



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento: Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación

Área de Conocimiento: Ingeniería de los Procesos de Fabricación

TRABAJO FIN DE GRADO

**ESTUDIO DE LA HUMEDAD EN PROBETAS DE TRACCIÓN IMPRESAS
MEDIANTE FABRICACIÓN ADITIVA**

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor: Javier Delange Izurrategui

Tutor: Carolina Bermudo Gamboa

Cotutor: Sergio Martín Béjar

MÁLAGA, mayo de 2025





Resumen:

La fabricación aditiva es actualmente una de las áreas más prometedoras de la ciencia, pudiéndose aplicar en diferentes campos como son la ingeniería, la medicina, arquitectura, etc. A diferencia de métodos tradicionales como la fabricación sustractiva, esta tecnología ofrece ventajas como la reducción de residuos, la personalización y la posibilidad de obtener piezas más complejas. Dentro de la fabricación aditiva existen diferentes métodos que son utilizados con distintas finalidades, como la Estereolitografía, que permite obtener piezas con alta calidad superficial y precisión o la Fabricación por Fusión de Filamento que presenta un menor coste y ofrece amplia variabilidad de materiales. Dentro de este último, en cuanto a materiales más comunes, destacan el PLA (ácido poliláctico) o el ABS (acrilonitrilo butadieno estireno). No obstante, uno de los problemas que nos encontramos en la impresión 3D es su vulnerabilidad respecto a los factores ambientales como puede ser la temperatura, humedad, etc.

El principal objetivo de este trabajo es estudiar la influencia de la humedad en probetas impresas en 3D con el fin de analizar cómo se ve afectado su comportamiento mecánico.

Palabras clave:

- Fabricación por Filamento Fundido
- PLA
- Fabricación Aditiva
- Humedad
- Ensayo de tracción
- Impresión 3D



Abstract

Additive manufacturing is currently one of the most promising areas of science, with applications in various fields such as engineering, medicine, and architecture, among others. Unlike traditional methods such as subtractive manufacturing, this technology offers advantages such as waste reduction, customization, and the ability to produce more complex parts.

Within additive manufacturing, there are different methods used for various purposes, such as Stereolithography (SLA), which allows for high surface quality and precision, or Fused Filament Fabrication (FFF), which is more cost-effective and offers a wide range of material options. The most commonly used materials include PLA (polylactic acid) and ABS (acrylonitrile butadiene styrene). However, one of the challenges in 3D printing is its susceptibility to environmental factors such as temperature and humidity.

The main objective of this study is to analyze the influence of humidity on 3D printed specimens to evaluate how it affects their mechanical behavior.

Key words:

- Fused Deposition Modeling
- PLA
- Additive Manufacturing
- Humidity
- Tensile test
- 3D impresión

Índice de contenido

Contenido

1.	INTRODUCCIÓN	10
2.	OBJETO Y ALCANCE	11
3.	ESTADO DEL ARTE	12
3.1.	Marco teórico.....	12
3.1.1.	Métodos de impresión:.....	14
3.1.2.	Aplicaciones	15
3.2.	Método de Fabricación por Filamento Fundido (FFF).....	17
3.2.1.	Parámetros de impresión	18
3.3.	Impresora utilizada	20
3.4.	Material utilizado (PLA).....	21
3.4.1.	Producción.....	23
3.5.	Ensayo a tracción	24
3.5.1.	Parámetros que se obtienen	25
3.6.	Efectos de la absorción de la humedad en polímeros	26
4.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	28
4.1.	Elección de probeta y normativa	28
4.2.	Modelado y software	30
4.3.	Impresión y software	31
4.4.	Impresión de las probetas y guardado.....	32
4.5.	Toma de datos.....	35
4.5.1.	Geometría de la probeta.....	35
4.5.2.	Rugosidad superficial	37
4.5.3.	Pesaje	38
4.6.	Ensayo de tracción	39
4.7.	Defectos superficiales	41
5.	RESULTADOS	43
5.1.	Análisis dimensional	43
5.2.	Análisis de la rugosidad superficial	45
5.3.	Análisis del pesaje.....	46
5.4.	Ensayo de tracción	48
5.4.1.	Rotura de las probetas	48
5.4.2.	Comparaciones	50
6.	CONCLUSIONES	55



7.	LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.....	56
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	57
8.	ANEXOS	60
8.1.	Hoja de datos I	60
8.2.	Hoja de datos II	67

Índice de Figuras

Figura 1 Geometría de una probeta de tracción[3].	10
Figura 2: Evolución de artículos de investigación en relación con impresión 3D en función de los años. Fuente: ScienceDirect.	12
Figura 3: Proceso de impresión 3D [1].	14
Figura 4: Aplicaciones de la fabricación aditiva en la biomedicina [2].	16
Figura 5: Posibles aplicaciones en el área aeroespacial y aeronáutica [2].	17
Figura 6: Funcionamiento de una impresora FFF [12]	18
Figura 7: Distintos patrones de relleno en impresión 3D [16]	19
Figura 8: Probetas con faldas para mejorar la adhesión.	20
Figura 9: Impresora utilizada.	21
Figura 10: Rollo de filamentos de PLA.	21
Figura 11: Proceso de biodegradación del PLA [21].	22
Figura 12: Imagen resumen de la producción del PLA [21]	24
Figura 13: Curva tensión-deformación de un ensayo de tracción [24]	24
Figura 14: Ensayo de tracción, máquina, probeta	26
Figura 15: Estructura química del PLA y ácido láctico [21].	26
Figura 16: Imagen generada por IA de los efectos causados por la humedad en impresión 3D	27
Figura 17: Procedimiento experimental del proyecto.	28
Figura 18: Diferentes geometrías de probetas: (a) ASTM D638, (b) ISO 527-2, (c) ASTM D3039-15°, (d) ASTM D3039-90°, y (e) ASTM D3039-0° [27].	29
Figura 19: Porcentaje de área aceptable de rotura [27].	29
Figura 20: Geometría de la probeta según la ISO 527-4 [28].	30
Figura 21: Geometría de la probeta modelada en SolidWorks.	30
Figura 22: Tanda de probetas en el software IdeaMaker.	31
Figura 23: Imágenes de la impresión de una tanda y pantalla táctil.	32
Figura 24: Post y preimpresión de una tanda de probetas	33
Figura 25: Planificador de ensayos.	34
Figura 26: Guardado de las probetas en seco, campana húmeda y sumergida.	34
Figura 27: Medidas tomadas de las probetas.	35
Figura 28: Medidas tomadas del grosor de las probetas.	36
Figura 29: Pie de rey utilizado	36
Figura 30: Muestra de parámetros analizados en el rugosímetro	37
Figura 31: Rugosímetro analizando la rugosidad superficial.	38
Figura 32: Peso utilizado.	38
Figura 33: Programa utilizado en el ensayo a tracción.	40
Figura 34: Ensayo de tracción finalizado.	41
Figura 35: Equipo utilizado para la detección de defectos superficiales.	42
Figura 36: Medidas del ancho de la cabeza de las probetas	43
Figura 37: Medidas de la longitud global de las probetas.	44
Figura 38: Medidas del grosor a lo largo de su eje longitudinal.	44
Figura 39: Promedio de los valores del grosor.	45
Figura 40: Resultados Ra y Rz en las dos direcciones de medición	45
Figura 41: Resultados de Ra en el eje longitudinal	46
Figura 42: Resultados de Rz en el eje longitudinal	46
Figura 45: Promedio del pesaje de las probetas	47
Figura 46: Resultado de la media del segundo pesaje	47
Figura 47: Rotura de probetas	48
Figura 48: Aproximación del área deseada de rotura.	49
Figura 49: Representación Fuerza-Posición de las probetas secas	50
Figura 50: Representación Fuerza-Posición de las probetas húmedas	50



<i>Figura 51: Representación Fuerza-Posición de las probetas mojadas</i>	51
<i>Figura 52: Representación Fuerza-Posición de la segunda semana</i>	51
<i>Figura 53: Representación Fuerza-Posición de la quinta semana</i>	52
<i>Figura 54: Representación Fuerza-Posición de la octava semana</i>	52
<i>Figura 55: Representación de la tensión máxima (UTS)</i>	53
<i>Figura 56: Representación de los puntos de rotura</i>	54
<i>Figura 57: Representación Fuerza-Posición global</i>	54



Índice de tablas

<i>Tabla 1: Términos utilizados en la fabricación aditiva [1].</i>	13
<i>Tabla 2: Métodos de impresión 3D [9].</i>	14
<i>Tabla 3: Propiedades del PLA [24].</i>	23
<i>Tabla 4: Tabla resumen de las propiedades de impresión de las probetas.</i>	32
<i>Tabla 5: Identificación de las probetas.</i>	34
<i>Tabla 6: Características ME405/10 [36].</i>	39
<i>Tabla 7: Velocidades de ensayo [37].</i>	40
<i>Tabla 8: Promedio de las medidas del grosor.</i>	45
<i>Tabla 9: Datos de tensión máxima y tensión de rotura.</i>	53

1. INTRODUCCIÓN

La fabricación aditiva, comúnmente conocida como impresión 3D consiste en la creación de un objeto tridimensional, añadiendo capas de un material a partir de un modelo digital previamente dado [1].

Este método de fabricación es versátil y permite su aplicación en múltiples campos de aplicación, como son por ejemplo la medicina, ingeniería, arquitectura, etc. En la ingeniería, esta tecnología es sobre todo usada para la fabricación de componentes ligeros y resistentes, enfocados en la realización de piezas de geometría compleja de forma económica y ágil. Como ventajas principales de la impresión 3D podríamos encontrar la reducción de material usado, la rapidez de trabajo y la propia personalización [2].

Muchos son los métodos y materiales usados para los ensayos hechos por fabricación aditiva, pero este proyecto estará enfocado en el proceso de la Fabricación por Filamento Fundido (FFF), donde los materiales más comunes son el PLA (ácido poliláctico) o el ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) y que dependiendo de su aplicación pueden variar.

Las probetas usadas tienen una geometría similar a la Figura 1, con dos engrosamientos en los extremos y una parte central más fina para así saber mejor donde se producen las roturas.

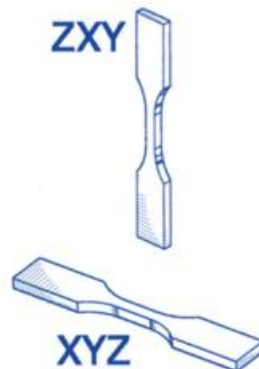


Figura 1 Geometría de una probeta de tracción[3].

La fabricación aditiva tiene muchos aspectos y variables a tener en cuenta, siendo un ejemplo los factores ambientales. Entre ellos se encuentran la temperatura, la presión y la humedad. Relacionado con este último se encuentra la propiedad higroscópica del PLA que le permite absorber la humedad del ambiente. Esto provoca un cambio en su estructura interna que le hace perder resistencia y rigidez, rindiendo menos en los ensayos mecánicos, así como provocando problemas en la impresión [4].

En este trabajo se estudiará este fenómeno, exponiendo probetas impresas por el método FFF a distintos periodos de tiempo y grados de humedad para luego someterlos a ensayos de tracción.



2. OBJETO Y ALCANCE

El objetivo del presente proyecto será analizar la influencia de la humedad en el comportamiento mecánico de probetas impresas mediante Fabricación por Filamento Fundido (FFF). Para ello, las probetas se someterán a ensayos de tracción, una vez han sido expuestas a diferentes ambientes.

La propiedad higroscópica de los materiales usados en la fabricación aditiva condiciona, en muchos casos, los materiales a usar y altera las propiedades mecánicas de la pieza [4]. Por este motivo se van a analizar estos inconvenientes.

En primer lugar, se recopilará información sobre la fabricación aditiva, los materiales a usar, métodos de impresión, fabricación de probetas, curvas tensión-deformación, influencia de la humedad en polímeros, etc. En definitiva, se expondrán los conocimientos previos necesarios de los que depende este trabajo fin de grado. Esta investigación se llevará a cabo mediante la búsqueda de artículos científicos y libros relacionados con los temas en cuestión.

Posteriormente, continuaremos con el apartado experimental donde se explicarán los pasos seguidos desde la creación del modelo 3D de la probeta hasta su ensayo de tracción, pasando por todos los pasos intermedios. Se presentará la metodología de impresión con los parámetros escogidos y etapas del proyecto en función de la humedad a conseguir junto con los softwares utilizados.

Por último, se analizarán los resultados y se presentarán una serie de conclusiones relacionadas con estos. Se analizarán en profundidad los datos obtenidos de la parte experimental de este proyecto y pondremos la vista hacia el futuro para ver hacia dónde se dirige esta tecnología y los caminos que puede abrir.

3. ESTADO DEL ARTE

1.1. Marco teórico

El primer contacto con la fabricación aditiva apareció en los 80 alrededor de todo el mundo con las principales potencias mundiales como Japón, Francia o Estados Unidos, a través de métodos basados en la fotosensibilidad. Posteriormente apareció la creación de objetos a partir de archivos digitales en tres dimensiones, conocido como estereolitografía [2]. Desde ese momento, se han desarrollado muchos métodos de fabricación aditiva y han desaparecido otros, por ejemplo, el Curado Sólido a Tierra o SGC [5].

Junto a la estereolitografía también aparecieron otros métodos que siguen siendo usados en la actualidad como el Modelado por Deposición Fundida (utilizado en este proyecto) o el Sinterizado por Láser Selectivo (SLS)[5], los cuales han seguido desarrollándose hasta el día de hoy.

Esta evolución de la fabricación aditiva está actualmente encaminada hacia la revolución de la impresión 4D que consiste en aportar a las impresiones, la capacidad de cambiar su forma y propiedades con el tiempo, con la aplicación de factores externos como la luz, el pH o la humedad [6].

Estas tecnologías tienen la capacidad de transformar el mundo debido a la flexibilidad a la hora de fabricar las piezas sin necesidad de herramientas externas y la creación de objetos altamente complejos. Otra gran ventaja es la poca cantidad de residuos generados y el reciclaje de estos. Debido a estos beneficios, en las tres últimas décadas, se han podido observar grandes avances en campos como la medicina, la ingeniería, electrónica y muchos otros [7].



Figura 2: Evolución de artículos de investigación en relación con impresión 3D en función de los años. Fuente: ScienceDirect.

Desde entonces, el interés y la investigación sobre la fabricación aditiva ha crecido exponencialmente, como podemos ver en la Figura 2, apareciendo una mayor variedad de métodos y con ello, términos y palabras que comúnmente se confunden. Se pueden agrupar en los siguientes:

Tabla 1: Términos utilizados en la fabricación aditiva [1].

Aditivo	Impresión 3D Fabricación aditiva, AM Fabricación Aditiva por Capas, ALM Fabricación Aditiva Digital, DM
Capas	Fabricación basada en capas Fabricación orientada en capas
Rapidez	Tecnología rápida Prototipado rápido Herramientas rápidas Fabricación rápida
Digital	Fabricación Digital Maqueta Digital
Directo	Fabricación Directa Herramientas Directas
3D	Impresión 3D Modelado 3D

Como se ha mencionado anteriormente, el proceso de fabricación aditiva empieza con una creación del objeto en un software de modelado. Este archivo es transformado a un formato que pueda leer el software de impresión con el que se trabaja. En este escalón, se parametriza y se pasa al elemento de impresión. Posteriormente se prepara la máquina y se termina de personalizar los parámetros de impresión [1].

El proceso en su totalidad se puede ver resumido en la siguiente imagen:

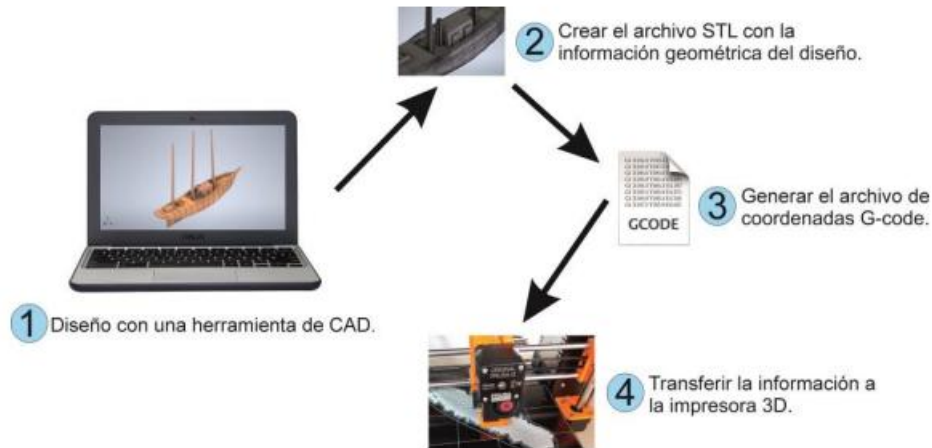


Figura 3: Proceso de impresión 3D [8].

3.1.1. Métodos de impresión:

Para crear las distintas capas, unir las, fundir el filamento o delinear el contorno necesario se necesita una fuente de energía externa y un método a seguir dependiendo de la pieza realizada. Como se ha mencionado con anterioridad, hay muchos métodos de impresión distintos. Cada uno se basa en diferentes técnicas y requieren maquinaria especial [9]. A continuación, se mostrará una tabla resumen con los distintos métodos de impresión:

Tabla 2: Métodos de impresión 3D [9].

Familia	Método	Abreviación	Definición
Polimerización	Estereolitografía Láser	LS	Las partes se generan a partir de la polimerización de un monómero líquido. Un láser hace solidificar el líquido.
	Impresión de polímeros and Polymer Jetting		Cuando el material monomérico se aplica mediante cabezales de impresión.
	Procesamiento Digital de luz		La foto polimerización funciona con un proyector como fuente de rayos UV. La capa en cuestión se proyecta en la pieza y se produce la solidificación.
	Micro Estereolitografía		Muchos procesos permiten la producción de piezas a escala micrométrica (la mayoría en investigación).
Sintetizado y fundición	Sinterizado por Láser/Sinterizado por Láser Selectivo	LS/SLS	Cada capa se delinea con un láser. Las partículas a las que golpea el

Extrusión/Modelado por filamento fundido			láser se derriten para luego solidificarse creándose una capa.
	Fusión en Lecho de Polvo, Fusión Selectiva por Láser	PBF,SLM	Muy parecido al anterior pero encarado a materiales más densos.
	Fusión por Haz de electrones		En lugar de utilizar un láser, se utiliza un electrón con mayor penetración y velocidad.
	Fabricación por Filamento Fundido	FFF	Se explica en detalle a continuación (utilizado en este proyecto).

3.1.2. Aplicaciones

La fabricación aditiva ha revolucionado la forma en la que se diseñan componentes en diversos sectores de la industria. La capacidad de poder partir de un modelo digital permite tener una gran libertad de diseño y personalización. La evolución de esta tecnología continúa expandiéndose y las técnicas de impresión actuales siguen mejorando [2].

A continuación, se explorarán las diversas aplicaciones de la impresión 3D en los distintos campos de la industria y se analizarán sus ventajas aplicando ejemplos concretos.

- *Biomedicina*

La fabricación aditiva permite la construcción de tejidos humanos a partir de una célula madre. Esta técnica ha permitido la construcción de prótesis, medicinas, implantes, etc. En este campo, los polímeros tienen el protagonismo, gracias a sus propiedades biodegradables, pero también son importantes los metales y cerámicos [10].

El interés en esta tecnología ha aumentado debido a las demandas de este sector. Se busca gran complejidad, personalización y producción reducida, por lo que la impresión 3D es lo más adecuado. La elección del material debe tener un gran estudio detrás y tendrá que ajustarse a su uso posterior, por ejemplo, en la Figura 4 [2].



Figura 4: Aplicaciones de la fabricación aditiva en la biomedicina [11].

- *Aeroespacial*

Su ventaja para la logística, funcionalidad, producción y peso de las piezas, hacen de la fabricación aditiva una técnica imprescindible para este sector. El 18% del mercado de la AM (additive manufacturing) forma parte de la industria aeroespacial, y cuenta con un gran futuro por delante [2].

En este sector, se necesitan componentes metálicos y no metálicos para la creación o reparación de objetos como aspas de turbinas, intercambiadores de calor, cámaras de combustión, inyectores, etc. Algunos ejemplos podemos verlos representados en la Figura 5. Son muchas empresas las que cuentan ya con este método (NASA, Space X) y se puede observar en los trajes de los astronautas o en el propio motor del SuperDaco [2], [12].

- *Electrónica*

En los últimos años ha surgido un gran interés en los electrónicos flexibles, es decir, sensores, condensadores, baterías, etc. Esto se debe a su gran eficiencia y gestión de material a la vez que su resistencia y su rendimiento.

Un ejemplo claro de este uso son los electrodos para los electrocardiogramas [2].

- *Construcción*

Cuentan con unas impresoras de gran tamaño capaces de hacer un bloque de cemento capaz de solidificarse en un corto periodo de tiempo. El problema es la necesidad de trabajadores realmente capacitados y el laborioso proceso que viene detrás.

Un ejemplo es la construcción de una serie de casas en Suzhou (China) a través de una impresora 3D. Esta impresora formaba capa tras capa de una mezcla de cemento, arena y fibra junto con los aditivos convenientes [2]. Son viviendas de un piso e independientes de aproximadamente 200 m² a 4800 dólares [13].

- Arte

Este sector cuenta con procesos muy laboriosos a la hora de crear una joya o decoración con procesos como la talla manual. Lo que hace la impresión 3D es reducir la cantidad de tiempo de producción o reducir el esfuerzo de la mano de obra [2].

En estos últimos años, se han llegado a producir objetos como pendientes de cerámica, collares metálicos, brazaletes de resina y muchos otros complementos más a través de la producción por fabricación aditiva [2].

En el mundo de la moda hemos podido observar avances como la impresión de zapatos en 3D por la compañía 3D Systems, e incluso de ropa como en la provincia china de Shandong [13].



Figura 5: Posibles aplicaciones en el área aeroespacial y aeronáutica [2].

3.2. Método de Fabricación por Filamento Fundido (FFF)

La técnica de impresión FDM o FFF (Fused Deposition Modeling o modelado por deposición fundida) es una técnica de fabricación aditiva que consiste en la fundición de un material termoplástico que se deposita en sucesivas capas hasta crear el objeto deseado. Los materiales más usados para este método son el PLV, ABS, PETG, etc y son suministrados por un cartucho enrollado que comunica con el sistema de alimentación de la máquina. Se proporciona información del tipo de material y cantidad restante [14], [15].

No hay diferencia entre la Fabricación por Filamento Fundido y el Modelado por Deposición fundida en cuestión de la técnica que utilizan, simplemente esta última, es una marca registrada por la empresa Stratasys. Empezaron a comercializar impresoras 3D en los años 90 [14].

Un sistema de alimentación fuerza al filamento a pasar por una unidad de calentamiento hasta convertirlo en una pasta caliente, que actúa como pegamento el cual se coloca en una boquilla y se prepara para colocarlo en capas (Figura 6). Este dispositivo calefactor se mueve en un plano horizontal hasta terminar la primera capa del polímero, para luego trasladarse en el eje z y continuar con la impresión según un patrón programado en el archivo de impresión. Una vez depositado, el material es rápidamente solidificado y enfriado formando una estructura resistente [14].

Este método cuenta con grandes ventajas como por ejemplo gran versatilidad, bajo precio, reducción de desperdicios, etc. FFF permite con un precio relativamente bajo, disponer de una

gran precisión dimensional, una rápida producción y otras muchas ventajas. Gracias a esto es por lo que sectores como el aeroespacial, militar, biomédico han tenido un enorme éxito y se han beneficiado de esta nueva tecnología [2][14].

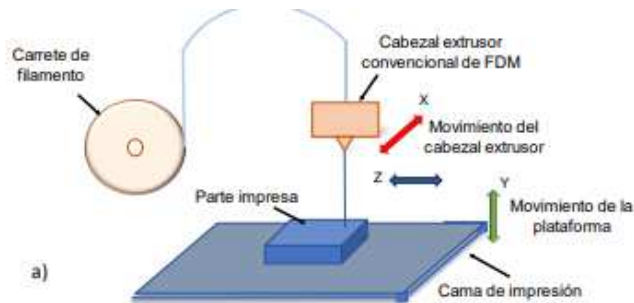


Figura 6: Funcionamiento de una impresora FFF [16]

Como posibles desventajas podríamos destacar una resolución limitada debido principalmente a la anchura de la boquilla del extrusor o requerimientos de soportes en caso de tener voladizos en la pieza.

Estas impresoras a menudo cuentan con varias cabezas de impresión, permitiendo la obtención de una pieza multimaterial. Con esto se consigue la creación de objetos multimateriales y que requieren de una geometría más compleja [2].

El proceso posterior a la impresión puede ser ejecutado manualmente, utilizando una espátula por ejemplo o con productos especiales como sosa caustica. Posteriormente, se pueden someter las piezas a diferentes procesos de mecanizado como el pulido u otros [9].

3.2.1. Parámetros de impresión

Algunos de los parámetros más importantes son los siguientes:

- *Altura de capa*

Consiste en el grosor de cada capa de filamento que es depositado. Capas más delgadas ofrecen un mejor detalle de la pieza, pero es directamente proporcional al tiempo de impresión. Del mismo modo, capas más gruesas agilizan la impresión, pero con una pérdida de detalles [17].

- *Temperatura de la cama caliente*

Es la temperatura que llega a alcanzar la base de la impresora donde se imprime la pieza. Se utiliza para mejorar la adhesión de la misma, reduciendo el riesgo de deformaciones. Varía según el material del filamento a utilizar [17].

- *Relleno*

La densidad de relleno o *infill density* es el porcentaje del interior de la pieza que se rellena con material. Una pieza con más relleno es más densa y resistente, aunque incrementa el tiempo de impresión y material utilizado. Se suele elegir un patrón de dibujo (Figura 7) con el que se deposita el filamento (hexagonal, líneas, cuadrícula, etc). Cada patrón ofrece una propiedad distinta de resistencia y flexibilidad [18].

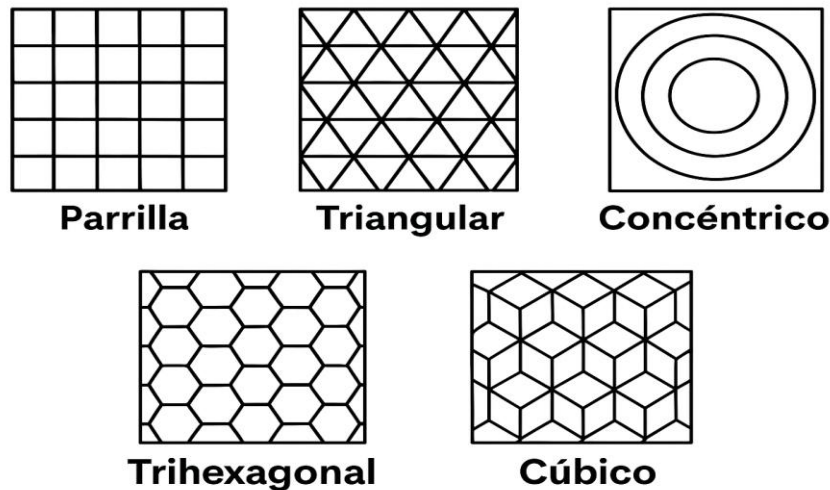


Figura 7: Distintos patrones de relleno en impresión 3D

○ *Temperatura de extrusor*

O también llamado *hotend*, es la temperatura a la que se calienta el filamento para que éste pueda ser extruido. Cada material tiene su temperatura de extrusión propia y es muy importante para evitar desperfectos en la pieza o atascos en el extrusor [19].

○ *Soportes*

Consisten en estructuras que se imprimen con el objetivo de soportar voladizos, facilitando así la elaboración de estructuras complejas o con salientes sin colapsar. A menudo suelen estar impresas con un segundo material distinto con alguna propiedad como la solubilidad en agua [20].

○ *Plataforma (adhesión):*

Mejoran la adherencia inicial de la primera capa, que se encuentra en contacto directo con la cama y ayudan a evitar deformaciones. Dependiendo de cada opción encontraremos más material utilizado y más adhesión o menos. Se suele escoger dependiendo de la pieza a hacer y el material utilizado. Existen [21]:

- Falda (skirt)(Figura 8)
- Borde (brim)
- Balsa (raft)

○ *Velocidad:*

Es la rapidez con la que se mueve el cabezal de la impresora para extruir el filamento. Afecta directamente al tiempo de impresión, pero puede dañar la calidad del acabado de la pieza, afectando a la precisión [20].

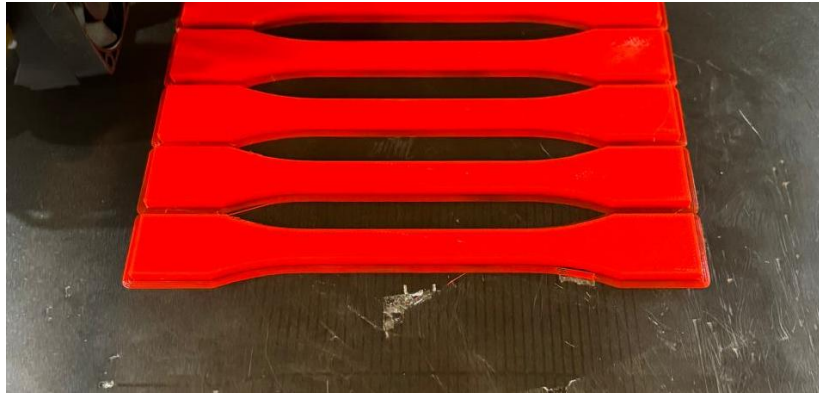


Figura 8: Probetas con faldas para mejorar la adhesión.

3.3. Impresora utilizada

Las impresoras 3D destinadas a FFF tienen como finalidad derretir el filamento a utilizar para luego pasarlo por uno o varios extrusores y ser luego depositado en capas sucesivas hasta construir el objeto. Existen una gran variedad dependiendo del método a usar y las características que queramos que tenga la pieza [22].

En nuestro caso, hemos utilizado la impresora Raise 3D Pro2 (mostrada en la Figura 9) destinada a imprimir según FFF, perfecta para uso profesional o educativo. Permite una gran variedad de filamentos y mejora la velocidad de impresión. Esta impresora destaca por su doble extrusor, su pantalla táctil y sus grandes proporciones [22].

Sus dimensiones son aproximadamente de 305×305×300mm. En su lateral contiene el apoyo de hasta dos rollos de filamento distintos para poder usarlos en una sola impresión gracias a su doble extrusor. En la pantalla táctil, podemos visualizar el estado de impresión a tiempo real junto a otros datos como temperatura de la cama y extrusores. También nos informa y nos da consejos de actividades, como cargar el filamento o al imprimir el archivo. El archivo para imprimir es leído a través de un pendrive [22].

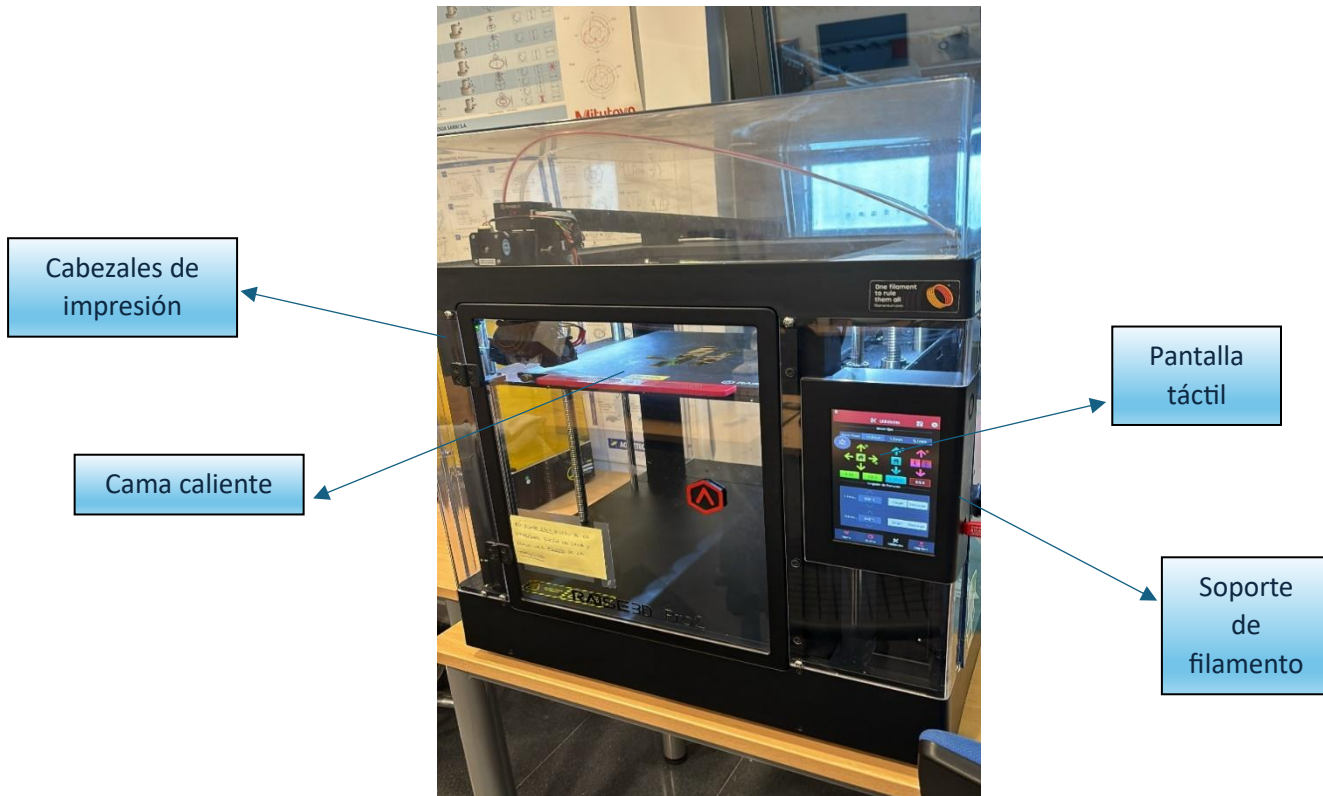


Figura 9: Impresora utilizada.

3.4. Material utilizado (PLA)

El PLA (ácido poliláctico) es uno de los filamentos más usados en la impresión 3D debido a sus grandes propiedades y a su característica biodegradable. Es un material no contaminante derivado del ácido láctico que se hace a partir de recursos renovables como el trigo o remolacha. Este polímero es versátil y es utilizado en diversos campos e industrias.

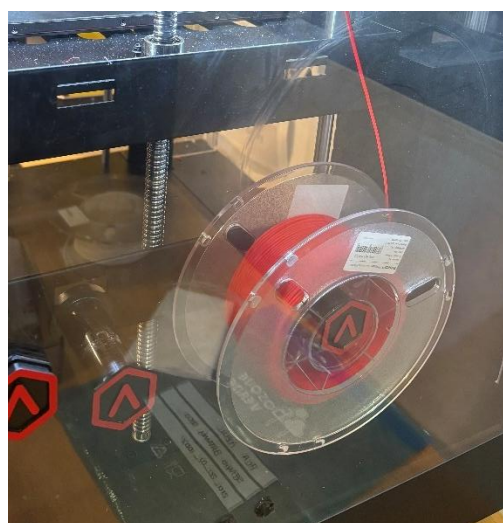


Figura 10: Rollo de filamentos de PLA.

Como rasgo negativo, destacar que el PLA es susceptible a la humedad y la absorción de agua, es decir, es higroscópico. Esto hace que varíen sus propiedades mecánicas a lo largo del tiempo en un ambiente de exposición al vapor de agua. Otro punto negativo se basa en los gases que emite en su descomposición, en concreto el CO₂ y CH₄. Estos gases son parte de los causantes del efecto invernadero, gases que quieren reducir los comités internacionales, aunque en las cantidades en las que producen, no suponen ninguna amenaza para el medio ambiente [23].

En cuanto a sus propiedades mecánicas, tiene un rango en tracción de 50-70 MPa y un módulo de tracción de alrededor de 3000 MPa, haciendo destacar su fuerza y rigidez frente a otros plásticos biodegradables. Su resistencia a flexión es de 100 MPa y su módulo de flexión esta sobre 4000 MPa. Siguiendo con la temperatura, se comienza a deformar a los 60 °C con una temperatura de fusión de 150°C [24].

De acuerdo con una encuesta realizada en 2020, se estimó una capitalización de las industrias de polímeros y biopolímeros de 666 mil millones y 10 mil millones de dólares respectivamente con una tasa de crecimiento anual del 16%. También destacó un aumento del volumen de residuos de polímeros de 320 millones de toneladas. Para reducir estos desechos de polímeros no biodegradables, varios países se han unido para promover los biopolímeros como es por ejemplo el PLA. Europa por sí sola contribuyó con el 55% del volumen total de biopolímeros producidos en 2018, centrándose en industrias como alimentos, bebidas y textiles. Si no se hace lo necesario, las consecuencias acabarás siendo percibidas por todos nosotros, y es por eso por lo que cada año se intentan mejorar estos números [23].

La biodegradación del PLA ocurre de forma natural con la ayuda de algas, hongos y varios tipos de bacterias. Su estructura se rompe en agua, dióxido de carbono y compuestos inorgánicos, formándose en el proceso estiércol. Todo esto en condiciones ideales de degradación, factores como la temperatura o la humedad, pueden alterar este proceso alargándolo. Por ejemplo, un PLA con mayor peso molecular se va a degradar más lentamente que una con un peso molecular menor. Primero se descompone de forma heterogénea la superficie y posteriormente, su estructura intermolecular [23].



Figura 11: Proceso de biodegradación del PLA .

Tabla 3: Propiedades del PLA [24].

Propiedades físicas	Valor	Unidades
Densidad	1,25	g/cm ³
Propiedades Térmicas	Valor	Unidades
Temperatura de Deflexión Térmica	56,7	°C
Temperatura de ablandamiento Vicat	55,4	°C
Temperatura de Transición a cristal	60,2	°C
Temperatura de fusión	151	°C
Propiedades mecánicas	Valor	Unidades
Módulo de tensión	2.769	MPa
Tensión de deformación	46,5	MPa
Tensión de rotura	39,5	MPa
Elongación de deformación	2,1	%
Elongación de rotura	6,5	%
Módulo de flexión	2.744	MPa
Ensayo de Charpy	3,3	kJ/m ²
Dureza	73,4	Shore D

3.4.1. Producción

La producción del ácido láctico se puede realizar de manera biológica o química utilizando bacterias. Estas bacterias permiten controlar el desarrollo de enantiómeros L-láctico y D-láctico resultando en una disminución del peso molecular del polímero. El proceso de producción del PLA de forma natural comienza con la fermentación del almidón, a su vez que bacterias y amoníaco. El resultado de esta producción de lactato de amonio, dióxido de carbono, alcohol y ácido acético [23].

Posteriormente, el lactato de amonio se divide amoníaco y ácido láctico por un proceso de electrolisis. El ácido láctico se envía a un reactor de oligomeración y se convierte en un prepolímero eliminando el agua. Este prepolímero se divide en anillos de lactida y se purifican mediante una columna de calor. Posteriormente se polimeriza usando un catalizador metálico como el estaño, abriendo los anillos y formando largas cadenas de PLA. Finalmente, el estaño se elimina en una cámara de extrusión utilizando carbonato de sodio como catalizador adicional. El PLA puro se solidifica a la forma preferida [23].

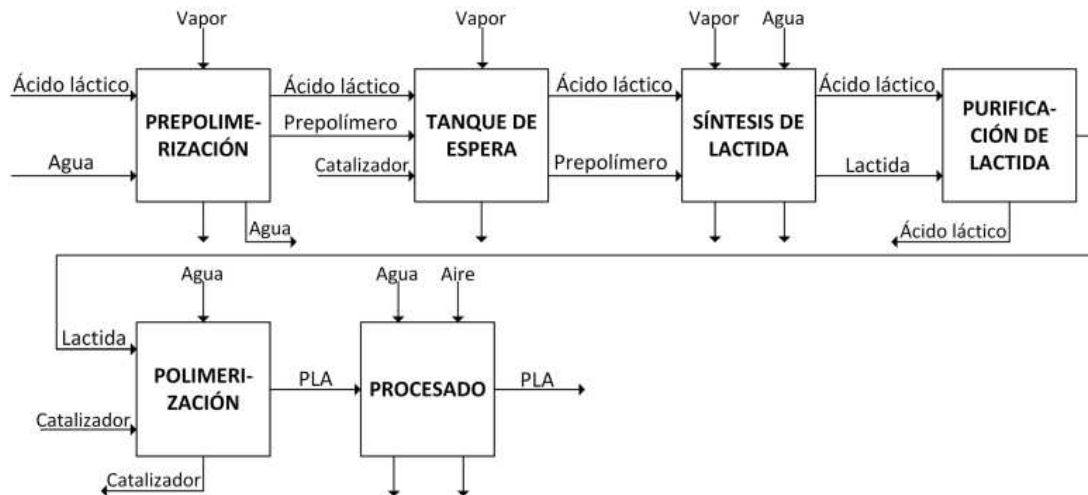


Figura 12: Imagen resumen de la producción del PLA [25]

3.5. Ensayo a tracción

Un ensayo de tracción es una prueba que tiene como objeto la evaluación de las propiedades mecánicas del material en cuestión, como su resistencia, ductilidad y elasticidad. La prueba consiste en la aplicación de una fuerza axial en una probeta hasta producir su ruptura, consiguiéndose los datos de deformación como de la carga. Esto genera una curva tensión-deformación que describe el comportamiento del material utilizado [26].

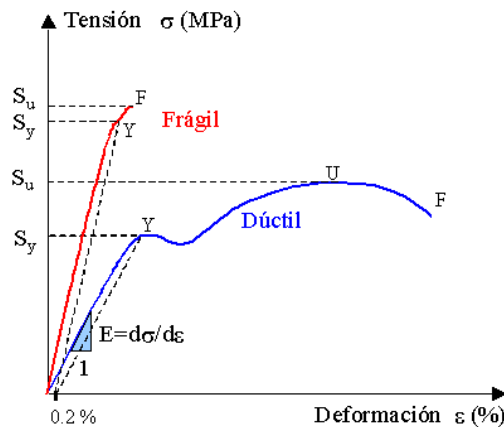


Figura 13: Curva tensión-deformación de un ensayo de tracción [27]

Este es un ensayo esencial para seleccionar materiales adecuados en la ingeniería y asegurar la seguridad estructural. Otra aplicación podría ser la investigación y optimización del desarrollo de nuevos materiales y procesos [26].

Las fases principales del ensayo son las siguientes:

- Elasticidad: etapa inicial en la que la relación carga aplicada y deformación del material es lineal, siguiendo la Ley de Hooke. Al eliminar la fuerza aplicada, el material recupera

su forma original sin sufrir ninguna deformación permanente. El módulo elástico mide su rigidez [26].

- Plasticidad: una vez superado el límite elástico el material sufre deformaciones permanentes (deformación no lineal). Aparece una disminución del ancho del material en el eje X, en la sección transversal, y un alargamiento en el eje Y [26].
- Ruptura: fase final del ensayo. Se mide la capacidad del material de soportar cargas antes de su ruptura y fallo. Suele ocurrir en la región de estricción [26].

3.5.1. Parámetros que se obtienen

Esfuerzo (σ): el esfuerzo o tensión es la fuerza aplicada por unidad de área de la sección transversal de la probeta.

$$\sigma = F/A \quad (\text{Eq. 1})$$

Deformación (ξ): se refiere al cambio de dimensiones de la probeta en un eje bajo una carga.

$$\xi = \Delta L/L_0 \quad (\text{Eq. 2})$$

Módulo de elasticidad (E): también llamado módulo de Young es una propiedad básica de los materiales utilizada para medir la rigidez o resistencia a la deformación elástica bajo una carga. Se halla a través de del cálculo de la pendiente de la recta que une dos puntos seleccionados de la zona elástica.

$$E = \sigma/\xi \quad (\text{Eq. 3})$$

Esfuerzo de fluencia (S_y): representa el momento en el que el material pasa de tener unas características elásticas a plásticas. Se dibuja una tangente entre dos puntos de la región elástica y otra en la región plástica, el punto donde se unen las dos rectas resulta en el esfuerzo de fluencia.



Figura 14: Ensayo de tracción, máquina, probeta

3.6. Efectos de la absorción de la humedad en polímeros

Como hemos abordado con anterioridad, el PLA es un material higroscópico con una estructura molecular representada en la Figura 15. Esta característica consiste en la capacidad de los materiales de absorber humedad del medio ambiente y luego retenerla. Todo material tiene una humedad de equilibrio en la cual el material ni absorbe ni se desprende de ella, pero cuando la humedad del ambiente es mayor que ésta última, el material se humedecerá [28].

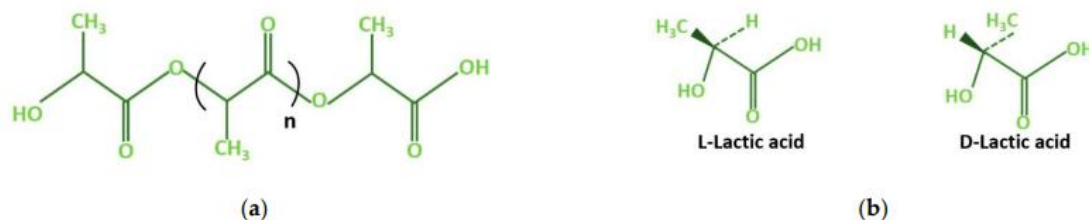


Figura 15: Estructura química del PLA y ácido láctico [23].

Este fenómeno puede ser una ventaja o una desventaja dependiendo del uso que le vayamos a dar, por ejemplo, el gel de sílice es usado en bolsas para absorber el vapor de agua del ambiente, evitando así que lo absorba el objeto. Para el PLA esto resulta un inconveniente debido a que, al absorber humedad, sus propiedades mecánicas se ven alteradas y desfavorecidas pudiendo modificar y falsear ensayos e incluso fallando la impresión [28].

Las consecuencias son variadas dependiendo del tiempo y el grado de exposición. Para empezar, al incrementar la humedad del filamento, su temperatura de fusión aumenta, lo que puede provocar atascos en el extrusor. Otra causa de atasco puede ser la evaporación del agua, creando huecos en el filamento. Continuando con las desventajas, contamos con la degradación del filamento. El agua crea fuertes enlaces intermoleculares en los polímeros que generan roturas en su interior, debilitando su estructura. Por último, la evaporación del agua entre las capas de

impresión crea huecos en la pieza imperceptibles al ojo humano que acaban degradando el acabado superficial de la pieza. Esto resulta en desperfectos como [29]:

- Burbujas
- Grietas superficiales
- Manchas
- Impresiones incompletas



Figura 16: Imagen generada por IA de los efectos causados por la humedad en impresión 3D

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

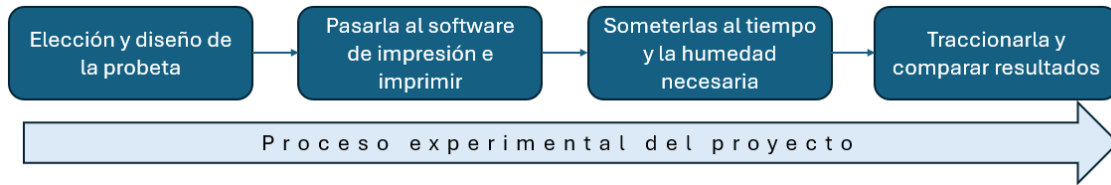


Figura 17: Procedimiento experimental del proyecto.

4.1. Elección de probeta y normativa

La elección de la geometría de la probeta es un tema fundamental para cualquier tipo de ensayo, con el fin de obtener resultados precisos y comparables. En los ensayos de tracción predominan dos familias de normativas que son las ISO y las ASTM. Es aún más importante en el caso de las probetas impresas a través de la fabricación aditiva, debido a factores como la anisotropía del material, la dirección de impresión o la influencia de los factores ambientales. Estos factores hacen que la probeta tienda a romperse por los radios de acuerdo debido a la concentración de esfuerzos que se crea [30]. A medida que las sucesivas capas de material se depositan una sobre la otra, se producen concentradores de tensión en las uniones, las cuales son acentuadas en los radios de acuerdo.

Como es bien sabido, uno de los actuales problemas de la impresión 3D es la forma en la que se imprimen los contornos de una pieza, sobre todo las curvaturas. Para conseguir que la probeta se fracture por una superficie válida, se ha utilizado la norma ISO 527-4 debido al aumento del radio de acuerdo con respecto a las otras normativas. Un mayor radio de acuerdo ayuda a suavizar los concentradores de esfuerzos y reparte mejor la tensión sobre la pieza, reduciendo la posibilidad de llegar a su límite de rotura en esa zona.

En primer lugar, se presentan las distintas normativas con sus respectivas geometrías con las que se ha realizado el estudio:

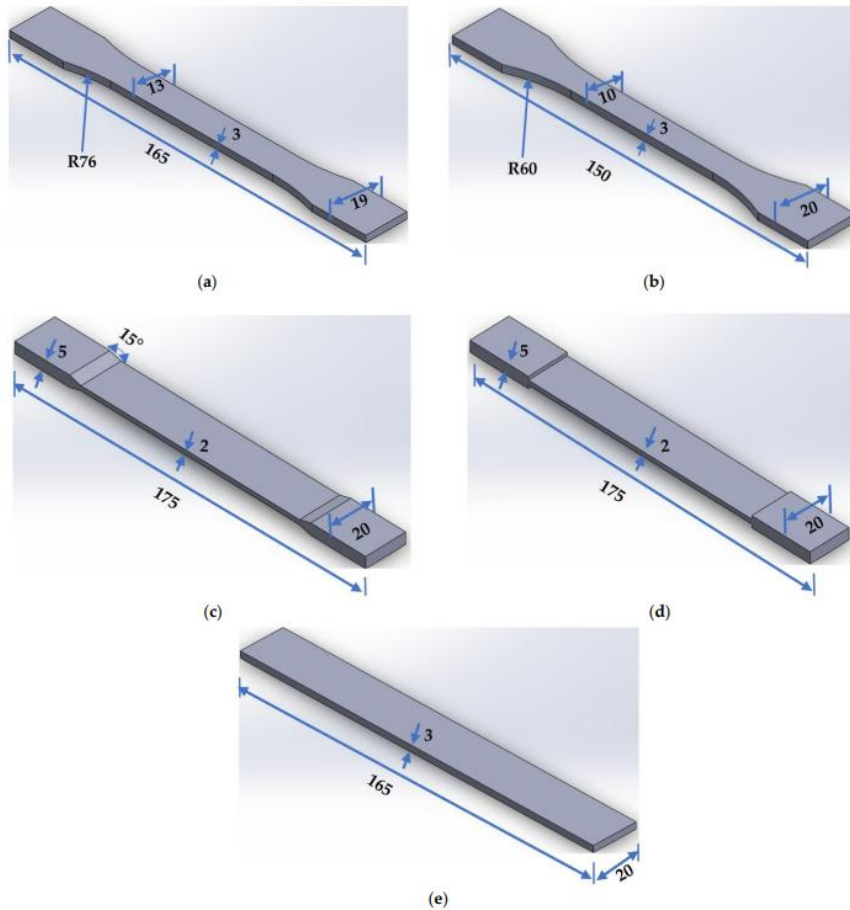


Figura 18: Diferentes geometrías de probetas: (a) ASTM D638, (b) ISO 527-2, (c) ASTM D3039-15°, (d) ASTM D3039-90°, y (e) ASTM D3039-0° [30].

Posteriormente se presta atención en la gráfica de superficie útil (Figura 19). La superficie útil consiste en el área de la pieza donde nos interesa que se fracture la pieza al llegar a su límite de fractura, en este caso, la zona entre los estrechamientos en el centro de la pieza. Si se fracturara en el cuello, podría deberse a las concentraciones de esfuerzo producidas por la geometría y no a su límite real de tracción del material.

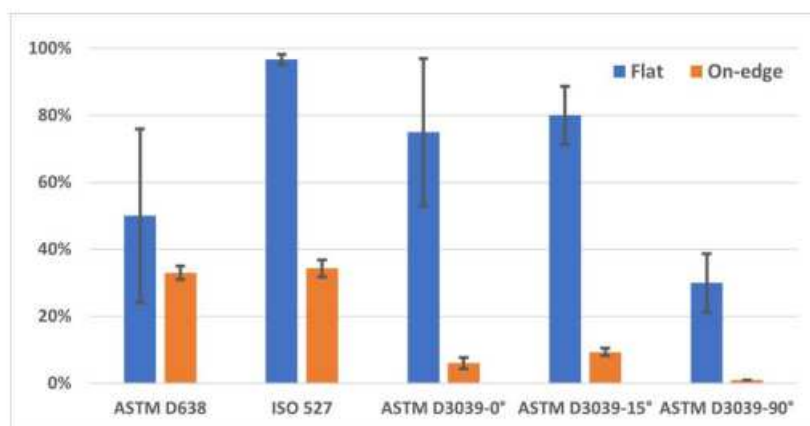
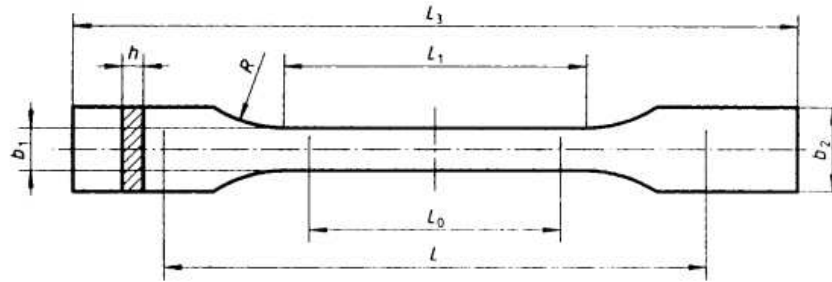


Figura 19: Porcentaje de área aceptable de rotura [30]

Como se puede observar en la Figura 19, la ISO 527-4 [31] ofrece la geometría con mejor superficie útil y es por eso por la que ha sido escogida para llevar este proyecto.



Medidas en milímetros		
L_3	Longitud total	$\geq 150^{(1)}$
L_1	Longitud de la parte estrecha con bordes paralelos	$60 \pm 0,5$
R	Radio	$\geq 60^{(2)}$
b_2	Anchura en los extremos	$20 \pm 0,2$
b_1	Anchura en la parte estrecha	$10 \pm 0,2$
h	Espesor	2 a 10
L_0	Longitud de referencia (recomendada para extensómetros)	$50 \pm 0,5$
L	Distancia inicial entre las mordazas	115 ± 1

Figura 20: Geometría de la probeta según la ISO 527-4 [31].

4.2. Modelado y software

Para modelar la probeta elegida se ha utilizado el software de diseño SolidWorks (*Dassault Systèmes - SolidWorks Corporation*). En este programa se ha modelado la pieza según la Figura 21 y se ha extraído posteriormente el archivo .STL necesario en el software de laminación.

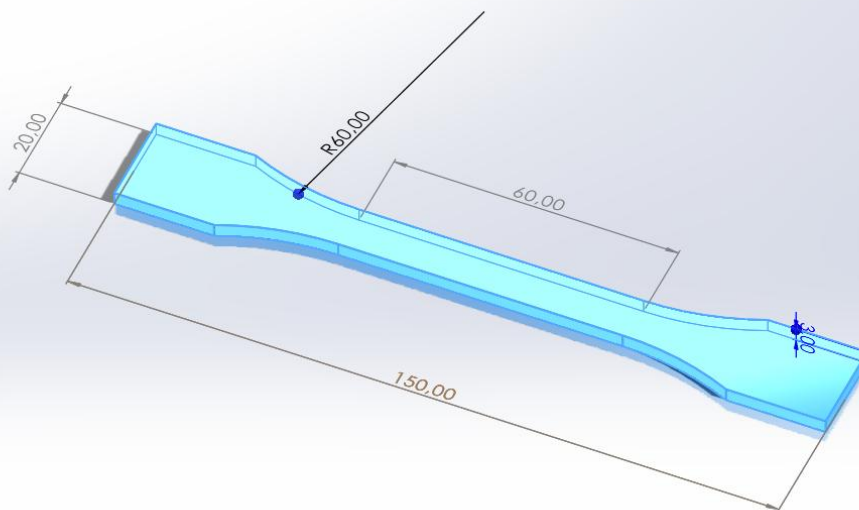


Figura 21: Geometría de la probeta modelada en SolidWorks.

4.3. Impresión y software

El software de laminado utilizado en este proyecto es el IdeaMaker 5.1.2. Este programa permite, a partir de un archivo .STL sacado de SolidWorks, crear un archivo en G Code que pueda leer la impresora para su posterior impresión.

El primer paso es cargar el archivo. Posteriormente, se coloca el modelo de la pieza en la posición y en las cantidades deseadas, en este caso, se sitúa a nivel de la cama y paralelo a ella para seguidamente añadir 4 copias más. Asimismo, se tuvo que subir 20 mm cada probeta para evitar los defectos de impresión provocados por las hendiduras de la cama.

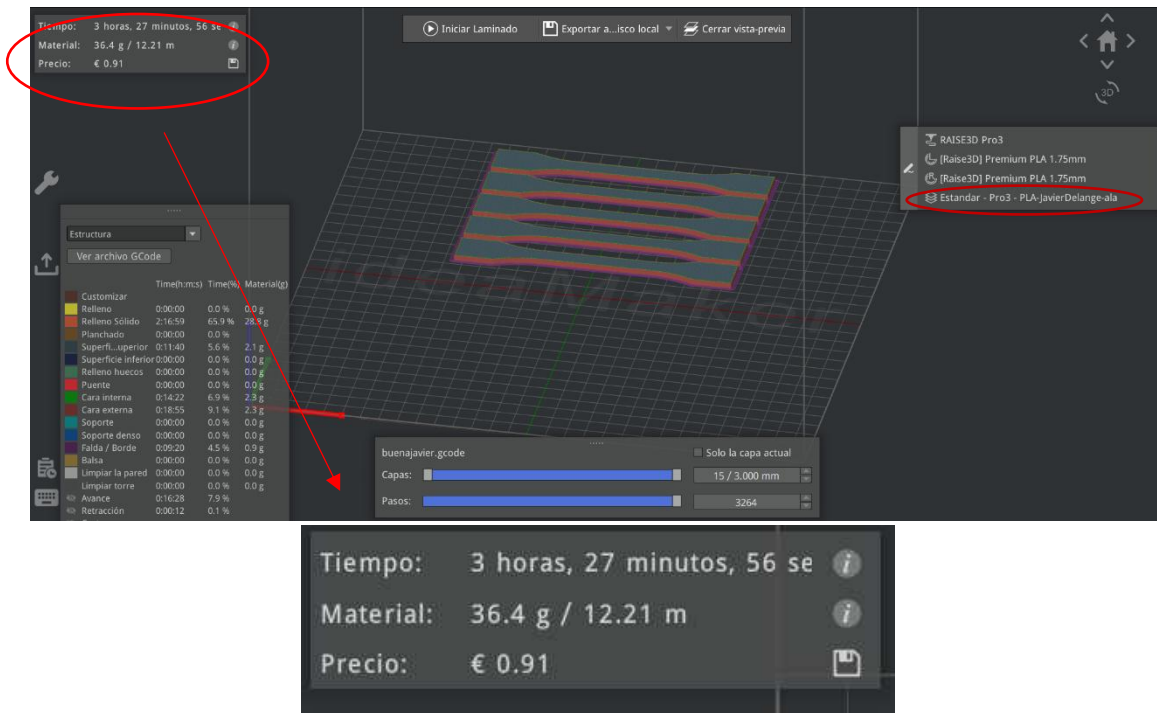


Figura 22: Tanda de probetas en el software IdeaMaker.

Se puede observar en la esquina superior izquierda de la Figura 22, los tiempos de impresión de cada tanda junto con la cantidad de material utilizado y su precio estimado.

Seguidamente se ajustan los parámetros de impresión deseados en el apartado señalado en la imagen. Aquí se personalizan, en función de la necesidad de la pieza, los parámetros mencionados en el apartado 3.2.1. Los parámetros ajustados en esta impresión son los siguientes:

Tabla 4: Tabla resumen de las propiedades de impresión de las probetas.

PARÁMETROS DESTACADOS	VALOR
ALTURA DE CAPA	0,2 mm
DENSIDAD DE RELLENO	100%
TEMPERATURA EXTRUSOR IZQUIERDO	215 °C
TEMPERATURA EXTRUSOR DERECHO	0 °C
TEMPERATURA CAMA CALIENTE	60 °C
SOPORTES	No
CARCASAS	2
PATRÓN DE RELLENO	Cuadrícula
PLATAFORMA	Sólo Ala
VELOCIDAD DE RELLENO	70 mm/s

4.4. Impresión de las probetas y guardado

En la Figura 23 se puede observar los datos principales ofrecidos de la impresión en tiempo real de una tanda. Principalmente, se deben tener en cuenta los datos de temperatura de la cama y extrusores, asegurando unos datos adecuados para el material que está siendo utilizado (Tabla 4).

Durante su impresión es importante que las probetas no sean perjudicadas por las muecas de la cama. Éstas provocan un pequeño desnivel que se va acumulando con las siguientes capas y a veces provocan que se despeguen de la base.



Figura 23: Imágenes de la impresión de una tanda y pantalla táctil.

Las probetas se han impreso en tandas de cinco unidades, siendo un total de siete. Una destinada para permanecer a un grado de humedad bajo, tres que serán guardadas en un ambiente con una humedad de entorno al 98% y por último las restantes permanecerán sumergidas en agua.

Una vez terminada la impresión de cada tanda, se esperarán 5-10 min a que disminuya la temperatura y no cause deformaciones al retirarla. Cuando la tanda sea retirada, se removerán las alas y se guardaran en bolsas estancas con una bolsa de gel de sílice (Figura 24) para que absorba la humedad en lugar de las probetas. Estas bolsas serán guardadas en el laboratorio hasta que sean sometidas a la prueba de tracción o colocadas en el lugar elegido para absorber la humedad correspondiente.

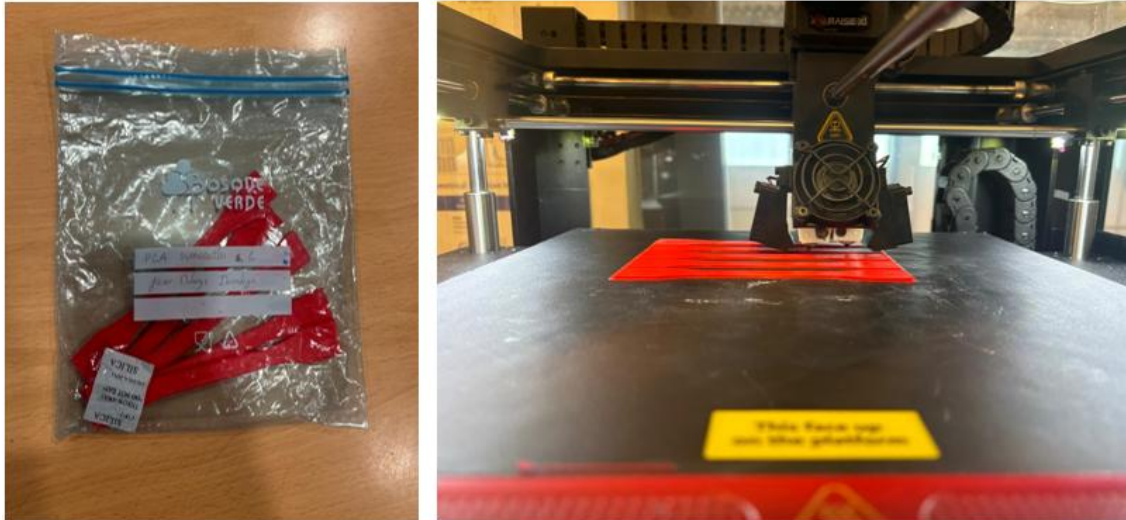


Figura 24: Post y preimpresión de una tanda de probetas

Cuando todas las probetas se han impreso correctamente, se procede a guardarlas por separado según la tanda a la que pertenezca. Serán divididas en tres grupos:

- Una tanda en seco: se guarda inmediatamente después de su impresión en una bolsa acompañada de un gel de sílice para asegurarnos de que permanezcan con la menor humedad posible. No se abrirá la bolsa hasta el momento de su ensayo.
- Tres tandas en una campana húmeda con algodón en la parte inferior de la superficie donde se apoyan las probetas. Junto a ellas se guarda un sensor de humedad que marca una humedad del 98%.
- Tres tandas sumergidas en agua.

Estas probetas serán luego ensayadas a tracción a las dos, cinco y ocho semanas tal y como se representa gráficamente en la Figura 25.

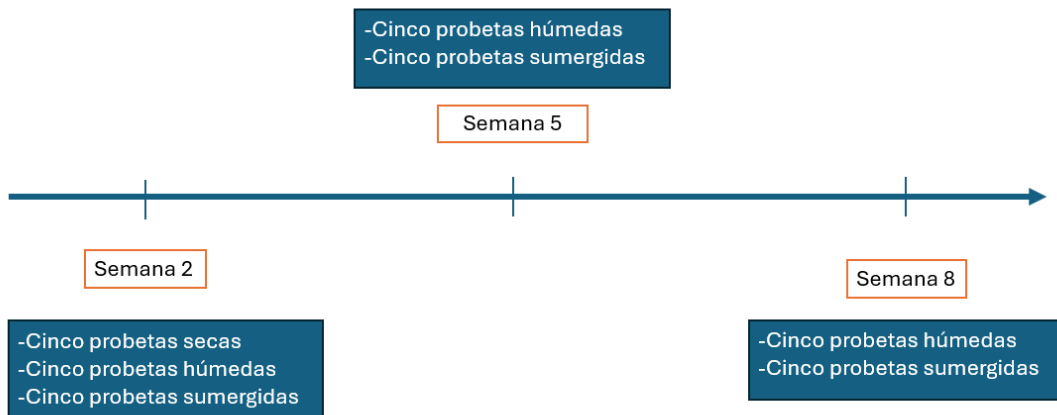


Figura 25: Planificador de ensayos.

Por último, las probetas son marcadas en los dos extremos para poder ser diferenciadas entre sí antes y después de finalizar el ensayo de tracción.

Tabla 5: Identificación de las probetas.

Probetas	Identificación
Guardadas sin humedad	SE-X
Guardadas junto a algodón húmedo	AY-X
Sumergidas en agua	SY-X

Siendo:

- X el número de probeta en una tanda (desde el uno hasta al 5).
- Y el número de la tanda (desde el 1 hasta el 3).

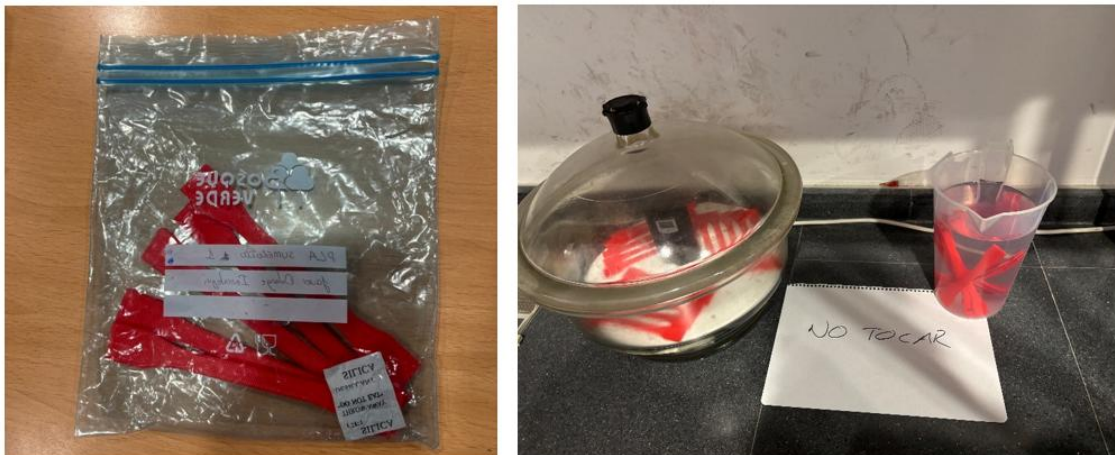


Figura 26: Guardado de las probetas en seco, campana húmeda y sumergida.

4.5. Toma de datos

Una vez todas las probetas han sido impresas se pasa a tomar sus respectivas mediciones para poder compararlas luego a lo largo del proyecto. Con los resultados se comprueba si la humedad afecta en la geometría, peso y rugosidad superficial y en qué proporciones ocurre. En primer lugar, se hacen doce medidas distintas de la geometría de la probeta con un pie de rey electrónico. Posteriormente, se mide la rugosidad superficial de la probeta en distintos puntos con un rugosímetro. Por último, se pesan en una balanza de precisión de 0,0001 g. Estos procesos son explicados en profundidad en los siguientes apartados.

A las dos semanas de exponer las probetas a su grado de humedad correspondiente, antes del primer ensayo a tracción, se toman las medidas de una probeta de cada grupo. Este proceso se repetirá a las cinco y ocho semanas.

Todas las probetas se han impreso y medido en el mismo ambiente y en las mismas condiciones.

4.5.1. Geometría de la probeta

Para analizar la geometría de la pieza, se realizan medidas sobre el largo y el ancho de las probetas. En total se realizan 12 mediciones de cada probeta como vemos en la Figura 27 y Figura 28.

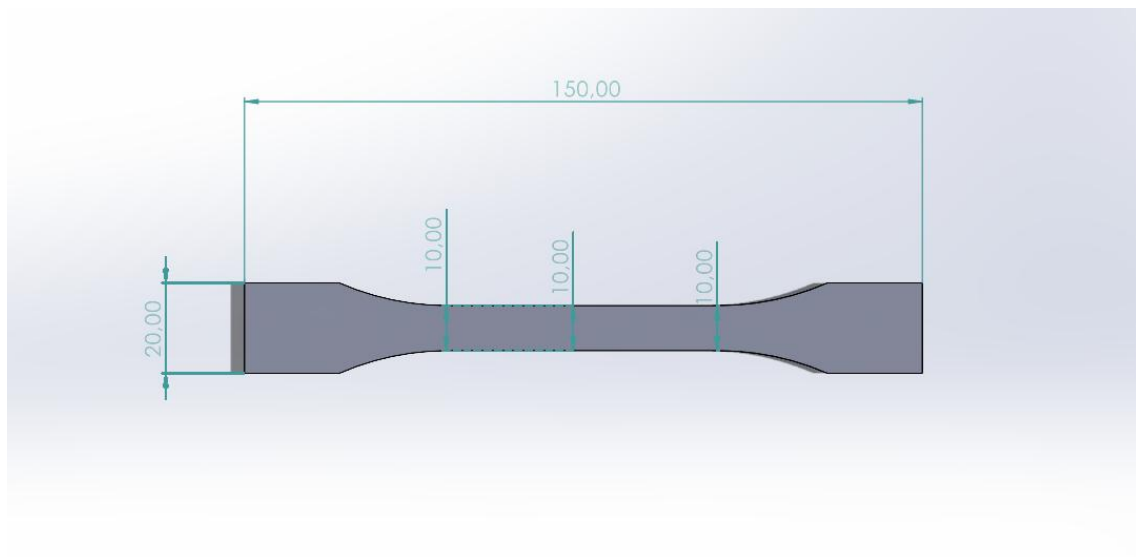


Figura 27: Medidas tomadas de las probetas.

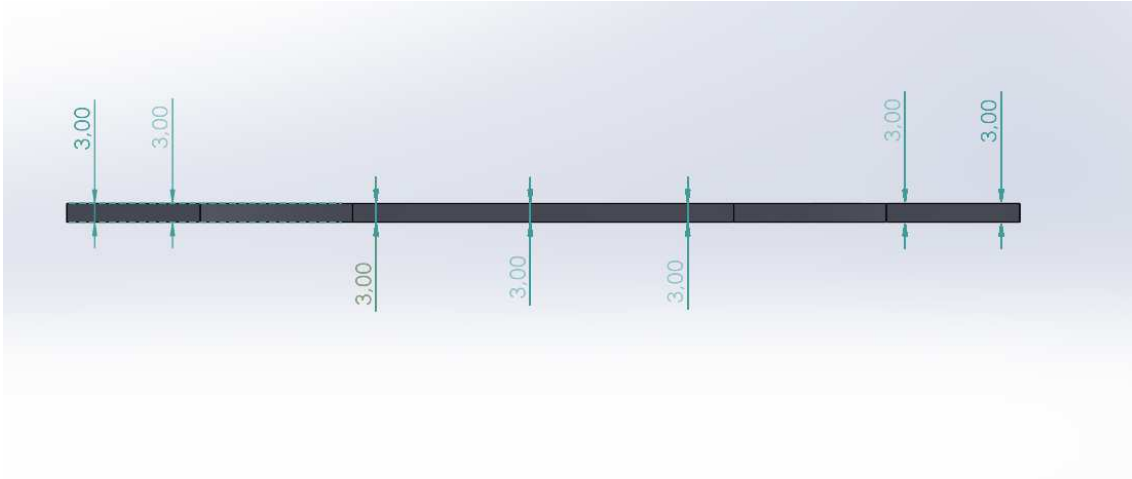


Figura 28: Medidas tomadas del grosor de las probetas.

El instrumento elegido para la toma de mediciones de la geometría de las probetas es un pie de rey digital Iroko, modelo D181. Este modelo cuenta con un rango de 150mm y una varilla de profundidad plana, con tornillo de bloque y estuche rígido. Tiene una división de escala de 0,01 mm y una pantalla LCD resistente al agua [32].

Podemos ver el modelo en la Figura 29.



Figura 29: Pie de rey utilizado

4.5.2. Rugosidad superficial

En cuanto al análisis de la rugosidad superficial se ha utilizado con un rugosímetro portátil en las dos caras de la probeta. En cada superficie se ha medido siguiendo la dirección del patrón de relleno de la probeta y perpendicular al mismo.

Las variables a tener en cuenta son las siguientes:

- Rugosidad Media Aritmética (Ra): sigue la norma ISO 4287/1 DIN 4768. Se trata del promedio aritmético de las desviaciones del perfil de rugosidad en toda la longitud de evaluación. Es un parámetro medido por la mayoría de los instrumentos de medidas actuales [33].
- Amplitud media (Rz): describe la media de las distancias máximas entre picos y valles. Es un parámetro de baja premediación en altura [33]. Parámetro mostrado en la Figura 30.



Figura 30: Muestra de parámetros analizados en el rugosímetro

El dispositivo utilizado para medir la rugosidad superficial es un rugosímetro portátil de la empresa Mitutoyo, modelo SJ-210 (Figura 31). Cuenta con un palpador extraíble de diamante con un rango de desplazamiento de 16 mm y una pantalla LCD donde se despliegan los resultados de medición. Tiene un rango de medición de 360 micrómetros y cuenta con una selección de velocidades distintas aplicables. Se pueden aplicar un total de seis normas incluyendo la ISO97 y ANSI [34].

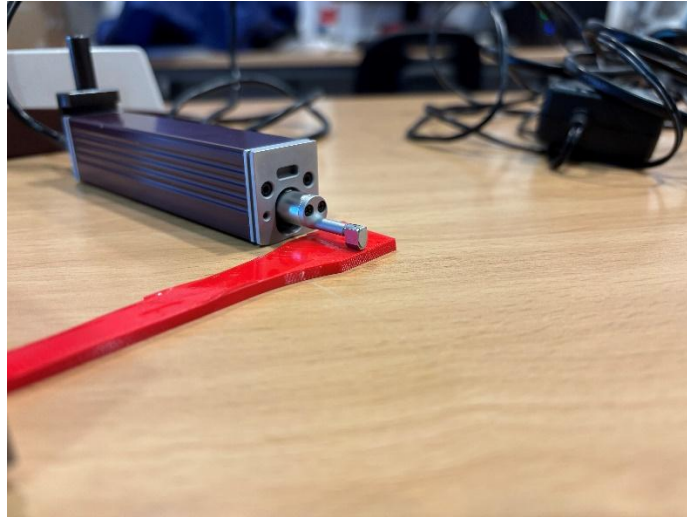


Figura 31: Rugosímetro analizando la rugosidad superficial

Para asegurar unas medidas fiables y la seguridad del palpador, las mediciones se han hecho con ayuda de elementos fijadores y estabilizadores.

4.5.3. Pesaje

El pesaje de las probetas se ha realizado a través del peso de la Figura 32:



Figura 32: Peso utilizado.

Se trata de un peso de la empresa Satorius, modelo Entris 1. Es de uso interior únicamente y cuenta con una precisión de hasta 0,1 mg. Cuenta con una carga máxima de 220 g [35].

Antes de hacer el pesaje, las probetas se secan para que el agua restante no absorbidas por ellas no puedan distorsionar el resultado final. Hay que tener cautela al realizar la medición debido a la alta sensibilidad del peso. Cualquier vibración o golpe en la mesa puede concluir en un resultado erróneo. El aparato tiene una precisión de hasta una diezmilésima de gramo, pero solo se tendrá en cuenta hasta la milésima debido a la poca fiabilidad provocada por el ambiente.

4.6. Ensayo de tracción

Para el ensayo a tracción se ha utilizado una máquina de ensayos universal modelo ME-405/10 del 2007 (Figura 14) ubicada en uno de los laboratorios de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga.

Esta máquina pertenece a la gama de baja carga de ensayos quasi estáticos cumpliendo la Norma EN-7500-1 [36]. Tienen capacidades desde 0,1t hasta 50t y tiene la capacidad de poder cumplir ensayos normalizados tanto de tracción como de compresión. Se compone principalmente de dos columnas laterales, una bancada, puente superior e inferior, célula de carga, mordazas, equipo de control y un software para Pc PCD2K [36].

Tabla 6: Características ME405/10 [36]

Características	ME405/10
Capacidad máxima de carga (t)	10
Velocidad máxima de trabajo (mm/min)	200. Opcionalmente hasta 500 mm/min
Exactitud de medida	FUERZA: +/-1 % entre 1 y 100% de l nominal. (opcional +/- 0,5%) POSICIÓN: +/-1 % entre 1 y 100% de l nominal. (opcional +/- 0,5%)
Máx. luz axial libre (mm)	1200
Min. Luz axial libre (mm)	0
Luz lateral libre entre columnas (mm)	520
Dimensiones marco de ensayos. Frontal (mm)	800
Dimensiones marco de ensayos. Fondo (mm)	500
Dimensiones marco de ensayos. Altura (mm)	2100
Peso aprox. Marco de ensayos (Kg)	710
Requisitos eléctricos	220/380 VAC / 50/60 Hz +/- 10%

Para obtener resultados fiables es de vital importancia colocar las probetas en una posición idónea respecto a la mordaza.

En primer lugar, se eligen las mordazas necesarias y la célula de carga en función a la prueba y el material a usar. Una vez escogidas las mordazas propias para sujetar una probeta plana y una célula de 500 Kg (elegida en base a las propiedades a tracción del PLA) se modifica la distancia entre mordazas para poder sujetar la probeta. Posteriormente, se hará una precarga para asegurarnos de que la probeta esté totalmente vertical y así asegurar un resultado fiable (Figura 33).

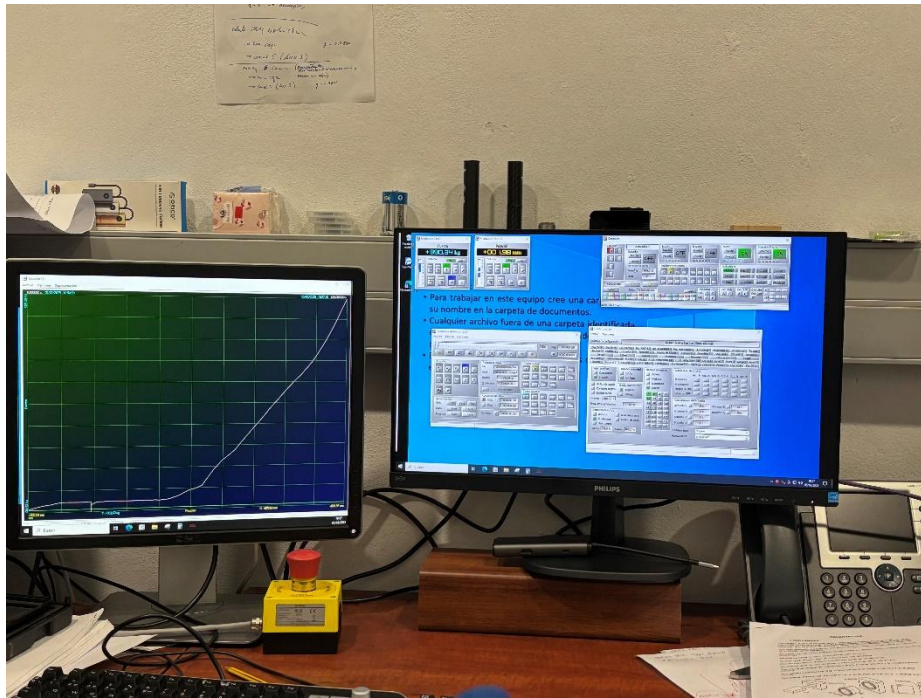


Figura 33: Programa utilizado en el ensayo a tracción.

Una vez completado los pasos anteriores, se establecerá en el software de control las características deseadas. El PCD2K permite variar las condiciones del ensayo, el propio ensayo en cuestión y a su vez muestra gráficamente el resultado del experimento con una gráfica Fuerza/Deformación. Algunos de los parámetros establecidos son:

- Velocidad del ensayo: 5mm/s
- Frecuencia de toma de datos: 2,5 Hz para tomar una mayor cantidad de datos
- Posición inicial

La velocidad del ensayo viene establecida por la Norma UNE-EN ISO 527-1: 2019 de la cual podemos extraer la siguiente tabla:

Tabla 7: Velocidades de ensayo [37]

Velocidad del ensayo V mm/min	Tolerancia %
0,125	±20
0,25	
0,5	
1	
2	
5	
10	±10
20	
50	

100	
200	
300	
500	

Es importante asegurarnos de poner la posición inicial a 0 para tener unos resultados fiables. A su vez se debe tener en cuenta el “ruido electrónico” producido por los distintos dispositivos cercanos y mantener la fuerza inicial anterior al ensayo nula.

Al terminar el ensayo, se guardará en un archivo Excel, una lista de valores (Fuerza, tiempo, desplazamiento) de cada una de las probetas traccionadas para posteriormente poder hacer un análisis de los resultados. El archivo a elegir es el 1:1 para recoger todos los datos posibles y luego hacer un posterior filtrado manual de cada probeta. El filtrado es necesario debido al hecho de que la probeta resbala inicialmente del agarre de la mordaza, lo que genera una ligera distorsión en los datos del inicio del ensayo. Otra razón se debe a la continuación de recogida de datos posterior a la ruptura de la probeta.



Figura 34: Ensayo de tracción finalizado.

4.7. Defectos superficiales

Para el estudio de los defectos superficiales y otras características posteriores a la rotura se utiliza el estereomicroscopio Stereo Discovery V12 (Figura 35), de la marca ZEISS. Cuenta con un zoom motorizado de 12 aumentos con un panel táctil SYCOP [38]. Como accesorio, cuenta con una cámara rápida 4K con documentación digital inteligente. Se trata de una cámara perteneciente a la marca mencionada anteriormente de modelo AxioCam 208 color y unos excelentes 30 fps.

Esta cámara cuenta con una gran cantidad de ventajas como la posibilidad de guardar imágenes en el modo independiente y la conexión directa a un monitor mediante un cable HDMI [39].



Figura 35: Equipo utilizado para la detección de defectos superficiales.

Posteriormente, se utiliza para poder ver con claridad defectos provocados por el ensayo a tracción y las posibles consecuencias por las que ha ocurrido la rotura. A su vez, gracias a este instrumento, se han tomado imágenes de alta resolución de la influencia de la humedad en las capas que se crean en el método FFF.

5. RESULTADOS

En este apartado se hará una comparativa sobre los datos medidos en este proyecto. Se analizará la influencia de la humedad en la geometría de la pieza, la rugosidad superficial, el peso y, especialmente, en las propiedades mecánicas del PLA.

5.1. Análisis dimensional

Después de realizar todas las mediciones de la geometría de las probetas, se ha analizado a través de una hoja de cálculo Excel los resultados obtenidos.

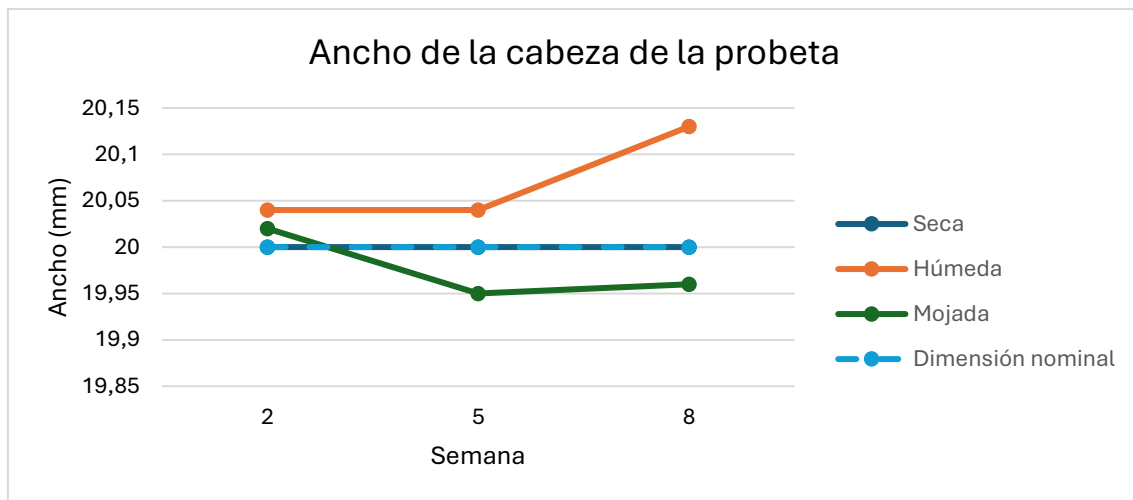


Figura 36: Medidas del ancho de la cabeza de las probetas

En la Figura 36 se puede observar la evolución de las medidas del ancho de la cabeza de las probetas a lo largo de las semanas. Las probetas húmedas aumentan de tamaño a medida que avanza el experimento, debido probablemente a la absorción de agua. Mientras tanto las sumergidas pierden tamaño como resultado de la degradación del material.

En cuanto a la longitud global de la probeta, según la Figura 37, se puede ver cómo tanto las tandas húmedas como las secas se acortan con el tiempo y la absorción de la humedad.

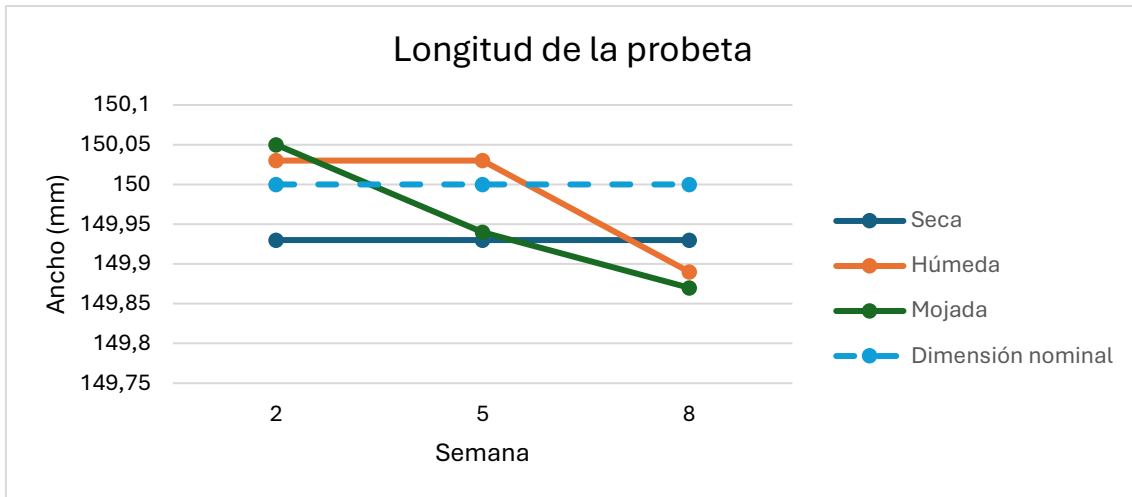


Figura 37: Medidas de la longitud global de las probetas

Por último, se va a estudiar cómo ha variado el alto de la probeta a lo largo de su longitud. Para ello se han tomado siete medidas como se ha representado en la Figura 28. En la siguiente figura se tienen las siete medidas en el eje Y.

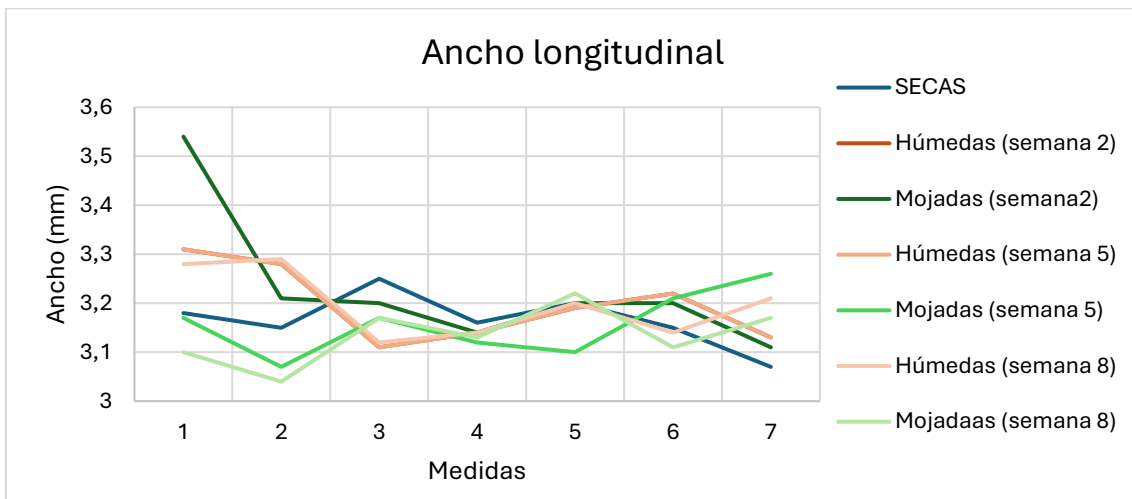


Figura 38: Medidas del grosor a lo largo de su eje longitudinal

Es complicado sacar una conclusión observando este gráfico, pero si se analiza con el promedio de los datos tomados por semana se puede volver a concluir que las húmedas aumentan ligeramente de tamaño debido a la absorción de moléculas de agua y las sumergidas pierden tamaño debido al deterioro del PLA.

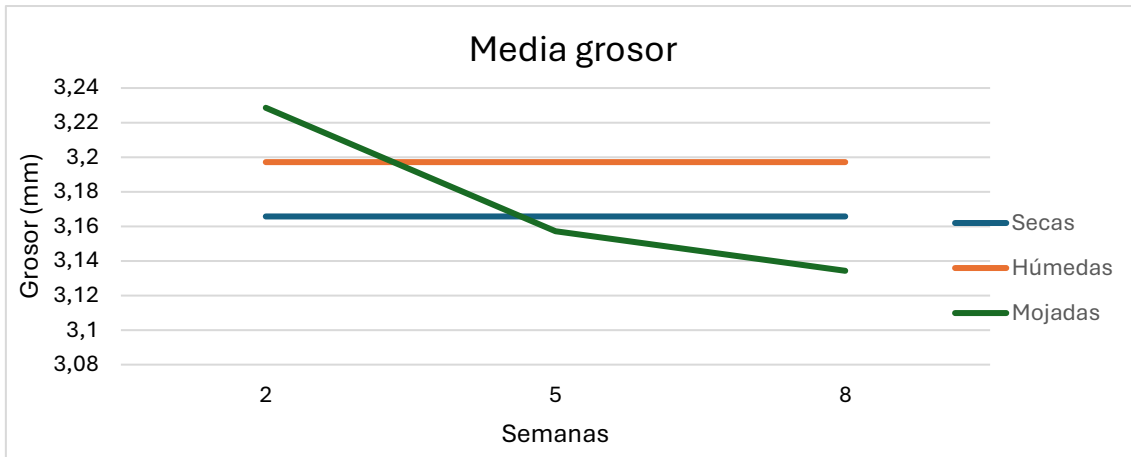


Figura 39: Promedio de los valores del grosor

Tabla 8: Promedio de las medidas del grosor

Medias grosor			
	Semana 2	Semana 5	Semana 8
Secas	3,16571429	3,16571429	3,16571429
Húmedas	3,19714286	3,19714286	3,19714286
Mojadas	3,22857143	3,15714286	3,13428571

5.2. Análisis de la rugosidad superficial

Una vez realizadas todas las medidas referentes a la rugosidad superficial, se procede a analizar los resultados obtenidos. Los parámetros estudiados son la Ra y Rz longitudinales a la capa superior de impresión de la probeta.

Estos dibujos de impresión son determinados según el patrón de relleno elegido en la configuración de la impresión. En este caso, el patrón fue cuadrangular por lo que se obtienen líneas de impresión de 45 y 270 grados.

Las mediciones se hacen en una de las cabezas de la probeta y los resultados se han tratado en una hoja de cálculo.

	2 semanas		5 semanas		8 semanas	
	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
secas	5,408	24,648	5,408	24,648	5,408	24,648
humedas	6,425	26,816	6,587	31,327	6,185	26,664
mojadas	6,261	29,281	7,086	40,035	5,92	28,104

Figura 40: Resultados Ra y Rz

Para las mediciones longitudinales de la probeta se obtienen los siguientes resultados:

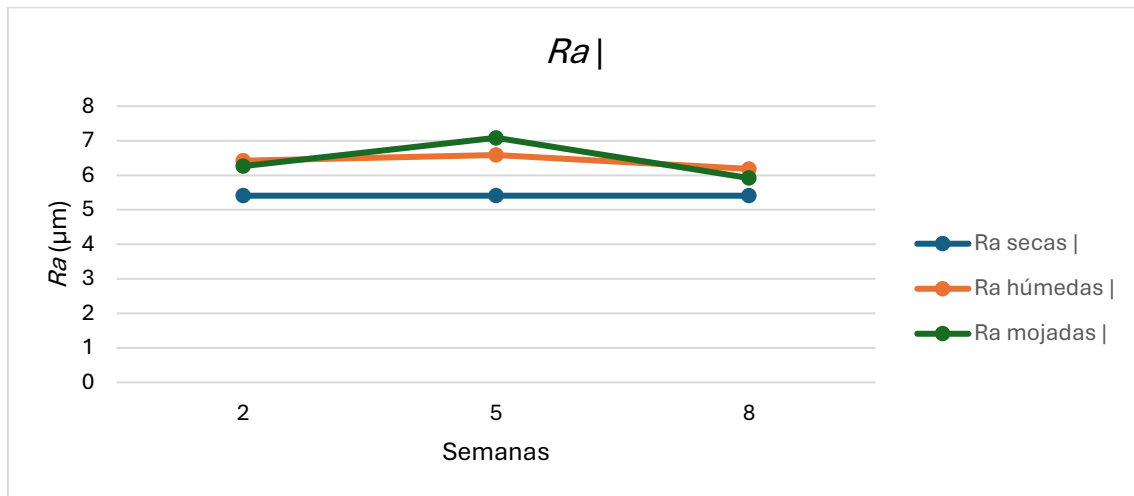


Figura 41: Resultados de Ra en el eje longitudinal

Y los resultados de Rz:

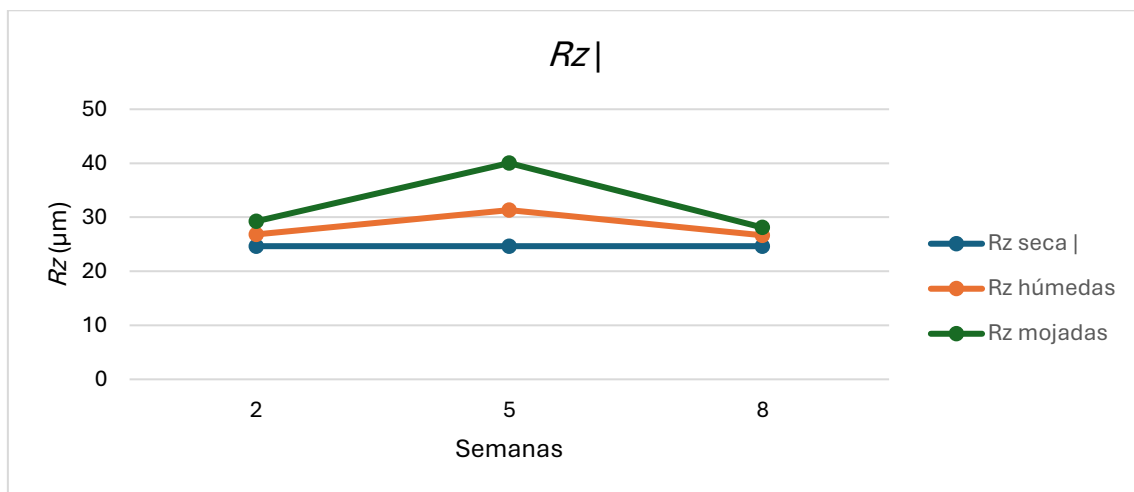


Figura 42: Resultados de Rz en el eje longitudinal

5.3. Análisis del pesaje

Para llevar a cabo el análisis de los pesos de las probetas en un periodo de tiempo, se ha decidido pesar las probetas antes de ser realizado el ensayo de tracción correspondiente. Durante el pesaje, se ha estudiado el peso de las cinco probetas de cada tanda. Con estos datos, posteriormente, se ha hecho un promedio a lo largo de las diferentes marcas de tiempo y se ha plasmado en la Figura 43.

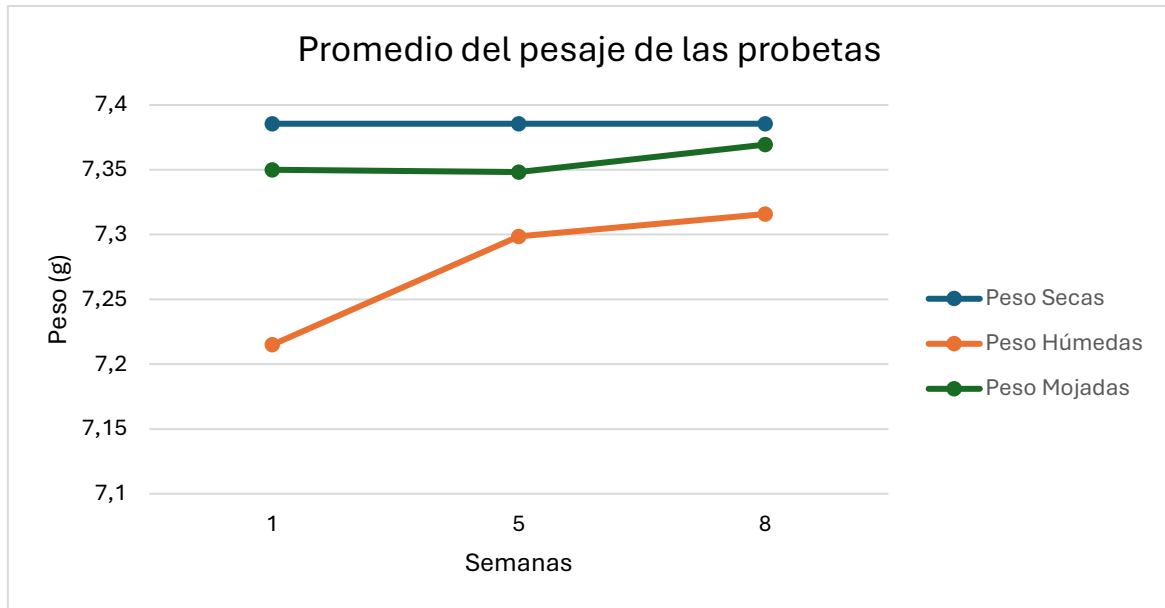


Figura 43: Promedio del pesaje de las probetas

Podemos observar un ligero aumento de peso en los grupos de probetas guardadas en un ambiente con un 98% de humedad. Esto puede ser debido a la propiedad higroscópica del PLA mencionada en el apartado 3.6.

En cuanto a las probetas que han permanecido sumergidas en agua, no se nota un aumento considerable de peso como era de esperar al ver lo sucedido con las húmedas. Puede ser debido a la absorción de agua y a su vez con la disolución del PLA en un ambiente tan húmedo.

Para comprobar el deterioro del material y evitar los errores de pesaje debido al agua sobrante no absorbida por las probetas, se ha vuelto a hacer el pesaje pasado un tiempo. Las probetas se han mantenido secándose en un lugar propicio para no ser expuestas a ambientes perjudiciales como al sol y se han mantenido abiertas para facilitar la circulación del aire.

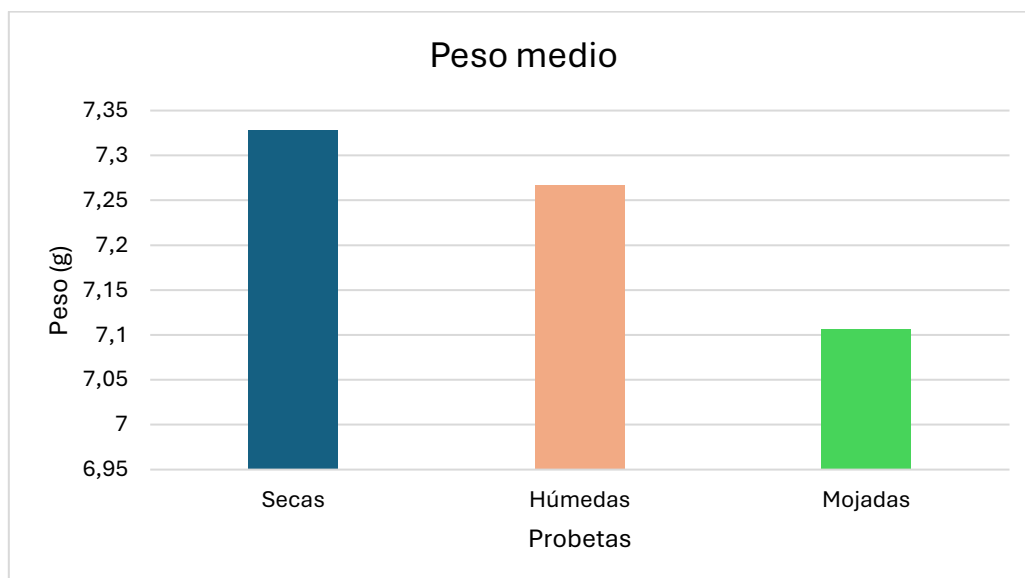


Figura 44: Resultado de la media del segundo pesaje

Como se puede ver en la Figura 44 se puede ver con más claridad los efectos de la absorción del agua sobre el PLA. Las probetas húmedas han perdido sobre un 0,84% del peso total, por el contrario, las probetas que han permanecido sumergidas pierden un 3,02% de su peso.

	Pesajes en seco					MEDIA	Pérdida
Secas	7,323	7,32	7,324	7,328	7,349	7,3288	
Húmedas	7,321	7,338	7,313	7,051	7,314	7,2674	0,84%
Mojadas	7,124	7,109	7,107	7,111	7,084	7,107	3,03%

5.4. Ensayo de tracción

5.4.1. Rotura de las probetas

La rotura de las probetas es un aspecto muy importante a tener en cuenta en un ensayo de tracción para saber realmente cómo son las propiedades del material utilizado, según se ha comentado en el apartado 4.1. A continuación, se va a mostrar el resultado de aplicar la geometría utilizada extraída de la norma ISO 527-4:

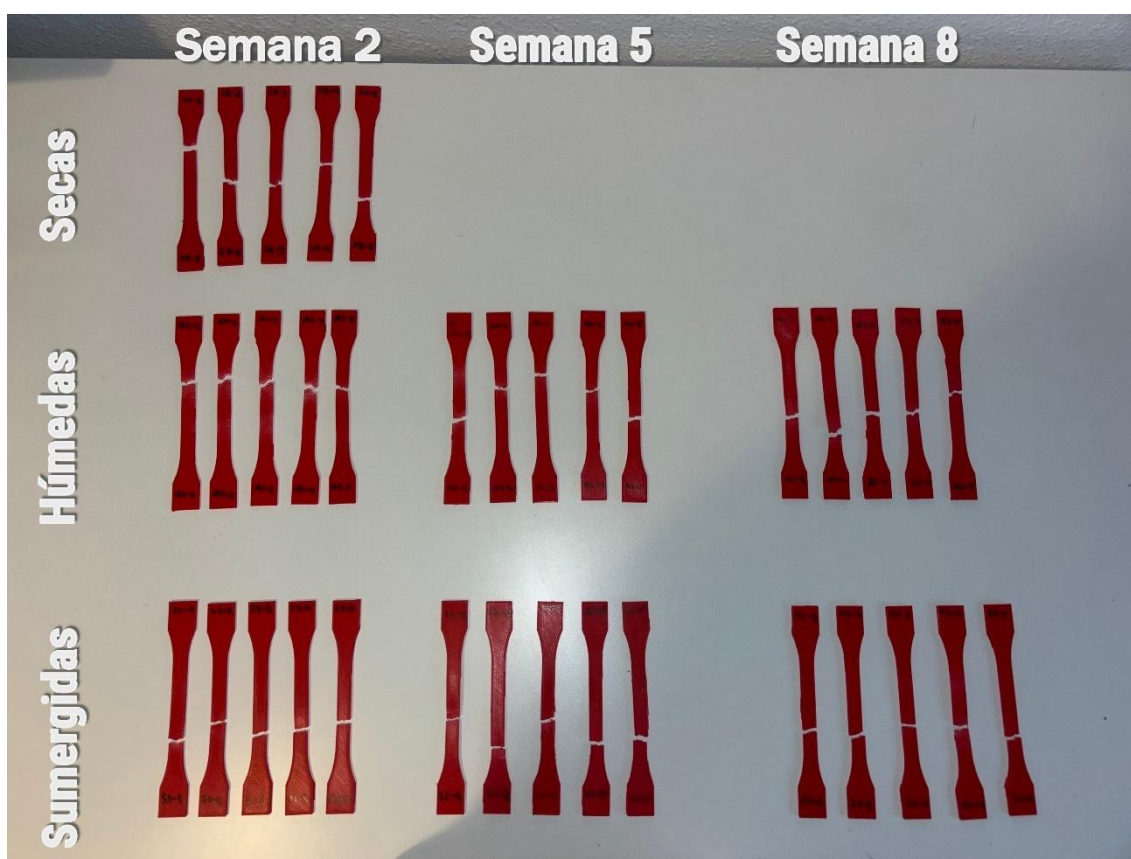


Figura 45: Rotura de probetas

Como se puede comprobar en la Figura 45, todas las probetas traccionadas han llegado a su límite de rotura en el estrechamiento entre los dos radios de acuerdo (área deseada). La geometría elegida (en particular los radios de acuerdo) remedia en cierta medida uno de los

problemas más comunes en los ensayos de tracción con probetas de PLA impresas mediante el método FFF.



Figura 46: Aproximación del área deseada de rotura.

5.4.2. Comparaciones

En este apartado se va a realizar una comparativa a través de gráficas y tablas de las propiedades mecánicas obtenidas a través del ensayo de tracción. Se hará un seguimiento de los tres tipos de probetas a través de las ocho semanas de duración del experimento. El objetivo final es sacar conclusiones de cómo afecta la humedad en las probetas impresas por el método FFF utilizando PLA a lo largo de un periodo sostenido de tiempo.

Las comparaciones serán a través de los máximos y mínimos de cada tanda de probetas para ver realmente como influye el ambiente. También serán representada por colores y tipo de líneas distintos para cada tipo de probeta, que se mantendrán a lo largo de los apartados.

- *Comparativa por tipo de probeta*

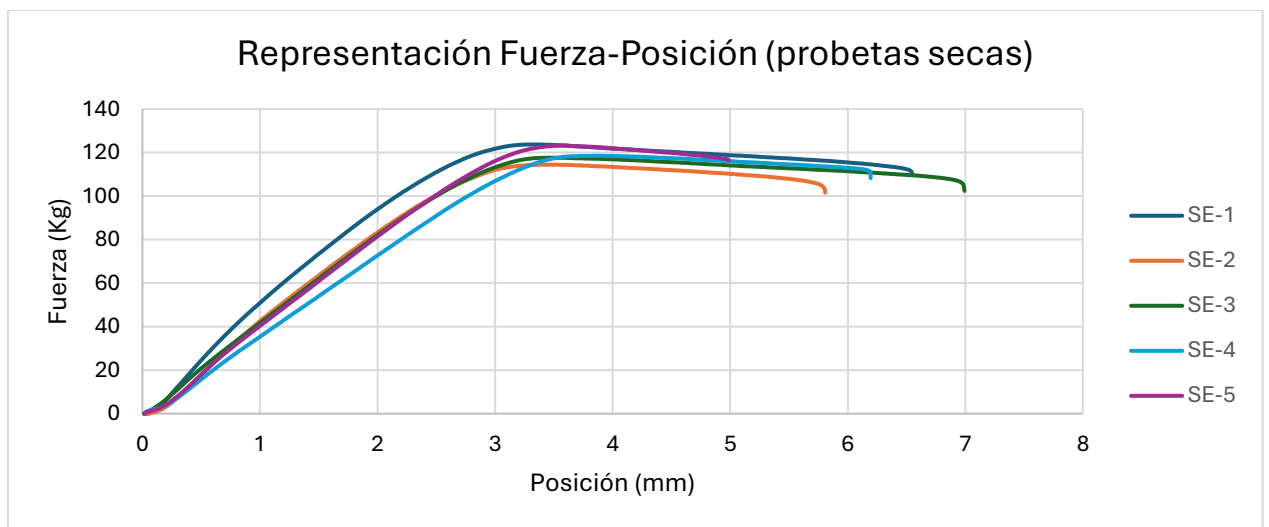


Figura 47: Representación Fuerza-Posición de las probetas secas

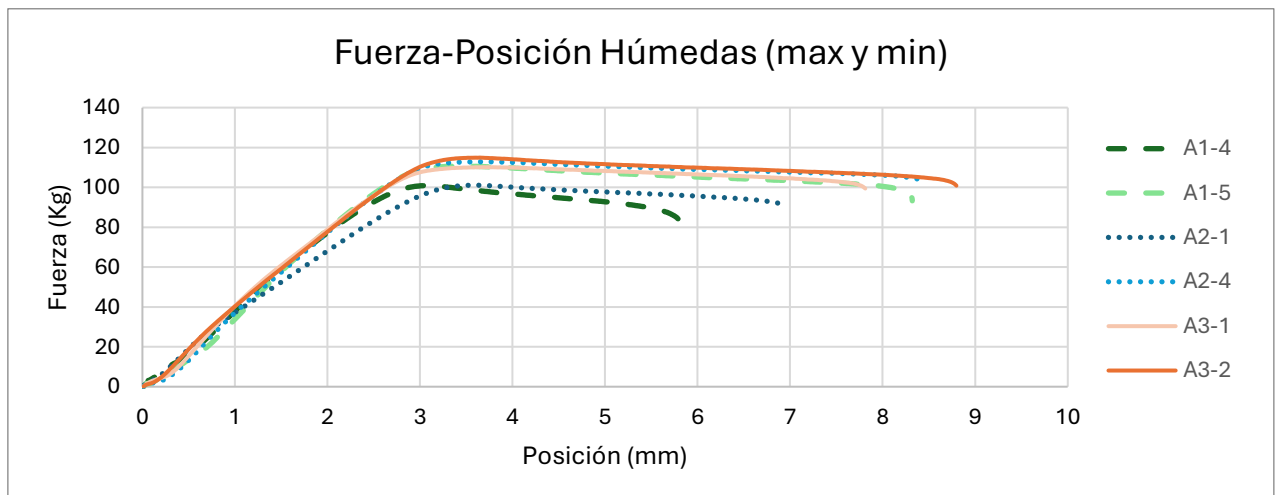


Figura 48: Representación Fuerza-Posición de las probetas húmedas

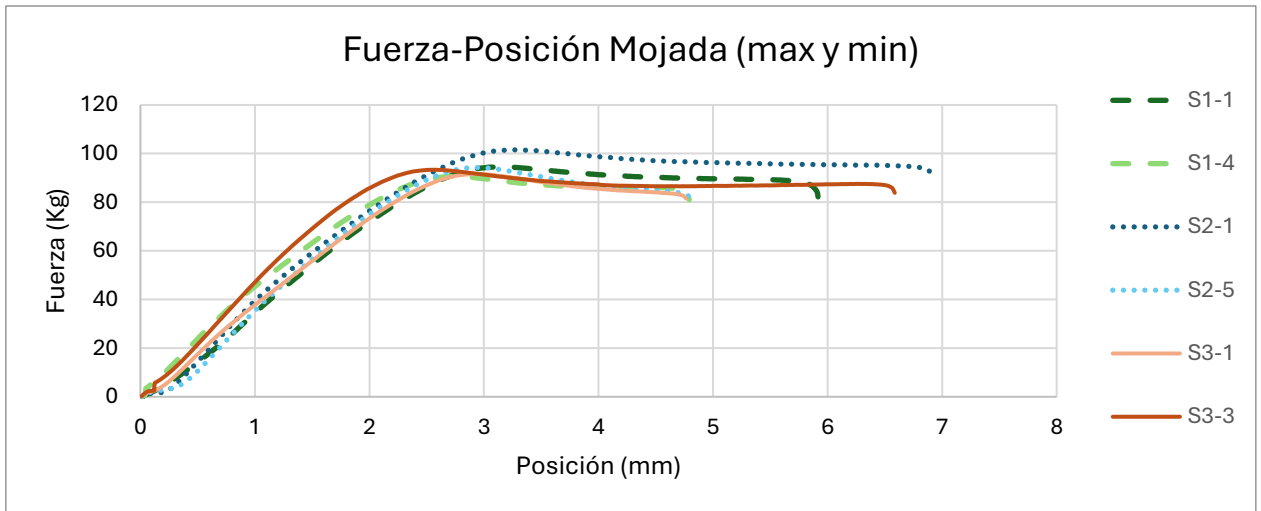


Figura 49: Representación Fuerza-Posición de las probetas mojadas

En las anteriores figuras se observan los datos de los distintos tipos de probetas a lo largo de las ocho semanas. En la Figura 47 se puede ver cada una de las probetas de la tanda seca en una representación Fuerza-Posición en la que destaca las fuerzas máximas y una rotura prematura de la SE-5.

En los dos gráficos posteriores se muestran las probetas máximas y mínimas de cada tanda, agrupada por colores (verdes las de la primera semana, azules las de la quinta y naranjas las de la octava). En primer lugar, se percibe un aumento de la fuerza máxima y posición final de rotura en la octava semana del ensayo. En las mojadas, se puede apreciar como la fuerza pico aumenta en la quinta semana y posteriormente vuelve a disminuir en la octava, sugiriendo una mejora de las propiedades del material en cuanto a fuerza máxima soportable alrededor de ese periodo.

- *Comparativa por semanas*

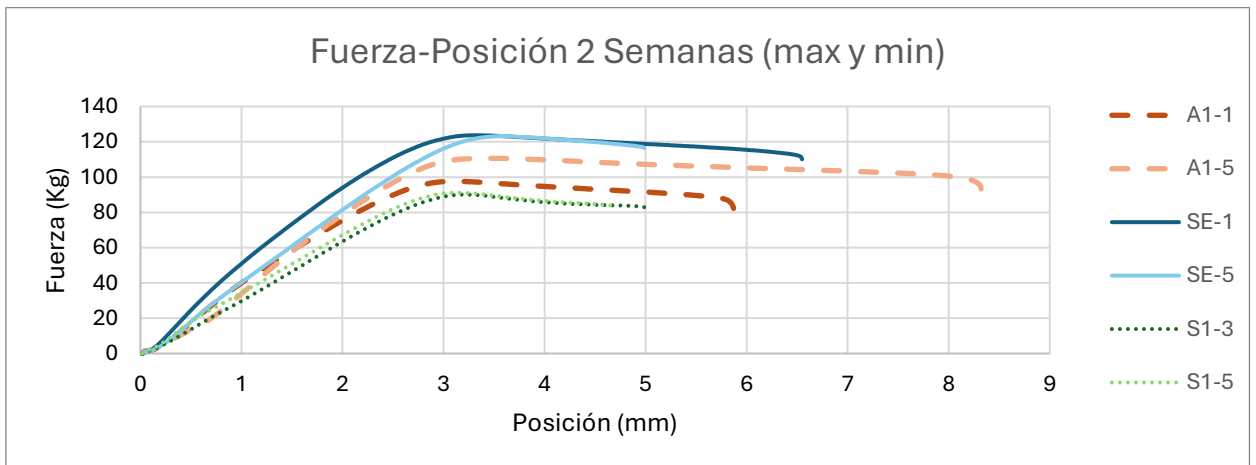


Figura 50: Representación Fuerza-Posición de la segunda semana

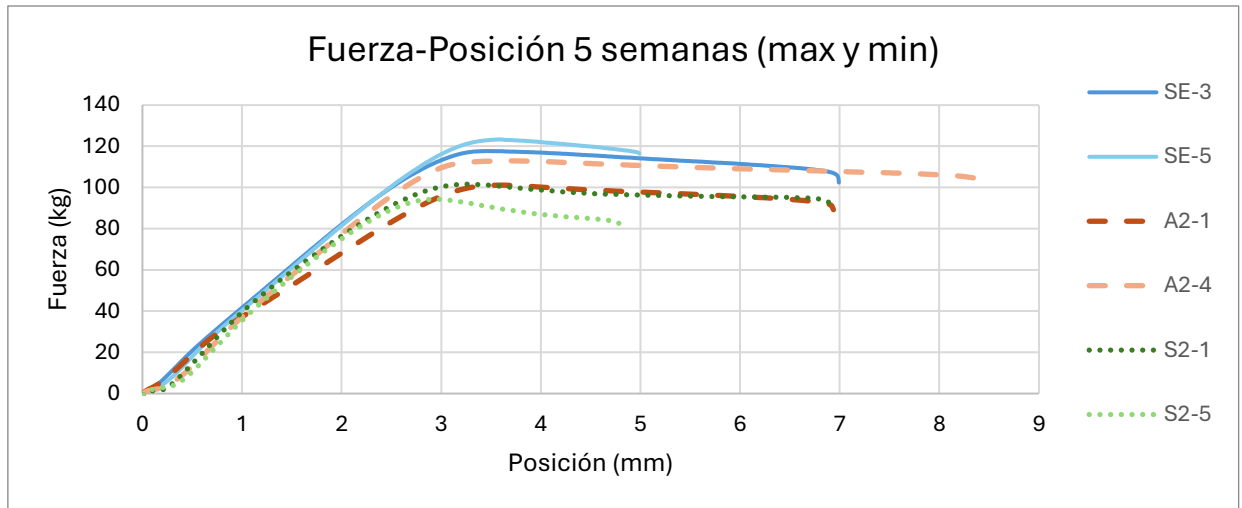


Figura 51: Representación Fuerza-Posición de la quinta semana

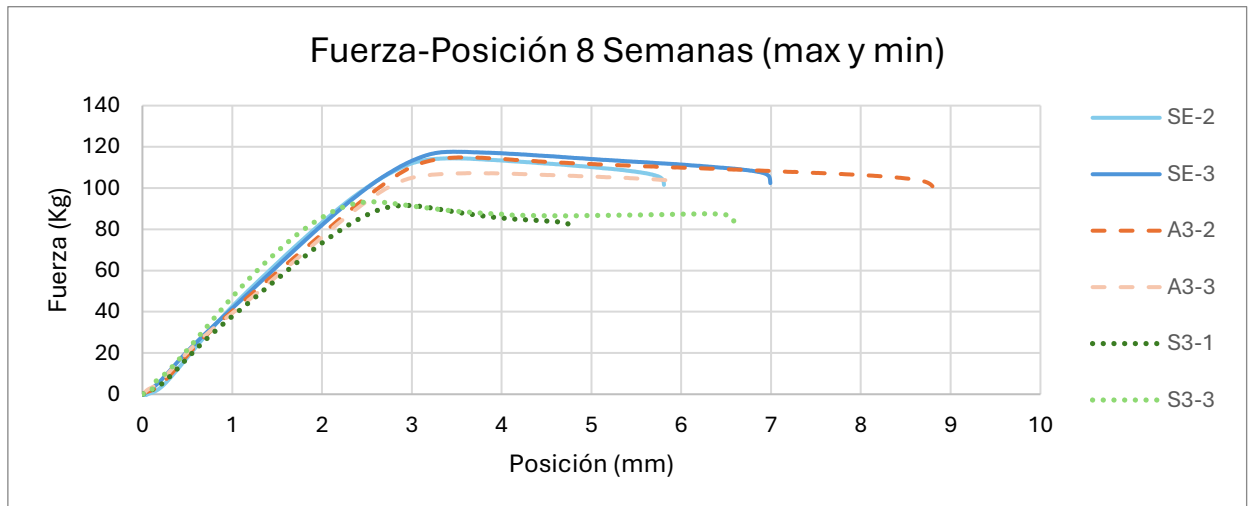


Figura 52: Representación Fuerza-Posición de la octava semana

De estas figuras destaca la diferencia del comportamiento en los distintos tipos de probetas. Las probetas que han sido expuestas a un grado de humedad del 90% experimentan una deformación mayor antes de llegar a la rotura. Es decir, tienen un mejor comportamiento plástico. También es destacable como la fuerza pico es mayor en las tandas secas y disminuye en mayor cantidad según la humedad a la que es expuesta.

Las probetas que se han mantenido sumergidas en agua experimentan un deterioro en sus propiedades mecánicas, tanto en fuerza máxima como en punto de rotura probablemente debido a la degradación del material.

▪ *Comparativa por Tensión*

Tabla 9: Datos de tensión máxima y tensión de rotura

PUNTO MÁXIMO			
	Semana 2	Semana 5	Semana 8
Secas	39,07	39,07	39,07
Húmedas	33,28	37,52	35,78
Mojadas	29,77	31,64	30,49

PUNTO ROTURA			
	Semana 2	Semana 5	Semana 8
Secas	35,21	35,21	35,21
Húmedas	27,45	33,31	32,65
Mojadas	26,29	28,07	27,61

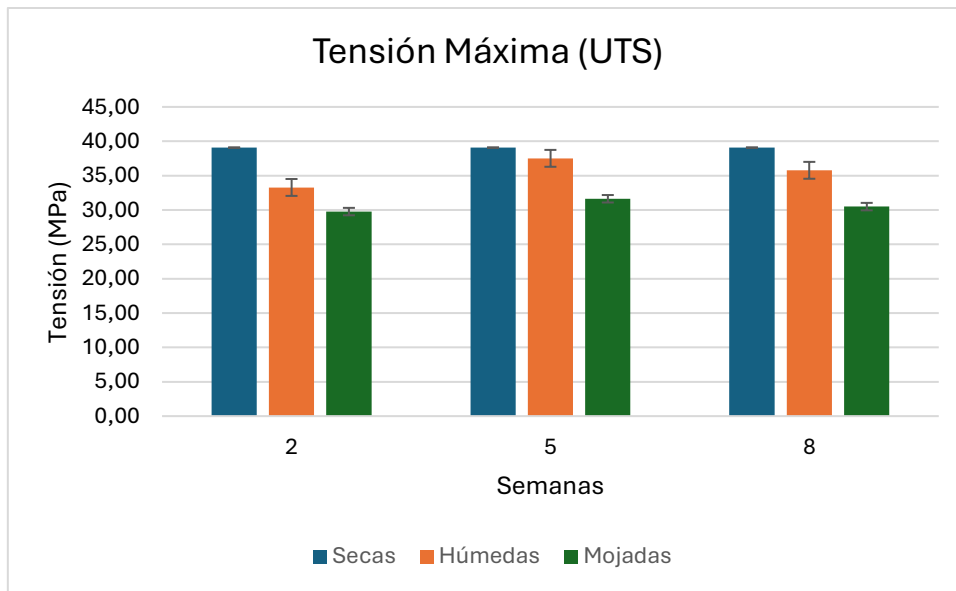


Figura 53: Representación de la tensión máxima (UTS)

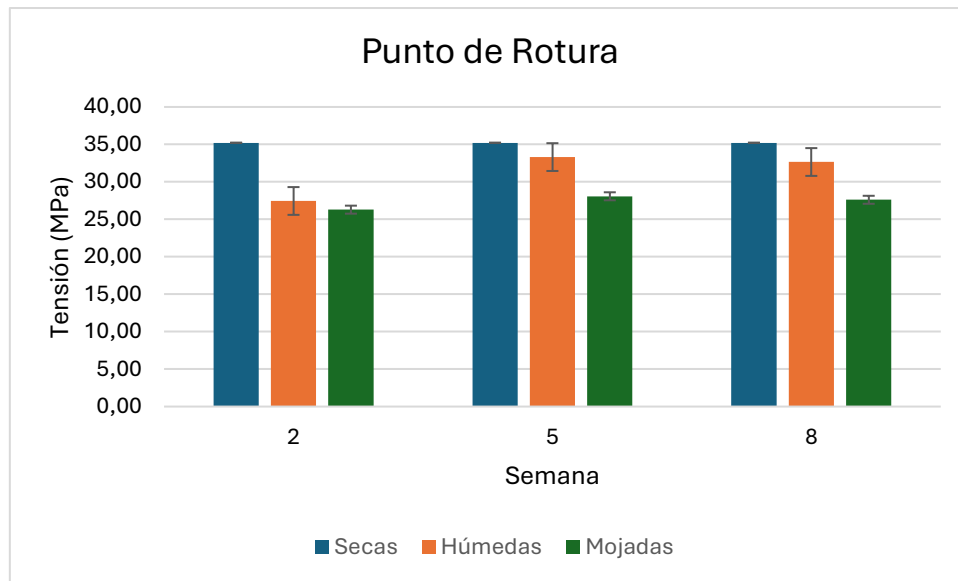


Figura 54: Representación de los puntos de rotura

Una gran forma de apreciar el comportamiento de las probetas es observar la tensión máxima de rotura o UTS y la tensión en la que se sufre la rotura. Para ello se ha necesitado la constante de la gravedad estándar y del área transversal de la probeta.

En la Figura 53 y Figura 54 se puede visualizar y confirmar lo visto en los apartados anteriores. Se observa una mejora en las propiedades del material de las tandas guardadas en la campana de humedad en la semana cinco seguida de un descenso de las mismas en la semana ocho. En cuanto a las probetas sumergidas no se puede apreciar un gran cambio a lo largo de las semanas, pero se puede asegurar una respuesta inferior al ensayo de tracción que las húmedas y las secas de forma global.

Otra forma de comprobarlo es observando la Figura 55.

- *Comparativa global media*

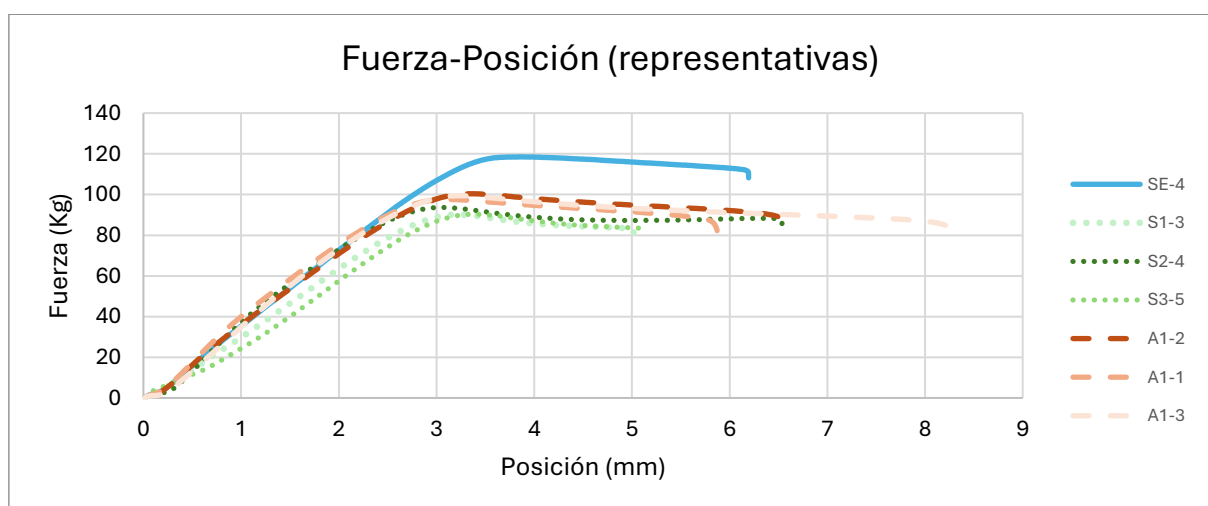


Figura 55: Representación Fuerza-Posición global

En esta gráfica se representa la media de cada una de las tandas estudiadas a lo largo del proyecto.

6. CONCLUSIONES

Del presente trabajo se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- En primer lugar, la utilización de la ISO 527-4 permite a las probetas impresas por fabricación aditiva llegar a la rotura en la zona deseada. El aumento de los radios de acuerdo suaviza las concentraciones de tensiones como se ha podido observar en el apartado experimental del proyecto. Esto permite saber realmente cuáles son los límites del material a estudiar.
- En lo referente a la influencia de la humedad en las dimensiones de las probetas se ha podido comprobar que, en casi todas las medidas, las probetas que han permanecido en un ambiente húmedo aumentan de tamaño. Mientras tanto las que han sido sumergidas durante un periodo de tiempo pierden tamaño, probablemente debido a la degradación más acusada del material en el agua.
- La humedad produce un aumento de los parámetros Ra y Rz. La rugosidad superficial empeora al verse afectada por el ambiente. Es destacable que para ambos parámetros aumentan en la quinta semana y vuelven a disminuir en la octava. Aun así, la diferencia es prácticamente despreciable de aproximadamente 2 micrómetros.
- Se puede observar una disminución del peso global de las probetas expuestas a la humedad en las primeras semanas. A lo largo de las semanas, las probetas húmedas aumentan de peso debido a la absorción de moléculas de agua del ambiente. Las sumergidas varían ligeramente el peso a pesar de estar mucho más expuestas al agua. Esto se debe a la continua degradación del material en el medio.
- Como conclusión de la influencia de una humedad elevada en el ambiente se puede decir que permite al material tener un comportamiento plástico más sostenido. El PLA al absorber cierta cantidad de humedad alcanza antes su límite elástico, pero permite una mayor deformación del material antes de su fractura. Las probetas húmedas han resultado ser las probetas con una mayor deformación final.
- En el caso de las sumergidas se puede comentar la disminución de sus propiedades mecánicas. No solo son las probetas que llegan antes a su límite elástico, sino que también son las que menos fuerza aplicada necesitan para lograrlo. Se resalta la rápida aparición de su fractura en la mayoría de los casos. Como se ha repetido a lo largo del proyecto estos resultados se deben a la degradación del plástico sumergido completamente en un medio acuoso.

7. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

En este último apartado se proponen diferentes formas de continuar con el estudio de la influencia de la humedad en la fabricación aditiva. El mero hecho de ser un simple trabajo de fin de grado limitado por tiempo y recursos deja muchas líneas de investigación abiertas para ser profundizadas y muchos hallazgos por ser descubiertos en un futuro. Las propuestas son las que se mencionan a continuación:

- El experimento ha tenido lugar durante tres periodos de tiempo, llegando a un total de ocho semanas donde (sobre todo en las probetas que han permanecido sumergidas) se ha podido apreciar una degradación del material utilizado. Ampliar el tiempo del ensayo y ver lo que sucede después de las ocho primeras semanas puede llevar a conocer mejor el comportamiento del PLA en su estado de descomposición. También puede ayudar a comprobar si es posible el uso de este tipo de elementos como recipientes de líquidos en un tiempo prolongado.
- Este trabajo se ha realizado con PLA pero es interesante, con más tiempo y recursos, saber cómo se comportan otros materiales comunes en la fabricación aditiva como el ABS en distintos tipos de ambientes húmedos.
- Otra posible línea de investigación puede ser replicar el estudio realizado, pero variando los parámetros de impresión como puede ser la densidad de relleno o la velocidad de impresión. A su vez se podría ver si al disminuir la densidad de relleno, la probeta absorbería más humedad y cambiaría notoriamente su peso.
- Repetir los ensayos con distintos tipos de medios, es decir, agua destilada, de grifo, agua salada, etc. Parámetros como la salinidad del agua utilizada o el PH que contenga puede afectar a la descomposición del material.
- Puede ser de gran interés cambiar el ensayo utilizado para llevar a la rotura las probetas. En este trabajo se ha utilizado únicamente la tracción, pero se podría ver cómo reacciona a la fatiga, compresión, etc.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Andreas Gebhardt, Julia Kessler, y Laura Thurn, « Basics of 3D Printing Technology», en *3D Printing Understanding Additive Manufacturing*, 2.ª ed., vol. 1, 2019, pp. 1-32.
- [2] A. Mahmood, T. Akram, H. Chen, y S. Chen, «On the Evolution of Additive Manufacturing (3D/4D Printing) Technologies: Materials, Applications, and Challenges», 1 de noviembre de 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/polym14214698.
- [3] A. R. Torrado y D. A. Roberson, «Failure Analysis and Anisotropy Evaluation of 3D-Printed Tensile Test Specimens of Different Geometries and Print Raster Patterns», *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 16, n.º 1, pp. 154-164, feb. 2016, doi: 10.1007/s11668-016-0067-4.
- [4] A. Abdela, M. Vandaele, S. Haenen, B. Buffel, B. Sirahbizu, y F. Desplentere, «Moisture Absorption Characteristics and Subsequent Mechanical Property Loss of Enset-PLA Composites», *Journal of Composites Science*, vol. 7, n.º 9, sep. 2023, doi: 10.3390/jcs7090382.
- [5] M. Lucero, Q. Villagómez, L. Alejandro, A. Caracheo, G. R. Mondragón, y R. R. Castro, «REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE LA FABRICACIÓN DE MULTIMATERIALES POR MEDIO DE IMPRESIÓN 3D», 2017. [En línea]. Disponible en: <http://itcelaya.edu.mx/ojs/index.php/pistas>
- [6] B. M. Dominguez Martínez, D. M. Perez Santos, A. L. Martínez Hernández, y C. Velasco-Santos, «Impresión 4D para desarrollo de materiales sustentables y funcionales con enfoque a la industria alimentaria», *Tendencias en energías renovables y sustentabilidad*, vol. 3, n.º 1, pp. 111-120, nov. 2024, doi: 10.56845/terys.v3i1.215.
- [7] L. Lendvai, I. Fekete, S. K. Jakab, G. Szarka, K. Verebélyi, y B. Iván, «Influence of environmental humidity during filament storage on the structural and mechanical properties of material extrusion 3D-printed poly(lactic acid) parts», *Results in Engineering*, vol. 24, dic. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.103013.
- [8] C. Valdivia Miranda, «Impresoras 3D: el futuro del modelado», 2020.
- [9] Andreas Gebhardt, Julia Kessler, y Laura Thurn, «2 - Additive Manufacturing Processes/3D Printing», en *3D Printing Understanding Additive Manufacturing*, 2.ª ed., vol. 1, 2019, pp. 33-70.
- [10] Kasper E G Diemel, Bas van Bochove, y Jukka V Seppälä, «Additive Manufacturing of Bioactive Poly(trimethylene carbonate)/β-Tricalcium Phosphate Composites for Bone Regeneration», *PubMed*, vol. 2, pp. 366-375, 2020.
- [11] «Ingeniería Biomédica: la contribución de la impresión 3D en Medicina». Accedido: 11 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.future-healthcare.ec/es/insights/76-ingenieria-biomedica-la-contribucion-de-la-impresion-3d-en-medicina.html>
- [12] Rafiq I. Noorani, *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. NY,USA: Wiley, 2005.
- [13] J. G. Odremán R, «Nota Técnica IMPRESIÓN 3D EN LA INDUSTRIA: UN ACERCAMIENTO A LA TECNOLOGÍA Y SU INFLUENCIA EN LA INDUSTRIA PETROLERA», 2014.
- [14] S. Prajapati, J. K. Sharma, S. Kumar, S. Pandey, y M. K. Pandey, «A review on comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS, TPU, and PETG manufactured engineering components by using fused deposition modelling», *Mater Today Proc*, may 2024, doi: 10.1016/j.matpr.2024.05.018.

- [15] J. Hiemenz, «LA IMPRESION 3D CON FDM: ¿Cómo funciona?»
- [16] J. León B., J. G. Díaz-Rodríguez, y O. A. González-Estrada, «Daño en partes de manufactura aditiva reforzadas por fibras continuas», *Revista UIS Ingenierías*, vol. 19, n.º 2, pp. 161-175, jun. 2020, doi: 10.18273/revuin.v19n2-2020018.
- [17] O. A. Mohamed, S. H. Masood, y J. L. Bhowmik, «Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects», *Adv Manuf*, vol. 3, n.º 1, pp. 42-53, mar. 2015, doi: 10.1007/s40436-014-0097-7.
- [18] K. L. C. Alvarez, R. F. C. Lagos, y M. Aizpun, «Influencia del porcentaje de relleno en la resistencia mecánica en impresión 3D, por medio del método de Modelado por Deposición Fundida (FDM)», *Ingeniare*, vol. 24, pp. 17-24, 2016, doi: 10.4067/S0718-33052016000500003.
- [19] B. Yin, Q. He, y L. Ye, «Effects of deposition speed and extrusion temperature on fusion between filaments in single-layer polymer films printed with FFF», *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, vol. 4, n.º 4, pp. 270-276, oct. 2021, doi: 10.1016/j.aiepr.2021.07.002.
- [20] M. Doshi, A. Mahale, S. K. Singh, y S. Deshmukh, «Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects», en *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2021, pp. 2269-2275. doi: 10.1016/j.matpr.2021.10.003.
- [21] «Raft, Skirt y Brim. Cuándo usar cada una y cómo configurarlas». Accedido: 24 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://filament2print.com/es/blog/raft-skirt-brim-impresion-3d?slug=raft-skirt-brim-impresion-3d&module=smartblog>
- [22] «Ficha Técnica Raise3D Pro 2».
- [23] L. Ranakoti *et al.*, «Critical Review on Polylactic Acid: Properties, Structure, Processing, Biocomposites, and Nanocomposites», 1 de junio de 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/ma15124312.
- [24] Roffelsen 3D, «Roffelsen3D_FFF_PLA_Material-Data-Sheet_v8», 2024, *Roffelsen 3D*.
- [25] M. N. Salinas y Y. L. Galiano, «Planta de producción de ácido poliláctico (PLA) a partir de ácido láctico».
- [26] D. Agudelo, M. Montoya, y C. Hernandez, «Caracterización mecánica a tensión de impresiones 3D de PLA y ABS modeladas por deposición fundida», 2019, doi: 10.5281/zenodo.3387679.
- [27] Mecapedia, «Ensayo de tracción». Accedido: 24 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.mecapedia.uji.es/pages/ensayo_de_traccion.html
- [28] M. Głowacki, K. Skórczewska, K. Lewandowski, P. Szewczykowski, y A. Mazurkiewicz, «Effect of Shock-Variable Environmental Temperature and Humidity Conditions on 3D-Printed Polymers for Tensile Properties», *Polymers (Basel)*, vol. 16, n.º 1, ene. 2024, doi: 10.3390/polym16010001.
- [29] M.C. Adrián Méndez Prieto, «Consideraciones para el procesamiento del ácido poliláctico (PLA)», Consideraciones para el procesamiento del ácido poliláctico (PLA).
- [30] R. F. Faidallah, M. M. Hanon, V. Vashist, A. Habib, Z. Szakál, y I. Oldal, «Effect of Different Standard Geometry Shapes on the Tensile Properties of 3D-Printed Polymer», *Polymers (Basel)*, vol. 15, n.º 14, jul. 2023, doi: 10.3390/polym15143029.
- [31] «NORMA ISO 527-4:1997. Determinación de las propiedades en tracción - Parte 4: Condiciones de ensayo para plásticos compuestos isotrópicos y ortotrópicos reforzados con fibras. Organización Internacional de Estandarización, Ginebra», 1997.

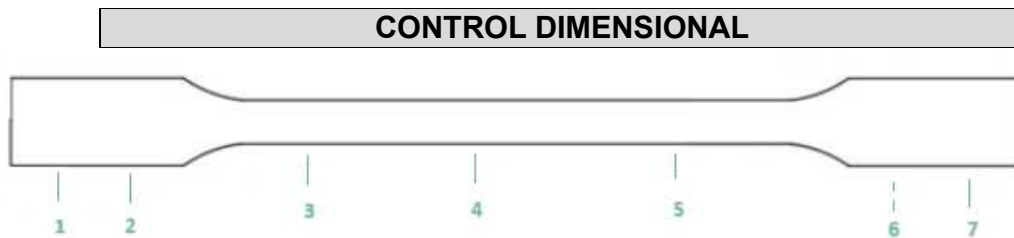
- [32] «Calibre pie de rey digital Iroko 0-150mm / 0-6"». Accedido: 5 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.unceta.es/productos/metrologia-y-dinamometria/calibre-pie-de-rey-digital-zidD11081>
- [33] «Parámetros de Rugosidad: ¿Qué son? Citar y enunciar alguno de los parámetros más frecuentes». Accedido: 24 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://lim.ii.udc.es/docencia/din-proind/docs/respuestas/p29f.htm>
- [34] «RUGOSIMETRO MITUTOYO SJ-210». Accedido: 24 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.instrumentacion-metrologia.es/Rugosimetro-178-560-01-Mitutoyo-Surftest-SJ-210>
- [35] «Technical Specifications». Accedido: 5 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://shop.sartorius.com/medias/Data-Sheet-Entris-.pdf?context=bWVfZdGVyYGRvY3VtZW50c3w2NzUwNDB8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfGFEQTFMMmhpT1M4NU1qazROakl6TVRBek1EQTJ8ZDAyNGQzNzYwZDIzMGZmNjRmZjk4ZWE3ZmUxMTM5M2I1YTYxMWFiMzA2ZTEwZjY3NzU2M2JkNjNiNGNjOWRjOA>
- [36] «SERIE ME-405». Accedido: 24 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: www.servosis.com
- [37] «UNE-EN ISO 527-1: 2019. Plásticos Determinación de las propiedades en tracción - Parte 1: Principios generales. Organización Internacional de Estandarización, Ginebra», 2019.
- [38] «ZEISS SteREO Discovery.V12 El estereomicroscopio modular con zoom motorizado de 12 aumentos». Accedido: 5 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.zeiss.com/microscopy/es/productos/microscopios-opticos/estereomicroscopios-y-microscopios-de-zoom/stereo-discovery-v12.html#highlights>
- [39] «ZEISS AxioCam 208 color La cámara rápida para microscopio 4K para una documentación digital inteligente». Accedido: 5 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.zeiss.com/microscopy/es/productos/camaras/axiocam-208-color.html>

8. ANEXOS

8.1. Hoja de datos I

SEMANAS	2
ID. ENSAYO	SE-X (secas)

DATOS PROCESO	Tª extrusión (°C)	215	Relleno (%)	100
	v impresión (mm/s)	60	Material	PLA
	e capa (mm)	0,20	Color	Rojo
	Tª cama (°C)	60	Carcasas	2
	Tª ambiente (°C)	22	Probeta	1



	1	2	3	4	5	6	7	Media
Ancho (mm)	3,18	3,15	3,25	3,16	3,20	3,15	3,07	3,17



	1	2	3	Media	4	5
Medida (mm)	10	10	10,02	10,01	20	149,93

MEDIDAS ADICIONALES

RUGOSIDAD SUPERFICIAL (µm)		MEDIA PESO (g)
Ra	Rz	Primer pesaje: 7,3855 Segundo pesaje: 7,3288
5,408	24,648	

SEMANAS	2
ID. ENSAYO	A1-Y (Húmedas)

DATOS PROCESO	Tª extrusión (°C)	215	Relleno (%)	100
	v impresión (mm/s)	60	Material	PLA
	e capa (mm)	0,20	Color	Rojo
	Tª cama (°C)	60	Carcasas	2
	Tª ambiente (°C)	22	Probeta	1

CONTROL DIMENSIONAL



	1	2	3	4	5	6	7	Media
Ancho (mm)	3,31	3,28	3,11	3,14	3,19	3,22	3,13	3,20



	1	2	3	Media	4	5
Medida (mm)	9,98	9,99	9,99	9,99	20,04	150,03

MEDIDAS ADICIONALES

RUGOSIDAD SUPERFICIAL (µm)		MEDIA PESO (g)
Ra	Rz	Primer pesaje: 7,215 Segundo pesaje: 7,267
6,425	26,816	

SEMANAS	2
ID. ENSAYO	S1-X (Mojadas)

DATOS PROCESO	Tª extrusión (°C)	215	Relleno (%)	100
	v impresión (mm/s)	60	Material	PLA
	e capa (mm)	0,20	Color	Rojo
	Tª cama (°C)	60	Carcasas	2
	Tª ambiente (°C)	22	Probeta	1

CONTROL DIMENSIONAL



	1	2	3	4	5	6	7	Media
Ancho (mm)	3,54	3,21	3,20	3,14	3,20	3,20	3,11	3,26



	1	2	3	Media	4	5
Medida (mm)	10,03	10,04	10,03	10,03	20,02	150,05

MEDIDAS ADICIONALES

RUGOSIDAD SUPERFICIAL (µm)		MEDIA PESO (g)
Ra	Rz	Primer pesaje: 7,35 Segundo pesaje: 7,107
6,261	29,281	

SEMANAS	5
ID. ENSAYO	A2-X (húmedas)

DATOS PROCESO	Tª extrusión (°C)	215	Relleno (%)	100
	v impresión (mm/s)	60	Material	PLA
	e capa (mm)	0,20	Color	Rojo
	Tª cama (°C)	60	Carcasas	2
	Tª ambiente (°C)	22	Probeta	1

CONTROL DIMENSIONAL



	1	2	3	4	5	6	7	Media
Ancho (mm)	3,31	3,28	3,11	3,14	3,19	3,22	3,13	3,20



	1	2	3	Media	4	5
Medida (mm)	9,98	9,99	9,99	9,99	20,04	150,03

MEDIDAS ADICIONALES

RUGOSIDAD SUPERFICIAL (µm)		MEDIA PESO (g)
Ra	Rz	Primer pesaje: 7,300 Segundo pesaje: 7,267
6,587	31,327	

SEMANAS	5
ID. ENSAYO	S2-X (Mojadas)

DATOS PROCESO	Tª extrusión (°C)	215	Relleno (%)	100
	v impresión (mm/s)	60	Material	PLA
	e capa (mm)	0,20	Color	Rojo
	Tª cama (°C)	60	Carcasas	2
	Tª ambiente (°C)	22	Probeta	1

CONTROL DIMENSIONAL



	1	2	3	4	5	6	7	Media
Ancho (mm)	3,17	3,07	3,17	3,12	3,10	3,21	3,26	3,16



	1	2	3	Media	4	5
Medida (mm)	9,99	9,98	9,98	9,98	19,95	149,94

MEDIDAS ADICIONALES

RUGOSIDAD SUPERFICIAL (µm)		MEDIA PESO (g)
Ra	Rz	Primer pesaje: 7,348 Segundo pesaje: 7,107
7,086	40,035	

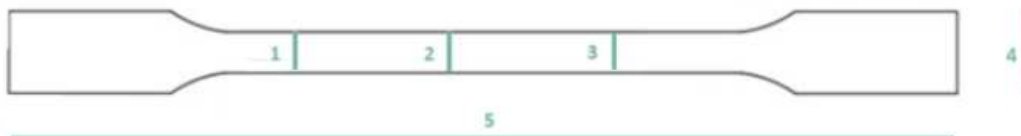
SEMANAS	8
ID. ENSAYO	A3-X (húmedas)

DATOS PROCESO	Tª extrusión (°C)	215	Relleno (%)	100
	v impresión (mm/s)	60	Material	PLA
	e capa (mm)	0,20	Color	Rojo
	Tª cama (°C)	60	Carcasas	2
	Tª ambiente (°C)	22	Probeta	1

CONTROL DIMENSIONAL



	1	2	3	4	5	6	7	Media
Ancho (mm)	3,28	3,29	3,12	3,14	3,20	3,14	3,21	3,20



	1	2	3	Media	4	5
Medida (mm)	10,29	10,04	10,02	10,11	20,13	149,89

MEDIDAS ADICIONALES

RUGOSIDAD SUPERFICIAL (µm)		MEDIA PESO (g)
Ra	Rz	Primer pesaje: 7,316 Segundo pesaje: 7,267
6,185	26,664	

SEMANAS	8
ID. ENSAYO	S3-X (Mojadas)

DATOS PROCESO	Tª extrusión (°C)	215	Relleno (%)	100
	v impresión (mm/s)	60	Material	PLA
	e capa (mm)	0,20	Color	Rojo
	Tª cama (°C)	60	Carcasas	2
	Tª ambiente (°C)	22	Probeta	1

CONTROL DIMENSIONAL



	1	2	3	4	5	6	7	Media
Ancho (mm)	3,10	3,04	3,17	3,13	3,22	3,11	3,17	3,13



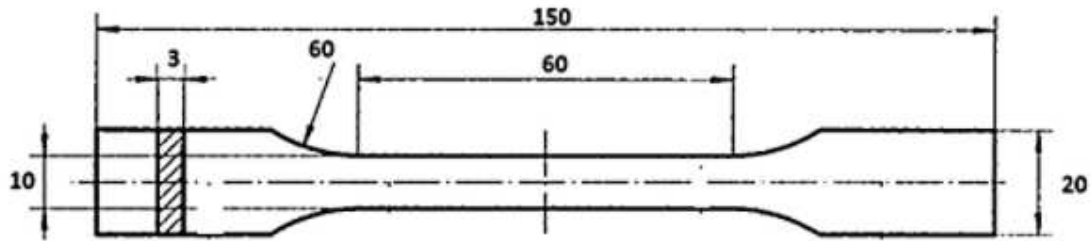
	1	2	3	Media	4	5
Medida (mm)	10,02	10,00	10,06	10,02	19,96	149,87

MEDIDAS ADICIONALES

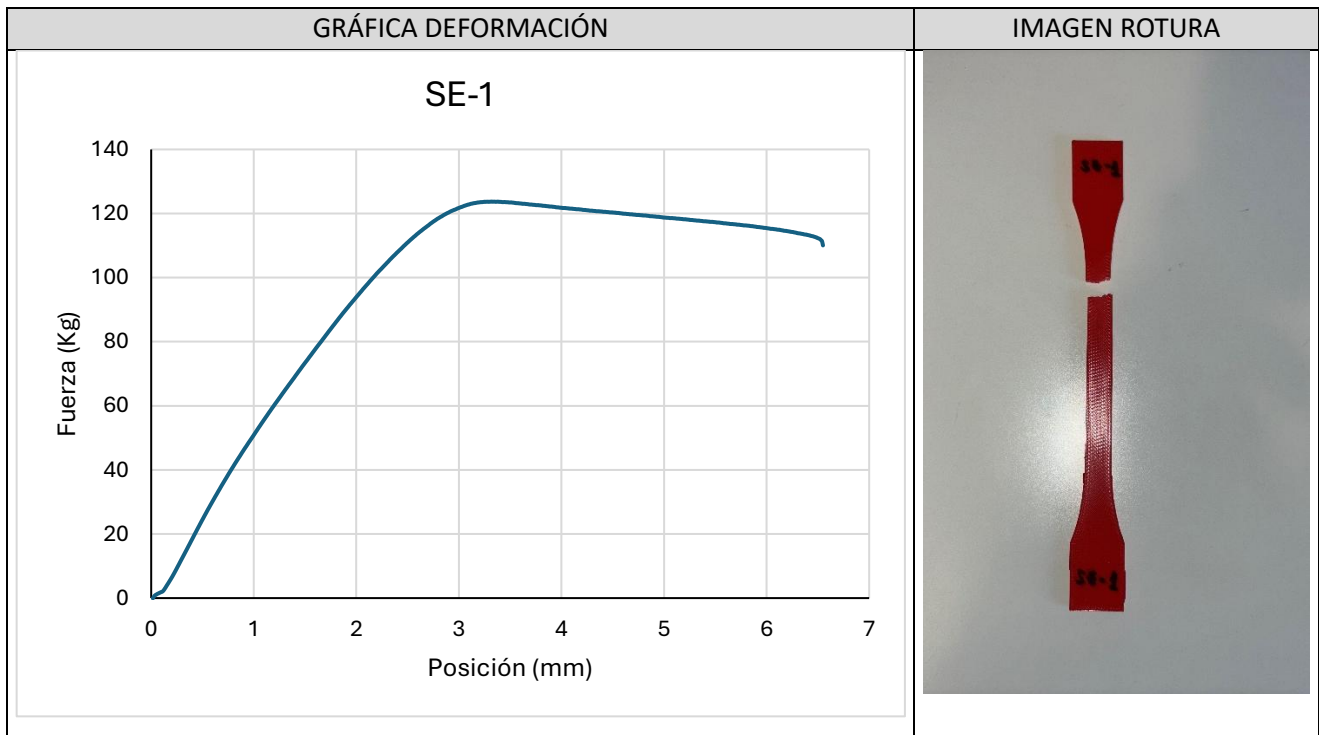
RUGOSIDAD SUPERFICIAL (µm)		MEDIA PESO (g)
Ra	Rz	Primer pesaje: 7,369 Segundo pesaje: 7,107
5,92	28,104	

8.2. Hoja de datos II

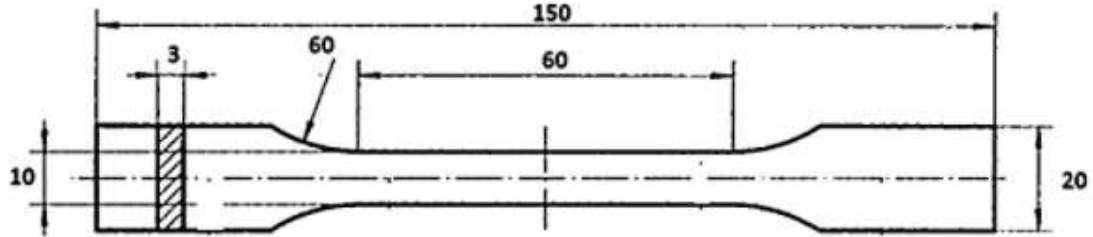
ID. ENSAYO	SE-1
-------------------	-------------



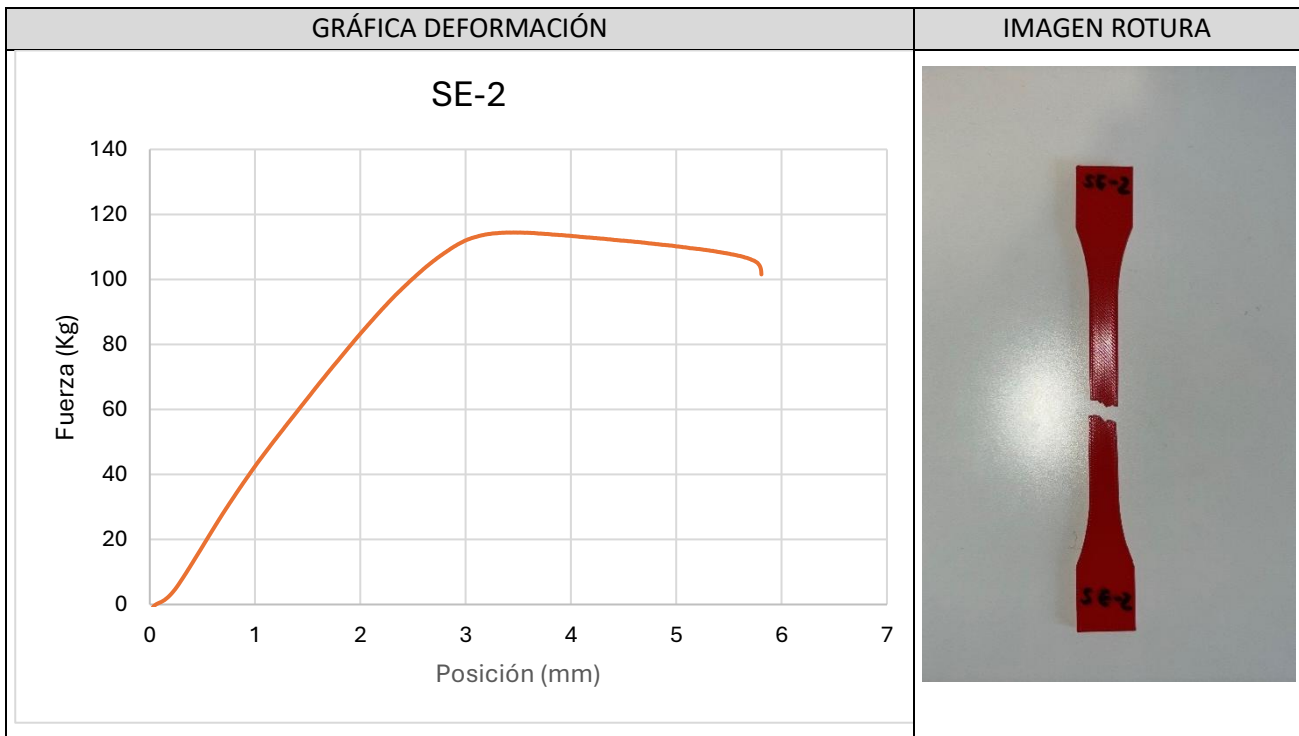
DATOS PROCESO	Fecha ensayo	20/12/2024	Hora ensayo	10:51:01
	Probeta	1	Tiempo empleado (s)	79,979
	Posición inicial (mm)	0,015	Posición final (mm)	6,549
	Fuerza inicial (kg)	-0,049	Fuerza final (kg)	110,051
	Fuerza pico (kg)	123,733	Nº muestras	1024



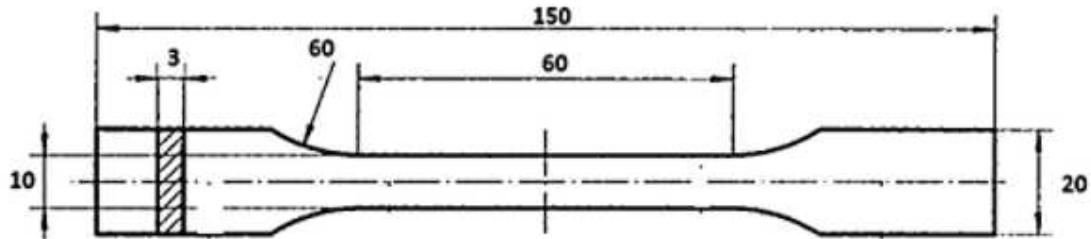
ID. ENSAYO	SE-2
-------------------	-------------



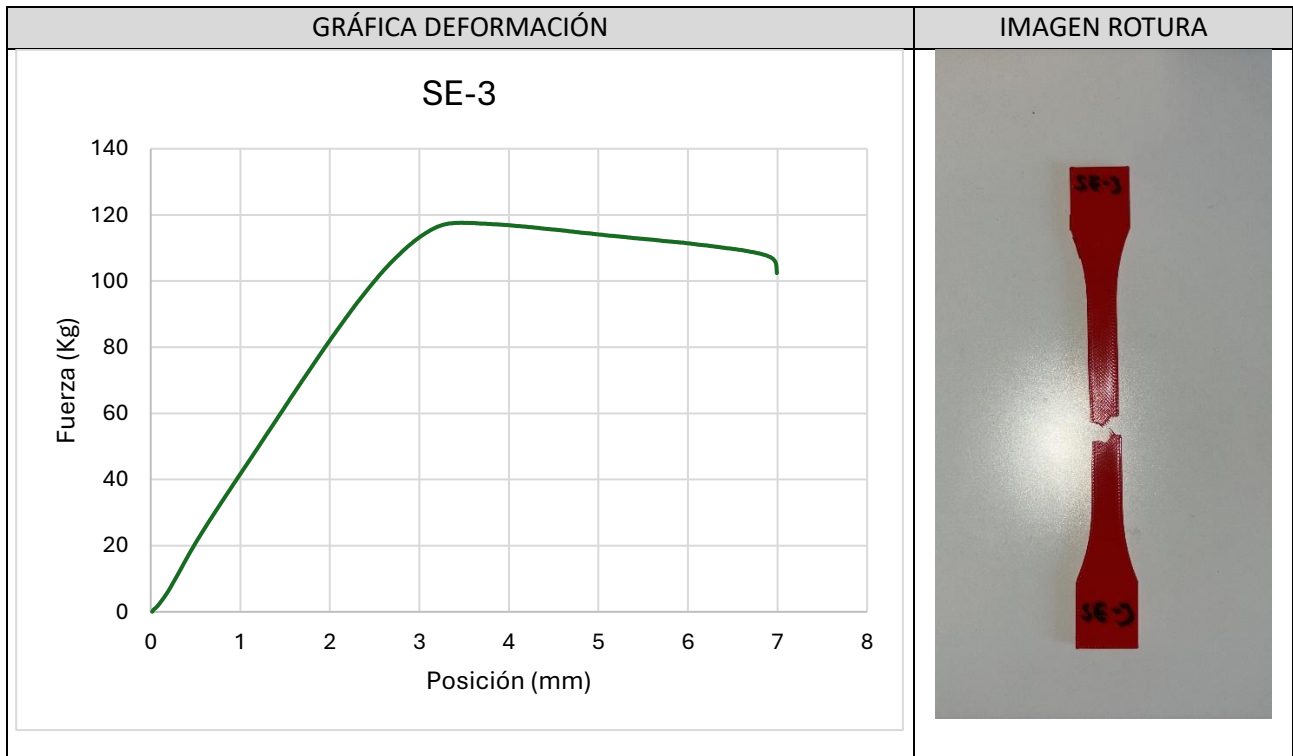
DATOS PROCESO	Fecha ensayo	20/12/2024	Hora ensayo	10:56:00
	Probeta	2	Tiempo empleado (s)	69,540
	Posición inicial (mm)	0,016	Posición final (mm)	5,807
	Fuerza inicial (kg)	-1,468	Fuerza final (kg)	101,537
	Fuerza pico (kg)	114,456	Nº muestras	3672



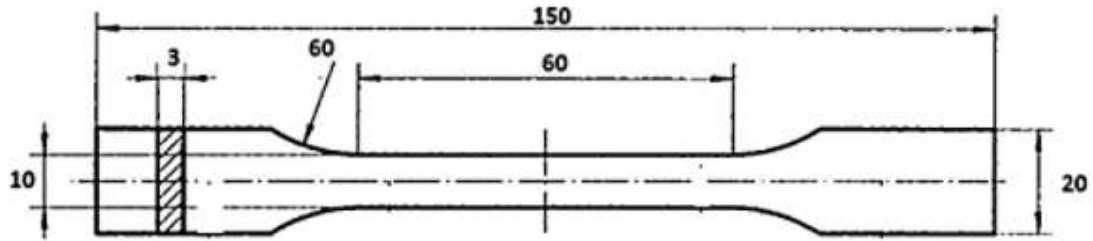
ID. ENSAYO	SE-3
-------------------	------



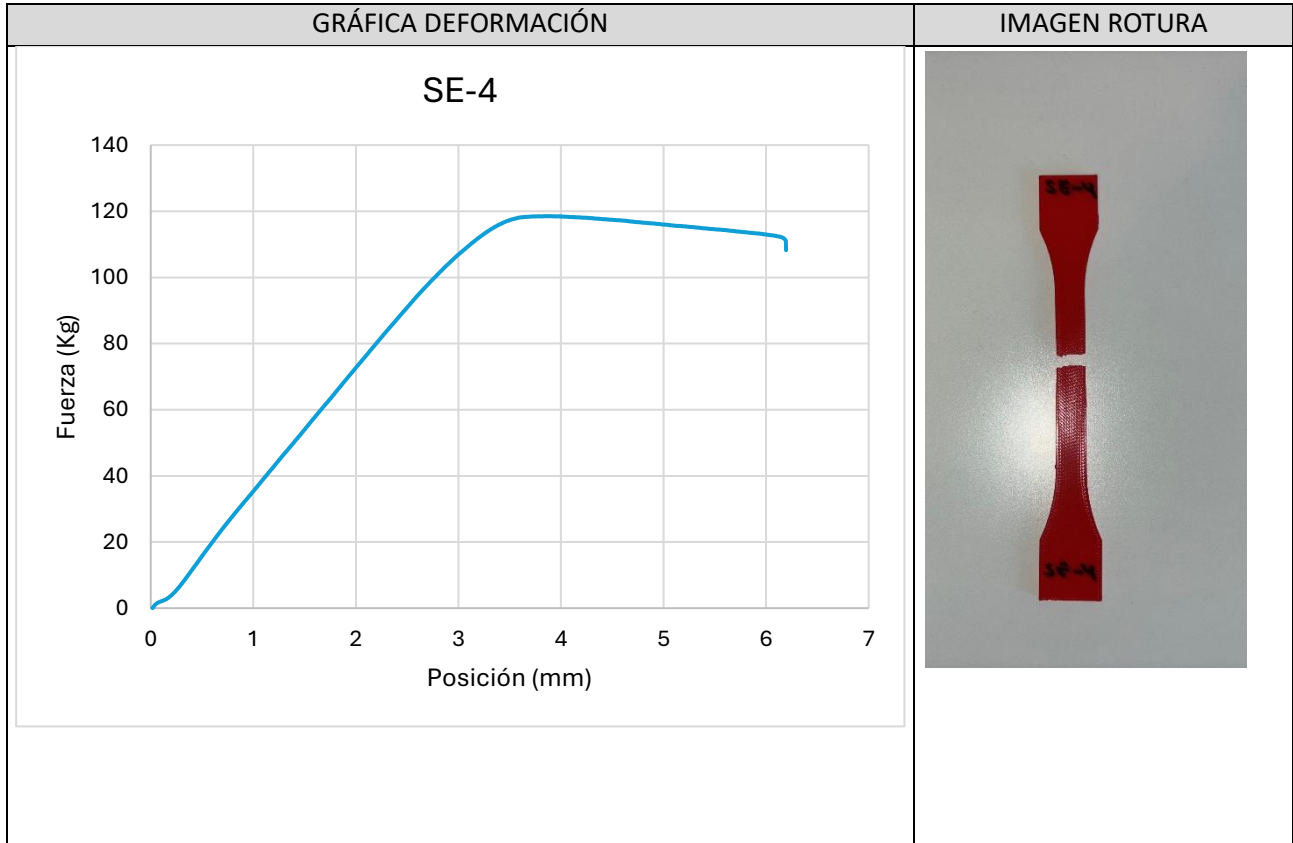
DATOS PROCESO	Fecha ensayo	20/12/2024	Hora ensayo	11:00:50
	Probeta	3	Tiempo empleado (s)	83,760
	Posición inicial (mm)	0,016	Posición final (mm)	6,991
	Fuerza inicial (kg)	0,023	Fuerza final (kg)	102,386
	Fuerza pico (kg)	117,652	Nº muestras	4481



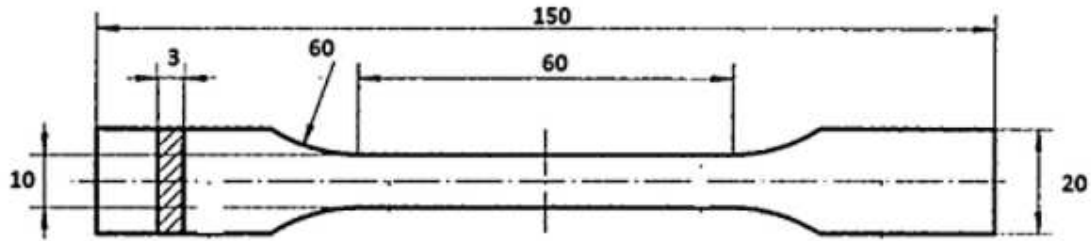
ID. ENSAYO	SE-4
-------------------	------



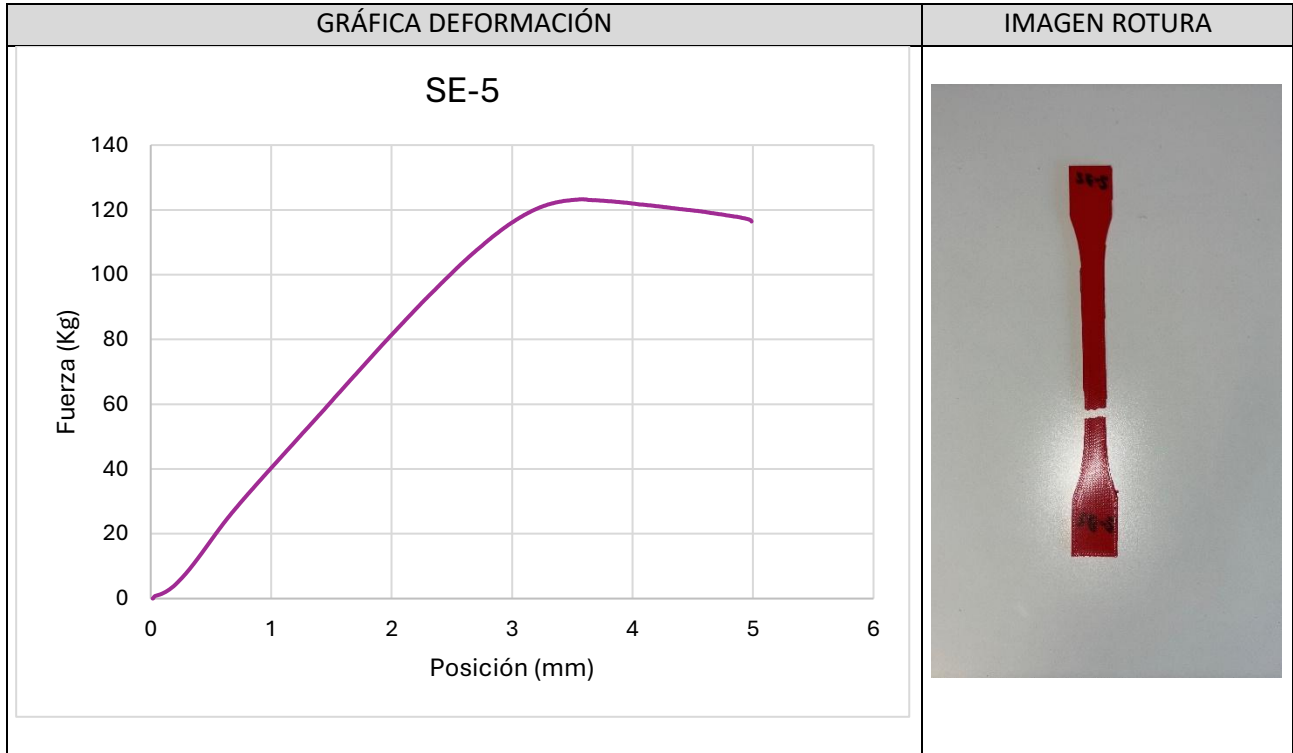
DATOS PROCESO	Fecha ensayo	20/12/2024	Hora ensayo	11:03:33
	Probeta	4	Tiempo empleado (s)	74,179
	Posición inicial (mm)	0,016	Posición final (mm)	6,194
	Fuerza inicial (kg)	0,040	Fuerza final (kg)	108,219
	Fuerza pico (kg)	118,539	Nº muestras	3925



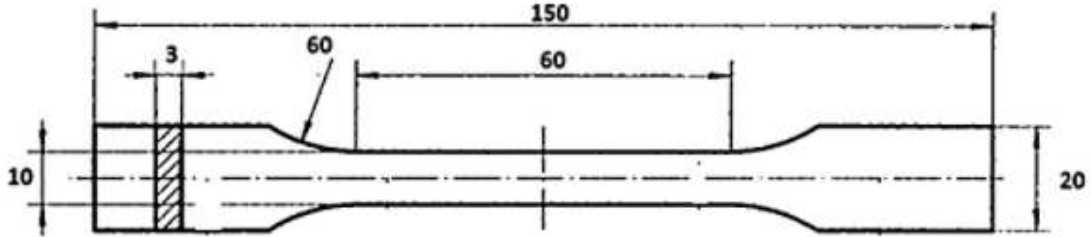
ID. ENSAYO	SE-5
-------------------	------



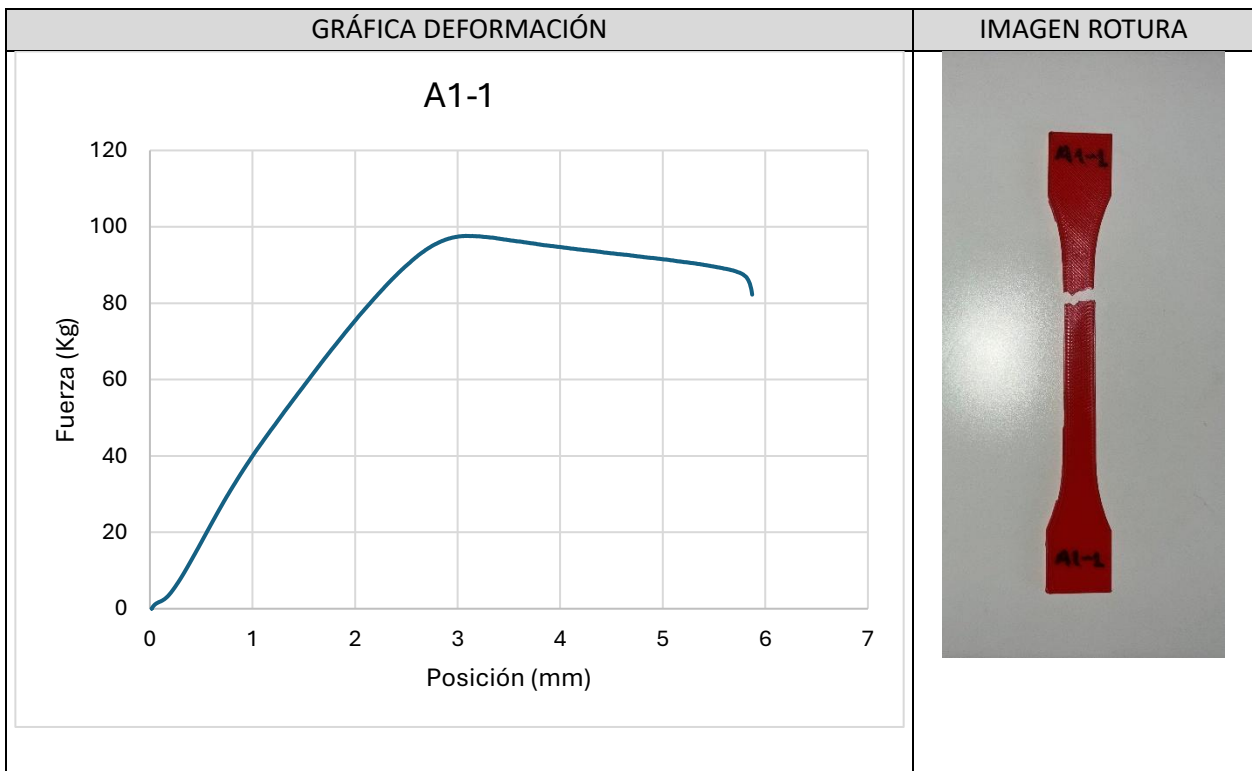
DATOS PROCESO	Fecha ensayo	20/12/2024	Hora ensayo	11:06:28
	Probeta	5	Tiempo empleado (s)	59,719
	Posición inicial (mm)	0,015	Posición final (mm)	4,987
	Fuerza inicial (kg)	0,025	Fuerza final (kg)	116,399
	Fuerza pico (kg)	123,285	Nº muestras	3250



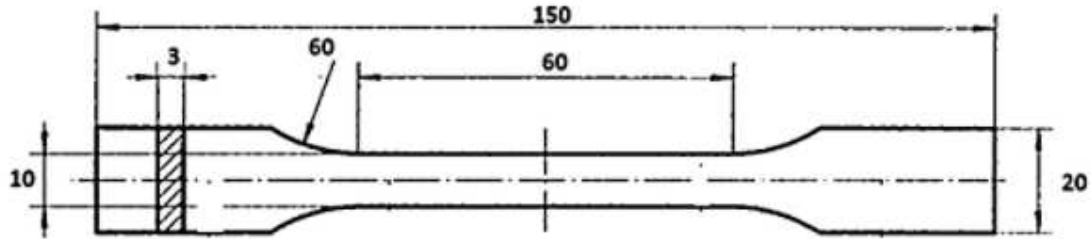
ID. ENSAYO	A1-1
-------------------	------



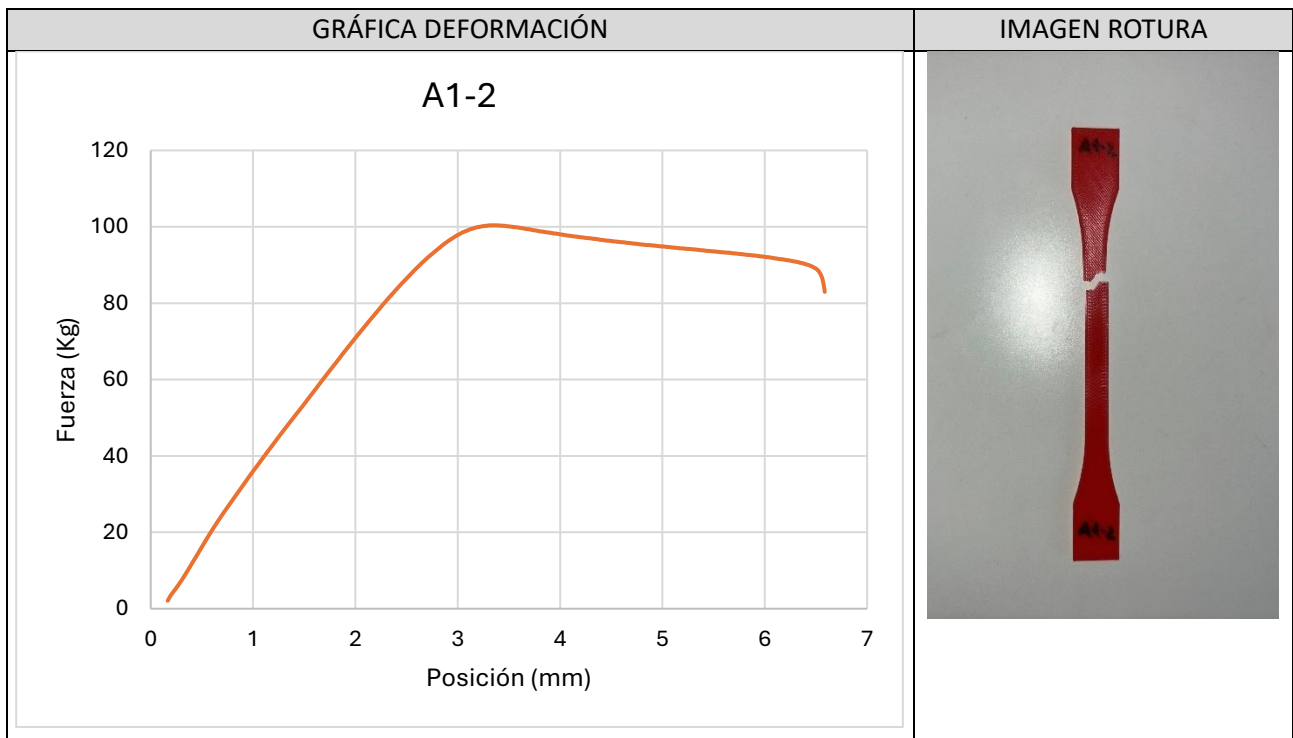
DATOS PROCESO	Fecha ensayo	20/12/2024	Hora ensayo	11:19:28
	Probeta	6	Tiempo empleado (s)	70,319
	Posición inicial (mm)	0,015	Posición final (mm)	5,871
	Fuerza inicial (kg)	0,041	Fuerza final (kg)	82,237
	Fuerza pico (kg)	97,646	Nº muestras	3555



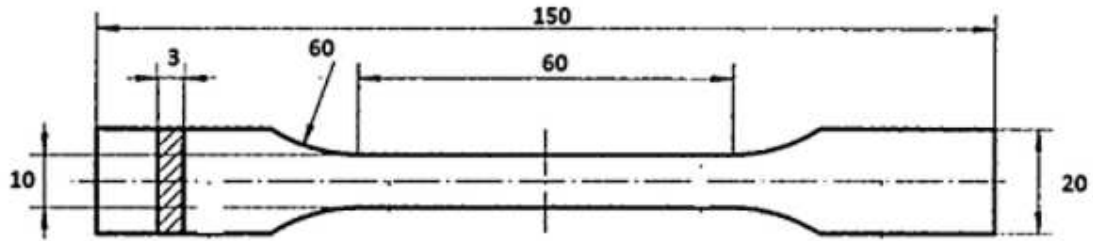
ID. ENSAYO	A1-2
-------------------	------



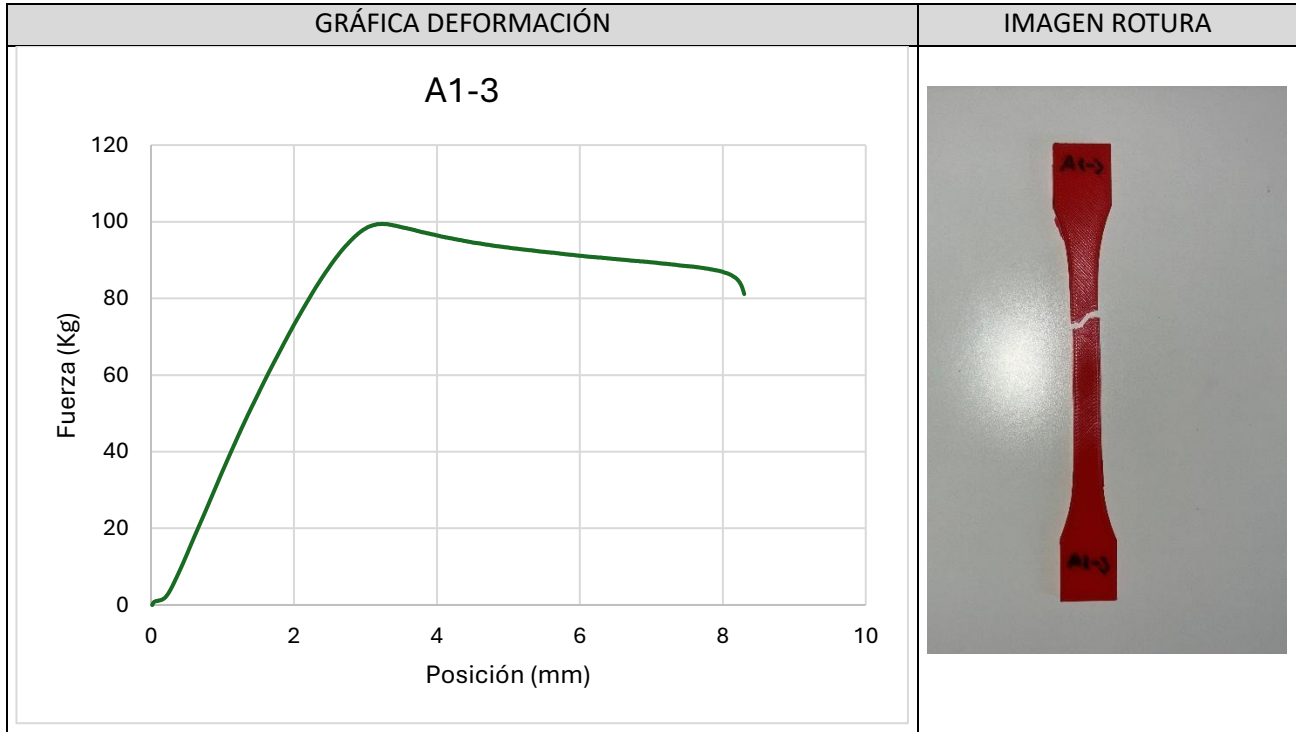
DATOS PROCESO	Fecha ensayo	20/12/2024	Hora ensayo	11:21:18
	Probeta	7	Tiempo empleado (s)	77,099
	Posición inicial (mm)	0,165	Posición final (mm)	6,586
	Fuerza inicial (kg)	2,088	Fuerza final (kg)	82,965
	Fuerza pico (kg)	100,422	Nº muestras	3944



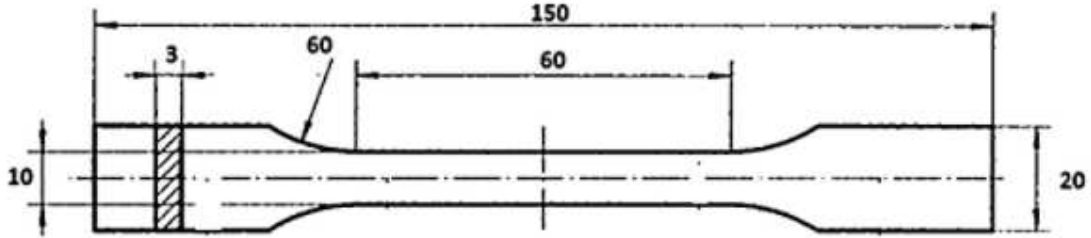
ID. ENSAYO	A1-3
-------------------	------



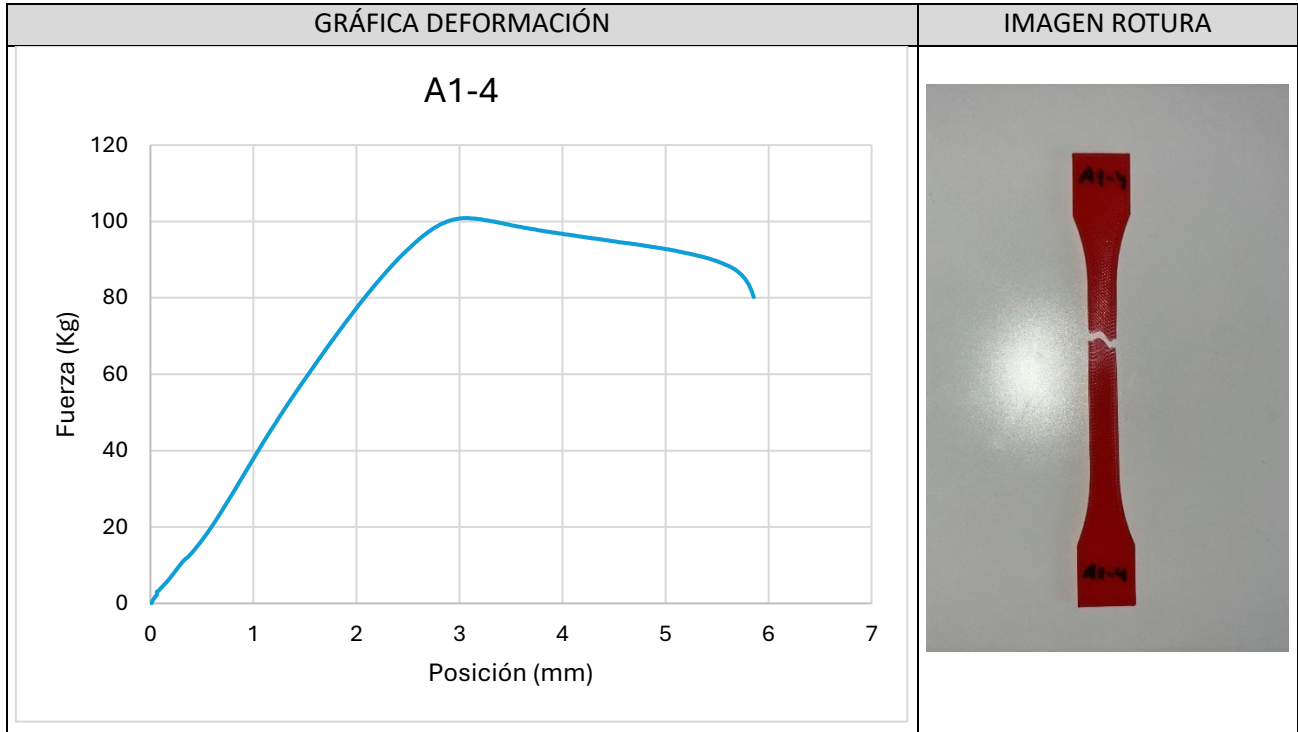
DATOS PROCESO	Fecha ensayo	20/12/2024	Hora ensayo	11:23:14
	Probeta	8	Tiempo empleado (s)	99,459
	Posición inicial (mm)	0,015	Posición final (mm)	8,299
	Fuerza inicial (kg)	-0,011	Fuerza final (kg)	81,123
	Fuerza pico (kg)	99,460	Nº muestras	5042



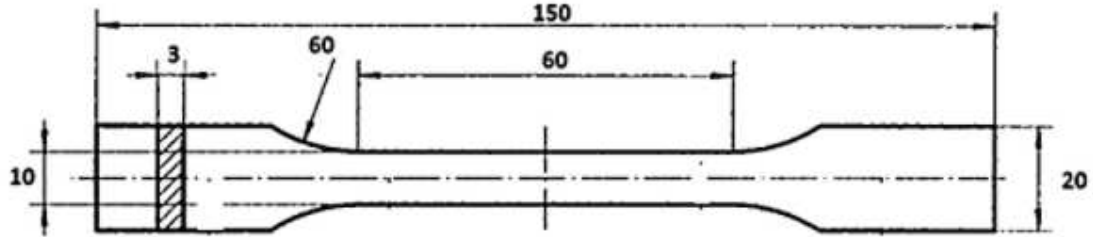
ID. ENSAYO	A1-4
-------------------	------



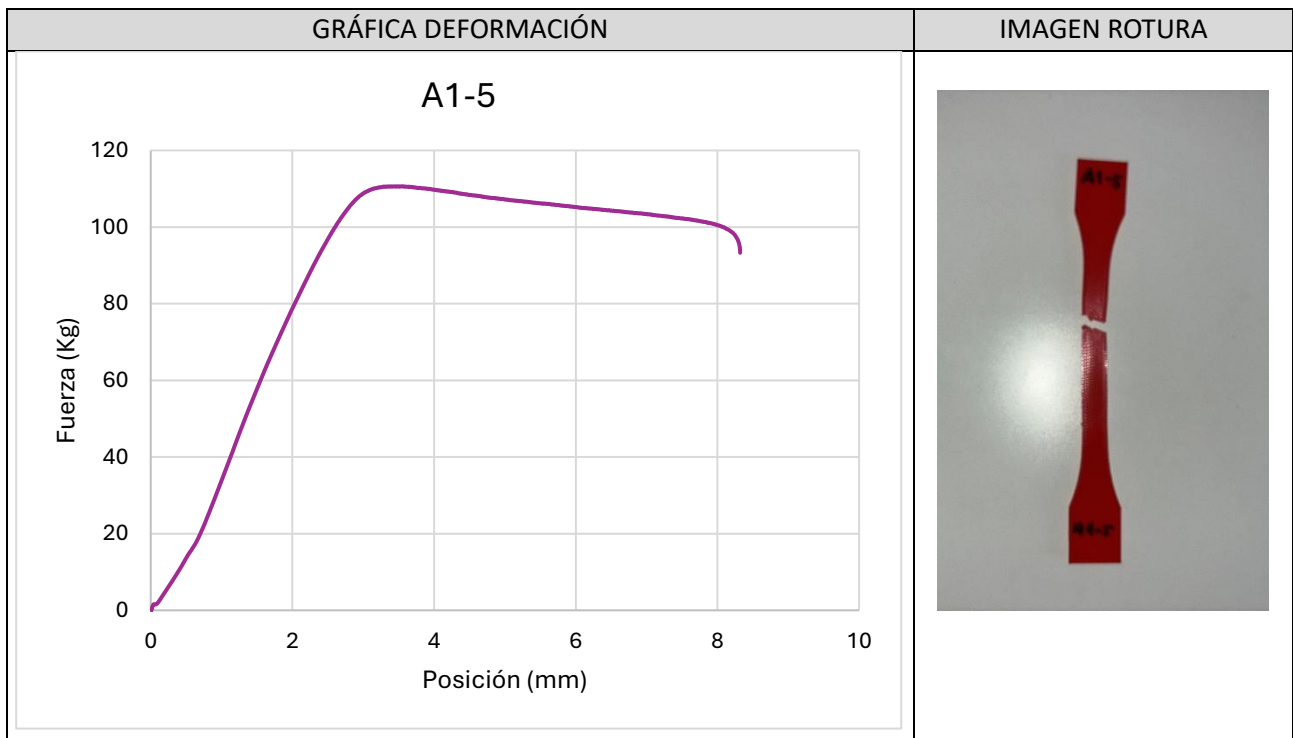
DATOS PROCESO	Fecha ensayo	20/12/2024	Hora ensayo	11:25:23
	Probeta	9	Tiempo empleado (s)	73,119
	Posición inicial (mm)	0,007	Posición final (mm)	5,857
	Fuerza inicial (kg)	0,028	Fuerza final (kg)	80,207
	Fuerza pico (kg)	100,919	Nº muestras	3785



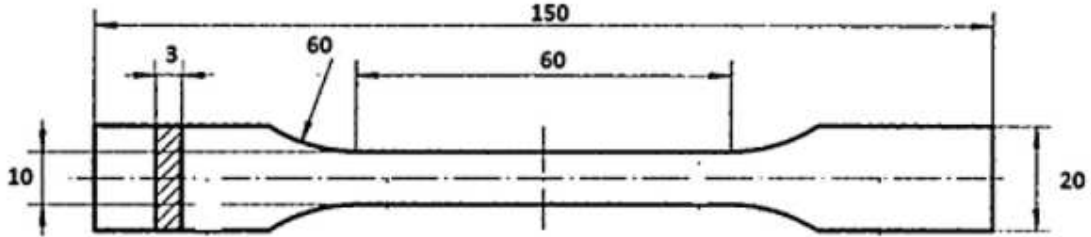
ID. ENSAYO	A1-5
-------------------	------



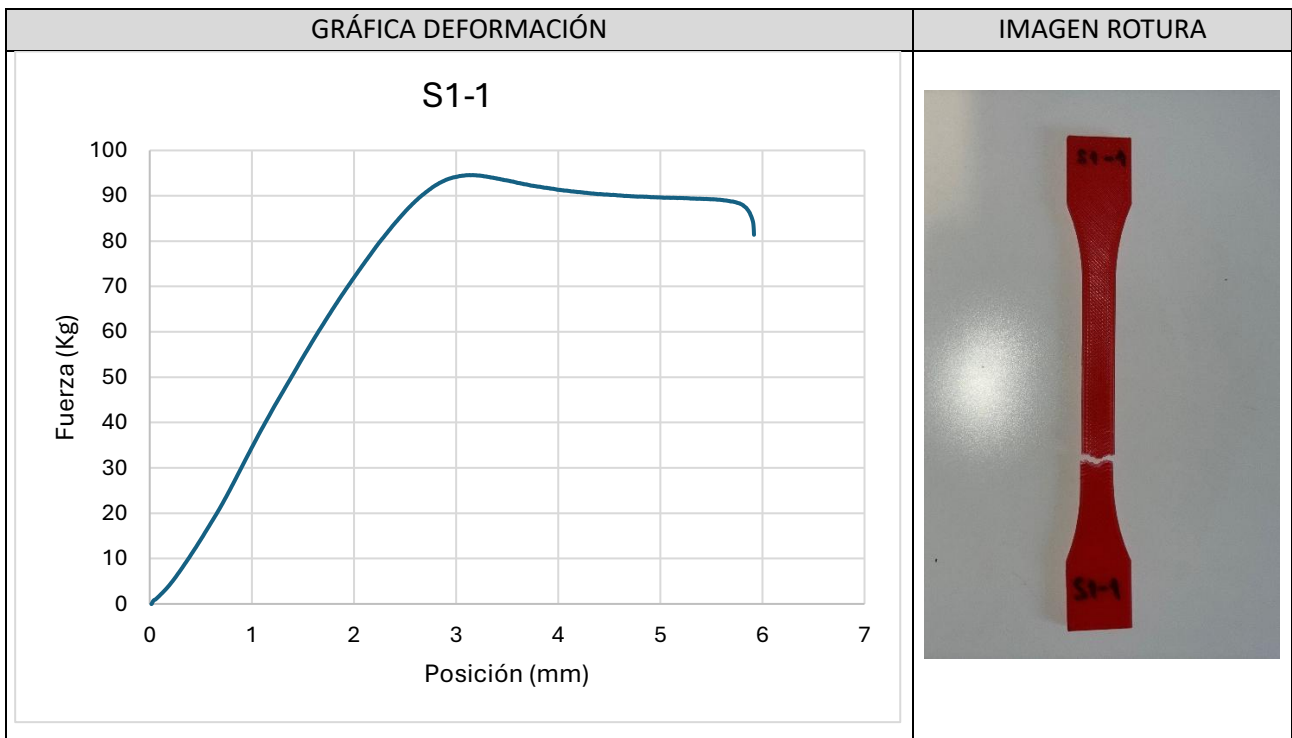
DATOS PROCESO	Fecha ensayo	20/12/2024	Hora ensayo	11:27:17
	Probeta	10	Tiempo empleado (s)	99,799
	Posición inicial (mm)	0,008	Posición final (mm)	8,320
	Fuerza inicial (kg)	0,099	Fuerza final (kg)	93,295
	Fuerza pico (kg)	110,647	Nº muestras	5070



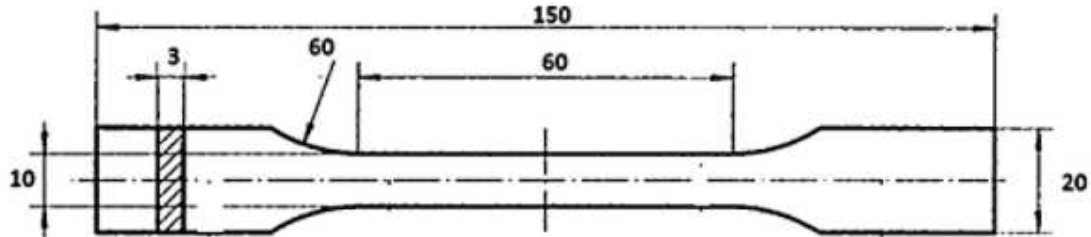
ID. ENSAYO	S1-1
-------------------	------



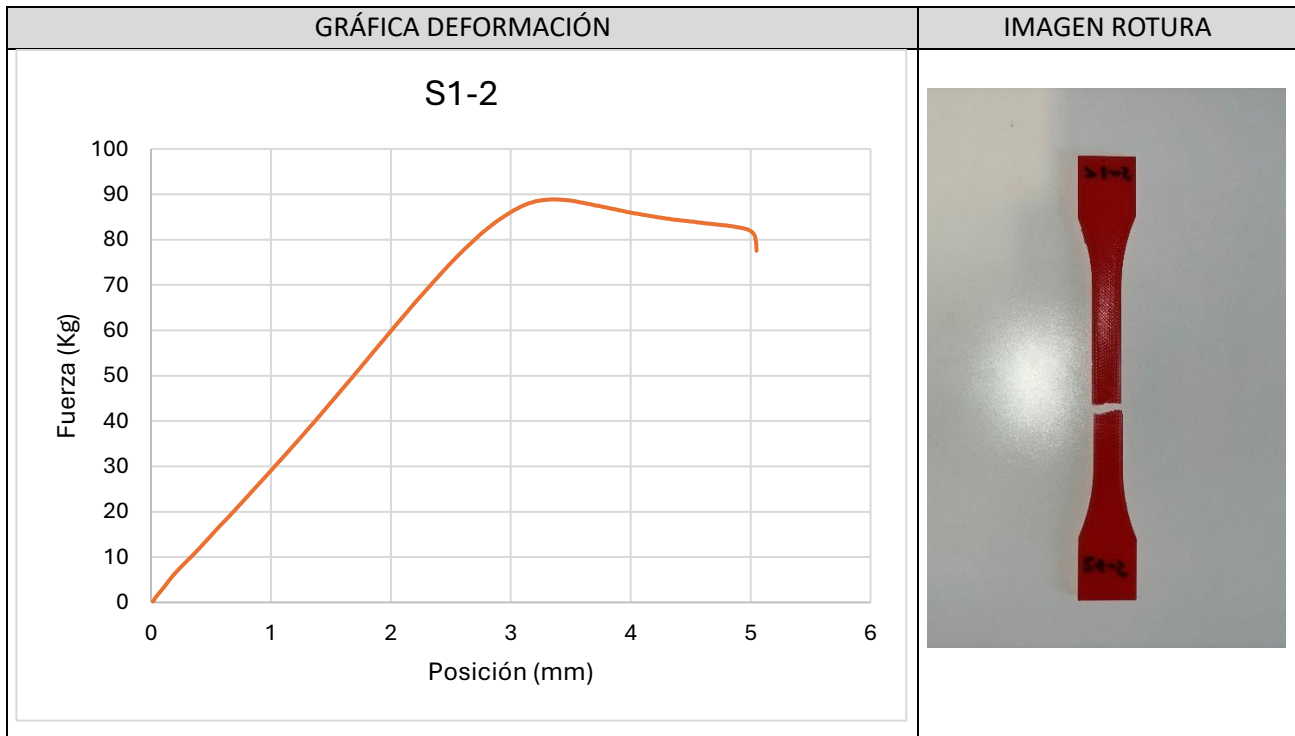
DATOS PROCESO	Fecha ensayo	20/12/2024	Hora ensayo	11:09:48
	Probeta	11	Tiempo empleado (s)	70,879
	Posición inicial (mm)	0,015	Posición final (mm)	5,917
	Fuerza inicial (kg)	-0,032	Fuerza final (kg)	81,396
	Fuerza pico (kg)	94,581	Nº muestras	3711



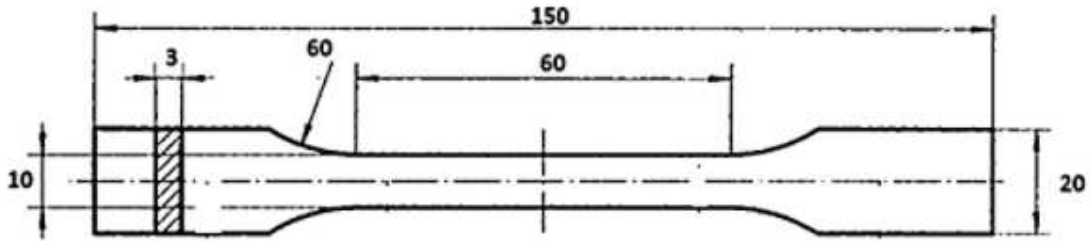
ID. ENSAYO	S1-2
-------------------	------



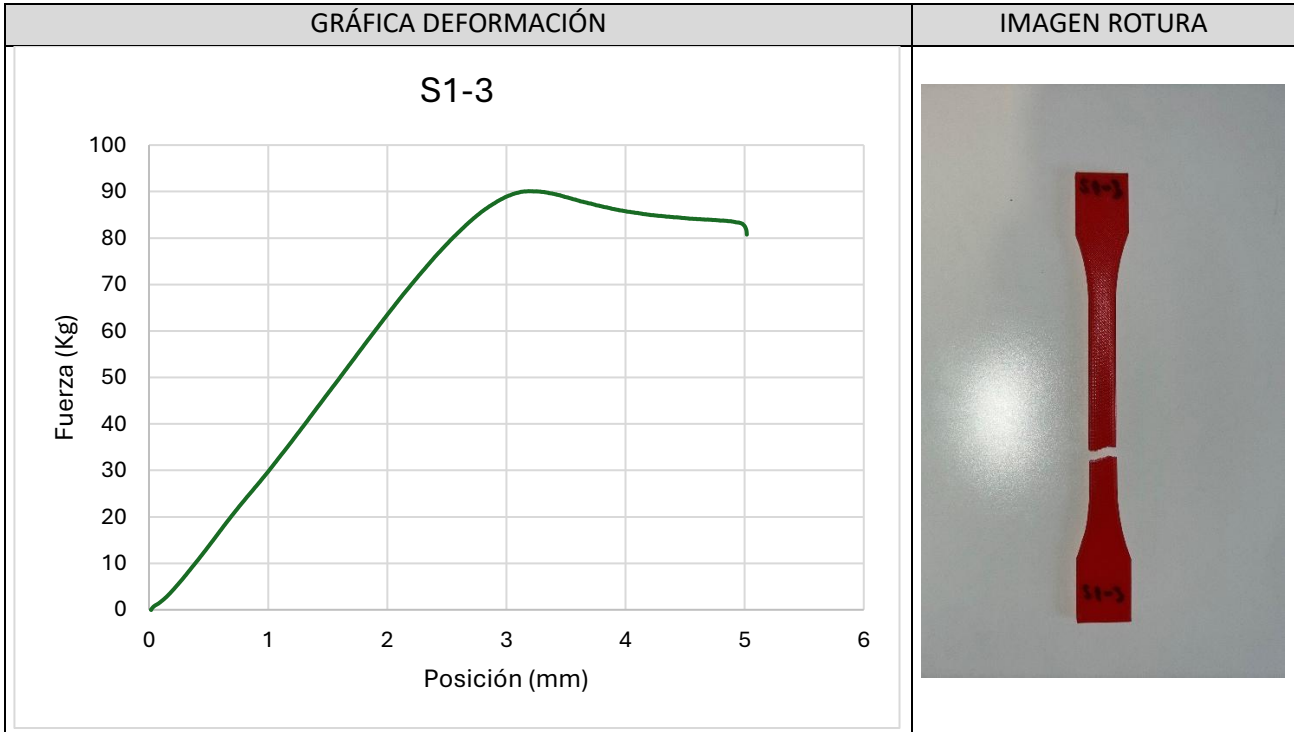
DATOS PROCESO	Fecha ensayo	20/12/2024	Hora ensayo	11:13:02
	Probeta	12	Tiempo empleado (s)	60,439
	Posición inicial (mm)	0,015	Posición final (mm)	5,049
	Fuerza inicial (kg)	0,224	Fuerza final (kg)	77,535
	Fuerza pico (kg)	88,885	Nº muestras	3136



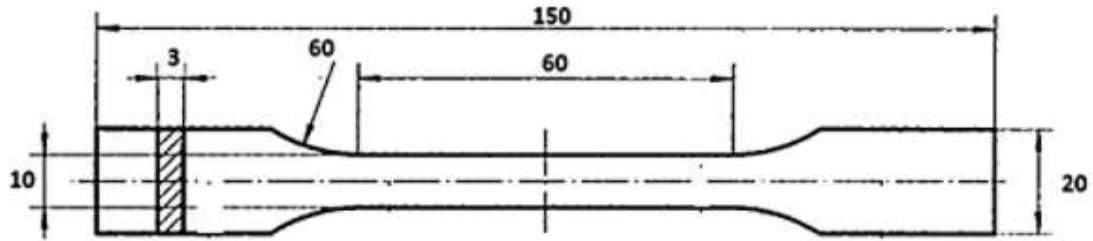
ID. ENSAYO	S1-3
-------------------	------



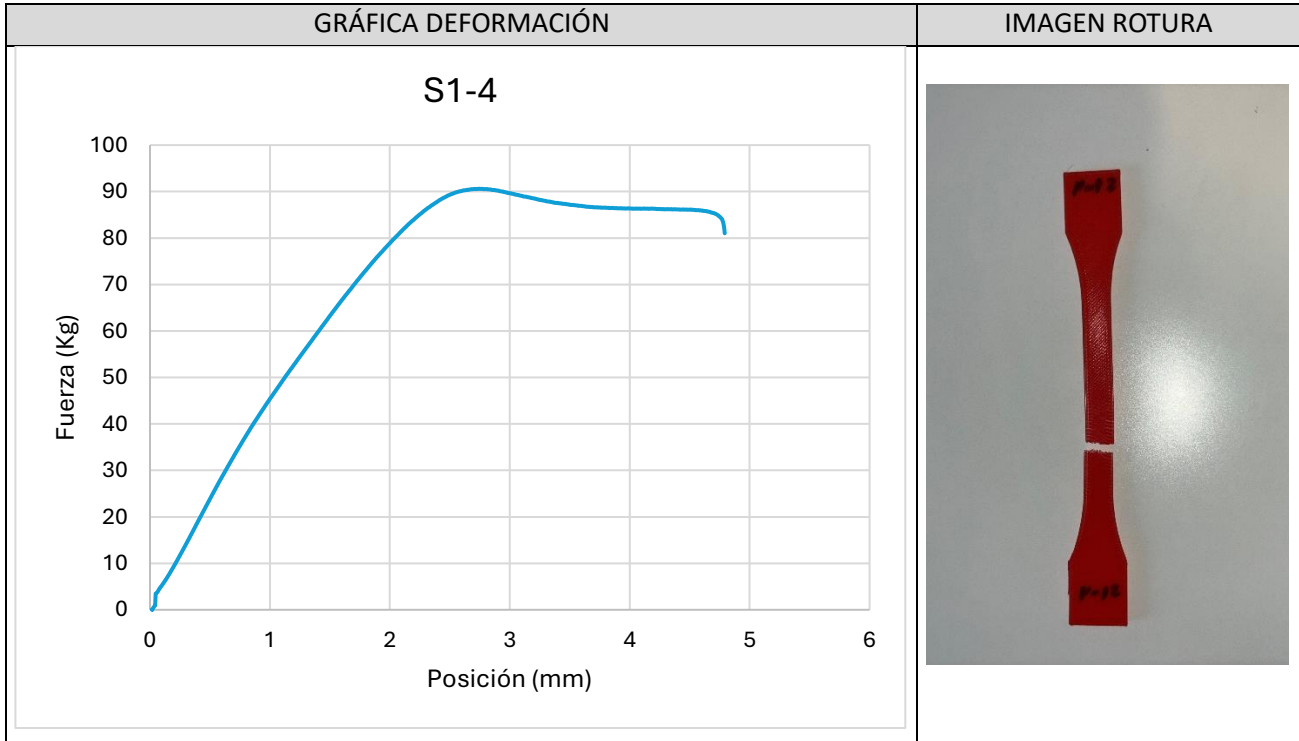
DATOS PROCESO	Fecha ensayo	20/12/2024	Hora ensayo	11:14:55
	Probeta	13	Tiempo empleado (s)	60,079
	Posición inicial (mm)	0,016	Posición final (mm)	5,018
	Fuerza inicial (kg)	-0,023	Fuerza final (kg)	80,729
	Fuerza pico (kg)	90,097	Nº muestras	3123



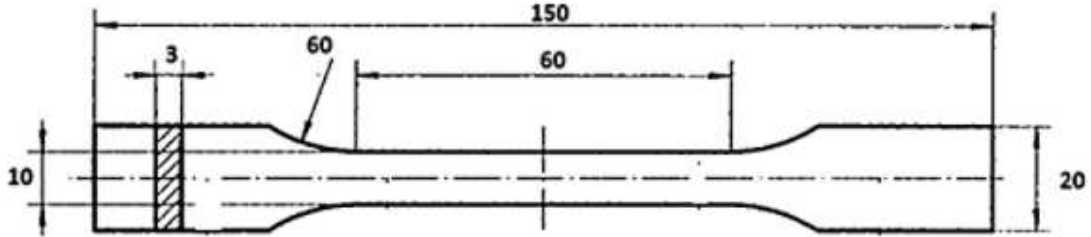
ID. ENSAYO	S1-4
-------------------	------



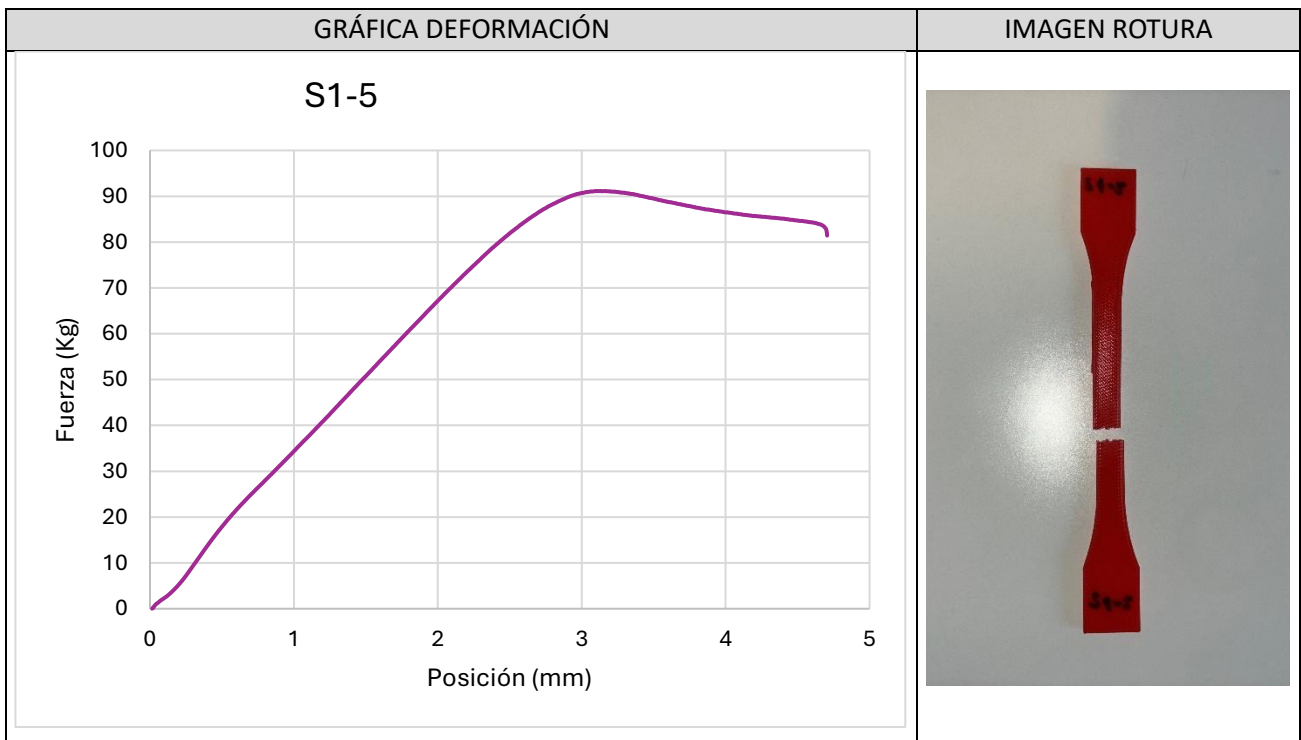
DATOS PROCESO	Fecha ensayo	20/12/2024	Hora ensayo	11:16:33
	Probeta	14	Tiempo empleado (s)	59,999
	Posición inicial (mm)	0,015	Posición final (mm)	4,792
	Fuerza inicial (kg)	-0,010	Fuerza final (kg)	81,027
	Fuerza pico (kg)	90,608	Nº muestras	3057



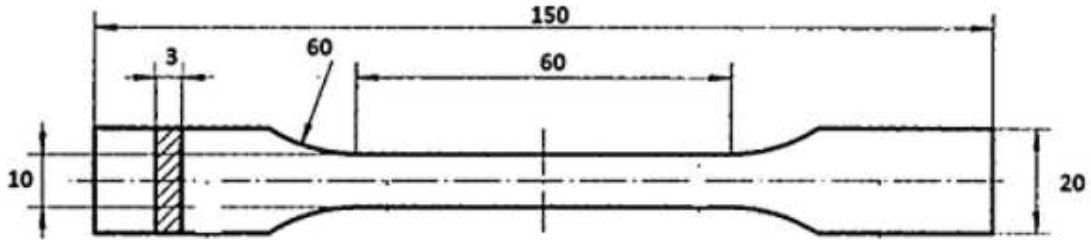
ID. ENSAYO	S1-5
-------------------	------



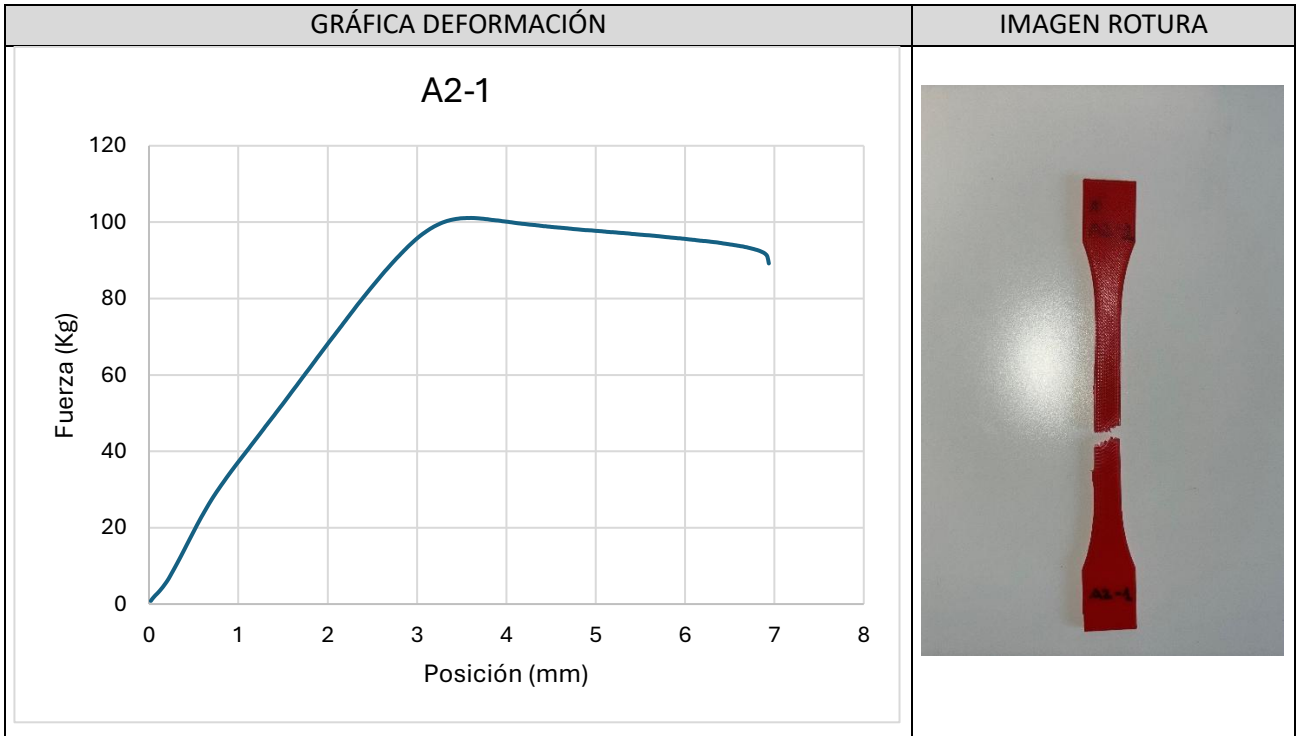
DATOS PROCESO	Fecha ensayo	20/12/2024	Hora ensayo	11:18:03
	Probeta	15	Tiempo empleado (s)	56,319
	Posición inicial (mm)	0,015	Posición final (mm)	4,705
	Fuerza inicial (kg)	0,047	Fuerza final (kg)	81,422
	Fuerza pico (kg)	91,156	Nº muestras	2858



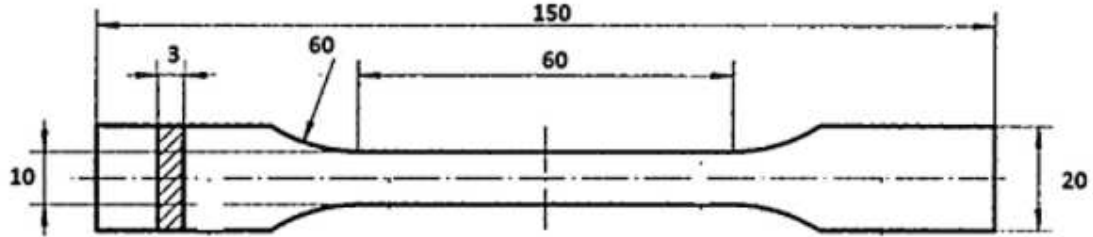
ID. ENSAYO	A2-1
-------------------	------



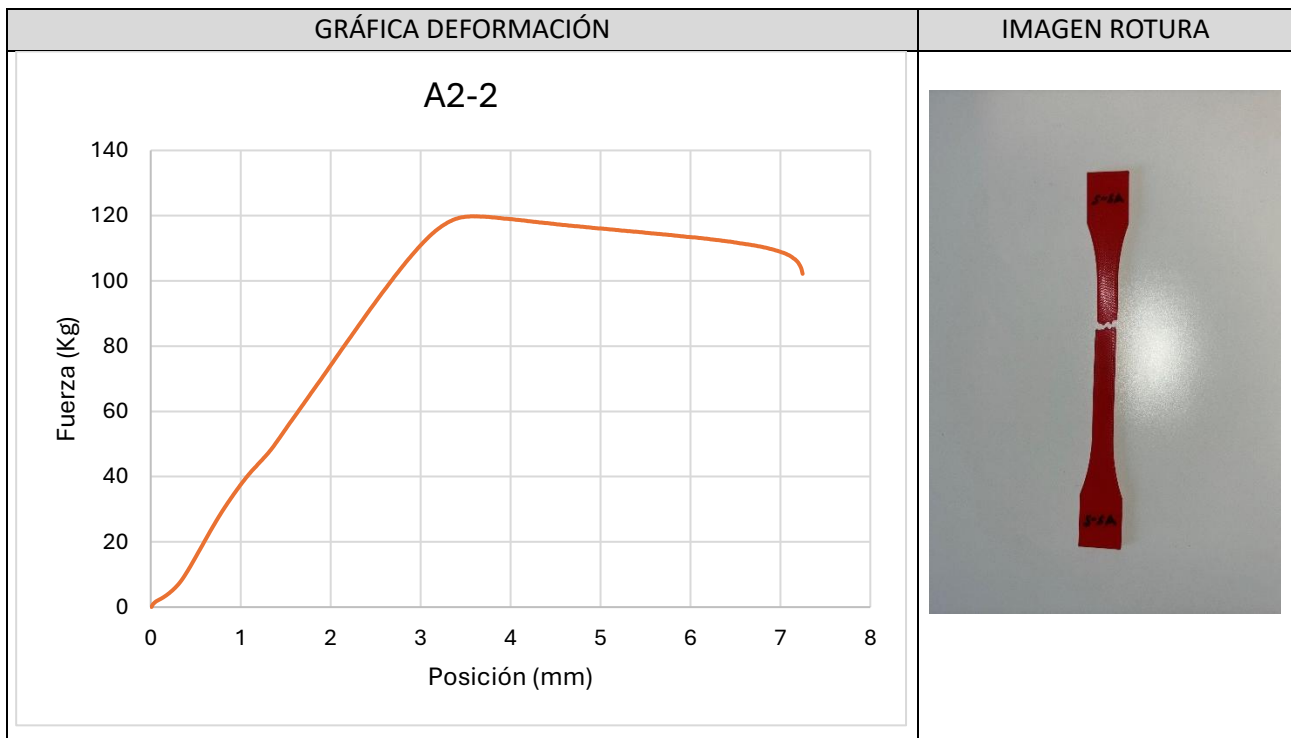
DATOS PROCESO	Fecha ensayo	14/01/2025	Hora ensayo	9:41:42
	Probeta	16	Tiempo empleado (s)	415
	Posición inicial (mm)	0,020	Posición final (mm)	6,937
	Fuerza inicial (kg)	0,823	Fuerza final (kg)	89,190
	Fuerza pico (kg)	101,105	Nº muestras	418



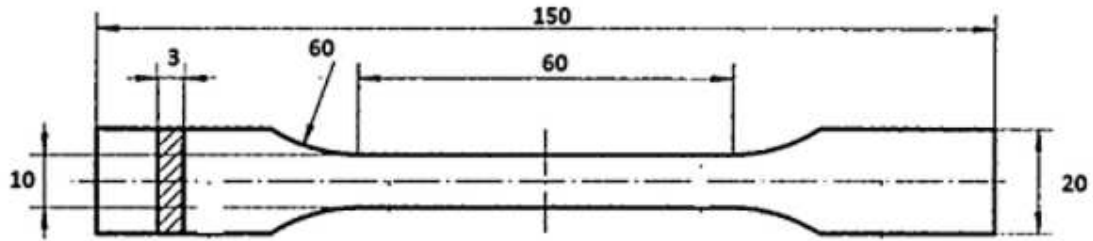
ID. ENSAYO	A2-2
-------------------	------



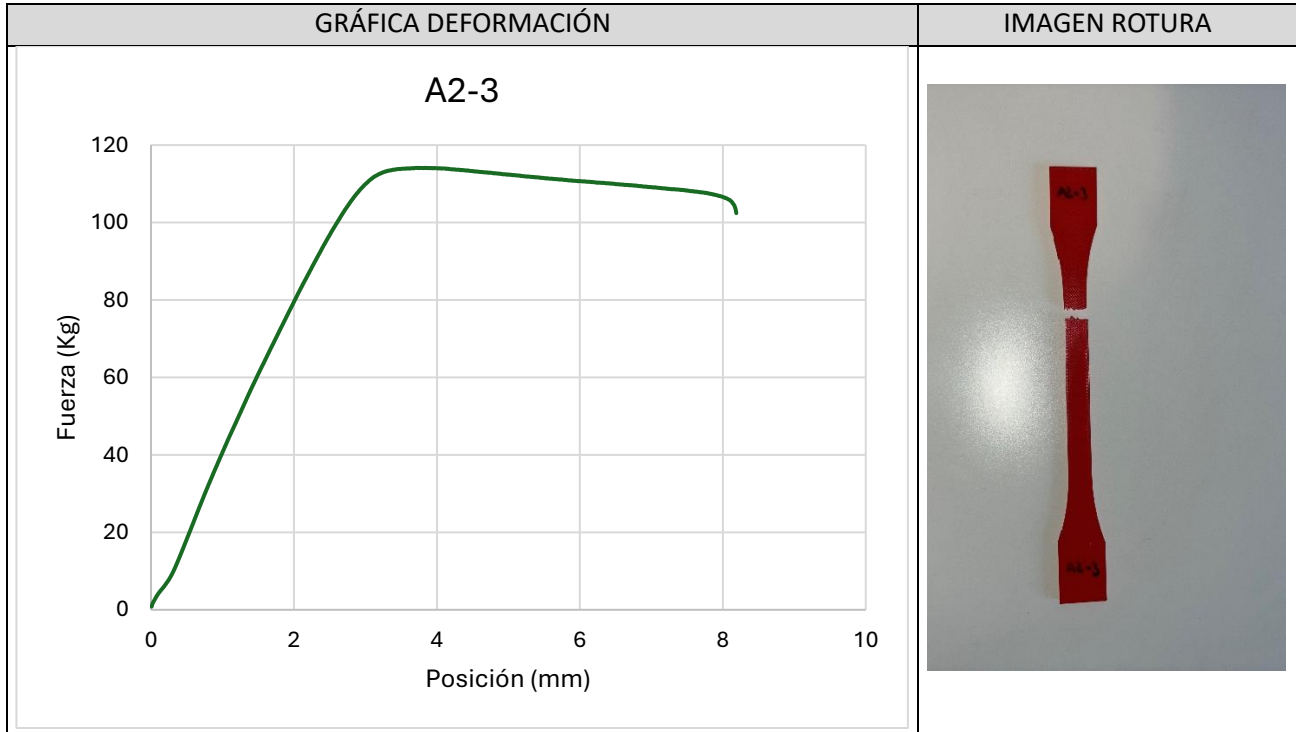
DATOS PROCESO	Fecha ensayo	14/01/2025	Hora ensayo	9:51:53
	Probeta	17	Tiempo empleado (s)	86,862
	Posición inicial (mm)	0,008	Posición final (mm)	7,247
	Fuerza inicial (kg)	0,035	Fuerza final (kg)	102,171
	Fuerza pico (kg)	119,823	Nº muestras	987



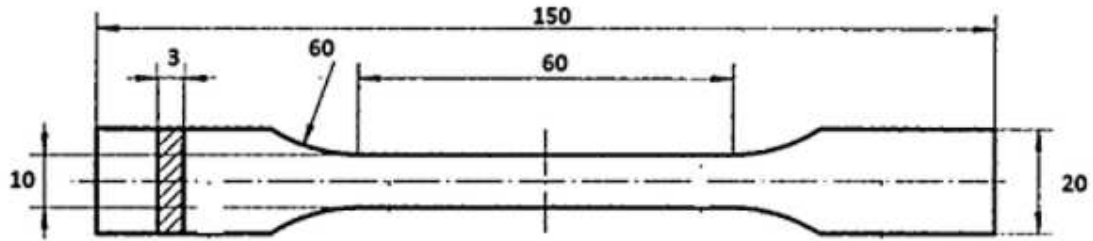
ID. ENSAYO	A2-3
-------------------	------



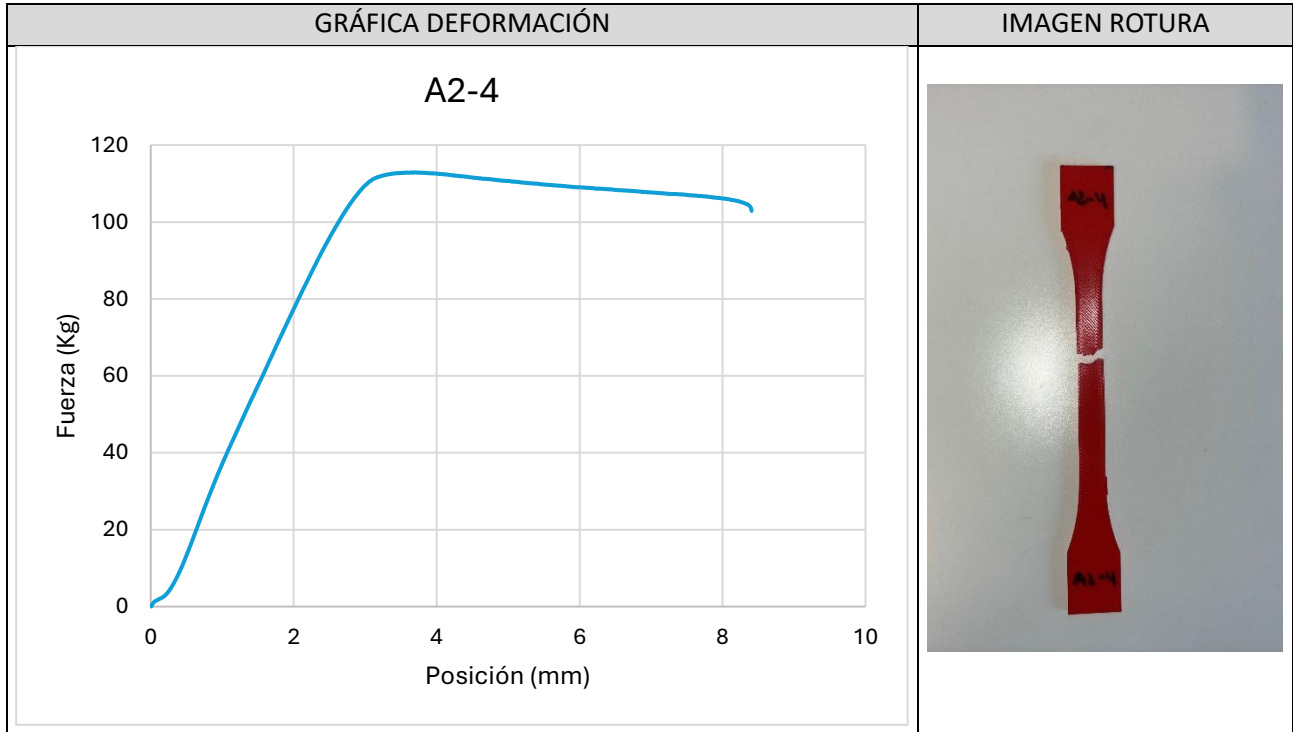
DATOS PROCESO	Fecha ensayo	14/01/2025	Hora ensayo	9:54:16
	Probeta	18	Tiempo empleado (s)	98,227
	Posición inicial (mm)	0,007	Posición final (mm)	8,188
	Fuerza inicial (kg)	0,816	Fuerza final (kg)	102,425
	Fuerza pico (kg)	114,137	Nº muestras	1110



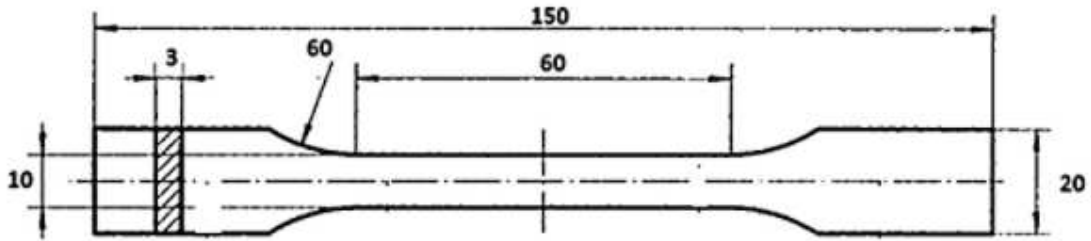
ID. ENSAYO	A2-4
-------------------	------



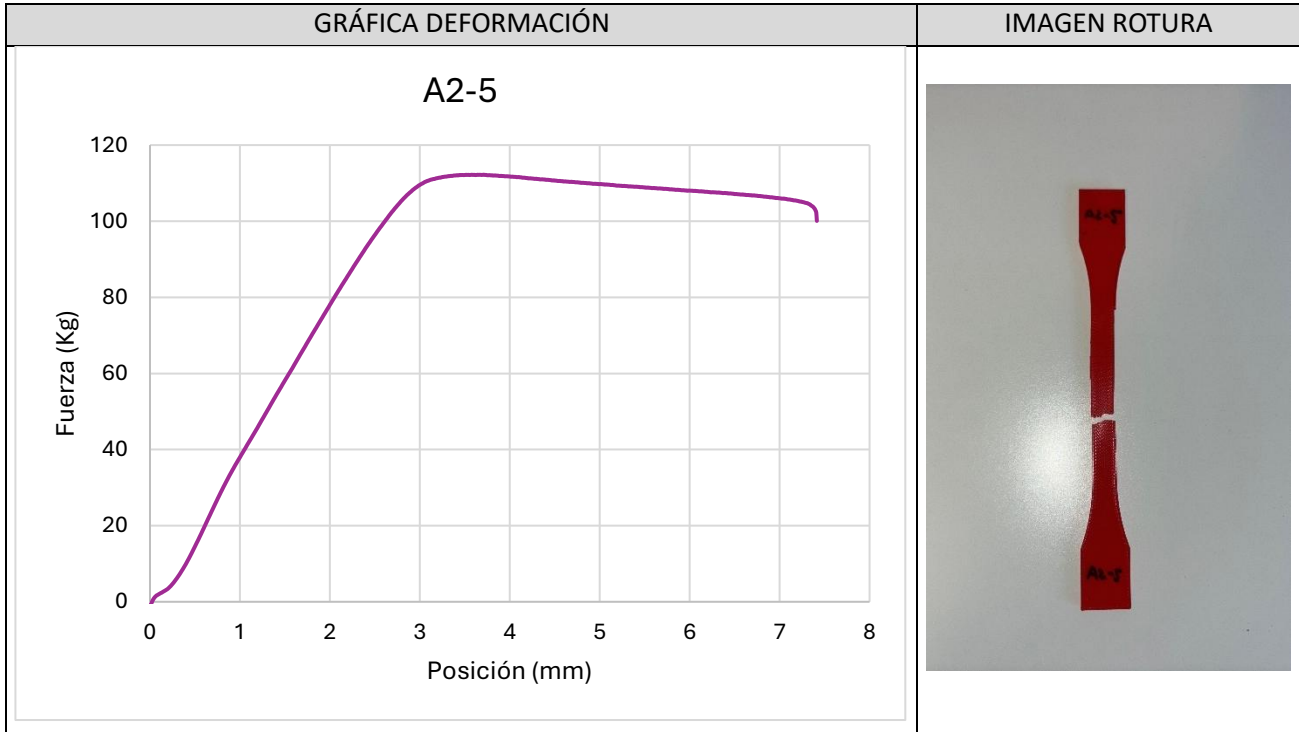
DATOS PROCESO	Fecha ensayo	14/01/2025	Hora ensayo	9:56:36
	Probeta	19	Tiempo empleado (s)	100,843
	Posición inicial (mm)	0,007	Posición final (mm)	8,407
	Fuerza inicial (kg)	0,013	Fuerza final (kg)	102,891
	Fuerza pico (kg)	112,906	Nº muestras	1134



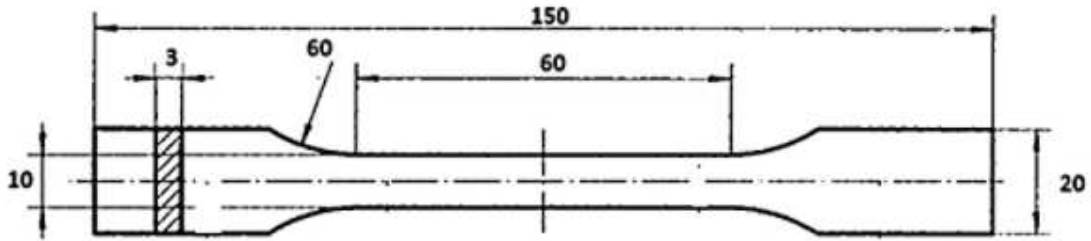
ID. ENSAYO	A2-5
-------------------	------



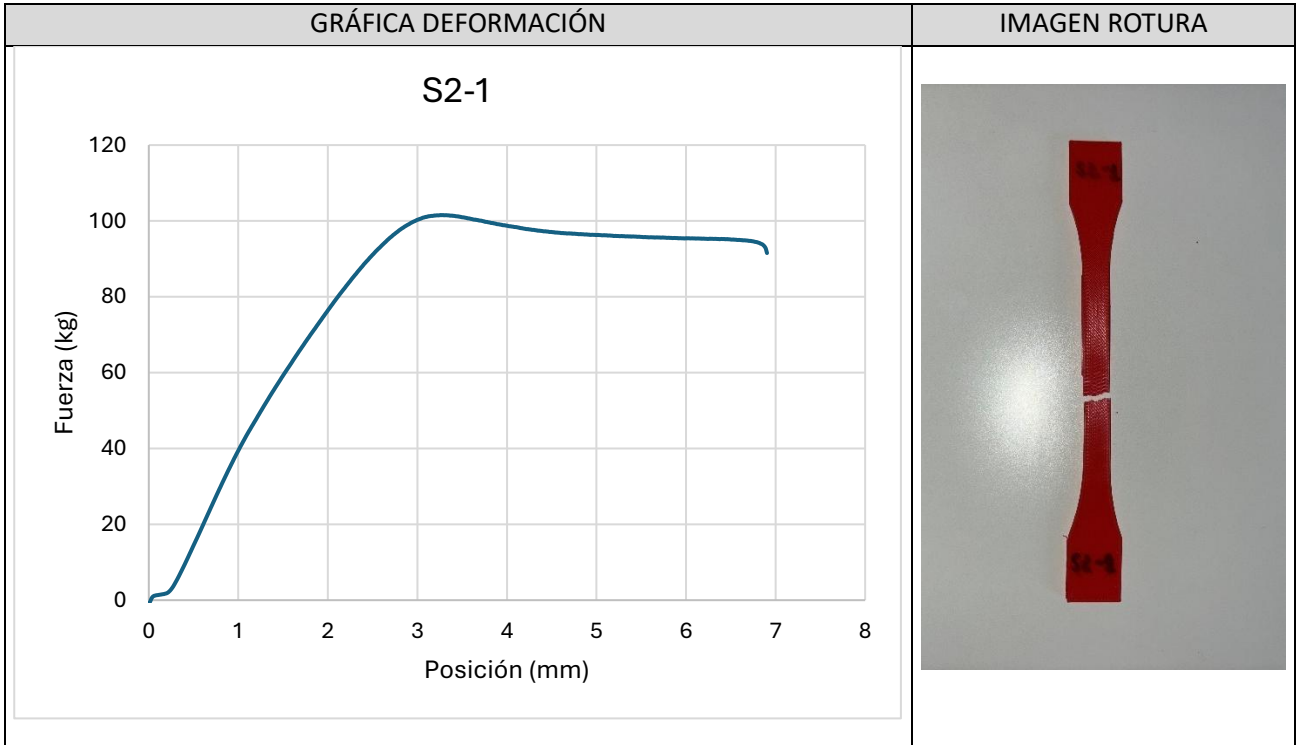
DATOS PROCESO	Fecha ensayo	14/01/2025	Hora ensayo	9:59:03
	Probeta	20	Tiempo empleado (s)	88,937
	Posición inicial (mm)	0,007	Posición final (mm)	7,414
	Fuerza inicial (kg)	-0,710	Fuerza final (kg)	100,076
	Fuerza pico (kg)	112,221	Nº muestras	1006



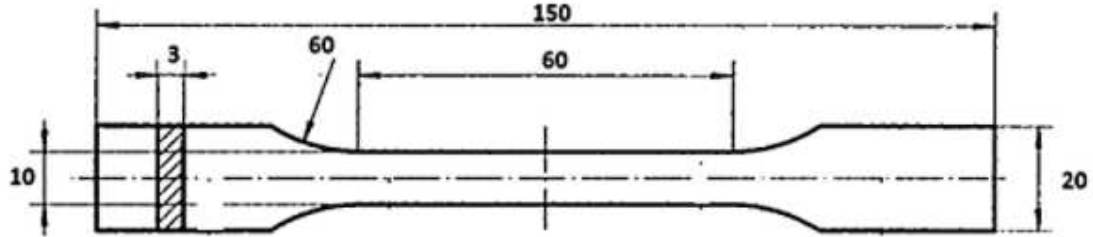
ID. ENSAYO	S2-1
-------------------	------



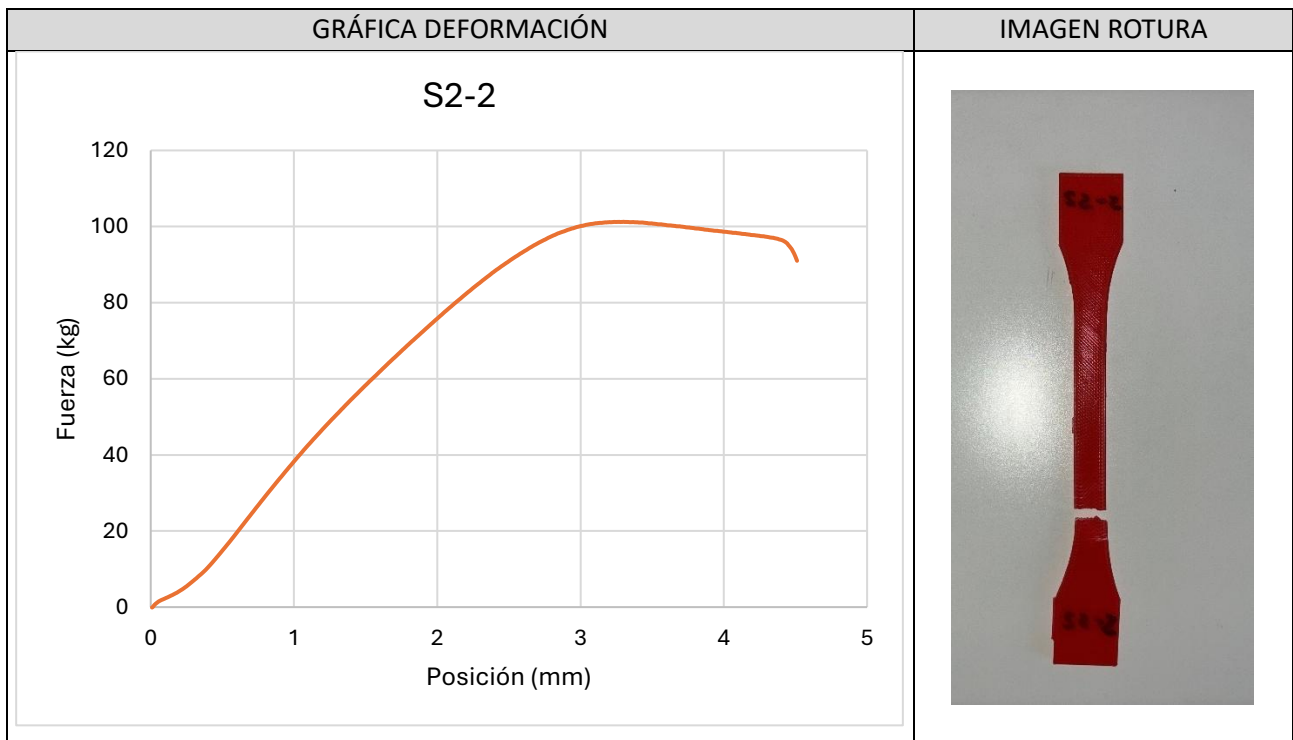
DATOS PROCESO	Fecha ensayo	14/01/2025	Hora ensayo	10:01:40
	Probeta	21	Tiempo empleado (s)	82,803
	Posición inicial (mm)	0,007	Posición final (mm)	6,903
	Fuerza inicial (kg)	-0,560	Fuerza final (kg)	91,529
	Fuerza pico (kg)	101,560	Nº muestras	934



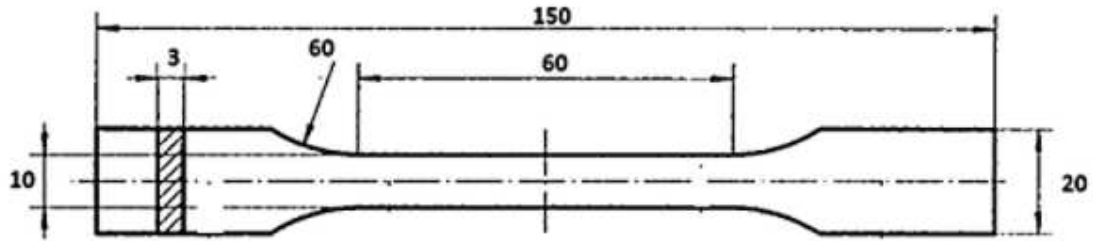
ID. ENSAYO	S2-2
-------------------	------



DATOS PROCESO	Fecha ensayo	14/01/2025	Hora ensayo	10:03:42
	Probeta	22	Tiempo empleado (s)	54,029
	Posición inicial (mm)	0,008	Posición final (mm)	4,510
	Fuerza inicial (kg)	-0,105	Fuerza final (kg)	90,999
	Fuerza pico (kg)	101,252	Nº muestras	620



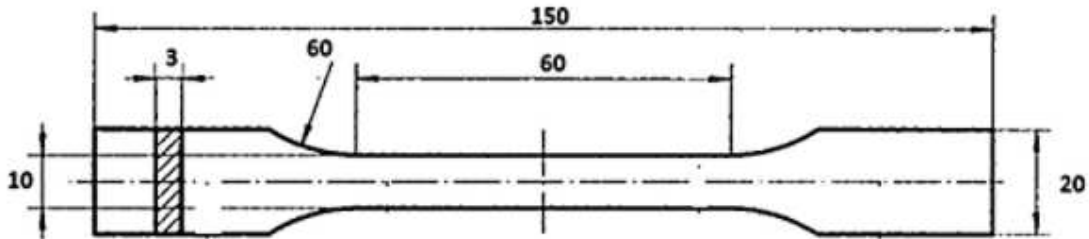
ID. ENSAYO	S2-3
-------------------	------



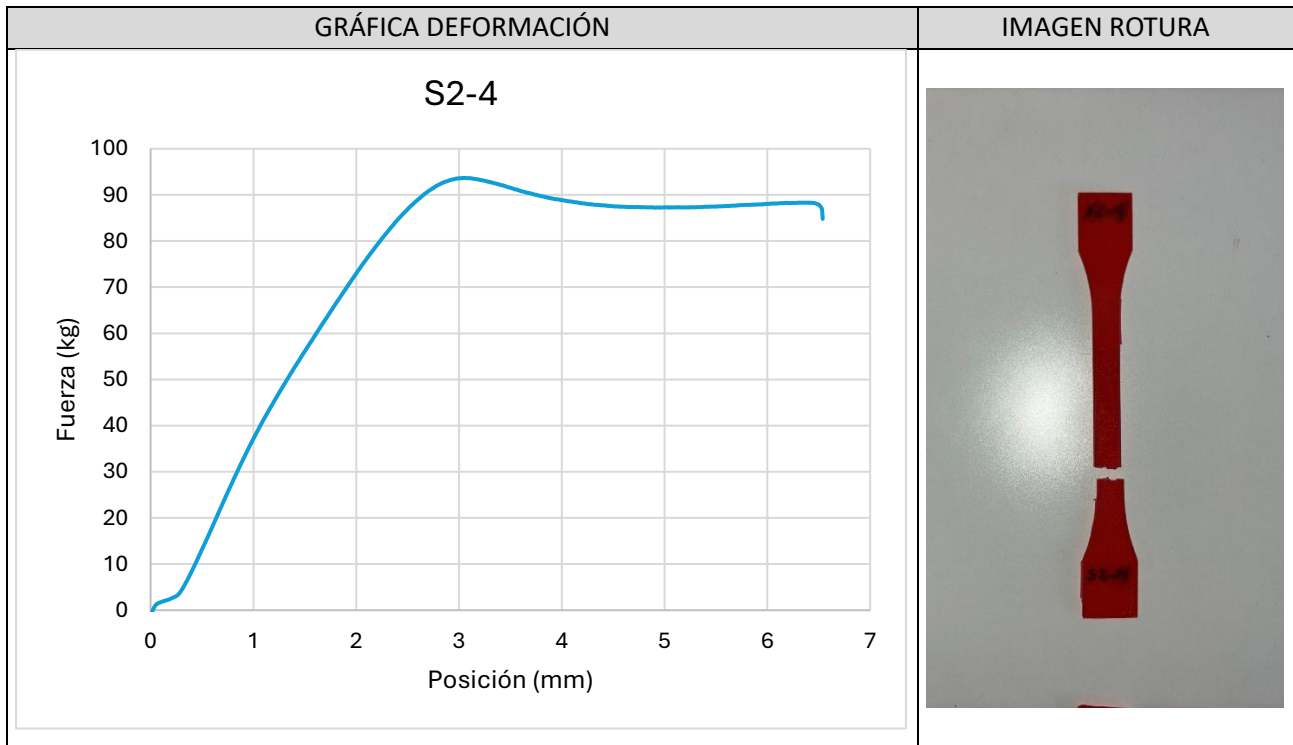
DATOS PROCESO	Fecha ensayo	14/01/2025	Hora ensayo	10:05:16
	Probeta	23	Tiempo empleado (s)	63,861
	Posición inicial (mm)	0,008	Posición final (mm)	5,330
	Fuerza inicial (kg)	-0,254	Fuerza final (kg)	82,384
	Fuerza pico (kg)	93,139	Nº muestras	733



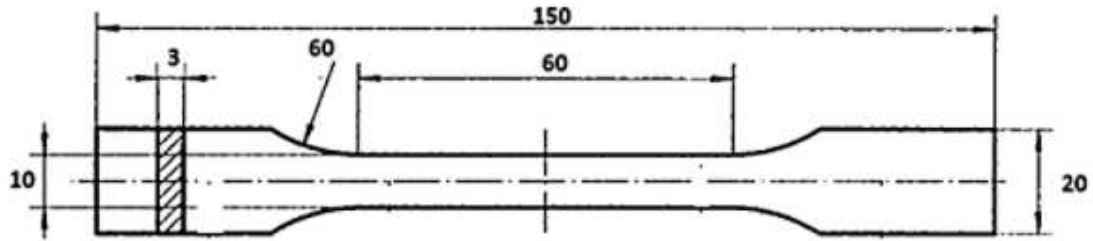
ID. ENSAYO	S2-4
-------------------	------



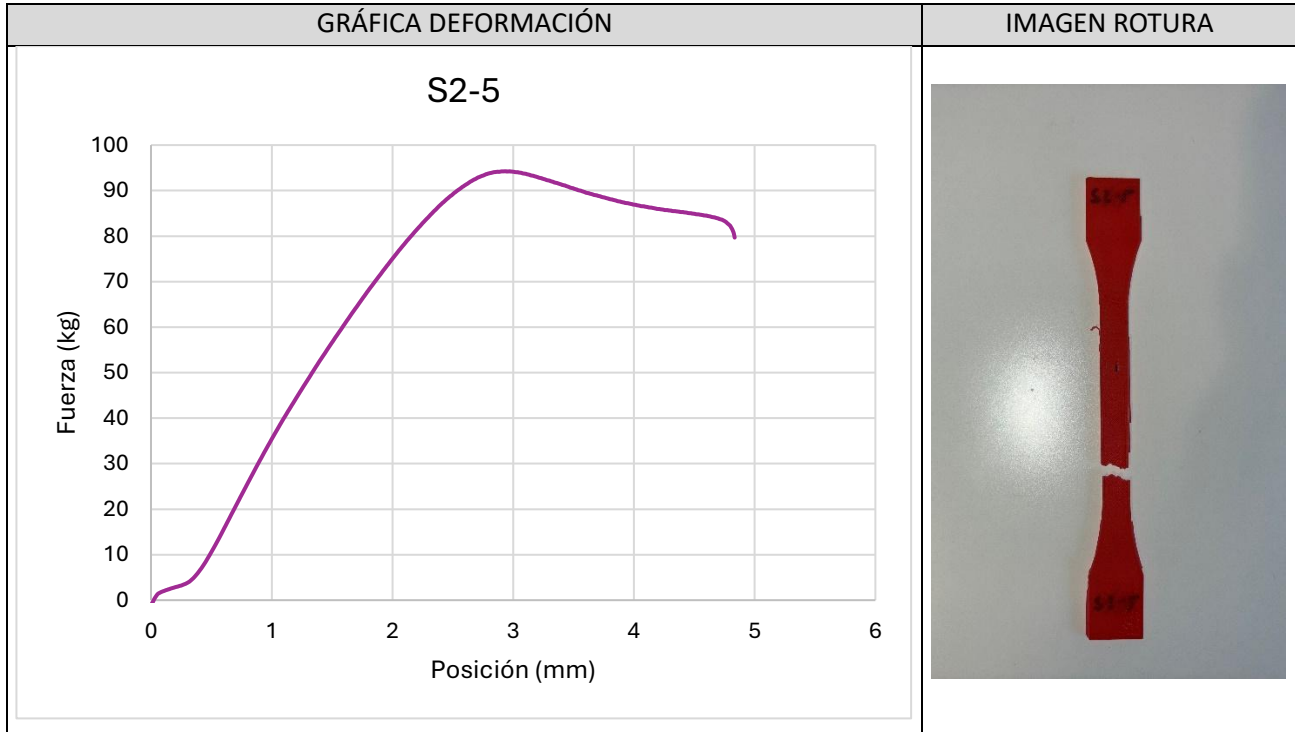
DATOS PROCESO	Fecha ensayo	14/01/2025	Hora ensayo	10:07:11
	Probeta	24	Tiempo empleado (s)	78,383
	Posición inicial (mm)	0,008	Posición final (mm)	6,538
	Fuerza inicial (kg)	-0,467	Fuerza final (kg)	84,792
	Fuerza pico (kg)	93,680	Nº muestras	898



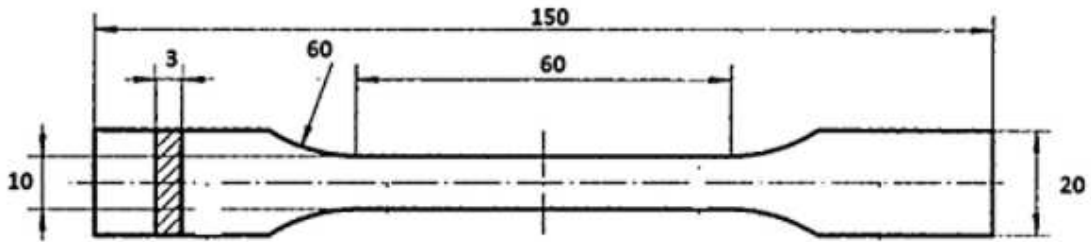
ID. ENSAYO	S2-5
-------------------	------



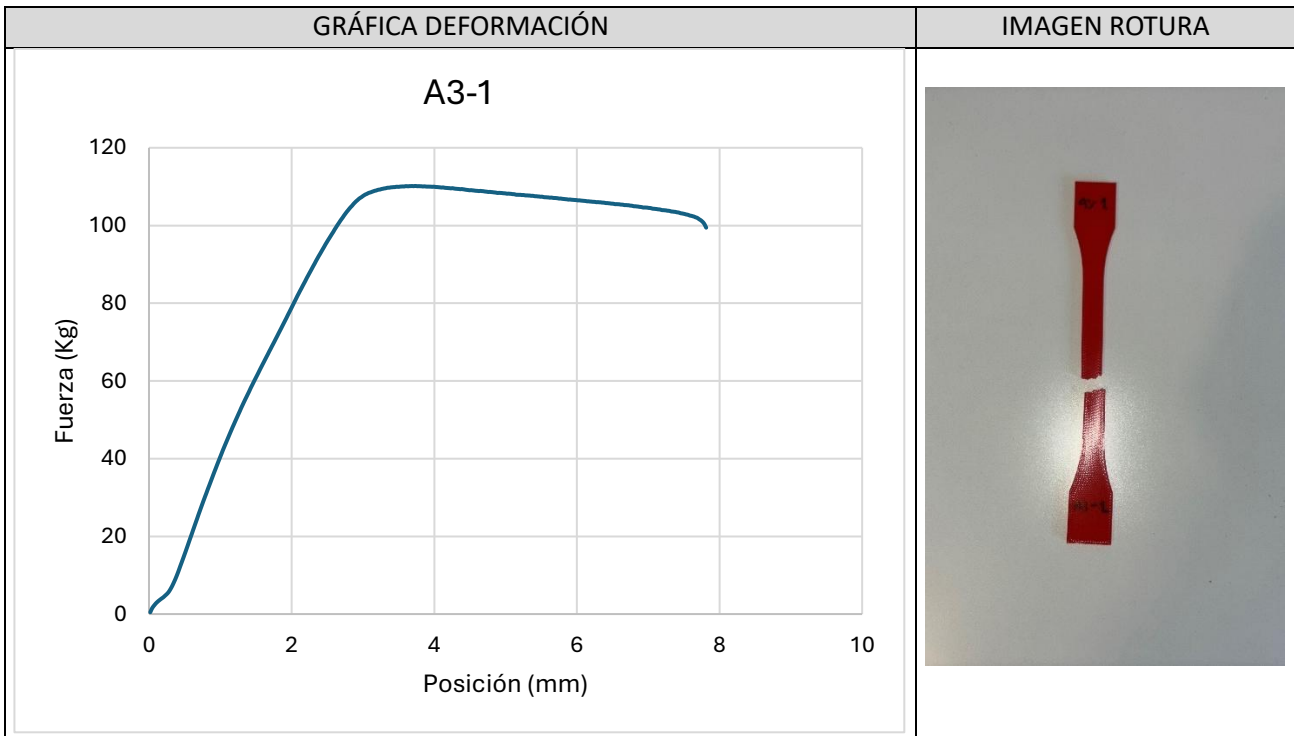
DATOS PROCESO	Fecha ensayo	14/01/2025	Hora ensayo	10:09:07
	Probeta	25	Tiempo empleado (s)	57,908
	Posición inicial (mm)	0,008	Posición final (mm)	4,834
	Fuerza inicial (kg)	-0,598	Fuerza final (kg)	79,671
	Fuerza pico (kg)	94,248	Nº muestras	666



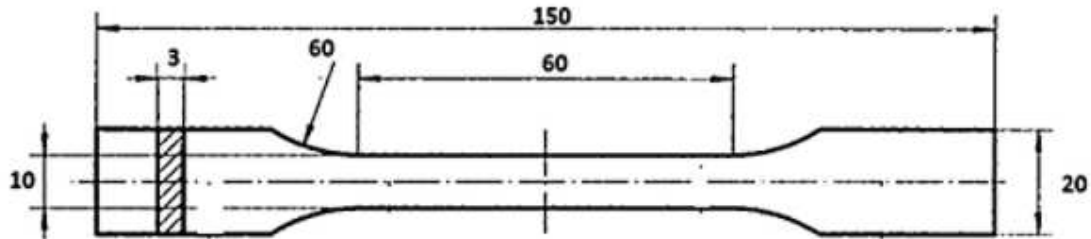
ID. ENSAYO	A3-1
-------------------	------



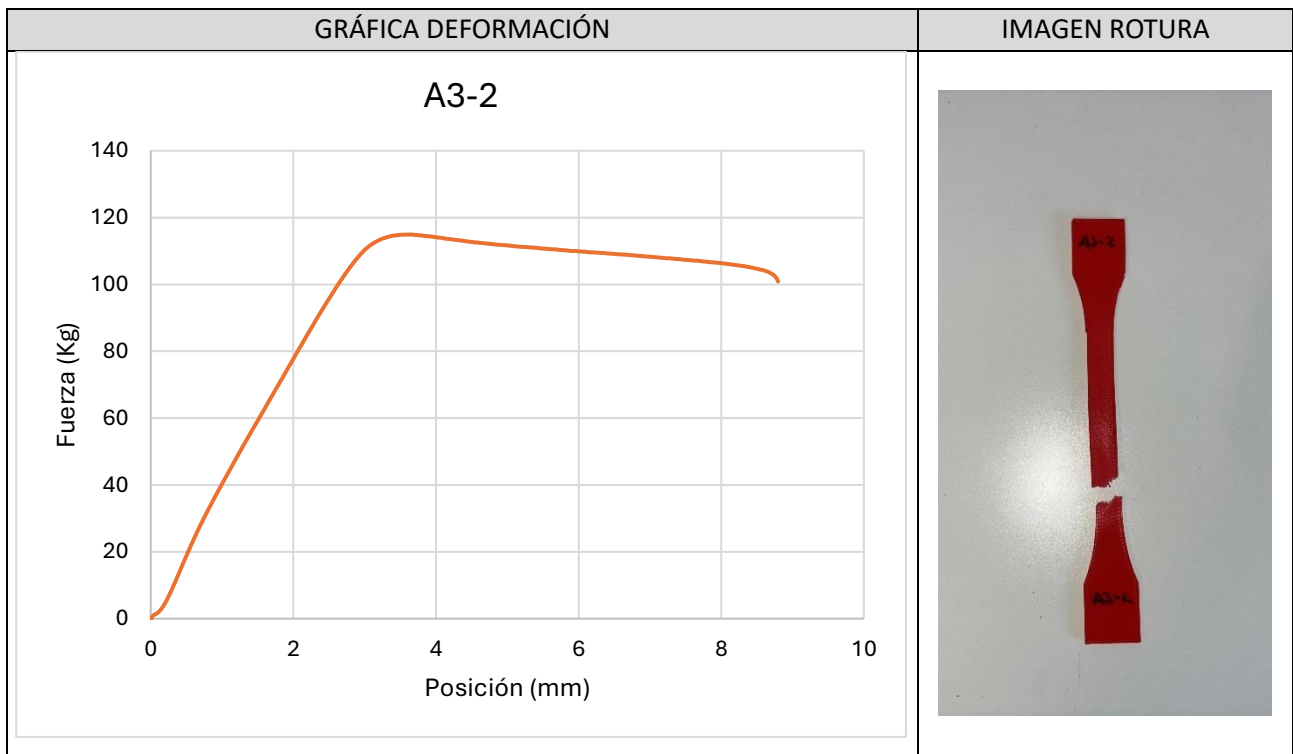
DATOS PROCESO	Fecha ensayo	05/02/2025	Hora ensayo	11:03:46
	Probeta	26	Tiempo empleado (s)	93,516
	Posición inicial (mm)	0,018	Posición final (mm)	7,812
	Fuerza inicial (kg)	0,477	Fuerza final (kg)	99,441
	Fuerza pico (kg)	110,169	Nº muestras	425



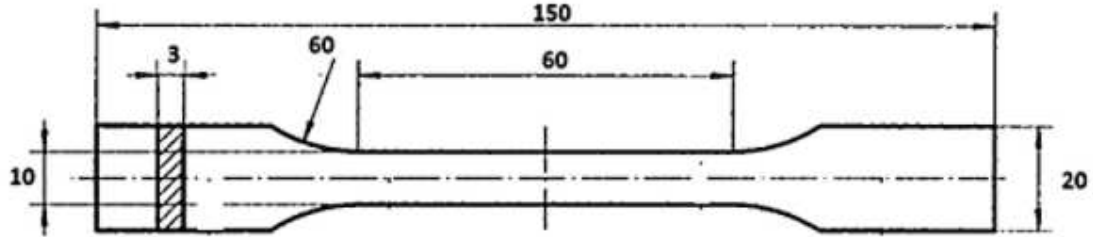
ID. ENSAYO	A3-2
-------------------	------



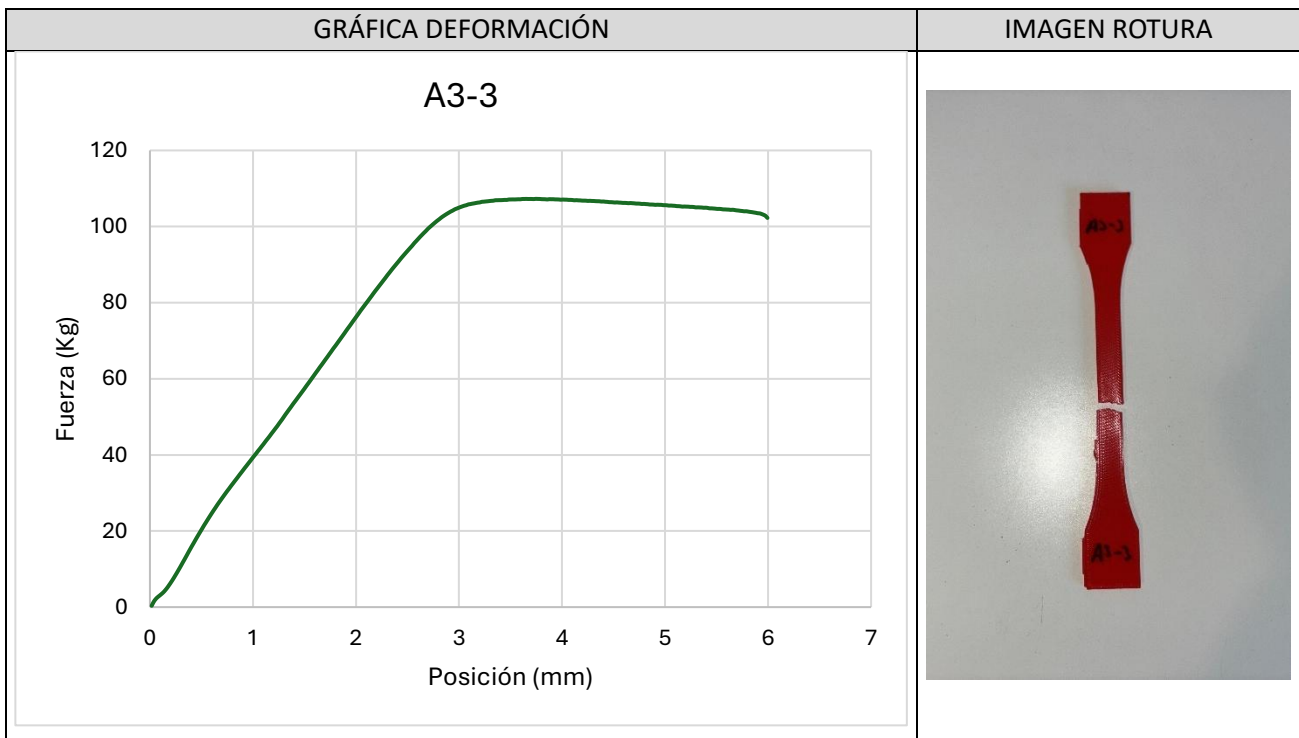
DATOS PROCESO	Fecha ensayo	05/02/2025	Hora ensayo	11:06:24
	Probeta	27	Tiempo empleado (s)	105,431
	Posición inicial (mm)	0,010	Posición final (mm)	8,797
	Fuerza inicial (kg)	0,098	Fuerza final (kg)	100,869
	Fuerza pico (kg)	114,963	Nº muestras	476



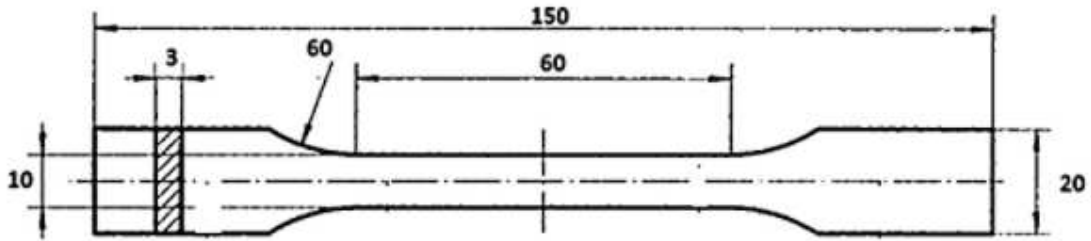
ID. ENSAYO	A3-3
-------------------	------



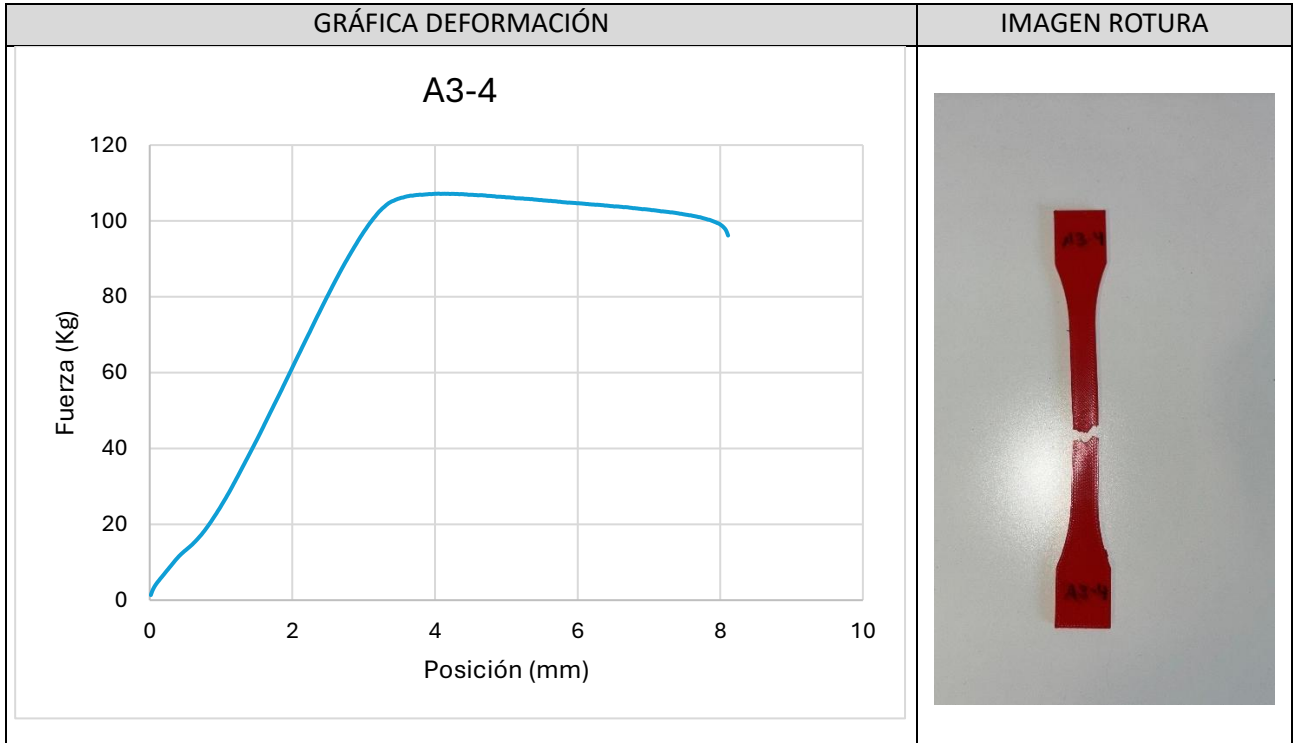
DATOS PROCESO	Fecha ensayo	05/02/2025	Hora ensayo	11:08:54
	Probeta	28	Tiempo empleado (s)	71,711
	Posición inicial (mm)	0,017	Posición final (mm)	5,993
	Fuerza inicial (kg)	0,354	Fuerza final (kg)	102,264
	Fuerza pico (kg)	107,279	Nº muestras	329



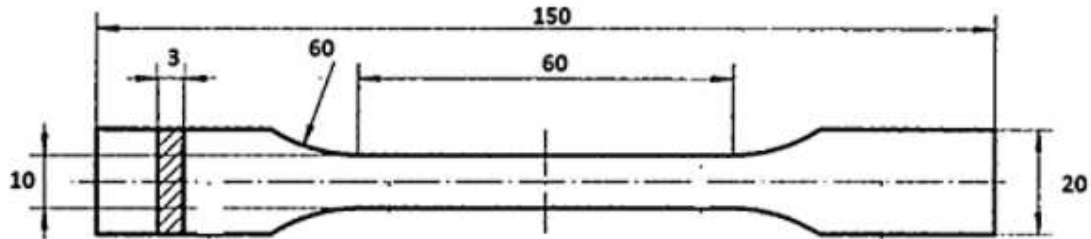
ID. ENSAYO	A3-4
-------------------	------



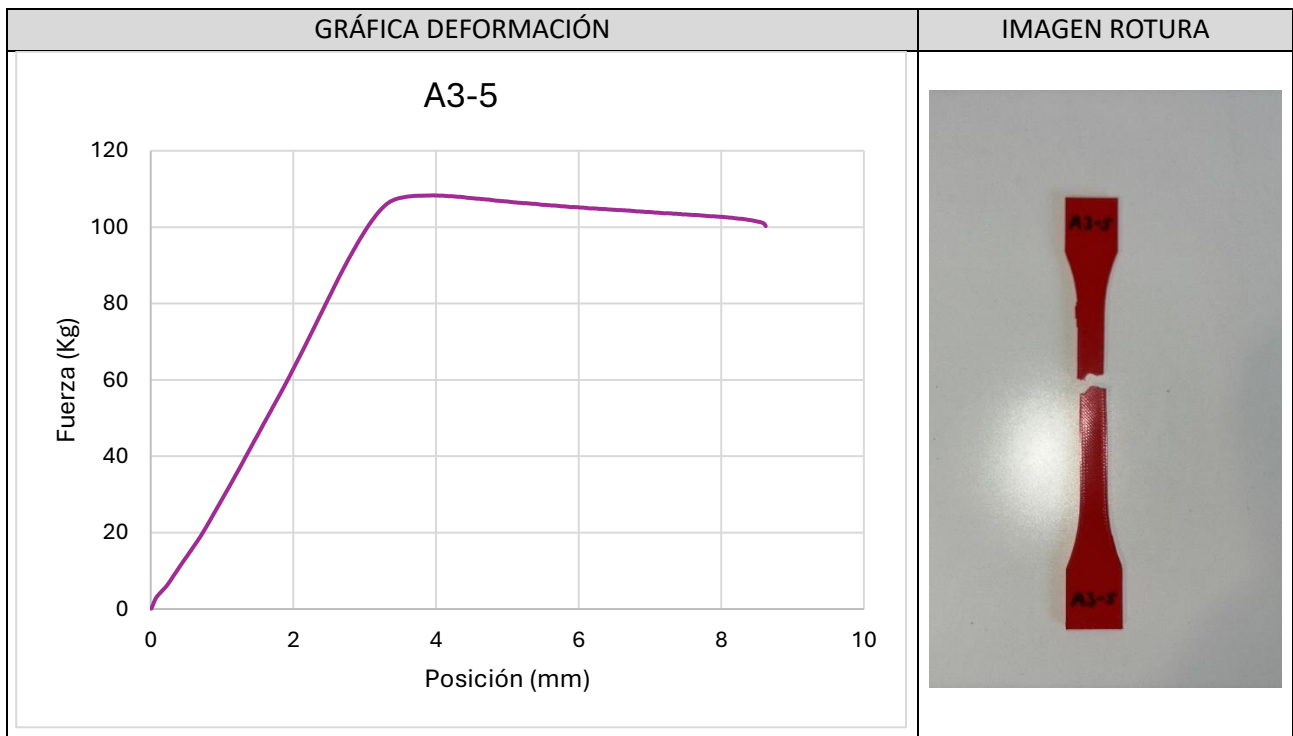
DATOS PROCESO	Fecha ensayo	05/02/2025	Hora ensayo	11:10:45
	Probeta	29	Tiempo empleado (s)	97,113
	Posición inicial (mm)	0,015	Posición final (mm)	8,109
	Fuerza inicial (kg)	1,343	Fuerza final (kg)	96,148
	Fuerza pico (kg)	107,205	Nº muestras	439



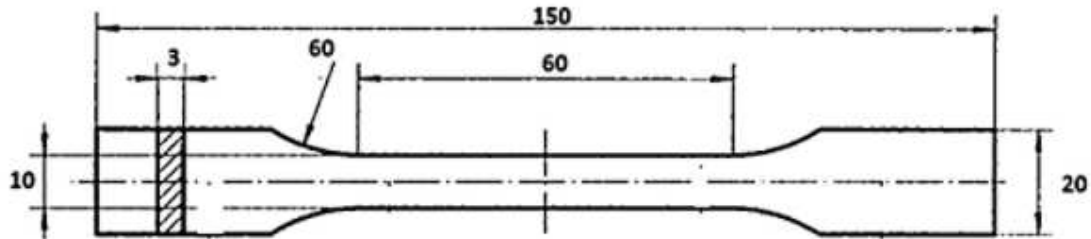
ID. ENSAYO	A3-5
-------------------	------



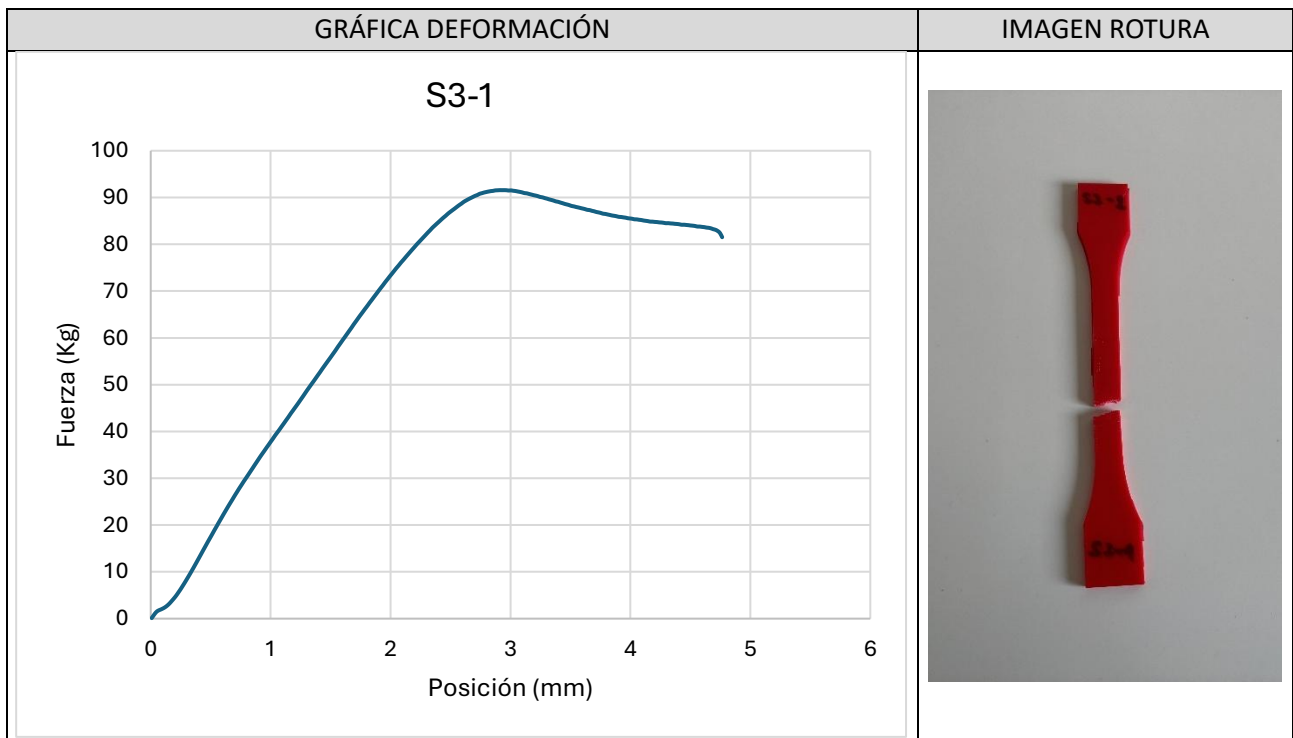
DATOS PROCESO	Fecha ensayo	05/02/2025	Hora ensayo	11:12:59
	Probeta	30	Tiempo empleado (s)	103,407
	Posición inicial (mm)	0,007	Posición final (mm)	8,623
	Fuerza inicial (kg)	0,085	Fuerza final (kg)	100,261
	Fuerza pico (kg)	108,324	Nº muestras	467



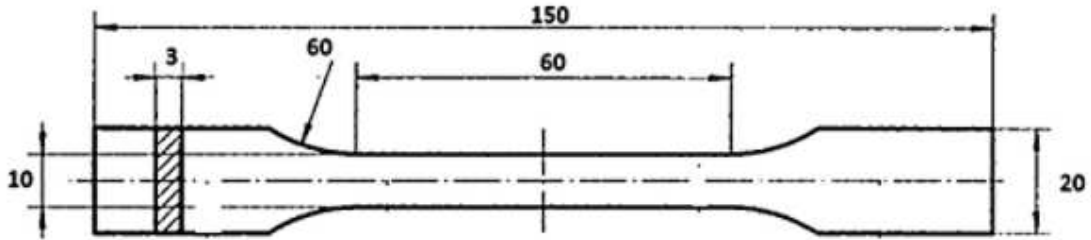
ID. ENSAYO	S3-1
-------------------	------



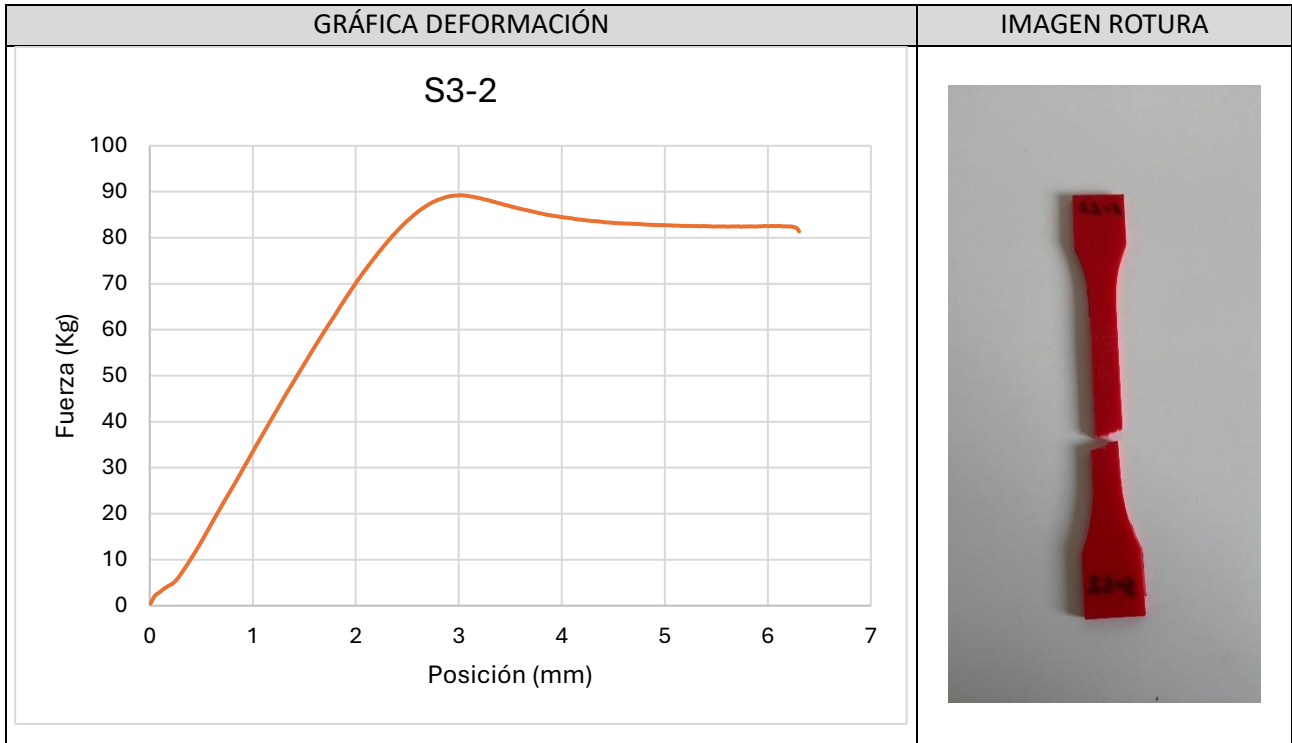
DATOS PROCESO	Fecha ensayo	05/02/2025	Hora ensayo	11:15:14
	Probeta	31	Tiempo empleado (s)	57,099
	Posición inicial (mm)	0,007	Posición final (mm)	4,764
	Fuerza inicial (kg)	0,111	Fuerza final (kg)	81,520
	Fuerza pico (kg)	91,580	Nº muestras	260



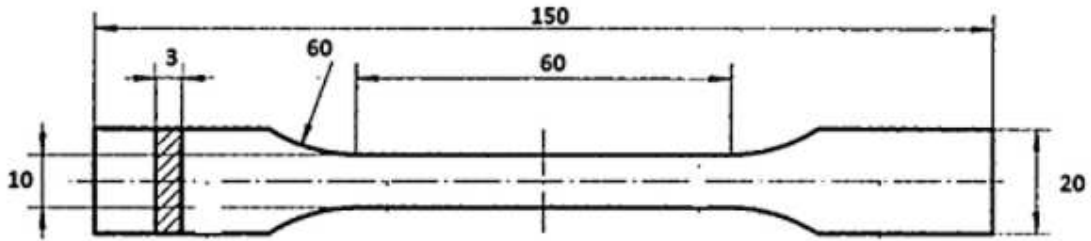
ID. ENSAYO	S3-2
-------------------	------



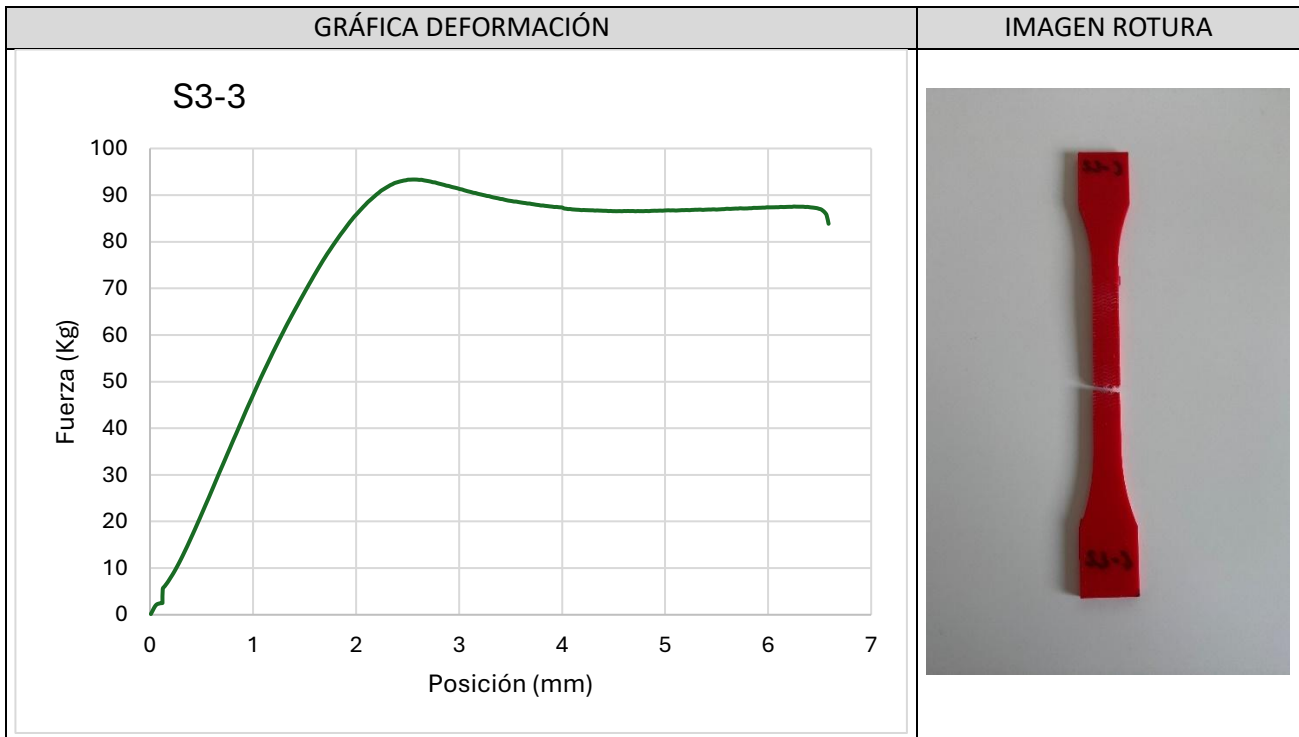
DATOS PROCESO	Fecha ensayo	05/02/2025	Hora ensayo	11:16:51
	Probeta	32	Tiempo empleado (s)	75,532
	Posición inicial (mm)	0,008	Posición final (mm)	6,302
	Fuerza inicial (kg)	0,471	Fuerza final (kg)	81,380
	Fuerza pico (kg)	89,264	Nº muestras	345



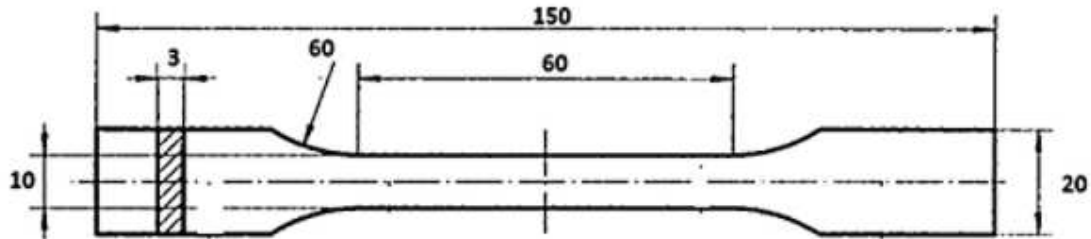
ID. ENSAYO	S3-3
-------------------	------



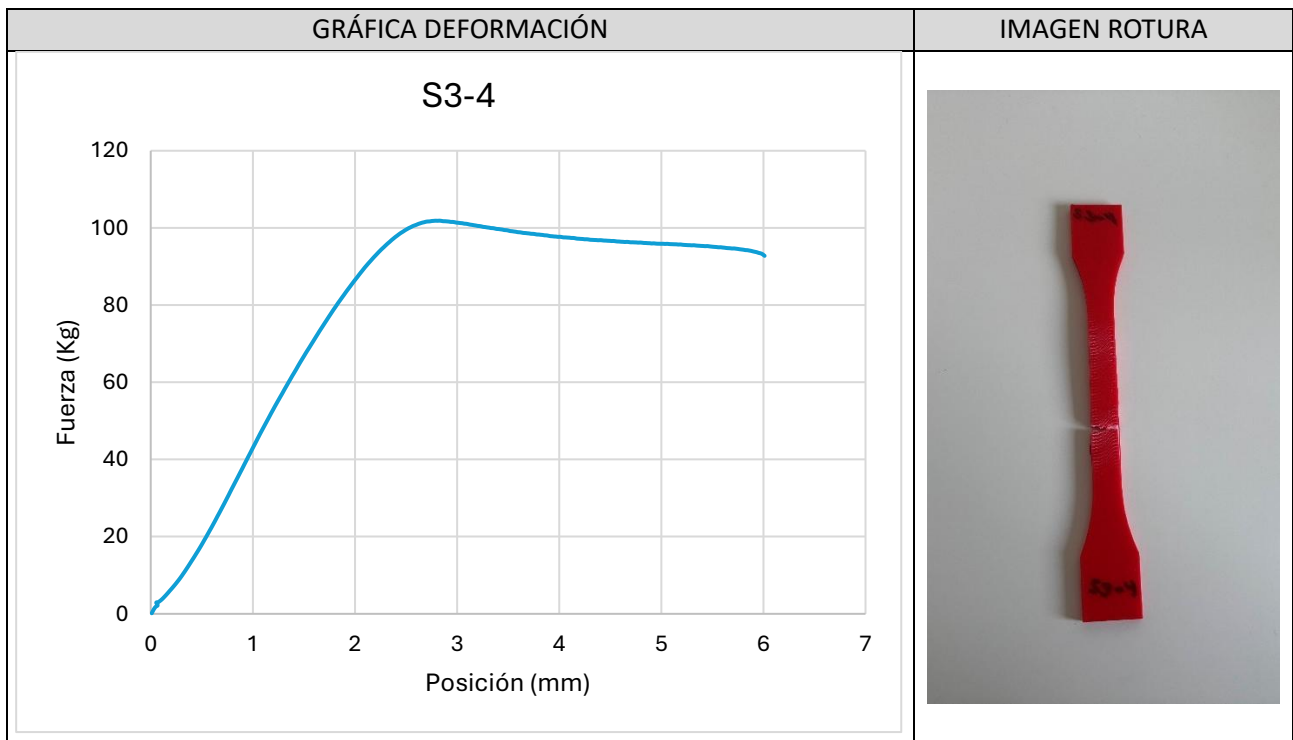
DATOS PROCESO	Fecha ensayo	05/02/2025	Hora ensayo	11:18:45
	Probeta	33	Tiempo empleado (s)	83,400
	Posición inicial (mm)	0,008	Posición final (mm)	6,586
	Fuerza inicial (kg)	0,145	Fuerza final (kg)	83,848
	Fuerza pico (kg)	93,341	Nº muestras	387



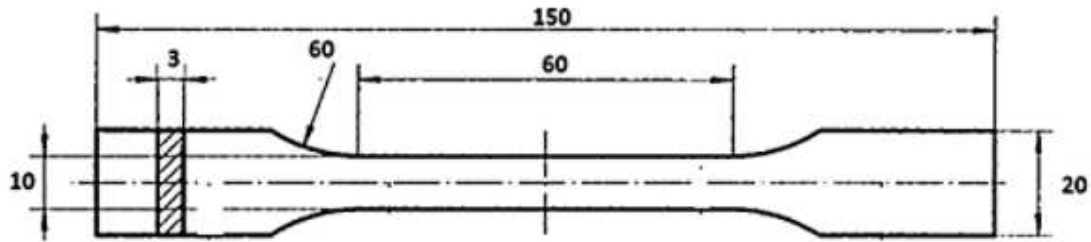
ID. ENSAYO	S3-4
-------------------	------



DATOS PROCESO	Fecha ensayo	05/02/2025	Hora ensayo	11:20:47
	Probeta	34	Tiempo empleado (s)	74,858
	Posición inicial (mm)	0,009	Posición final (mm)	6,011
	Fuerza inicial (kg)	0,147	Fuerza final (kg)	92,761
	Fuerza pico (kg)	101,881	Nº muestras	344



ID. ENSAYO	S3-5
-------------------	------



DATOS PROCESO	Fecha ensayo	05/02/2025	Hora ensayo	11:22:36
	Probeta	35	Tiempo empleado (s)	61,820
	Posición inicial (mm)	0,015	Posición final (mm)	5,169
	Fuerza inicial (kg)	0,336	Fuerza final (kg)	82,745
	Fuerza pico (kg)	90,341	Nº muestras	283

