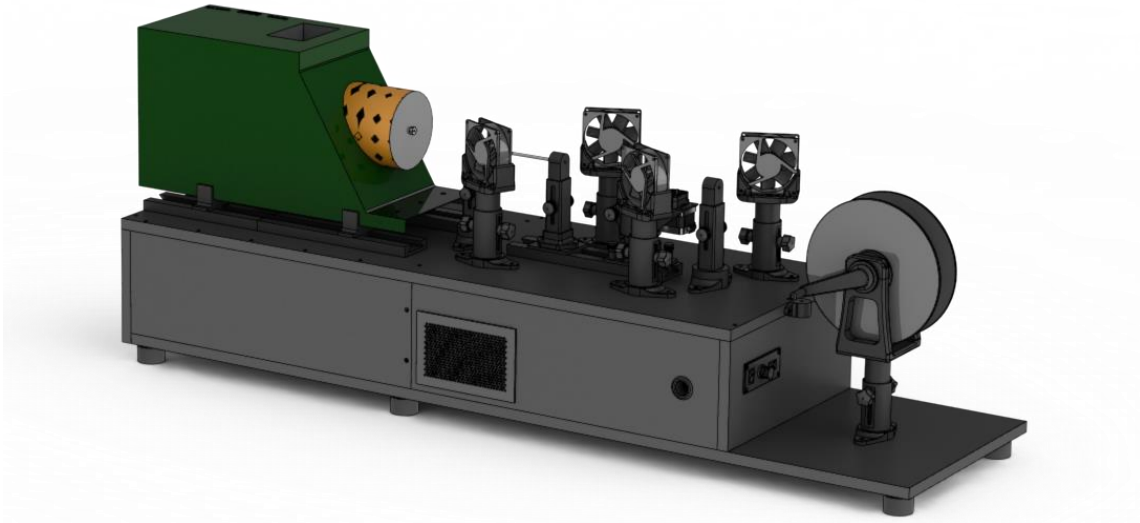
Gráfica esfuerzo-deformación P5 flexión PLA reciclado.

23. ANEXO IV: CARACTERIZACIÓN FILAMENTO RECICLADO

Tramo 1		Tramo 2		Tramo 3		Tramo 4		Tramo 5		Tramo 6		Tramo 7	
L [cm]	D [mm]	L [cm]	D [mm]	L [cm]	D [mm]	L [cm]	D [mm]	L [cm]	D [mm]	L [cm]	D [mm]	L [cm]	D [mm]
0	1,63	0	1,08	0	1,31	0	1,67	0	1,70	0	1,71	0	1,66
25	1,74	25	1,30	25	1,43	25	1,66	25	1,23	25	1,68	25	1,85
50	1,49	50	1,81	50	1,73	50	1,89	50	1,22	50	1,95	50	1,91
75	1,72	75	1,93	75	1,89	75	1,90	75	1,44	75	2,20	75	1,87
100	1,47	100	1,86	100	1,54	100	1,74	100	1,69	100	2,13	100	1,64
125	1,45	125	1,74	125	1,81	125	1,75	125	1,42	125	1,73	125	1,43
150	1,77	150	1,91	150	1,97	150	1,82	150	1,53	150	1,83	150	1,77
175	1,76	175	1,88	175	1,64	175	1,70	175	1,78	175	1,78	175	1,92
200	1,85	200	1,75	200	1,49	200	1,40	200	1,71	200	1,91	200	1,88
225	1,69	225	1,68	225	1,48	225	1,80	225	1,49	225	1,81	225	1,87
250	1,44	250	1,68	250	1,75	250	1,98	250	1,60	250	2,01	250	1,70
275	1,40	275	2,10	275	1,89	275	1,82	275	1,38	275	1,94	275	1,49
300	1,40	300	1,77	300	1,63	300	1,96	300	1,41	300	1,96	300	1,34
325	1,60	325	1,57	325	1,63	325	1,90	325	1,57	325	1,79	325	1,75
350	1,81	350	1,50	350	1,66	350	1,82	350	1,54	350	1,50	350	1,79
375	1,73	375	1,85	375	1,70	375	1,55	375	1,59	375	1,55	375	1,93
400	1,74	400	1,76	400	1,35	400	1,47	400	1,56	400	1,84	400	1,61
425	1,77	425	1,90	425	1,35	425	1,45	425	1,77	425	1,75	425	1,79
450	1,90	450	1,59	450	1,57	450	1,51	450	1,83	450	1,66	450	1,74
475	1,82	475	1,47	475	1,68	475	1,89	475	1,76	475	1,82	475	1,54
500	1,93	500	1,48	500	1,79	500	1,98	500	1,48	500	1,74	500	1,48
515	1,36	525	1,94	525	1,84	525	1,59	525	1,60	525	1,53	525	1,29
		550	1,89	550	1,87	550	1,70	550	1,82	550	1,68	550	1,24
		575	2,10	575	1,55	575	1,80	575	1,87	575	1,84		
		600	2,07	600	1,79	600	1,67	600	1,90	600	1,76		
		625	2,08	625	1,78	625	1,92	625	1,83	625	1,44		
		650	1,57	650	1,70	650	1,78	650	1,42	650	1,27		
		675	1,50	675	1,68	675	1,63	661	1,42	675	1,56		
		700	1,58	700	1,76	700	1,52			700	1,57		
		725	1,46	725	1,75	710	1,34						
		741	1,33	750	1,54								
				775	1,62								
				800	1,78								
				825	1,92								
				845	1,40								

Tramo 8		Tramo 9		Tramo 10		Tramo 11		Tramo 12		Tramo 13		Tramo 14	
L [cm]	D [mm]	L [cm]	D [mm]	L [cm]	D [mm]	L [cm]	D [mm]	L [cm]	D [mm]	L [cm]	D [mm]	L [cm]	D [mm]
0	1,24	0	1,61	0	1,60	0	1,25	0	1,31	0	1,85	0	1,95
25	1,41	25	1,64	25	1,62	25	1,58	25	1,96	25	1,67	25	1,75
50	1,48	50	1,77	50	1,92	50	1,51	50	1,87	50	1,87	50	1,79
75	1,46	75	1,93	75	1,70	75	1,66	75	1,75	75	1,82	75	1,63
100	1,33	100	1,86	100	1,65	100	1,78	100	1,56	100	1,60	100	1,77
125	1,65	125	1,83	125	1,90	125	1,80	125	1,80	125	1,45	125	1,55
150	1,60	145	1,85	150	1,90	150	1,86	150	1,88	150	1,38	150	1,20
175	1,53			175	1,82	175	1,73	175	1,70	175	1,76	175	1,20
200	1,95			200	1,72	200	1,71	200	1,68	200	1,82	200	1,68
225	1,92					225	1,85	225	1,91	225	1,65		
250	1,62					250	1,88	250	1,88	250	2,05		
275	1,65					275	1,83	275	1,76	275	1,98		
300	1,60					288	1,77	300	1,72	300	1,77		
325	1,61							325	1,85	325	1,73		
350	1,47							350	1,65	350	1,75		
375	1,42							375	1,47	375	1,92		
400	1,25							400	1,44	400	1,80		
425	1,27							425	1,82	425	1,62		
450	1,57							450	1,64	450	1,60		
475	1,58							475	1,84	475	1,78		
500	1,78							500	1,81	500	1,62		
525	1,48							525	1,46	525	1,55		
550	1,34							550	1,80	550	1,30		
575	1,43							575	1,81	575	1,47		
600	1,58							600	1,52	600	1,72		
625	1,48							625	1,27	625	1,52		
650	1,59							650	1,61	650	1,81		
675	1,73							675	1,64	675	1,75		
700	1,46							700	1,59	700	1,97		
725	1,44							725	1,76	725	1,82		
750	1,49							750	1,92	750	1,63		
775	1,81							775	1,86	775	1,60		
800	1,55							800	1,67	800	1,53		
825	1,35							825	1,51	825	1,87		
850	1,75									850	2,08		
875	1,99									875	2,02		
900	1,84									900	1,95		
925	1,80									925	1,83		
950	1,87									950	1,74		
975	1,63									975	1,57		
1000	1,46									1000	1,41		
1025	1,42									1025	1,65		
1050	1,41												
1075	1,30												
1100	1,35												
1125	1,89												
1150	2,00												
1175	1,85												
1200	1,84												
1225	1,83												
1250	1,81												
1275	1,59												
1300	1,45												
1325	1,55												
1350	1,50												
1375	1,60												
1400	1,78												
1425	1,84												
1450	1,60												
1475	1,70												
1500	1,96												
1525	1,92												
1550	1,75												
1575	1,43												
1600	1,28												
1625	1,34												

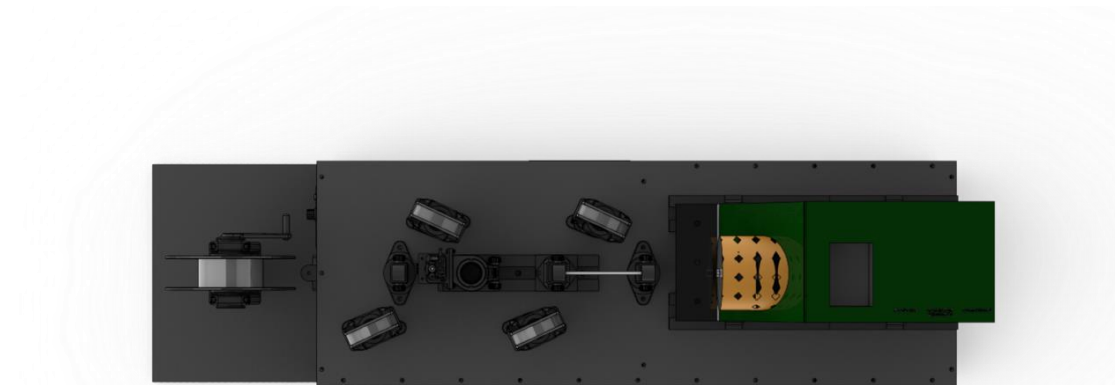
24. ANEXO V: RENDERS CONJUNTO



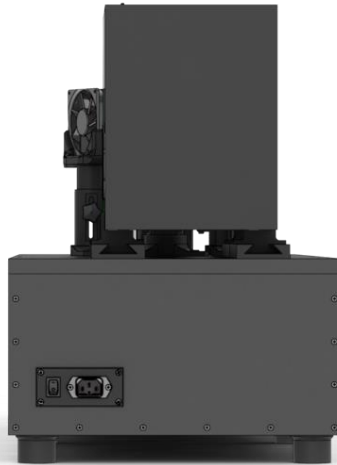
Conjunto extrusor vista derecha.



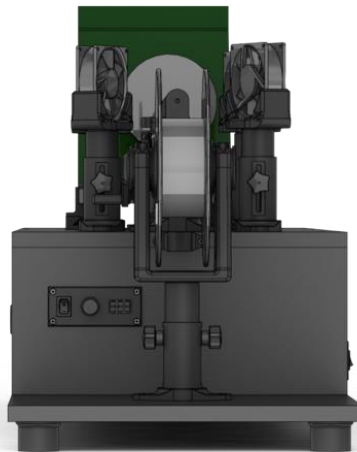
Conjunto extrusor vista izquierda.



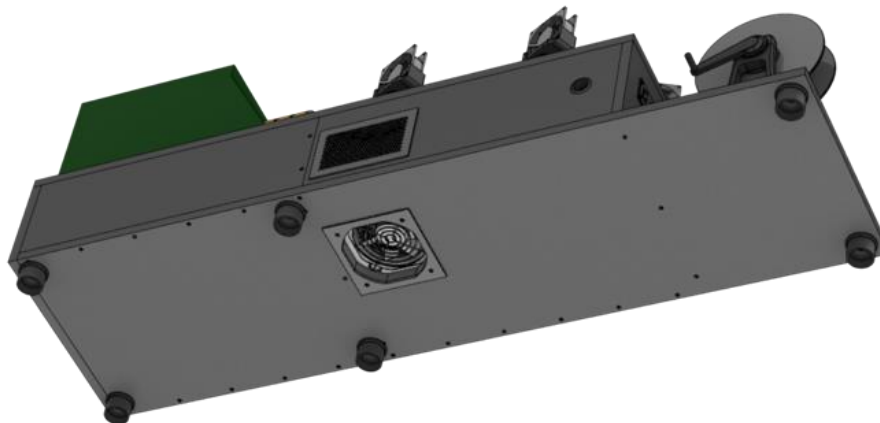
Conjunto extrusor vista planta.



Conjunto extrusor vista trasera.



Conjunto extrusor vista frontal.



Conjunto extrusor vista inferior.

25. ANEXO VI: PRESUPUESTO

25.1 PRESUPUESTO DE IMPRESIÓN 3D

Ud.	Descripción	Precio (€)	Total (€)
Acople sistema extrusor motorizado			
1	Base guía	24,48	24,48
1	Guía	15,16	15,16
1	Base al suelo	14,72	14,72
1	Eje interior abrazadera	18,68	18,68
1	Eje exterior abrazadera	18,8	18,8
1	Adaptador motor NEMA	12,79	12,79
Sistema raíles extrusora			
2	Base guía 20 cm	22,73	45,46
2	Base guía 25 cm	25,72	51,44
4	Guía soportes extrusora	13,16	52,64
4	Soporte descartado	13,23	52,92
Soporte exterior			
2	Base al suelo soporte exterior	15,34	30,68
2	Bloque interior soporte exterior	16,73	33,46
2	Bloque exterior soporte exterior	15,37	30,74
Soporte interior			
1	Guía soporte	15,35	15,35
1	Base al suelo soporte interior	12,92	12,92
1	Bloque interior soporte interior	15,85	15,85
1	Bloque exterior soporte interior	15,37	15,37
1	Pieza guía final	12,3	12,3
1	Marco motor	12,52	12,52
1	Placa motor	19,3	19,3
Probetas			
14	Probeta tracción PLA industrial	12,01	168,14
18	Probeta compresión PLA industrial	12,47	224,46
18	Probeta flexión PLA industrial	11,14	200,52
6	Probeta tracción PLA reciclado	11,37	68,22
6	Probeta compresión PLA reciclado	12,23	73,38
6	Probeta flexión PLA reciclado	11,06	66,36
TOTAL			1306,66

25.2 PRESUPUESTO DE MATERIAL

Ud.	Descripción	Precio (€)	Total (€)
1	Sistema extrusor MK10	2,86	2,86
1	Motor DC 12 V 2 rpm	6,47	6,47
1	Motor DC 12 V 6 rpm	6,31	6,31
1	Motor DC 12 V 12 rpm	6,31	6,31
1	Motor DC 12 V 20 rpm	6,31	6,31
1	Controlador de velocidad PWM	7,88	7,88
1	Soporte motor	3,08	3,08
1	Motor NEMA 17, Arduino uno, Driver A4988, Firmware	31,36	31,36
TOTAL			70,58

25.3 PRESUPUESTO TOTAL

Presupuesto de impresión 3D	1306,66 €
Presupuesto de material	70,58 €
PRESUPUESTO TOTAL	1377,24 €

Cabe destacar que el presupuesto de material hace referencia al precio de compra de cada uno de los productos adquiridos en la realización del proyecto. Con respecto al presupuesto de impresión 3D, se realiza una estimación del coste de cada una de las piezas impresas en base a distintos factores: longitud del filamento requerido, tiempo de impresión, amortización de la impresora, consumo eléctrico y coste operativo.

26. ANEXO VII: PLANOS

ÍNDICE DE PLANOS

1. CONJUNTO EXTRUSOR.

1.01.00. SUBCONJUNTO ACOPLA SISTEMA EXTRUSOR MOTORIZADO

- 1.01.01 Base guía
- 1.01.02 Guía
- 1.01.03 Base al suelo
- 1.01.04 Eje interior abrazadera
- 1.01.05 Eje exterior abrazadera
- 1.01.06 Adaptador motor NEMA
- 1.01.07 Soporte motor NEMA

1.02.00 SUBCONJUNTO SISTEMA RAÍLES EXTRUSORA

- 1.02.01 Base guía 20 cm
- 1.02.02 Base guía 25 cm
- 1.02.03 Guía soportes extrusora

1.03.00 SUBCONJUNTO SOPORTE EXTERIOR

- 1.03.01 Base al suelo soporte exterior
- 1.03.02 Bloque exterior soporte exterior
- 1.03.03 Bloque interior soporte exterior

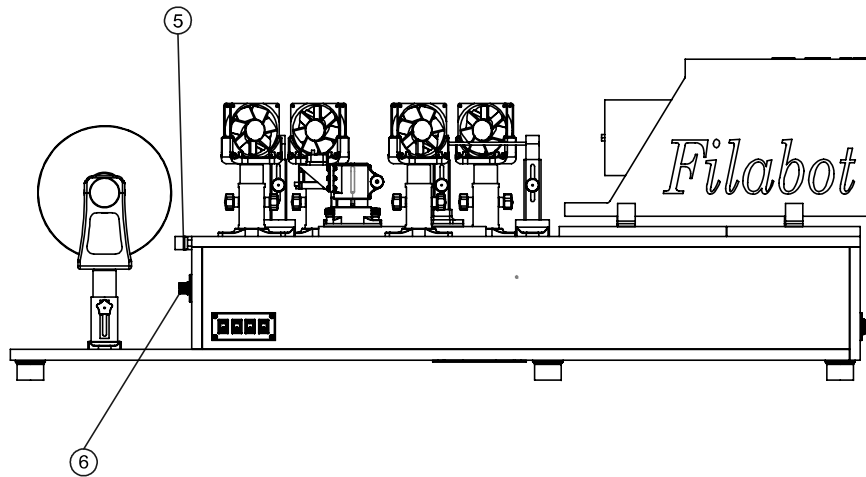
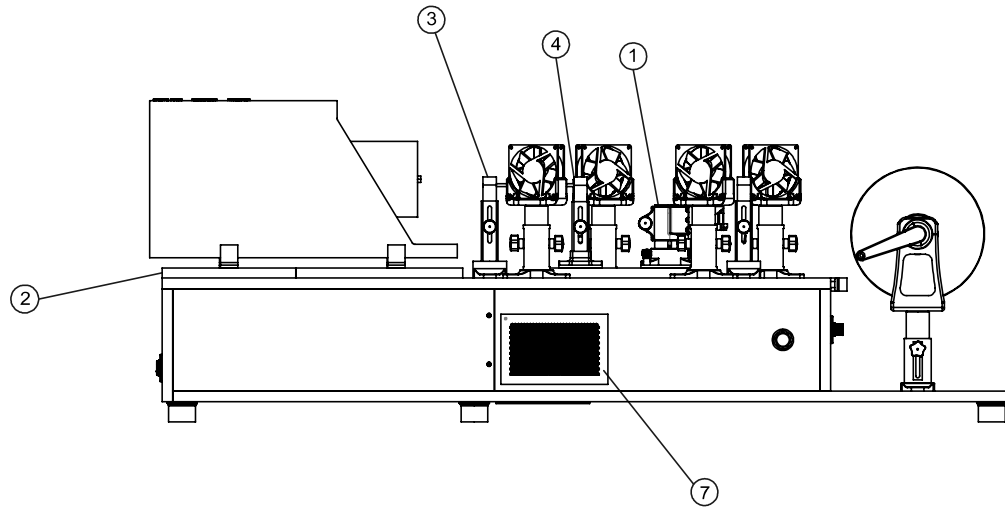
1.04.00 SUBCONJUNTO SOPORTE INTERIOR

- 1.04.01 Guía soporte
- 1.04.02 Base al suelo soporte interior
- 1.04.03 Bloque exterior soporte interior
- 1.04.04 Bloque interior soporte interior

1.05.00 PIEZA GUÍA FINAL

1.06.00 MARCO MOTOR

1.07.00 PLACA MOTOR



1	1	Subconjunto acople sistema extrusor motorizado
2	1	Subconjunto sistema raíles extrusora
3	2	Subconjunto soporte exterior
4	1	Subconjunto soporte interior
5	1	Pieza guía final
6	1	Marco motor
7	1	Placa motor
Marca	Nº pieza	Designación y observaciones

CONJUNTO EXTRUSOR

Autor: Fernando Delgado Ayala

Id. s. normas:
UNE-EN-DIN



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

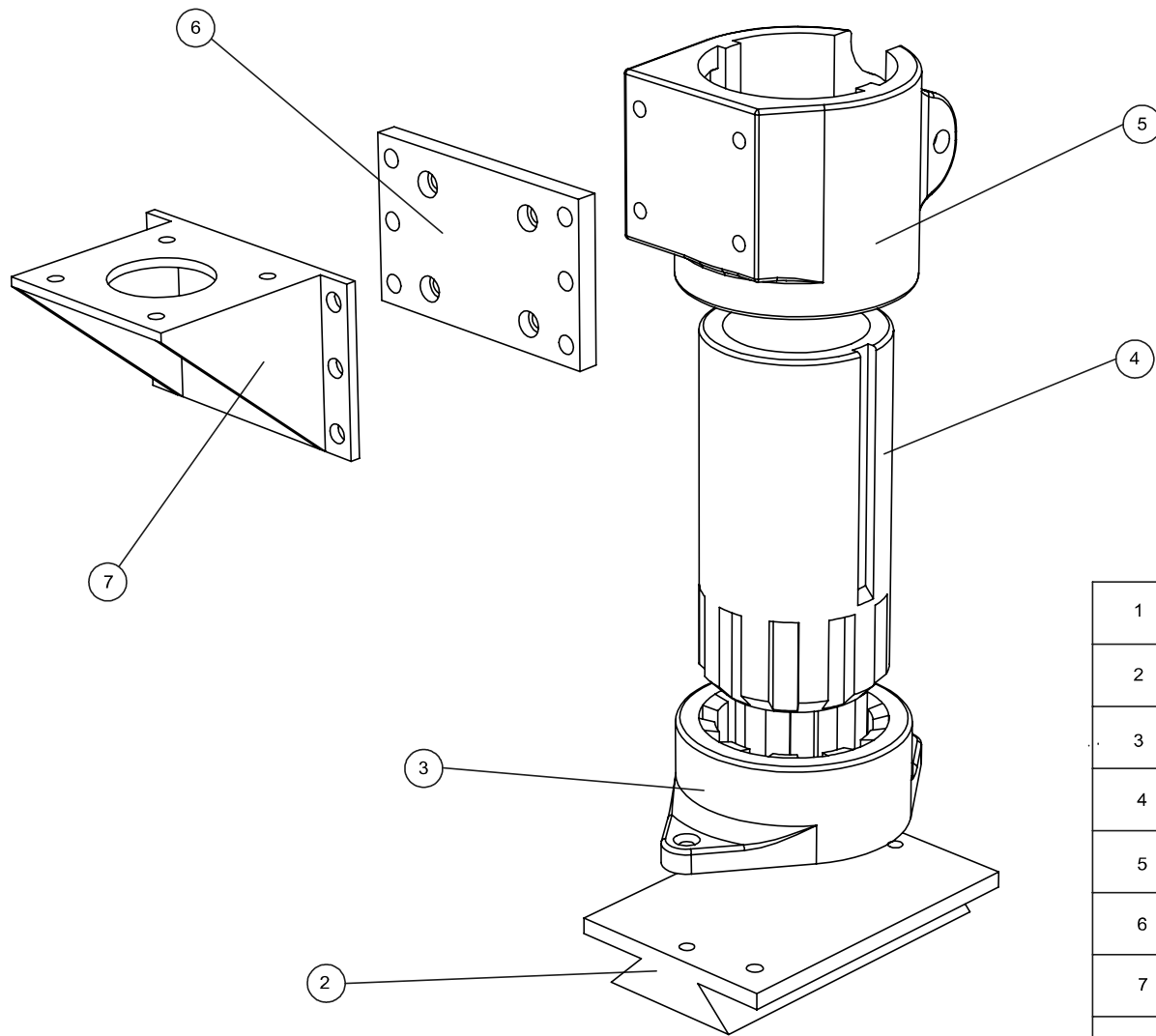
Grado Ingeniería Mecánica
Universidad de La Laguna

Julio 2021

ESCALA:
1:8

CONJUNTO EXTRUSOR

Nº PLANO:
1



1	1	Base guía	PLA
2	1	Guía	PLA
3	1	Base al suelo	PLA
4	1	Eje interior abrazadera	PLA
5	1	Eje exterior abrazadera	PLA
6	1	Adaptador motor NEMA	PLA
7	1	Soporte motor NEMA	PLA
Marca	Nº pieza	Designación y observaciones	Material

CONJUNTO EXTRUSOR

Autor: Fernando Delgado Ayala

Id. s. normas:
UNE-EN-DIN



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

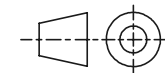
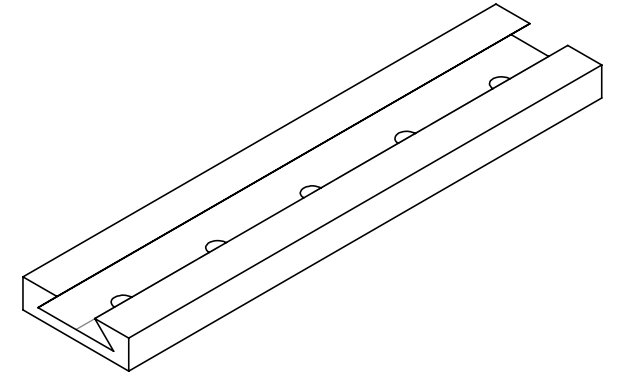
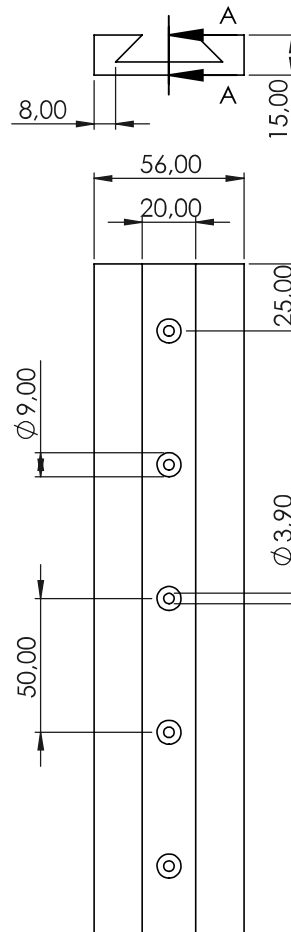
Grado Ingeniería Mecánica
Universidad de La Laguna


Julio 2021

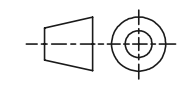
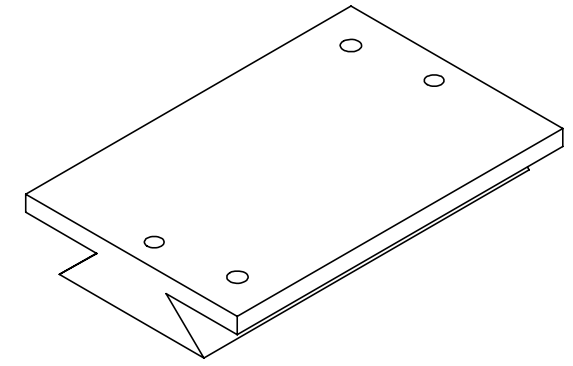
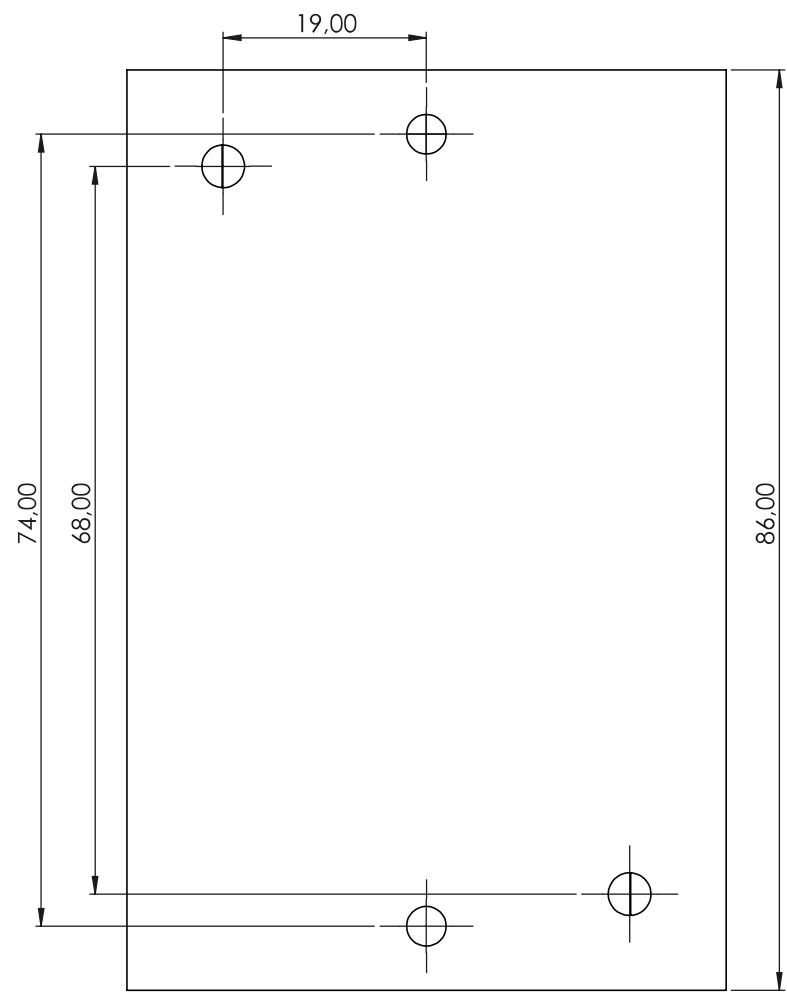
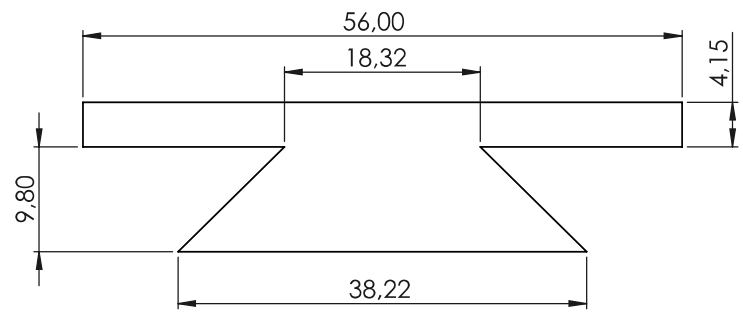
ESCALA:
1:1


Subconjunto acople sistema extrusor motorizado

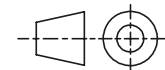
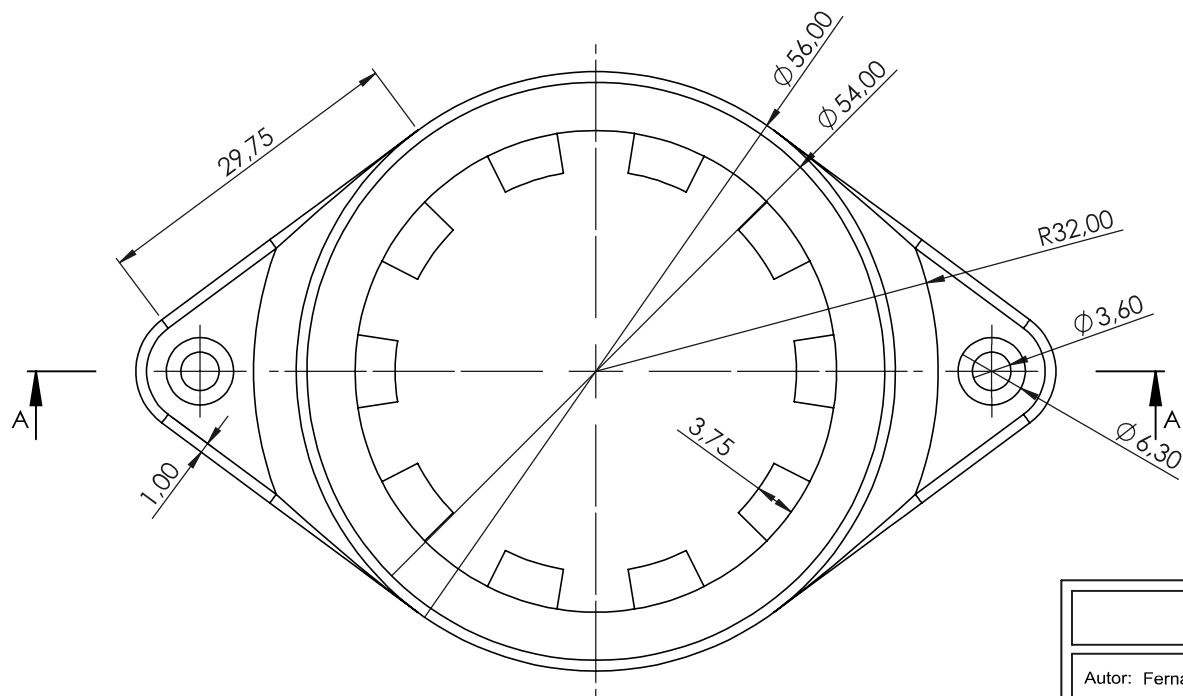
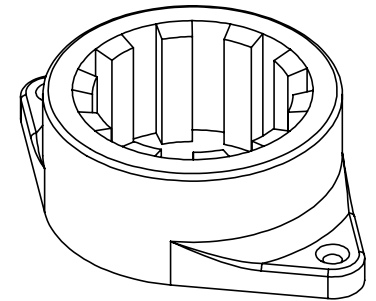
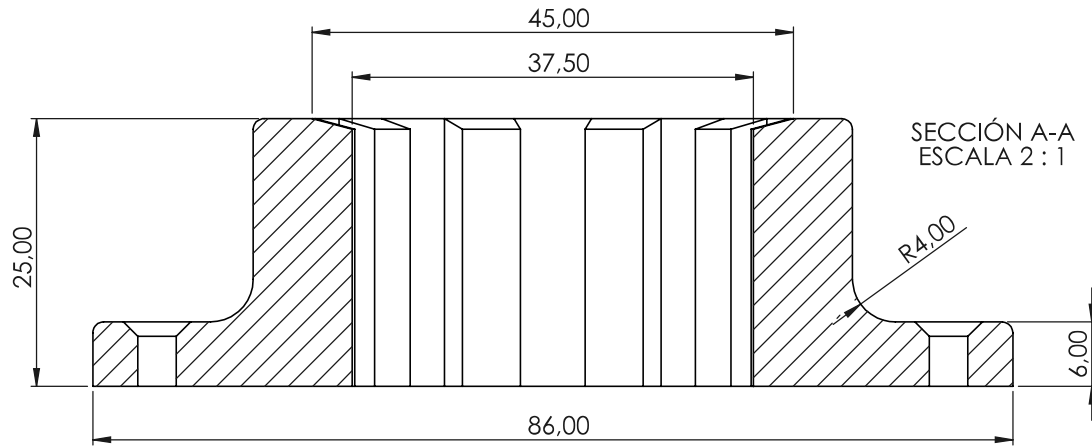
Nº PLANO:
1.01.00




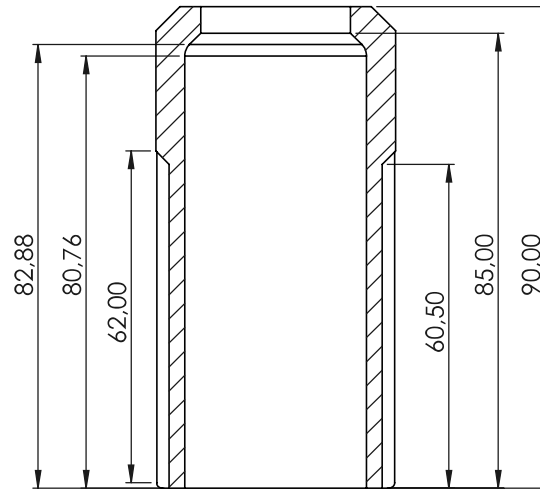
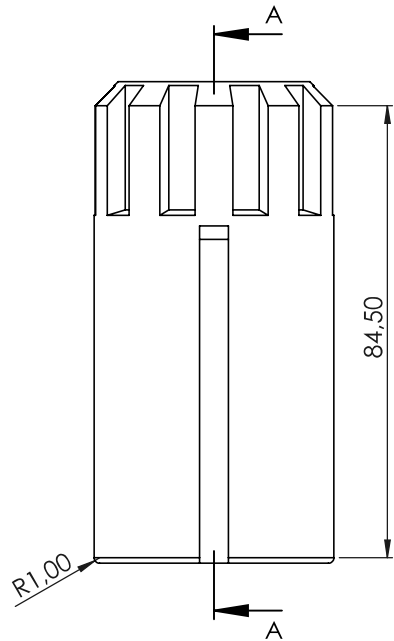
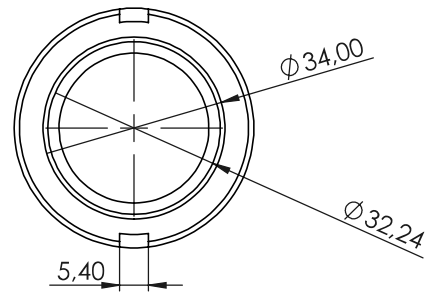
CONJUNTO EXTRUSOR			
Autor: Fernando Delgado Ayala	Id. s. normas: UNE-EN-DIN	 Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Fecha: Julio 2021	Subconjunto sistema raíles extrusora Marca 1		Nº PLANO: 1.01.01
ESCALA: 1:2			



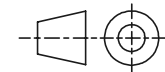
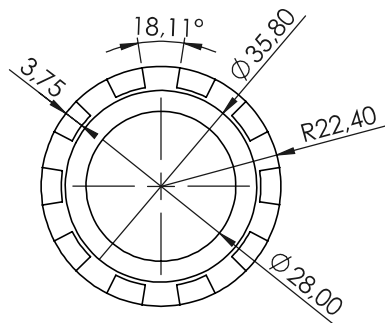
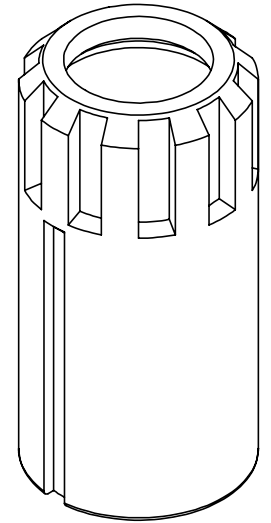
CONJUNTO EXTRUSOR			
Autor: Fernando Delgado Ayala	Id. s. normas: UNE-EN-DIN	 Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Fecha: Julio 2021	Subconjunto acople sistema extrusor motorizado Marca 2		Nº PLANO: 1.01.02
ESCALA: 2:1			




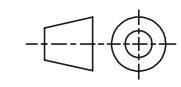
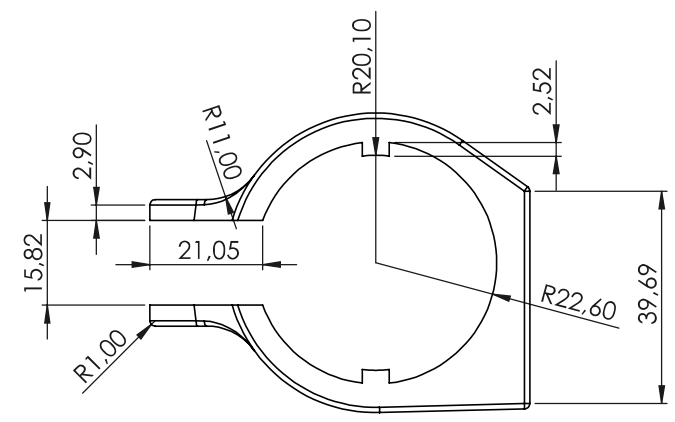
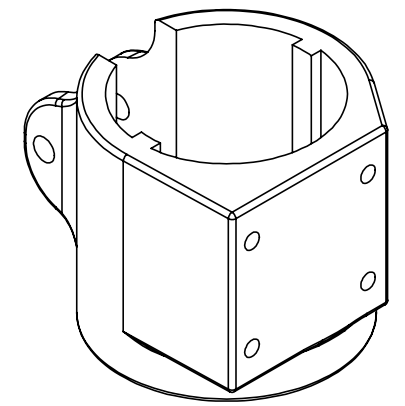
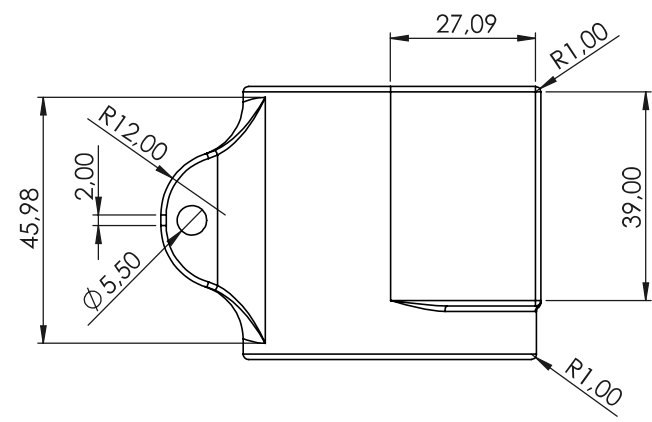
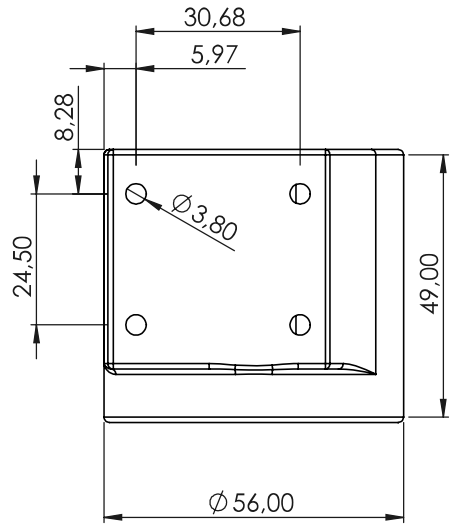
CONJUNTO EXTRUSOR			
Autor: Fernando Delgado Ayala	Id. s. normas: UNE-EN-DIN	 Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Fecha: Julio 2021	Subconjunto acople sistema extrusor motorizado Marca 3		Nº PLANO: 1.01.03
ESCALA: 2:1			




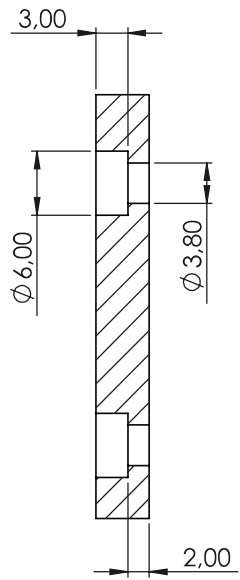
SECCIÓN A-A



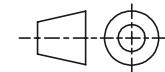
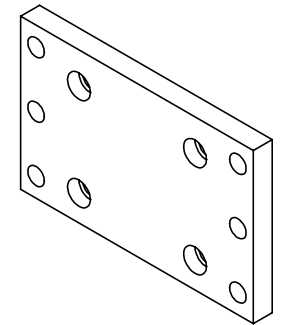
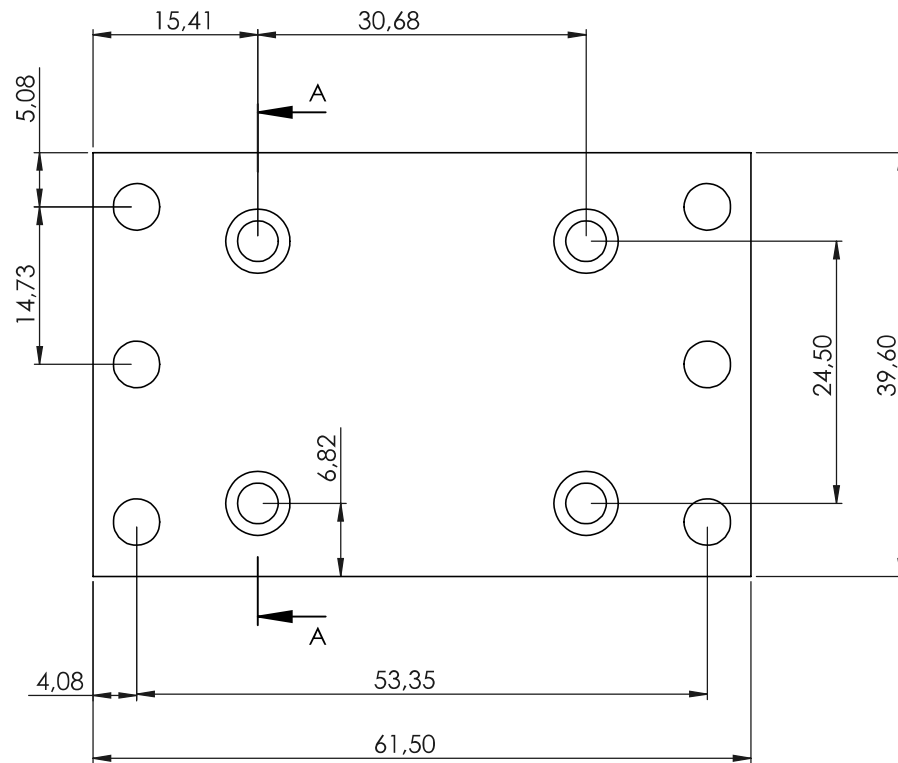
CONJUNTO EXTRUSOR			
Autor: Fernando Delgado Ayala	Id. s. normas: UNE-EN-DIN	 Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Fecha: Julio 2021	ESCALA: 1:1		Nº PLANO: 1.01.04
Subconjunto acople sistema extrusor motorizado Marca 4			




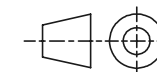
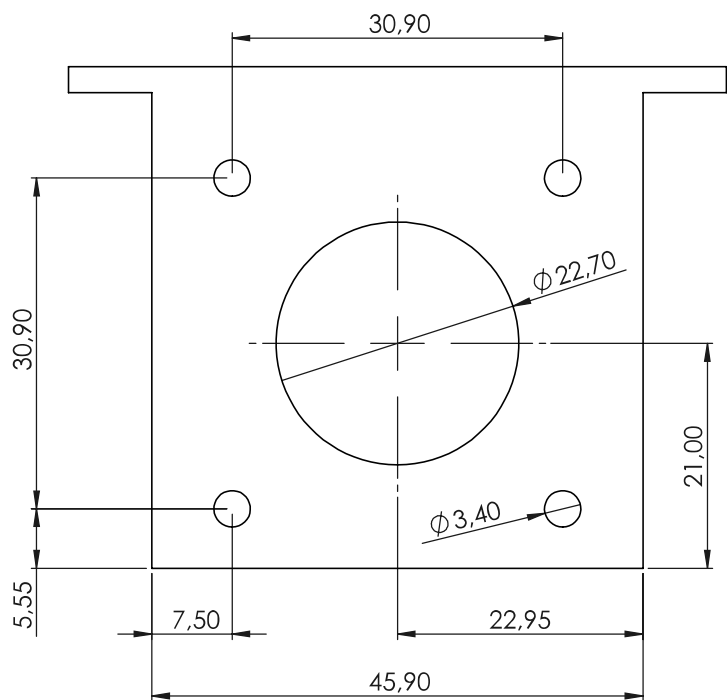
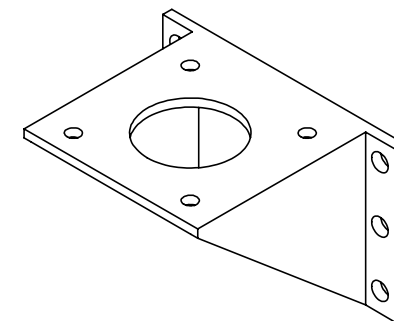
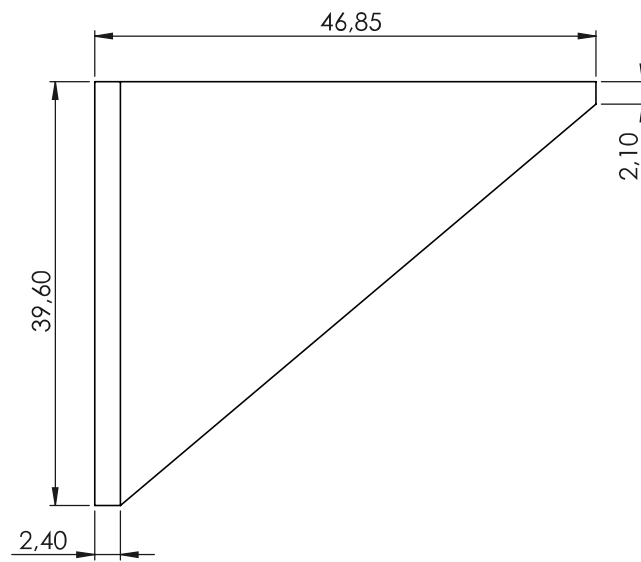
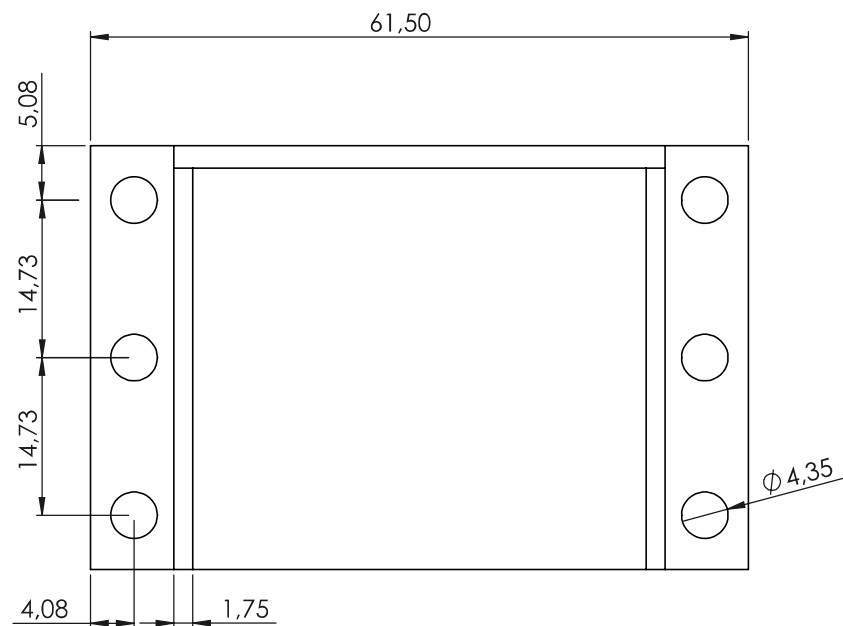
CONJUNTO EXTRUSOR			
Autor: Fernando Delgado Ayala	Id. s. normas: UNE-EN-DIN	 Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Fecha: Julio 2021	Subconjunto acople sistema extrusor motorizado Marca 5		Nº PLANO: 1.01.05
ESCALA: 1:1			




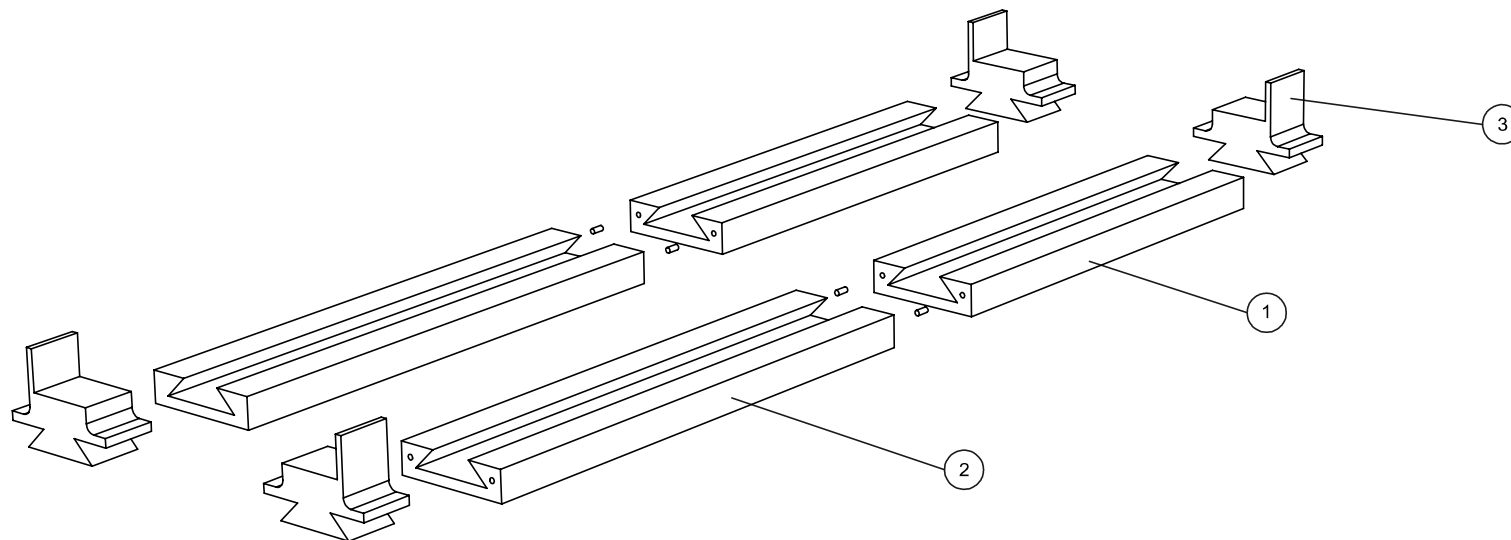
SECCIÓN A-A
ESCALA 2 : 1



CONJUNTO EXTRUSOR			
Autor: Fernando Delgado Ayala	Id. s. normas: UNE-EN-DIN	 Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Fecha: Julio 2021	Subconjunto acople sistema extrusor motorizado Marca 6		Nº PLANO: 1.01.06
ESCALA: 2:1			



CONJUNTO EXTRUSOR			
Autor: Fernando Delgado Ayala	Id. s. normas: UNE-EN-DIN	 Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Fecha: Julio 2021	ESCALA: 2:1		Nº PLANO: 1.01.07
Subconjunto acople sistema extrusor motorizado Marca 7			



1	2	Base guía 20 cm	PLA
2	2	Base guía 25 cm	PLA
3	4	Guía soporte extrusora	PLA
Marca	Nº pieza	Designación y observaciones	Material

CONJUNTO EXTRUSOR

Autor: Fernando Delgado Ayala

Id. s. normas:
UNE-EN-DIN



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

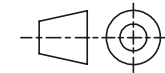
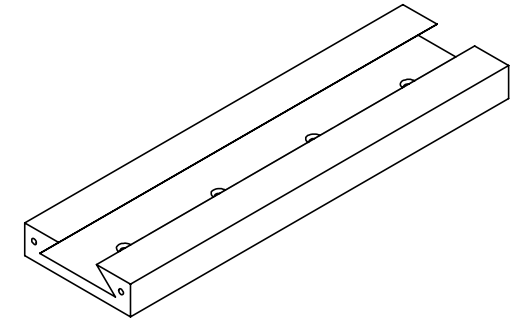
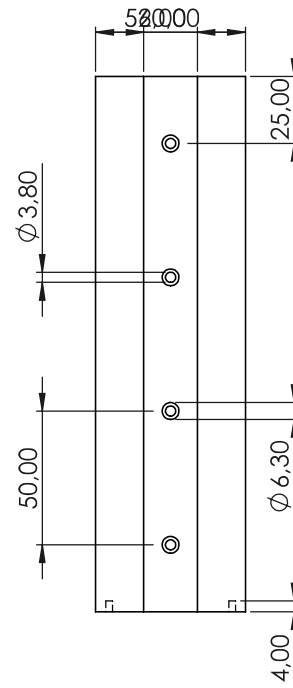
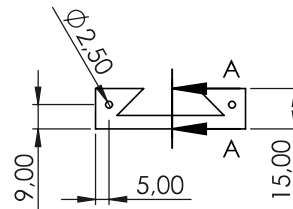
Grado Ingeniería Mecánica
Universidad de La Laguna


Julio 2021

ESCALA:
1:2

Subconjunto sistema raíles extrusora

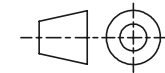
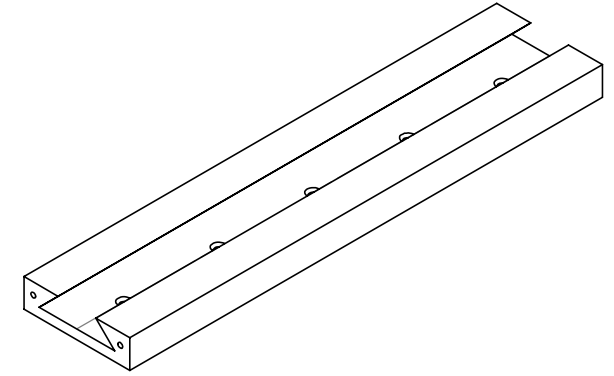
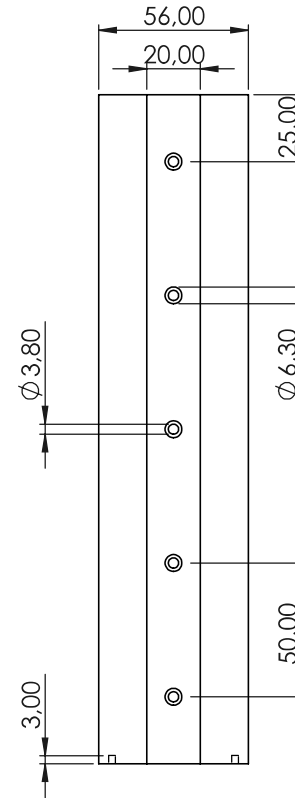
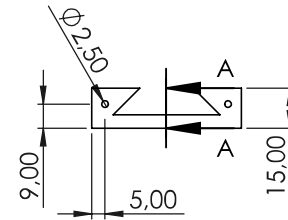
Nº PLANO:
1.02.00



CONJUNTO EXTRUSOR			
Autor: Fernando Delgado Ayala	Id. s. normas: UNE-EN-DIN	 Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Fecha: Julio 2021	Subconjunto sistema raíles extrusora Marca 1		Nº PLANO: 1.02.01
ESCALA: 1:2			



SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 2



CONJUNTO EXTRUSOR

Autor: Fernando Delgado Ayala

Id. s. normas:
UNE-EN-DIN



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Grado Ingeniería Mecánica

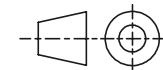
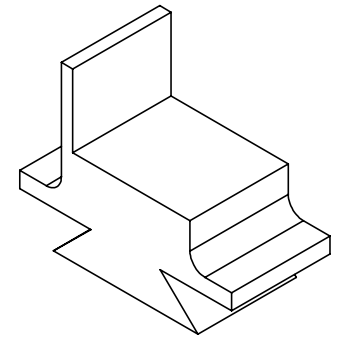
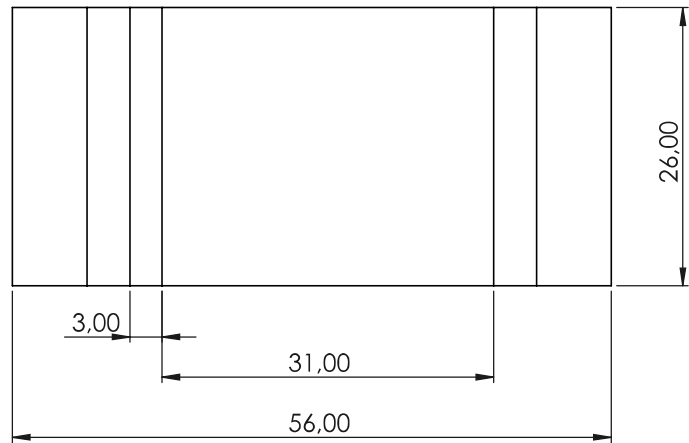
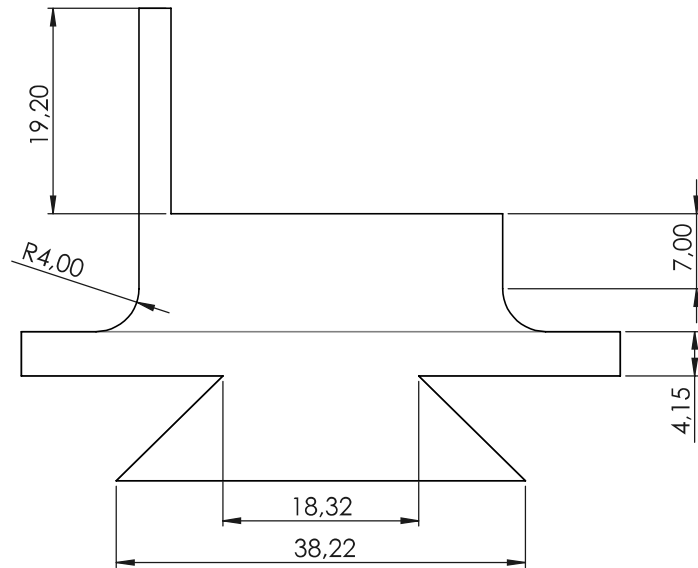
Universidad de La Laguna


Fecha: Julio 2021

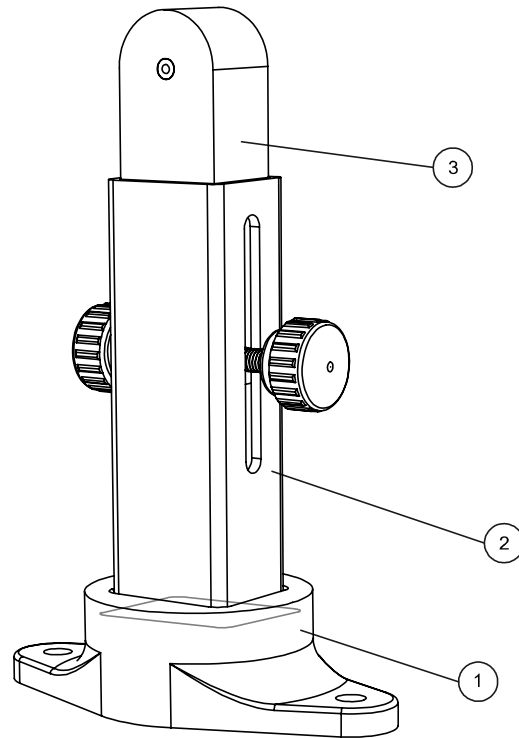
ESCALA:
1:2

Subconjunto sistema raíles extrusora
Marca 2

Nº PLANO:
1.02.02



CONJUNTO EXTRUSOR			
Autor: Fernando Delgado Ayala	Id. s. normas: UNE-EN-DIN	 Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Fecha: Julio 2021	Subconjunto sistema raíles extrusora Marca 3		Nº PLANO: 1.02.03
ESCALA: 2:1			



1	2	Base al suelo soporte exterior	PLA
2	2	Bloque exterior soporte exterior	PLA
3	2	Bloque interior soporte exterior	PLA
Marca	Nº pieza	Designación y observaciones	Material

CONJUNTO EXTRUSOR

Autor: Fernando Delgado Ayala

Id. s. normas:
UNE-EN-DIN



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

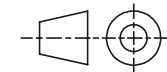
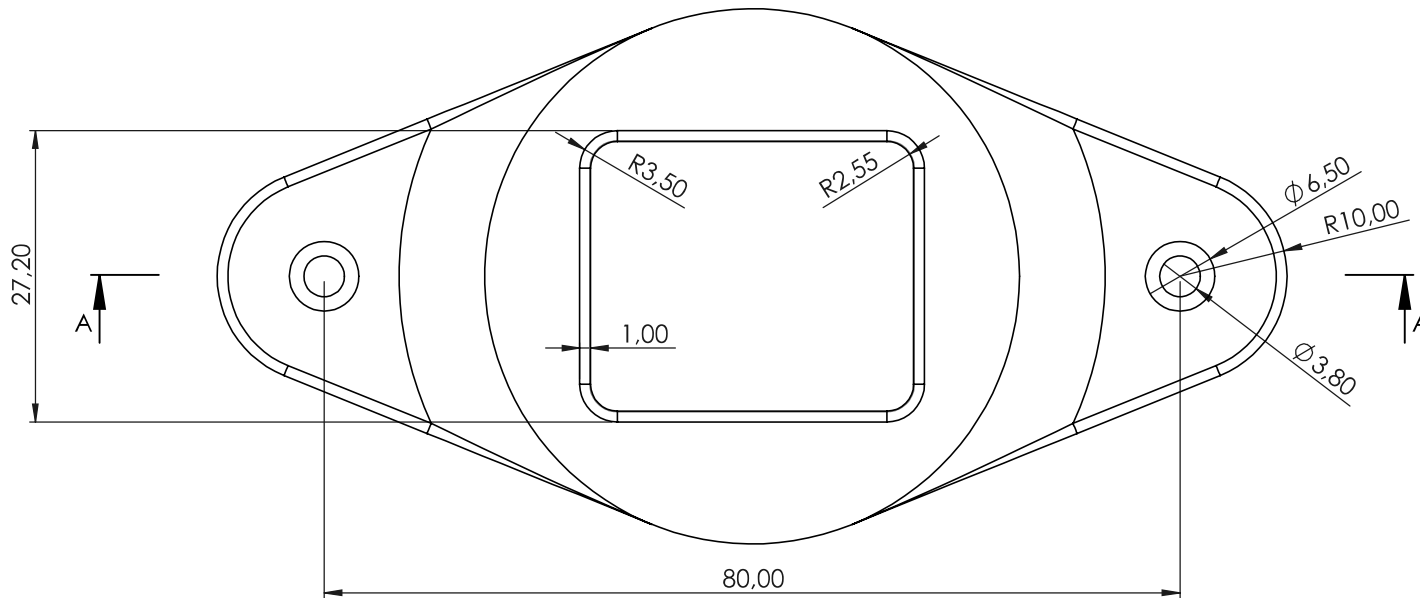
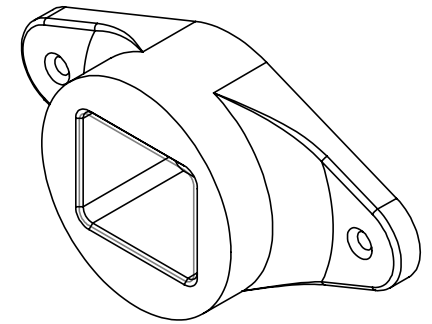
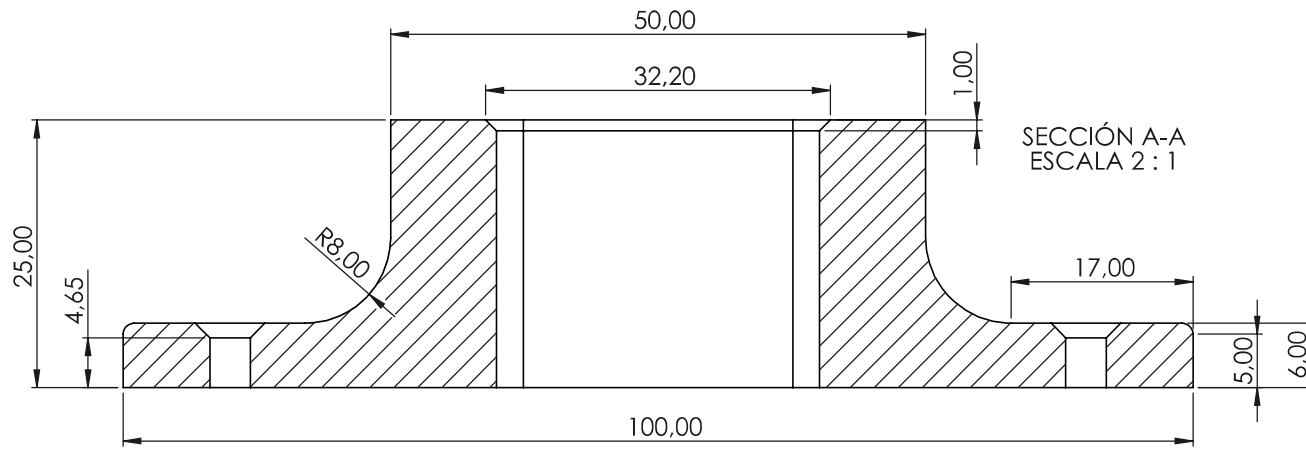
Grado Ingeniería Mecánica
Universidad de La Laguna


Julio 2021

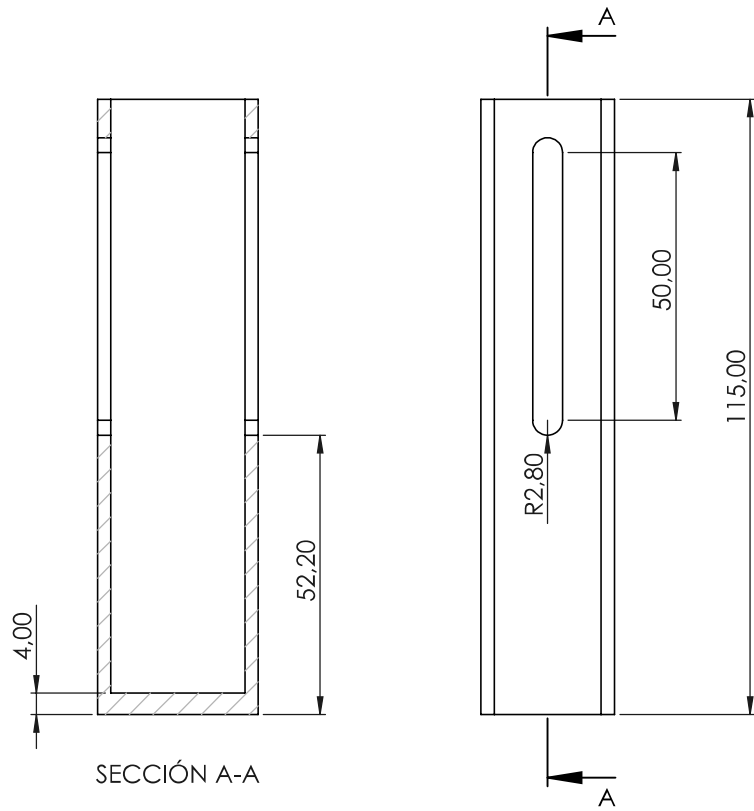
ESCALA:
1:1

Subconjunto soporte exterior

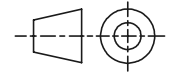
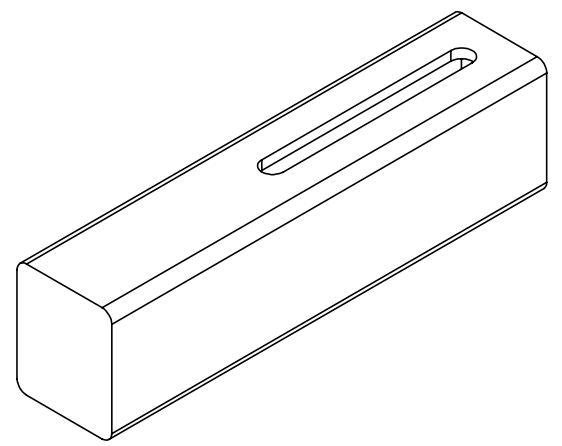
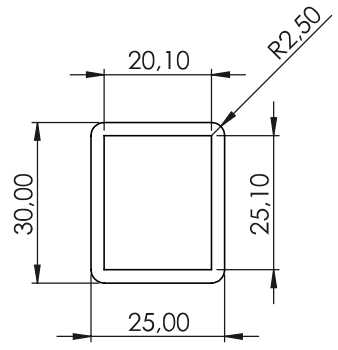
Nº PLANO:
1.03.00




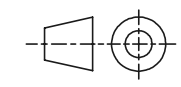
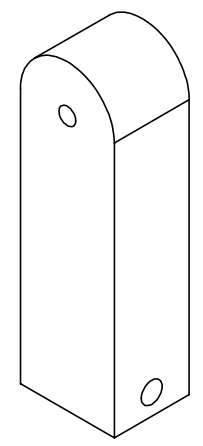
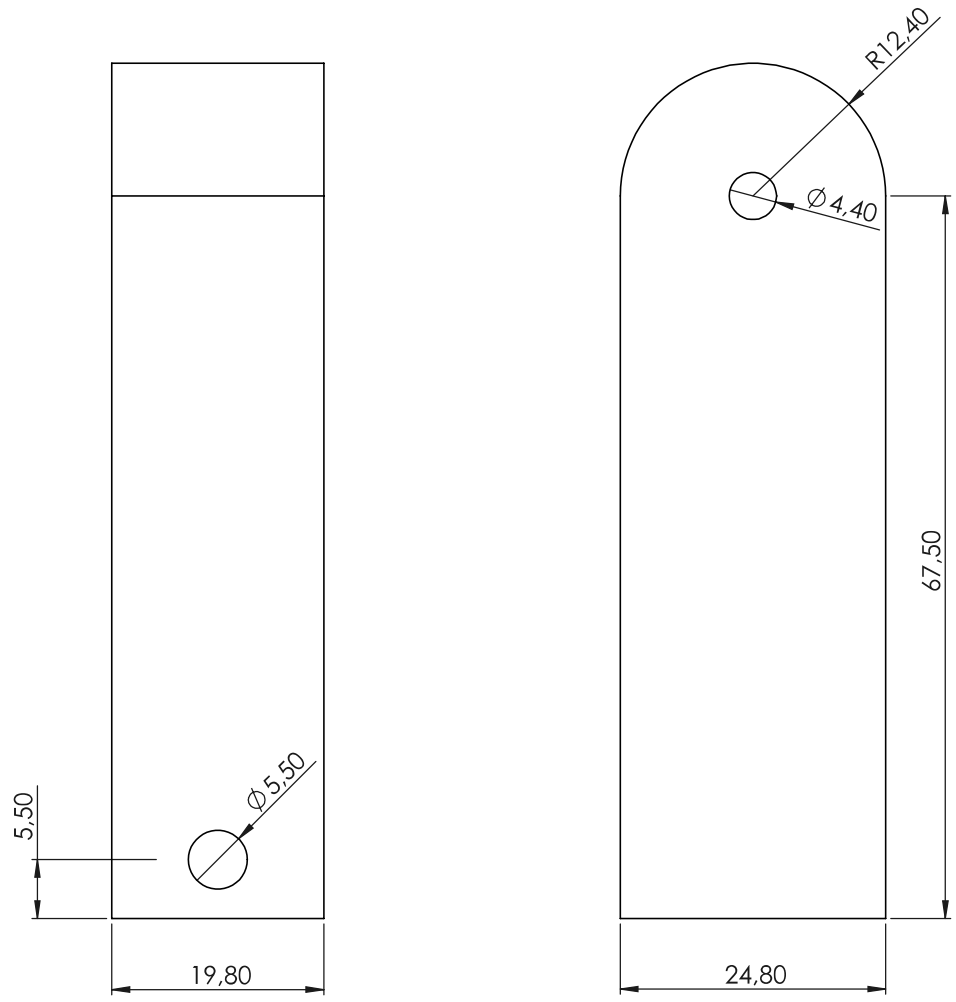
CONJUNTO EXTRUSOR			
Autor: Fernando Delgado Ayala	Id. s. normas: UNE-EN-DIN	 Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Fecha: Julio 2021	Subconjunto soporte exterior Marca 1		Nº PLANO: 1.03.01
ESCALA: 2:1			




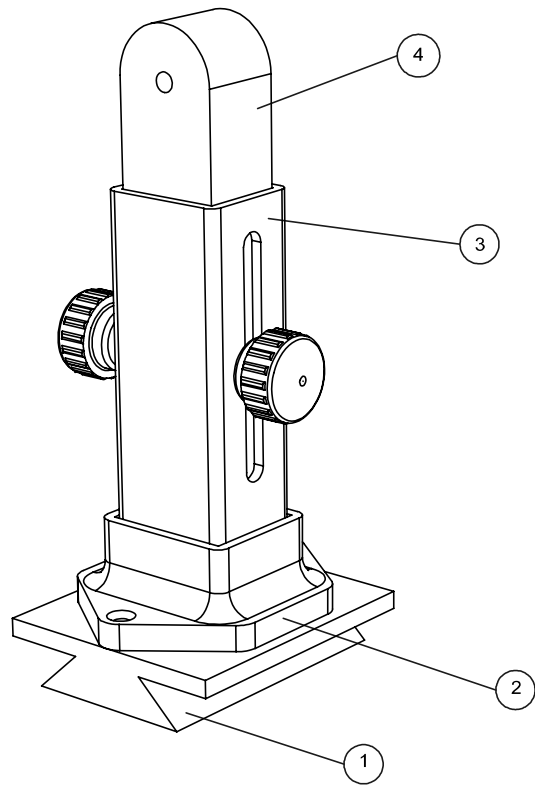
SECCIÓN A-A



CONJUNTO EXTRUSOR			
Autor: Fernando Delgado Ayala	Id. s. normas: UNE-EN-DIN	 Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Fecha: Julio 2021	Subconjunto soporte exterior Marca 2		Nº PLANO: 1.03.02
ESCALA: 1:1			



CONJUNTO EXTRUSOR			
Autor: Fernando Delgado Ayala	Id. s. normas: UNE-EN-DIN	 Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Fecha: Julio 2021	Subconjunto soporte exterior Marca 3		Nº PLANO: 1.03.03
ESCALA: 2:1			



1	1	Guía soporte	PLA
2	1	Base al suelo soporte interior	PLA
3	1	Bloque exterior soporte interior	PLA
4	1	Bloque interior soporte interior	PLA
Marca	Nº pieza	Designación y observaciones	Material

CONJUNTO EXTRUSOR

Autor: Fernando Delgado Ayala

Id. s. normas:
UNE-EN-DIN



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

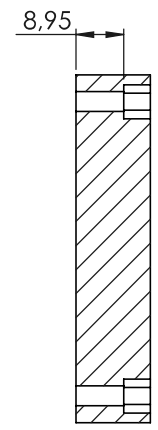
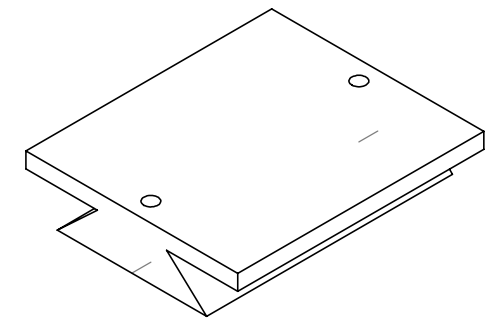
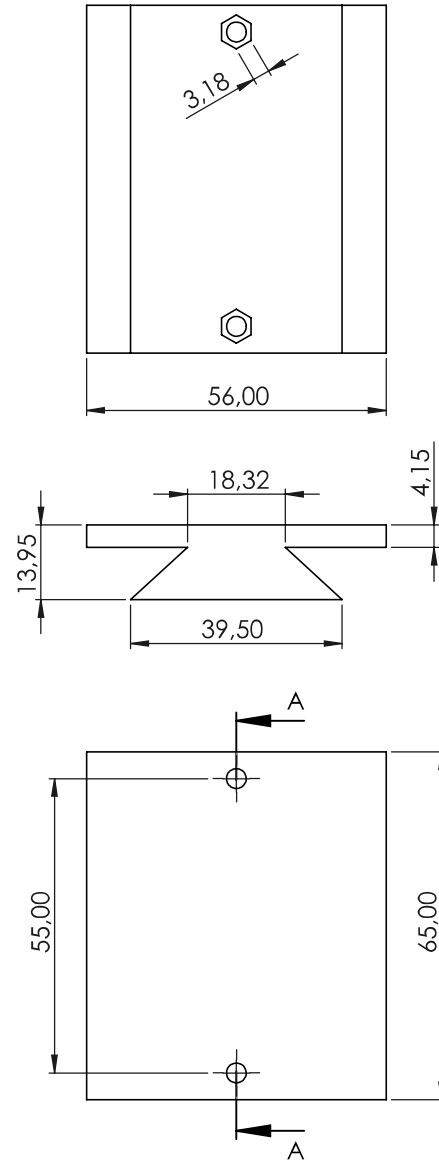
Grado Ingeniería Mecánica
Universidad de La Laguna

Julio 2021

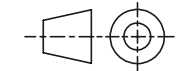
ESCALA:
1:1


Subconjunto soporte interior

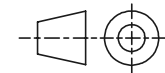
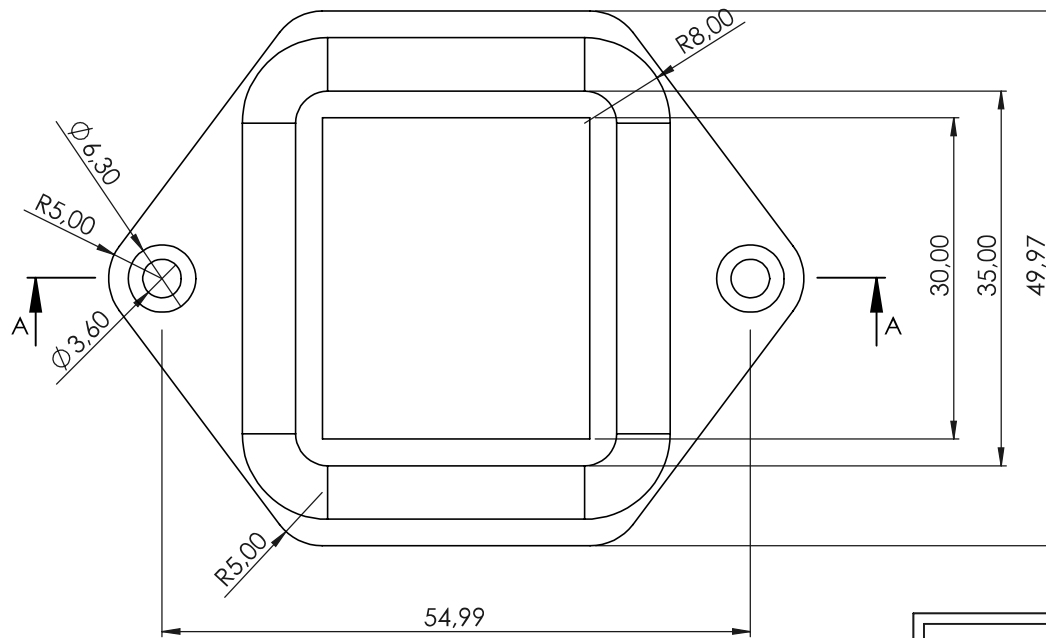
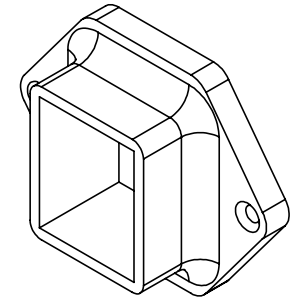
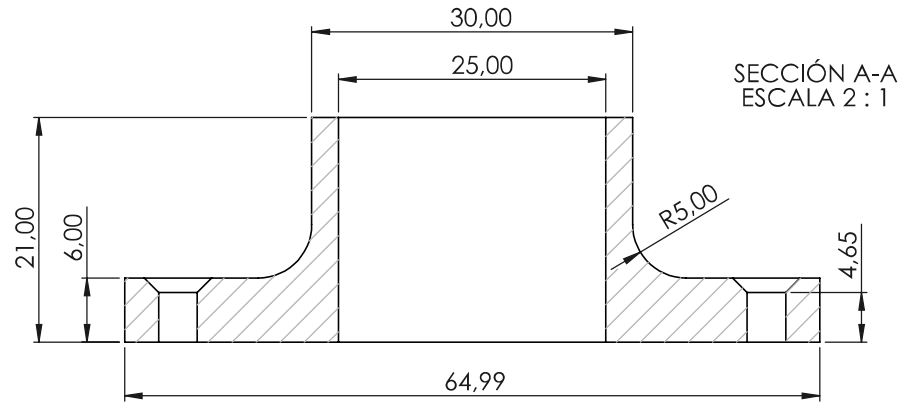
Nº PLANO:
1.04.00




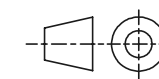
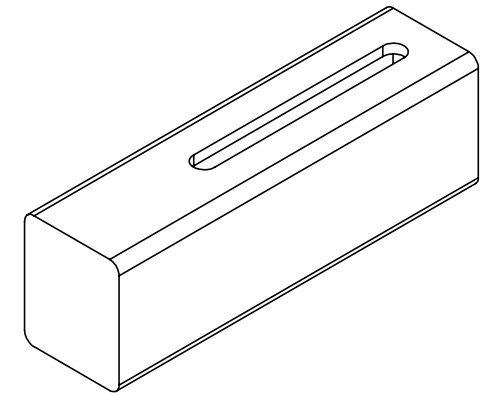
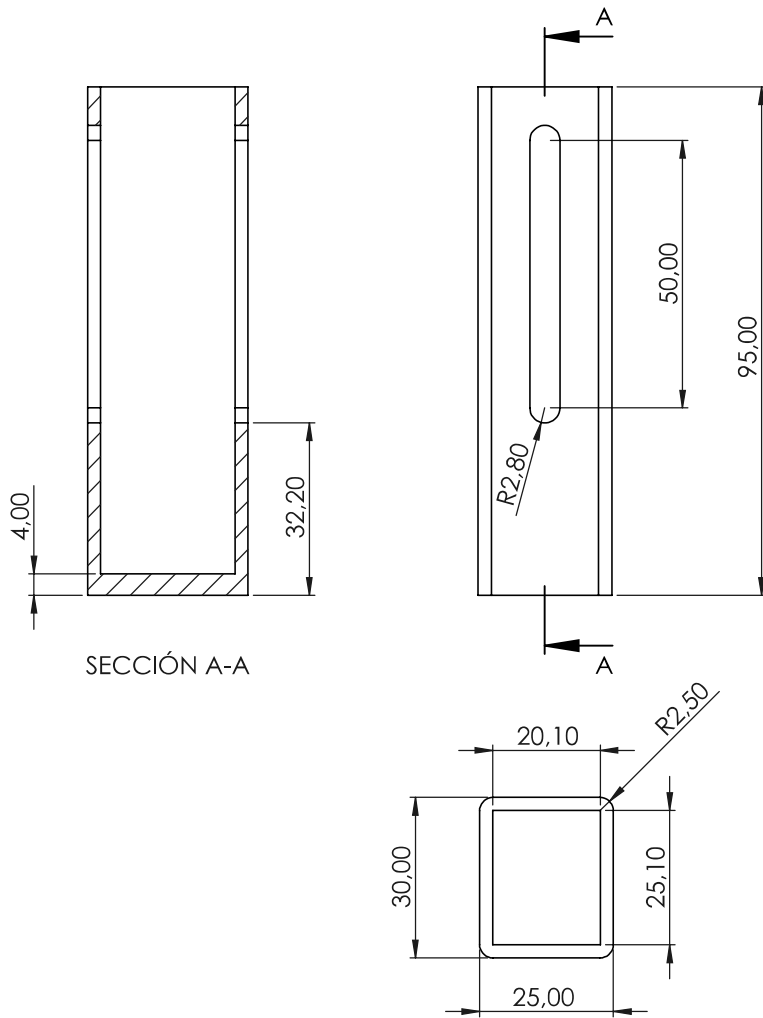
SECCIÓN A-A




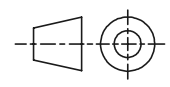
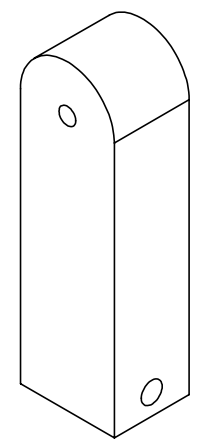
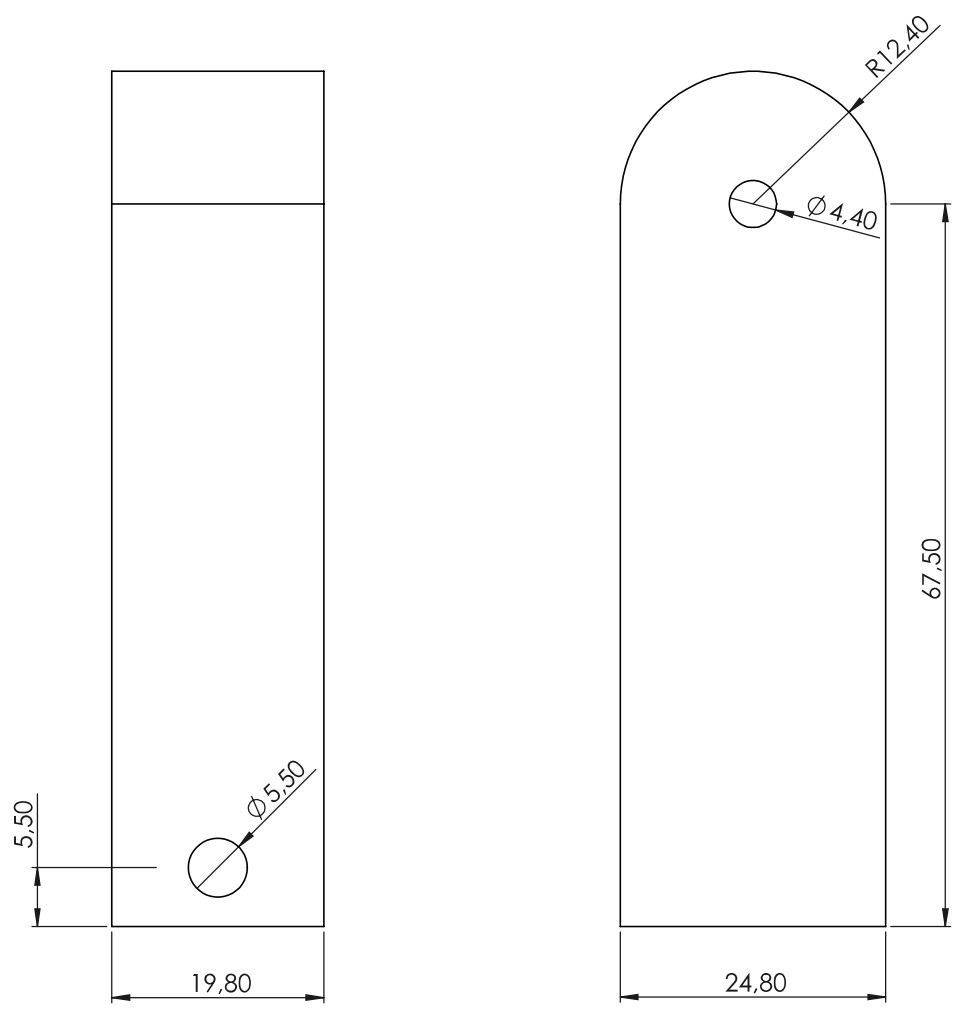
CONJUNTO EXTRUSOR			
Autor: Fernando Delgado Ayala	Id. s. normas: UNE-EN-DIN	 Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Fecha: Julio 2021	Subconjunto soporte interior Marca 1		Nº PLANO: 1.04.01
ESCALA: 1:1			




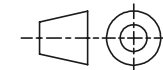
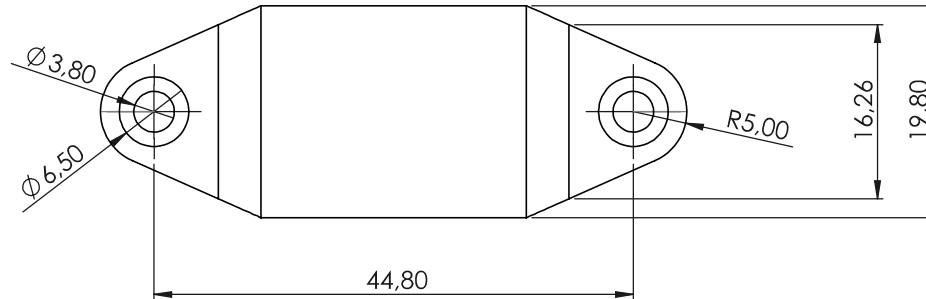
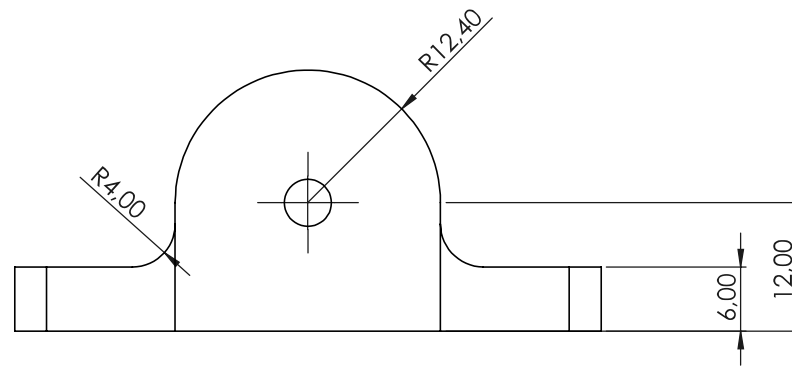
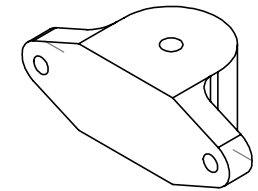
CONJUNTO EXTRUSOR			
Autor: Fernando Delgado Ayala	Id. s. normas: UNE-EN-DIN	 Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Fecha: Julio 2021	Subconjunto soporte interior Marca 2		Nº PLANO: 1.04.02
ESCALA: 2:1			




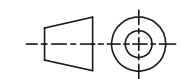
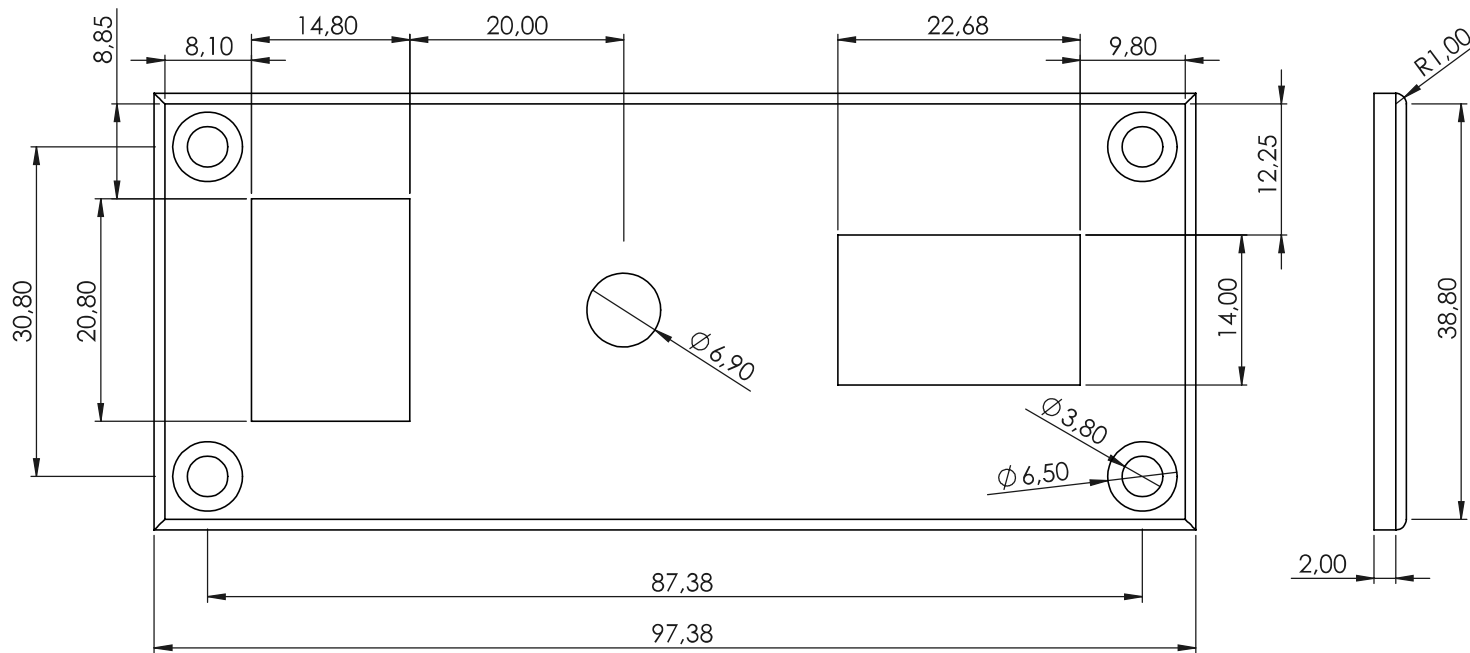
CONJUNTO EXTRUSOR			
Autor: Fernando Delgado Ayala	Id. s. normas: UNE-EN-DIN	 Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Fecha: Julio 2021	Subconjunto soporte interior Marca 3		Nº PLANO: 1.04.03
ESCALA: 1:1			




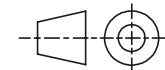
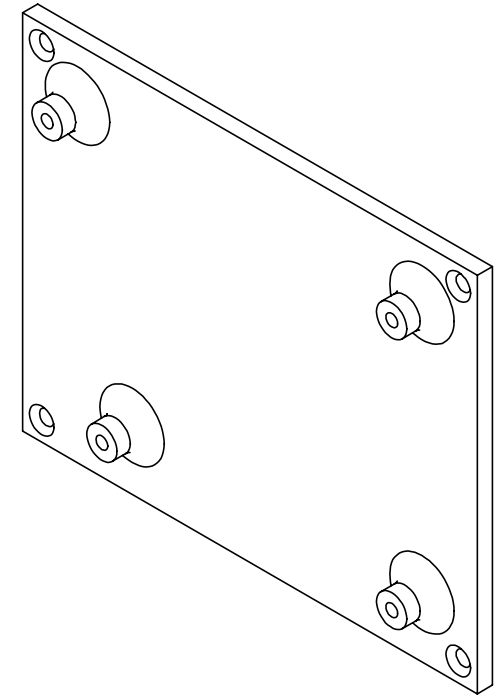
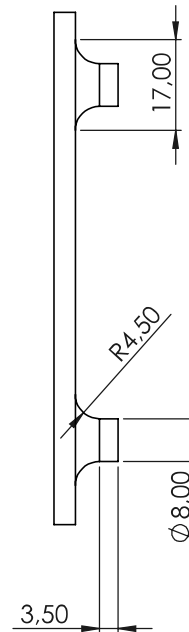
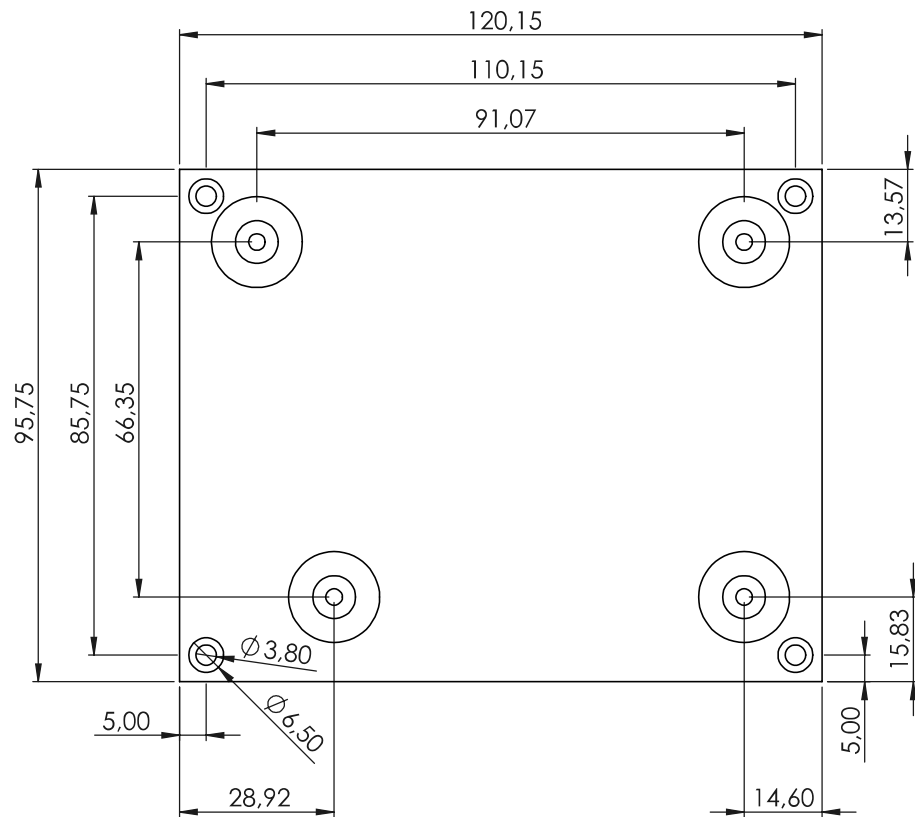
CONJUNTO EXTRUSOR			
Autor: Fernando Delgado Ayala	Id. s. normas: UNE-EN-DIN	 Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Fecha: Julio 2021	Subconjunto soporte interior Marca 4		Nº PLANO: 1.04.04
ESCALA: 2:1			




CONJUNTO EXTRUSOR				
Autor: Fernando Delgado Ayala		Id. s. normas: UNE-EN-DIN	 Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Fecha: Julio 2021				
ESCALA: 2:1	Pieza Guía final		Nº PLANO: 1.05.00	



CONJUNTO EXTRUSOR			
Autor: Fernando Delgado Ayala	Id. s. normas: UNE-EN-DIN	 Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Fecha: Julio 2021	Marco motor		Nº PLANO: 1.06.00
ESCALA: 2:1			



CONJUNTO EXTRUSOR			
Autor: Fernando Delgado Ayala		Id. s. normas: UNE-EN-DIN	 ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
Fecha: Julio 2021			
ESCALA:	Placa motor		Nº PLANO:
1:1			1.07.00