



**Escuela Superior
de Ingeniería y Tecnología**
Universidad de La Laguna

TRABAJO FIN DE GRADO

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA EN
LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE PROBETAS
FABRICADAS POR IMPRESIÓN 3D MEDIANTE FDM**

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Alumno: Eduardo Cabello Correa

Tutores: María Milagros Laz Pavón

Fernando Rivera López

Junio, 2021

AGRADECIMIENTOS

A los tutores académicos, el Doctor Fernando Rivera López y la Doctora María Milagros Laz Pavón por su dedicación, apoyo e implicación en el desarrollo del proyecto.

Al Vicerrectorado de Innovación Docente, Calidad y Campus de Anchieta de la Universidad de La Laguna, por su apoyo a través del Proyecto de Innovación Educativa “ Impresión de prototipos 3D para prácticas de laboratorio ”.

A Miqueas Fortes, Andy Middleton y Hanoch Hemmerich, por el soporte técnico y los conocimientos transmitidos de impresión 3D.

A la técnica de laboratorio Judith R. Díaz, por la amabilidad y los conocimientos transmitidos sobre las técnicas de análisis térmico.

A mi familia, por el constante apoyo durante el desarrollo de este proyecto.

PROYECTO

Título Estudio del efecto de la temperatura en las propiedades
mecánicas de probetas fabricadas por impresión 3D mediante
FDM

PETICIONARIO

Universidad Universidad de La Laguna

Facultad Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología

Dirección Camino San Francisco de Paula, s/n, 38200 San Cristóbal de
La Laguna, S/C de Tenerife, España

AUTOR

Nombre Eduardo Cabello Correa

DNI 54114438-S

Teléfono 622312989

Correo electrónico alu0100956283@ull.edu.es

Hoy en día, la impresión 3D es un método de fabricación ampliamente utilizado en muchas áreas como, por ejemplo, el diseño industrial, la construcción, la educación o el sector alimentario. Entre las técnicas existentes, el Modelado por Deposición Fundida (FDM) es la de mayor tendencia en la Fabricación Aditiva (AM), de gran interés relacionada con las impresoras 3D de sobremesa y las altas capacidades desde el punto de vista industrial.

Respecto a la variedad de materiales existentes en la técnica AM, el ácido poliláctico (PLA) representa una alternativa interesante. Este polímero termoplástico, obtenido a partir de recursos renovables, es ampliamente empleado en la fabricación 3D debido a sus buenas ventajas como, por ejemplo, un coste aceptable, propiedades físicas adecuadas, buena biocompatibilidad y baja toxicidad de sus productos en el caso de que exista degradación.

En el presente estudio, se fabrican piezas de PLA con 100 % de relleno mediante FDM con una impresora 3D, variando la temperatura de fabricación de 180 °C a 260 °C. El objetivo es analizar la influencia de la temperatura de la boquilla de impresión en las propiedades mecánicas. Por esta razón, se realizan ensayos de resistencia a la tracción uniaxial, a la compresión y a la flexión en tres puntos, en una máquina de ensayos universal electromecánica, con el fin de obtener magnitudes mecánicas para su comparación. A partir del análisis o los resultados, se estudia si la selección de la temperatura de extrusión constituye un factor importante para obtener un producto final con las propiedades mecánicas deseadas.

ABSTRACT

Nowadays, 3D printing is a method of manufacturing widely employed in many areas as, for example, industrial design, construction, education or alimentary sector. Among the possible techniques, Fused Deposition Modeling (FDM) is the Additive Manufacturing (AM) trendiest one, of great interest related to desktop 3D printers and the high capabilities from an industrial point of view.

With respect to the variety of materials existing in AM, polylactic acid (PLA) represents an interesting alternative. This thermoplastic polymer, obtained from renewable resources, is extensively employed in 3D fabrication due to its good benefits as, for example, acceptable cost, adequate physical properties, good biocompatibility and low toxicity of its degradation products.

In the current study, 100 % infill PLA specimens were fabricated by FDM with a 3D printer, varying the manufacturing temperature from 180 °C to 260 °C. The purpose is to analyze the influence of nozzle temperature on mechanical properties. In this sense, uniaxial tensile, compressive and three-point flexural strength tests were carried out, in an electro-mechanical universal testing machine, in order to obtain mechanical magnitudes for comparison. From the analysis or results, it is studied if the selection of extrusion temperature constitutes an important factor for obtaining a final product with the desired mechanical properties.

1. Introducción	1
1.1 Objeto.....	1
1.2 Alcance	1
2. Fabricación aditiva	2
2.1 Introducción	2
2.1.1 Fotopolimerización en cuba (VAT Photopolymerization)	5
2.1.2 Proyección de Material (Material Jetting).....	6
2.1.3 Proyección de Aglutinante (Binder Jetting)	7
2.1.4 Deposición de Energía Focalizada (Directed Energy Deposition).....	8
2.1.5 Fusión de Lecho en Polvo (Powder Bed Fusion)	9
2.1.6 Laminado de Hojas (Sheet Lamination).....	10
2.1.7 Extrusión de Material (Material Extrusion).....	11
2.2 Modelado por Deposición Fundida (FDM)	12
2.2.1 Parámetros de procesamiento	12
2.2.2 Descripción del proceso de impresión.....	16
2.3 Materiales empleados en FDM	19
2.3.1 Smartfil PLA	22
3. Análisis térmico	25
3.1 Calorimetría Diferencia de Barrido (DSC).....	25
3.2 Termogravimetría (TG)	27
3.3 Análisis de resultados	30
4. Difracción de rayos-X (XRD)	34
5. Impresión de las probetas	36
5.1 Impresora 3D	36
5.2 Diseño de las probetas	38
5.3 Selección de los parámetros de impresión	40
5.4 Fabricación de las probetas.....	44
5.4.1 Probetas para el ensayo de tracción.....	47
5.4.2 Probetas para el ensayo de compresión	51
5.4.3 Probetas para el ensayo de flexión a tres puntos	53
6. Ensayos Mecánicos	56
6.1 Instrumentación de laboratorio	56

ÍNDICE GENERAL

6.2	Ensayos de tracción	57
6.3	Ensayos de compresión.....	63
6.4	Ensayos de flexión a tres puntos.....	66
7.	Análisis de resultados	70
7.1	XRD	70
7.2	Ensayos de tracción	71
7.2.1	Dirección del eje X.....	72
7.2.2	Dirección del eje Z	78
7.3	Ensayos de compresión.....	83
7.4	Ensayos de flexión a tres puntos.....	88
8.	Conclusiones.....	95
9.	Conclusions	97
10.	Líneas futuras de trabajo.....	99
11.	Glosario de términos	100
12.	Bibliografía.....	106
12.1	Normativa de aplicación.....	106
12.2	Software empleado	106
12.3	Referencias	107
13.	Anexo I: Caracterización del filamento de PLA Smartfil.....	113
13.1	Ensayo de tracción	113
13.2	Ficha técnica del material.....	116
13.3	Comparativa de probetas con diferente porcentaje de relleno	117
14.	Anexo II: Análisis térmico	119
15.	Anexo III: Gráficas.....	121
15.1	Gráficas de esfuerzo/deformación y carga/desplazamiento	121
15.1.1	Tracción eje X	121
15.1.2	Tracción eje Z.....	122
15.1.3	Compresión.....	124
15.1.4	Flexión.....	126
15.2	Gráficas para el cálculo del módulo de elasticidad	127
15.3	Gráficas para el cálculo del límite elástico.....	129
16.	Anexo IV: Dimensiones y pesos.....	131
17.	Anexo V: Condiciones atmosféricas.....	135

18. Anexo VI: Fotografías	136
18.1 Tracción eje X	136
18.2 Tracción eje Z.....	137
18.3 Compresión	138
18.4 Flexión.....	139
19. Anexo VII: Microfotografías	140
19.1 Tracción eje X	140
19.2 Tracción eje Z.....	141
19.3 Compresión	142
19.4 Flexión.....	143

Figura 1. Comparación entre a) mecanizado, b) fabricación aditiva y c) moldeo por extrusión [2].....	2
Figura 2. Etapas de la fabricación aditiva. a) Desarrollo de la idea que se transforma en datos digitales mediante CAD, (b) preprocesamiento de los datos del modelo y (c) fabricación aditiva del producto [2].....	3
Figura 3. Representación esquemática del proceso de impresión 3D basado en Estereolitografía ascendente [7].	5
Figura 4. Representación esquemática del proceso MJ [10].	6
Figura 5. a) El actuador DOD disminuye rápidamente el volumen del depósito de tinta y expulsa una gota. b) La CIJ produce un chorro inducido por presión que se rompe en pequeñas gotas, que se cargan y desvían en una trayectoria hacia la superficie impresa [11].	7
Figura 6. Representación esquemática de la tecnología BJ [10].	8
Figura 7. Esquema del proceso DED [15].	9
Figura 8. Ilustración gráfica del proceso SLS 3D, destacando sus principales componentes [17].	10
Figura 9. Esquema básico del proceso LOM, al que se pueden agregar pasos de procesamiento adicionales. El flujo continuo de material en hojas está marcado por flechas rojas. Copyright año 2012, Elsevier [20].	10
Figura 10. Representación esquemática del proceso FDM [21].	11
Figura 11. Ejemplo de algunos parámetros del proceso FDM [21].	13
Figura 12. Posibles orientaciones de la pieza en el proceso de impresión [23].	13
Figura 13. Ejemplo de Warping Deformation (WD) [4]. Se observa cómo se despegan la esquinas de la pieza debido a una mala adherencia con la cama de impresión.	16
Figura 14. Croquis de una probeta diseñada para el ensayo de flexión.	17
Figura 15. Ejemplo de un modelo tridimensional de una probeta diseñada para el ensayo de flexión.	17
Figura 16. Ejemplo de formato STL de una probeta diseñada para el ensayo de flexión.	17
Figura 17. Ejemplo de laminación de una probeta diseñada para el ensayo de flexión.	18

Figura 18. Dispositivos de entrada USB y microSD.....	18
Figura 19. a) Imagen tomada durante la impresión de probetas diseñadas para los ensayos de flexión e b) imagen realizada tras la finalización del proceso de impresión.	19
Figura 20. Piezas realizadas con los materiales mencionados en la Tabla 2. a) PLA, b) ABS, c) ASA, d) PC, e) PET, f) ULTEM, g) Nylon, h) TPU [27, 28, 29].	20
Figura 21. Piezas realizadas mediante un filamento base con la adición de una fibra para mejorar sus propiedades. a) PLA junto con fibra de madera y b) PET junto con fibra de carbono [27].....	22
Figura 22. a) Bobina de PLA, b) bolsa de almacenamiento y c) caja de almacenaje....	24
Figura 23. Curva calorimétrica de DSC típica de polímeros semicristalinos [32].	26
Figura 24. Elementos utilizados durante el DSC. a) Selladora, b) crisol y c) Discovery DSC 025 de TA Instruments.	27
Figura 25. a) Curva TG que muestra pérdida de masa en una sola etapa [34] y b) curva DTG en la dirección endotérmica.....	28
Figura 26. Instrumento Discovery SDT 650 de TA Instruments.	29
Figura 27. Curvas calorimétricas para el ensayo DSC.....	31
Figura 28. Curva TG-DTG.....	32
Figura 29. a) Ejemplo de un difractograma típico y b) representación del proceso XRD [38].	35
Figura 30. Difractómetro PANalytical Empyrean.....	35
Figura 31. Principales componentes de la impresora 3D.	36
Figura 32. Dimensiones de las piezas fabricadas mediante FDM. a) XRD, b) compresión, c) flexión y d) tracción.....	38
Figura 33. Diseños 3D realizados con SolidWorks 2018 de las piezas fabricadas mediante FDM. a) XRD, b) flexión, c) tracción y d) compresión.....	40
Figura 34. Explicación de las capas presentes utilizando una pieza para el ensayo de flexión. a) Perímetros o carcasas verticales, b) carcasas horizontales y c) falda, relleno inferior, relleno interno y relleno superior sin representar las carcasas verticales.	41
Figura 35. Piezas para el ensayo de tracción en la dirección de construcción del a) eje Z y b) eje X.	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 36. Piezas para el ensayo de tracción con porcentaje de relleno de a) 50 % y b) 100 %.....	42
Figura 37. Patrones de relleno y ángulos de deposición empleados para las distintas piezas fabricadas. a) Tracción eje X, b) XRD, c) compresión, d) flexión y e) tracción eje Z.....	43
Figura 38. Imágenes de las distintas impresiones. a) Tracción eje X, b) XRD, c) tracción eje Z, d) compresión y e) flexión.....	45
Figura 39. Instrumentos de medida junto con la balanza empleada.....	46
Figura 40. Envasado al vacío de las piezas destinadas a los distintos ensayos mecánicos.	47
Figura 41. Marcado de las probetas de tracción.....	47
Figura 42. Representación de los tipos de air gap [23, 46].	49
Figura 43. Impresión a una temperatura de a) 180 °C, b) 200 °C y c) 260 °C.....	49
Figura 44. Proceso de impresión de las piezas de tracción en la dirección del eje X. ...	50
Figura 45. Proceso de impresión de las probetas para el ensayo de tracción (eje Z). ...	51
Figura 46. Marcado de las piezas para el ensayo de compresión.....	52
Figura 47. a) Impresión a 180 °C, b) impresión a 200 °C, c) impresión a 260 °C y d) formación de rebabas.....	52
Figura 48. Proceso de impresión de las probetas para el ensayo de compresión.	53
Figura 49. Marcado de las probetas para el ensayo de flexión.....	54
Figura 50. Impresión a una temperatura de a) 180 °C, b) 200 °C y c) 260 °C.....	54
Figura 51. Proceso de impresión de las probetas para el ensayo de flexión.	55
Figura 52. Máquina de ensayos mecánicos Shimadzu Autograph AG-IS 50 KN.....	56
Figura 53. Elementos que intervienen en el ensayo de a) tracción, b) flexión y c) compresión.	57
Figura 54. Extensómetro MFA 25.....	57
Figura 55. Elementos que intervienen en el ensayo de tracción.....	58

Figura 56. Curva de esfuerzo/deformación típica de ensayos de tracción. Adaptado de [47].	59
Figura 57. Determinación del módulo de elasticidad en tracción [40].....	61
Figura 58. Cálculo del esfuerzo de límite elástico.	62
Figura 59. a) Colocación de las piezas en el ensayo de compresión y b) curvas esfuerzo/deformación típicas del ensayo de compresión [42].	63
Figura 60. Colocación de la probeta sobre los apoyos para el ensayo de flexión. Adaptado de [43].	66
Figura 61. Curva carga/desplazamiento típica de ensayos de flexión. Adaptado de [43].	67
Figura 62. Difractogramas obtenidos tras el análisis XRD.	71
Figura 63. Curva esfuerzo/deformación representativa del ensayo de tracción en el eje X.	72
Figura 64. a) Imagen después del ensayo de tracción de una probeta impresa a 220 °C, b) fotografía realizada tras el ensayo de tracción, con un microscopio digital, a una muestra impresa a 180 °C y c) fotografía realizada tras el ensayo de tracción, con un microscopio digital, a una muestra impresa a 260 °C. Se aprecia claramente el efecto del air gap positivo en la pieza impresa a la temperatura de 180 °C.	73
Figura 65. Gráfico comparativo de la influencia de la temperatura sobre la RT (eje X).	73
Figura 66. Gráfico comparativo de la influencia de la temperatura sobre el módulo de elasticidad a tracción (eje X).	75
Figura 67. Gráfico comparativo de la influencia de la temperatura sobre el límite elástico (eje X).	76
Figura 68. Gráfico comparativo de la influencia de la temperatura sobre la deformación máxima alcanzada (eje X).	77
Figura 69. Gráfica de esfuerzo/deformación representativa del ensayo de tracción en el eje Z. A 180 °C, la curva no se manifiesta ya que queda superpuesta por las demás temperaturas de impresión.	78
Figura 70. a) Fractura de una probeta impresa a 200 °C, b) fotografía realizada tras la rotura, con un microscopio digital, a una muestra impresa a 200 °C en la dirección del eje Z y c) fotografía realizada tras la rotura, con un microscopio digital, a una muestra impresa a 200 °C en la dirección del eje X.	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 71. Gráfico comparativo de la influencia de la temperatura sobre la RT (eje Z).	80
Figura 72. . Gráfico comparativo de la influencia de la temperatura sobre el módulo de elasticidad a tracción (eje Z)......	81
Figura 73. Gráfico comparativo de la influencia de la temperatura sobre la deformación máxima alcanzada (eje Z)......	82
Figura 74. Secuencia del ensayo de compresión. a) Antes del ensayo, b) durante el ensayo y c) después del ensayo.	83
Figura 75. a) Gráfica de esfuerzo/deformación representativa del ensayo de compresión y b) zoom sobre la zona elástica de la curva de esfuerzo/deformación.....	84
Figura 76. a) Imagen, tras el ensayo, de la serie de probetas impresas a 200 °C y b) fotografía realizada sobre las grietas, con un microscopio digital, a una muestra impresa a 200 °C.	85
Figura 77. Gráfico comparativo de la influencia de la temperatura sobre el módulo de elasticidad a compresión.....	86
Figura 78. Gráfico comparativo de la influencia de la temperatura sobre el esfuerzo de fluencia a compresión.	87
Figura 79. Secuencia del ensayo de flexión a tres puntos. a) Colocación de la probeta en los apoyos, b) acomodación del puente de carga sobre la superficie de la probeta y c) fotografía durante el ensayo.	88
Figura 80. Curva carga/desplazamiento representativa del ensayo de flexión.....	89
Figura 81. a) Imagen después del ensayo de flexión de una probeta impresa a 260 °C y b) fotografía realizada tras el ensayo de flexión, con un microscopio digital, a una muestra impresa a 260 °C.....	90
Figura 82. Gráfico comparativo de la influencia de la temperatura sobre la carga máxima.	90
Figura 83. Gráfico comparativo de la influencia de la temperatura sobre el MOR.	91
Figura 84. Gráfico comparativo de la influencia de la temperatura sobre el módulo de elasticidad.	92
Figura 85. Gráfico comparativo de la influencia de la temperatura sobre el desplazamiento máximo.	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 86. Gráfico comparativo de la influencia de la temperatura sobre la deformación máxima a flexión.	93
--	----

Tabla 1. Diámetros más comunes de la boquilla extrusora utilizados durante el proceso FDM.	15
Tabla 2. Materiales empleados en FDM [27, 29, 30].	21
Tabla 3. Propiedades mecánicas proporcionadas por el fabricante junto con los resultados de tracción del filamento de PLA.	23
Tabla 4. Valores obtenidos del ciclo calentamiento-enfriamiento-calentamiento realizado.....	32
Tabla 5. Leyenda correspondiente a los principales componentes de la impresora 3D.	37
Tabla 6. Dimensiones de las piezas fabricadas mediante FDM correspondientes a la Figura 32.....	39
Tabla 7. Velocidades de impresión empleadas.....	44
Tabla 8. Resumen de las piezas impresas y su duración por cada serie.	46
Tabla 9. Medidas y pesos promedios de las probetas (eje X) destinadas al ensayo de tracción.	48
Tabla 10. Medidas y pesos promedios de las probetas (eje Z) destinadas al ensayo de tracción.	51
Tabla 11. Medidas y pesos promedios de las probetas destinadas al ensayo de compresión.	53
Tabla 12. Medidas y pesos promedios de las probetas destinadas al ensayo de flexión.	55
Tabla 13. Resultados del ensayo de tracción (eje X) junto con las condiciones atmosféricas.	77
Tabla 14. Resultados del ensayo de tracción (eje Z) junto con las condiciones atmosféricas.....	83
Tabla 15. Resultados del ensayo de compresión junto con las condiciones atmosféricas.	88
Tabla 16. Resultados del ensayo de flexión junto con las condiciones atmosféricas....	94

ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1. Pieza para el análisis XRD.

Plano 2. Probeta para el ensayo de tracción.

Plano 3. Probeta para el ensayo de compresión.

Plano 4. Probeta para el ensayo de flexión.

1. Introducción

1.1 Objeto

El principal objetivo del trabajo es realizar un estudio en el que se compruebe cómo afecta la temperatura de impresión a la estructura interna de las piezas fabricadas. De esta manera, se pretende relacionar dicha estructura con las propiedades mecánicas de los prototipos mediante ensayos de tracción, compresión y flexión.

Además, se presenta un objetivo académico, que consiste en la superación de la asignatura Trabajo Fin de Grado, perteneciente al último curso del Grado de Ingeniería Mecánica Industrial ofrecido por la Universidad de La Laguna.

1.2 Alcance

Para conseguir el objetivo principal del trabajo, se debe comprender el funcionamiento de la técnica de impresión 3D empleada, así como, el uso experimental de la Máquina Universal de Ensayos que permite la realización de los ensayos mecánicos de tracción, compresión y flexión.

Además, conocer las propiedades térmicas del material empleado, puede suponer una gran ventaja para determinar las temperaturas de impresión de la boquilla de extrusión. Con ello, se puede colaborar en el avance del conocimiento de las propiedades del material utilizado, actualizando su información.

2. Fabricación aditiva

2.1 Introducción

Uno de los objetivos principales de la industria moderna es la fabricación de productos de alta calidad con buenas prestaciones para aplicaciones del mercado. Por esta razón, las industrias manufactureras se han esforzado en automatizar los procesos de producción, lo que implica una inversión de tiempo en adquirir conocimientos sobre el software y el hardware de los equipos [1].

Una de las tecnologías no convencionales que ha dado un paso importante en las dos últimas décadas son las técnicas de fabricación aditiva [1] (AM, siglas referidas al término en inglés *Additive Manufacturing*), una tecnología emergente que está revolucionando el diseño y que supone una alternativa muy interesante frente a los métodos de fabricación tradicionales. La AM fue introducida por primera vez durante la década de los 80 del siglo pasado, para satisfacer las necesidades altamente especializadas de creación de modelos y fabricación rápida de prototipos (RP, siglas referidas al término en inglés *Rapid Prototyping*). La impresión 3D (también conocida como fabricación aditiva) ha surgido como una plataforma de tecnología versátil para el diseño asistido por ordenador (CAD, siglas referidas al término en inglés *Computer Aided Design*) y la RP.

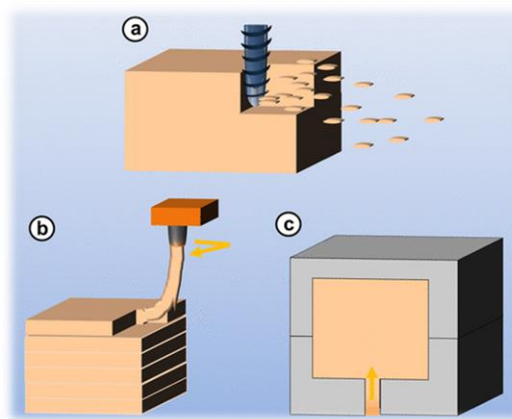


Figura 1. Comparación entre a) mecanizado, b) fabricación aditiva y c) moldeo por extrusión [2].

La AM permite la producción de piezas personalizadas a partir de metales, cerámicas y polímeros sin la necesidad de moldes o mecanizados típicos de la fabricación convencional [2]. La **Figura 1** muestra una comparativa entre la fabricación aditiva y las tecnologías tradicionales. En primer lugar, se observa el proceso de mecanizado en el cual

la formación de la pieza se logra por arranque de material. En segundo lugar, se muestra la técnica AM, donde la elaboración del prototipo se logra mediante la adición capa por capa del material necesario. En último lugar, se ilustra un ejemplo del moldeo por extrusión, donde la producción de la pieza se consigue añadiendo plástico fundido a presión en un molde de fabricación.

La AM permite la producción de una amplia variedad de figuras y formas con un menor coste respecto a los procesos de fabricación tradicionales, ayudando por tanto, a la simplificación o eliminación de líneas de montaje [3]. Con la evolución de la AM, se ha vuelto mucho más fácil fabricar un objeto 3D de cualquier forma usando directamente un modelo CAD a partir de grandes datos numéricos mediante un proceso rápido, flexible y automatizado [4]. Una vez se produce un boceto CAD, el equipo de fabricación aditiva lee los datos del archivo y comienza a agregar capas sucesivas del material que se trate para fabricar el objeto tridimensional. La **Figura 2** muestra una representación sobre las etapas de la fabricación aditiva.

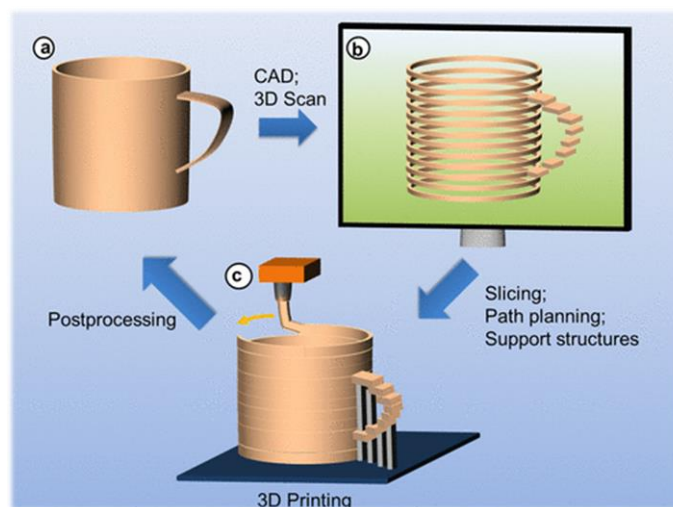


Figura 2. Etapas de la fabricación aditiva. a) Desarrollo de la idea que se transforma en datos digitales mediante CAD, (b) preprocesamiento de los datos del modelo y (c) fabricación aditiva del producto [2].

En la actualidad, existen varios métodos de AM disponibles comercialmente con el fin de ampliar la gama de materiales compatibles con la tecnología y de extender sus aplicaciones. Las grandes diferencias entre las distintas técnicas de la fabricación aditiva se centran en la adición del material y en el medio de fusión entre las partículas. En algunos casos, se trata de agregar material en estado sólido o semisólido, mientras que en otros, la materia prima se puede encontrar en fase líquida. Según la clasificación

establecida por la norma *UNE-EN ISO/ASTM 52900:2017* [5], los procesos AM se diferencian en siete categorías:

- 1) Fotopolimerización en cuba.
- 2) Proyección de Material.
- 3) Proyección de Aglutinante.
- 4) Deposición de Energía Focalizada.
- 5) Fusión de Lecho en Polvo.
- 6) Laminado de Hojas.
- 7) Extrusión de Material.

En los siguientes apartados, se desarrollan las distintas técnicas mencionadas, explicando brevemente en qué consiste cada una.

2.1.1 Fotopolimerización en cuba (VAT Photopolymerization)

La Fotopolimerización en cuba es un término genérico que se aplica a varias tecnologías de impresión 3D. Se define como un proceso de líquido a sólido, en el que la fotopolimerización controlada por ordenador se utiliza para crear objetos sólidos a partir de una cuba de resinas líquidas [6]. Durante el proceso, se aplica un haz de luz a una resina líquida, sensible a dicha luz y contenida en una cuba, dibujando una sección transversal sobre la superficie de la cuba mencionada. La luz proyectada sobre diferentes tipos de espejos, solidifica capa por capa la resina en un proceso repetitivo. Entre los procesos más comunes se incluyen: la Estereolitografía (SLA, por sus siglas en inglés *Stereolithography*), el Procesamiento de Luz Digital (DLP, por sus siglas en inglés *Digital Light Projector*), el Procesamiento de Interfaz de Luz Continua (CLIP, por sus siglas en inglés *Continuous Light Interface Production*) y la Polimerización de dos Fotones (TPP, por sus siglas en inglés *Two Photon Polymerization*). La **Figura 3** muestra un ejemplo de Estereolitografía, la técnica de Fotopolimerización en cuba mayormente utilizada.

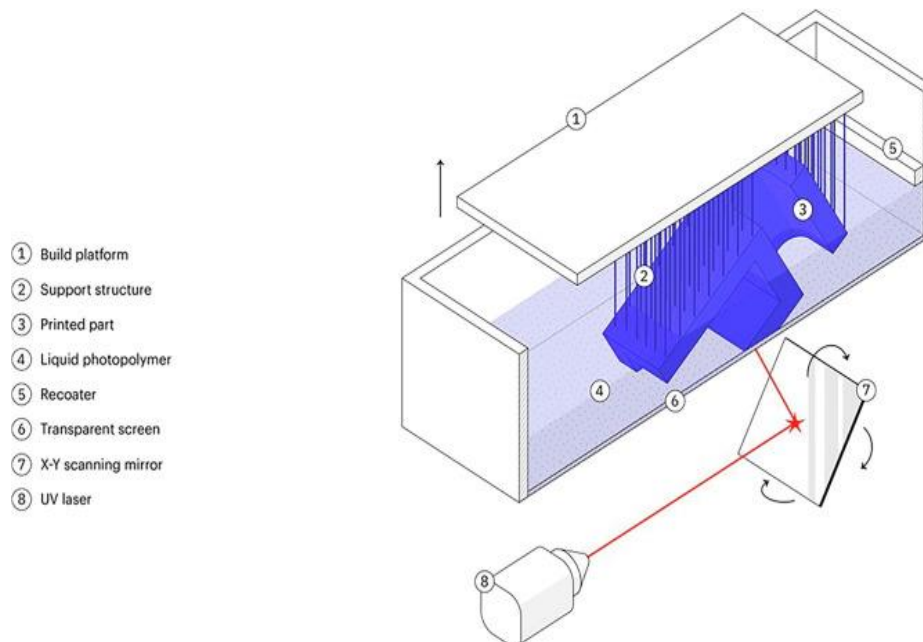


Figura 3. Representación esquemática del proceso de impresión 3D basado en Estereolitografía ascendente [7].

2.1.2 Proyección de Material (Material Jetting)

La Proyección o Inyección de Material (MJ, siglas referidas al término en inglés *Material Jetting*) se define como el proceso AM basado en la deposición selectiva de gotas de material para llevar a cabo la fabricación de objetos [5]. Esta técnica, hace uso de las mismas características que la impresión con Inyección de Tinta (IP, siglas referidas al término en inglés *Inkjet Printing*), tecnología que utilizan las impresoras convencionales 2D. Sin embargo, a diferencia de estas impresoras 2D, se inyectan capas de fotopolímero líquido (capa por capa) que se pueden curar en la plataforma de construcción, mientras que en una impresora habitual, se inyectan gotas de tinta sobre una hoja de papel.

Durante el proceso, se utiliza una serie de boquillas para depositar selectivamente el material (generalmente una resina), que se cura con una fuente de energía, como por ejemplo, una lámpara UV [8] (ver la **Figura 4**). Esta tecnología admite el uso de una amplia variedad de materiales, lo que permite fabricar polímeros duros y blandos en un solo proceso [9].

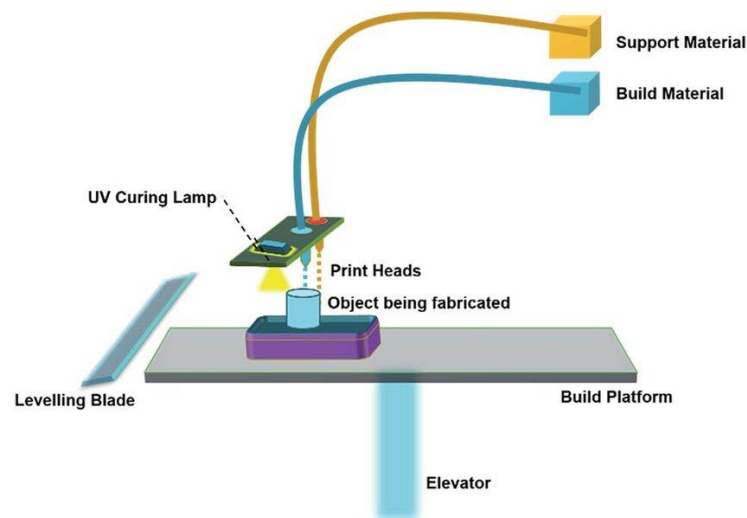


Figura 4. Representación esquemática del proceso MJ [10].

Se han realizado numerosos estudios sobre dos modificaciones de impresoras de inyección de material:

- Inyección por Demanda (DOD, por sus siglas en inglés *Drop-On-Demand*).
- Impresión de Inyección de Tinta Continua (CIJ, por sus siglas en inglés *Continuous Inkjet*).

La única diferencia entre la técnica CIJ y la DOD es el momento en el que se generan las gotas. Como se observa en la **Figura 5**, en la DOD las gotas se producen cuando es necesario, mientras que en la CIJ, se generan rompiendo el flujo continuo a través de una boquilla de expulsión [10].

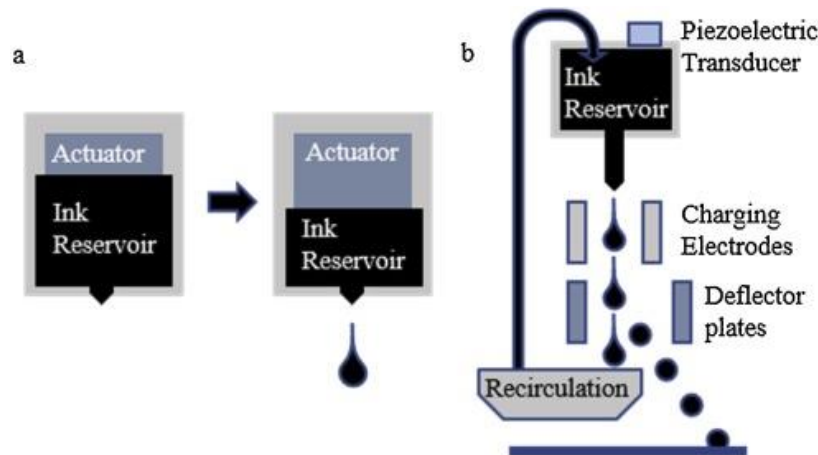


Figura 5. a) El actuador DOD disminuye rápidamente el volumen del depósito de tinta y expulsa una gota. b) La CIJ produce un chorro inducido por presión que se rompe en pequeñas gotas, que se cargan y desvían en una trayectoria hacia la superficie impresa [11].

2.1.3 Proyección de Aglutinante (Binder Jetting)

La tecnología de Proyección de Aglutinante (BJ, por sus siglas en inglés *Binder Jetting*) fue desarrollada inicialmente en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT, por sus siglas en inglés *Massachusetts Institute Technology*) y patentada en 1993 por Emanuel Sachs, quien desarrolló el proceso utilizando un polvo de tipo yeso y un aglutinante compuesto por glicerina y agua, depositado mediante cabezales de impresión de inyección de tinta [12].

En el proceso, se coloca un polvo fino sobre una plataforma de construcción (ver la **Figura 6**) y posteriormente, se aplica cuidadosamente un agente adhesivo líquido a través de cabezales de impresión de inyección de tinta, para adherir las partículas entre sí. La plataforma de construcción desciende una distancia prefijada y la siguiente capa de polvo se coloca sobre la primera, empleando un rodillo durante el proceso [10]. A continuación, se imprime la siguiente capa y se une a la anterior mediante el aglutinante inyectado [10, 12]. Repitiendo el proceso de deposición de polvo y unión, las piezas se acumulan en el lecho de polvo [10]. Finalmente, la caja se puede calentar para curar o fijar el aglutinante

si es necesario y seguidamente, las partes impresas se pueden retirar del lecho de polvo en un proceso denominado despojado [12].

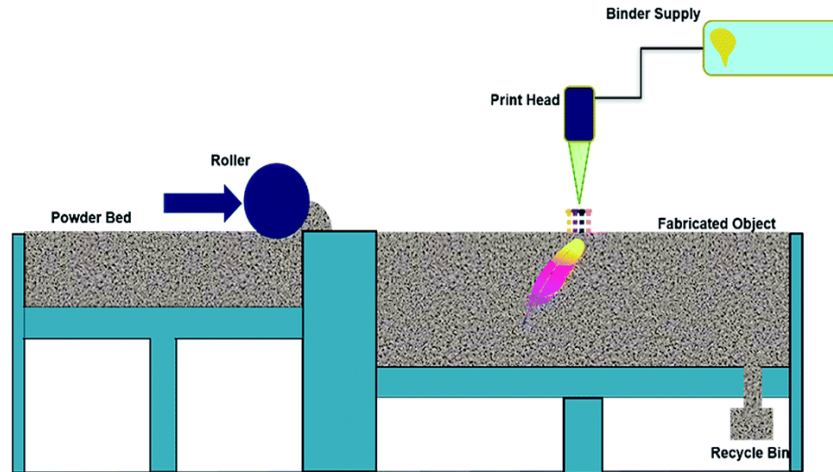


Figura 6. Representación esquemática de la tecnología BJ [10].

Esta tecnología es capaz de imprimir una variedad de materiales que están disponibles en forma de polvo, incluidos metales, polímeros y cerámicas [10]. Además, debido al uso de aglutinantes, la técnica BJ posee varias ventajas sobre otros procesos AM, como la eliminación de defectos inducidos térmicamente (por ejemplo, la distorsión y el crecimiento de grano no deseado) y una amplia compatibilidad con varios materiales. Algunos de los componentes “exóticos” empleados en el proceso BJ son: Inconel 718, cobre, zirconio, carburo de silicio, titanita de bario, fosfato de calcio e hidroxiapatita [13].

2.1.4 Deposición de Energía Focalizada (Directed Energy Deposition)

La Deposición de Energía Focalizada (DED, por sus siglas en inglés *Directed Energy Deposition*) es una técnica AM avanzada para la fabricación de componentes, recubrimientos y reparación de piezas. Durante el proceso, se proyecta un haz de láser en movimiento sobre una superficie para producir un baño de fusión y posteriormente, se pulveriza polvo metálico en este baño mediante boquillas para formar el componente deseado capa por capa [14]. La calidad y la forma de los componentes fabricados dependen de muchos parámetros, incluida la estrategia de escaneo, la potencia del láser, la velocidad de alimentación del polvo y su concentración [14]. A medida que la fuente de energía se mueve, el material previamente depositado se solidifica. La materia prima se transporta utilizando un gas inerte que también actúa para prevenir la oxidación durante el proceso [15]. La **Figura 7** muestra una representación de la tecnología DED.

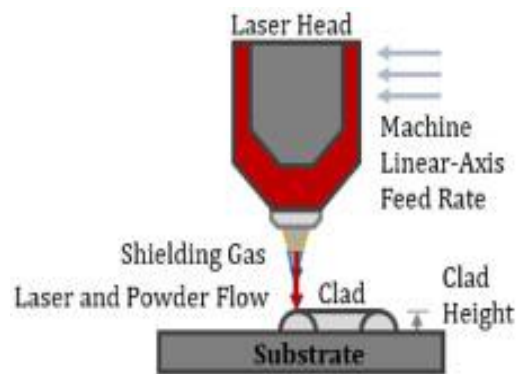


Figura 7. Esquema del proceso DED [15].

De igual modo, la técnica DED es muy adecuada para fabricar Material Clasificado Funcionalmente (FGM, por sus siglas en inglés *Functionally Graded Material*), utilizado en varios campos como el aeroespacial, militar y médico. Con esta tecnología se pueden depositar numerosos materiales, incluidos los basados en titanio, níquel y hierro, además del acero inoxidable con una tasa de deposición relativamente alta, en comparación con otros procesos AM [14].

2.1.5 Fusión de Lecho en Polvo (Powder Bed Fusion)

Esta tecnología AM de producción avanzada (PBF, por sus siglas en inglés *Powder Bed Fusion*), utiliza un láser o un haz de electrones como fuente de energía térmica para la irradiación y fusión de partículas de polvo [16]. Durante el proceso, la fuente de energía impacta sobre el polvo fundiéndolo o sinterizándolo. A medida que el proceso continúa, se extienden capas de polvo encima de otras con ayuda de un rodillo mecánico, mientras el prototipo se solidifica. Este proceso se repite hasta finalizar todas las secciones de la pieza. Dentro de esta técnica, los procesos más comunes incluyen: la Sinterización Selectiva por Láser (SLS, por sus siglas en inglés *Selective Laser Sintering*), la Fusión Selectiva por Láser (SLM, por sus siglas en inglés *Selective Laser Melting*), la Sinterización Directa por Láser de Metales (DMLS, por sus siglas en inglés *Direct Metal Laser Sintering*) y la Fusión por haz de Electrones (EBM, por sus siglas en inglés *Electron Beam Melting*). La **Figura 8** muestra una representación del proceso SLS, mostrando sus principales componentes.

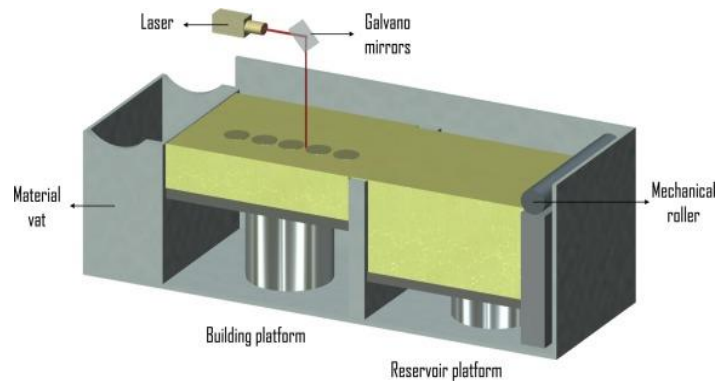


Figura 8. Ilustración gráfica del proceso SLS 3D, destacando sus principales componentes [17].

2.1.6 Laminado de Hojas (Sheet Lamination)

Esta tecnología se define como un proceso AM en el cual un material en forma de láminas u hojas se une para construir un objeto [5]. Esta técnica incluye dos tipos de procesos [18]: la Fabricación de Objetos Laminados (LOM, por sus siglas en inglés *Laminated Object Manufacturing*), en la cual láminas delgadas hechas de polímeros sintéticos o papel se laminan, cortan y pegan secuencialmente capa por capa para construir un objeto [2] (ver la **Figura 9**). En segundo lugar, se encuentra la Fabricación Aditiva Ultrasónica (UAM, por sus siglas en inglés *Ultrasonic Additive Manufacturing*), en la que láminas delgadas de metal o aleaciones metálicas se sueldan capa por capa para crear una estructura 3D [19].

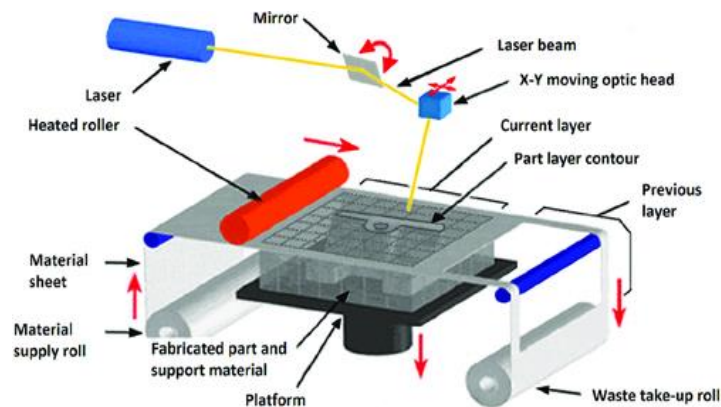


Figura 9. Esquema básico del proceso LOM, al que se pueden agregar pasos de procesamiento adicionales. El flujo continuo de material en hojas está marcado por flechas rojas. Copyright año 2012, Elsevier [20].

De manera similar a otros métodos de AM, las piezas fabricadas con el laminado de hojas pueden requerir un procesamiento posterior para mejorar la calidad de la superficie y la precisión dimensional.

2.1.7 Extrusión de Material (Material Extrusion)

La técnica AM basada en extrusión consiste en la deposición capa a capa controlada por ordenador de polímeros, pastas y dispersiones fundidas a través de una boquilla u orificio móvil que actúa como cabezal de impresión por extrusión [2]. Incluye varias técnicas en las que destacan principalmente: el Modelado por Deposición Fundida (FDM, por sus siglas en inglés *Fused Deposition Modeling*) y la Dispensación 3D, en la que se incluyen las técnicas de Microextrusión 3D y Deposición de Fibras.

En 1989, Scott Crump inventó y patentó el Modelado por Deposición Fundida. Poco después, fundó la empresa *Stratasys* que comercializa las primeras impresoras 3D FDM [2]. Esta tecnología comprende la extrusión en 3D de polímeros termoplásticos que se alimentan mecánicamente como filamentos delgados desde un carrete al cabezal de impresión de extrusión (ver la **Figura 10**). La extrusora se calienta a una temperatura de proceso apropiada para el polímero utilizado, por ejemplo, por encima de la temperatura de fusión para los polímeros semicristalinos. Desde principios del año 2000, la FDM ha sido la técnica de AM más utilizada en todo el mundo [2].

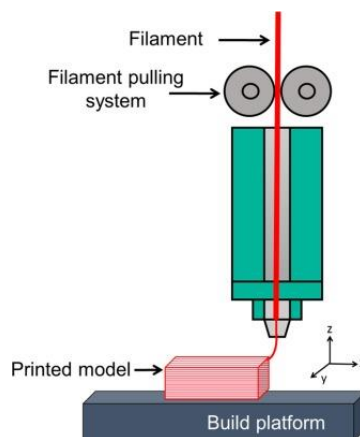


Figura 10. Representación esquemática del proceso FDM [21].

A diferencia de los procesos SLA, SLM y MJ con sus ventanas de procesamiento y rangos de formulación bastante estrechos, la Dispensación 3D tolera una variedad mucho mayor de materiales que se pueden combinar entre sí mediante múltiples dispensadores. Esto es particularmente ventajoso con respecto al procesamiento de materiales biológicos, como por ejemplo, células vivas y factores de crecimiento, que no toleran altas temperaturas de procesamiento y monómeros tóxicos [2].

2.2 Modelado por Deposición Fundida (FDM)

Es la técnica de impresión 3D que se emplea en el presente trabajo, por ello, se desarrolla con especial hincapié. La tecnología FDM, fue desarrollada en la década de los 80 y comercializada en los 90 [1]. Es uno de los métodos más utilizados entre las otras técnicas ya mencionadas, debido al precio relativamente bajo del equipamiento necesario y la extensa variedad de materias primas que se pueden utilizar [3]. Es también conocido como la Fabricación por Filamento Fundido (FFF, por sus siglas en inglés *Fused Filament Fabrication*, término registrado por *Stratasys Inc.*).

Esta técnica AM permite fabricar piezas tridimensionales, calentando y extruyendo los materiales de filamentos termoplásticos a través de una pequeña boquilla, sin la necesidad de herramientas ni mecanizado y sin requerir intervenciones humanas [1]. La principal ventaja es que esta tecnología ha permitido que la impresión 3D sea más accesible para los usuarios. No solo se utiliza para realizar prototipos, sino que los productos finales también se fabrican con este tipo de máquinas [1]. La calidad del producto final depende en gran medida de las materias primas empleadas, así como de los parámetros de procesamiento [3]. A continuación, se desarrollan los parámetros más importantes que intervienen en el proceso de impresión.

2.2.1 Parámetros de procesamiento

- a) **Ángulo de deposición (raster angle):** es el ángulo entre la trayectoria de la boquilla y el eje X de la plataforma de impresión durante el proceso FDM. Este afecta a la precisión en la elaboración y al rendimiento mecánico de la muestra impresa. Generalmente, se puede seleccionar entre 0° y 90° [22]. La **Figura 11** presenta un ejemplo gráfico de diferentes ángulos de deposición.
- b) **Densidad de relleno (infill density):** este parámetro expresa el volumen de material impreso y domina directamente sobre las propiedades de la muestra impresa. Esto quiere decir que una menor o mayor densidad afecta considerablemente a las propiedades mecánicas. El componente más denso posee mejores propiedades mecánicas, pero se necesita más tiempo para preparar el prototipo [23]. La densidad se controla en porcentaje como muestra la **Figura 11**, donde el 0 % se refiere a una pieza hueca y el 100 % a una pieza completamente sólida.

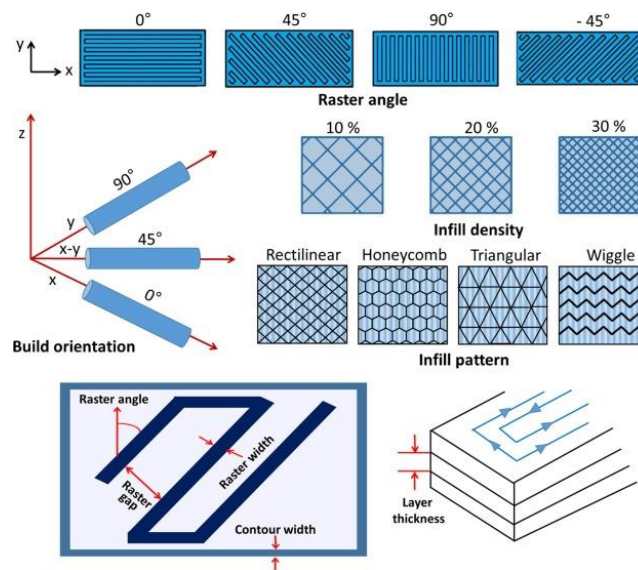


Figura 11. Ejemplo de algunos parámetros del proceso FDM [21].

c) **Orientación de la pieza (build orientation):** describe la disposición en la que el componente a imprimir se ajusta en la plataforma de construcción con los tres ejes principales X, Y y Z de la impresora 3D [23]. Este parámetro también afecta a las propiedades mecánicas de las muestras impresas. Las Figuras 11 y 12 muestran un ejemplo gráfico de la orientación de impresión.

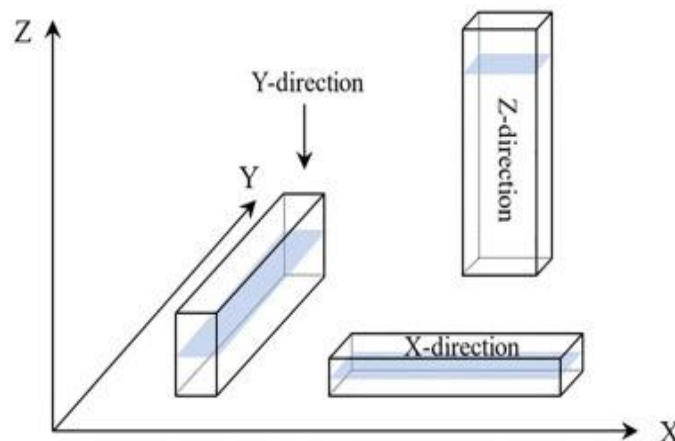


Figura 12. Posibles orientaciones de la pieza en el proceso de impresión [23].

d) **Patrón de relleno (infill pattern):** es la metodología utilizada para imprimir la estructura interna de la pieza [23]. Existen muchos patrones de relleno disponibles, los más utilizados son:

- Rectilíneo.
- Rectilíneo alineado.

- Triangular o diagonal.
- Serpenteante (en inglés, wiggle).
- En forma de panal (en inglés, honeycomb).
- Lineal.
- Concéntrico.
- Rejilla.

Según varios estudios, el tipo de relleno afecta directamente a las propiedades mecánicas de las piezas. La **Figura 11** muestra gráficamente algunos ejemplos de los distintos tipos mencionados.

e) Espesor de capa (layer thickness): se refiere a la cantidad de material depositada a lo largo del eje vertical de la impresora 3D en una sola pasada [23] (ver la **Figura 11**). En la acumulación capa por capa, cuando aumenta el espesor, disminuye la precisión de la impresión, aumenta la rugosidad de la superficie, disminuye el tiempo de impresión y el perfil exterior es propenso al efecto escalonado. A la inversa, cuando se reduce el espesor de la capa, se mejora la precisión de la muestra impresa, disminuye la rugosidad de la superficie, aumenta el tiempo de impresión y disminuye la eficiencia [22]. La elección del grosor de capa depende del diámetro de la boquilla, de las propiedades del material y de la precisión que se requiera. Además, las alturas de deposición del material siempre son menores que el diámetro de la boquilla extrusora [23].

f) Velocidad de impresión (printing speed): puede definirse como la velocidad de desplazamiento de la boquilla mientras se deposita material en la plataforma de construcción. El tiempo de impresión de los componentes depende directamente de la velocidad de impresión. Del mismo modo, este parámetro tiene un impacto dominante en la deformación de la pieza. Esto se debe a la cantidad significativa de tensión residual que se produce durante la deposición del material, que es el resultado de un proceso de extrusión más rápido. Sin embargo, el efecto de la velocidad de impresión se considera insignificante cuando se imprimen capas más delgadas [23].

g) Diámetro de la boquilla de extrusión (nozzle diameter): este parámetro tiene una consecuencia considerable en el ancho del material depositado. Para mantener un flujo constante adecuado del material de extrusión, la selección de un diámetro de boquilla

óptimo es vital [23]. Además, se observa que el diámetro de la boquilla tiene un gran efecto en el tiempo de extrusión, cuanto mayor es el diámetro de la boquilla menor es el tiempo necesario para completar la extrusión [23]. Por otra parte, se ha demostrado que el diámetro de la boquilla tiene un gran efecto sobre el espesor de capa, como se ha mencionado anteriormente. Los valores más comunes para el diámetro de la boquilla se resumen en la *Tabla 1*.

Tabla 1. Diámetros más comunes de la boquilla extrusora utilizados durante el proceso FDM.

Diámetros de las boquillas (mm)	Nivel de los detalles durante la impresión	Nivel de horas de impresión
0,2	Máximo	Alto
0,4	Estándar	Estándar
0,6	Medio	Medio
0,8	Mínimo	Bajo

h) Temperatura de la boquilla de extrusión (nozzle temperature): es el parámetro más importante en este trabajo e irá cambiando su valor durante las distintas impresiones. Se define como la temperatura que se mantiene dentro de la boquilla del extrusor, durante el proceso FDM, antes de que el material se extruya [23]. Normalmente, se suele fijar la temperatura de extrusión de la primera capa entre 5 °C y 10 °C más alta que las otras, con el propósito de asegurar una buena adherencia. El valor de la temperatura se establece en función del material empleado en el proceso de impresión. En este estudio, se selecciona un rango de temperaturas de impresión, para ello, se necesita conocer cómo afectan las variaciones de temperatura al material utilizado. Por esta razón, se realizan una serie de ensayos térmicos con el fin de determinar un rango de temperaturas de impresión y obtener las propiedades térmicas del material.

i) Temperatura de la cama de impresión (bed temperature): es la temperatura que tiene la plataforma de construcción durante el proceso de impresión. El material al solidificarse tiende a separarse de la superficie de impresión, por ello, muchas impresoras destinadas a imprimir materiales a altas temperaturas disponen de una cama caliente para ayudar a combatir estos problemas. La adhesión de la primera capa en la plataforma de construcción debe ser adecuada, ya que si esto no ocurre, aparecen errores en las siguientes. Además, si se imprime la primera capa demasiado rápido, el material puede no tener tiempo suficiente para adherirse a la plataforma de

construcción. Por esta razón, normalmente es muy útil imprimir la primera capa a una velocidad más lenta, de modo que el material tenga tiempo suficiente para vincularse a la cama [24]. El error más común que existe debido a la no adherencia de las capas inferiores se conoce como *Warping Deformation* (WD), un ligero alabeo mostrado en la **Figura 13** que presenta la superficie impresa al despegarse de la plataforma de construcción. Este problema ha sido enfatizado por muchos investigadores, donde la principal solución implicaba la aplicación de un adhesivo térmico sintético entre la primera capa y la plataforma [4].

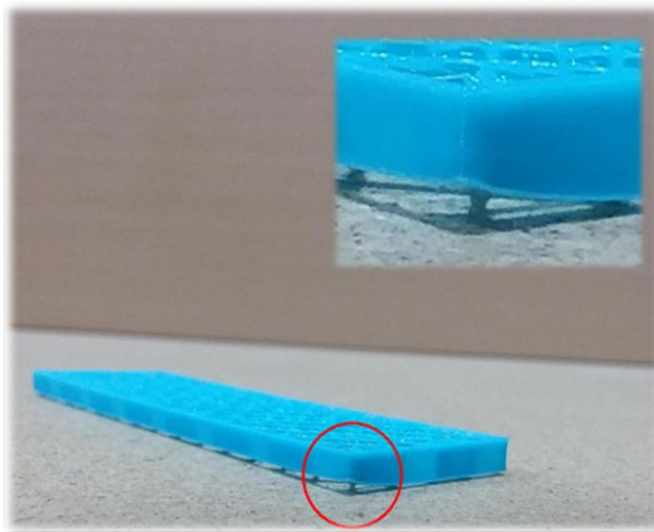


Figura 13. Ejemplo de *Warping Deformation* (WD) [4]. Se observa cómo se despegan las esquinas de la pieza debido a una mala adherencia con la cama de impresión.

Existen otras opciones para conseguir una buena adhesión como, por ejemplo, un pegamento temporal, un aerosol, spray para el cabello, barras de pegamento y otras sustancias pegajosas que se deben aplicar en la parte superior de las plataformas de construcción. Además, el mantenimiento de la cama de impresión es otro aspecto muy importante para conseguir la adherencia de la primera capa. Por ello, hay que asegurarse de que esté libre de polvo o grasas antes de iniciar la impresión [24].

2.2.2 Descripción del proceso de impresión

Una vez definidos los parámetros de procesamiento, se describen los pasos a seguir en el proceso de impresión FDM, utilizando como ejemplo, las probetas diseñadas para el ensayo de flexión a tres puntos.

- 1) En primer lugar, se puede partir de un croquis (ver la **Figura 14**) o boceto en el que se conozcan las dimensiones de las piezas.

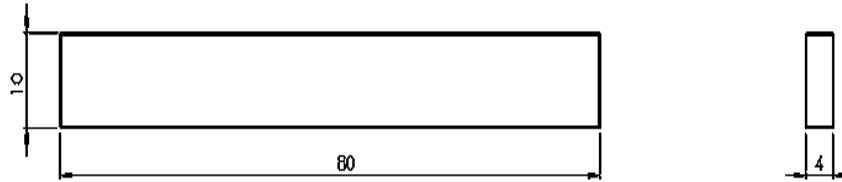


Figura 14. Croquis de una probeta diseñada para el ensayo de flexión.

- 2) El segundo paso consiste en transmitir el boceto a un sistema de modelado 3D, ya sea creando el modelo (ver la **Figura 15**) o escaneando un objeto con el uso de un escáner 3D. Para la creación del modelo, se utilizan los sistemas CAD como, por ejemplo, *SolidWorks*, *SketchUp*, *Bender*, etc.

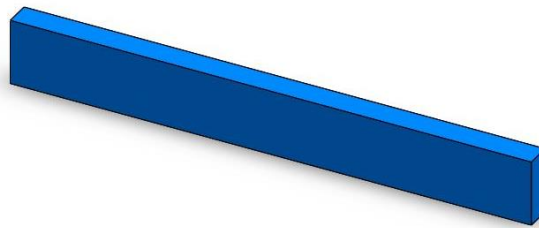


Figura 15. Ejemplo de un modelo tridimensional de una probeta diseñada para el ensayo de flexión.

- 3) De manera similar a muchos otros sistemas de AM, el diseño 3D generado puede interactuar con un archivo CAD a través del formato STL, una abreviatura de Estereolitografía [1]. Este formato se utiliza para la mayoría de las tecnologías de fabricación aditiva y define la geometría 3D de los objetos excluyendo información como color y textura. Para ello, se aproxima el modelo tridimensional a una malla compuesta normalmente por triángulos que definen el objeto, como se observa en la **Figura 16**. Cuanto más compleja sea la pieza, más triángulos se deben realizar.

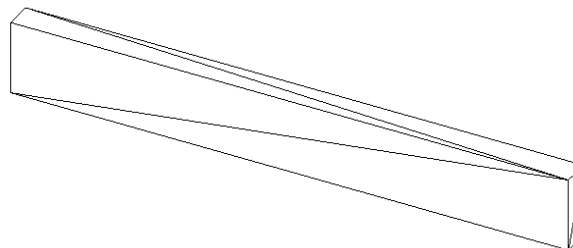


Figura 16. Ejemplo de formato STL de una probeta diseñada para el ensayo de flexión.

4) A continuación, el archivo STL se utiliza en un software laminador como, por ejemplo, *Simplify 3D*, *Ultimaker Cura 3D*, *Slic3r*, etc. Este tipo de programas, convierten el modelo tridimensional en una serie de capas realizando cortes matemáticos (ver la **Figura 17**). Además, se establecen los parámetros de la impresión que se han mencionado anteriormente en el apartado **2.2.1**, junto con una serie de instrucciones que debe seguir la impresora, estableciendo el lenguaje de programación conocido como *G-Code*.

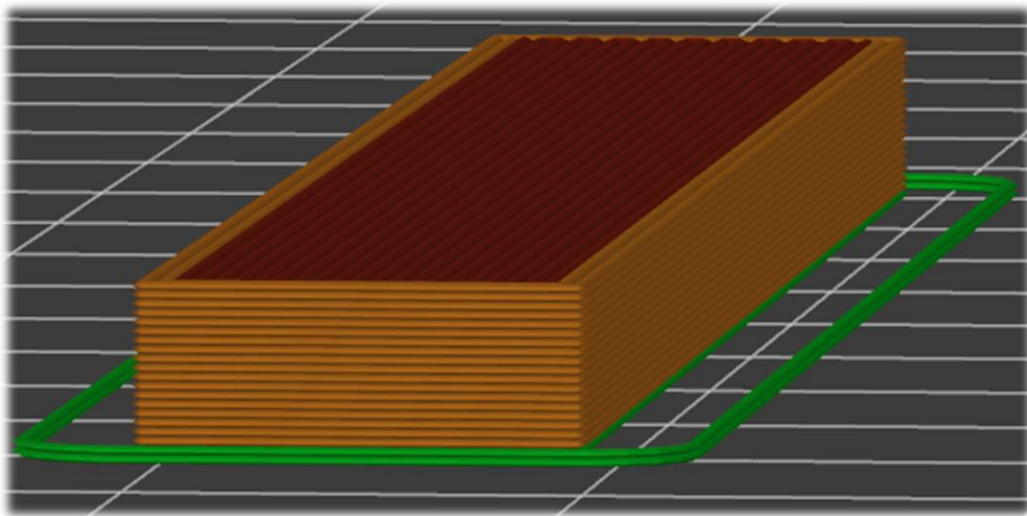


Figura 17. Ejemplo de laminación de una probeta diseñada para el ensayo de flexión.

5) Una vez preparado el código, este se carga en la impresora a través de una tarjeta microSD o un puerto USB que, conectado a un ordenador, puede controlar el proceso de impresión en todo momento. En la **Figura 18**, se resaltan con un círculo de color rojo, los dispositivos de entrada para el conector USB y la tarjeta microSD.



Figura 18. Dispositivos de entrada USB y microSD.

6) Finalmente, la boquilla extrusora sigue rutas controladas por ordenador usando los comandos del *G-Code*, mientras extruye filamentos termoplásticos fundidos (ver la

Figura 19) en la plataforma de construcción, depositando capas encima de otras generando un objeto 3D [1].

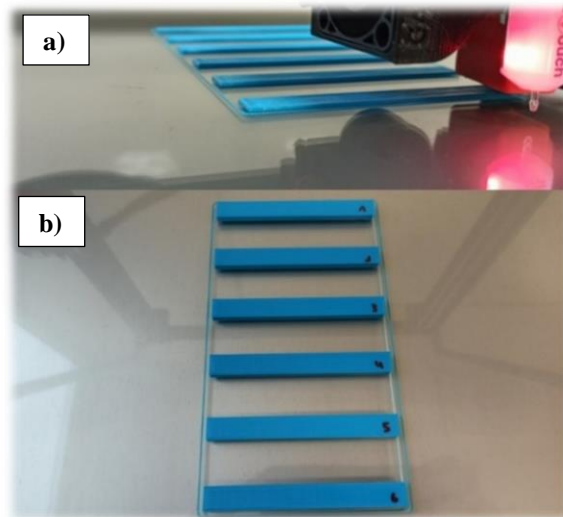


Figura 19. a) Imagen tomada durante la impresión de probetas diseñadas para los ensayos de flexión e b) imagen realizada tras la finalización del proceso de impresión.

2.3 Materiales empleados en FDM

Una de las mayores limitaciones que impiden que el proceso FDM se emplee en la industria es la disponibilidad limitada de materiales que se pueden utilizar como filamento. Los más utilizados en esta tecnología suelen ser polímeros, aunque también encontramos piezas de otros tipos. Los más comunes se resumen en la **Tabla 2** y en la **Figura 20**. En ellas, se mencionan los siguientes materiales: Ácido Poliláctico (PLA, por sus siglas en inglés *Polylactic Acid*), Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS, por sus siglas en inglés *Acrylonitrile Butadiene Styrene*), Acrilonitrilo Estireno Acrilato (ASA, por sus siglas en inglés *Acrylonitrile Styrene Acrylate*), Policarbonato (PC, por sus siglas en inglés *Polycarbonate*), Tereftalato de Polietileno (PET, por sus siglas en inglés *Polyethylene Terephthalate*), ULTEM, Nylon y Poliuretano Termoplástico (TPU, por sus siglas en inglés *Thermoplastic Polyurethane*).

De todos ellos, el PLA y el ABS son los materiales más empleados en el escenario actual. Sin embargo, el PLA es preferido por los usuarios principales por encima de los filamentos de ABS, debido a su punto de fusión más bajo que a su vez permite el uso de impresoras menos costosas. Además, si se produce una degradación del material durante el proceso de impresión, es menos tóxico en comparación con el ABS [3].

El PLA es de base biológica, ya que se fabrica a partir de materiales agrícolas renovables. Ha mostrado un gran potencial para reemplazar los plásticos derivados del petróleo debido a sus altas propiedades mecánicas y biodegradabilidad a largo plazo. Sin embargo, las aplicaciones más amplias del PLA están limitadas por inconvenientes como, por ejemplo, la fragilidad y baja resistencia térmica [25]. Debido a la naturaleza semicristalina del PLA, las propiedades físicas y mecánicas del producto final tienen una gran dependencia con las condiciones durante y posterior al procesamiento. Por esta razón, encontrar los parámetros óptimos es vital para lograr productos de mayor calidad [3].

El ABS es un polímero termoplástico comúnmente utilizado para fabricar productos rígidos, moldeados y ligeros. Debido a su distinta cristalinidad, polimerización, distribución de variaciones de longitud de cadena y adición de colores y plastificantes, existen varios grados de este polímero. De la literatura, se conoce que los aerosoles son emitidos por el proceso de FDM usando filamentos de ABS [26].

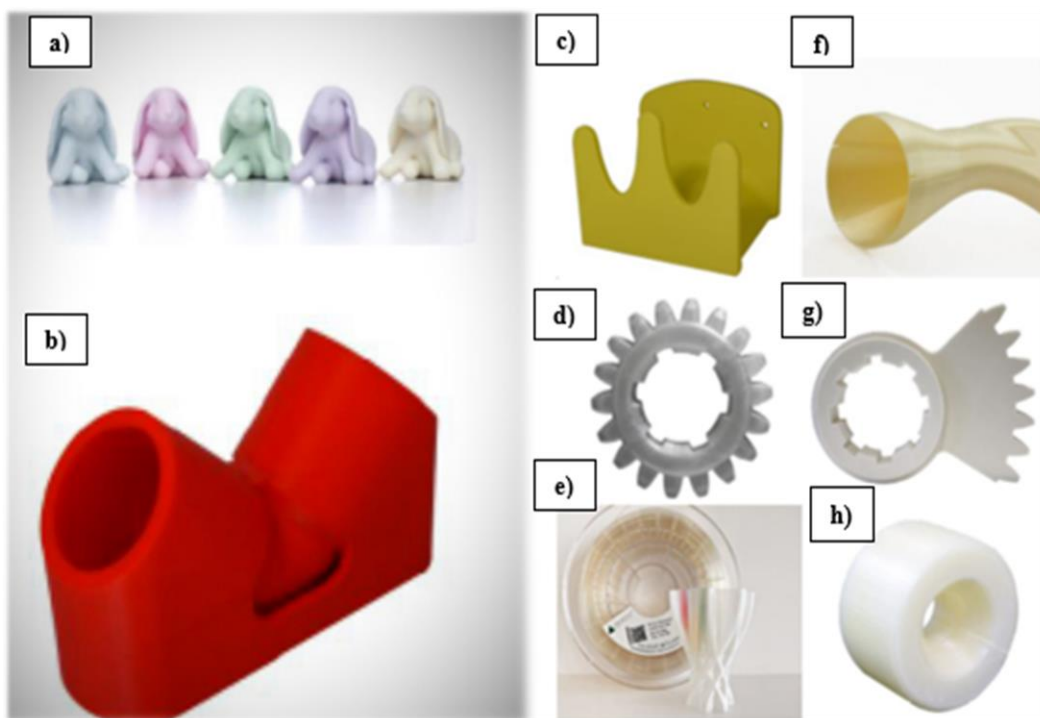


Figura 20. Piezas realizadas con los materiales mencionados en la Tabla 2. a) PLA, b) ABS, c) ASA, d) PC, e) PET, f) ULTEM, g) Nylon, h) TPU [27, 28, 29].

Impresión 3D. FDM

Tabla 2. Materiales empleados en FDM [27, 29, 30].

Material	Beneficios	Desventajas	Aplicaciones	Temperatura de extrusión recomendada (°C)	Temperatura de la cama recomendada (°C)	Temperatura de transición vítrea (°C)
PLA	Biodegradable a largo plazo. Variedad de colores y buen acabado. No produce olor. Leve contracción tras la impresión.	Deterioro al contacto con el agua. La adhesión entre capas no es muy fuerte.	Productos domésticos. Figuras decorativas. Prototipos.	[200, 240]	[0, 60]	[55, 65]
	Alta resistencia al calor. Buena ductilidad. Reutilizable.	No biodegradable. Produce olor durante la impresión. Gran contracción tras la impresión.	Productos domésticos. Legos. Piezas de automóviles. Piezas industriales.	[230, 250]	[80, 100]	[105, 110]
ASA	Alta resistencia a la intemperie y al impacto. Variedad de colores. Mejor resistencia térmica que el ABS.	Emisiones de estireno. Necesidad de cama caliente.	Carcasas eléctricas y para piezas de automóviles. Artículos deportivos.	[240, 260]	[90, 110]	[100, 105]
PC	Gran rigidez y resistencia al impacto. Gran resistencia a la deformación térmica.	Propenso a absorber la humedad de aire.	Prototipos rápidos.	[250, 270]	[90, 110]	[140, 150]
		Temperaturas muy altas de impresión.	Plantillas y accesorios.			
PET	Alta transparencia. Resistencia a la absorción de la humedad. Reciclable.	No biodegradable.	Piezas para el exterior.	[225, 245]	[60, 90]	[70, 80]
		Produce un ligero olor durante la impresión.	Elementos que necesiten cierta elasticidad y resistencia. Industria química y alimentaria.			
ULTEM	Resistencia a temperaturas muy altas. Material ignífugo. Gran resistencia mecánica. Baja toxicidad. Muy flexible.	No posee variedad de colores.	Sector aeronáutico.	[350, 380]	[140, 160]	[170, 190]
		Puede conllevar problemas de impresión si se expone a la humedad. Muy caro.	Industria automotriz. Industria médica.			
Nylon	Alta dureza, flexibilidad y resistencia al impacto. Sin olores desagradables al imprimir.	Propenso al Warping. Se requiere almacenamiento hermético para evitar la absorción de agua, ya que los filamentos que no están secos pueden causar defectos de impresión.	Engranajes de plástico. Bridas para cables.	[245, 265]	[70, 90]	[40, 60]
		Dificultad al imprimir.	Carcasa de teléfonos. Mangos de bicicletas.			
Flexible (TPU)	Gran flexibilidad. Excelente amortiguación de vibraciones. Resistencia a la abrasión y al impacto. Larga vida útil.	Puede que no funcione bien en todas las extrusoras.	Amortiguación de vibraciones.	[215, 235]	[45, 80]	[-40, -20]

Recientemente, diversas investigaciones [25] han comenzado a utilizar fibras naturales como materiales aditivos (ver la **Figura 21**) en los filamentos utilizados para la técnica FDM, donde la cantidad de contenido de fibra varía entre el 30 %. Son utilizadas para mejorar las características del filamento base, ya que tienen numerosos efectos positivos, como por ejemplo, una baja densidad, altas propiedades específicas, renovabilidad, biodegradabilidad y bajo costo. Por tanto, los compuestos reforzados con fibras naturales se han vuelto cada vez más atractivos y se continúan estudiando, debido a sus propiedades mecánicas específicas, una gestión adecuada al final de su vida útil y una huella ambiental controlada [25].



Figura 21. Piezas realizadas mediante un filamento base con la adición de una fibra para mejorar sus propiedades. a) PLA junto con fibra de madera y b) PET junto con fibra de carbono [27].

Al mismo tiempo que las fibras naturales, se han comenzado a utilizar fibras de carbono que se añaden en el material base para mejorar sus propiedades. Se pueden adquirir varios filamentos populares con relleno de fibra de carbono, incluidos PLA, PETG, Nylon, ABS y PC. Estas fibras son extremadamente fuertes y hacen que el filamento aumente en resistencia y rigidez. Por ello, las piezas impresas en 3D serán mucho más ligeras y dimensionalmente más estables, ya que las fibras ayudarán a evitar que la pieza se encoja a medida que se enfría. Sin embargo, debido a las fibras agregadas, estos materiales tienen más probabilidades de obstruirse y pueden requerir un hardware especial para evitar daños en la impresora [28].

2.3.1 Smartfil PLA

Para este proyecto, se utiliza un PLA con un diámetro de 1,75 mm y de color azul zafiro, de la empresa *Smart Materials* [27] a un precio de 23,50 €/Kg. El fabricante ofrece una ficha técnica (disponible en el *Anexo I*), en la cual se especifican algunas propiedades del material como, por ejemplo, la densidad (1,24 g/cm³) y la temperatura de transición

vítrea (60 °C) que pueden servir como referencia. No obstante, existen características como, por ejemplo, la temperatura de fusión que son importantes conocer con exactitud. Por esta razón, se realizan ensayos térmicos con el fin de ampliar el conocimiento en las propiedades térmicas y determinar cómo de estable es el material, para establecer la temperatura máxima de impresión que se puede alcanzar sin que se produzca una degradación.

Por otra parte, en la ficha técnica se distinguen valores de determinadas propiedades mecánicas que pueden servir como referencia. De forma simultánea al ensayo térmico, se elabora un ensayo mecánico de tracción para caracterizar el filamento, obteniendo así sus propiedades mecánicas. La **Tabla 3** muestra los valores obtenidos tras el ensayo y los ofrecidos por el fabricante. Aunque estos resultados no son comparables entre sí, ya que los ensayos se han realizado de una manera diferente, los valores obtenidos son semejantes y han servido como referencia para el presente estudio. Los cálculos, comentarios y gráficos realizados se extienden en el *Anexo I*.

Tabla 3. Propiedades mecánicas proporcionadas por el fabricante junto con los resultados de tracción del filamento de PLA.

	Fabricante	Caracterización
Resistencia a la tracción (MPa)	-	48,0 ± 2,4
Módulo de elasticidad a tracción (MPa)	3,50 · 10 ³	3,19 · 10 ³ ± 0,14 · 10 ³
Límite de fluencia (MPa)	60	-
Alargamiento máximo (%)	6	-
Deformación máxima (%)	-	1,5 ± 0,1
Esfuerzo a rotura (MPa)	50	45,9 ± 1,4

A continuación, se destaca la importancia del resguardo de la bobina de PLA con el fin de evitar la absorción de humedad y polvo del ambiente, que podría afectar al filamento y en consecuencia a las impresiones. Para ello, se utiliza una bolsa de almacenamiento (ver la **Figura 22**) proporcionada por el fabricante [27], que se puede sellar herméticamente, en cuyo interior contiene un pequeño saco de gel de sílice para

Impresión 3D. FDM

proteger el filamento de la humedad. Además, esta bolsa se introduce en una caja de almacenaje en la cual se guardan todos los elementos relacionados con el presente proyecto. Este procedimiento siempre se reproduce una vez finalizadas todas las impresiones.

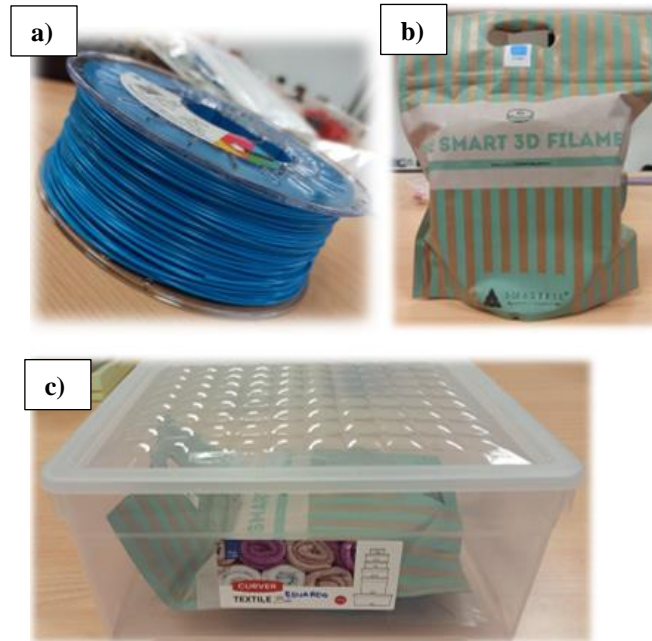


Figura 22. a) Bobina de PLA, b) bolsa de almacenamiento y c) caja de almacenaje.

3. Análisis térmico

Este término establece un conjunto de técnicas analíticas que estudian el comportamiento térmico de los materiales. Existen distintos tipos de análisis térmicos y cada uno de ellos, se define de acuerdo con los diferentes cambios físicos que se analizan. Sin embargo, este apartado se centra en la Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC, por sus siglas en inglés *Differential Scanning Calorimetry*) y en la Termogravimetría (TG, por sus siglas en inglés *Thermogravimetric*).

Con estos ensayos, se amplía el conocimiento sobre la influencia de la temperatura en el material, conociendo así las propiedades térmicas de este. Además, se obtiene la temperatura a la cual tiene lugar la transición vítrea, cristalización, fusión y degradación del material. Con estos datos, se puede establecer un rango adecuado de temperatura para la impresión.

Cabe destacar que, la parte experimental es desarrollada por el Servicio General de Apoyo a la Investigación (SEGAI) que, además, ha permitido la obtención de imágenes e información de los equipos utilizados.

3.1 Calorimetría Diferencia de Barrido (DSC)

Este procedimiento se utiliza para estudiar qué ocurre cuando un material se calienta, se enfría o se conserva, analizando así sus transiciones térmicas. Se define por la norma *UNE-EN ISO 11357-1:2017* [31] como una técnica en la cual la diferencia entre la velocidad de flujo de calor entre un crisol que contiene una muestra y un crisol de referencia, deriva en función de la temperatura y/o del tiempo, mientras que, los dos crisoles se someten al mismo programa de temperatura controlado en una atmósfera especificada. Es una práctica común registrar una curva (ver la **Figura 23**) en la cual, la temperatura o el tiempo se representa en el eje de abscisas y la velocidad del flujo de calor en el eje de ordenadas (curva calorimétrica). Cabe destacar que, es importante indicar la dirección endotérmica o exotérmica sobre la curva DSC.

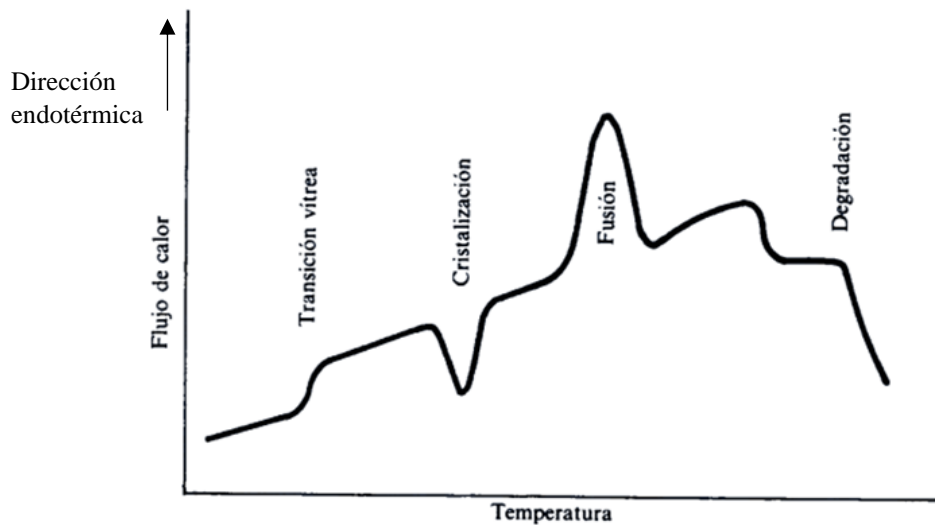


Figura 23. Curva calorimétrica de DSC típica de polímeros semicristalinos [32].

Durante el ensayo, se emplean dos crisoles. En uno de ellos, se deposita la muestra y se sella herméticamente mediante una selladora, mientras que el otro se deja vacío (crisol de referencia). Cada uno se apoya sobre la parte superior de un calefactor y seguidamente, a través de un ordenador que sirva de interfaz con el instrumento de DSC, se ponen en funcionamiento los calefactores. El ordenador asegura totalmente que la velocidad de calentamiento sea exactamente la misma a lo largo de todo el ensayo ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$). La muestra implica que existe material extra en uno de los crisoles, por lo tanto, hace falta un mayor aporte de calor para lograr que la temperatura del crisol de la muestra aumente a la misma velocidad que la del crisol de referencia. Este calor adicional que debe suministrarse es lo que se mide en el ensayo, trazando una curva calorimétrica a medida que la temperatura se incrementa. La **Figura 24** muestra la selladora, los crisoles empleados y el Calorímetro Diferencial de Barrido *Discovery DSC 025* de *TA Instruments*.

Un aspecto a destacar, es la forma en la que se enfría el material posterior a su fusión, ya que esta define su historial térmico y puede marcar una gran diferencia en sus propiedades. Dada su importancia en el comportamiento del material, el procedimiento operativo estándar consiste en realizar un ciclo de calentamiento-enfriamiento-calentamiento [33].

- 1) **Primer calentamiento:** muestra el material tal y como se recibe, con unas condiciones de fabricación determinadas.

- 2) **Enfriamiento:** si se realiza de forma controlada ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$), impone un historial térmico estándar en el material.
- 3) **Segundo calentamiento:** permite comparar los materiales de forma directa entre sí, ya que con los pasos anteriores, se consigue eliminar el historial térmico.

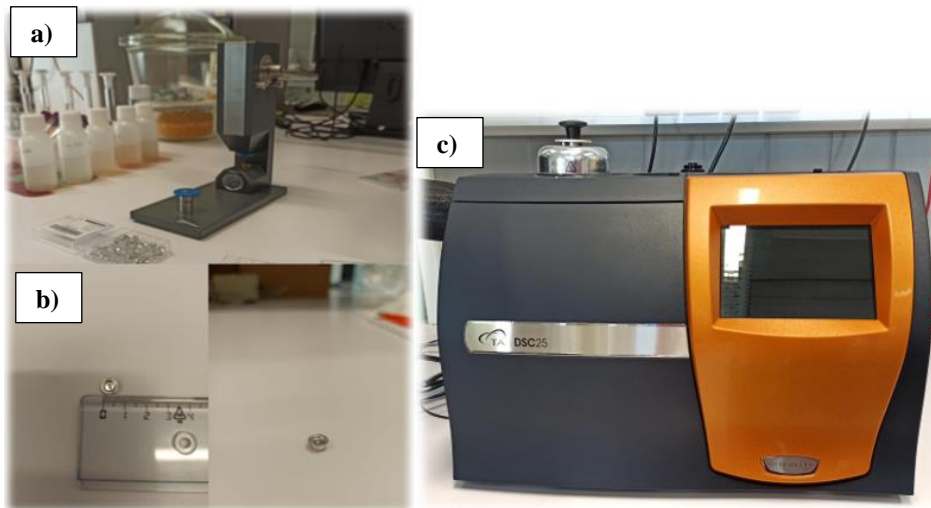


Figura 24. Elementos utilizados durante el DSC. a) Selladora, b) crisol y c) Discovery DSC 025 de TA Instruments.

3.2 Termogravimetría (TG)

El análisis de TG, se realiza en base a la norma *UNE-EN ISO 11358-1:2015* [34]. Se puede llevar a cabo de un modo dinámico (donde varía la masa en función de la temperatura o del tiempo bajo condiciones controladas) o en modo isoterma (en el cual varía la masa en función del tiempo a una temperatura constante). En este caso, se emplea la primera opción donde se calienta una muestra a velocidades especificadas, siguiendo un programa de temperatura controlado, midiendo la variación de la masa en función del tiempo durante un periodo determinado. Durante la medición, se puede mantener la muestra en una atmósfera inerte (únicamente teniendo en cuenta el efecto de la temperatura) o en una atmósfera oxidante controlada (para la evaluación termo-oxidativa del material considerando condiciones reales) [34].

Normalmente, el TG se utiliza para determinar las temperaturas y los índices de descomposición de los polímeros. La variación en masa se registra en forma de curva termogravimétrica (ver la *Figura 25*) y con ella se determinan las temperaturas y masas específicas. Asimismo, es importante conocer la velocidad de descomposición, para ello,

se realiza la derivada de primer orden sobre la curva TG obteniendo una curva denominada DTG, mostrada en la **Figura 25**. El pico de dicha curva coincide con la temperatura a la cual se considera la descomposición de la muestra.

Actualmente, el TG se emplea en combinación con otras técnicas como el Análisis Térmico Diferencial (DTA, por sus siglas en inglés *Differential Thermal Analysis*) o el DSC, con el fin de ofrecer simultáneamente más información sobre la estabilidad térmica del material.

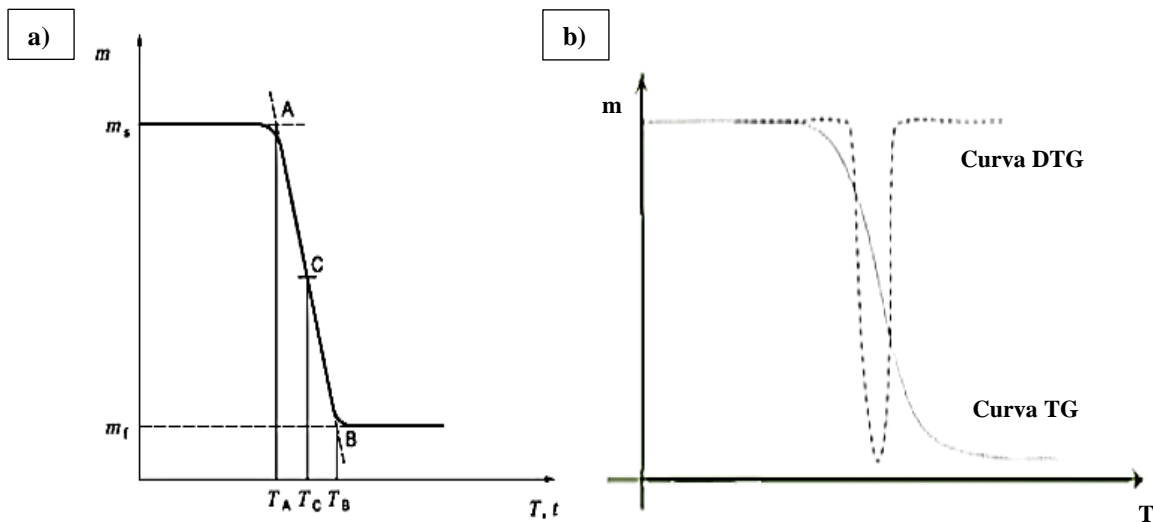


Figura 25. a) Curva TG que muestra pérdida de masa en una sola etapa [34] y b) curva DTG en la dirección endotérmica.

A partir de la curva TG (**Figura 25**) se determinan los puntos A, B y C, donde [34]:

- A es el punto inicial y corresponde con el punto de intersección de la línea base de la masa inicial y la tangente a la curva TG en el punto de máxima pendiente. La temperatura en este punto (T_A) corresponde con la temperatura a la cual comienza la degradación del material.
- B es el punto final y corresponde con el punto de intersección de la línea base de la masa final y la tangente a la curva TG el punto de máxima pendiente. La temperatura en este punto (T_B) corresponde con la temperatura a la cual finaliza la degradación del material.
- C es el punto medio y corresponde con el punto de intersección con la temperatura que se encuentra equidistante de las dos líneas base. Como regla general, se toma la

temperatura en este punto (T_C) como la temperatura a la cual tiene lugar la degradación del material.

Una vez determinado dichos puntos, se calculan los porcentajes de la pérdida de masa en una sola etapa y de la masa del residuo mediante las siguientes expresiones:

$$m_l = \frac{m_s - m_f}{m_s} \times 100 \quad (1)$$

$$m_r = \frac{m_f}{m_s} \times 100 \quad (2)$$

donde:

m_f es la masa en el punto final B, expresada en gramos.

m_s es la masa en el punto inicial A, expresada en gramos.

m_l es la pérdida de masa, expresada en porcentaje.

m_r es la masa del residuo, expresada en porcentaje.

El calorímetro está formado por una báscula que posee una alta sensibilidad para medir cambios de peso, por ello, debe estar aislada de los efectos térmicos para maximizar la exactitud y precisión del pesaje [34]. Además, consta de un horno programable para controlar la energía en forma de calor de la muestra desde temperaturas bajas hasta temperaturas muy altas. De la misma manera que el DSC, cuenta con un ordenador que hace de interfaz con el instrumento, con el cual se recogen los datos del ensayo y se representan gráficamente generando la curva TG.

Para realizar esta técnica de análisis térmico, se emplea el Analizador Térmico Simultáneo *Discovery SDT 650* de *TA Instruments*, mostrado en la **Figura 26**.



Figura 26. Instrumento *Discovery SDT 650* de *TA Instruments*.

3.3 Análisis de resultados

En esta sección, se exponen las condiciones de ensayo utilizadas y los resultados obtenidos de las temperaturas de transición vítrea (T_g), cristalización (T_c), fusión (T_m) y degradación del material (T_d). Además, se calculan los valores del residuo y la pérdida de masa tras la degradación. Para la obtención de los resultados se emplea el software *TRIOS de TA Instruments*. Los cálculos se presentan de forma detallada en el Anexo II, empleando las normas *UNE-EN ISO 11357-1:2017* [31] y *UNE-EN ISO 11358-1:2015* [34].

A continuación, se muestran los parámetros establecidos para el ensayo DSC junto con los resultados obtenidos. Se calculan las transiciones térmicas del material tras un ciclo calentamiento-enfriamiento-calentamiento. De este modo, se determinan las propiedades térmicas del material con las condiciones de fabricación y sin ellas.

Se emplea un DSC de flujo térmico, utilizando como atmósfera inerte un caudal de nitrógeno de 50 ml/min. Los crisoles son de aluminio (T_{zero}), empleando un valor de masa de 7,029 mg para el crisol de la muestra. Durante los calentamientos, el incremento de la temperatura es de 10 °C/min en un intervalo desde 0 °C hasta 300 °C, mientras que en el enfriamiento el descenso de la temperatura es de 5 °C/min desde 300 °C hasta 0 °C. La **Figura 27** muestra las curvas calorimétricas para el ciclo completo (se indica la dirección exotérmica) y la **Tabla 4** presenta los valores de temperatura obtenidos.

La curva del primer calentamiento contiene información sobre el historial térmico del procesamiento de la muestra. En ella, el primer efecto que se observa es la transición vítrea. Durante este proceso reversible, se produce un cambio en la capacidad calorífica, donde el material pasa de un estado duro y frágil a otro más blando y gomoso. Para obtener su valor y, de acuerdo con la norma *UNE-EN ISO 11357-1:2017* [31], se toma el punto medio del intervalo en el que se produce una anomalía sobre la línea base. En la primera curva, la transición tiene un valor de 58 °C, formándose un pico pronunciado. Sin embargo, en las curvas restantes no se observa este pico, sino que se produce una ligera curvatura cuando esta transición ocurre, teniendo un valor de 53,8 °C y 59 °C para el enfriamiento y el segundo calentamiento, respectivamente. Según otros autores [35, 36], esto puede ser debido a una entalpía de relajación que está relacionada con el

envejecimiento del material. Se observa un descenso de aproximadamente 4 °C en el enfriamiento, con respecto a los otros dos valores que presentan bastante similitud.

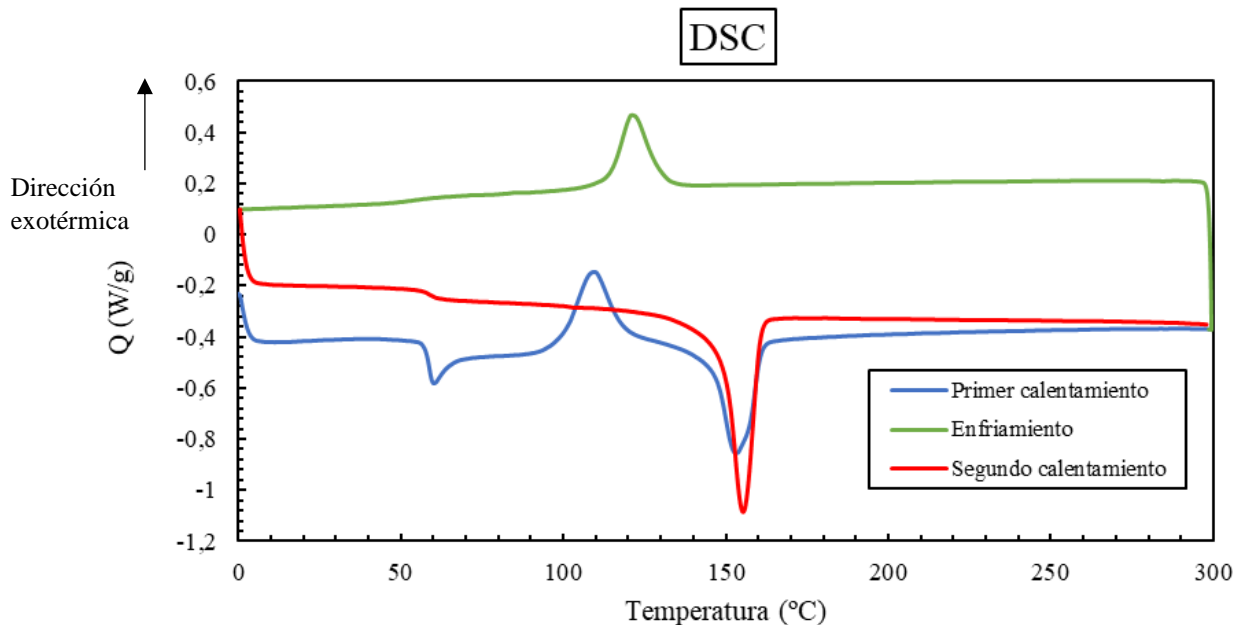


Figura 27. Curvas calorimétricas para el ensayo DSC.

El segundo efecto que se observa sobre las curvas es la cristalización, también denominada cristalización fría. Esta transición térmica en la primera curva indica que el material es completamente amorfo en su estado inicial, debido a que el proceso de enfriamiento pudo ser demasiado rápido para que se produjera la cristalización. Por otra parte, sobre el segundo calentamiento no existe la presencia de un pico de cristalización fría exotérmico, sino que este se observa en la curva de enfriamiento donde la temperatura de cristalización tiene un valor de 120,1 °C, diferenciándose en gran magnitud (11 °C) sobre el valor de cristalización obtenido en la curva del primer calentamiento (109,1 °C). Esto puede indicar que la velocidad de enfriamiento del ensayo era bastante baja, ya que ha habido tiempo suficiente para que el material se cristalice. Cabe destacar que, tanto para la cristalización y la fusión del material, el valor de la temperatura se toma como el punto máximo del pico, de acuerdo con la norma *UNE-EN ISO 11357-1:2017* [31].

La siguiente anomalía sobre la curva calorimétrica corresponde con la fusión del material, que se presenta como un pico endotérmico. Para el primer calentamiento se obtiene un valor de 153,3 °C, mientras que en el segundo se observa una temperatura de 155,3 °C, difiriendo ambos en 2 °C. Según la gráfica, aproximadamente a la temperatura

Análisis térmico. Análisis de resultados

de 160 °C, el material estaría fundido completamente, por lo que la temperatura de impresión se podría establecer a partir de este valor. Sin embargo, por seguridad es conveniente no imprimir en dicho valor, ya que podría causar atascos en la impresora. En este intervalo de ensayo, no se aprecia el efecto de la degradación, por lo que sería posible imprimir a la temperatura de 300 °C sin esperar descomposición del material. No obstante, por seguridad, esa temperatura no se alcanza en ningún momento debido a la posibilidad de dañar algún componente de la impresora por el uso de altas temperaturas.

Tabla 4. Valores obtenidos del ciclo calentamiento-enfriamiento-calentamiento realizado.

	Valores de temperaturas (°C)		
	Primer calentamiento	Enfriamiento	Segundo calentamiento
T_g	58,0	53,8	59,0
T_c	109,1	121,1	-
T_m	153,3	-	155,3

Para el análisis TG realizado (en modo dinámico), se emplea como atmósfera inerte un caudal de nitrógeno de 50 ml/min. Los crisoles son de aluminio (T_{zero}), usando un valor de masa de 8,471 mg para el crisol de la muestra. Durante el calentamiento, el incremento de la temperatura es de 10 °C/min en un intervalo desde 0 °C hasta 500 °C. La **Figura 28** muestra la curva TG junto con la curva DTG.

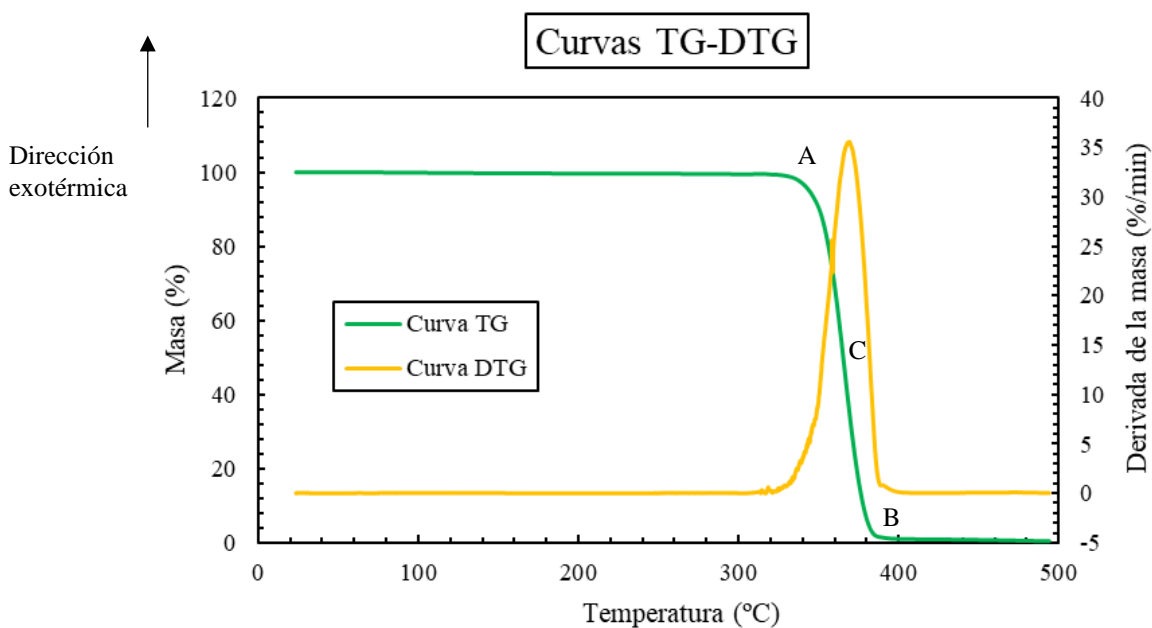


Figura 28. Curvas TG-DTG.

La temperatura de degradación (T_d) del PLA, se puede calcular de dos formas diferentes. En primer lugar, con la curva TG se alcanza un valor de 365,5 °C, siendo este el punto medio de dicha curva (punto C de la **Figura 28**), obtenido de acuerdo con la norma *UNE-EN ISO 11358-1:2015* [34]. En segundo lugar, con la curva DTG se obtiene un valor de 369 °C, tomando el punto máximo del pico. Como resultado final para la T_d , se toma el valor promedio de los mencionados, siendo este 368,6 °C.

Observando la curva TG-DTG, se distingue el punto A en el cual comienza la degradación del material, teniendo este una temperatura aproximada de 352,6 °C y una masa de 8,428 mg. En este punto, ya se ha perdido un 0,51% de la masa inicial del ensayo. Por otro lado se halla el punto B, en el cual finaliza la degradación, teniendo este una temperatura aproximada de 377,6 °C y un valor de masa de 0,073 mg. Con estos datos y aplicando las ecuaciones (1) y (2), se obtiene un valor de pérdida de masa del 99,13 % y un valor de 0,87 % de masa residual.

Tras estos ensayos realizados, la conclusión final indica que el rango de temperaturas de impresión se puede establecer teóricamente desde 160 °C hasta 350 °C. Sin embargo, por cuestiones de seguridad, nunca se debe llegar hasta estos límites. Por esta razón, se impone un margen de 20 °C para la temperatura inicial, estableciendo la temperatura mínima del intervalo de impresión en 180 °C. Para la temperatura máxima del intervalo de impresión, hay que atender a las prestaciones de la impresora 3D. Según las condiciones de fábrica, la boquilla es capaz de alcanzar una temperatura máxima de 270 °C. No obstante, tras una optimización realizada, la boquilla es capaz de imprimir hasta una temperatura de 300 °C. Del mismo modo, para la temperatura final de impresión, se impone un margen, en este caso de 40 °C, sobre la temperatura máxima alcanzable por la boquilla extrusora, estableciéndose en 260 °C la temperatura máxima del intervalo de impresión. Las demás temperaturas se establecen incrementando la temperatura inicial hasta la temperatura final con un intervalo de 20 °C, siendo estos: 180 °C, 200 °C, 220 °C, 240 °C y 260 °C.

4. Difracción de rayos-X (XRD)

Para el presente estudio, se realiza un análisis de difracción de rayos-X (XRD, por sus siglas en inglés *X-Ray Diffraction*) con el fin de determinar si tras la impresión, las piezas presentan algún grado de cristalinidad o si por el contrario, son completamente amorfas. Cabe destacar que, la parte experimental es desarrollada en el Servicio de Rayos X del SEGAI que, además, ha permitido la obtención de imágenes e información de los equipos utilizados.

Los rayos-X son una forma de radiación electromagnética de elevada energía y pequeña longitud de onda. Cuando un haz incide en un material sólido, parte de este se dispersa en todas las direcciones a causa de los electrones asociados a los átomos o iones que encuentra en el trayecto, pero el resto del haz puede dar lugar al fenómeno de la difracción de rayos-X. Esto ocurre si existe una disposición ordenada de átomos y si se cumplen las condiciones que vienen determinadas por la Ley de Bragg, mostrada en la ecuación (3), que relaciona la longitud de onda de los rayos-X y la distancia interatómica con el ángulo de incidencia del haz difractado [37].

$$n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin(\theta) \quad (3)$$

donde:

n es un número entero.

λ corresponde con la longitud de onda de los rayos-X.

d es la distancia entre los planos de la red cristalina.

θ es el ángulo entre los rayos incidentes y los rayos de dispersión.

Si no se cumple esta ley, la interferencia es de naturaleza no constructiva y el campo del haz difractado es de muy baja intensidad. Cuando la interferencia es constructiva obtenemos una respuesta, que se conoce con el nombre de difractograma (ver la **Figura 29**), y que nos proporciona información para identificar y cuantificar los componentes presentes en los materiales, ya que cada componente tiene un difractograma único, es decir, una “huella dactilar” característica de su estructura interna [37].

Una muestra policristalina contiene una gran cantidad de pequeños cristales que adoptan aleatoriamente todas las orientaciones posibles. Todos los planos de un espaciado

XRD. Caracterización

dado difractan al mismo ángulo 2θ respecto al haz incidente, de manera que todos los rayos difractados se sitúan en un pico de semiángulo 2θ respecto al haz incidente (ver la **Figura 29**). Para cada conjunto de planos se produce la difracción a un ángulo de Bragg diferente dando lugar a una serie de picos de difracción [37], [38].

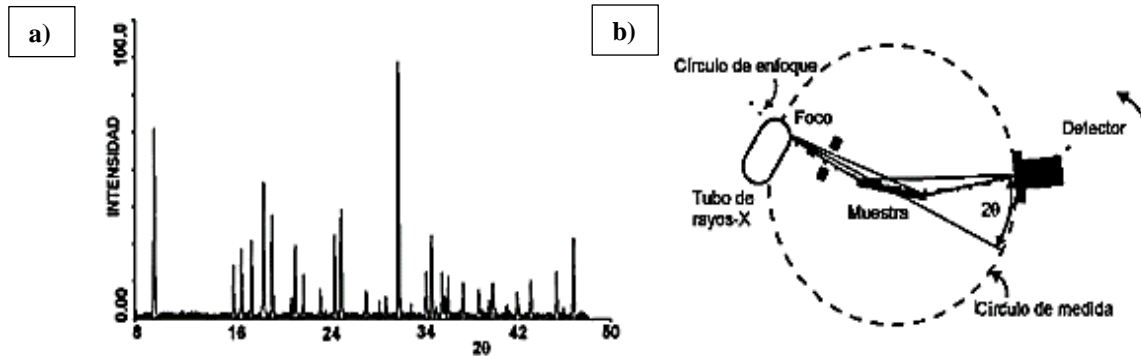


Figura 29. a) Ejemplo de un difractograma típico y b) representación del proceso XRD [38].

Para el ensayo, se dispone de un difractómetro de polvo que utiliza una fuente de rayos-X, la muestra que se investiga y un detector para recoger los rayos difractados, como indica la **Figura 29**. El principio de funcionamiento se basa en la penetración de un haz de rayos-X en la muestra y posteriormente, este es difractado por los planos cristalinos que contiene la muestra. El ángulo y la intensidad de la difracción son característicos de una estructura cristalina. En este caso, se emplea el difractómetro *PANalytical Empyrean* mostrado en la **Figura 30**.



Figura 30. Difractómetro *PANalytical Empyrean*.

5. Impresión de las probetas

5.1 Impresora 3D

Para llevar a cabo las impresiones se emplea el modelo *Creality CR-10-S4*, una versión mejorada de la impresora *Creality CR-10*. Esta máquina es de código abierto permitiendo usar distintos tipos de material, marca y software laminador. Está formada por varios perfiles de aluminio de color negro con una placa de construcción de 400 x 400 x 400 mm (largo x ancho x alto), lo que permite crear modelos de gran tamaño. La interfaz con esta impresora se realiza con una pantalla LCD que permite la conexión de una tarjeta microSD y un dispositivo USB. Cabe destacar que, esta versión de la impresora no es el modelo original que viene predeterminado de fábrica, ya que ha sufrido algunas modificaciones. La *Figura 31* junto con la *Tabla 5* muestran los principales componentes de la impresora 3D.

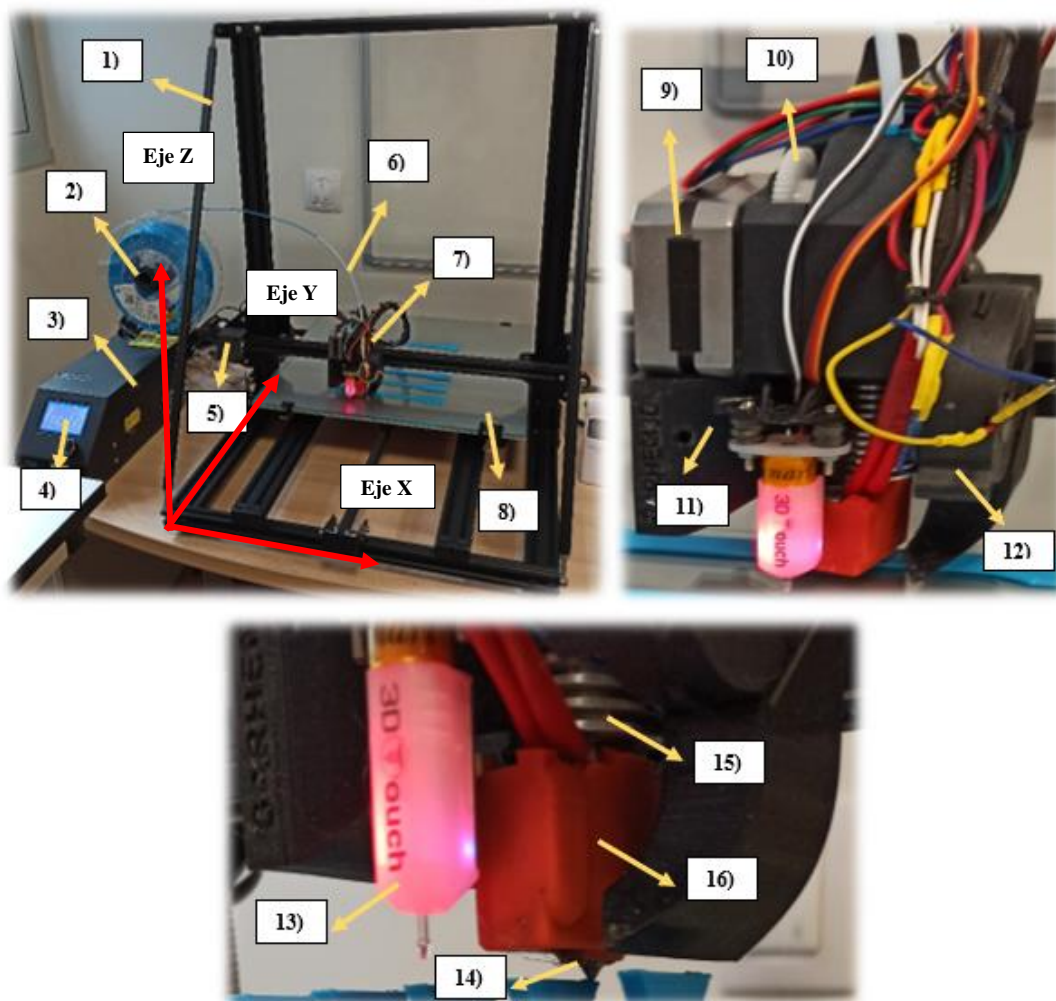


Figura 31. Principales componentes de la impresora 3D.

Tabla 5. Leyenda correspondiente a los principales componentes de la impresora 3D.

1	Barras de soporte	9	Motor a pasos para el filamento
2	Soporte de bobina	10	Rueda dentada
3	Ranura para tarjeta SD y conector USB	11	Ventilador de enfriamiento
4	Pantalla LCD	12	Ventilador de capa
5	Motor a paso para los ejes	13	Sensor táctil de nivelación
6	Tubo <i>Bowden</i>	14	Boquilla
7	Extrusor	15	Disipador
8	Cama caliente o plataforma de construcción	16	<i>Hotend</i>

Las barras de soporte que se observan en la **Figura 31**, son una mejora sobre el modelo original. Son utilizadas para mejorar la estabilidad, reduciendo las vibraciones durante la impresión. Del mismo modo, se observan en dicha figura los tres ejes principales en los que se desplaza la impresora, teniendo cada uno de ellos, un motor a pasos (también denominado motor paso a paso) utilizado para mover cada eje.

Para la extracción e introducción del filamento, existe un conjunto formado por un motor a pasos, un sistema de engranajes y un tubo *Bowden*. Estos componentes se utilizan para guiar y sostener al filamento desde la bobina hasta el extremo inferior del extrusor [39].

Para el enfriamiento se emplean dos ventiladores, uno de ellos se encarga de enfriar la boquilla de extrusión y el otro de enfriar el filamento (ventilador de capa), nada más depositarlo sobre la cama caliente ayudando a la adhesión de las capas [39].

El extrusor es el principal componente de la impresora. Permite la transferencia de calor para fundir el material y puede moverse por el espacio de impresión para crear la pieza. La parte inferior del extrusor se conoce como extremo caliente o *hotend*, en ella, se funde el filamento extruyéndose a través de la boquilla. Existe una gran variedad de *hotends*, pero la mayoría contiene un disipador térmico para reducir el arrastre de calor y un elemento para eliminar la transferencia de calor, que evita que el filamento se derrita en la parte superior de la extrusora [39].

Finalmente, se ha añadido un sensor táctil de nivelación automática *BL Touch 3D* como mejora a la versión de fábrica, permitiendo ajustar la altura del eje Z durante la impresión. El autonivelado, se inserta en el *G-Code*, donde el sensor toma nueve puntos

sobre la plataforma de construcción generando un plano. Este proceso, puede evitar errores de impresión sobre la primera capa.

5.2 Diseño de las probetas

El diseño de los prototipos se realiza en base a las normas de los ensayos mecánicos especificadas en el apartado **12.1** [40, 41, 42, 43], es decir, se dispone de una probeta de dimensiones distintas para los ensayos de tracción, compresión y flexión. Además, se realizan dos diseños para un análisis de difracción de rayos-X (XRD), difiriendo cada uno de ellos en el espesor. Finalmente, se ha dejado a libre elección por el SEGAI, la pieza que mejor se adapte al soporte. La **Figura 32** y la **Tabla 6** muestran las dimensiones finales elegidas para las distintas piezas.

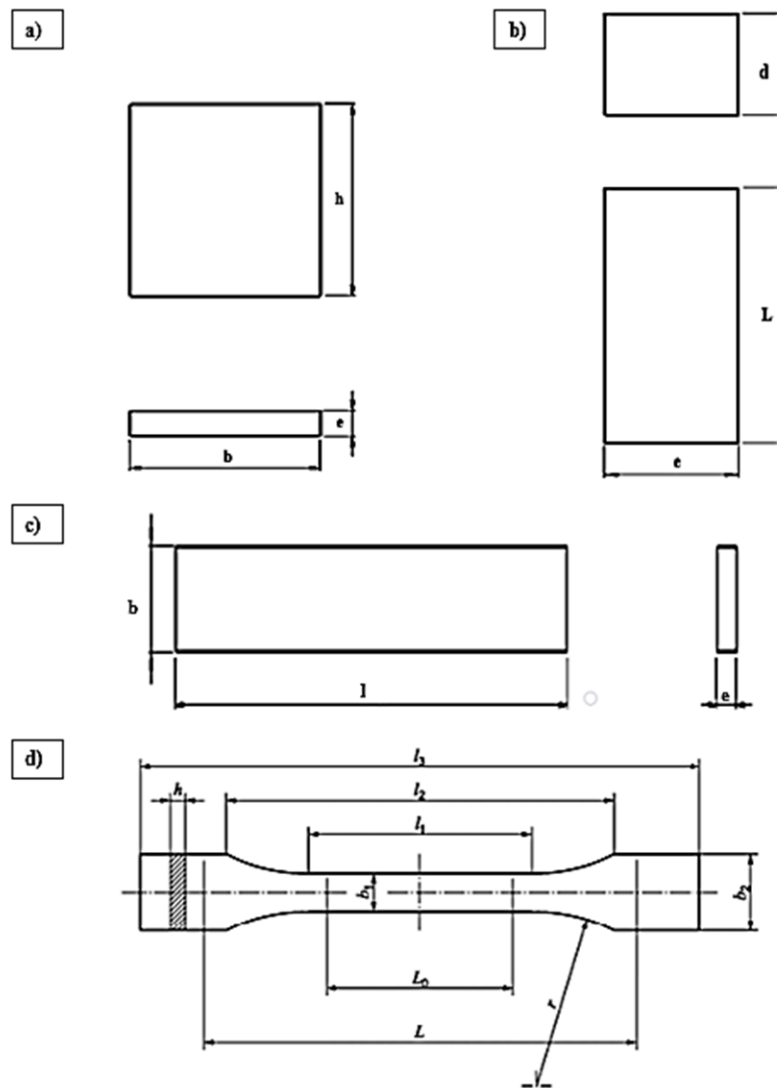


Figura 32. Dimensiones de las piezas fabricadas mediante FDM. a) XRD, b) compresión, c) flexión y d) tracción.

Tabla 6. Dimensiones de las piezas fabricadas mediante FDM correspondientes a la Figura 32.

	Magnitud	Descripción	Valor (mm)
XRD	b	base	30,00 ± 0,01
	h	ancho	30,00 ± 0,01
	e	espesor	4,00 ± 0,01
Tracción	l ₃	Longitud total	170 ± 1
	l ₁	Longitud de la parte estrecha de caras paralelas	80 ± 2
	r	radio	24 ± 1
	l ₂	Distancia entre las partes anchas de caras paralelas	109,3 ± 3,2
	b ₂	Anchura en los extremos	20,0 ± 0,2
	b ₁	Anchura de la parte estrecha	10,0 ± 0,2
	h	Espesor recomendado	4,0 ± 0,2
	L ₀	Longitud de referencia	50,0 ± 0,5
	L	Distancia inicial entre las mordazas	115 ± 1
Compresión	d	espesor	16,0 ± 0,2
	e	base	16,0 ± 0,2
	L	longitud	40 ± 2
Flexión	b	base	10,0 ± 0,2
	e	espesor	4,0 ± 0,2
	l	longitud	80 ± 2

Una vez especificadas las dimensiones, se realiza el modelado 3D mediante *SolidWorks 2018*. La **Figura 33** muestra los diseños 3D generados con el programa. Para el ensayo de tracción, se adopta la recomendación de la normas *UNE-EN ISO 527-1:2019* [40] y *UNE-EN ISO 527-2:2012* [41], utilizando la probeta tipo 1A. De la misma manera, en el ensayo de flexión, se emplea la probeta preferente recomendada por la norma *UNE-EN-ISO 178:2020* [43]. En el ensayo de compresión, las probetas deben tener forma de prisma recto, cilindro o tubo. La norma *UNE-EN ISO 604:2003* [42] establece una probeta preferente, sin embargo, se decide realizar otro diseño de prisma recto, con el fin de evitar lo máximo posible el posible pandeo de la pieza durante el ensayo, ajustándose a la siguiente inecuación:

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

donde:

x es el lado menor de la sección transversal del prisma, expresado en milímetros.

l es la longitud de la probeta, expresada en milímetros.

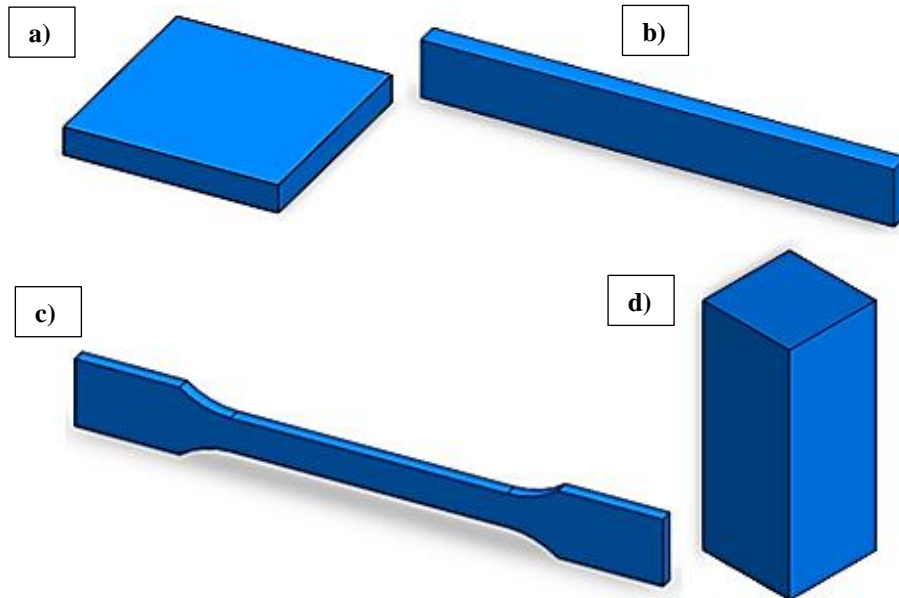


Figura 33. Diseños 3D realizados con SolidWorks 2018 de las piezas fabricadas mediante FDM. a) XRD, b) flexión, c) tracción y d) compresión.

5.3 Selección de los parámetros de impresión

Una vez establecidos los archivos CAD, se guardan en una extensión STL a través del mismo programa de modelado 3D. Estos se emplean en un software laminador que divide la pieza en distintas capas realizando cortes matemáticos. Existen varios tipos de laminadores, pero en este proyecto se utiliza *PrusaSlicer 2.3.0*. Con el uso de este programa, se establecen todos los parámetros de impresión elegidos. Algunos de ellos, se mantienen constantes durante todas las impresiones. Los valores de estos parámetros, se establecen por recomendaciones de técnicos de impresión 3D, el fabricante y referencias bibliográficas [27].

En cuanto a las capas presentes en las piezas, se diferencian las capas inferiores, intermedias y superiores (ver la **Figura 34**). Para todas ellas, se emplea un espesor de 0,2 mm constante durante la totalidad de las impresiones. Por cada capa, se realiza un perímetro antes de comenzar a rellenar la pieza. Estos se conocen como carcasas verticales, consideradas como tapas laterales del objeto (ver la **Figura 34**). Por otro lado, se encuentran las carcasas horizontales, consistiendo en un relleno sólido añadido a la pieza que se antepone y superpone al relleno interno, creando una tapa inferior y superior

al objeto (ver la **Figura 34**). Para este proyecto, se emplean dos perímetros por cada capa (dos carcassas verticales) y cuatro carcassas horizontales para las capas superiores e inferiores.

Previo a la impresión, se realiza un contorno externo a la pieza conocido como falda (*Skirt*, en inglés). De este modo, se asegura la purga del extrusor antes de empezar a fabricar la pieza y la nivelación de la base, evitando así errores al inicio de la impresión. Se puede configurar el número de vueltas de contorno que efectúa, la distancia de separación a la pieza, así como la altura hasta la que se debe realizar [44]. Para el presente proyecto, se realiza una vuelta al objeto con una distancia de 2 mm sobre él, utilizando una altura de 2 capas.

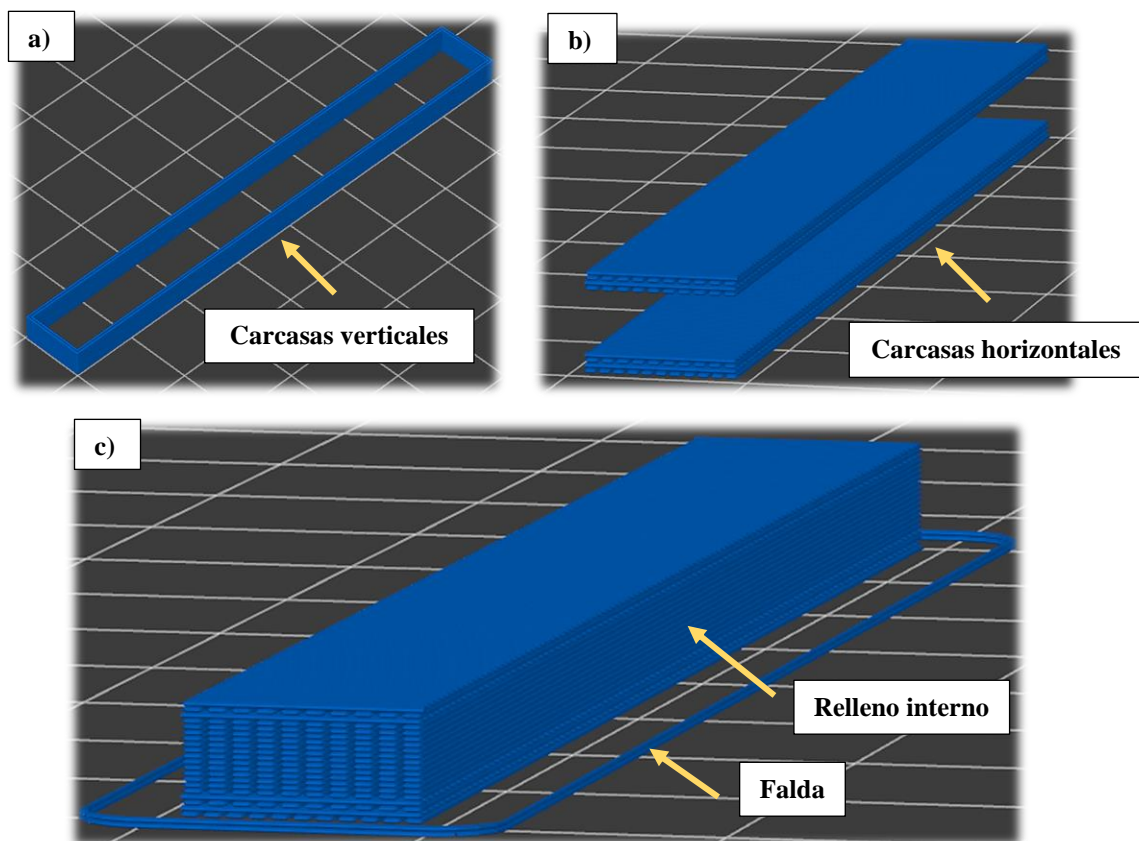


Figura 34. Explicación de las capas presentes utilizando una pieza para el ensayo de flexión. a) Perímetros o carcassas verticales, b) carcassas horizontales y c) falda, relleno inferior, relleno interno y relleno superior sin representar las carcassas verticales.

La orientación de las piezas se realiza sobre el eje X de la máquina 3D. No obstante, se amplía el estudio en tracción, realizando la impresión en la dirección del eje Z (ver la **Figura 35**), con el fin de comprobar si el efecto de la temperatura presenta un mayor impacto en esta dirección.

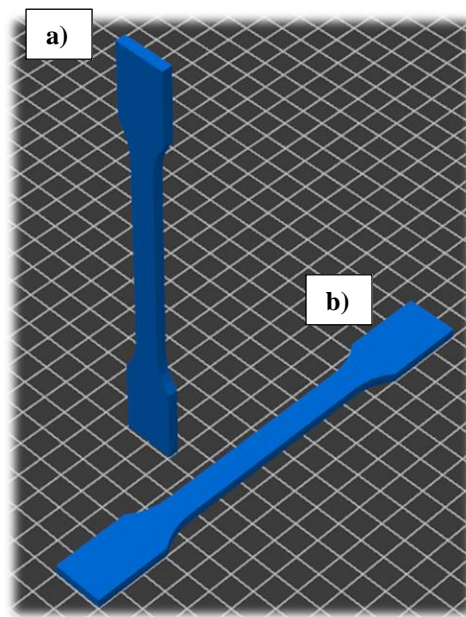


Figura 35. Piezas para el ensayo de tracción en la dirección de construcción del a) eje Z y b) eje X.

En cuanto al porcentaje del relleno interno, se realiza un estudio previo para el ensayo de tracción, con el fin de determinar un porcentaje de relleno entre el 50 % y 100 % (ver la **Figura 36**). Los resultados obtenidos en el estudio se amplían en el Anexo I. Las conclusiones muestran que, se consiguen mejores propiedades mecánicas con las probetas fabricadas con un 100 % del relleno interno, obteniendo curvas con mayor recorrido sobre la zona plástica. Además, el tiempo de impresión de las probetas fabricadas con un 50 % del relleno interno, disminuye solamente en una hora respecto a las del 100 %. Por estas razones, se decide emplear un relleno del 100 %, manteniéndose constante para todas las series de las piezas fabricadas.

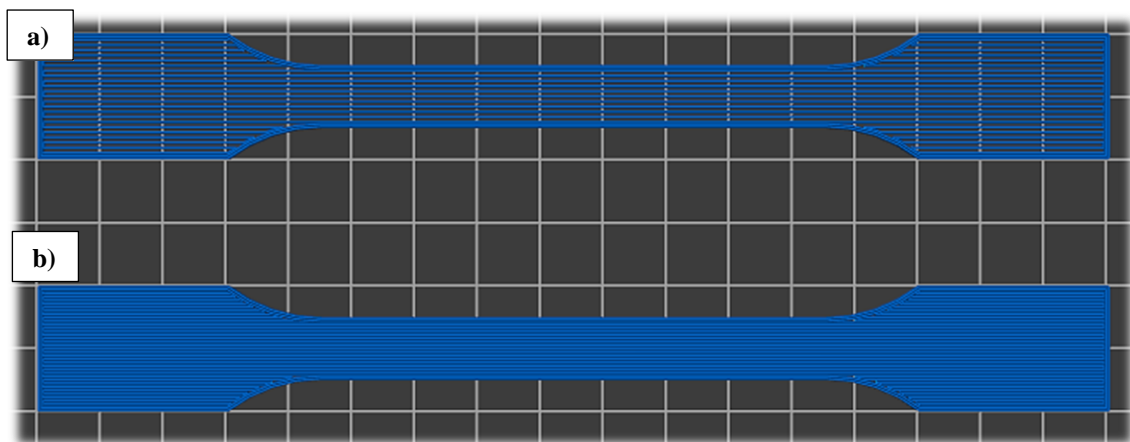


Figura 36. Piezas para el ensayo de tracción con porcentaje de relleno de a) 50 % y b) 100 %.

El patrón de relleno muestra algunas diferencias para las piezas realizadas. En las probetas para los ensayos de tracción sobre el eje X y compresión, se emplea un relleno rectilíneo alineado con un ángulo de deposición de 0° , con el fin de que la aplicación de la fuerza se realice en la dirección de fabricación. Alsoufi *et al.* [4], Yang [25] y Koch *et al.* [45] sustentan que, los rendimientos de tracción más fuertes de los componentes impresos, se obtienen cuando la orientación de impresión del filamento es paralela a la dirección de la fuerza aplicada. La **Figura 37** muestra los patrones de rellenos empleados en con el laminador *PrusaSlicer*.

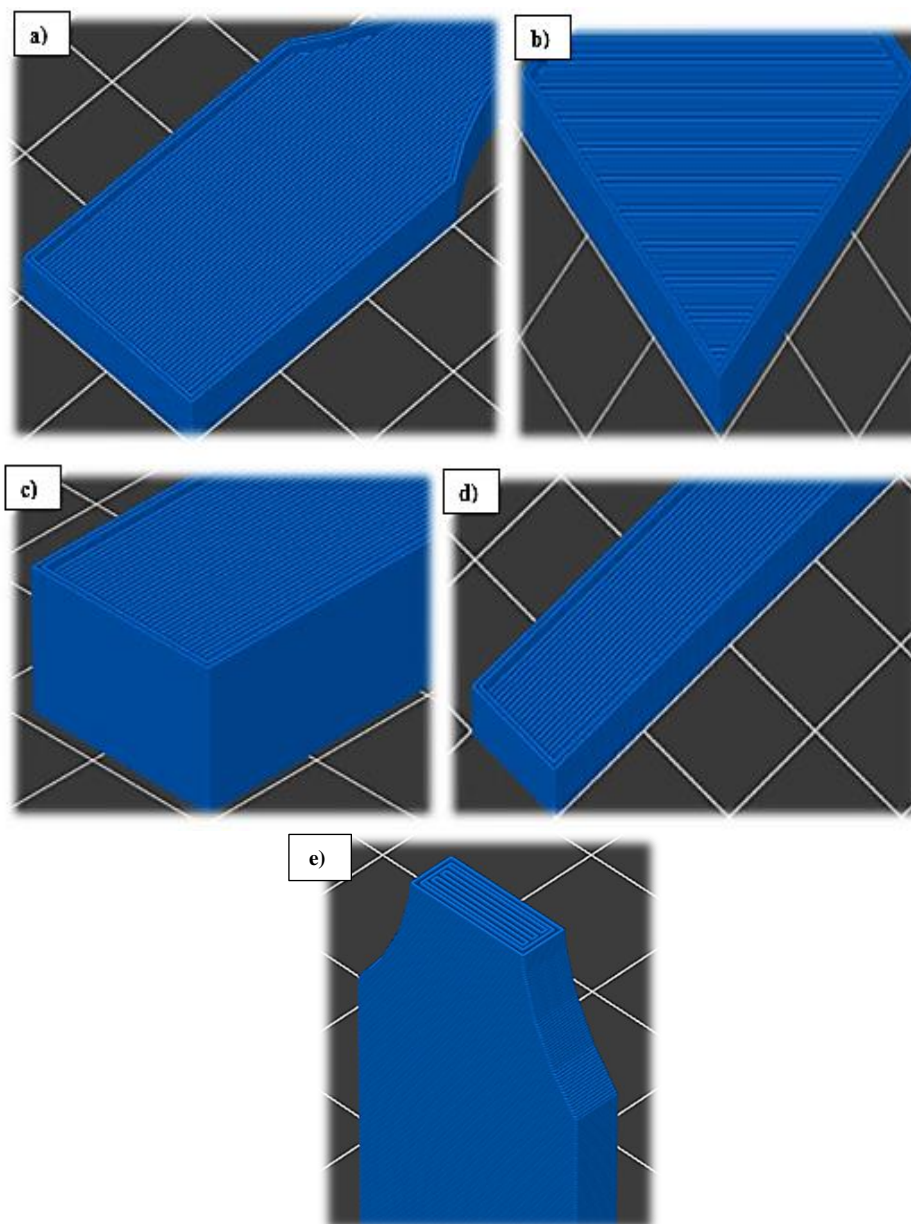


Figura 37. Patrones de relleno y ángulos de deposición empleados para las distintas piezas fabricadas.
a) Tracción eje X, b) XRD, c) compresión, d) flexión y e) tracción eje Z.

Del mismo modo, en las probetas para los ensayos de flexión y de tracción sobre el eje Z, se emplea este tipo de relleno. Sin embargo, la aplicación de la fuerza no se produce en la dirección de impresión de la probeta. Finalmente, para las piezas de XRD se utiliza un patrón de relleno rectilíneo con un ángulo de deposición de 45°, realizando un cruzamiento de las capas.

Las velocidades empleadas se mantienen constantes durante las impresiones y se resumen en la **Tabla 7**. Cabe destacar que, como se ha mencionado en el apartado **2.2.1**, la velocidad de la primera capa se mantiene con un valor bajo con el fin de optimizar la adhesión del material a la cama caliente.

Tabla 7. Velocidades de impresión empleadas.

Velocidades de impresión (mm/s)	
Perímetros	40
Relleno interno	50
Relleno sólido	40
Primera capa	20
Velocidad máxima del eje X	60
Velocidad máxima del eje Y	50
Velocidad máxima del eje Z	10

Únicamente se utiliza un extrusor, con un diámetro de la boquilla de 0,4 mm. El rango de la temperatura de impresión elegido tras los resultados del análisis térmico (ver el apartado **3.3**), comienza en 180 °C llegando hasta 260 °C, con un incremento de 20 °C en cada intervalo. La primera capa se imprime a 5 °C por encima del resto, con el fin de mejorar la adhesión sobre la plataforma de impresión. Finalmente, para el enfriamiento se mantiene el ventilador encendido, durante todas las impresiones, al 100 % de su velocidad.

5.4 Fabricación de las probetas

Una vez determinados los parámetros y las instrucciones para la impresora 3D (*G-Code*), se introducen en ella a través de una tarjeta microSD y se pone en marcha la impresión. La trayectoria de la boquilla comienza realizando la falda y seguidamente, completa el área dentro de los contornos con los patrones de densidad de relleno mencionados. Empieza con la primera capa y continúa con el relleno sólido inferior, el relleno interno y el relleno sólido superior.

Diseño y fabricación de las probetas

Se fabrican un total de 130 piezas, resumidas en la **Tabla 8**. Para XRD se imprimen 2 series, la primera a una temperatura inferior (180 °C) y la segunda a una temperatura mayor (260 °C). Para el resto de las piezas, se imprimen series de 6 probetas, cuyas duraciones de impresión se identifican en la **Tabla 8**. Además, para todas las impresiones se lleva a cabo un registro de la temperatura y humedad presente en el ambiente, estos valores se exponen en el Anexo V. Durante las impresiones, se utilizan algunos utensilios como, por ejemplo, alicates para cortar el filamento, limpiacristales para mantener la plataforma de construcción libre de suciedad y laca de spray para la adhesión de las piezas con el fin de evitar el *warping*. La **Figura 38** muestra una imagen representativa de cada impresión.

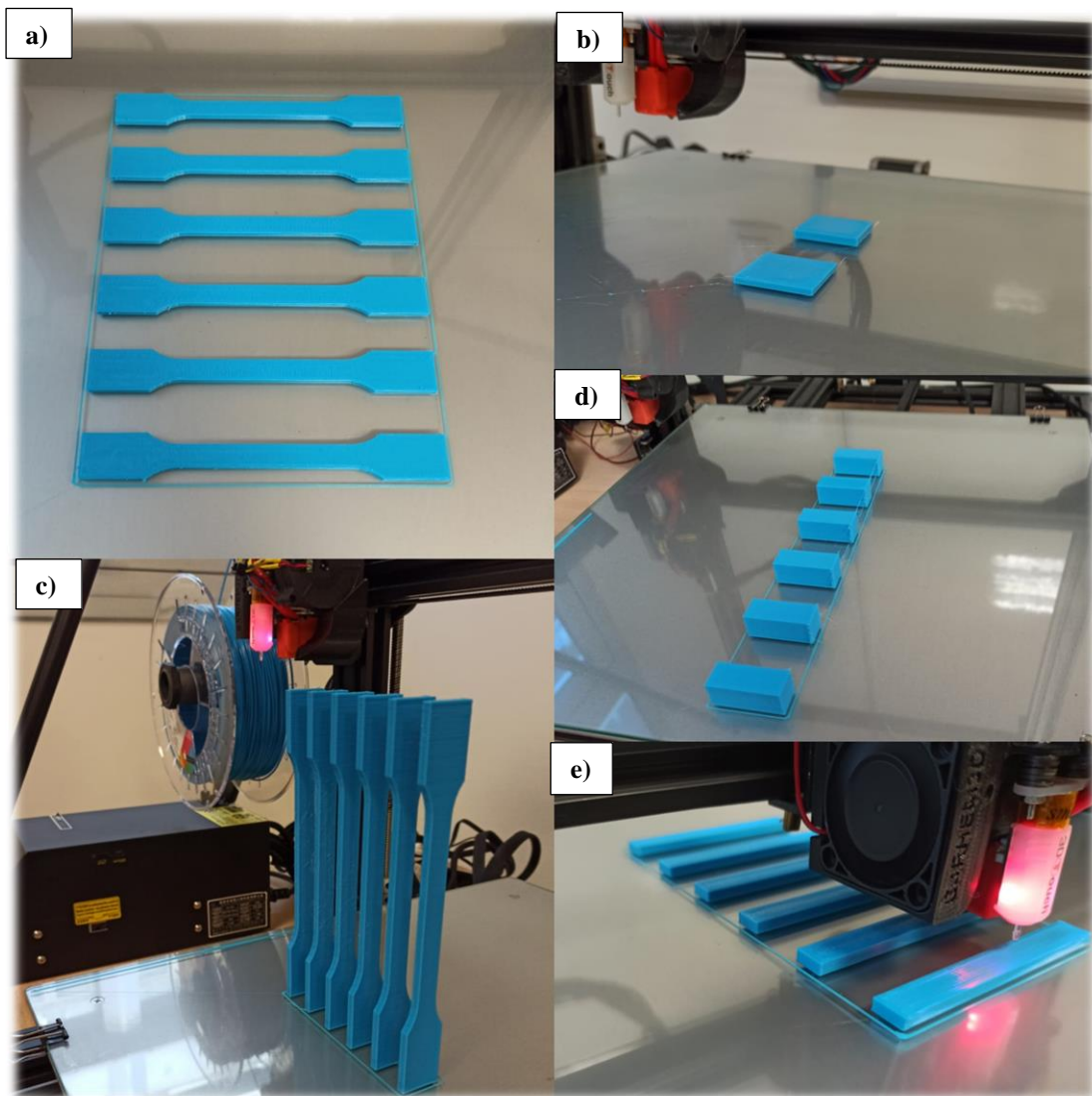


Figura 38. Imágenes de las distintas impresiones. a) Tracción eje X, b) XRD, c) tracción eje Z, d) compresión y e) flexión.

Tabla 8. Resumen de las piezas impresas y su duración por cada serie.

	Nº de piezas	Duración de impresión por cada serie (horas: minutos)
DRX	4	0:39
Tracción eje X	36	5:35
Tracción eje Z	30	8:15
Compresión	30	5:42
Flexión	30	1:59

Cabe destacar que, las piezas en tracción impresas en la dirección del eje Z, presentan una mayor duración debido a la velocidad de este eje (ver la **Tabla 7**).

Una vez finalizada la impresión de cada serie, se establece una numeración atendiendo al orden de impresión de las piezas. Seguidamente, se pesan las probetas utilizando la balanza *Pioneer™* de *OHAUS* y posteriormente, se registran las dimensiones con el uso de un calibrador digital *Caliper 2019* y una regla (ver la **Figura 39**).



Figura 39. Instrumentos de medida junto con la balanza empleada.

En el caso de que las piezas no se ensayen directamente tras finalizar la impresión, con el fin de evitar el impacto de las condiciones atmosféricas, se conservan al vacío en bolsas herméticas. Para ello, se emplea la envasadora al vacío de *Qilive* mostrada en la **Figura 40**. Además, estas bolsas se introducen en la caja de almacenamiento mencionada en el apartado **2.3.1**, donde se depositan todas las probetas impresas en el proyecto.



Figura 40. Envasado al vacío de las piezas destinadas a los distintos ensayos mecánicos.

5.4.1 Probetas para el ensayo de tracción

Para ambas direcciones de impresión, el marcado de las probetas de tracción se establece de la manera indicada en la **Figura 41**, donde W_{01} y W_{02} corresponden con la distancia de separación entre las mordazas, W_1 y W_3 pertenecen a la longitud de referencia del extensómetro y W_2 equivale a la sección central de la probeta. Además, se aprecia en esta figura que se toman diferentes puntos para medir el espesor (t), siendo este un promedio de t_1 , t_2 , t_3 , t_4 y t_5 . El ancho (W_0), se obtiene del promedio de los dos puntos de separación de las mordazas, mientras que el estrechamiento (W), se obtiene tras el promedio de las marcas del extensómetro junto con la parte central de la probeta. Asimismo, se observa en la **Figura 41** la numeración de las probetas.

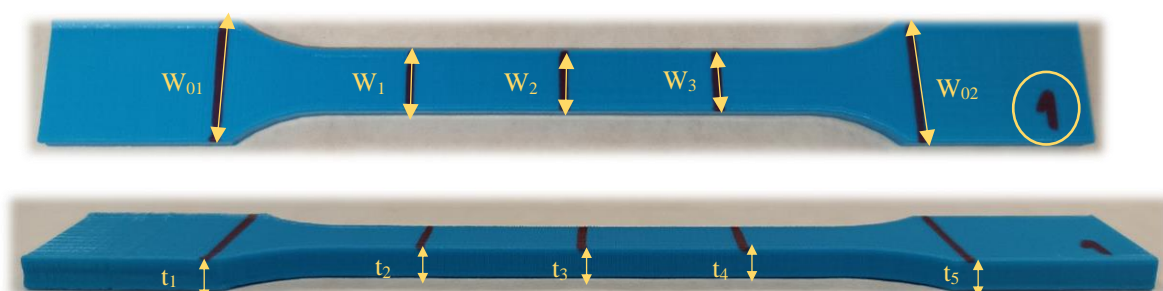


Figura 41. Marcado de las probetas de tracción.

5.4.1.1 Dirección del eje X

La **Tabla 9** recoge los pesos y las dimensiones promedio de las probetas de tracción, impresas a distintas temperaturas, en la orientación de construcción del eje X. Los valores detallados para cada probeta se presentan de forma extensa en el Anexo IV.

El peso muestra una tendencia ligeramente ascendente desde 200 °C hasta 260 °C, donde el peso promedio se aproxima a 12 g, sin embargo, a 180 °C existe una diferencia de 1,5 g. Esto puede ser debido a la viscosidad del material con la temperatura o a un posible atasco parcial en la impresión. No obstante, esta última opción se descarta, ya que la siguiente serie se imprime con naturalidad sin realizar intervenciones en la máquina 3D.

Tabla 9. Medidas y pesos promedios de las probetas (eje X) destinadas al ensayo de tracción.

	Rango de temperatura				
	180 °C	200 °C	220 °C	240 °C	260 °C
Peso (g)	10,29 ± 0,02	11,70 ± 0,02	11,90 ± 0,03	11,83 ± 0,02	11,94 ± 0,03
Longitud [L] (mm)	170 ± 1	170 ± 1	170 ± 1	170 ± 1	170 ± 1
Espesor [t] (mm)	3,96 ± 0,01	3,96 ± 0,02	4,00 ± 0,03	4,00 ± 0,02	4,05 ± 0,04
Ancho [Wo] (mm)	20,10 ± 0,02	20,20 ± 0,08	20,30 ± 0,08	20,30 ± 0,02	20,80 ± 0,04
Ancho [W] (mm)	10,10 ± 0,02	10,30 ± 0,04	10,30 ± 0,09	10,40 ± 0,01	10,90 ± 0,05

El menor peso de las piezas impresas a 180 °C, se puede explicar en base a la viscosidad del flujo másico. El material a esta temperatura presenta una gran viscosidad y no deposita todo el flujo másico que debería, dejando de esta manera, huecos entre los filamentos contiguos. Este efecto se conoce como *air gap* y representa el espacio que existe entre dos deposiciones de material contiguas. Además, actúa en íntima relación con la adhesión de las capas y, por lo tanto, con las propiedades mecánicas de la pieza. El valor del *air gap* puede ser cero, positivo o negativo (ver la **Figura 42**). En el caso de espacios de aire cero, los materiales depositados están apenas en contacto entre sí (caso ideal). En espacios de aire positivos, la deposición del material en series sucesivas se separa dejando huecos, lo que da como resultado una estructura poco compacta. Finalmente, en los espacios de aire negativo se rellenan los huecos vacíos entre filamentos aumentando la densidad, y por tanto, aumentando la resistencia de las uniones. Sin

embargo, puede aparecer un exceso de material que lleva consigo un mal acabado [23, 46].

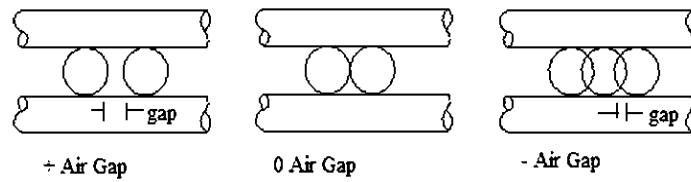


Figura 42. Representación de los tipos de air gap [23, 46].

Atendiendo a este razonamiento, las probetas impresas a 180 °C presentan un caso de air gap positivo, por lo que la pieza se comporta como un objeto con menor porcentaje de relleno del que debería. En el intervalo de temperatura de 200 °C hasta 240 °C, no se observan defectos en la impresión, obteniendo un caso de air gap cero. Sin embargo, a la temperatura de impresión de 260 °C, se puede observar un exceso de material debido a la fluidez del PLA (caso negativo de air gap), donde se deposita mayor cantidad de flujo másico del que se debería (ver la **Figura 43**). De este modo, se refuerzan las conclusiones establecidas por Behzadnasab y Yousefi [3] en su estudio, indicando que la viscosidad de la masa fundida del PLA depende en gran medida de la temperatura. Por lo tanto, con el aumento de la temperatura de la boquilla durante el proceso de impresión, la viscosidad de la masa fundida del PLA disminuye. De esta manera, se logra una mejor difusión de las moléculas de PLA recién extruidas, que a su vez dan como resultado una adhesión más fuerte entre las capas.

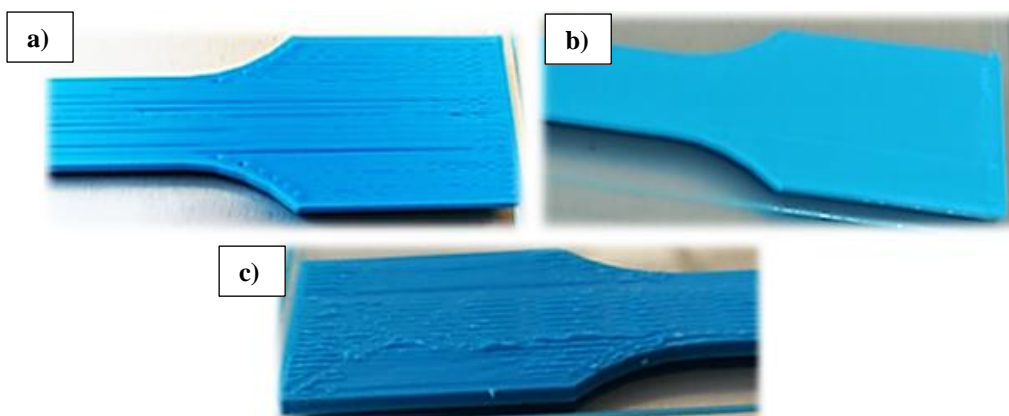


Figura 43. Impresión a una temperatura de a) 180 °C, b) 200 °C y c) 260 °C.

Las dimensiones también sufren un ligero incremento debido a la porosidad y rugosidad de la superficie, que aumentan con la temperatura. Por esta razón, los acabados

superficiales a la temperatura de 260 °C son peores que a las temperaturas inferiores. La **Figura 44** muestra una imagen representativa del proceso de impresión en la dirección del eje X.

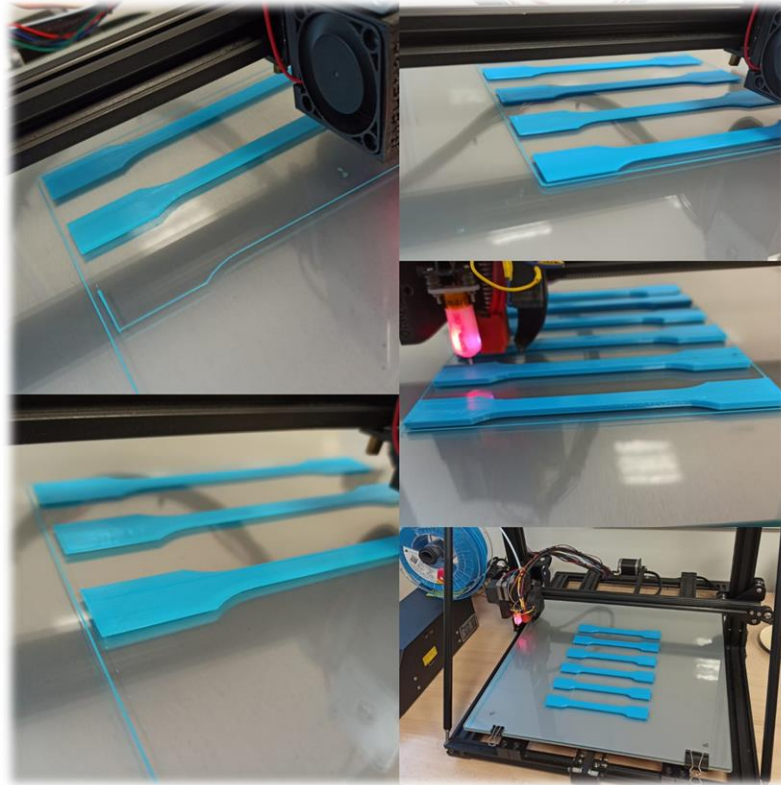


Figura 44. Proceso de impresión de las piezas de tracción en la dirección del eje X.

5.4.1.2 Dirección del eje Z

La **Tabla 10** recoge los pesos y las dimensiones promedio de las probetas de tracción, impresas a distintas temperaturas, en la orientación de construcción del eje Z. Los valores detallados para cada probeta se presentan de forma extensa en el Anexo IV.

El peso muestra una tendencia ligeramente ascendente con el efecto de la temperatura, del mismo modo que las probetas impresas en la dirección del eje X, donde el peso promedio se aproxima a 12 g. Sin embargo, en este caso existe una desigualdad respecto a la anterior dirección, donde la temperatura de 180 °C presenta una diferencia de 0,25 g respecto a las demás. Esto puede ser debido a que la sección sobre la que se deposita el material es inferior al caso anterior (ver la **Figura 45**). Por esta razón, el error que se puede cometer dejando huecos entre los filamentos, por causa de la viscosidad del PLA, también es menor.

Tabla 10. Medidas y pesos promedios de las probetas (eje Z) destinadas al ensayo de tracción.

	Rango de temperatura				
	180 °C	200 °C	220 °C	240 °C	260 °C
Peso (g)	11,74 ± 0,03	12,01 ± 0,03	12,05 ± 0,05	12,13 ± 0,03	12,27 ± 0,02
Longitud [L] (mm)	170 ± 1	170 ± 1	170 ± 1	170 ± 1	170 ± 1
Espesor [t] (mm)	4,19 ± 0,04	4,32 ± 0,01	4,31 ± 0,02	4,31 ± 0,01	4,31 ± 0,01
Ancho [W_o] (mm)	20,36 ± 0,01	20,27 ± 0,02	20,44 ± 0,02	20,44 ± 0,02	20,43 ± 0,03
Ancho [W] (mm)	10,29 ± 0,03	10,27 ± 0,02	10,39 ± 0,01	10,39 ± 0,02	10,38 ± 0,01

Las dimensiones no presentan ninguna tendencia visible, no obstante, se observan ligeros cambios de una temperatura a otra. El acabado superficial no difiere en gran medida de una temperatura a otra, sin embargo, se observan grandes diferencias con respecto a la otra dirección de impresión.

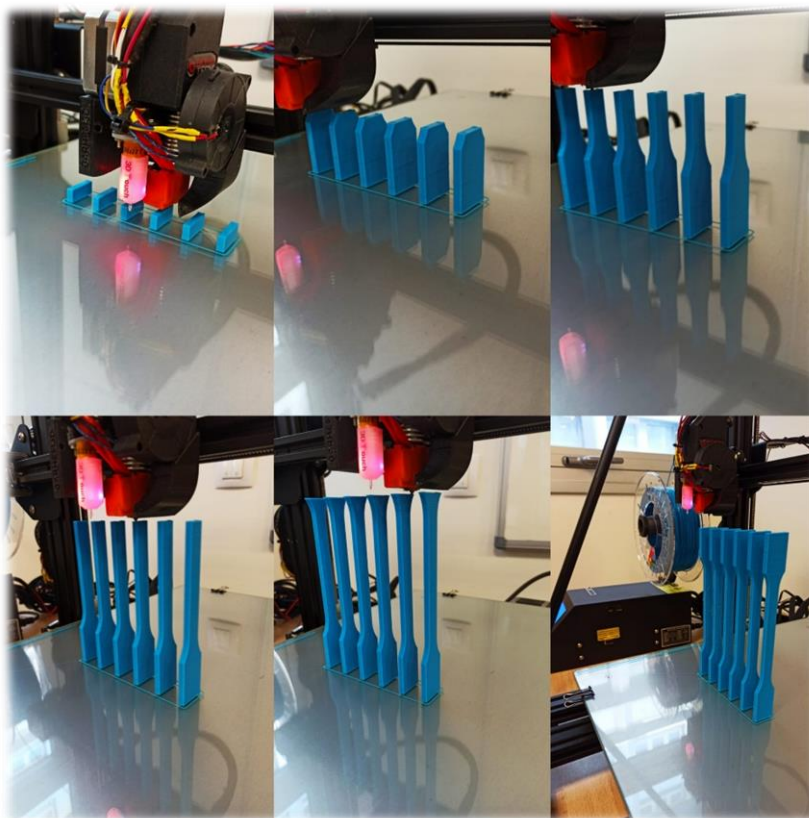


Figura 45. Proceso de impresión de las probetas para el ensayo de tracción (eje Z).

5.4.2 Probetas para el ensayo de compresión

Para las probetas destinadas al ensayo mecánico de compresión, el marcado se establece de la manera indicada en la **Figura 46**. Para cada cara del prisma recto, se toma

un valor de longitud (L), siendo este el promedio de cuatro valores (L_1 , L_2 , L_3 y L_4). Para la obtención de las medidas del espesor y la base, se tiene en cuenta el valor promedio de los tres puntos indicado sobre la **Figura 46**. Del mismo modo, se observa la numeración de las probetas.



Figura 46. Marcado de las piezas para el ensayo de compresión.

La **Tabla 11** recoge los pesos y las dimensiones promedio de las probetas de compresión impresas a distintas temperaturas. Los valores detallados para cada probeta se presentan de forma extensa en el Anexo IV.

El peso muestra una tendencia ligeramente ascendente al incrementar la temperatura de impresión, del mismo modo que la probetas de los ensayos mecánicos de tracción. De la misma manera, las probetas muestran defectos debidos a la viscosidad, observando una deficiencia de material a 180 °C y un exceso de material a 260 °C (ver la **Figura 47**).

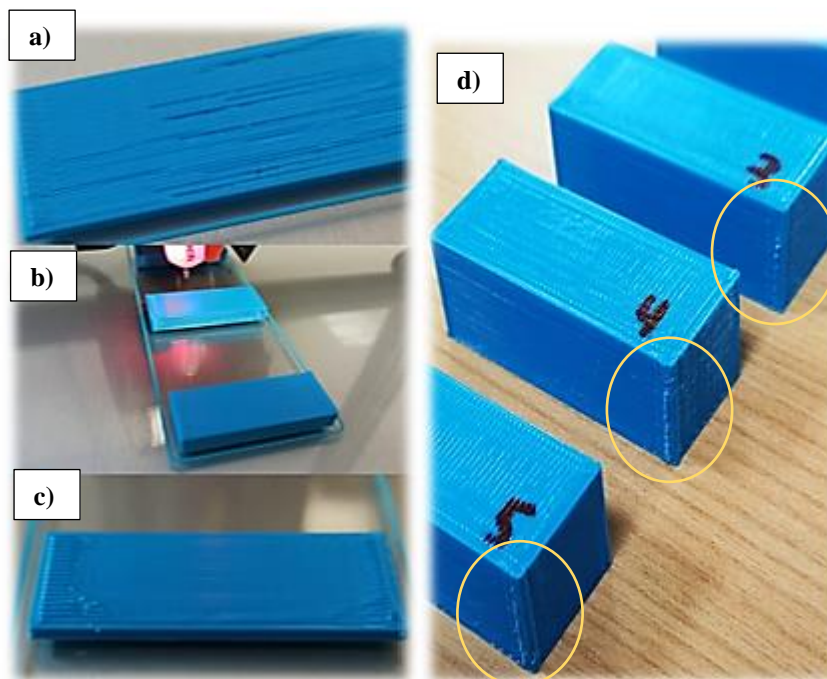


Figura 47. a) Impresión a 180 °C, b) impresión a 200 °C, c) impresión a 260 °C y d) formación de rebabas.

Tabla 11. Medidas y pesos promedios de las probetas destinadas al ensayo de compresión.

	Rango de temperatura				
	180 °C	200 °C	220 °C	240 °C	260 °C
Peso (g)	12,13 ± 0,02	12,32 ± 0,02	12,64 ± 0,02	12,57 ± 0,01	12,74 ± 0,01
Longitud [L] (mm)	39,95 ± 0,04	40,10 ± 0,02	40,14 ± 0,06	40,17 ± 0,03	40,22 ± 0,03
Espesor [d] (mm)	16,11 ± 0,04	16,54 ± 0,05	16,33 ± 0,06	16,27 ± 0,05	16,31 ± 0,02
Base [e] (mm)	15,78 ± 0,02	15,85 ± 0,03	15,84 ± 0,07	15,84 ± 0,02	15,85 ± 0,03

En estas piezas, la longitud presenta un ligero incremento con la temperatura. Esto puede ser debido a la formación de rebabas en una de las caras, actuando estas en el acabado superficial de las piezas. Las otras dimensiones no presentan una tendencia visible, no obstante, se observan ligeros cambios de una temperatura a otra. Cabe destacar que, aun siendo piezas de sección cuadrada, se registran medidas inferiores para la base respecto al espesor. Para estas probetas, el acabado superficial no difiere en gran medida de una temperatura a otra. La **Figura 48** muestra una imagen representativa del proceso de impresión.

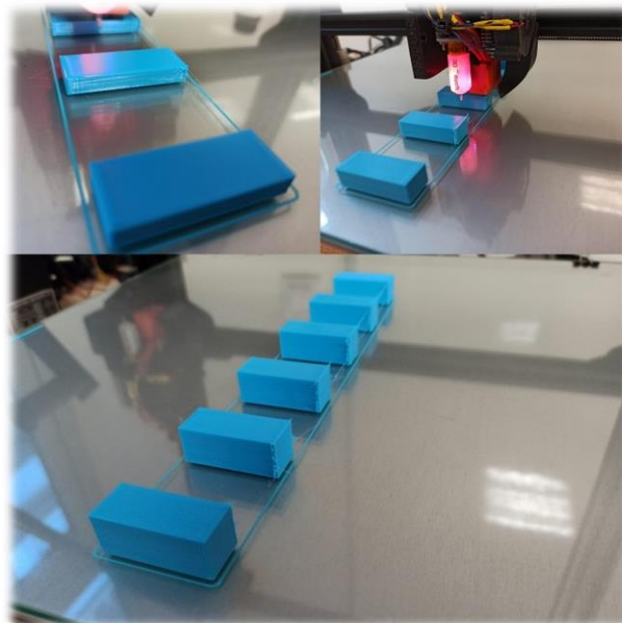


Figura 48. Proceso de impresión de las probetas para el ensayo de compresión.

5.4.3 Probetas para el ensayo de flexión a tres puntos

Para las probetas destinadas al ensayo mecánico de flexión, el marcado se establece de la manera indicada en la **Figura 49**. Las dimensiones del espesor y la base, se calculan

como el promedio de los tres puntos indicados sobre la **Figura 49**. Los puntos 1 y 3 coinciden con los apoyos de la pieza sobre la bancada, mientras que el punto 2 corresponde con la sección central de la probeta. Del mismo modo, se observa en la **Figura 49** la numeración de las probetas.



Figura 49. Marcado de las probetas para el ensayo de flexión.

La **Tabla 12** recoge los pesos y las dimensiones promedio de las probetas para el ensayo de flexión impresas a distintas temperaturas. Los valores detallados para cada probeta se presentan de forma extensa en el Anexo IV. El peso muestra una tendencia ligeramente ascendente con el incremento de la temperatura de impresión, del mismo modo que las probetas de los anteriores ensayos mecánicos. De manera similar, estas piezas presentan defectos debidos a la viscosidad. Se observa una deficiencia de material a 180 °C y un exceso de material a 260 °C, formándose ligeros bultos sobre la superficie de la probeta como muestra la **Figura 50**.

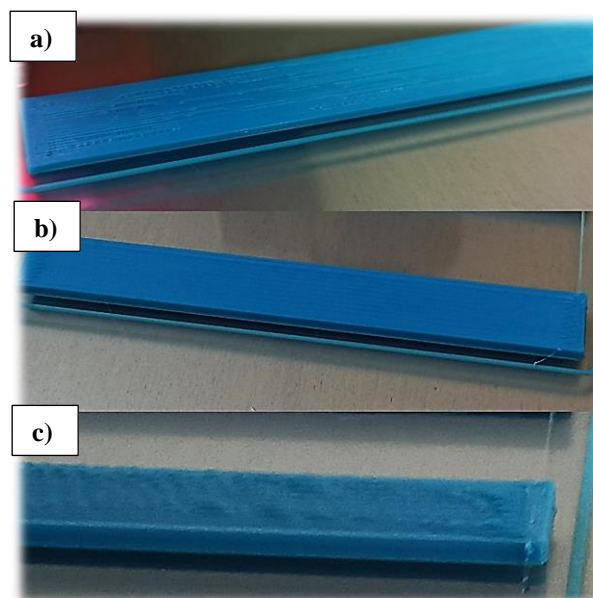


Figura 50. Impresión a una temperatura de a) 180 °C, b) 200 °C y c) 260 °C.

Las dimensiones, de la misma manera que las probetas para los ensayos de tracción sobre la dirección de impresión del eje Z, no presentan ninguna tendencia visible. No obstante, se observan ligeros cambios de una temperatura a otra. Sin embargo, el acabado

Diseño y fabricación de las probetas

superficial no difiere en gran medida de una temperatura a otra. La *Figura 51* muestra una imagen representativa del proceso de impresión.

Tabla 12. Medidas y pesos promedios de las probetas destinadas al ensayo de flexión.

	Rango de temperatura				
	180 °C	200 °C	220 °C	240 °C	260 °C
Peso (g)	3,62 ± 0,01	3,87 ± 0,01	3,89 ± 0,01	3,96 ± 0,01	3,95 ± 0,01
Longitud [l] (mm)	80 ± 1	80 ± 1	80 ± 1	80 ± 1	80 ± 1
Base [b] (mm)	10,63 ± 0,04	10,72 ± 0,03	10,76 ± 0,04	10,80 ± 0,04	10,79 ± 0,05
Espesor [e] (mm)	3,91 ± 0,02	4,02 ± 0,03	4,04 ± 0,05	4,03 ± 0,01	4,04 ± 0,02

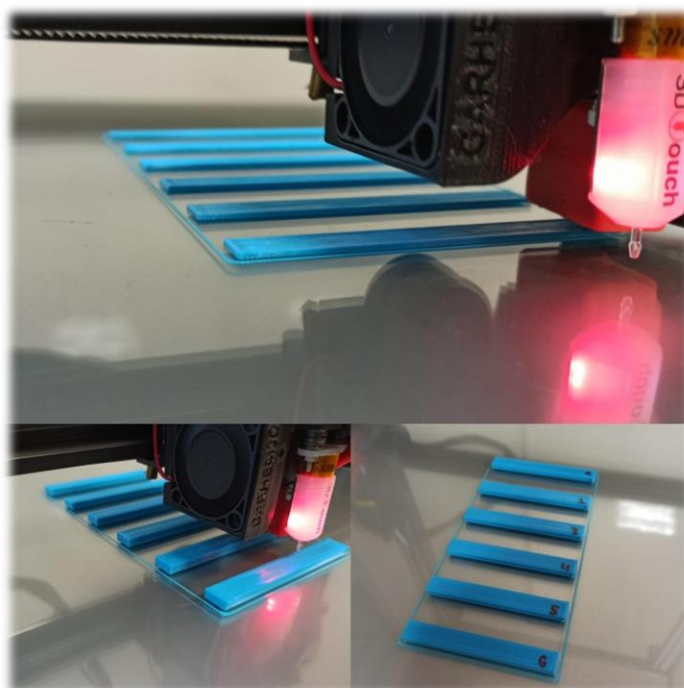


Figura 51. Proceso de impresión de las probetas para el ensayo de flexión.

6. Ensayos Mecánicos

6.1 Instrumentación de laboratorio

Durante los ensayos mecánicos, se emplean diversos elementos que se describen a continuación:

- Máquina Universal de Ensayos

Se dispone de la máquina de ensayos mecánicos *Shimadzu Autograph AG-IS*, con una capacidad máxima de carga de 50 KN (ver la **Figura 52**), ubicada en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología. Esta máquina permite realizar ensayos de tracción, compresión y flexión (ver la **Figura 53**).



Figura 52. Máquina de ensayos mecánicos Shimadzu Autograph AG-IS 50 KN.

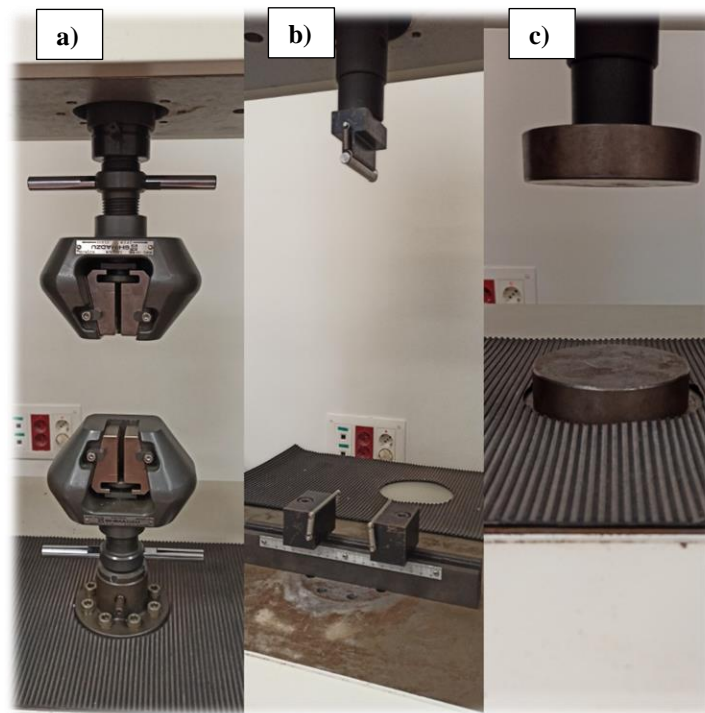


Figura 53. Elementos que intervienen en el ensayo de a) tracción, b) flexión y c) compresión.

- Extensómetro

Este aparato mide con precisión las deformaciones de las probetas en el ensayo de tracción. Debe situarse sobre la línea central de la probeta y de forma simétrica respecto a su punto medio. Se emplea el modelo *MFA 25* mostrado en la *Figura 54*.

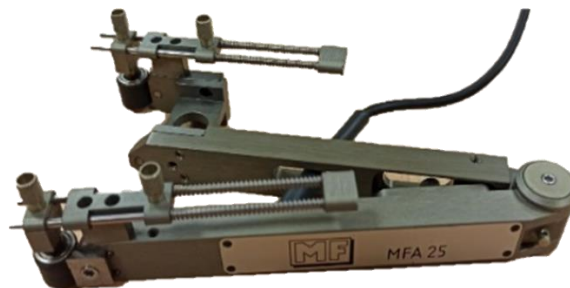


Figura 54. Extensómetro MFA 25.

6.2 Ensayos de tracción

El ensayo de tracción consiste en aplicar un valor de carga sobre una probeta a lo largo de su eje longitudinal principal, con un movimiento ascendente del bastidor a una velocidad constante, hasta que rompa o hasta que el esfuerzo o la deformación alcancen

un valor predeterminado. Para este ensayo, se emplean la normas *UNE-EN ISO 527-1:2019* [40] y *UNE-EN ISO 527-2:2012* [41].

Durante este procedimiento se mide la carga que soporta la probeta y el alargamiento que experimenta. Para ello, se utiliza el software *Trapezium* que ayuda en el registro automático de los datos. A través de este software, se establecen todas las condiciones de ensayo como, por ejemplo, la carga aplicada, la velocidad de ensayo y el número de probetas a ensayar. La norma [40] establece que se deben ensayar un mínimo de cinco probetas, sin embargo, se pueden añadir más si se requiere una mayor precisión.

Previamente al ensayo, se miden las dimensiones de las probetas (descritas en el apartado 5.4) para posteriormente, añadirlas en el software. Una vez establecidas las condiciones de ensayo, las probetas se colocan en las mordazas. Estas las sujetarán y fijarán a la máquina de forma que, el eje principal de la probeta coincida con la dirección del alargamiento a través de la línea central del montaje de sujeción (ver la *Figura 55*). Se aprietan las mordazas uniformemente para evitar el deslizamiento de la probeta y el movimiento de las mordazas durante el ensayo [40]. La presión de las mordazas no debe provocar fractura o aplastamiento de la probeta, por esta razón, para nivelar este esfuerzo existen dos manivelas (superior e inferior) que cierran y abren las mordazas (ver la *Figura 55*). Una vez que ya están bien sujetas, se coloca el extensómetro a una longitud de referencia [40].

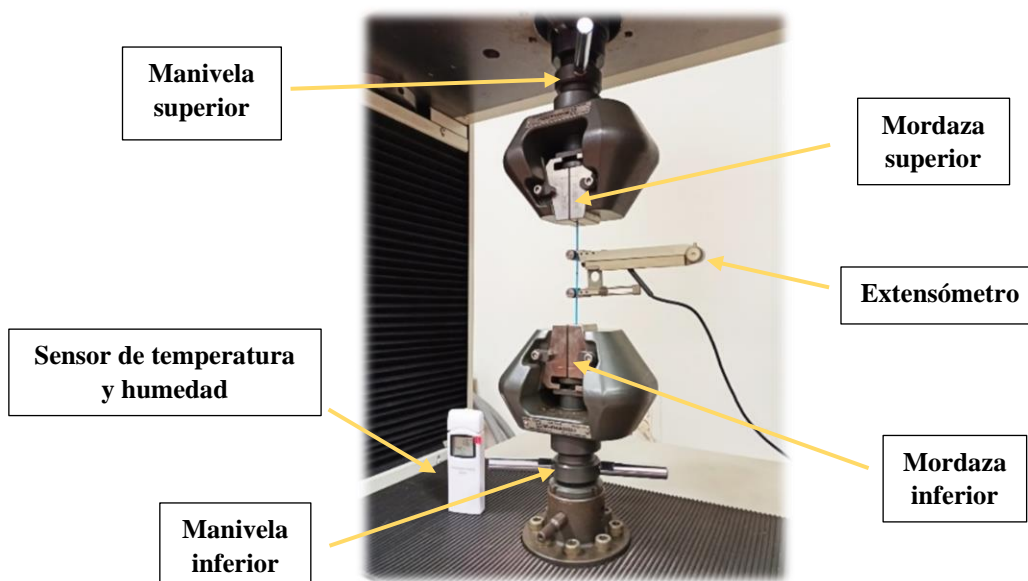


Figura 55. Elementos que intervienen en el ensayo de tracción.

Tras el ensayo, se obtienen los resultados del tiempo transcurrido, la carga aplicada y el alargamiento medido con el extensómetro. Con estos dos últimos valores, se realiza una representación del esfuerzo frente a la deformación como se observa en la **Figura 56**.

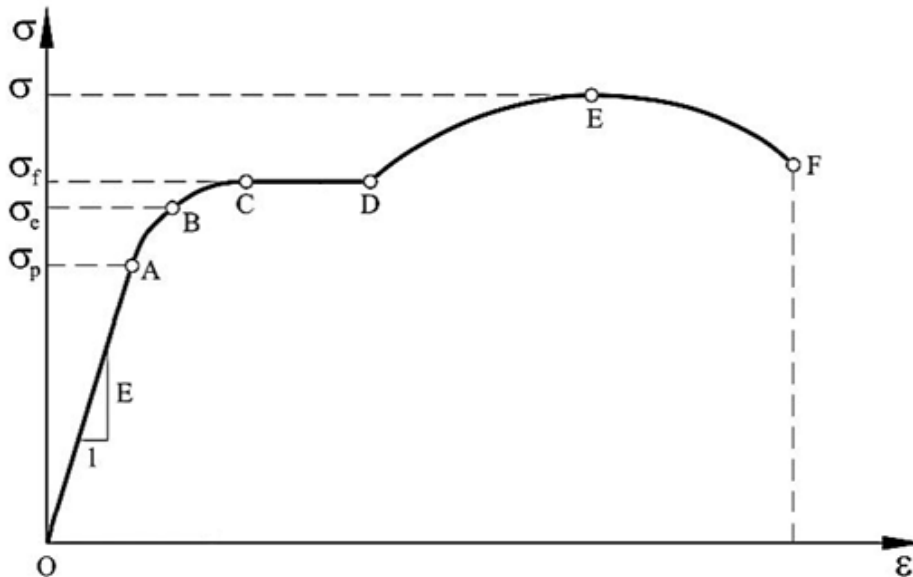


Figura 56. Curva de esfuerzo/deformación típica de ensayos de tracción. Adaptado de [47].

Para estos diagramas, se distinguen diferentes regiones:

a) **Zona elástica:** en esta región se producen bajas deformaciones y el material tiene un comportamiento elástico, cumpliéndose la Ley de Hooke:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (5)$$

donde:

σ es el valor del esfuerzo, expresado en megapascales (MPa).

E es el valor del módulo elástico del material, expresado en megapascales (MPa).

ε es el valor de la deformación, expresado como una relación adimensional o en porcentaje.

Observando la **Figura 56**, durante el tramo OA, el material cumple una relación completamente lineal entre el esfuerzo y la deformación, donde su pendiente determina el módulo elástico del material [47]. En el tramo OB, el material sufre deformaciones elásticas sin experimentar ningún cambio permanente, donde el punto B se conoce como esfuerzo de límite elástico o límite de elasticidad (σ_y o σ_e). Por último, el tramo AB tiene

un comportamiento elástico no lineal que, será más significativo dependiendo del material [47].

b) Zona plástica: a partir del límite elástico, el material sufre deformaciones permanentes perdiendo el comportamiento elástico. A continuación, el tramo BD corresponde con el primer intervalo de la región plástica del material, en el cual no se recupera el comportamiento lineal. Seguidamente, el punto D se conoce como límite de fluencia (σ_{fl}), en el cual el esfuerzo deja de ser proporcional a la deformación. El siguiente tramo CD se conoce como zona de fluencia, no siempre aparece en todos los materiales y es característica porque la deformación aumenta sin que se produzca un aumento del esfuerzo.

En el tramo DE, a partir de un valor determinado de deformación, el esfuerzo necesario para seguir aumentando la deformación se incrementa, generándose un fenómeno conocido como endurecimiento por deformación, encontrándose en este punto el esfuerzo máximo [47]. El material puede llegar a la fractura en este lugar, pero no tiene por qué ser siempre así. En el último tramo EF, cuando se alcanza la tensión máxima, se empieza a formar una disminución localizada en el área de la sección transversal en algún punto de la probeta, lo cual se denomina estricción. Toda la deformación posterior está confinada en la estricción y la fractura del material normalmente ocurre en este tramo [47].

Tras la finalización del ensayo, se obtienen los siguientes parámetros especificados por la norma [40]:

Esfuerzo de tracción (σ_t)

Se define como la fuerza aplicada por unidad de área, expresado en la siguiente ecuación:

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \quad (6)$$

σ_t es el valor del esfuerzo, expresado en megapascuales (MPa).

F es la fuerza medida, expresada en newtons (N).

A es el área de la sección transversal inicial de la probeta, expresada en milímetros cuadrados (mm^2).

Deformación en tracción (ε_t)

Se define como el incremento de la longitud frente a una longitud de referencia:

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (7)$$

ε_t es el valor de la deformación, expresado como una relación adimensional o en porcentaje.

L_0 es la longitud de referencia de la probeta, expresada en milímetros ($L_0 = 50$ mm).

ΔL_0 es el incremento de la longitud de la probeta entre las marcas de referencia, expresada en milímetros. Este valor es proporcionado directamente por la medición registrada en el extensómetro.

Módulo de Young o módulo de elasticidad en tracción (E_t)

El módulo de Young o módulo de elasticidad longitudinal relaciona la tensión según una dirección, con las deformaciones unitarias que se producen en esa misma dirección. La norma [40] establece que su valor sobre la curva de tensión frente a la deformación, coincide con la pendiente en el intervalo comprendido entre $\varepsilon_1 = 0,05$ % y $\varepsilon_2 = 0,25$ %, utilizando el modelo de la recta de regresión lineal ajustada por el método de mínimos cuadrados (ver la **Figura 57**).

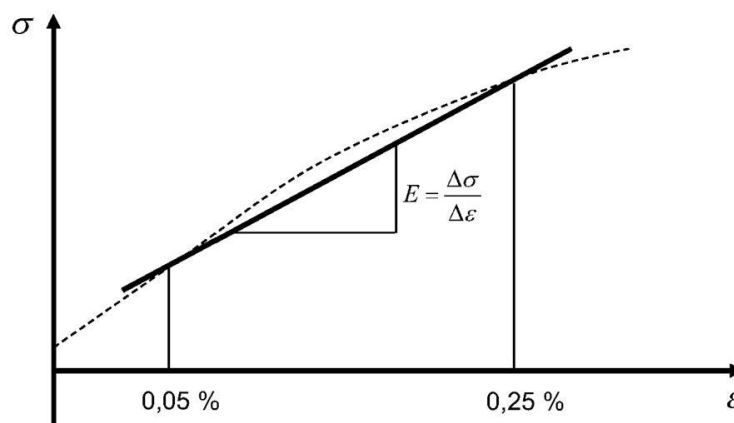


Figura 57. Determinación del módulo de elasticidad en tracción [40].

Resistencia a la tracción (RT)

La resistencia a tracción corresponde con el esfuerzo máximo alcanzado tras el ensayo de tracción.

Esfuerzo de límite elástico (σ_y)

Es el esfuerzo máximo que puede soportar un material sin sufrir deformaciones permanentes. Si se aplica algún esfuerzo superior a este límite, el material experimenta un comportamiento plástico con deformaciones permanentes. Debido a la dificultad para localizarlo exactamente, se adopta un criterio convencional (ver la **Figura 58**) y se considera como límite elástico la tensión a la cual el material tiene una deformación de un porcentaje determinado [40, 47]. El más utilizado y el empleado en este trabajo es el 0,2 % (o también $\varepsilon = 0,002$).

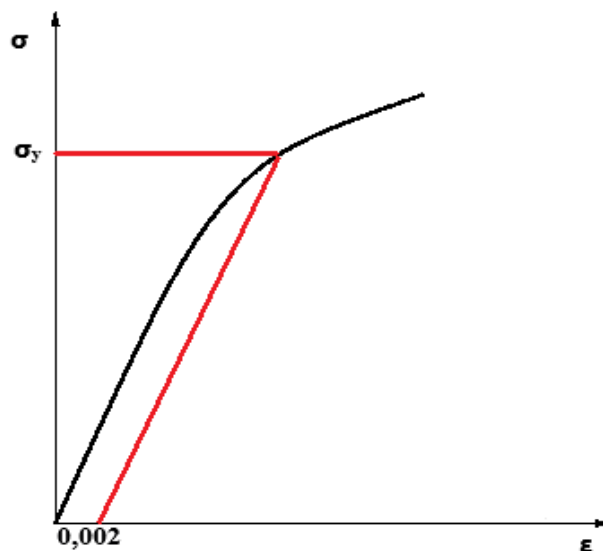


Figura 58. Cálculo del esfuerzo de límite elástico.

Deformación máxima ($\varepsilon_{m\acute{a}x}$)

La deformación máxima en tracción es el valor más alto registrado de deformación y coincide con el esfuerzo en el punto de rotura, en el que caso de que la probeta llegue a la fractura.

Esfuerzo de rotura (σ_b)

El esfuerzo de rotura corresponde con el valor del esfuerzo aplicado con el cual el material alcanza la fractura. Del mismo modo, puede coincidir con el valor de la deformación máxima.

6.3 Ensayos de compresión

El ensayo de compresión consiste en aplicar un valor de carga sobre una probeta a lo largo de su eje longitudinal principal, con un movimiento descendente del puente de carga a una velocidad constante, hasta que rompa o hasta que el esfuerzo o la deformación alcancen un valor predeterminado. Para este ensayo, se emplea la norma *UNE-EN ISO 604:2003* [42].

Durante este procedimiento, se mide la carga que soporta la probeta y el desplazamiento experimentado por el puente de carga. Para ello, del mismo modo que en los ensayos de tracción, se utiliza el software *Trapezium* para definir los parámetros del ensayo y registrar los datos. El procedimiento del ensayo, como se puede observar en la **Figura 59**, consiste en situar la probeta entre las superficies de los discos de compresión de acero endurecido y alinearla sobre la parte central de dichas superficies. Se asegura, con ajustes de la máquina, que la superficies de los extremos de la probeta y las superficies de los discos de compresión estén ligeramente en contacto. La norma [42] recomienda aplicar una pequeña carga previa, con el fin de evitar una zona de acomodación de los discos con la probeta al inicio del ensayo. Esto no se emplea en la ejecución del ensayo, pero sí se tiene en cuenta a la hora de realizar los cálculos.

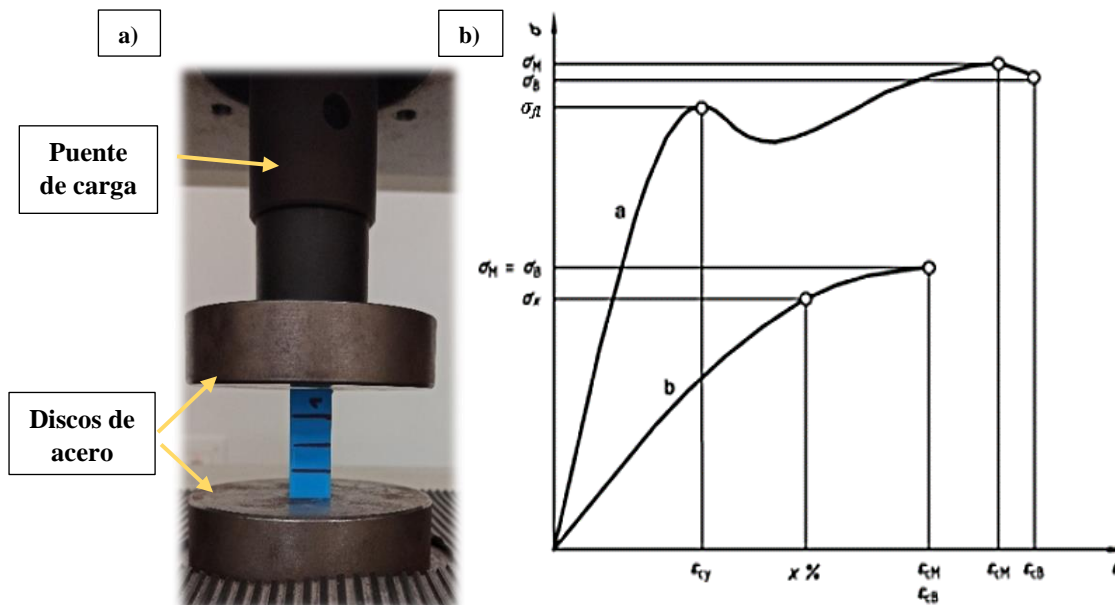


Figura 59. a) Colocación de las piezas en el ensayo de compresión y b) curvas esfuerzo/deformación típicas del ensayo de compresión [42].

Tras el ensayo, se obtienen los resultados del tiempo transcurrido, la carga aplicada y el desplazamiento experimentando por el puente de carga. Con estos dos últimos valores, se realiza una representación del esfuerzo frente a la deformación como se observa en la **Figura 59**.

En estos diagramas, del mismo modo que en los ensayos de tracción, se puede distinguir una región elástica y plástica. Tomando de ejemplo la curva a de la **Figura 59**, la zona elástica existe hasta el límite de fluencia indicado como σ_F . A partir de este valor, el esfuerzo comienza a decrecer hasta que la tensión necesaria para seguir aumentando la deformación se incrementa, generándose un endurecimiento por deformación, presentándose aquí el esfuerzo máximo. Finalmente, la tensión vuelve a decrecer, estableciéndose en este intervalo la fractura de la pieza.

Tras la finalización del ensayo, se obtienen parámetros similares a los calculados tras los ensayos de tracción, especificados por la norma [42]:

Esfuerzo de compresión (σ_c)

Se define como la fuerza aplicada por unidad de área, expresado en la siguiente ecuación:

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (8)$$

σ_c es el valor del esfuerzo, expresado en megapascales (MPa).

F es la fuerza medida, expresada en newtons (N).

A es el área de la sección transversal inicial de la probeta, expresada en milímetros cuadrados (mm²).

Deformación en compresión (ε_c)

Se define como el incremento de la longitud frente a una longitud de referencia:

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta L}{L} \quad (9)$$

ε_c es el valor de deformación, expresado como una relación adimensional o en porcentaje.

L es la distancia inicial entre los discos de compresión, expresada en milímetros. Se

corresponde aproximadamente con el valor de longitud de la probeta.

ΔL es la disminución de la distancia entre los discos de compresión, expresada en milímetros. Este valor es proporcionado directamente por la medición registrada con el descenso del puente de carga.

Módulo de elasticidad en compresión (E_c)

El módulo de elasticidad en compresión se obtiene de manera similar a los ensayos de tracción, empleando la recta de regresión lineal ajustada por el método de mínimos cuadrados. Según la norma [42], el valor de la pendiente se obtiene en el intervalo comprendido entre $\varepsilon_1 = 0,05 \%$ y $\varepsilon_2 = 0,25 \%$. Sin embargo, debido a la posible aparición de una región curvada al inicio del diagrama, el intervalo comprendido se aumenta a unos valores de deformación del $\varepsilon_1 = 1,5 \%$ y $\varepsilon_2 = 2,5 \%$.

Resistencia a la compresión (σ_m)

La resistencia a compresión corresponde con el esfuerzo máximo alcanzado tras el ensayo de compresión.

Esfuerzo de fluencia (σ_f)

El esfuerzo de fluencia, como indica la **Figura 59** sobre la curva a, se obtiene como el primer valor de tensión para el que tiene lugar un incremento en la deformación sin un incremento del esfuerzo [42].

Deformación máxima ($\varepsilon_{m\acute{a}x}$)

La deformación máxima en compresión es el valor más alto registrado de deformación y coincide con la deformación en el punto de rotura, en el que caso de que la probeta llegue a la fractura.

Esfuerzo de rotura (σ_b)

El esfuerzo de rotura corresponde con el valor de la tensión aplicada con el cual el material alcanza la fractura. Del mismo modo, puede coincidir con el valor de la deformación máxima.

6.4 Ensayos de flexión a tres puntos

El ensayo de flexión a tres puntos consiste en la aplicación de una carga sobre el punto medio de una probeta apoyada en dos soportes (ver la **Figura 60**). Para este ensayo, se emplea la norma *UNE-EN-ISO 178:2020* [43].

Durante el procedimiento del ensayo, la probeta se flexiona a una velocidad constante, hasta que se rompe o hasta que alcanza un valor máximo de deformación. Del mismo modo que en los ensayos de tracción y compresión, se emplea el software *Trapezium* para definir los parámetros del ensayo y registrar los datos. Finalmente, se mide la fuerza aplicada sobre la probeta y el desplazamiento del puente de carga resultante sobre el punto medio.

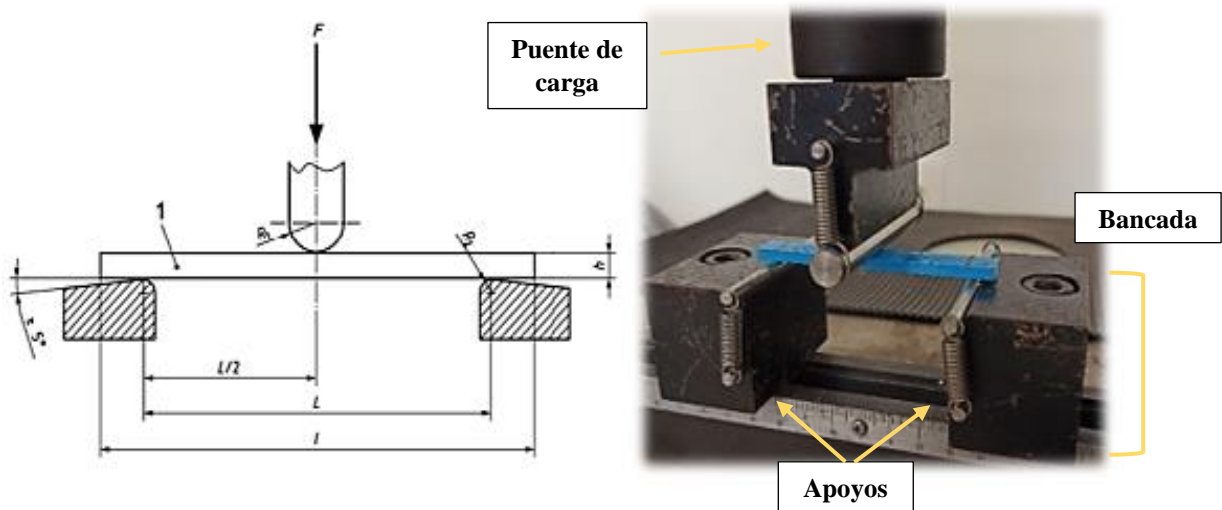


Figura 60. Colocación de la probeta sobre los apoyos para el ensayo de flexión. Adaptado de [43].

El procedimiento del ensayo, comienza ajustando la distancia entre los apoyos con el fin de cumplir la ecuación recomendada por la norma [43]:

$$L = (16 \pm 1) \cdot h \quad (10)$$

En este caso, h corresponde con el espesor de la probeta que, para las dimensiones elegidas, tiene un valor de 4 mm. Por lo tanto, la distancia entre los apoyos será $L = 64$ mm. Posteriormente, se sitúa la probeta simétricamente sobre los dos soportes como indica la **Figura 60** y se coloca el puente de carga apoyado ligeramente sobre la superficie de la probeta. La norma [43] recomienda aplicar una pequeña carga previa, con el fin de evitar una zona de acomodación del puente de carga con la probeta al inicio del ensayo.

Esto no se aplica en la ejecución del ensayo, pero sí se tiene en cuenta a la hora de realizar los cálculos. La velocidad del ensayo se mantiene con un valor constante, empleando de esta manera, el método A indicado en la norma [43].

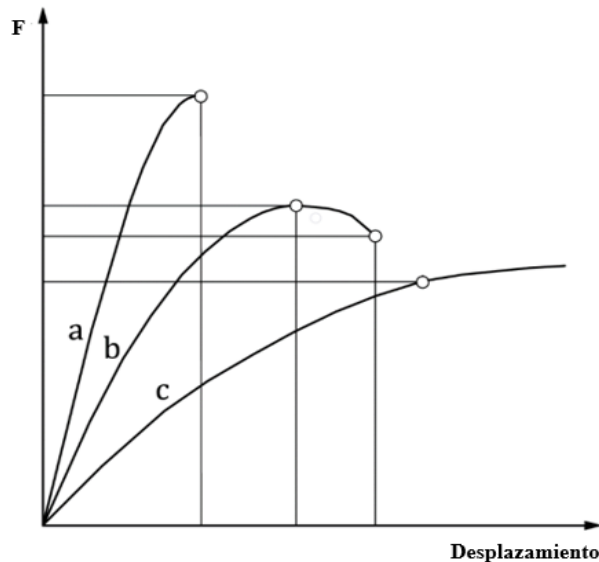


Figura 61. Curva carga/desplazamiento típica de ensayos de flexión. Adaptado de [43].

Tras el ensayo, se obtienen los resultados del tiempo transcurrido, la carga aplicada y el desplazamiento experimentado por el puente de carga. Estos dos últimos valores, se representan en un gráfico de carga frente a desplazamiento como indica la **Figura 61**. Las regiones de estos diagramas son similares a las mencionadas para los distintos ensayos descritos. Sin embargo, normalmente los valores de desplazamiento medidos en los ensayos de flexión son inferiores.

Tras la finalización de los ensayos, se obtienen los siguientes parámetros especificados por la norma [43]:

Desplazamiento del puente de carga (s)

El valor de desplazamiento corresponde con la distancia experimentada por la superficie inferior o superior de la probeta durante el ensayo, en el punto de aplicación de la carga, desde su posición inicial. Este valor es proporcionado directamente por la medición registrada con el descenso del puente de carga.

Máxima carga ($F_{m\acute{a}x}$)

Se obtiene el valor máximo de carga soportado por la probeta en el punto medio, hasta que rompa o hasta que alcance un valor determinado de desplazamiento.

Esfuerzo máximo de flexión (MOR)

El esfuerzo máximo de flexión (MOR, por sus siglas en inglés *Modulus of Rupture*) corresponde con la tensión máxima experimentada por la probeta durante el ensayo. Para una probeta de sección rectangular se calcula con la siguiente expresión [43]:

$$MOR = \frac{3 \cdot F_{m\acute{a}x} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (11)$$

donde:

MOR es el valor del esfuerzo máximo en flexión, expresado en megapascuales (MPa).

$F_{m\acute{a}x}$ es el valor máximo de carga, expresado en newtons (N).

L es la distancia entre los apoyos, expresada en milímetros.

b es el ancho de la probeta, expresado en milímetros.

h es el espesor de la probeta, expresado en milímetros.

Deformación máxima en flexión (ϵ_f)

El valor de la máxima deformación experimentada por la probeta, se calcula con la siguiente expresión [43]:

$$\epsilon_f = \frac{6 \cdot s_{m\acute{a}x} \cdot h}{L^2} \quad (12)$$

donde:

ϵ_f es el valor de la deformación, expresado como una relación adimensional o en porcentaje.

$s_{m\acute{a}x}$ corresponde con el máximo valor de desplazamiento, expresado en milímetros.

h es el espesor de la probeta, expresado en milímetros.

L es la distancia entre los apoyos, expresada en milímetros.

Módulo de elasticidad en flexión (E_f)

El valor del módulo de elasticidad en flexión, se calcula con la siguiente expresión [48]:

$$E_f = \frac{L^3 \cdot m}{4 \cdot w \cdot h^3} \quad (13)$$

donde:

E_f es el valor del módulo elástico, expresado en megapascales (MPa).

L es la distancia entre los apoyos, expresada en milímetros.

m corresponde con el valor de la pendiente de la curva, expresado en megapascales (MPa).

w es el ancho de la probeta, expresado en milímetros.

h es el espesor de la probeta, expresado en milímetros.

El valor de la pendiente (m) se obtiene del mismo modo que en los ensayos de tracción y compresión, empleando la recta de regresión lineal ajustada por el método de mínimos cuadrados. Según la norma [43], se emplea el intervalo comprendido entre $\varepsilon_1 = 0,05 \%$ y $\varepsilon_2 = 0,25 \%$, que corresponden con los valores de desplazamiento de $s_1 = 0,085$ mm y $s_2 = 0,426$ mm. Sin embargo, debido a la posible aparición de una región curvada al inicio del diagrama, el intervalo comprendido se aumenta a unos valores de desplazamientos del $s_1 = 0,085$ mm y $s_2 = 2$ mm.

7. Análisis de resultados

A continuación, se presentan las tablas y gráficas con los resultados obtenidos para el análisis XRD y los ensayos de tracción, compresión y flexión. Se ensayan un total de 126 piezas, sin embargo, para los cálculos se tienen en cuenta 105 probetas, descartando una muestra de cada serie. Esto es recomendable ya que, con frecuencia, el valor de alguna probeta puede desviarse de manera drástica respecto a las demás, o incluso, podría cometerse algún error durante en el ensayo. En las tablas, se presentan los valores promedios obtenidos en cada serie, junto con los valores de las desviaciones estándar calculados a partir de la siguiente expresión:

$$\sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (14)$$

donde:

x corresponde con los valores de los elementos del muestreo.

\bar{x} es el valor promedio de los elementos del muestreo.

n corresponde con el número de observaciones del muestreo ($n = 5$).

Además de estos valores, se muestran imágenes de la fractura de las probetas tras haber sido ensayadas. Durante todos los ensayos mecánicos, del mismo modo que en el proceso de impresión, se registran las condiciones atmosféricas (temperatura y humedad relativa) cuyo valor promedio se muestra en las tablas presentes en este apartado. El Anexo V, muestra en mayor profundidad los registros de las condiciones atmosféricas.

7.1 XRD

A continuación, se muestran las condiciones establecidas junto con los resultados obtenidos. El análisis de difracción de rayos-X (XRD) de las muestras fabricadas, se realiza en el difractómetro *PANalytical Empyrean* mostrado en el apartado 4, utilizando una radiación $\text{CuK}\alpha_{1,2}$ ($\lambda_{\text{K}\alpha 1} = 1,5406 \text{ \AA}$ y $\lambda_{\text{K}\alpha 2} = 1,5444 \text{ \AA}$) con un ánodo de cobre (Cu) en pasos de $0,02626^\circ$ en el rango de 2θ ($5-80^\circ$).

Se realizan dos mediciones sobre la superficie de la primera capa impresa de las muestras, una de ellas a una temperatura de $180 \text{ }^\circ\text{C}$ y otra a $260 \text{ }^\circ\text{C}$, con el fin de

determinar si tras la impresión, las piezas presentan algún grado de cristalinidad. La **Figura 62**, muestra los difractogramas obtenidos tras el análisis XRD de las muestras de PLA tras su fabricación a 180 °C y 260 °C.

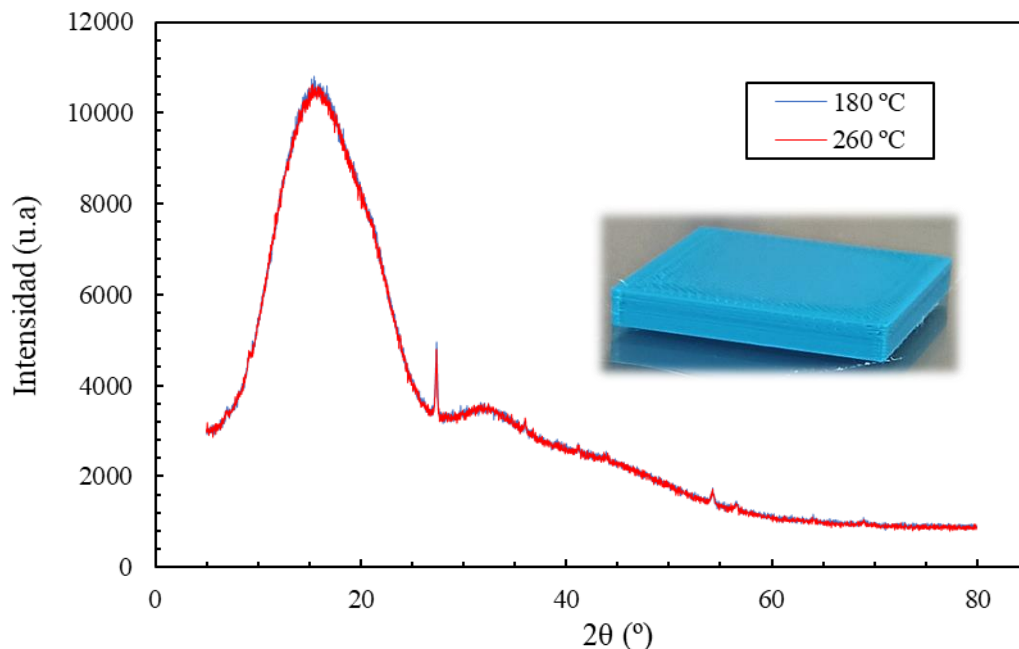


Figura 62. Difractogramas obtenidos tras el análisis XRD.

Como puede observarse, en ambas muestras está presente una banda ancha similar, típica de las estructuras amorfas sin orden de largo alcance. Este mismo resultado es identificado por F. Alam *et al.* [49] y Merino *et al.* [50] en sus estudios. Por otra parte, aproximadamente a 27° se observa un pico, aunque sin presentar orden de largo alcance, que puede representar la existencia de cristalinidad. Este mismo efecto es observado por B. Wittbrodt y J.M. Pearce [51], quienes establecen que esta anomalía puede ser debida a la presencia de algún aditivo incorporado al material. Finalmente, se concluye que la mayoría de la estructura interna de las piezas es amorfa y que no se observan cambios estructurales tras la impresión a diferentes temperaturas.

7.2 Ensayos de tracción

A continuación, se muestran los resultados obtenidos tras los ensayos de tracción. La velocidad del ensayo se mantiene constante con un valor de 1 mm/min. Los valores obtenidos de RT, módulo de elasticidad y límite elástico se calculan con 3 cifras

significativas, mientras que los valores de deformación se muestran con 2 cifras significativas.

7.2.1 Dirección del eje X

Los ensayos de tracción realizados para las probetas impresas en la dirección del eje X, se muestran de manera representativa en la **Figura 63**. En el Anexo III, se muestra en profundidad, las representaciones gráficas de tensión frente a la deformación para cada serie de ensayo.

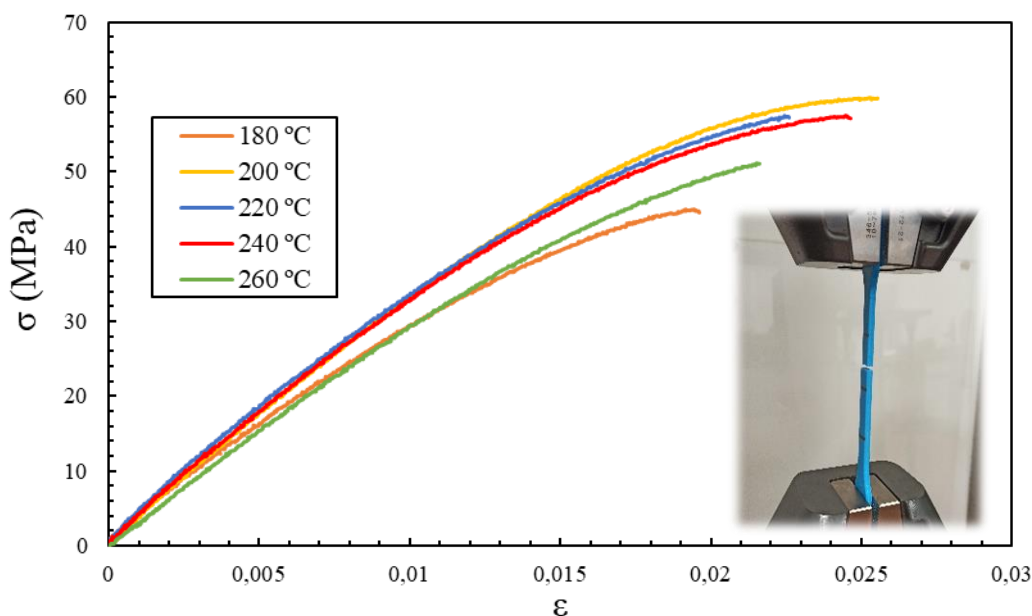


Figura 63. Curva esfuerzo/deformación representativa del ensayo de tracción en el eje X.

Como puede observarse en la **Figura 63**, inicialmente las curvas presentan una respuesta lineal hasta el valor del límite elástico (35-45 MPa). Posteriormente, tras la zona elástica, se puede apreciar la región plástica en la que las deformaciones producidas en las probetas son de carácter permanente. Finalmente, se produce la rotura totalmente frágil de la probeta en valores bajos de deformación, sin presentar zona de fluencia (ver la **Figura 63**) ni zona de estricción, como se puede apreciar en las imágenes de la **Figura 64**.

En los Anexos VI y VII, se muestran más imágenes de la rotura experimentada por las probetas de todas las series ensayadas. Muy pocas muestras rompen en la zona del extensómetro, generándose la mayor parte de dichas roturas fuera de esta zona. Esto puede ser debido a la concentración de tensiones en las regiones del cambio de geometría,

Análisis de resultados

como indica Tymrak *et al.* [52] en su estudio. No obstante, todas las probetas rompen dentro de la zona de menor sección (W), por lo que son incluidas en los estudios realizados.

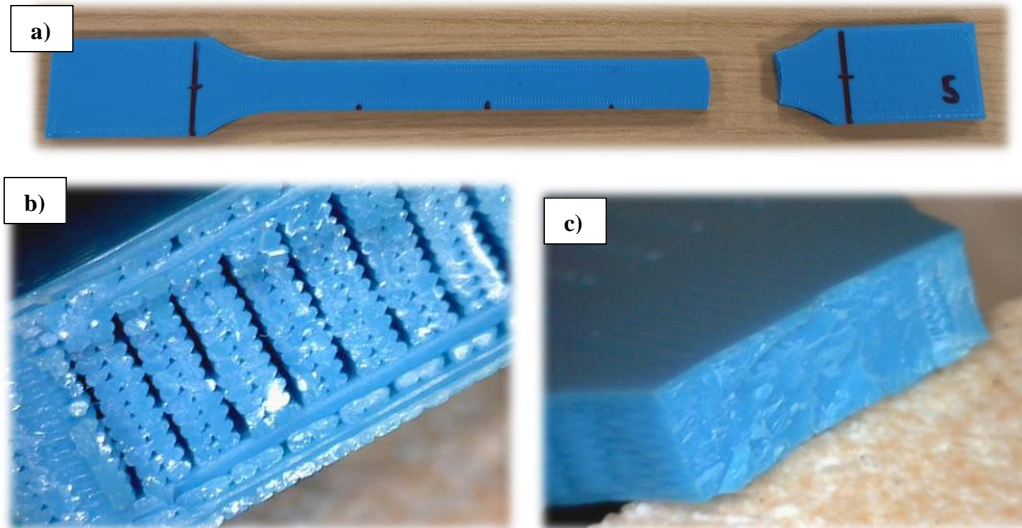


Figura 64. a) Imagen después del ensayo de tracción de una probeta impresa a 220 °C, b) fotografía realizada tras el ensayo de tracción, con un microscopio digital, a una muestra impresa a 180 °C y c) fotografía realizada tras el ensayo de tracción, con un microscopio digital, a una muestra impresa a 260 °C. Se aprecia claramente el efecto del air gap positivo en la pieza impresa a la temperatura de 180 °C.

En la **Figura 65**, se representan los valores promedio calculados de la RT para cada temperatura de impresión.

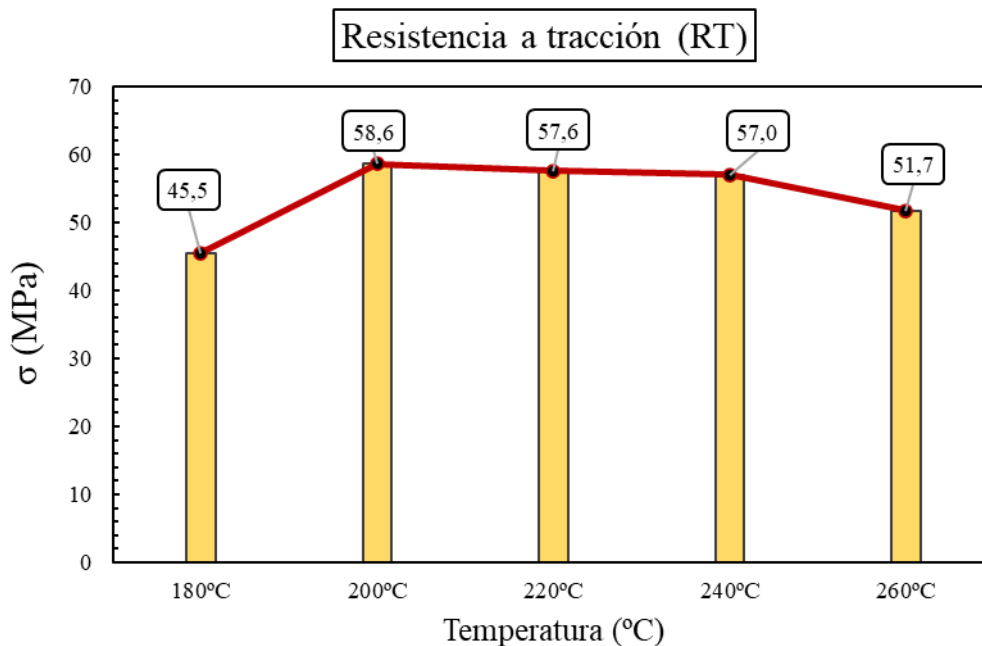


Figura 65. Gráfico comparativo de la influencia de la temperatura sobre la RT (eje X).

Todos los valores que se obtienen para la resistencia a la tracción se encuentran en el intervalo especificado por Chacón *et al.* [53], quienes establecen los valores típicos de las propiedades mecánicas de tracción para piezas de PLA fabricadas mediante FDM (15,75-72,2 MPa). En dicho estudio, se utiliza un filamento *Smartfil* similar al empleado en el presente proyecto, obtenido por el mismo fabricante [27].

A la temperatura de impresión de 180 °C, se encuentra el valor más bajo obtenido (45,5 MPa), mientras que en 200 °C se tiene el valor más alto (58,6 MPa), observando una diferencia de aproximadamente 13 MPa. A partir de 200 °C, la resistencia a tracción comienza a descender ligeramente hasta los 260 °C (alcanzando un valor de 51,7 MPa), comportándose de este modo como piezas más frágiles con el incremento de la temperatura. Este último razonamiento también es observado por Miranda *et al.* [54] en su estudio, en el que a medida que se eleva la temperatura de impresión, la adhesión de las capas aumenta, pero las piezas son más frágiles. Los valores de RT desde 200 °C hasta 240 °C, no difieren en gran magnitud como le ocurre a CNC Kitchen [55]. Sin embargo, a la temperatura de 260 °C, se experimenta un descenso notable que puede ser debido a la mala adherencia de las capas por un exceso de material.

Del mismo modo, Yang [25] demuestra en su investigación utilizando un PLA reforzado con fibras de madera que, a partir de un cierto valor de temperatura (200 °C), la resistencia a tracción comienza a descender. En cuanto a la comparación con el valor establecido por el fabricante [27] (50 MPa), por lo general, los resultados se aproximan en gran medida. No obstante, se desconocen las condiciones y parámetros fijados para la impresión de las piezas ensayadas por el fabricante, por lo que la comparación es de carácter cualitativo y se debe tomar solo como referencia.

La gran desigualdad establecida con el valor de RT para la temperatura de 180 °C (45,5 MPa) con los demás, puede ser debido al efecto del air gap positivo que presentan las piezas tras la impresión, actuando así como muestras con menor porcentaje de relleno y, por lo tanto, con peores propiedades mecánicas (ver la **Figura 64**).

En la **Figura 66**, se representan los valores promedio calculados del módulo de elasticidad para cada temperatura de impresión. La obtención de su valor, se realiza a partir de la gráfica de tensión frente a la deformación mediante un ajuste de mínimos cuadrados en la zona elástica, según se ha descrito en el apartado **6.2**. De esta manera, el

valor de la pendiente obtenido tras el ajuste corresponde al módulo de Young. En el Anexo III, se muestran con mayor detalle, las rectas de regresión lineal obtenidas para el cálculo del módulo elástico.

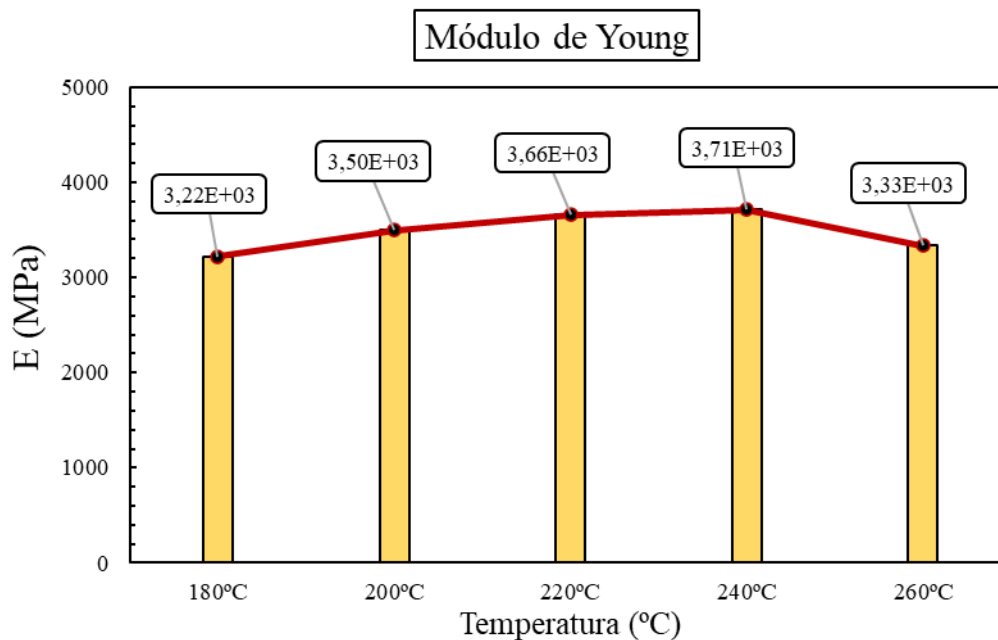


Figura 66. Gráfico comparativo de la influencia de la temperatura sobre el módulo de elasticidad a tracción (eje X).

Los valores promedio del módulo de elasticidad a tracción, muestran la misma tendencia ascendente observada por Behzadnasab y Yousefi [3] en su estudio, desde la temperatura de impresión de 180 °C hasta 240 °C. Se observa que a partir de esta última temperatura, el valor módulo de elasticidad comienza a decrecer hasta 260 °C. El valor promedio más bajo obtenido es aproximadamente 3220 MPa, que corresponde con la temperatura de 180 °C, mientras que el valor máximo se encuentra aproximadamente en 3710 MPa, a la temperatura de 240 °C. No obstante, teniendo en cuenta las desviaciones estándar presentadas en la **Tabla 13**, se obtiene un intervalo de estudio para el módulo de Young desde 3100 MPa hasta 3940 MPa. Este intervalo experimentado, es más amplio que el establecido por Chacón *et al.* [53] en su estudio (2020-3550 MPa) y por A. Del Médico [46] en su Trabajo de Fin de Grado (3450-3830 MPa). Finalmente, cabe destacar que, a la temperatura de 200 °C se reproduce el valor proporcionado por el fabricante [27] para el módulo de elasticidad a tracción (3500 MPa).

Debido a que las curvas no presentan zona de fluencia, se calcula el esfuerzo a un porcentaje de la deformación (0,2 %). En la **Figura 67**, se representan los valores

promedio obtenidos del límite elástico para cada temperatura de impresión. En el Anexo III, se muestran con mayor detalle, las gráficas realizadas para la obtención del valor del límite elástico.

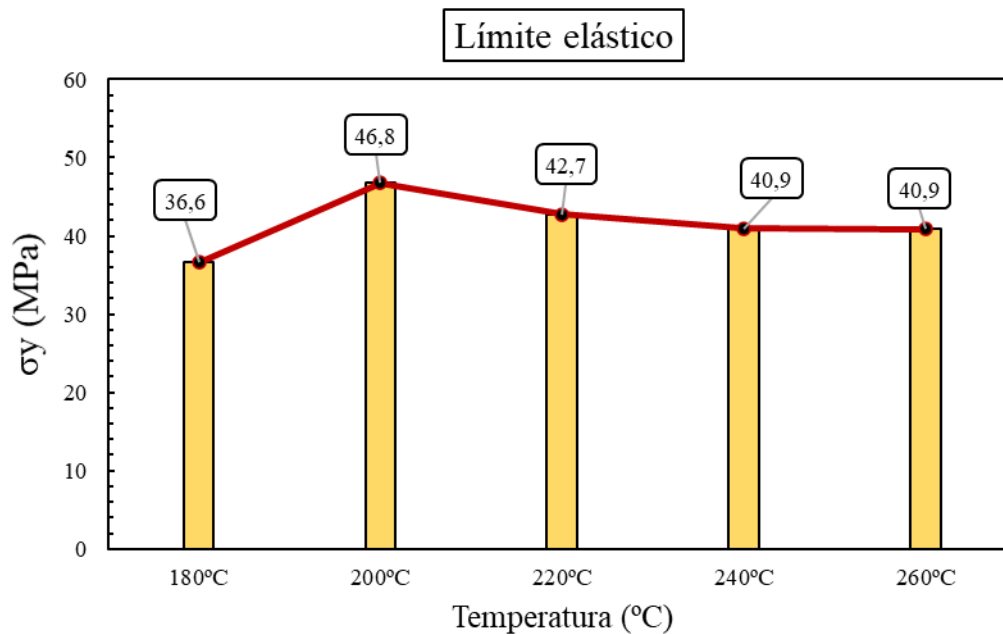


Figura 67. Gráfico comparativo de la influencia de la temperatura sobre el límite elástico (eje X).

Como puede observarse en la **Figura 67**, el valor promedio del límite elástico presenta la misma tendencia que la RT hasta la temperatura de 240 °C. No obstante, a partir de esta temperatura, el límite elástico no muestra ninguna diferencia significativa, manteniéndose constante. Nuevamente, a la temperatura de 180 °C se encuentra el valor promedio del límite elástico más bajo obtenido (36,6 MPa), mientras que en 200 °C se obtiene el valor más alto (46,8 MPa), observando una diferencia de aproximadamente 10 MPa. El fabricante [27] proporciona un valor del límite de fluencia del material (60 MPa), sin embargo por las razones mencionadas, esta propiedad mecánica no se obtiene y, por lo tanto, no se puede comparar.

En la **Figura 68**, se representan los valores promedio calculados de la deformación máxima a tracción. Los valores que se obtienen se encuentran dentro del intervalo establecido por Chacón *et al.* [53] (0,5-9,2 %). El valor promedio más bajo se presenta de nuevo a la temperatura de 180 °C (2 %), sin embargo, este se diferencia del valor promedio más alto en 5 décimas (2,5 %), mostrado a las temperaturas de 200 °C y 240 °C. Este hecho añadido a las desviaciones estándar presentadas en la **Tabla 13**, muestra que el resultado de la deformación máxima no es un valor representativo del que obtener

conclusiones. Esto es observado por Behzadnasab y Yousefi [3], A. Del Médico [46] y Tymrak *et al.* [52] al analizar las deformaciones.

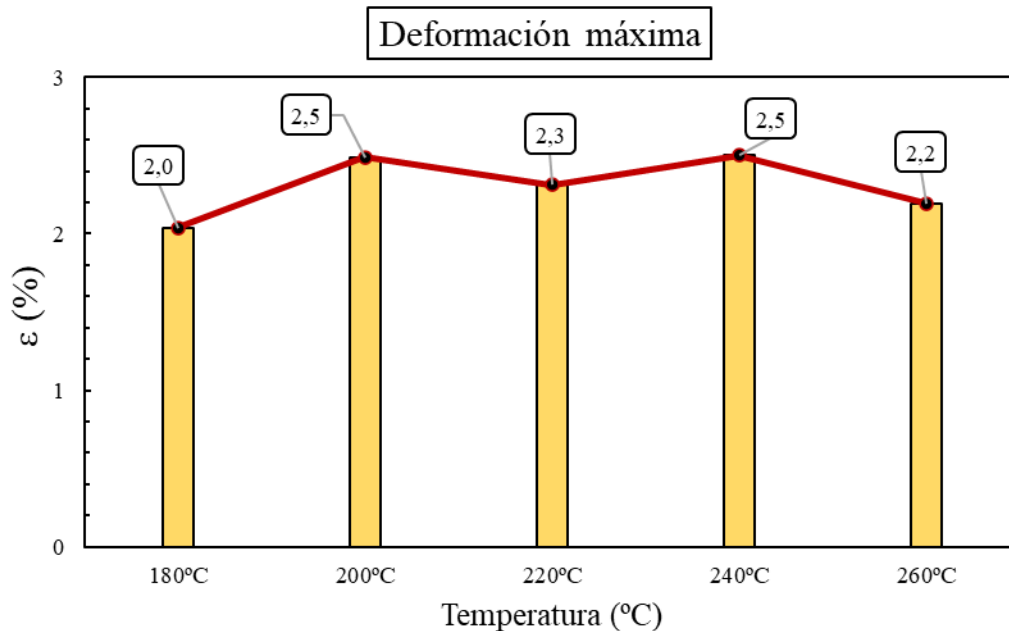


Figura 68. Gráfico comparativo de la influencia de la temperatura sobre la deformación máxima alcanzada (eje X).

Por lo tanto, se establece que al aumentar la temperatura de impresión los resultados son insignificantes en la deformación, por lo que esta propiedad mecánica no se ve afectada por la temperatura a la que se imprimen las probetas. Finalmente, como resumen de los valores obtenidos, la **Tabla 13** muestra los resultados con las desviaciones estándar calculadas y con las condiciones atmosféricas medidas.

Tabla 13. Resultados del ensayo de tracción (eje X) junto con las condiciones atmosféricas.

	180 °C	200 °C	220 °C	240 °C	260 °C
RT (MPa)	45,5 ± 2,2	58,7 ± 1,8	57,6 ± 2,2	57,0 ± 1,9	51,7 ± 1,7
E_t (MPa)	3,22 · 10 ³ ± 0,12 · 10 ³	3,50 · 10 ³ ± 0,01 · 10 ³	3,66 · 10 ³ ± 0,28 · 10 ³	3,71 · 10 ³ ± 0,16 · 10 ³	3,33 · 10 ³ ± 0,12 · 10 ³
σ_y (MPa)	36,6 ± 0,9	46,8 ± 2,3	42,7 ± 2,3	40,9 ± 3,0	40,9 ± 1,9
ε_{máx} (%)	2,0 ± 0,22	2,5 ± 0,3	2,3 ± 0,2	2,5 ± 0,3	2,2 ± 0,2
T (°C)	18,1	17,9	17,6	17,7	17,1
HR (%)	66,3	61,7	61,0	60,0	72,1

7.2.2 Dirección del eje Z

Los ensayos de tracción realizados para las probetas impresas en la dirección del eje Z, se muestran de manera representativa en la **Figura 69**. En el Anexo III, se muestra en profundidad, los diagramas de esfuerzo frente a la deformación para cada serie de ensayo.

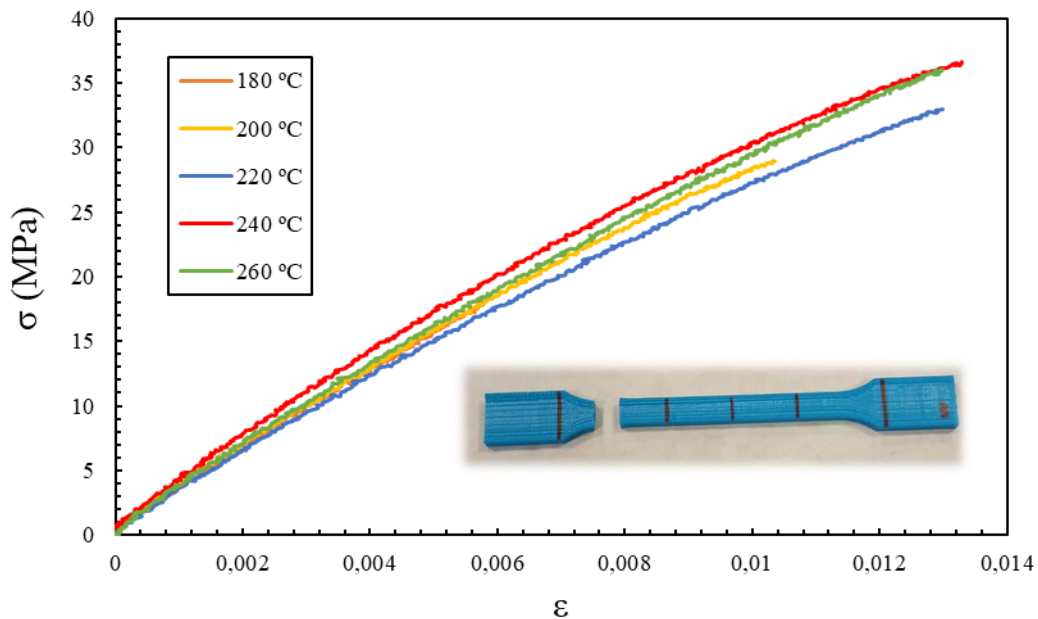


Figura 69. Gráfica de esfuerzo/deformación representativa del ensayo de tracción en el eje Z. A 180 °C, la curva no se manifiesta ya que queda superpuesta por las demás temperaturas de impresión.

Como puede observarse en la **Figura 69**, inicialmente las curvas presentan una respuesta lineal, sin embargo, el valor del límite elástico no se puede establecer del mismo modo que en la anterior dirección de impresión. Esto es debido a que la obtención del valor del límite elástico, calculado como el valor del esfuerzo al 0,2 % de la deformación, no proporciona ningún resultado de tensión, al no cortar con la gráfica de esfuerzo/deformación.

La curva se introduce en la región plástica perdiendo el comportamiento elástico del material y finalmente, se produce la rotura totalmente frágil de la probeta con valores más bajos de deformación que en la anterior dirección de impresión. Esta rotura, no presenta zona de fluencia (ver la **Figura 69**) ni zona de estricción, como se puede apreciar en las imágenes de la **Figura 70**.

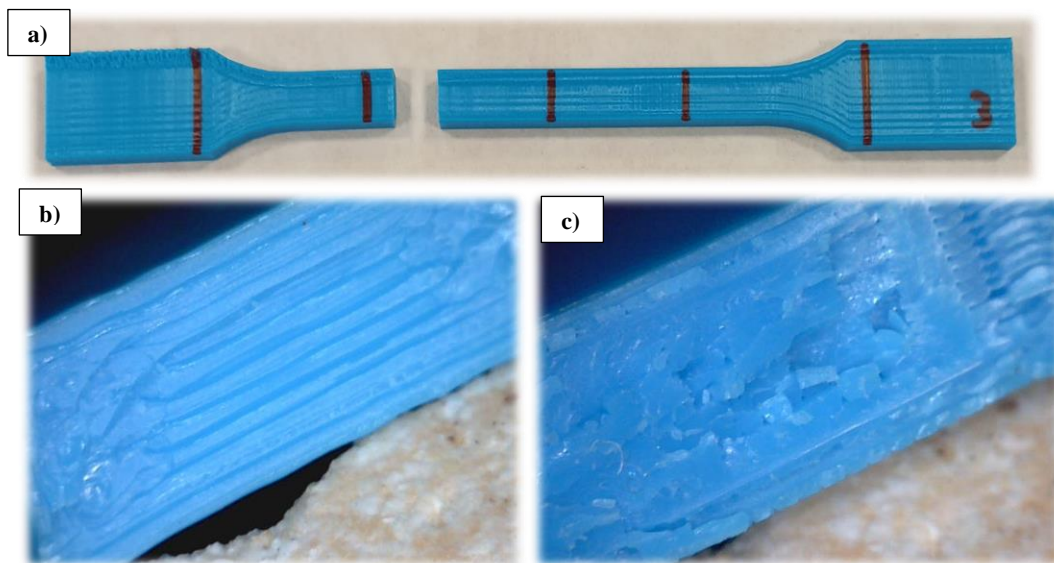


Figura 70. a) Fractura de una probeta impresa a 200 °C, b) fotografía realizada tras la rotura, con un microscopio digital, a una muestra impresa a 200 °C en la dirección del eje Z y c) fotografía realizada tras la rotura, con un microscopio digital, a una muestra impresa a 200 °C en la dirección del eje X.

Como se observa en la **Figura 70**, la fractura se produce de forma diferente en ambas direcciones de impresión. J.R.C. Dizon *et al.* [56] y Song *et al.* [57], presentan en sus estudios, un comportamiento similar para probetas impresas con diferentes ángulos de deposición (0° y 90°). La fractura de las probetas impresas en la dirección del eje X (0° en los estudios), depende de la carga de tracción soportada por los filamentos de PLA. Por otro lado, la fractura de las probetas impresas en la dirección del eje Z (90° en los estudios), depende de la mejor o peor adhesión de las capas. Estas imágenes sirven de apoyo a la gráfica de esfuerzo frente a la deformación, en donde la fractura es completamente frágil sin observar ningún encuellamiento. En los Anexos VI y VII, se muestran más imágenes de la rotura experimentada por todas las probetas. Cabe destacar que, del mismo modo que en la anterior dirección de impresión, muy pocas probetas rompen en la zona del extensómetro, generándose la mayor parte de dichas roturas fuera de esa zona.

En la **Figura 71**, se representan los valores promedio calculados de la RT para cada temperatura de impresión. De manera similar, los valores obtenidos para la resistencia a la tracción se encuentran en el intervalo establecido por Chacón *et al.* [53]. Sin embargo, estos muestran una diferencia significativa del orden del 64 % por debajo, respecto a la anterior dirección de impresión. Esto ya es investigado por otros autores como Raut *et al.*

[57], quienes estudiaron el efecto de la orientación de impresión en las propiedades mecánicas de piezas fabricadas mediante FDM.

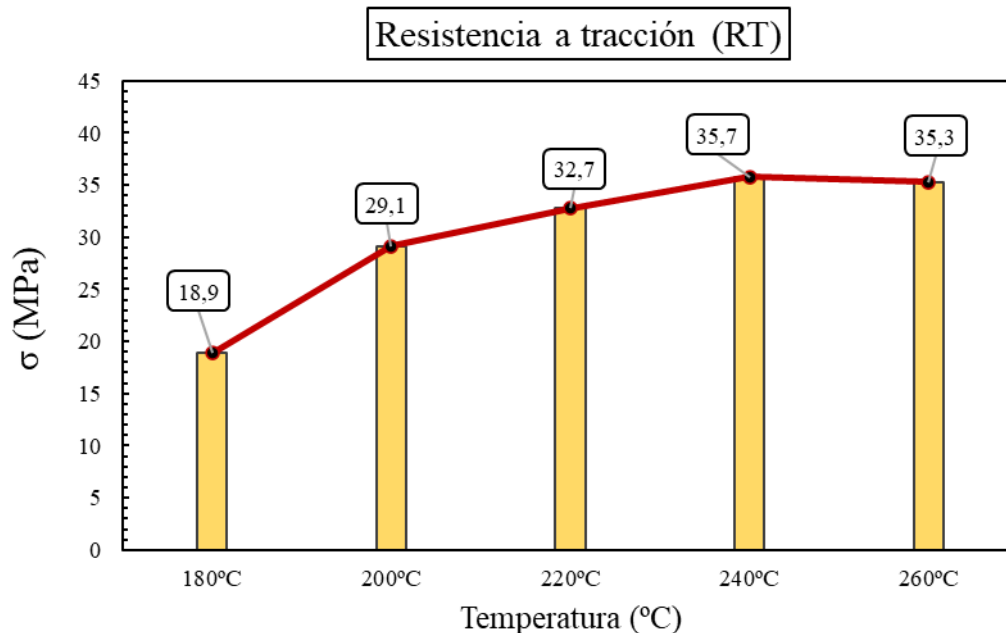


Figura 71. Gráfico comparativo de la influencia de la temperatura sobre la RT (eje Z).

Se observa en la **Figura 71**, que la influencia de la temperatura de impresión sobre la RT es distinta respecto a la anterior dirección de impresión, presentando una tendencia ascendente con el incremento de la temperatura hasta 240 °C. Esto indica que la adhesión de las capas mejora con el aumento de la temperatura de impresión, como muestran Behzadnasab y Yousefi [3] en su estudio y CNC Kitchen [54] en su análisis. A partir de 240 °C, la RT comienza a descender muy ligeramente hasta los 260 °C, aunque considerando las desviaciones estándar calculadas en la **Tabla 14**, se puede establecer insignificante el efecto de la temperatura sobre la RT en este intervalo.

Del mismo modo, se observa que a la temperatura de 180 °C se obtiene la mayor diferencia con respecto a las demás temperaturas, por lo que es la menos indicada para fabricar piezas destinadas a tracción. En ella, se presenta el valor más bajo obtenido (18,9 MPa), mientras que en 240 °C se encuentra el valor más alto (35,7 MPa).

En la **Figura 72**, se representan los valores promedio calculados del módulo de elasticidad a tracción para cada temperatura. En el Anexo III, se muestra con mayor detalle, el ajuste por mínimos cuadrados para la determinación del módulo elástico.

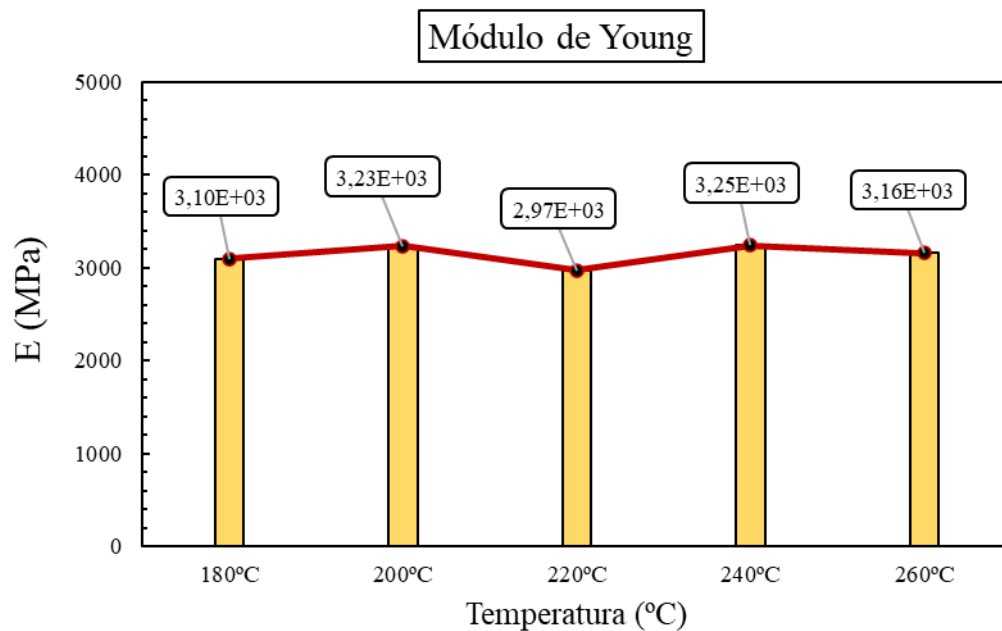


Figura 72. . Gráfico comparativo de la influencia de la temperatura sobre el módulo de elasticidad a tracción (eje Z).

Los valores del módulo de elasticidad a tracción no presentan una tendencia clara. No obstante, se puede observar un patrón en donde las temperaturas extremas (180 °C y 260 °C) presentan un módulo de elasticidad aproximado a 3100 MPa, las temperaturas intermedias (200 °C y 240 °C) muestran un módulo aproximado de 3200 MPa y la temperatura media del intervalo (220 °C) presenta el valor más bajo obtenido con 2900 MPa.

Por otro lado, el valor promedio más alto que se obtiene es de 3250 MPa a la temperatura de 240 °C. Sin embargo, teniendo en cuenta las desviaciones estándar presentadas en la **Tabla 14**, se obtiene un intervalo de estudio para el módulo de Young desde 2800 MPa hasta 3360 MPa. De esta manera, el intervalo experimentado en esta sección para los valores del módulo de Young, es inferior al establecido por Chacón *et al.* [53] en su estudio y A. Del Médico [46] en su Trabajo de Fin de Grado.

Como se puede observar, en esta dirección de impresión los valores obtenidos para el módulo de elasticidad son inferiores a la anterior dirección (3100-3940 MPa). Por esta razón, se puede considerar que el efecto de la temperatura en el valor del módulo de elasticidad a tracción, presenta un mayor efecto en la dirección de impresión del eje X. Esto puede estar relacionado con el efecto de la elasticidad de la fibras de PLA y la

adhesión entre ellas, para la impresión en el eje X. En cambio, para la dirección de impresión en el eje Z, al producirse el despegue de las capas el valor del módulo elástico no se ve tan afectado.

En la **Figura 73**, se representan los valores promedio calculados de la deformación máxima a tracción. Del mismo modo que en la anterior dirección de impresión, los valores que se obtienen se encuentran dentro del intervalo establecido por Chacón *et al.* [53]. El valor promedio más bajo se presenta de nuevo a la temperatura de 180 °C (0,6 %), mientras que el valor más alto se obtiene a 240 °C (1,4 %).

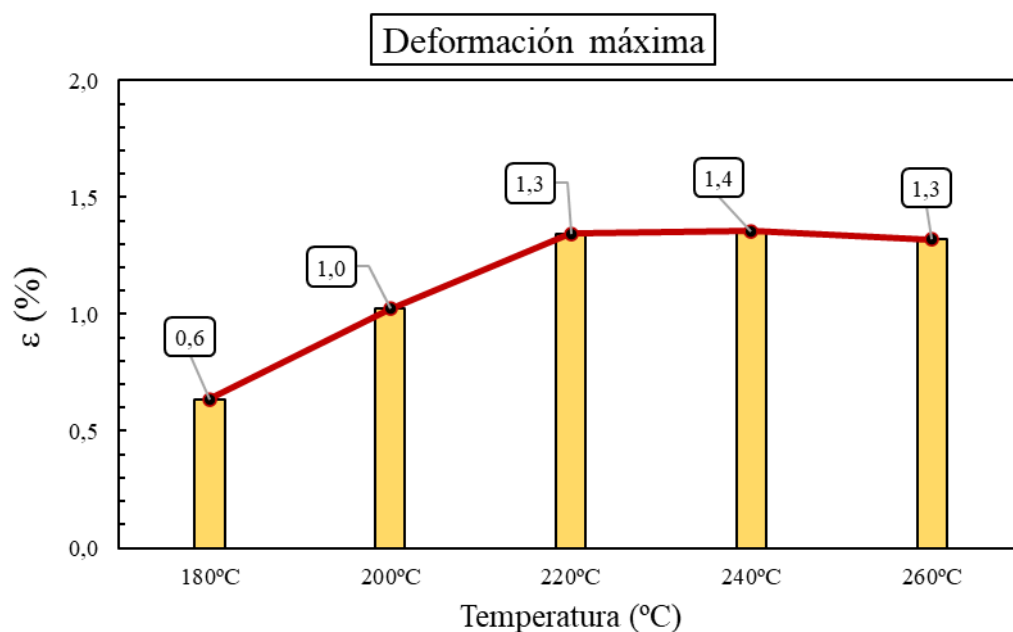


Figura 73. Gráfico comparativo de la influencia de la temperatura sobre la deformación máxima alcanzada (eje Z).

Los resultados muestran una tendencia ascendente de los valores promedio de deformación desde 180 °C hasta 220 °C. Sin embargo, a partir de este valor hasta la temperatura de 260 °C, las diferencias que se observan son insignificantes. Cabe destacar que, las deformaciones experimentadas en esta dirección de impresión presentan valores más bajos que en la anterior dirección.

Finalmente, como resumen de los valores obtenidos, la **Tabla 14** muestra los resultados con las desviaciones estándar calculadas y con las condiciones atmosféricas medidas.

Tabla 14. Resultados del ensayo de tracción (eje Z) junto con las condiciones atmosféricas.

	180 °C	200 °C	220 °C	240 °C	260 °C
RT (MPa)	18,9 ± 1,9	29,1 ± 0,8	32,7 ± 1,7	35,7 ± 1,7	35,3 ± 2,9
E_t (MPa)	3,10 · 10 ³ ± 0,09 · 10 ³	3,23 · 10 ³ ± 0,10 · 10 ³	2,97 · 10 ³ ± 0,17 · 10 ³	3,25 · 10 ³ ± 0,11 · 10 ³	3,16 · 10 ³ ± 0,12 · 10 ³
ε_{máx} (%)	0,6 ± 0,1	1,0 ± 0,1	1,3 ± 0,1	1,4 ± 0,1	1,3 ± 0,1
T (°C)	20,3	19,2	20,2	20,3	19,1
HR (%)	66,0	65,5	68,4	67,8	64,8

7.3 Ensayos de compresión

A continuación, se muestran los resultados obtenidos tras los ensayos de compresión. La velocidad del ensayo se mantiene constante con un valor de 1 mm/min. Los valores obtenidos del módulo de elasticidad a compresión y el límite de fluencia se calculan con 3 cifras significativas. La **Figura 74** muestra la secuencia del ensayo realizado.

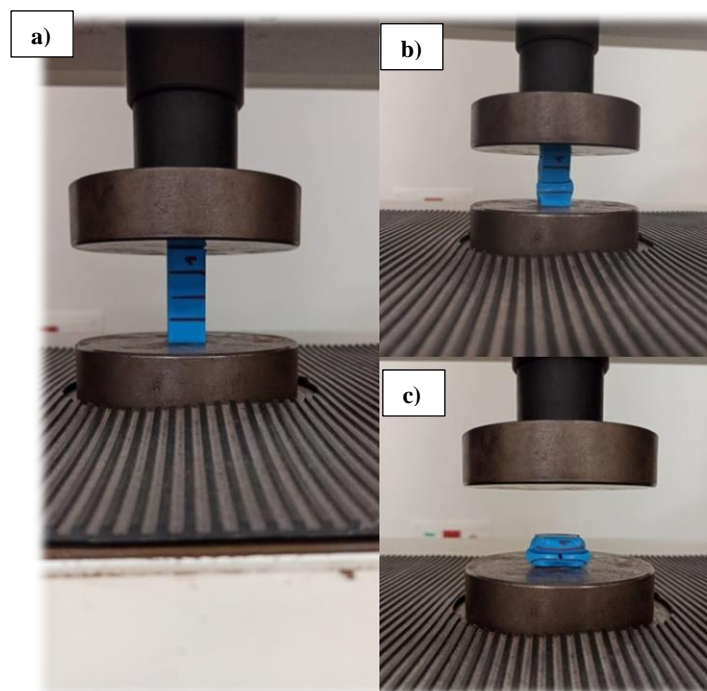


Figura 74. Secuencia del ensayo de compresión. a) Antes del ensayo, b) durante el ensayo y c) después del ensayo.

Los ensayos de compresión realizados para las probetas impresas se muestran de manera representativa en la **Figura 75**. En el Anexo III, se presentan en profundidad, las gráficas de tensión frente a la deformación para cada serie de ensayo.

Análisis de resultados

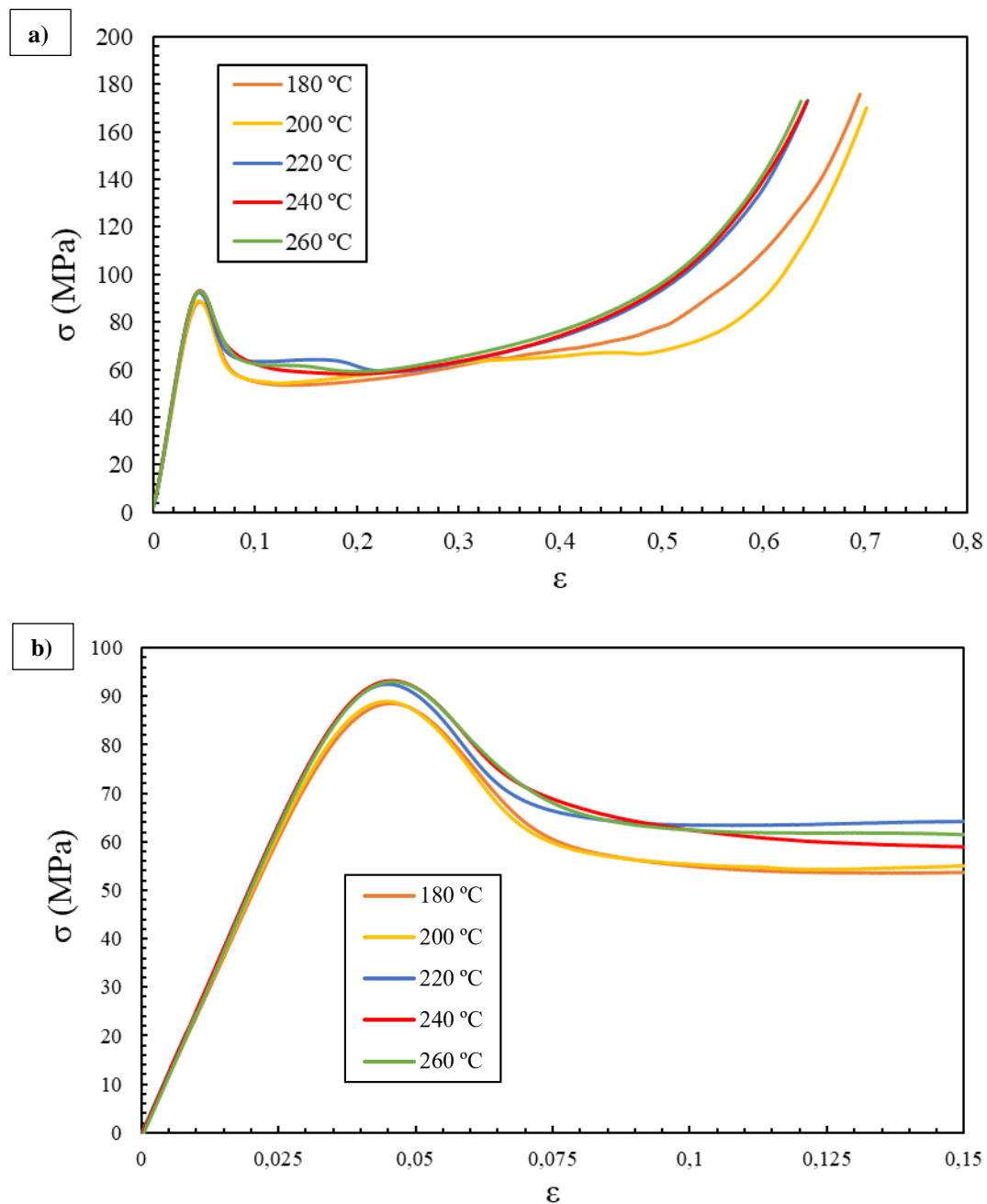


Figura 75. a) Gráfica de esfuerzo/deformación representativa del ensayo de compresión y b) zoom sobre la zona elástica de la curva de esfuerzo/deformación.

Como se puede observar en la **Figura 75**, inicialmente las curvas presentan una respuesta lineal hasta el valor del límite elástico a compresión (79-85 MPa). Posteriormente, se introducen en la región plástica perdiendo el comportamiento elástico del material, observándose una zona de fluencia. Seguidamente, el esfuerzo necesario para seguir aumentando la deformación se incrementa, generándose un endurecimiento por deformación, encontrándose aquí el esfuerzo máximo. Finalmente, el ensayo

concluye ya que, por cuestiones de seguridad, se impone un límite de carga para la máquina de ensayo de 45 KN y un límite de descenso para el puente de carga de 3 cm. Por esta razón, dentro de estos límites mencionados, la probeta de ensayo comienza a pandear (ver la **Figura 75**) llegando a aplastarse totalmente, pero sin llegar a la fractura total. En determinadas series de ensayo, aparecen algunas grietas sobre las caras del prisma como muestra la **Figura 76**. En ella, se observa un despegue de los filamentos que conforman la pieza. En los Anexos VI y VII, se muestran más imágenes tras el ensayo de compresión de todas las series de probetas ensayadas.

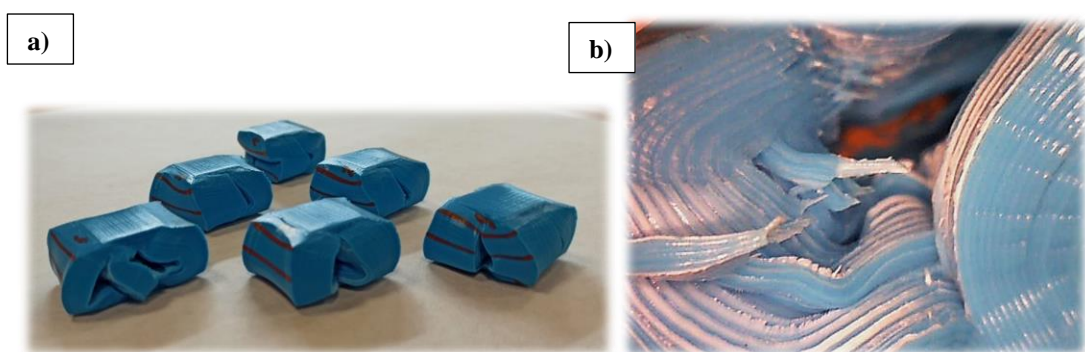


Figura 76. a) Imagen, tras el ensayo, de la serie de probetas impresas a 200 °C y b) fotografía realizada sobre las grietas, con un microscopio digital, a una muestra impresa a 200 °C.

Con los límites para el ensayo de compresión mencionados, se obtienen valores de resistencia a compresión de aproximadamente 173 MPa y valores de deformación entre el 60 y 70 % para todos los intervalos de temperatura. Estas mismas regiones sobre la curva de esfuerzo frente a la deformación, son identificadas por K. Balamurugan *et al.* [59], Rodrigues *et al.* [60] y Ciurana *et al.* [61] en sus estudios de compresión.

Cabe destacar que, los ensayos de compresión no se suelen estudiar con frecuencia. Durante la realización de este proyecto, apenas se han encontrado trabajos publicados de ensayos a compresión en piezas de PLA fabricadas por FDM. Además, el fabricante [27] no proporciona valores de parámetros para el ensayo de compresión con este material, por lo que los resultados del presente proyecto permiten ampliar el conocimiento en las propiedades mecánicas de este PLA.

En la **Figura 77**, se representan los valores promedio calculados del módulo de elasticidad a compresión para cada temperatura de impresión. En el Anexo III, se muestra

con mayor detalle, el ajuste por mínimos cuadrados para la determinación del módulo elástico.

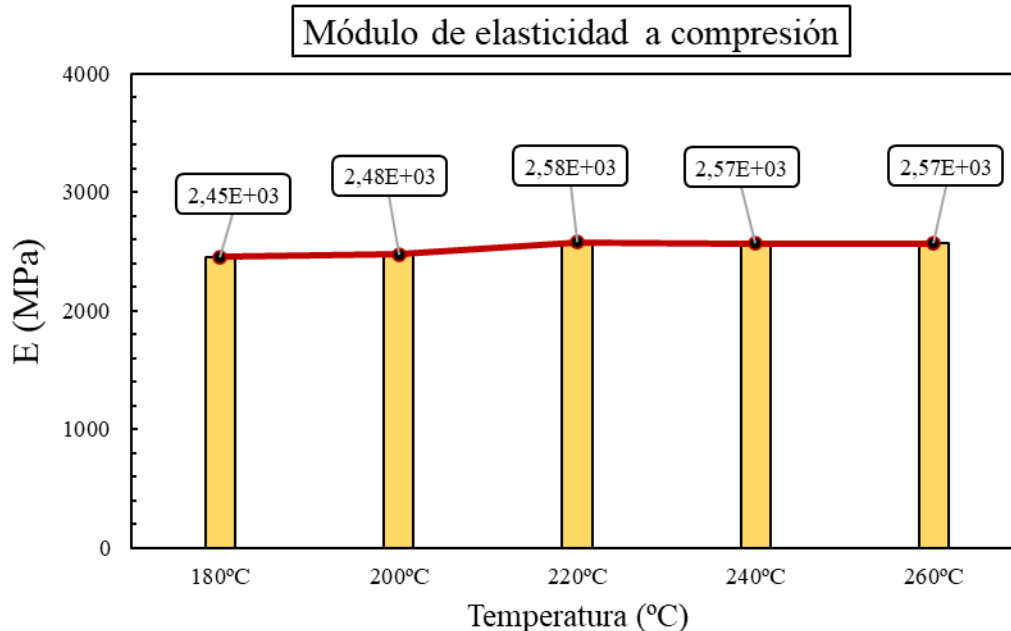


Figura 77. Gráfico comparativo de la influencia de la temperatura sobre el módulo de elasticidad a compresión.

Los valores del módulo de elasticidad a compresión presentan una tendencia ligeramente ascendente desde la temperatura de 180 °C hasta 220 °C. De manera que, a medida que aumenta la temperatura la adherencia de las capas es superior, incrementando el valor del módulo elástico. Sin embargo, a raíz de esta última temperatura hasta 260 °C, los valores del módulo de elasticidad a compresión no varían, manteniéndose constantes en el intervalo desde 2560 MPa hasta 2598 MPa.

De la literatura [49, 60, 61], se conoce que los valores del módulo de elasticidad a compresión suelen estar entre 230 MPa y 1140 MPa, para *scaffolds* destinados a aplicaciones biomédicas. Estas piezas no son completamente sólidas, presentando un porcentaje de relleno inferior a las probetas fabricadas en este proyecto. Por esta razón, estas últimas presentan mejores propiedades mecánicas. De manera similar, el valor promedio más bajo obtenido se encuentra a la temperatura de 180 °C (2450 MPa), mientras que el valor más alto se obtiene a 220 °C (2580 MPa).

En la **Figura 78**, se representan los valores promedio calculados del esfuerzo de fluencia a compresión para cada temperatura de impresión.

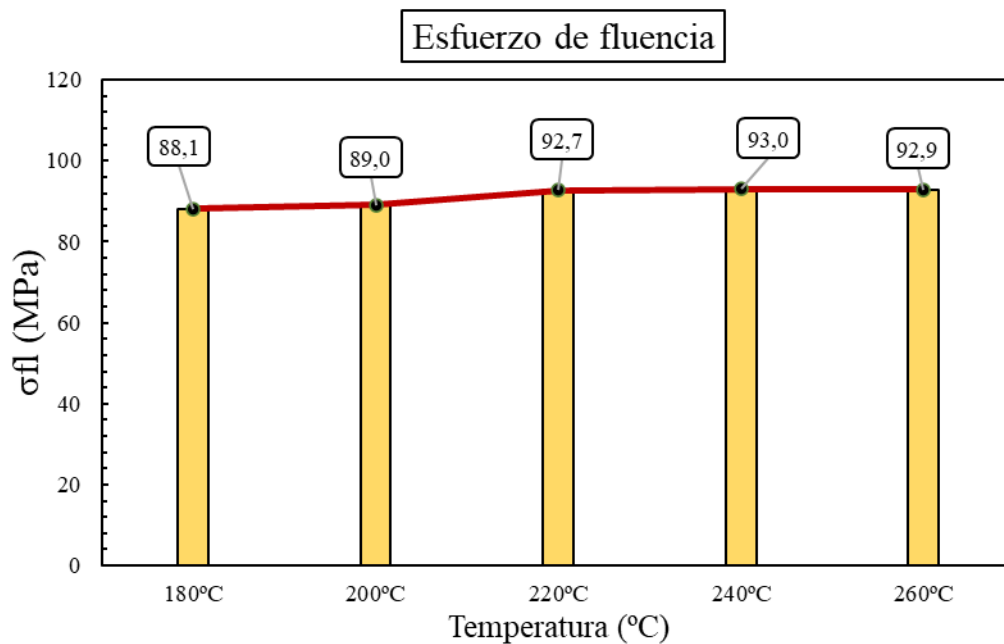


Figura 78. Gráfico comparativo de la influencia de la temperatura sobre el esfuerzo de fluencia a compresión.

De la misma manera que el módulo elástico, teniendo en cuenta las desviaciones estándar presentadas en la **Tabla 15**, los valores promedio de la tensión de fluencia presentan una tendencia ligeramente ascendente desde la temperatura de 180 °C hasta 220 °C. De un modo similar, a medida que aumenta la temperatura la adherencia de las capas es superior, incrementando el valor del esfuerzo de fluencia. Sin embargo, a raíz de esta última temperatura hasta 260 °C, los valores del esfuerzo de fluencia a compresión no varían, manteniéndose constantes en el intervalo desde 91,7 MPa hasta 93,7 MPa.

De la bibliografía [60, 62], se conoce que los valores del esfuerzo de fluencia a compresión para el PLA suelen estar entre 3,1 MPa y 40 MPa, en *scaffolds* fabricados para aplicaciones biomédicas. Asimismo, se obtienen mejores propiedades mecánicas para las piezas de este proyecto por las razones mencionadas anteriormente. Nuevamente, el valor promedio más bajo se encuentra a la temperatura de 180 °C (88,1 MPa), mientras que el valor promedio más alto se obtiene a 240 °C (93 MPa).

Finalmente, como resumen de los valores obtenidos, la **Tabla 15** muestra los resultados con las desviaciones estándar calculadas y con las condiciones atmosféricas medidas.

Tabla 15. Resultados del ensayo de compresión junto con las condiciones atmosféricas.

	180 °C	200 °C	220 °C	240 °C	260 °C
E_c (MPa)	2,45 · 10 ³ ± 0,02 · 10 ³	2,48 · 10 ³ ± 0,02 · 10 ³	2,58 · 10 ³ ± 0,02 · 10 ³	2,57 · 10 ³ ± 0,01 · 10 ³	2,57 · 10 ³ ± 0,01 · 10 ³
σ_n (MPa)	88,1 ± 0,5	89,0 ± 0,7	92,7 ± 1,0	93,0 ± 0,3	92,9 ± 0,3
T (°C)	17,9	18,4	17,7	17,7	18,0
HR (%)	63,0	62,0	55,0	42,3	57,7

7.4 Ensayos de flexión a tres puntos

A continuación, se presentan los resultados obtenidos tras los ensayos de flexión a tres puntos. La velocidad del ensayo se mantiene constante con un valor de 2 mm/min. Los valores obtenidos para el MOR y el módulo de elasticidad a flexión se calculan con 3 cifras significativas, mientras que los valores de desplazamiento y deformación máxima se obtienen con 2 cifras significativas. Por otro lado, la carga máxima se representa con 4 cifras significativas. La **Figura 79** muestra la secuencia del ensayo realizado.

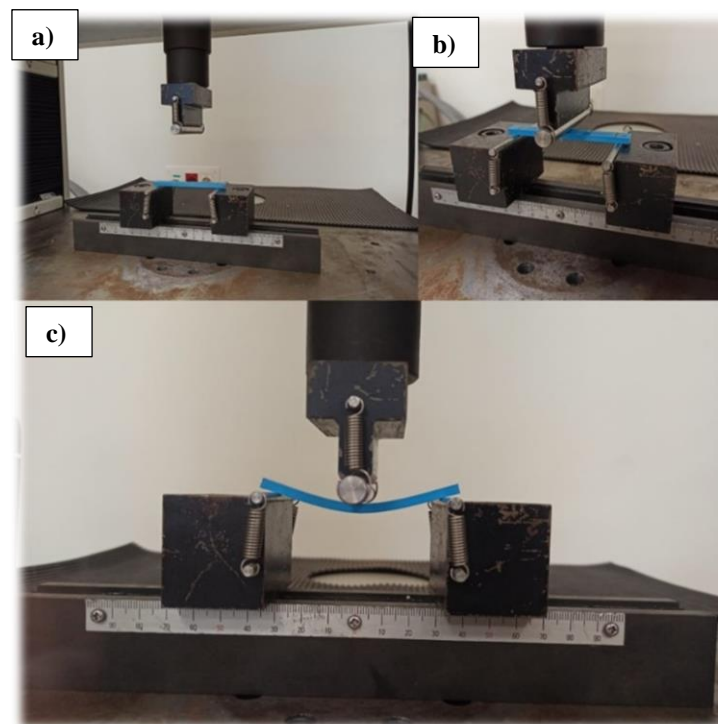


Figura 79. Secuencia del ensayo de flexión a tres puntos. a) Colocación de la probeta en los apoyos, b) acomodación del puente de carga sobre la superficie de la probeta y c) fotografía durante el ensayo.

Los ensayos de flexión realizados para las probetas impresas, se muestran de manera representativa en la **Figura 80**. En el Anexo III, se presenta de manera extensa, las gráficas de carga frente al desplazamiento experimentado para cada serie de ensayo.

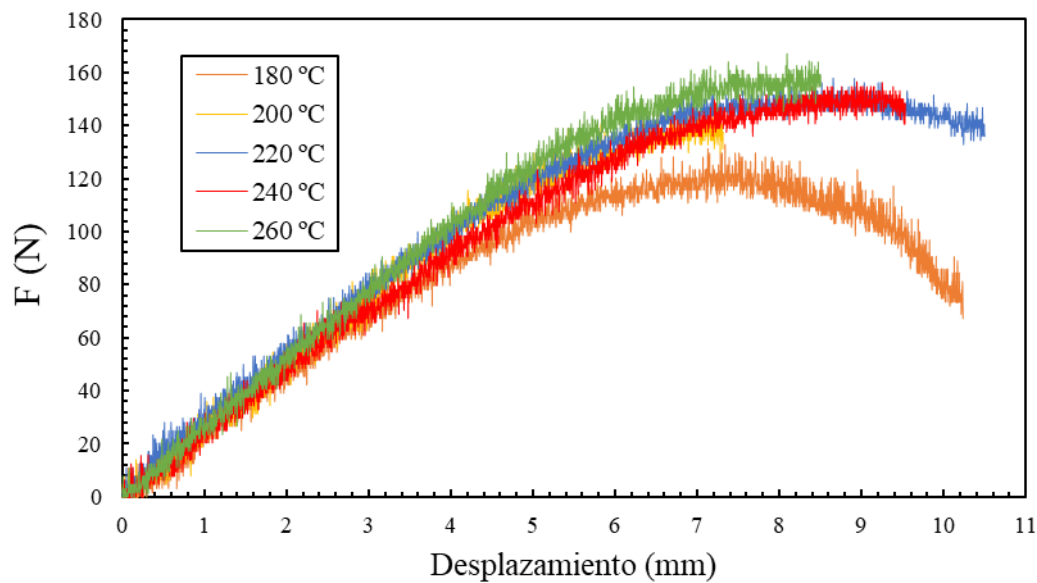


Figura 80. Curva carga/desplazamiento representativa del ensayo de flexión.

Como se puede observar en la **Figura 80**, las curvas presentan fluctuaciones de los valores de carga para un mismo valor de desplazamiento. Esto puede ser debido a una relación existente entre la naturaleza del ensayo y la pieza impresa, pudiendo generarse cambios estructurales o microrroturas no observables a simple vista. Este mismo efecto es observado por A. Del Médico [46] y por Arunkumar *et al.* [63] en sus ensayos de flexión.

Se puede observar que, inicialmente las curvas presentan una respuesta lineal, que corresponde con la zona elástica, hasta un valor de carga determinado. Posteriormente, se introducen en la región plástica a partir de la cual, las deformaciones que se producen en las piezas tienen un carácter permanente. Finalmente, se produce la rotura totalmente frágil de la probeta en valores de desplazamiento entre 7 y 11 mm.

La **Figura 81** sirve de apoyo a la gráfica de carga frente al desplazamiento, en donde la fractura comienza con pequeñas grietas hasta llegar a una rotura totalmente frágil de las piezas. El puente de carga aplica valores de fuerza sobre la superficie superior de la probeta someténdola a un esfuerzo de compresión, mientras que la superficie inferior de dicha probeta está sometida a un esfuerzo de tracción. Por otra parte, cabe destacar que, no todas las probetas presentan una rotura total, sino que algunas experimentan una mayor curvatura de las piezas donde solo se muestran las pequeñas grietas. En los Anexos VI y

Análisis de resultados

VII, se presentan de manera ampliada, las imágenes de las distintas probetas para cada serie de ensayo.



Figura 81. a) Imagen después del ensayo de flexión de una probeta impresa a 260 °C y b) fotografía realizada tras el ensayo de flexión, con un microscopio digital, a una muestra impresa a 260 °C.

En las **Figuras 82 y 83**, se representan los valores promedio calculados de la carga máxima y el MOR para cada temperatura de impresión. Ambos presentan una tendencia ascendente con el incremento de la temperatura, estableciendo como Balamurugan *et al.* [59], que al aumentar la temperatura de la boquilla de impresión la resistencia a la flexión también aumenta. Esto puede ser debido a una mejora de la adherencia de las capas por el efecto de la temperatura. Todos los valores que se obtienen para el MOR, se encuentran en el intervalo especificado por Chacón *et al.* [53], quienes establecen los valores típicos de las propiedades mecánicas a flexión para piezas de PLA fabricadas mediante FDM (52-115 MPa).

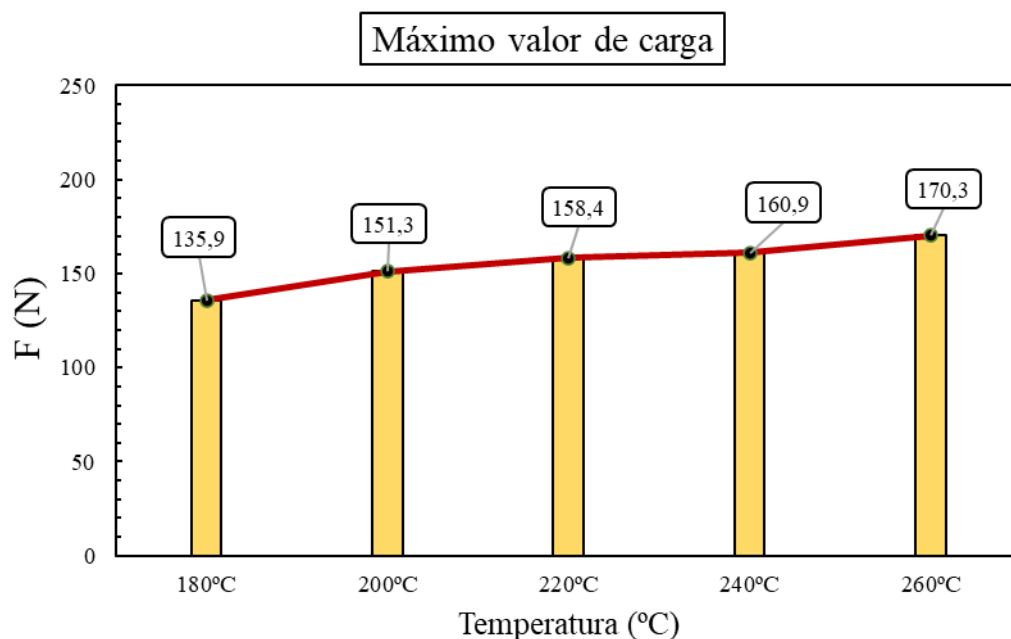


Figura 82. Gráfico comparativo de la influencia de la temperatura sobre la carga máxima.

A la temperatura de 180 °C, se presentan los valores promedio más bajos obtenidos para la carga máxima (135,9 N) y el MOR (80,2 MPa). Por otro lado, a la temperatura de 260 °C se encuentran los valores más altos para las propiedades mecánicas mencionadas (170,3 N y 92,8 MPa, respectivamente), observando una diferencia de aproximadamente 34,4 N para la carga máxima y 12,6 MPa para el MOR. En cuanto a la comparación con el valor establecido por el fabricante [27] para el MOR (83 MPa), por lo general, los resultados se aproximan en gran medida. No obstante, el valor promedio obtenido a la temperatura de 200 °C es el más cercano al ofrecido por el fabricante.

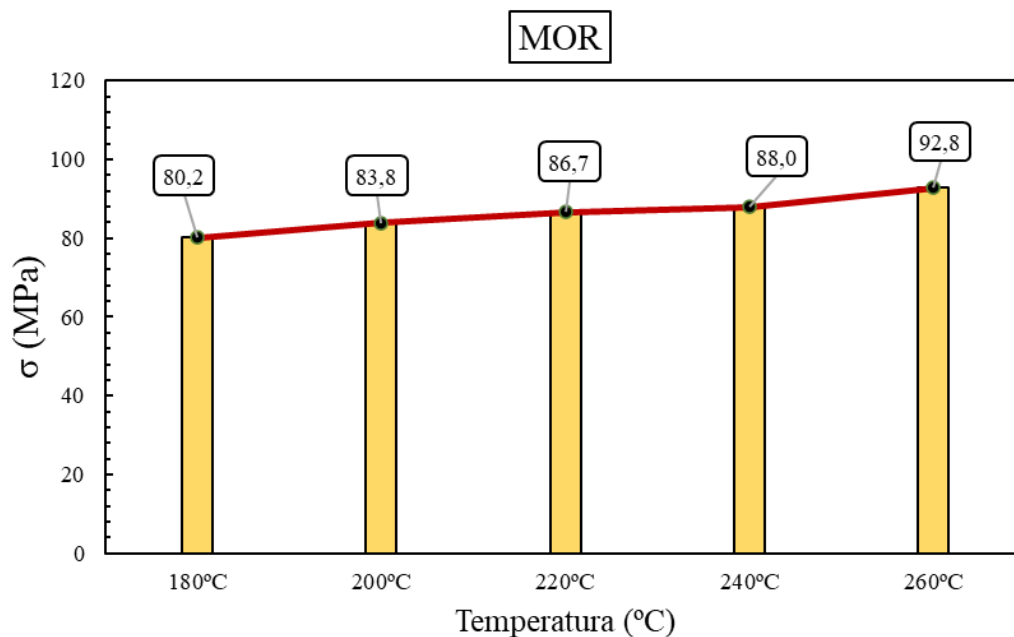


Figura 83. Gráfico comparativo de la influencia de la temperatura sobre el MOR.

En la **Figura 84**, se presentan los valores promedio calculados del módulo de elasticidad a flexión para cada temperatura de impresión. En el Anexo III, se muestran con mayor detalle, las rectas de regresión lineal obtenidas para el cálculo del módulo elástico.

Teniendo en cuenta las desviaciones estándar presentadas en la **Tabla 16**, los cambios de los valores del módulo de elasticidad a flexión se consideran insignificantes desde 180 °C hasta 220 °C con valores aproximados a 2450 MPa. No obstante, a partir de esta última temperatura, del mismo modo que le ocurre a Yang [25] (6,3 %), los valores comienzan a descender en torno al 5,3 % hasta 240 °C. Por otro lado, a partir de esta última

temperatura de impresión, los valores comienzan a aumentar de nuevo hasta 260 °C obteniendo un valor promedio de 2480 MPa a esta temperatura.

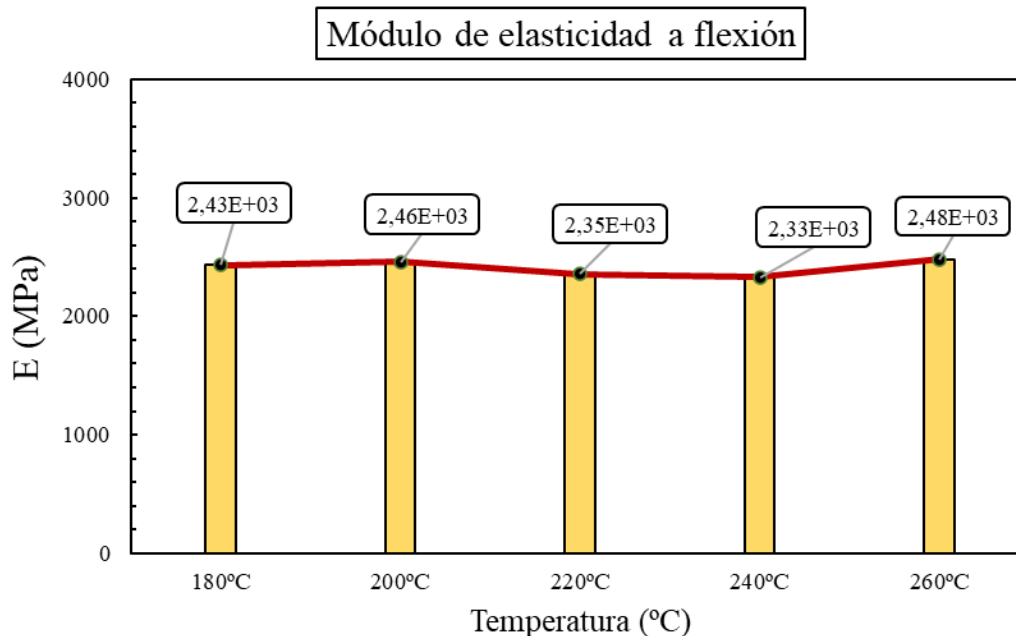


Figura 84. Gráfico comparativo de la influencia de la temperatura sobre el módulo de elasticidad.

La mayoría de los valores obtenidos en este proyecto para los resultados del módulo de elasticidad a flexión (2170-2600 MPa), se encuentran dentro del intervalo establecido por Chacón *et al.* [53] y por A. Del Médico [46] (2392-4930 MPa). En cuanto a la comparación con el valor establecido por el fabricante [27] (3800 MPa), los resultados obtenidos se diferencian en torno al 60 %. No obstante, se desconocen las condiciones y parámetros fijados para la impresión de las piezas ensayadas por el fabricante, por lo que la comparación es de carácter cualitativo y se debe tomar solo como referencia.

En las **Figura 85 y 86**, se presentan los valores promedio calculados del desplazamiento y la deformación máxima a flexión. Se puede observar que, a la temperatura de 180 °C, se obtienen valores promedio altos de desplazamiento (10,4 mm) y deformación (6 %). Esto puede ser debido a que las probetas no llegan a fracturarse totalmente a esta temperatura, sino que se doblan haciendo que el puente de carga descienda una mayor distancia (ver Anexo VI). Por otra parte, a la temperatura de 200 °C, se alcanzan los valores promedio más bajos de desplazamiento (7,4 mm) y deformación (4,4 %), en donde toda la serie de probetas impresas llegan a fracturarse totalmente (ver Anexo VI).

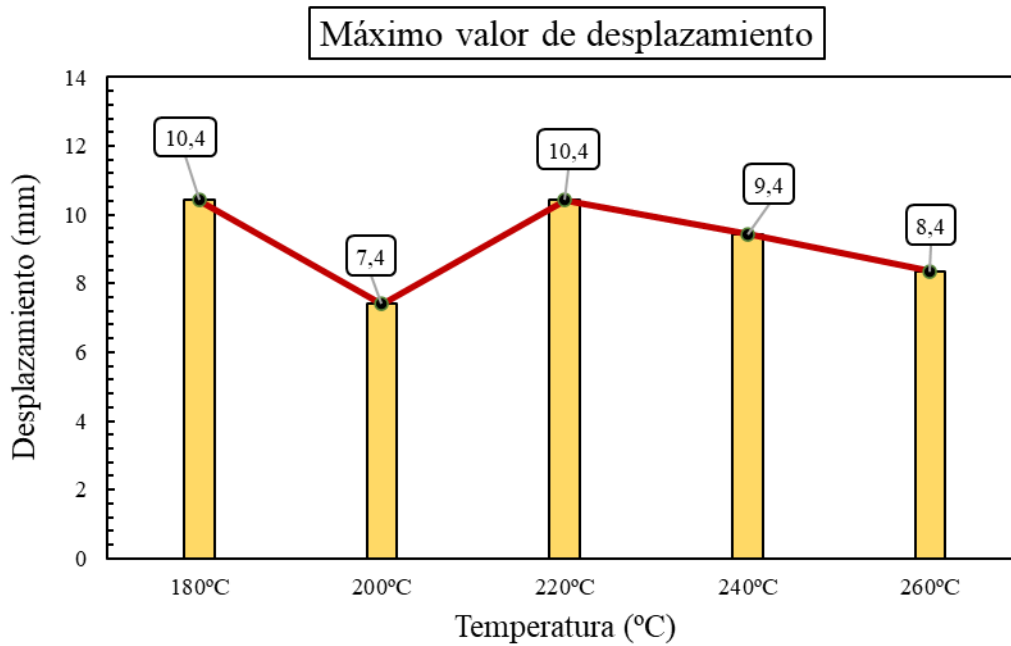


Figura 85. Gráfico comparativo de la influencia de la temperatura sobre el desplazamiento máximo.

A continuación, a la temperatura de 220 °C se vuelven a reproducir los valores promedio obtenidos a 180 °C. No obstante, de las 6 probetas que se ensayan, la mitad llega a la fractura total, mientras que el resto solo se dobla provocando la aparición de ligeras grietas (ver Anexo VI). A raíz de esta última temperatura de impresión, los valores de desplazamiento y deformación comienzan a descender ligeramente hasta 260 °C.

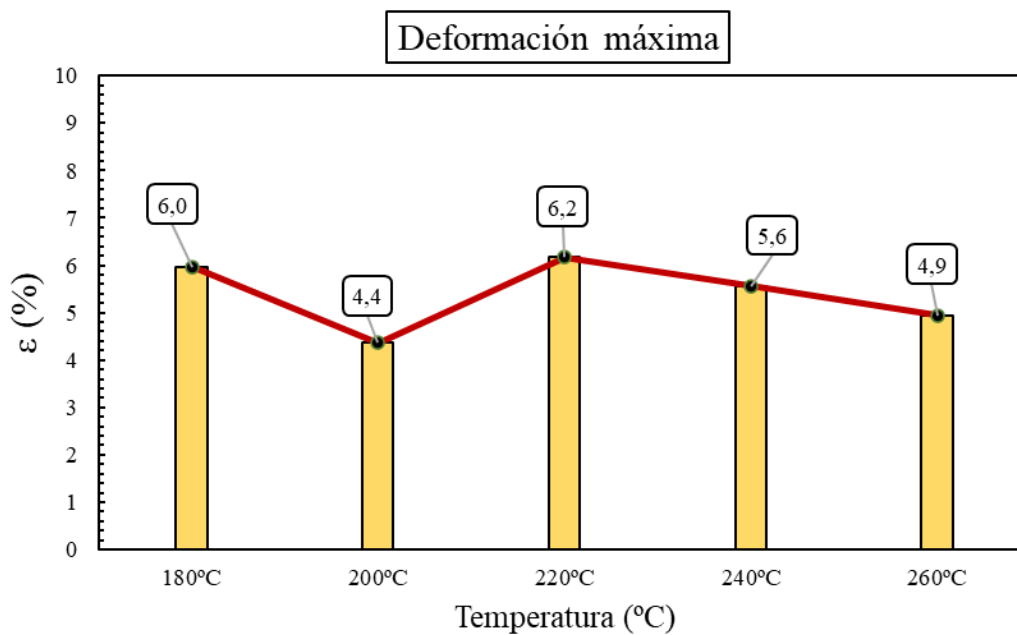


Figura 86. Gráfico comparativo de la influencia de la temperatura sobre la deformación máxima a flexión.

A. Del Médico [46] en su estudio, obtiene valores de deformación entre el 4 % y 9 %, para diferentes patrones de relleno y orientaciones de impresión. De esta manera, teniendo en cuenta las desviaciones estándar presentadas en la **Tabla 16**, todos los valores obtenidos en el intervalo experimentado para la deformación máxima (4,2-7,1 %), se encuentran dentro del intervalo experimentado por A. Del Médico [46] en su Trabajo de Fin de Grado.

Por otro lado, el fabricante [27] no proporciona información sobre la deformación a flexión, por lo que del mismo modo que en los ensayos de compresión, los resultados del presente proyecto permiten ampliar el conocimiento en las propiedades mecánicas de este PLA.

Finalmente, como resumen de los valores obtenidos, la **Tabla 16** muestra los resultados con las desviaciones estándar calculadas y con las condiciones atmosféricas medidas.

Tabla 16. Resultados del ensayo de flexión junto con las condiciones atmosféricas.

	180 °C	200 °C	220 °C	240 °C	260 °C
F_{máx.} (N)	135,9 ± 4,4	151,3 ± 3,6	158,4 ± 3,6	160,9 ± 4,4	170,3 ± 3,3
MOR (MPa)	80,2 ± 2,5	83,8 ± 1,9	86,7 ± 3,5	88,0 ± 1,8	92,8 ± 1,8
E_f (MPa)	2,43 · 10 ³ ± 0,17 · 10 ³	2,46 · 10 ³ ± 0,06 · 10 ³	2,35 · 10 ³ ± 0,18 · 10 ³	2,33 · 10 ³ ± 0,05 · 10 ³	2,48 · 10 ³ ± 0,08 · 10 ³
Desplazamiento máx. (mm)	10,4 ± 0,7	7,4 ± 0,3	10,4 ± 1,6	9,4 ± 0,5	8,4 ± 0,5
Deformación a flexión (%)	6,0 ± 0,4	4,4 ± 0,2	6,2 ± 0,9	5,6 ± 0,3	4,9 ± 0,3
T (°C)	16,9	17,2	17,6	17,7	17,7
HR (%)	61,0	63,9	62,4	66,4	65,0

8. Conclusiones

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

Con las técnicas de análisis térmico DSC y TG realizadas, se obtienen las temperaturas de transición vítrea, cristalización, fusión y degradación del material. Colaborando de esta manera, en el avance del conocimiento de las propiedades térmicas del PLA como material para la fabricación aditiva (AM). Además, con el análisis XRD, se comprueba que la estructura interna es principalmente amorfa, sin observar cambios asociados a la formación de estructuras cristalinas con el incremento de la temperatura de impresión.

Se observa que, el incremento de la temperatura afecta a la viscosidad del material utilizado para la impresión y por tanto, a las características de la pieza. A medida que aumenta la temperatura de impresión, el material presenta mayor fluidez depositando una mayor cantidad de flujo másico del que se debería. De esta manera, se logra una mejor difusión de las moléculas de PLA recién extruidas, que a su vez dan como resultado una adhesión más fuerte entre las capas.

De modo inverso, a medida que disminuye la temperatura de impresión, el material presenta mayor viscosidad depositando una menor cantidad de flujo másico del que se debería. De esta manera, las piezas presentan huecos entre los filamentos contiguos, actuando como muestras con menor porcentaje de relleno y, por lo tanto, con peores propiedades mecánicas. Además, se comprueba que el aumento de la temperatura de impresión presenta un efecto sobre el acabado superficial de las piezas, aumentando la rugosidad de la superficie a temperaturas superiores.

Cabe destacar que, la ligera variación de flujo másico mencionada, afecta en menor medida a las dimensiones y pesos de las probetas. Sin embargo, en un proceso de impresión 3D a gran escala, este efecto podría suponer un gasto material y monetario.

Para el ensayo mecánico de tracción, se determina que la mayoría de las propiedades mecánicas de este material, dependen principalmente de las variaciones de la temperatura de impresión. Además, el aumento de esta temperatura, presenta un efecto diferente en las propiedades mecánicas de tracción dependiendo de la orientación de impresión. En la

Conclusiones

orientación del eje X, la resistencia de las piezas depende de la carga de tracción soportada por los filamentos de PLA, en donde el incremento de la temperatura influye de manera favorable hasta un cierto valor. De otro modo, en la orientación de impresión del eje Z, esta resistencia presenta una mayor dependencia en el despegue de las capas, que resulta de la mejor o peor adhesión entre los filamentos.

Con los resultados obtenidos tras el ensayo mecánico de compresión, se permite ampliar el conocimiento en las propiedades mecánicas del PLA. Los valores obtenidos de estas propiedades mecánicas dependen de las variaciones de la temperatura de impresión hasta un cierto valor, mejorando la adhesión de las capas a mayores temperaturas.

Para el ensayo mecánico de flexión a tres puntos, se determina que la resistencia a la flexión obtenida para este material aumenta con la temperatura de impresión, mejorando la adherencia de las capas con el incremento de la temperatura. Además, con los valores obtenidos para la deformación a flexión, se permite ampliar el conocimiento en las propiedades mecánicas de este PLA.

De manera general, se puede establecer un rango de impresión adecuado (200-220 °C), cuya elección puede depender de las características que se deseen y/o de los valores de las propiedades mecánicas que se requieran. Cabe destacar que, un aumento excesivo de la temperatura de impresión, no dará siempre como resultado una mejora en las propiedades mecánicas. Por esta razón, en un proceso de impresión 3D a gran escala, un incremento desmedido de la temperatura de impresión podría suponer un gasto energético.

Finalmente, se establece que la selección de la temperatura de impresión, podría constituir un factor importante para obtener un producto final con las propiedades mecánicas deseadas. No obstante, se considera un parámetro de impresión que influye en menor medida respecto a otros parámetros como, por ejemplo, el porcentaje de relleno, el patrón de relleno o la orientación de impresión, que presentan un mayor efecto en las propiedades mecánicas.

9. Conclusions

The main conclusions obtained after the study are presented below:

With the DSC and TG thermal analysis techniques used, temperatures of glass transition, crystallization, melting and degradation of the material are obtained. Collaborating in this way, with the knowledge advancement of the thermal properties of PLA as a material for additive manufacturing (AM). In addition, with the XRD analysis, it is verified that the internal structure is mainly amorphous, without observing associated changes to the composition of crystalline structures with the printing temperature increase.

On the one hand, it is verified that the temperature increase affects the material viscosity used for printing and therefore, the characteristics of the specimen. As the printing temperature increases, the material becomes more fluid, depositing a greater mass flow amount than it is supposed to. In this way, a better diffusion of the newly extruded PLA molecules is achieved, which results in a stronger adhesion between layers.

On the other hand, as the printing temperature decreases, the material becomes more viscous, depositing less mass flow than it is supposed to. In this way, the specimens present air gaps between the contiguous filaments, acting as samples with a lower infill density and therefore, with worse mechanical properties. In addition, it is found that the printing temperature increase has an effect on the surface finish of the specimens, increasing at higher temperatures the surface roughness.

It should be noted that the slight variation of mass flow mentioned above, affects in a minor degree to the dimensions and weights of the specimens. However, on a large-scale 3D printing process, this effect could involve a material and monetary expense.

For the mechanical tensile test, it is determined that most of the mechanical properties of this material depend on the variations of the printing temperature. Furthermore, the temperature increase has a different effect on the tensile mechanical properties depending on the printing orientation. In the X-axis, the specimens' strength depends on the tensile load supported by the PLA filaments, in which the temperature increase influences favorably up to a certain value. What is more, in the Z-axis, this resistance presents a

Conclusions

greater dependence on the peeling off of the layers, which results from the better or worse adhesion of the filaments.

With the results obtained after the mechanical compression test, it is possible to extend the knowledge about PLA mechanical properties. The obtained values of these mechanical properties depend on printing temperature variations, improving at higher temperatures the layers adhesion.

For the three-point mechanical bending test, it is determined that the flexural strength obtained for this material increases with the printing temperature, improving at higher temperatures the layers adhesion. In addition, with the values obtained for the flexural deformation, it is possible to extend the knowledge about the PLA used and its mechanical properties.

In general, a suitable printing range (200-220 °C) can be established, which choice may depend on the desired characteristics and/or the required values of mechanical properties. It should be noted that an excessive increase in printing temperature will not always result in improved mechanical properties. For this reason, in a large-scale 3D printing process, a disproportionated increase in printing temperature could be energy wasteful.

Finally, it is established that the printing temperature selection could be an important factor to obtain a final product with the desired mechanical properties. However, it is considered a printing parameter that has less influence than other parameters such as, the infill density, the infill pattern or the printing orientation, which have a greater effect on the mechanical properties.

10. Líneas futuras de trabajo

A continuación, se proponen las siguientes propuestas que se podrían utilizar para ampliar el estudio realizado:

- Se pueden completar aún más los ensayos mecánicos, añadiendo de este modo, más información sobre las propiedades mecánicas de este PLA, realizando ensayos de dureza y ensayos de resistencia al impacto.
- Para los ensayos de tracción, ya que se imprime en las direcciones de impresión del eje X y el Z, se puede ampliar el estudio imprimiendo en la dirección del eje Y. Con ello, se puede determinar la influencia de la temperatura sobre esta dirección de impresión y compararla con las demás.
- Para los ensayos de compresión, se puede realizar otro diseño de probeta o emplear el recomendado por la norma, para obtener valores comparables de resistencia a la compresión y deformación a rotura, que pueden variar con el efecto de la temperatura de impresión. Además, para la eliminación de una región curvada al inicio del ensayo, se recomienda establecer un valor de carga previo.
- Se puede realizar un estudio similar a este, pero utilizando distintos materiales con el fin de determinar si la influencia de la temperatura de impresión presenta un efecto semejante.
- Por otro lado, se puede realizar un posprocesamiento a las probetas tras la impresión y comprobar si las propiedades mecánicas cambian. Una de las técnicas empleadas podría ser un curado a una temperatura determinada o la aplicación de acetona que mejoraría el acabado superficial y quizás las propiedades mecánicas.
- También se podría probar si la variación de la temperatura presenta un mayor efecto en un patrón de relleno diferente.

11. Glosario de términos

Ácido Poliláctico (PLA)

Es un termoplástico fabricado a base de recursos renovables como el almidón de maíz o la caña de azúcar y junto con los filamentos de ABS, son los materiales más empleados en el proceso FDM.

Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS)

Es un polímero termoplástico bastante utilizado en la tecnología FDM. Junto con los filamentos de PLA, es de los termoplásticos más fáciles de imprimir y de bajo costo.

Acrilonitrilo Estireno Acrilato (ASA)

Es un material utilizado en la impresión 3D, que mejora las capacidades del ABS y que presenta gran resistencia a los rayos UV y a la larga exposición en ambientes climatológicos.

Aglutinante

Sustancia que permite unir distintos elementos entre sí.

Air gap

Este término representa el espacio que existe entre dos deposiciones de material contiguas.

Bastidor

Corresponde con la estructura resistente que soporta los diversos elementos constitutivos de una máquina de ensayos o de un instrumento de medición.

Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

Es un tipo de ensayo térmico que se emplea para analizar las transiciones térmicas de distintos materiales. Para ello, se mide la diferencia de calor entre una muestra y una referencia en función de la temperatura o el tiempo.

Cristalización

Corresponde con una transición térmica en la cual se produce un alineamiento de las cadenas moleculares en el polímero. Con ello, se mejoran las propiedades mecánicas.

Curva DTG

Corresponde con la curva obtenida tras realizar la derivada de primer orden sobre la curva TG. El pico de dicha curva coincide con la temperatura a la cual se considera la degradación del material.

Degradación

Corresponde con una transición térmica en la cual los cambios significativos que experimenta un polímero en su estructura química, bajo la acción de determinadas condiciones medioambientales, resulta en una pérdida de las propiedades del material.

Despojado

Proceso por el cual se le extrae a algún objeto algo que lo acompaña, cubre o completa.

Diseño asistido por ordenador (CAD)

Software que permite ayudar en la creación y optimización de un diseño 3D.

Endotérmico

Se refiere a una reacción química en la cual se absorbe energía del entorno. En este caso, la energía en forma de calor se transfiere del exterior al interior del sistema.

Exotérmico

Se refiere a una reacción química en la cual se libera energía al entorno. En este caso, la energía en forma de calor se transfiere del interior al exterior del sistema.

Extensómetro

Instrumento que mide con precisión las deformaciones de las probetas durante el ensayo mecánico.

Extrusor

Es uno de los componentes de las impresoras 3D en la tecnología FDM y permite la transferencia de calor para fundir el material.

Fabricación aditiva (AM)

Es una técnica de producción basada en la deposición de material capa a capa para la creación de elementos tridimensionales.

Fabricación rápida de prototipos (RP)

Conjunto de técnicas que se emplean para fabricar modelos a escala o piezas tridimensionales a partir de un archivo CAD.

Fotopolimerización

Proceso de polimerización que se inicia por la absorción de luz visible o ultravioleta.

Fusión

Corresponde con una transición térmica en la cual un material pasa de un estado sólido a un estado líquido.

G-Code

Lenguaje de programación en el que se establecen los parámetros de impresión junto con una serie de instrucciones que debe seguir la impresora 3D.

Hardware

Conjunto de elementos físicos que constituyen un ordenador.

Lecho de impresión

Corresponde con la plataforma o superficie en la cual se imprimen las piezas tridimensionales.

Límite elástico

Es el valor de esfuerzo o tensión máxima que un material puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes. Si se aplican tensiones superiores a este límite, el material experimenta un comportamiento plástico con deformaciones permanentes.

Modelado por Deposición Fundida (FDM)

Es una técnica de fabricación aditiva que permite fabricar piezas tridimensionales, calentando y extruyendo los materiales de filamentos termoplásticos a través de una pequeña boquilla.

Módulo elástico

Es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico según la dirección en la que se aplica una fuerza. Relaciona los incrementos de tensión aplicados en el ensayo y los incrementos de deformación producidos.

Nozzle

Es el componente de la impresora 3D por el que se extruye el filamento fundido, que posteriormente se coloca en la plataforma de impresión.

Nylon

Es un polímero ampliamente utilizado en la fabricación aditiva que presenta muchas características interesantes como, por ejemplo, gran flexibilidad y resistencia al impacto o a la abrasión.

Policarbonato (PC)

Es un termoplástico utilizado en la fabricación aditiva con buenas propiedades como, por ejemplo, alta rigidez, alta resistencia a los impactos y buena resistencia al fuego.

Polimerización

Proceso químico en el cual dos o más moléculas se agrupan entre sí para formar otra de mayor tamaño, dando lugar un polímero, una cadena lineal o una macromolécula tridimensional.

Poliuretano Termoplástico (TPU)

Es un termoplástico utilizado en la fabricación aditiva característico por su alta resistencia a la abrasión, a ciertos elementos químicos, a los rayos UV y a las bajas temperaturas.

Radiación ultravioleta (UV)

Corresponde con la radiación electromagnética emitida por la región del espectro que ocupa la posición intermedia entre la luz visible y los rayos X.

Resina

Sustancia orgánica con una consistencia pastosa obtenida naturalmente, como producto que fluye de varias plantas o artificialmente, mediante reacciones de polimerización.

Scaffolds

Son estructuras, normalmente biodegradables, utilizadas en el campo de ingeniería de tejidos. Presentan funciones como, por ejemplo, estimular respuestas celulares, suministrar moléculas activas y proporcionar soporte estructural para tejidos en desarrollo.

STL

Es un formato utilizado para la mayoría de las tecnologías de fabricación aditiva que define la geometría 3D de los objetos excluyendo información como color y textura. Para ello, se aproxima el modelo tridimensional a una malla compuesta normalmente por triángulos que definen el objeto.

Software

Conjunto de programas, instrucciones y reglas informáticas para ejecutar ciertas tareas en un ordenador.

Tereftalato de Polietileno (PET)

Es el plástico más usado en el mundo y también se emplea en la fabricación aditiva. Normalmente, se utiliza añadiendo glicol (PETG) sobre el PET común, que lo hace más transparente, menos frágil y más fácil de procesar.

Termogravimetría (TG)

Es un tipo de ensayo térmico que se emplea para analizar la variación de la masa en función del tiempo durante un periodo determinado, siguiendo un programa de temperatura controlado.

Transición vítrea

Es un proceso reversible en el cual se produce un cambio en la capacidad calorífica, donde el material pasa de un estado duro y frágil a otro más blando y gomoso.

Warping

Se corresponde con un ligero alabeo que presenta la superficie impresa al despegarse de la plataforma de construcción debido a una mala adherencia.

ULTEM

Es un polímero de alto rendimiento que ofrece excelentes propiedades térmicas, un gran nivel de estabilidad dimensional, extrema resistencia al fuego y una excelente resistencia a muchos productos químicos.

12. Bibliografía

12.1 Normativa de aplicación

Durante el desarrollo del trabajo se emplea la normativa ISO. Concretamente, se utilizan las siguientes normas para el diseño de las probetas, la realización de los ensayos térmicos y la ejecución los distintos ensayos mecánicos de tracción, compresión y flexión.

- *Fabricación aditiva. Principios generales. Terminología, UNE-EN ISO/ASTM 52900:2017.*
- *Plásticos. Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC). Parte 1: Principios Generales (ISO 11357-1:2017).*
- *Plásticos. Termogravimetría (TG) de polímeros. Parte 1: Principios generales (ISO 11358-1:2015).*
- *Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 1: Principios generales (ISO 527-1:2019).*
- *Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 2: Condiciones de ensayo de plásticos para moldeo y extrusión (ISO 527-2:2012).*
- *Plásticos. Determinación de las propiedades en compresión (ISO 604:2003).*
- *Plásticos. Determinación de las propiedades en flexión (ISO 178:2020).*

12.2 Software empleado

- Para la obtención de los resultados de las distintas técnicas de análisis térmico utilizadas, se emplea el software *TRIOS de TA Instruments*.
- Para realizar el diseño y los planos de las piezas utilizadas en el trabajo se emplea *SolidWorks 2018*.
- Como software laminador, para definir los parámetros de impresión y establecer el fichero *G-Code*, se utiliza *PrusaSlicer 2.3.0*.
- Para el análisis y la realización de las gráficas de los resultados obtenidos de los ensayos de tracción, compresión y flexión se emplea *Microsoft Excel Office 365*.

12.3 Referencias

- [1] M. S. Alsoufi, M. W. Alhazmi, D. K. Suker, . T. A. Alghamdi, R. A. Sabbagh, M. A. Felemban y F. K. Bazuhair, «Experimental Characterization of the Influence of Nozzle Temperature in FDM 3D Printed Pure PLA and Advanced PLA+,» *American Journal of Mechanical Engineering*, vol. 7, n° 2, pp. 45-60, 2019.
- [2] S. Clark Ligon, . R. Liska, J. Stampfl, M. Gurr y R. Mühlaupt, «Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing,» *Chemical Reviews*, vol. 117, n° 15, pp. 10212-10290, 2017.
- [3] M. Behzadnasab y A. a. Yousefi , «Effects of 3D printer nozzle head temperature on the physical and mechanical properties of PLA based product,» de *12th International Seminar on Polymer Science and Technology*, Tehran, 2016.
- [4] M. S. Alsoufi y . A. E. Elsayed, «Warping Deformation of Desktop 3D Printed Parts Manufactured by Open Source Fused Deposition Modeling (FDM) System,» *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, vol. 17, n° 4, pp. 7-16, 2017.
- [5] *Fabricación aditiva. Principios generales. Terminología, UNE-EN ISO/ASTM 52900:2017.*
- [6] X. Xu, A. Awad, P. Robles-Martinez, S. Gaisford, A. Goyanes y A. W. Basit, «Vat photopolymerization 3D printing for advanced drug delivery and medical device applications,» *Journal of Controlled Release*, 2020.
- [7] F. Cosmi y A. D. Maso, «A mechanical characterization of SLA 3D-printed specimens for low-budget applications,» *Materials Today: Proceedings*, vol. 32, pp. 194-201, 2020.
- [8] L. D. Sturm, M. I. Albakri, P. A. Tarazaga y C. B. Williams, «In situ monitoring of material jetting additive manufacturing process via impedance based measurements,» *Additive Manufacturing*, vol. 28, pp. 456-463, 2019.
- [9] Y. L. Tee, P. Tran, M. Leary, P. Pille y M. Brandt, «3D Printing of polymer composites with material jetting: Mechanical and fractographic analysis,» *Additive Manufacturing*, vol. 36, 2020.
- [10] M. Sireesha, J. Lee, A. S. K. Kiran, V. J. Babu, B. B. T. Kee y S. Ramakrishna, «A review on additive manufacturing and its way into the oil and gas industry,» *RSC Advances*, vol. 8, 2018.

- [11] X. Shen y H. E. Naguib, «A robust ink deposition system for binder jetting and material jetting,» *Additive Manufacturing*, vol. 29, 2019.
- [12] A. Mostafaei, A. M. Elliott, J. E. Barnes, F. Li, W. Tan, C. L. Cramer, P. Nandwana y M. Chmielus, «Binder jet 3D printing – Process parameters, materials, properties, and challenges,» *Progress in Materials Science*, 2020.
- [13] H. Miyanaji, S. Zhang y L. Yang, «A new physics-based model for equilibrium saturation determination in binder jetting additive manufacturing process,» *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 124, pp. 1-11, 2018.
- [14] K. S. Ribeiro, F. E. Mariani y R. T. Coelho, «A Study of Different Deposition Strategies in Direct Energy Deposition (DED) Processes,» *Procedia Manufacturing*, vol. 48, pp. 663-670, 2020.
- [15] M. Soshi, C. Yau y R. Kusama, «Development and evaluation of a dynamic powder splitting system for the directed energy deposition (DED) process,» *CIRP Annals*, vol. 69, pp. 341-344, 2020.
- [16] D. D. Singh, T. Mahender y A. R. Reddy, «Powder bed fusion process: A brief review,» *Materials Today: Proceedings*, 2020.
- [17] A. Awad, F. Fina, A. Goyanes, S. Gaisford y A. W. Basit, «3D printing: Principles and pharmaceutical applications of selective laser sintering,» *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 586, 2020.
- [18] R. Singh, A. Gupta, O. Tripathi, S. Srivastava, B. Singh, A. Awasthi, S. Rajput, P. Sonia, P. Singhal y K. K. Saxena, «Powder bed fusion process in additive manufacturing: An overview,» *Materials Today: Proceedings*, vol. 26, pp. 3058-3070, 2020.
- [19] S. James y C. Dang, «Investigation of shear failure load in ultrasonic additive manufacturing of 3D CFRP/Ti structures,» *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 56, pp. 1317-1321, 2020.
- [20] B. Dermeik y N. Travitzky, «Laminated Object Manufacturing of Ceramic-Based Materials,» *Advanced Engineering Materials*, vol. 22, 2020.
- [21] V. Shanmugam, O. Das, K. Babu, U. Marimuthu, A. Veerasimman, D. J. Johnson, R. E. Neisiany, M. S. Hedenqvist, S. Ramakrishna y F. Berto, «Fatigue behaviour of FDM-3D printed polymers, polymeric composites and architected cellular materials,» *International Journal of Fatigue*, vol. 143, 2021.
- [22] W. Wu, W. Ye, Z. Wu, P. Geng, Y. Wang y J. Zhao, «Influence of Layer Thickness, Raster Angle, Deformation Temperature and Recovery Temperature on the Shape-

- Memory Effect of 3D-Printed Polylactic Acid Samples,» *Materials*, vol. 10, n° 8, 2017.
- [23] I. J. Solomon, P. Sevvell y J. Gunasekaran, «A review on the various processing parameters in FDM,» *Materials Today: Proceedings*, 2020.
- [24] J. L. A. Mardones y A. A. González, «Web-Robótica,» Noviembre 2016. [En línea]. Available: <https://www.web-robotica.com>. [Último acceso: 21 Enero 2021].
- [25] T.-C. Yang, «Effect of Extrusion Temperature on the Physico-Mechanical Properties of Unidirectional Wood Fiber-Reinforced Polylactic Acid Composite (WFRPC) Components Using Fused Deposition Modeling,» *Polymers*, vol. 10, n° 9, 2018.
- [26] A. Manoj, M. Bhuyan, S. R. Banik y M. R. Sankar, «Review on particle emissions during fused deposition modeling of acrylonitrile butadiene styrene and polylactic acid polymers,» *Materials Today: Proceedings*, 2021.
- [27] «SMART MATERIALS 3D PRINTING S.L.,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.smartmaterials3d.com>. [Último acceso: 26 Enero 2021].
- [28] «Stratasys Direct, Inc., Stratasys Ltd. (Collectively "Stratasys"),» [En línea]. Available: <https://www.stratasysdirect.com>. [Último acceso: 26 Enero 2021].
- [29] «Simplify3D,» 2013. [En línea]. Available: <https://www.simplify3d.com/>. [Último acceso: 24 Enero 2021].
- [30] Trimaker, 2016. [En línea]. Available: <https://trimaker.com>. [Último acceso: 21 Enero 2021].
- [31] *Plásticos. Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC). Parte 1: Principios Generales (ISO 11357-1:2017)*.
- [32] M. Á. Llorente Uceta y A. Horta Zubiaga, *Técnicas de caracterización de polímeros*, Madrid: UNED Ediciones, 1991.
- [33] «guíalab,» 16 Junio 2018. [En línea]. Available: <https://www.guialab.com.ar>. [Último acceso: 26 Abril 2021].
- [34] *Plásticos. Termogravimetría (TG) de polímeros. Parte 1: Principios generales (ISO 11358-1:2015)*.
- [35] «Laboratory Solutions from METTLER TOLEDO,» Youtube, 20 Diciembre 2021. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=MRJXMEIpmPU>. [Último acceso: 1 Mayo 2021].
-

- [36] J. C. C. Lorenzo, «Estudio del efecto de la cristalización fría y del envejecimiento físico en las relajaciones de los polímeros mediante la técnica de corrientes estimuladas térmicamente,» Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya, 1999.
- [37] «X Ray Data Services,» [En línea]. Available: <https://www.xdataser.com/difraccion-de-rayos-x>. [Último acceso: 14 Mayo 2021].
- [38] Universidad Politécnica de Cartagena, «Difracción de rayos X. Introducción,» [En línea]. Available: https://www.upct.es/~minaees/difraccion_rayosx.pdf. [Último acceso: 2021 Mayo 2021].
- [39] «Creality 3D Official,» Creality 3D Store, 15 Octubre 2019. [En línea]. Available: <https://www.creality3dofficial.com/es/blogs/news/ultimate-3d-printing-beginners-guide>. [Último acceso: 2 Mayo 2021].
- [40] *Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 1: Principios generales (ISO 527-1:2019).*
- [41] *Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 2: Condiciones de ensayo de plásticos para moldeo y extrusión (ISO 527-2:2012).*
- [42] *Plásticos. Determinación de las propiedades en compresión (ISO 604:2003).*
- [43] *Plásticos. Determinación de las propiedades en flexión (ISO 178:2020).*
- [44] «filament2print,» 9 Junio 2017. [En línea]. Available: https://filament2print.com/es/blog/23_skirt-brim-raft.html. [Último acceso: 4 Mayo 2021].
- [45] C. Koch, L. V. Hulle y N. Rudolph, «Investigation of mechanical anisotropy of the fused filament fabrication process via customized tool path generation,» *Additive Manufacturing*, vol. 16, pp. 138-145, 2017.
- [46] A. J. D. M. Bravo, «Propiedades mecánicas de componentes fabricados mediante modelado por deposición fundida,» Trabajo Fin de Grado, Universidad de La Laguna, 2017.
- [47] G. I. P. Carpio, «Análisis de tracción de probetas impresas en 3D mediante deposición de hilo fundido de PLA, ABS y PLA/MLO,» trabajo de fin de grado, Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, 2019.
- [48] D. R. Askeland, *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, Madrid: Paraninfo, 2001.
- [49] F. Alam, V. R. Shukla, K. Varadarajan y S. Kumar, «Microarchitected 3D printed polylactic acid (PLA) nanocomposite scaffolds for biomedical applications,»

- ournal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 103, n° 103576, 2020.
- [50] D. Merino, Y. Mansilla, C. Casalongué y V. Alvarez, «Propiedades fisicoquímicas y antibacteriales de mezcla de PLA-quitosano obtenidas por casting con potencial uso como acolchados agrícolas,» *Avances en Ciencias e Ingeniería*, pp. 27-39, 2016.
- [51] B. Wittbrodt y J. M. Pearce, «The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components,» *Additive Manufacturing*, vol. 8, pp. 110-116, 2015.
- [52] B. Tymrak, M. Kreiger y J. Pearce, «Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions,» *Materials & Design*, vol. 58, pp. 242-246, 2014.
- [53] J. Chacón, M. Caminero, E. García-Plaza y P. Núñez, «Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection,» *Materials & Design*, vol. 124, pp. 143-157, 2017.
- [54] J. F. M. Fernandes, M. Leite, A. Deus, L. Reis y M. Vaz, «Study of the Influence of 3D Printing Parameters on the Mechanical Properties,» de *3rd International Conference on Progress in Additive Manufacturing*, Singapore, 2018.
- [55] CNC Kitchen, «Printing PLA at 265°C? How does printing temperature affect strength?,» 2 Mayo 2020. [En línea]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=mwS_2R2mIvo. [Último acceso: 5 Mayo 2021].
- [56] J. R. C. Dizon, A. H. Espera, Q. Chen y R. C. Advincula, «Mechanical characterization of 3D-printed polymers,» *Additive Manufacturing*, vol. 20, pp. 44-67, 2018.
- [57] Y. Song, Y. Li, W. Song, K. Yee, K.-Y. Lee y V. Tagarielli, «Measurements of the mechanical response of unidirectional 3D-printed PLA,» *Materials & Design*, vol. 123, pp. 154-164, 2017.
- [58] S. Raut, V. S. Jatti, N. K. Khedkar y T. Singh, «Investigation of the Effect of Built Orientation on Mechanical Properties and Total Cost of FDM Parts,» *Procedia Materials Science*, vol. 6, pp. 1625-1630, 2014.
- [59] K. Balamurugan, M. V. Pavan, S. A. Ali y G. Kalusuraman, «Compression and flexural study on PLA-Cu composite filament using FDM,» *Materials Today: Proceedings*, vol. 44, pp. 1687-1691, 2021.
-

- [60] N. Rodrigues, M. Benning, A. M. Ferreira, L. Dixon y K. Dalgarno, «Manufacture and Characterisation of Porous PLA Scaffolds,» *Procedia CIRP*, vol. 49, pp. 33-38, 2016.
- [61] J. d. Ciurana, L. Serenó y È. Vallès, «Selecting Process Parameters in RepRap Additive Manufacturing System for PLA Scaffolds Manufacture,» *Procedia CIRP*, vol. 5, pp. 152-157, 2013.
- [62] D. W. Hutmacher, S. Thorsten, Z. Iwan, N. K. Woei, T. S. Hin y T. K. Cheng, «Mechanical properties and cell cultural response of polycaprolactone scaffolds designed and fabricated via fused deposition modeling,» *Journal of Biomedical Materials Research*, vol. 55, nº 2, pp. 203-216, 2001.
- [63] N. Arunkumar, N. Sathishkumar, S. Sanmugapriya y R. Selvam, «Study on PLA and PA thermoplastic polymers reinforced with carbon additives by 3D printing process,» *Materials Today: Proceedings*, 2021.

13. Anexo I: Caracterización del filamento de PLA Smartfil

13.1 Ensayo de tracción

Este estudio, se elabora de manera previa a los ensayos mecánicos realizados durante el proyecto, con el fin de obtener valores que sirvan de referencia para las propiedades mecánicas de este material. En primer lugar, se ejecutan cortes sobre el filamento (ver la *Imagen 1*) con una longitud de 170 mm aproximadamente, de la misma forma que las probetas 1A elegidas para el ensayo de tracción. Las medidas de los pesos y las dimensiones se establecen en la *Tabla de anexos 1*.

Tabla de anexos 1. Dimensiones y pesos del filamento.

Número	t ₁ (mm)	t ₂ (mm)	t ₃ (mm)	t ₄ (mm)	t ₅ (mm)	t (mm)	Longitud (mm)	Peso (g)
PLA FAB 1	1,74	1,75	1,75	1,76	1,75	1,75	169	0,504
PLA FAB 2	1,76	1,74	1,75	1,75	1,75	1,75	172	0,510
PLA FAB 3	1,76	1,76	1,75	1,76	1,76	1,76	171	0,506
PLA FAB 4	1,75	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	172	0,515
PLA FAB 5	1,76	1,76	1,75	1,76	1,76	1,76	171	0,506
PLA FAB 6	1,76	1,76	1,75	1,75	1,76	1,76	170	0,510

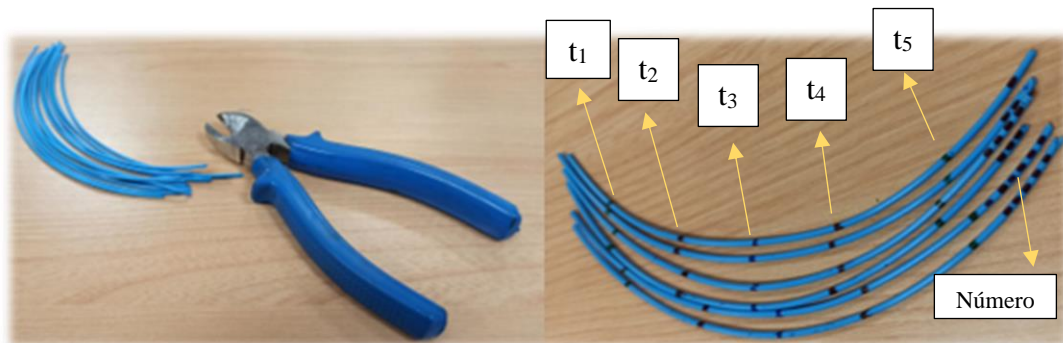
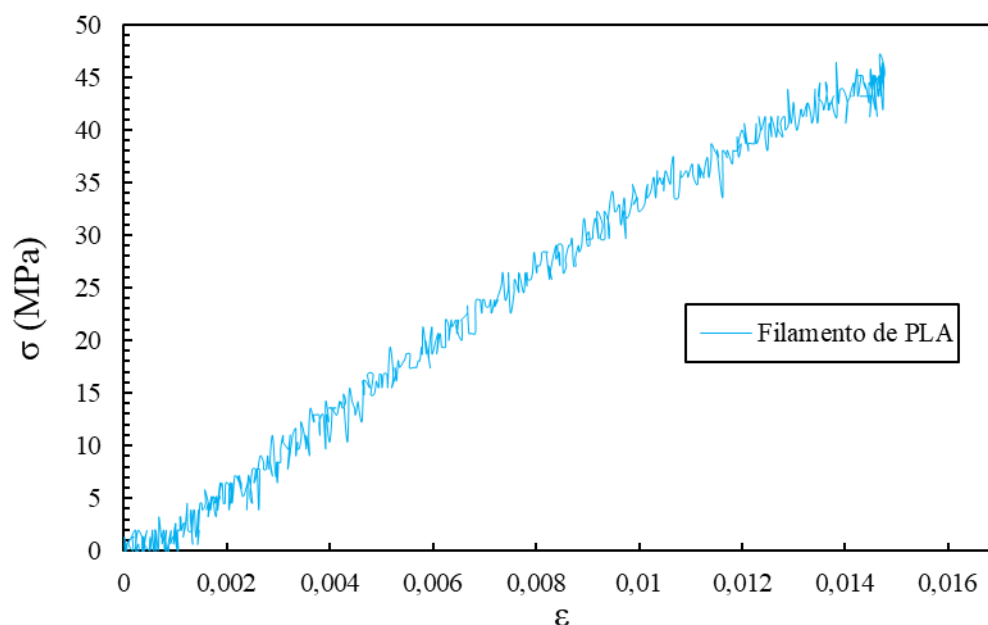


Imagen 1. Cortes del filamento junto con el marcado correspondiente.

Se ensayan 6 muestras a una velocidad de carga constante de 1 mm/min. No obstante, para los cálculos se tienen en cuenta 5 probetas, del mismo modo que en todos los ensayos mecánicos realizados. La *Gráfica 1* muestra una curva representativa de este ensayo. Finalmente, los resultados junto con las desviaciones estándar calculadas y las condiciones atmosféricas medidas se especifican en la *Tabla de anexos 2*.



Gráfica 1. Curva representativa del ensayo de tracción con el filamento de fábrica.

Como puede observarse en la **Gráfica 1**, inicialmente la curva presenta una respuesta lineal y seguidamente, se introduce en la región plástica perdiendo el comportamiento elástico del material. Finalmente, se produce la rotura totalmente frágil de la probeta con valores de deformación promedio del 1,5 %. La gráfica muestra bastante fluctuación, donde se alternan valores altos y bajos de tensión para un mismo valor de deformación. Esto puede ser debido al deslizamiento del filamento en las mordazas, provocando errores en la lectura. Debido a este hecho, la comparación es de carácter cualitativo y se debe tomar solo como referencia.

Tabla de anexos 2. Resultados del ensayo de tracción con el filamento de fábrica.

RT (MPa)	$48,0 \pm 2,4$
E_t (MPa)	$3,19 \cdot 10^3 \pm 0,14 \cdot 10^3$
ε_{máx} (%)	$1,5 \pm 0,1$
σ_b (MPa)	$45,9 \pm 1,4$
T(°C)	16,2
HR (%)	74,4

Aun así, se obtienen valores muy próximos a los ofrecidos por el fabricante. Sin embargo, el valor del límite elástico no se puede obtener, debido a que el procedimiento

de cálculo empleado (valor del esfuerzo al 0,2 % de la deformación), no proporciona ningún resultado de tensión, al no cortar con la gráfica de esfuerzo/deformación. La **Imagen 2** muestra una representación del ensayo y de la fractura de los filamentos.

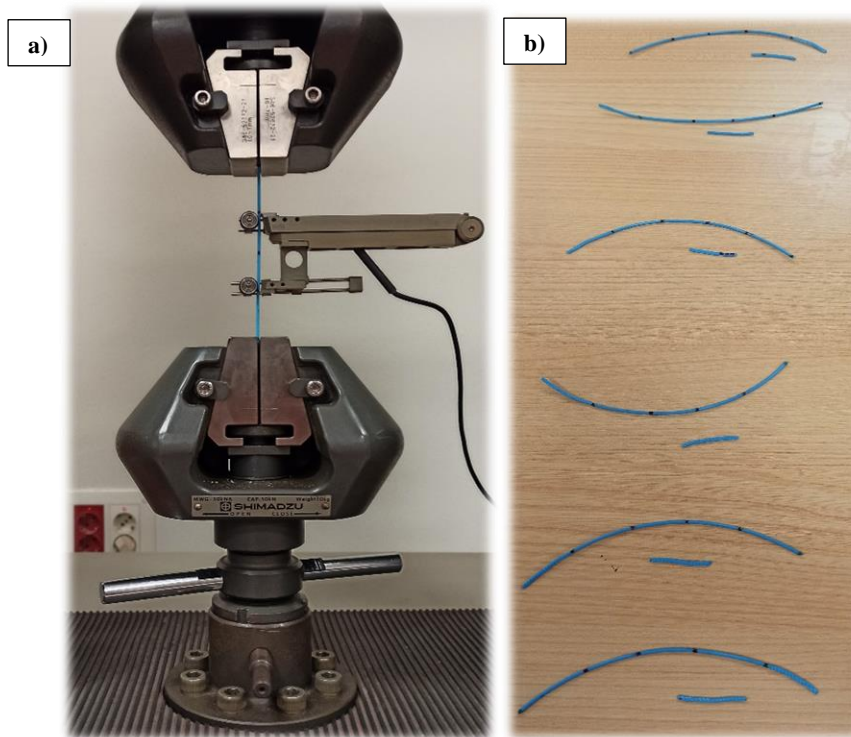


Imagen 2. a) Representación del ensayo realizado y b) fractura de los filamentos.

13.2 Ficha técnica del material

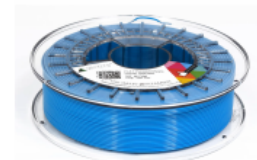
PLA

TECHNICAL DATA SHEET VERSION 1.1



PLA

Biodegradable filament and ok for all 3d printers. It is very easy to print as it has no contractions so you can make really big pieces. With our PLA filament you can achieve a fantastic finish and lively colours in all your pieces.



Reciclabile
Recyclable



Apto para contacto
con alimentos
Food Approved
Alimenta approved



Biocompostable
Biocompatible
Biocompostabile

	TYPICAL VALUE	UNITS	TEST METHOD
PHYSICAL PROPERTIES			
Chemical Name	Polylactic Acid		
Material Density	1.24	g/cm ³	ISO 1183
Glass Transition Temperature	60	°C	D3418
MECHANICAL PROPERTIES			
Tensile Strength at Break	50	MPa	D882
Tensile Yield Strength	60	MPa	D882
Tensile Modulus	3.5	GPa	D882
Tensile Elongation	6	%	D882
Notched Charpy Impact	5	KJ/m2	ISO-179-1eA
Flexural Strength	83	MPa	D790
Flexural Modulus	3.8	GPa	D790
THERMAL PROPERTIES			
Heat Distorsion Temperature (0.45 MPa)	55	°C	E2092
PRINTING PROPERTIES			
Print Temperature	200-240	°C	
Hot Pad	0-60	°C	
Fan Layer	ON (100)	%	

SIZE	NET W.	GROSS W.	DIAMETERS	COLOR	PACKAGING
S	330 g	475 g	1.75 mm	Various colors	SmartBag, security seal, desiccant bag
M	750 g	975 g	1.75 mm/2.85 mm	Various colors	
L	1000 g	1256 g	1.75 mm/2.85 mm	Various colors	

DISCLAIMER: The information provided in the data sheets is intended to be just a reference. It should not be used as design or quality control values. Actual values may differ significantly depending on the printing conditions. The final performance of the printed components does not only depend on the materials, also the design and printing conditions are important.

Smart Materials assumes no responsibility for any damage, injury or loss produced by the use of its filaments in any particular application.

smart materials 3D

@ www.smartmaterials3d.com

✉ info@smartmaterials3d.com

☎ +34 953 041 993

13.3 Comparativa de probetas con diferente porcentaje de relleno

Inicialmente, se realiza un estudio previo empleando un ensayo de tracción, con el fin de determinar un porcentaje de relleno entre el 50 % y 100 %. La *Imagen 3* muestra la diferencia existente entre las distintas probetas durante el proceso de impresión. Se muestra claramente la desigualdad en la deposición de los filamentos, dejando huecos en las probetas del 50 %, mientras que en la de 100 %, la pieza se comporta como un objeto completamente sólido (a excepción de ligeros defectos). Se emplea la temperatura de 200 °C para realizar la comparación.

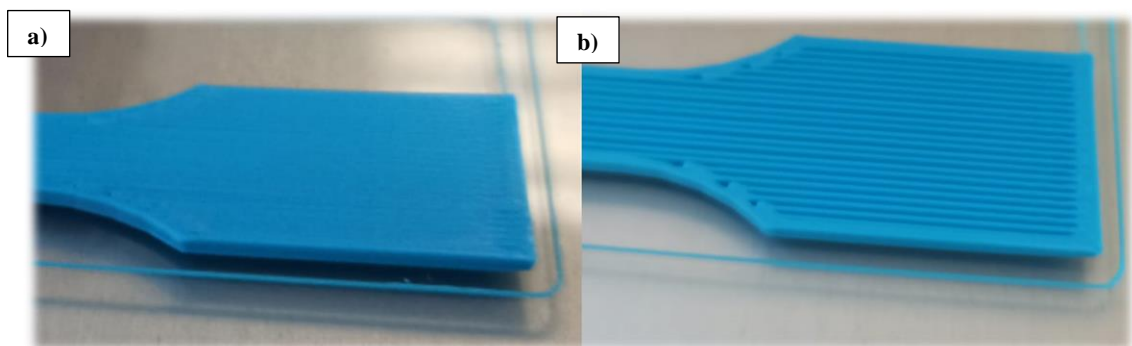
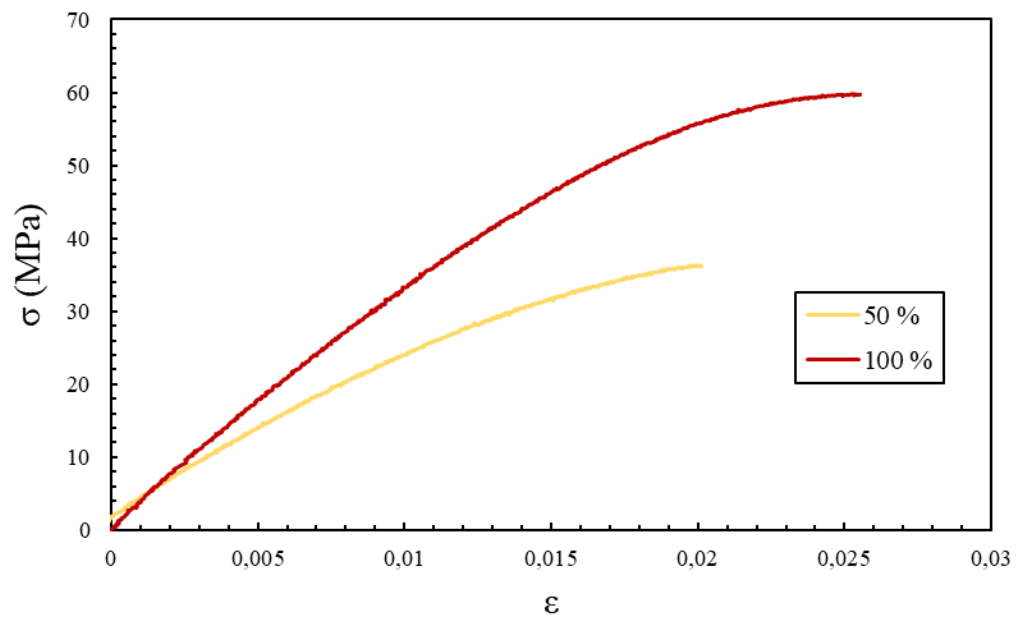


Imagen 3. Impresión a 200 °C con un relleno del a) 100 % y b) 50 %.

Finalmente, la *Gráfica 2* y la *Tabla de anexos 3*, comparan las propiedades mecánicas obtenidas para ambos rellenos. Las conclusiones muestran que, se consiguen mejores resultados con las probetas fabricadas con un 100 % del relleno interno, obteniendo curvas con mayor recorrido sobre la región plástica.

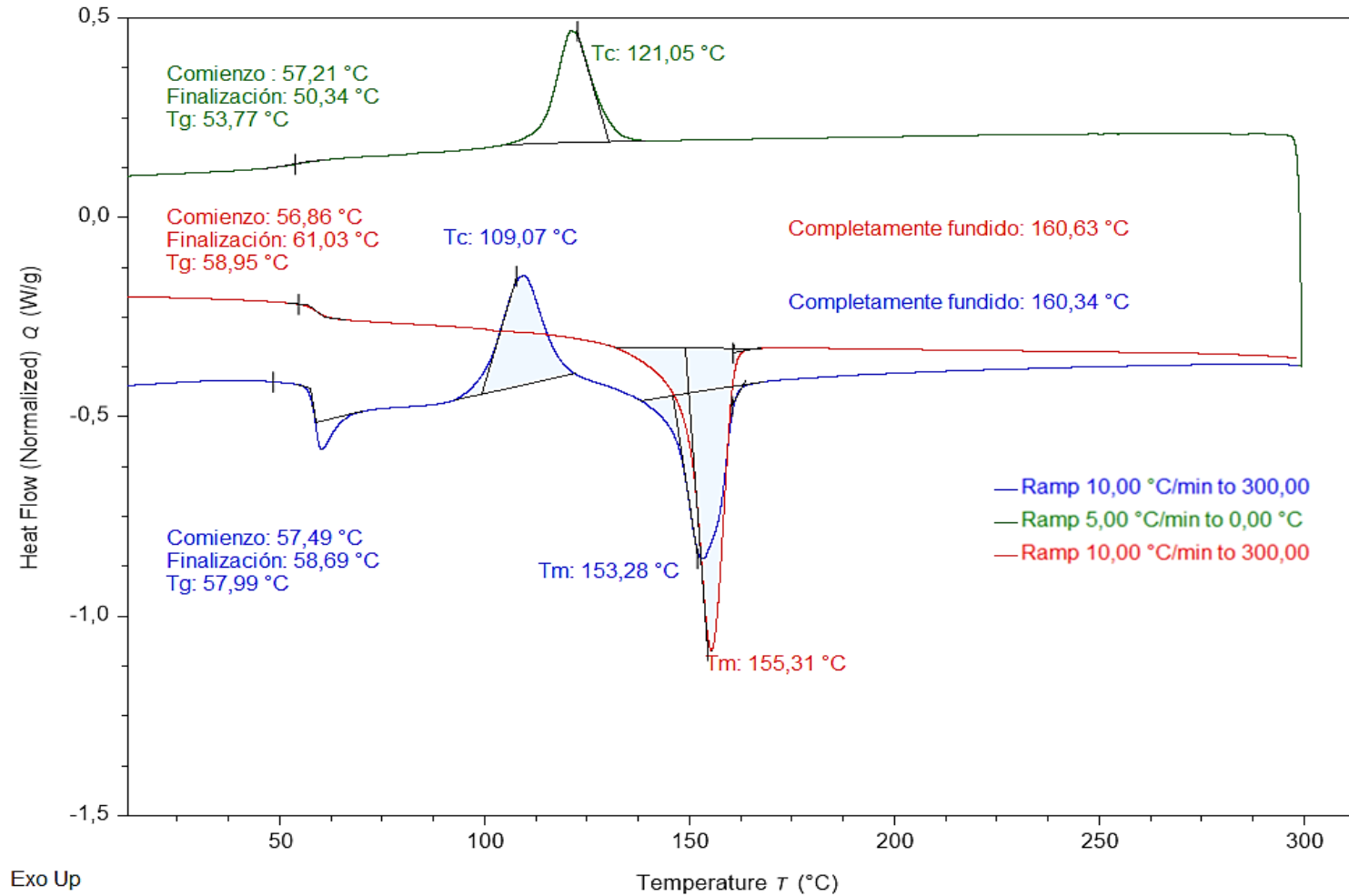
Tabla de anexos 3. Comparativa de las propiedades mecánicas obtenidas tras el ensayo de tracción.

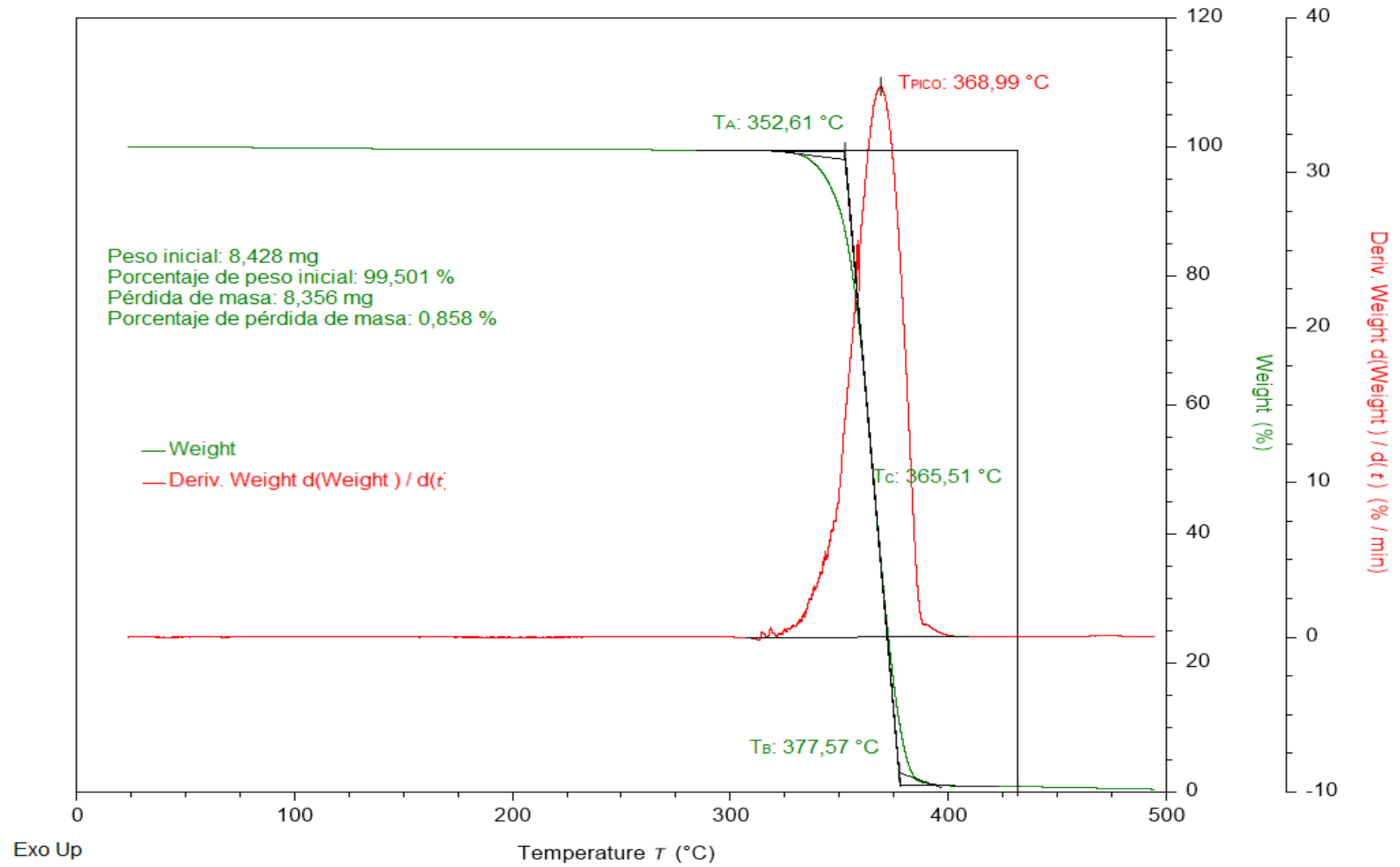
	50 %	100 %
RT (MPa)	37,0 ± 0,8	58,6 ± 1,8
E (MPa)	2,42 · 10 ³ ± 0,11 · 10 ³	3,50 · 10 ³ ± 0,09 · 10 ³
ε_{máx} (%)	2,2 ± 0,2	2,5 ± 0,3
σ_y (MPa)	29,8 ± 1,0	46,8 ± 2,3



Gráfica 2. Curva de esfuerzo/deformación representativa para un relleno del 50 % y del 100 %.

14. Anexo II: Análisis térmico

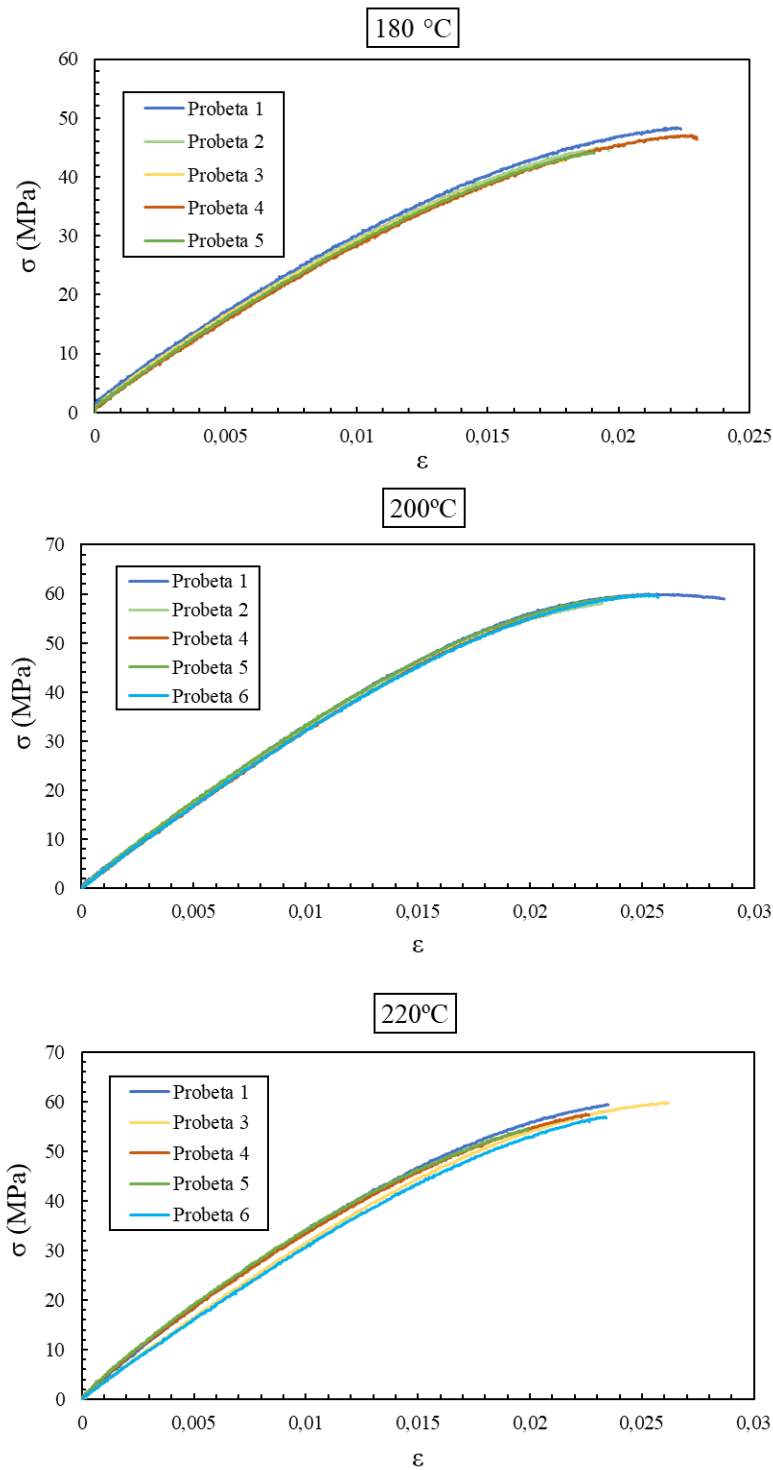


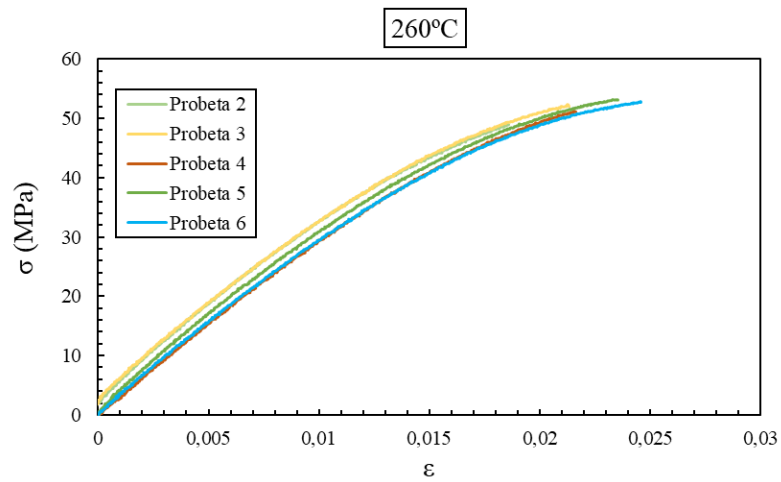
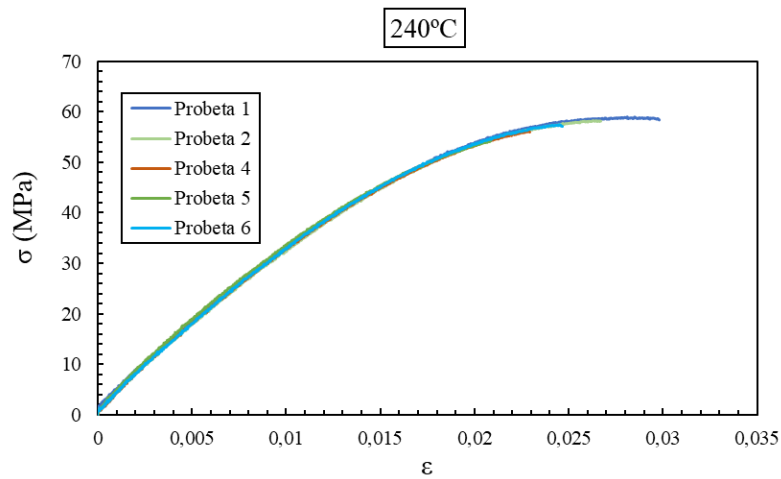


15. Anexo III: Gráficas

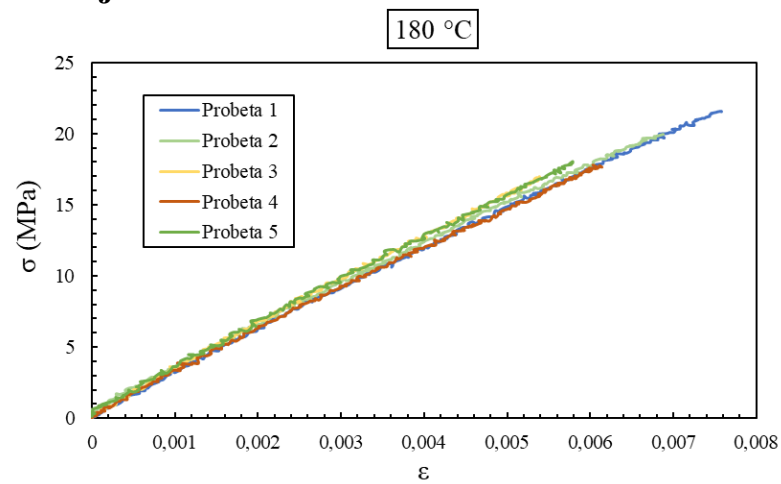
15.1 Gráficas de esfuerzo/deformación y carga/desplazamiento

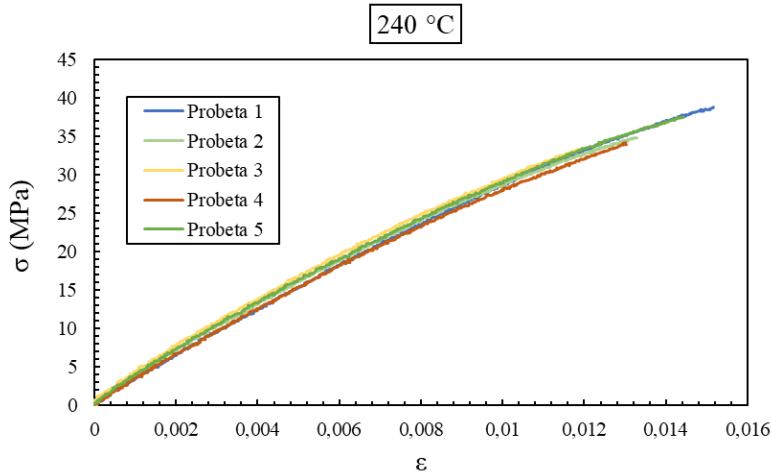
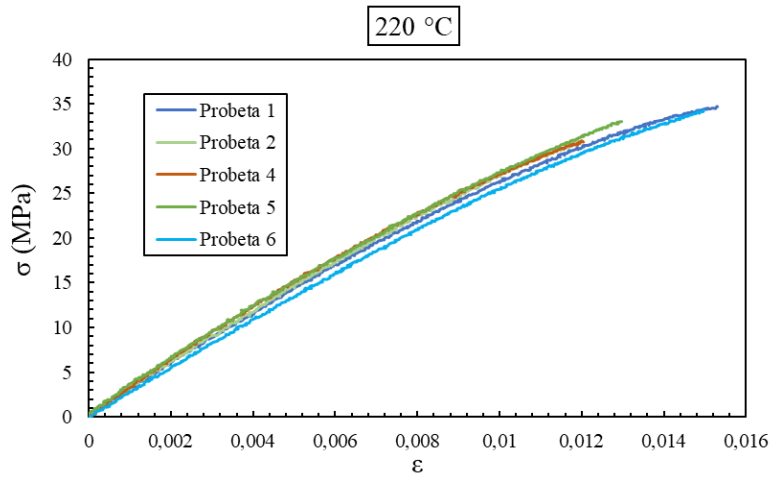
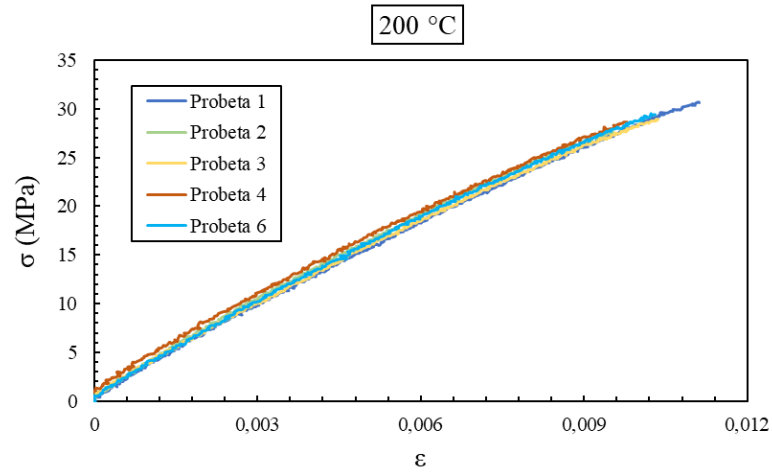
15.1.1 Tracción eje X

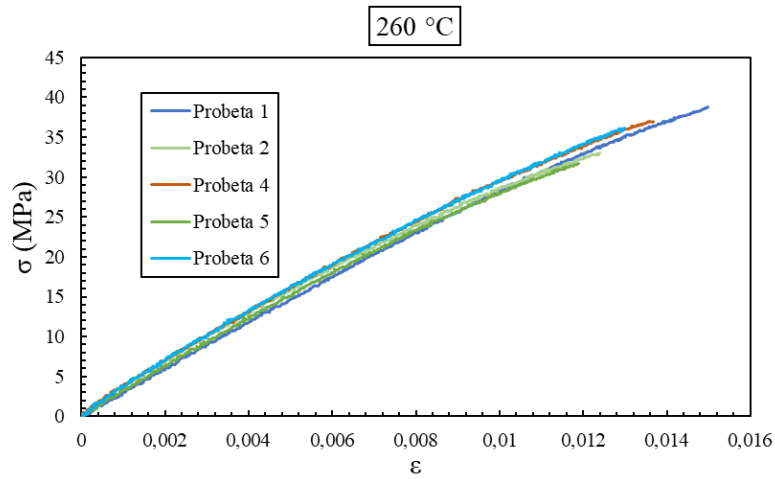




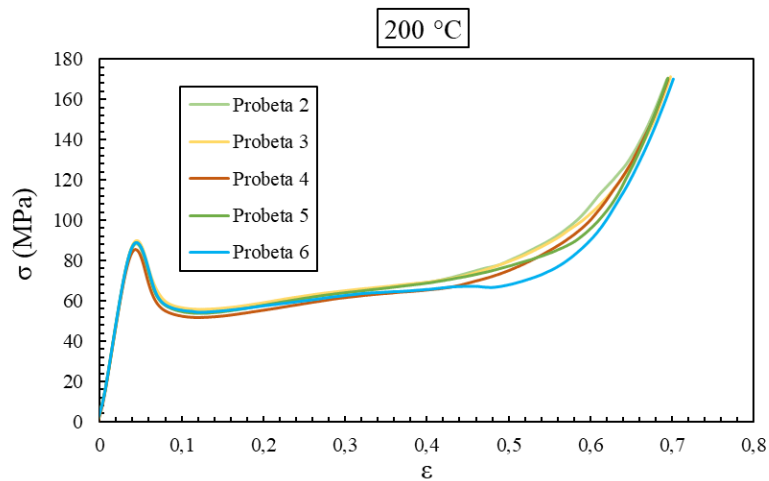
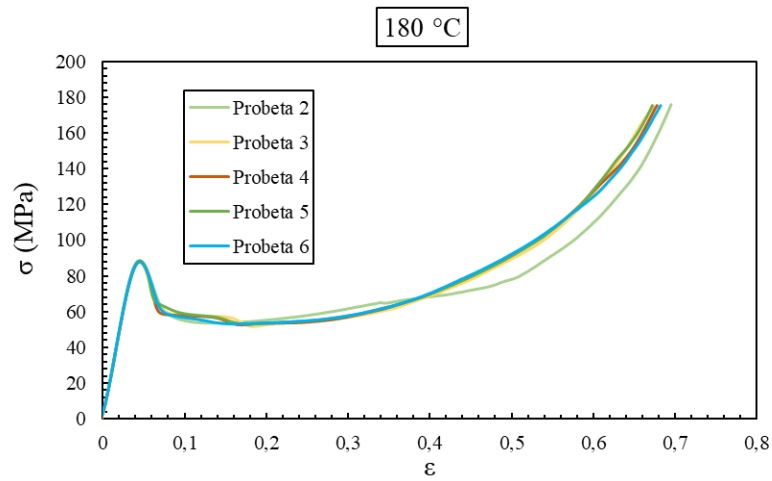
15.1.2 Tracción eje Z

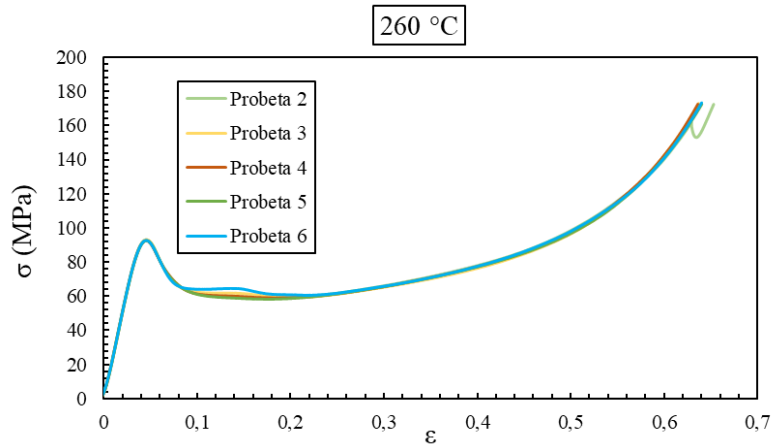
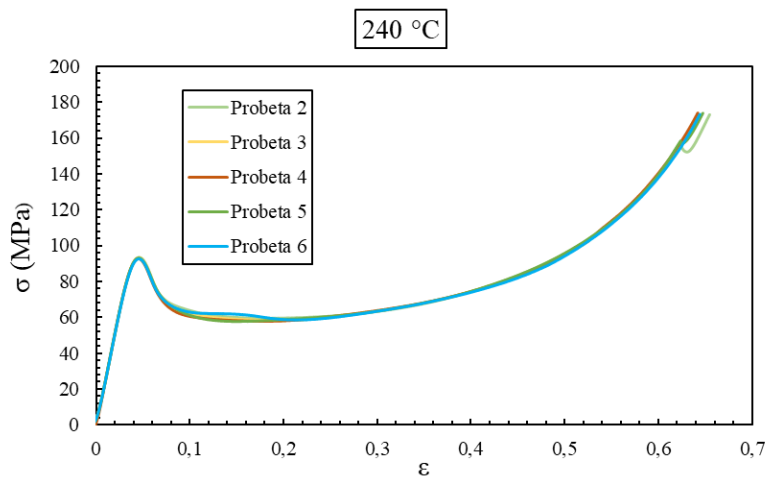
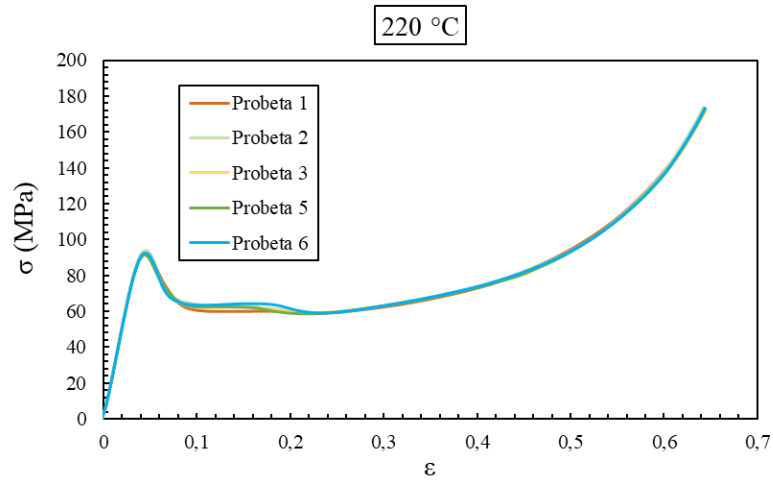




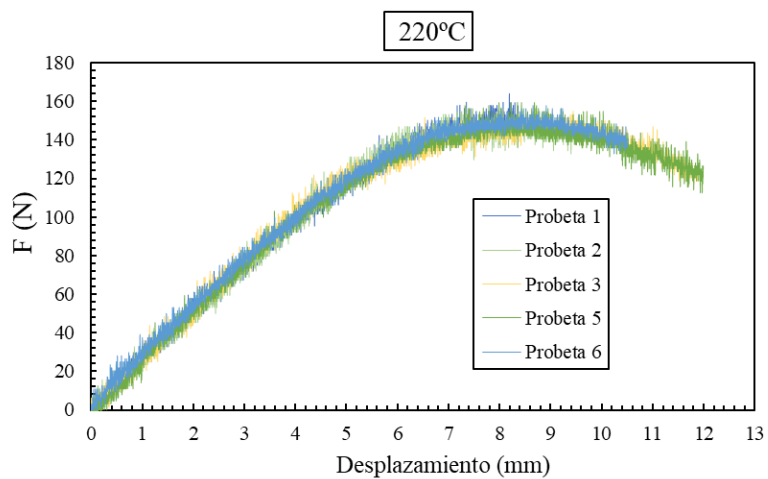
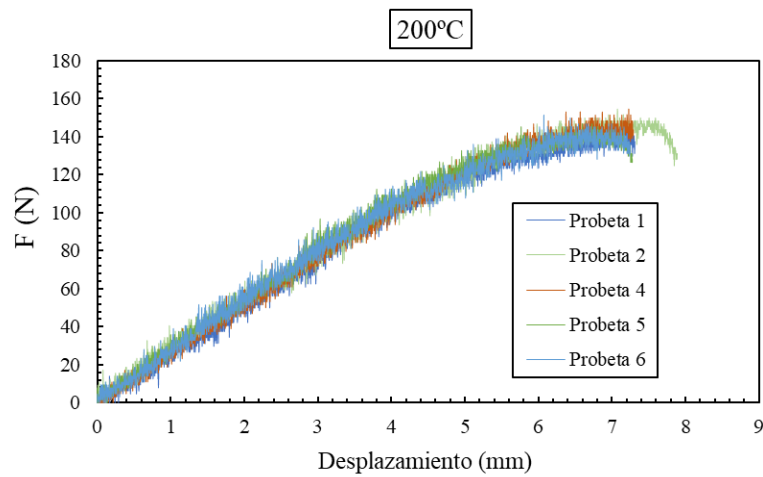
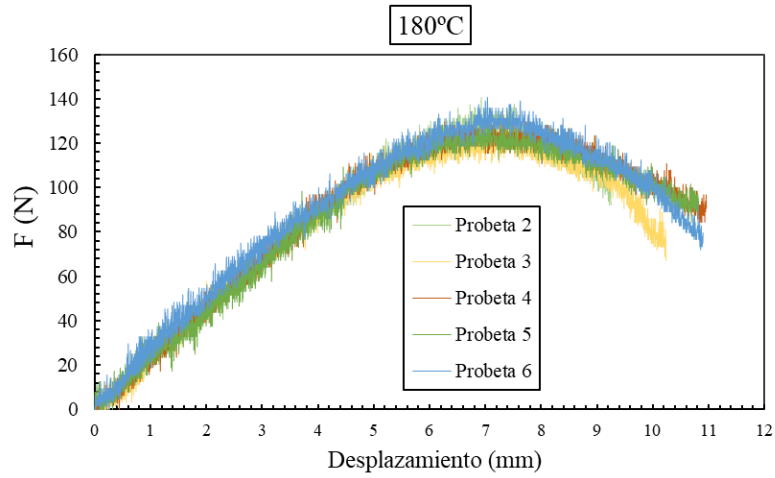


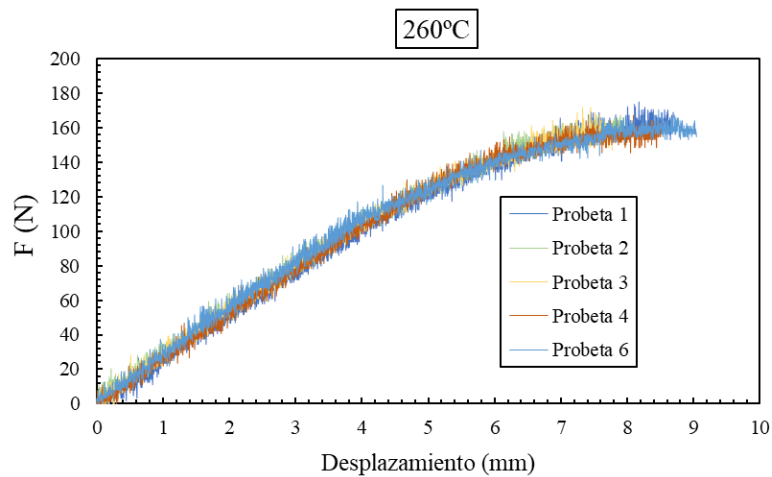
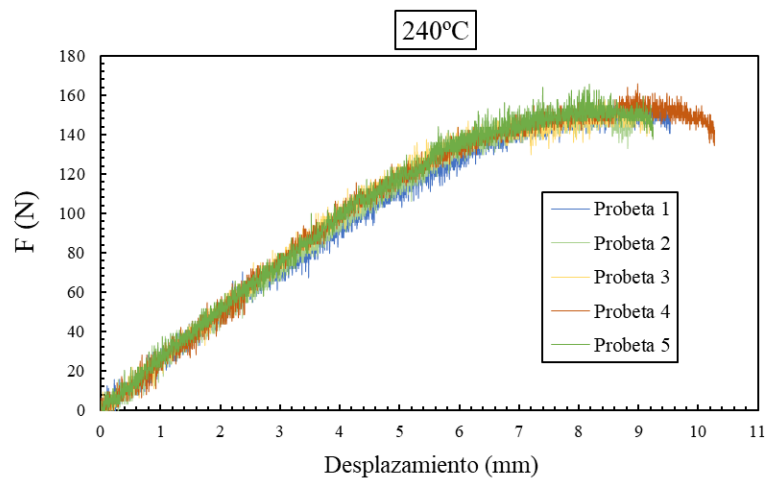
15.1.3 Compresión





15.1.4 Flexión





15.2 Gráficas para el cálculo del módulo de elasticidad

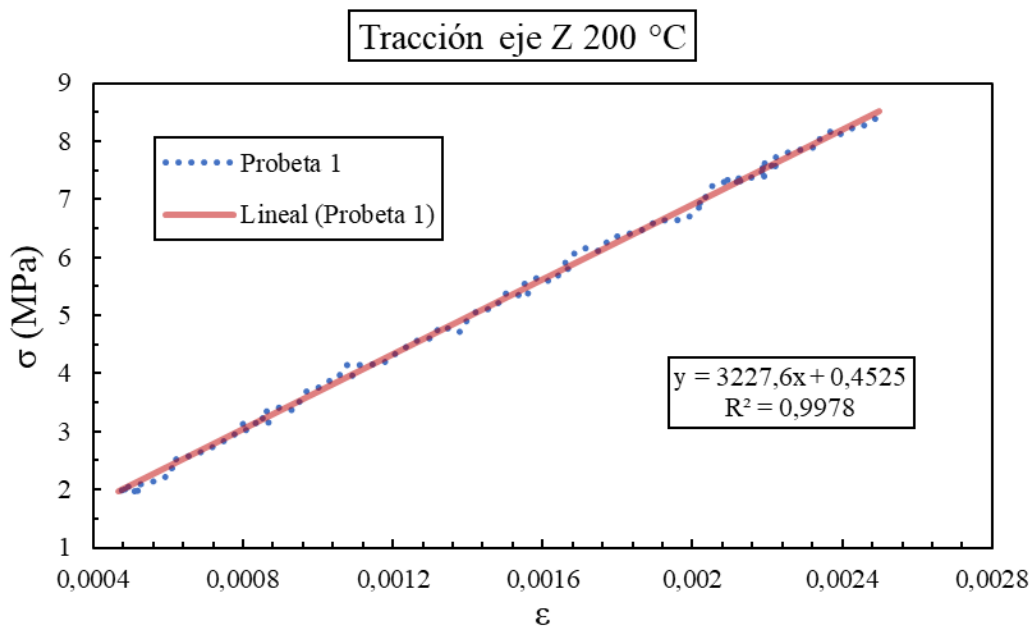
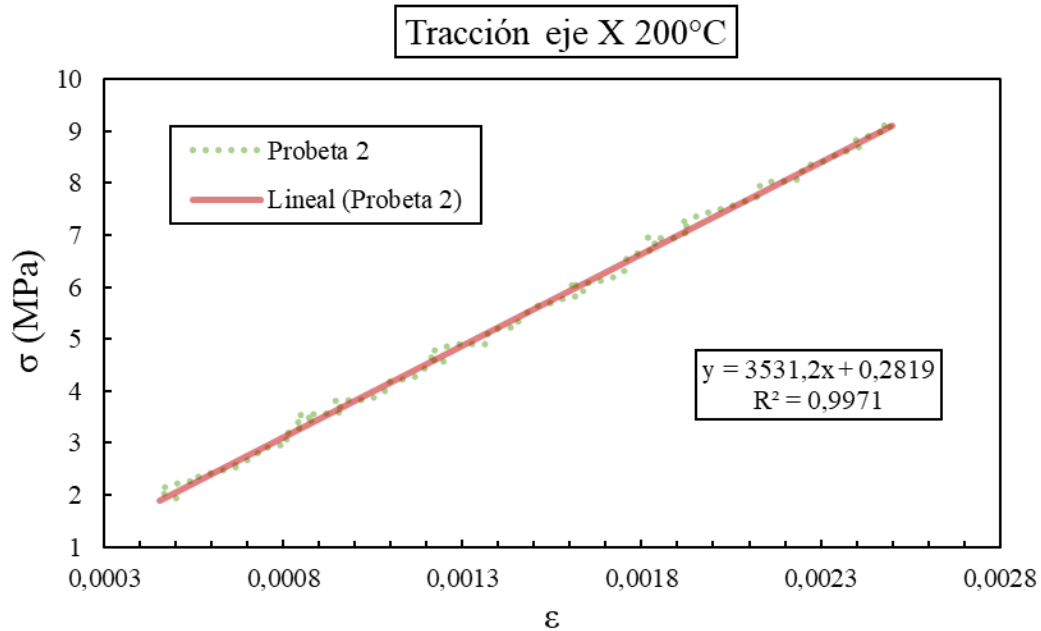
Debido a la cantidad de probetas ensayadas, se presentan de manera representativa las gráficas realizadas para la obtención del módulo elástico de tracción, compresión y flexión para una temperatura específica (200 °C). Para el cálculo, se representa la recta de regresión lineal sobre la zona elástica de la curva, en los intervalos mencionados en el apartado 6. Con ello, se obtiene la pendiente de dicha curva:

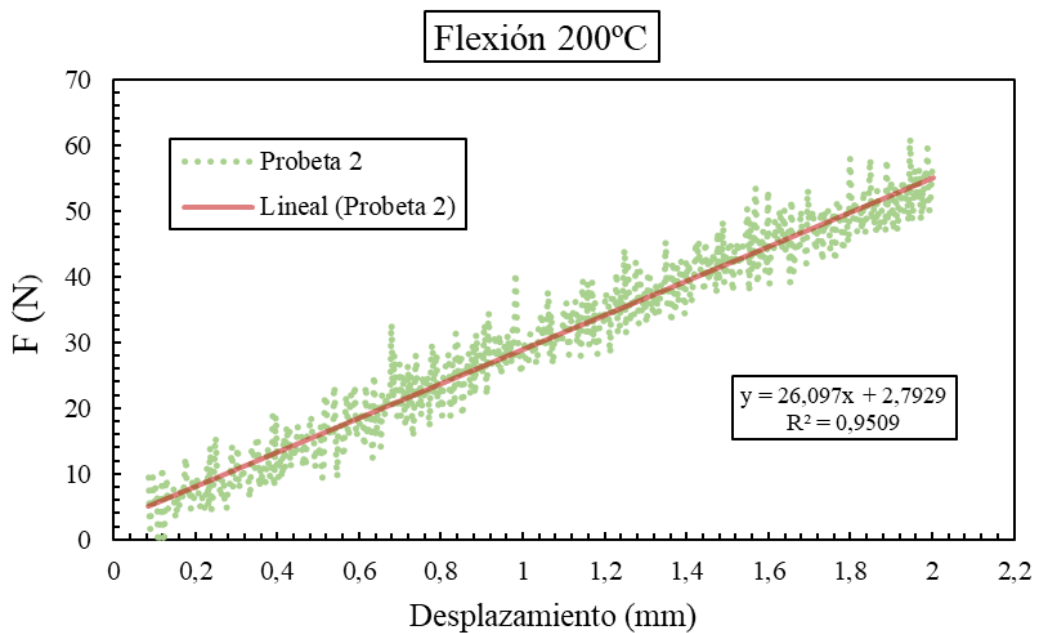
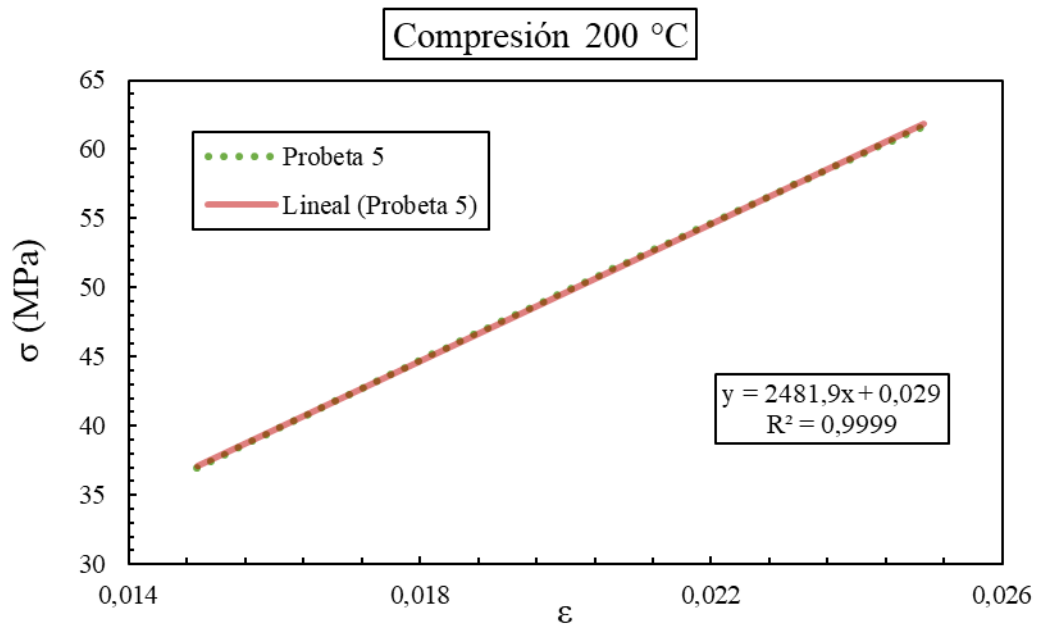
$$y = mx - n$$

donde:

n es el valor de la ordenada en el origen.

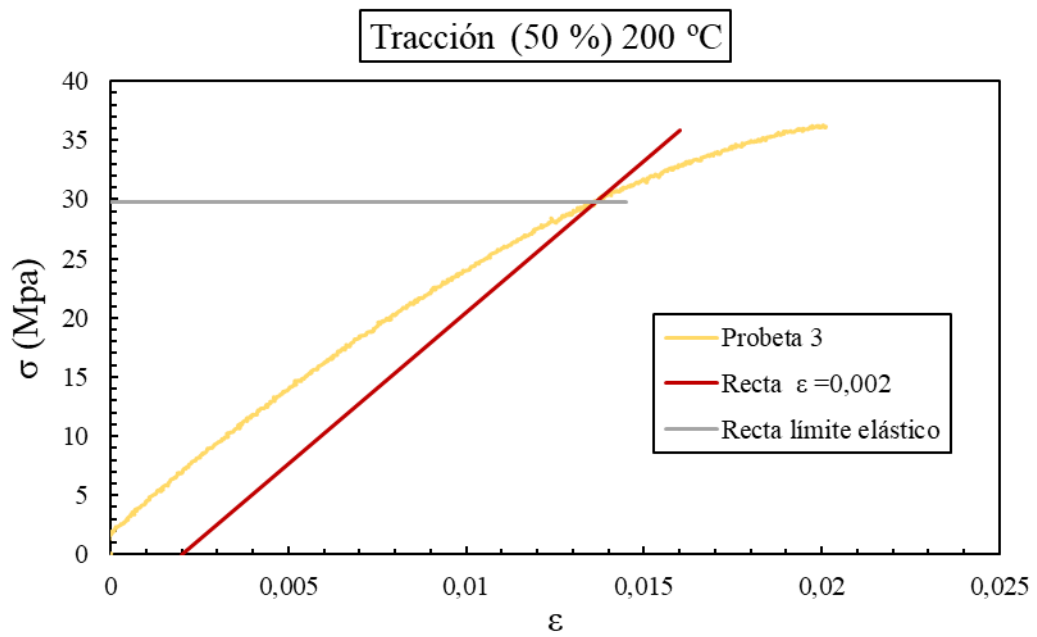
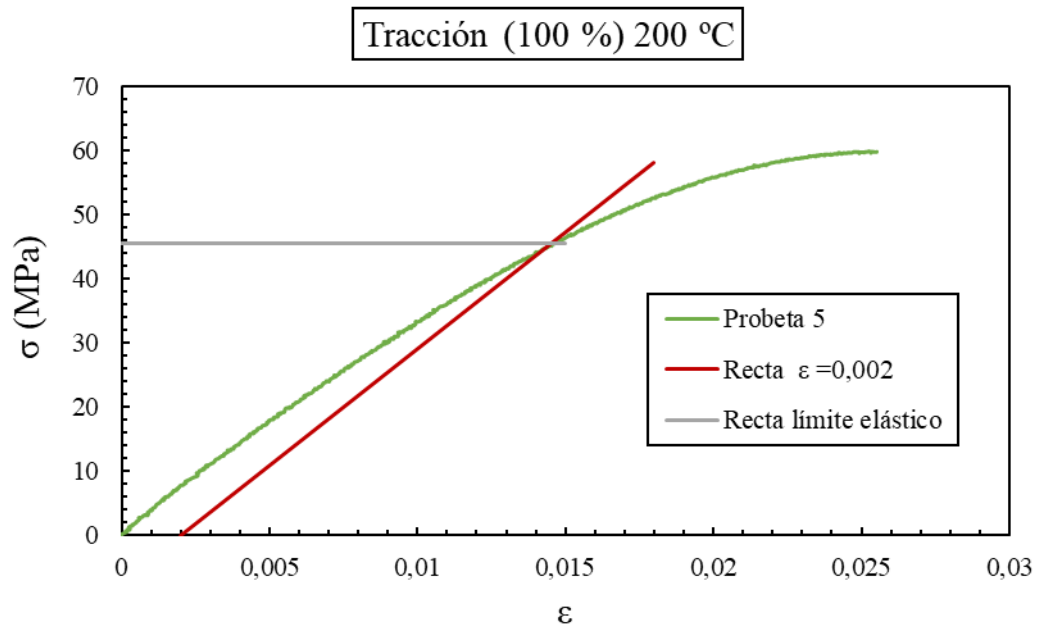
m es el valor de la pendiente, coincidiendo en los casos de tracción y compresión con el valor del módulo elástico expresado en MPa. En el caso de flexión, para la obtención del módulo de elasticidad se aplica la ecuación (13).





15.3 Gráficas para el cálculo del límite elástico

De la misma manera que el módulo elástico, se presenta la obtención del límite elástico para los ensayos mecánicos de tracción en la dirección de impresión del eje X, con un 100 % y 50 % del relleno interno, de manera representativa para una temperatura específica (200 °C).



16. Anexo IV: Dimensiones y pesos

Tracción eje X			Dimensiones (mm)														
Temperatura de impresión	Nº de probeta	Peso (g)	t1	t2	t3	t4	t5	t	W ₀₁	W ₀₂	W ₀	W ₁	W ₂	W ₃	W	I ₃	L _{ext}
180 °C	Probeta 1	10,32	3,98	3,96	3,96	3,94	3,94	3,96	20,06	20,11	20,08	10,07	10,08	10,10	10,08	170,00	50,00
	Probeta 2	10,29	3,96	3,95	3,94	3,93	3,94	3,94	20,11	20,09	20,10	10,07	10,09	10,10	10,09	170,00	50,00
	Probeta 3	10,26	3,96	3,98	3,97	3,96	3,93	3,96	20,13	20,10	20,11	10,09	10,10	10,11	10,10	170,00	50,00
	Probeta 4	10,28	3,95	3,93	3,94	3,96	3,97	3,95	20,10	20,10	20,10	10,08	10,1	10,13	10,10	170,00	50,00
	Probeta 5	10,31	3,98	3,98	4,00	3,98	3,96	3,98	20,13	20,14	20,13	10,13	10,12	10,17	10,14	170,00	50,00
	Probeta 6	10,35	3,98	3,98	3,99	3,97	4,02	3,99	20,07	20,08	20,07	10,14	10,15	10,14	10,14	170,00	50,00
200 °C	Probeta 1	11,67	3,95	3,95	3,95	3,94	3,94	3,95	20,35	20,36	20,35	10,22	10,24	10,19	10,22	170,00	50,00
	Probeta 2	11,73	4,03	3,98	3,98	3,98	3,97	3,99	20,20	20,22	20,21	10,30	10,35	10,30	10,32	170,00	50,00
	Probeta 3	11,70	3,96	3,93	3,97	3,99	2,96	3,76	20,23	20,20	20,21	10,29	10,30	10,29	10,29	170,00	50,00
	Probeta 4	11,70	3,99	3,99	3,94	3,94	3,95	3,96	20,21	20,10	20,15	10,23	10,30	10,33	10,29	170,00	50,00
	Probeta 5	11,69	3,95	3,96	3,95	3,92	3,97	3,95	20,20	20,19	20,19	10,20	10,30	10,33	10,28	170,00	50,00
	Probeta 6	11,72	3,95	4,00	3,98	3,96	3,99	3,98	20,27	20,24	20,25	10,34	10,33	10,30	10,32	170,00	50,00
220 °C	Probeta 1	11,86	3,97	3,93	3,95	3,94	3,96	3,95	20,15	20,16	20,15	10,19	10,20	10,22	10,20	170,00	50,00
	Probeta 2	11,85	4,01	3,95	3,97	3,97	4,01	3,98	20,20	20,30	20,25	10,40	10,40	10,28	10,36	170,00	50,00
	Probeta 3	11,89	3,98	4,00	3,97	3,98	3,98	3,98	20,24	20,30	20,27	10,32	10,27	10,31	10,30	170,00	50,00
	Probeta 4	11,90	4,04	3,95	3,98	4,05	3,98	4,00	20,30	20,21	20,25	10,30	10,40	10,45	10,38	170,00	50,00
	Probeta 5	11,91	3,98	4,04	4,01	4,05	4,04	4,02	20,40	20,35	20,37	10,48	10,42	10,39	10,43	170,00	50,00
	Probeta 6	11,94	4,07	4,06	4,03	3,97	4,00	4,03	20,35	20,25	20,30	10,30	10,31	10,35	10,32	170,00	50,00
240 °C	Probeta 1	11,80	3,96	4,01	3,98	3,98	4,02	3,99	20,32	20,36	20,34	10,40	10,38	10,42	10,40	170,00	50,00
	Probeta 2	11,84	4,03	3,96	4,01	4,07	4,01	4,02	20,39	20,25	20,32	10,35	10,40	10,40	10,38	170,00	50,00
	Probeta 3	11,85	3,98	3,97	3,97	3,98	3,98	3,98	20,38	20,32	20,35	10,35	10,32	10,38	10,35	170,00	50,00
	Probeta 4	11,83	4,02	3,99	4,00	4,02	4,06	4,02	20,32	20,26	20,29	10,32	10,38	10,44	10,38	170,00	50,00
	Probeta 5	11,85	4,01	4,00	4,01	3,99	3,99	4,00	20,33	20,34	20,33	10,45	10,40	10,40	10,42	170,00	50,00
	Probeta 6	11,85	3,97	3,95	3,95	3,96	3,96	3,96	20,26	20,35	20,30	10,42	10,39	10,37	10,39	170,00	50,00
260 °C	Probeta 1	11,96	3,99	4,07	3,96	4,09	4,02	4,03	20,82	20,86	20,84	10,88	10,91	10,93	10,91	170,00	50,00
	Probeta 2	11,94	4,02	4,09	4,04	4,09	4,16	4,08	20,76	20,78	20,77	10,89	10,80	10,83	10,84	170,00	50,00
	Probeta 3	11,91	4,00	4,01	3,95	3,94	4,05	3,99	20,75	20,76	20,75	10,95	10,95	10,98	10,96	170,00	50,00
	Probeta 4	11,93	4,12	4,05	3,97	4,01	4,11	4,05	20,78	20,81	20,79	10,92	10,88	10,90	10,90	170,00	50,00
	Probeta 5	11,94	3,99	3,96	4,02	4,10	3,99	4,01	20,78	20,86	20,82	10,94	10,89	10,98	10,94	170,00	50,00
	Probeta 6	11,98	4,19	3,97	4,10	4,06	4,14	4,09	20,68	20,76	20,72	10,93	10,88	10,87	10,89	170,00	50,00

Tracción eje Z			Dimensiones (mm)														
Temperatura de impresión	Nº de probeta	Peso (g)	t1	t2	t3	t4	t5	t	W01	W02	W0	W1	W2	W3	W	I3	L _{ext}
180 °C	Probeta 1	11,79	4,40	4,36	4,15	4,17	4,22	4,26	20,41	20,35	20,38	10,34	10,31	10,33	10,33	170,00	50,00
	Probeta 2	11,71	4,38	4,12	4,11	4,10	4,16	4,17	20,42	20,33	20,37	10,30	10,28	10,30	10,29	170,00	50,00
	Probeta 3	11,72	4,27	4,15	4,12	4,11	4,17	4,16	20,32	20,39	20,35	10,24	10,30	10,30	10,28	170,00	50,00
	Probeta 4	11,74	4,28	4,12	4,14	4,14	4,14	4,16	20,33	20,36	20,34	10,28	10,29	10,28	10,28	170,00	50,00
	Probeta 5	11,74	4,31	4,13	4,15	4,13	4,16	4,18	20,34	20,37	20,35	10,24	10,29	10,21	10,25	170,00	50,00
	Probeta 6	11,75	4,35	4,13	4,15	4,11	4,18	4,18	20,36	20,34	20,35	10,24	10,27	10,27	10,26	170,00	50,00
200 °C	Probeta 1	12,05	4,43	4,26	4,30	4,32	4,31	4,32	20,25	20,26	20,25	10,26	10,31	10,31	10,29	170,00	50,00
	Probeta 2	11,97	4,44	4,30	4,29	4,33	4,30	4,33	20,20	20,30	20,25	10,22	10,28	10,25	10,25	170,00	50,00
	Probeta 3	12,01	4,41	4,31	4,33	4,28	4,28	4,32	20,25	20,34	20,29	10,21	10,28	10,31	10,27	170,00	50,00
	Probeta 4	12,01	4,45	4,29	4,33	4,28	4,29	4,33	20,23	20,31	20,27	10,24	10,29	10,27	10,27	170,00	50,00
	Probeta 5	12,00	4,39	4,26	4,28	4,30	4,29	4,30	20,27	20,31	20,29	10,23	10,28	10,28	10,26	170,00	50,00
	Probeta 6	12,03	4,37	4,33	4,32	4,27	4,25	4,31	20,26	20,30	20,28	10,23	10,31	10,30	10,28	170,00	50,00
220 °C	Probeta 1	12,12	4,45	4,30	4,27	4,28	4,38	4,34	20,46	20,41	20,43	10,39	10,39	10,41	10,40	170,00	50,00
	Probeta 2	11,98	4,39	4,28	4,25	4,25	4,29	4,29	20,42	20,41	20,41	10,38	10,34	10,40	10,37	170,00	50,00
	Probeta 3	12,06	4,34	4,33	4,35	4,26	4,29	4,31	20,44	20,45	20,44	10,40	10,37	10,38	10,38	170,00	50,00
	Probeta 4	12,06	4,37	4,31	4,27	4,27	4,26	4,30	20,49	20,46	20,47	10,39	10,39	10,41	10,40	170,00	50,00
	Probeta 5	12,06	4,44	4,29	4,27	4,30	4,30	4,32	20,45	20,44	20,44	10,38	10,37	10,42	10,39	170,00	50,00
	Probeta 6	12,07	4,39	4,27	4,25	4,25	4,28	4,29	20,45	20,43	20,44	10,40	10,35	10,39	10,38	170,00	50,00
240 °C	Probeta 1	12,19	4,41	4,32	4,26	4,28	4,32	4,32	20,42	20,41	20,41	10,44	10,40	10,39	10,41	170,00	50,00
	Probeta 2	12,09	4,40	4,25	4,24	4,30	4,35	4,31	20,45	20,47	20,46	10,39	10,38	10,40	10,39	170,00	50,00
	Probeta 3	12,14	4,36	4,33	4,25	4,25	4,34	4,31	20,48	20,45	20,46	10,40	10,39	10,40	10,40	170,00	50,00
	Probeta 4	12,13	4,40	4,35	4,25	4,27	4,30	4,31	20,45	20,44	20,44	10,37	10,32	10,36	10,35	170,00	50,00
	Probeta 5	12,15	4,38	4,33	4,28	4,27	4,31	4,31	20,44	20,42	20,43	10,39	10,38	10,39	10,39	170,00	50,00
	Probeta 6	12,17	4,31	4,30	4,25	4,24	4,35	4,29	20,44	20,48	20,46	10,36	10,39	10,38	10,38	170,00	50,00
260 °C	Probeta 1	12,26	4,39	4,35	4,29	4,27	4,30	4,32	20,44	20,46	20,45	10,40	10,40	10,41	10,40	170,00	50,00
	Probeta 2	12,25	4,32	4,29	4,30	4,22	4,35	4,30	20,34	20,42	20,38	10,36	10,38	10,40	10,38	170,00	50,00
	Probeta 3	12,26	4,36	4,29	4,25	4,28	4,35	4,31	20,38	20,47	20,42	10,40	10,39	10,38	10,39	170,00	50,00
	Probeta 4	12,28	4,39	4,28	4,25	4,29	4,39	4,32	20,45	20,43	20,44	10,39	10,37	10,36	10,37	170,00	50,00
	Probeta 5	12,28	4,40	4,31	4,26	4,25	4,38	4,32	20,41	20,49	20,45	10,38	10,39	10,40	10,39	170,00	50,00
	Probeta 6	12,31	4,35	4,22	4,25	4,29	4,38	4,30	20,40	20,48	20,44	10,38	10,36	10,39	10,38	170,00	50,00

Compresión		Dimensiones (mm)													
Temperatura de impresión	Nº de probeta	Peso (g)	e ₁	e ₂	e ₃	e	d ₁	d ₂	d ₃	d	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L
180 °C	Probeta 1	12,14	15,77	15,80	15,82	15,80	16,04	16,06	16,04	16,05	39,86	39,94	40,16	39,98	39,99
	Probeta 2	12,10	15,76	15,76	15,75	15,76	16,08	16,16	16,12	16,12	39,84	39,99	39,91	39,88	39,91
	Probeta 3	12,10	15,77	15,76	15,77	15,77	16,16	16,11	16,22	16,16	39,84	39,92	39,83	39,92	39,88
	Probeta 4	12,13	15,76	15,76	15,80	15,77	16,14	16,16	16,14	16,15	39,86	39,94	40,16	39,91	39,97
	Probeta 5	12,15	15,78	15,78	15,80	15,79	16,11	16,12	16,16	16,13	39,90	39,92	40,11	39,92	39,96
	Probeta 6	12,14	15,74	15,74	15,78	15,75	16,08	16,11	16,15	16,11	39,91	39,98	39,85	39,88	39,91
200 °C	Probeta 1	12,29	15,77	15,75	15,78	15,77	16,40	16,60	16,60	16,53	40,10	40,00	40,58	40,03	40,18
	Probeta 2	12,30	15,80	15,82	15,84	15,82	16,56	16,62	16,61	16,60	39,98	39,90	40,29	40,30	40,12
	Probeta 3	12,30	15,81	15,80	15,84	15,82	16,48	16,54	16,40	16,47	40,11	40,00	40,31	40,02	40,11
	Probeta 4	12,32	15,83	15,86	15,87	15,85	16,54	16,51	16,64	16,56	40,15	40,00	40,30	40,03	40,12
	Probeta 5	12,32	15,84	15,86	15,87	15,86	16,52	16,53	16,52	16,52	39,90	40,03	40,30	40,01	40,06
	Probeta 6	12,34	15,88	15,85	15,91	15,88	16,55	16,50	16,53	16,53	40,09	40,02	40,24	40,03	40,10
220 °C	Probeta 1	12,64	15,80	15,88	15,96	15,88	16,16	16,32	16,44	16,31	39,98	40,05	40,21	40,01	40,06
	Probeta 2	12,65	15,64	15,71	15,80	15,72	16,36	16,32	16,34	16,34	40,06	40,09	40,36	40,11	40,16
	Probeta 3	12,66	15,83	15,89	15,93	15,88	16,41	16,40	16,48	16,43	40,06	40,05	40,26	40,02	40,10
	Probeta 4	12,65	15,76	15,88	15,91	15,85	16,32	16,38	16,38	16,36	40,10	40,11	40,33	40,09	40,16
	Probeta 5	12,64	15,78	15,82	15,92	15,84	16,23	16,35	16,36	16,31	40,10	40,23	40,36	40,08	40,19
	Probeta 6	12,62	15,79	15,86	15,93	15,86	16,17	16,24	16,35	16,25	40,13	40,10	40,36	40,12	40,18
240 °C	Probeta 1	12,56	15,86	15,84	15,85	15,85	16,14	16,20	16,31	16,22	40,03	40,01	40,43	40,08	40,14
	Probeta 2	12,57	15,83	15,89	15,87	15,86	16,23	16,28	16,30	16,27	40,01	40,05	40,44	40,09	40,15
	Probeta 3	12,58	15,77	15,88	15,80	15,82	16,37	16,34	16,33	16,35	40,05	40,15	40,45	40,04	40,17
	Probeta 4	12,57	15,77	15,79	15,79	15,78	16,24	16,27	16,27	16,26	40,05	40,17	40,42	40,14	40,20
	Probeta 5	12,58	15,79	15,83	15,84	15,82	16,18	16,23	16,32	16,24	40,08	40,14	40,41	40,13	40,19
	Probeta 6	12,56	15,81	15,89	15,88	15,86	16,21	16,25	16,30	16,25	40,09	40,14	40,54	40,07	40,21
260 °C	Probeta 1	12,74	15,86	15,86	15,92	15,88	16,27	16,31	16,32	16,30	40,04	40,11	40,45	40,15	40,19
	Probeta 2	12,74	15,90	15,84	15,89	15,88	16,27	16,30	16,36	16,31	40,20	40,21	40,50	40,15	40,27
	Probeta 3	12,75	15,81	15,79	15,83	15,81	16,29	16,34	16,37	16,33	40,15	40,13	40,58	40,14	40,25
	Probeta 4	12,75	15,82	15,93	15,91	15,89	16,25	16,28	16,33	16,29	40,13	40,10	40,56	40,07	40,22
	Probeta 5	12,75	15,87	15,84	15,89	15,87	16,28	16,30	16,33	16,30	40,18	40,09	40,51	40,07	40,21
	Probeta 6	12,74	15,79	15,80	15,89	15,83	16,28	16,28	16,29	16,28	40,24	40,13	40,35	40,10	40,21

Flexión			Dimensiones (mm)								
Temperatura de impresión	Nº de probeta	Peso (g)	b ₁	b ₂	b ₃	b	h ₁	h ₂	h ₃	h	l
180 °C	Probeta 1	3,62	10,56	10,66	10,65	10,62	3,83	3,85	3,87	3,85	80,00
	Probeta 2	3,61	10,61	10,69	10,61	10,64	3,92	3,85	3,91	3,89	80,00
	Probeta 3	3,62	10,55	10,61	10,56	10,57	3,95	3,89	3,90	3,91	80,00
	Probeta 4	3,62	10,59	10,74	10,60	10,64	3,88	3,90	3,93	3,90	80,00
	Probeta 5	3,63	10,60	10,74	10,64	10,66	3,92	3,91	3,94	3,92	80,00
	Probeta 6	3,62	10,60	10,75	10,62	10,66	3,93	3,92	3,96	3,94	80,00
200 °C	Probeta 1	3,87	10,71	10,67	10,69	10,69	3,94	3,94	4,03	3,97	80,00
	Probeta 2	3,89	10,73	10,81	10,72	10,75	4,09	4,00	3,96	4,02	80,00
	Probeta 3	3,88	10,66	10,75	10,67	10,69	4,10	3,98	4,00	4,03	80,00
	Probeta 4	3,88	10,67	10,78	10,65	10,70	4,06	4,01	4,03	4,03	80,00
	Probeta 5	3,87	10,65	10,79	10,69	10,71	4,06	3,97	4,03	4,02	80,00
	Probeta 6	3,87	10,72	10,80	10,72	10,75	4,05	4,07	4,06	4,06	80,00
220 °C	Probeta 1	3,89	10,75	10,85	10,86	10,82	4,00	4,02	4,05	4,02	80,00
	Probeta 2	3,88	10,75	10,78	10,73	10,75	4,16	4,07	4,02	4,08	80,00
	Probeta 3	3,89	10,74	10,77	10,69	10,73	4,16	4,08	4,05	4,10	80,00
	Probeta 4	3,89	10,79	10,81	10,77	10,79	4,14	4,02	4,04	4,07	80,00
	Probeta 5	3,89	10,80	10,73	10,66	10,73	3,97	3,92	4,04	3,98	80,00
	Probeta 6	3,89	10,83	10,76	10,66	10,75	3,96	4,03	4,08	4,02	80,00
240 °C	Probeta 1	3,96	10,78	10,92	10,79	10,83	4,04	3,99	4,04	4,02	80,00
	Probeta 2	3,97	10,76	10,84	10,79	10,80	4,09	4,00	4,01	4,03	80,00
	Probeta 3	3,96	10,68	10,84	10,68	10,73	4,08	3,96	4,01	4,02	80,00
	Probeta 4	3,96	10,75	10,86	10,76	10,79	4,08	4,02	4,06	4,05	80,00
	Probeta 5	3,95	10,81	10,88	10,82	10,84	4,05	4,00	4,08	4,04	80,00
	Probeta 6	3,95	10,70	10,82	10,73	10,75	4,02	3,99	4,08	4,03	80,00
260 °C	Probeta 1	3,96	10,84	10,91	10,86	10,87	4,01	4,00	4,07	4,03	80,00
	Probeta 2	3,96	10,74	10,83	10,70	10,76	4,01	4,02	4,03	4,02	80,00
	Probeta 3	3,95	10,73	10,85	10,72	10,77	4,04	4,03	4,04	4,04	80,00
	Probeta 4	3,95	10,76	10,82	10,75	10,78	4,11	4,00	4,08	4,06	80,00
	Probeta 5	3,95	10,79	10,87	10,78	10,81	4,09	4,04	4,02	4,05	80,00
	Probeta 6	3,96	10,77	10,88	10,74	10,80	4,07	4,05	4,02	4,05	80,00

17. Anexo V: Condiciones atmosféricas

Tanto para las impresiones 3D como para los ensayos mecánicos, se dispone de una estación meteorológica (*MISOL*) con sensores para recoger los datos de temperatura y humedad, mostrada en la *Imagen 4*. Los datos promedio obtenidos se muestran en la *Tabla de anexos 4*.



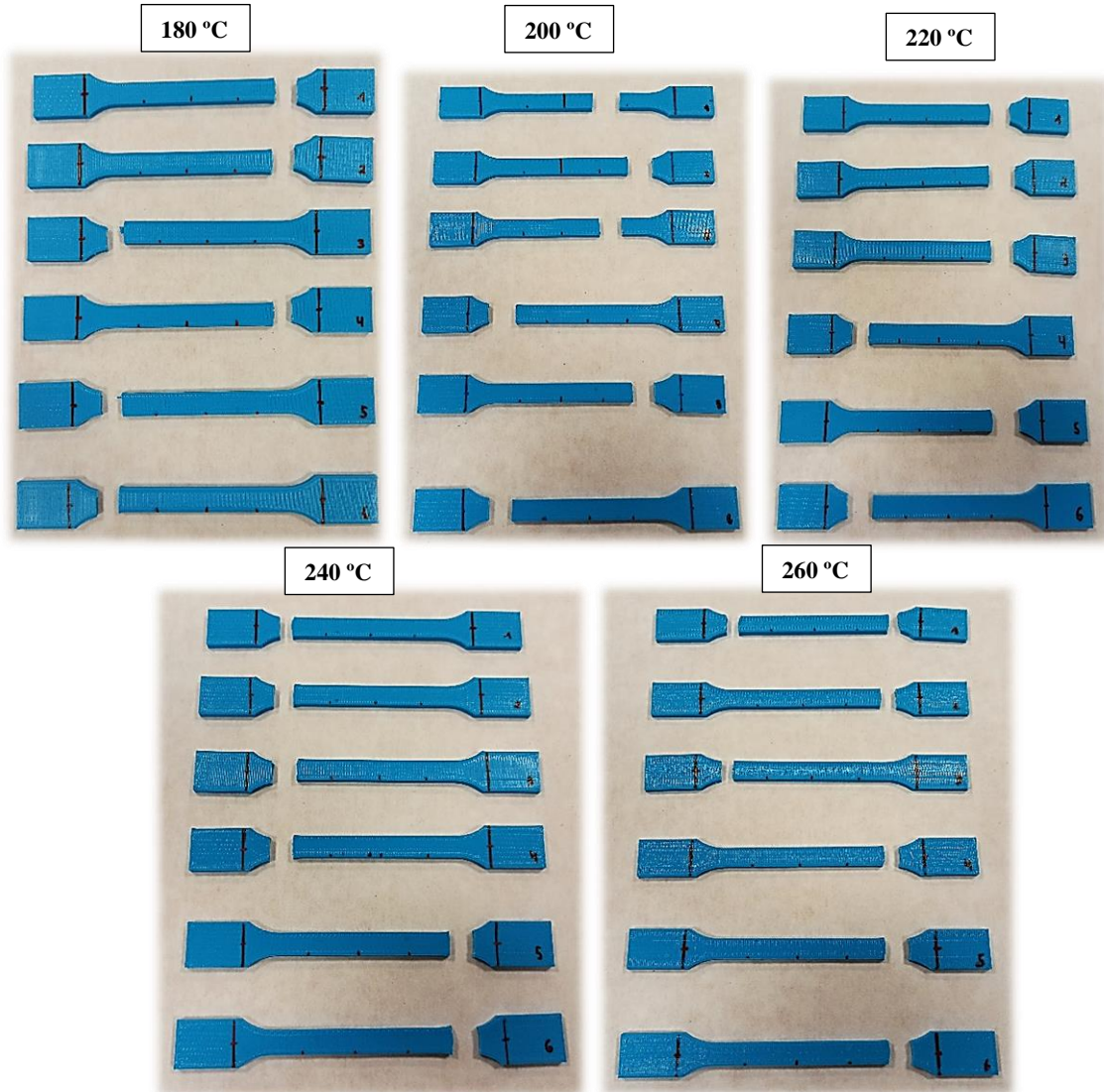
Imagen 4. Estación meteorológica y sensor de temperatura y humedad.

Tabla de anexos 4. Valores promedio de temperatura y humedad relativa registrados durante el proceso de impresión y los ensayos mecánicos.

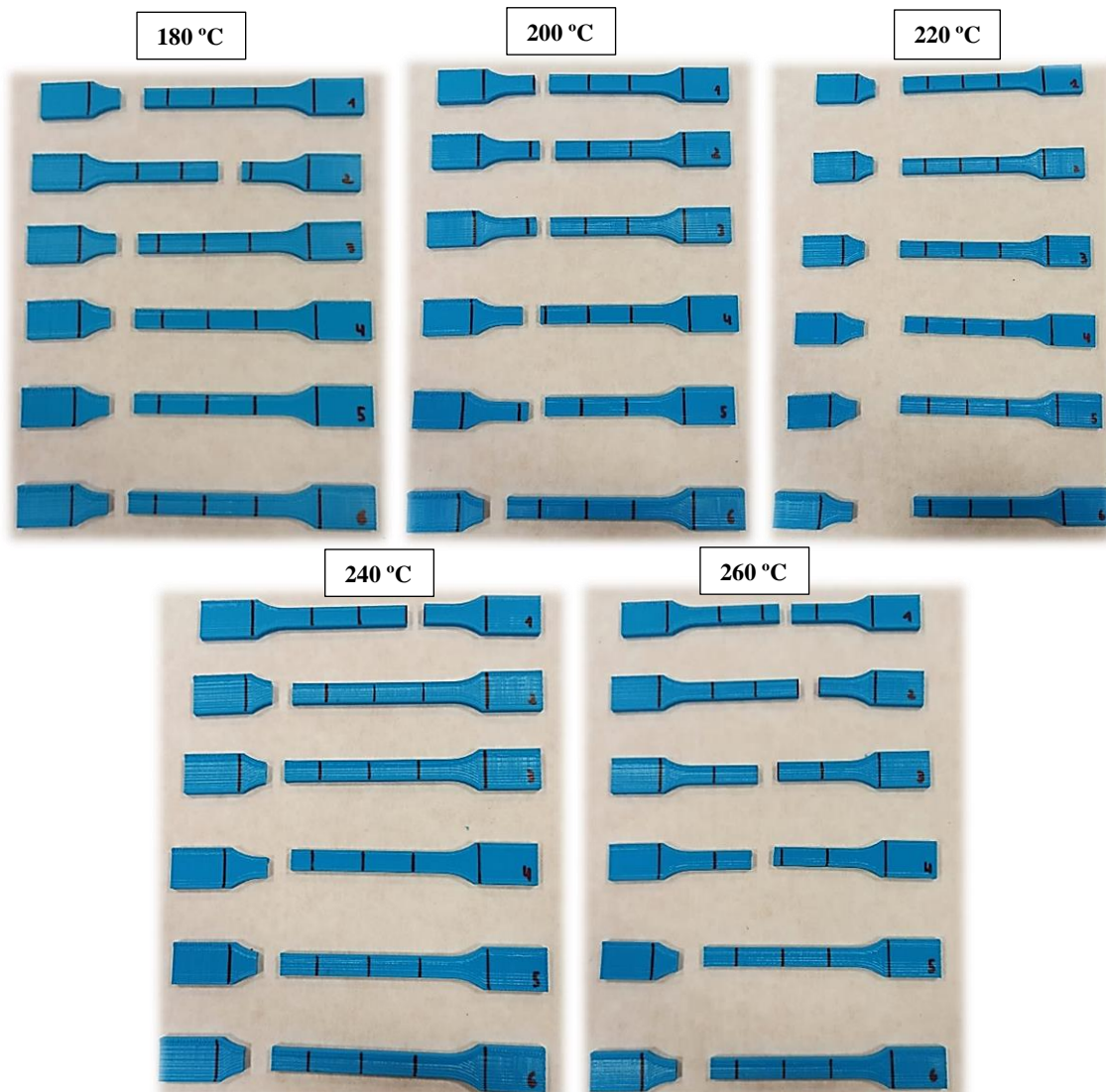
		180 °C		200 °C		220 °C		240 °C		260 °C		
		T (°C)	HR (%)	T (°C)	HR (%)	T (°C)	HR (%)	T (°C)	HR (%)	T (°C)	HR (%)	
Impresión 3D	XRD	16,8	50,0	-	-	-	-	-	-	17,5	46,0	
	Tracción	Eje X	17,8	64,2	17,4	63,7	17,6	59,1	17,1	59,8	16,9	74,0
		Eje Z	18,6	58,6	19,1	61,7	18,9	62,2	19,1	61,9	19,1	58,9
		50 % infill	-	-	18,0	59,8	-	-	-	-	-	-
	Compresión	18,1	61,7	17,2	65,3	17,8	62,9	17,6	62,4	17,6	55,0	
Flexión	17,7	59,2	17,1	59,3	17,0	60,3	17,3	64,0	17,6	62,1		
Ensayos mecánicos	Tracción	Eje X	18,1	66,3	17,9	61,7	17,6	61,0	17,7	60,0	17,1	72,1
		Eje Z	20,3	66,0	19,2	65,5	20,2	68,4	20,3	67,8	19,1	64,8
		50 % infill	-	-	17,5	65,0	-	-	-	-	-	-
	Compresión	17,9	63,0	18,4	62,0	17,7	55,0	17,7	42,3	18,0	57,7	
	Flexión	16,9	61,0	17,2	63,9	17,6	62,4	17,7	66,4	17,7	65,0	

18. Anexo VI: Fotografías

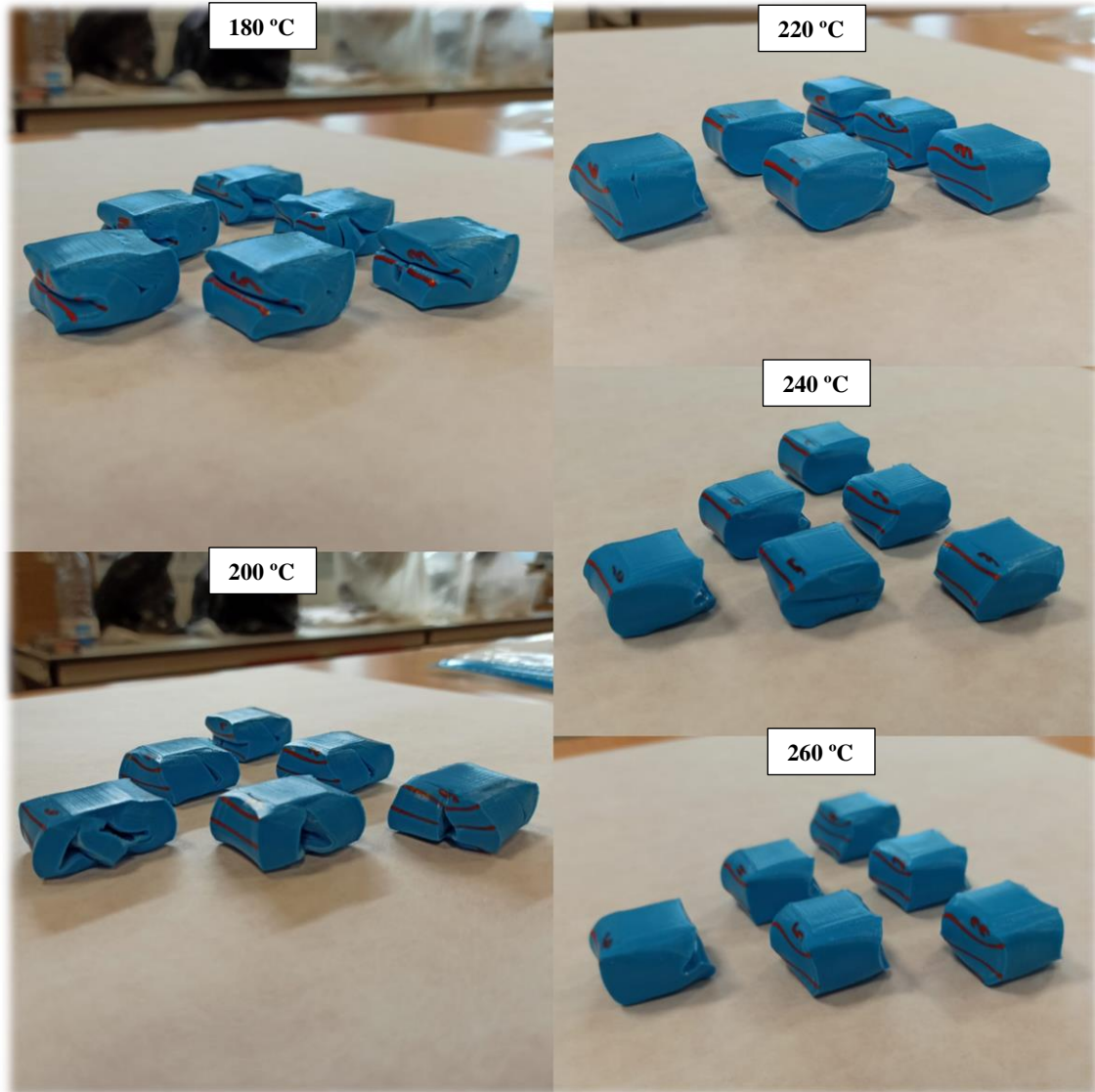
18.1 Tracción eje X



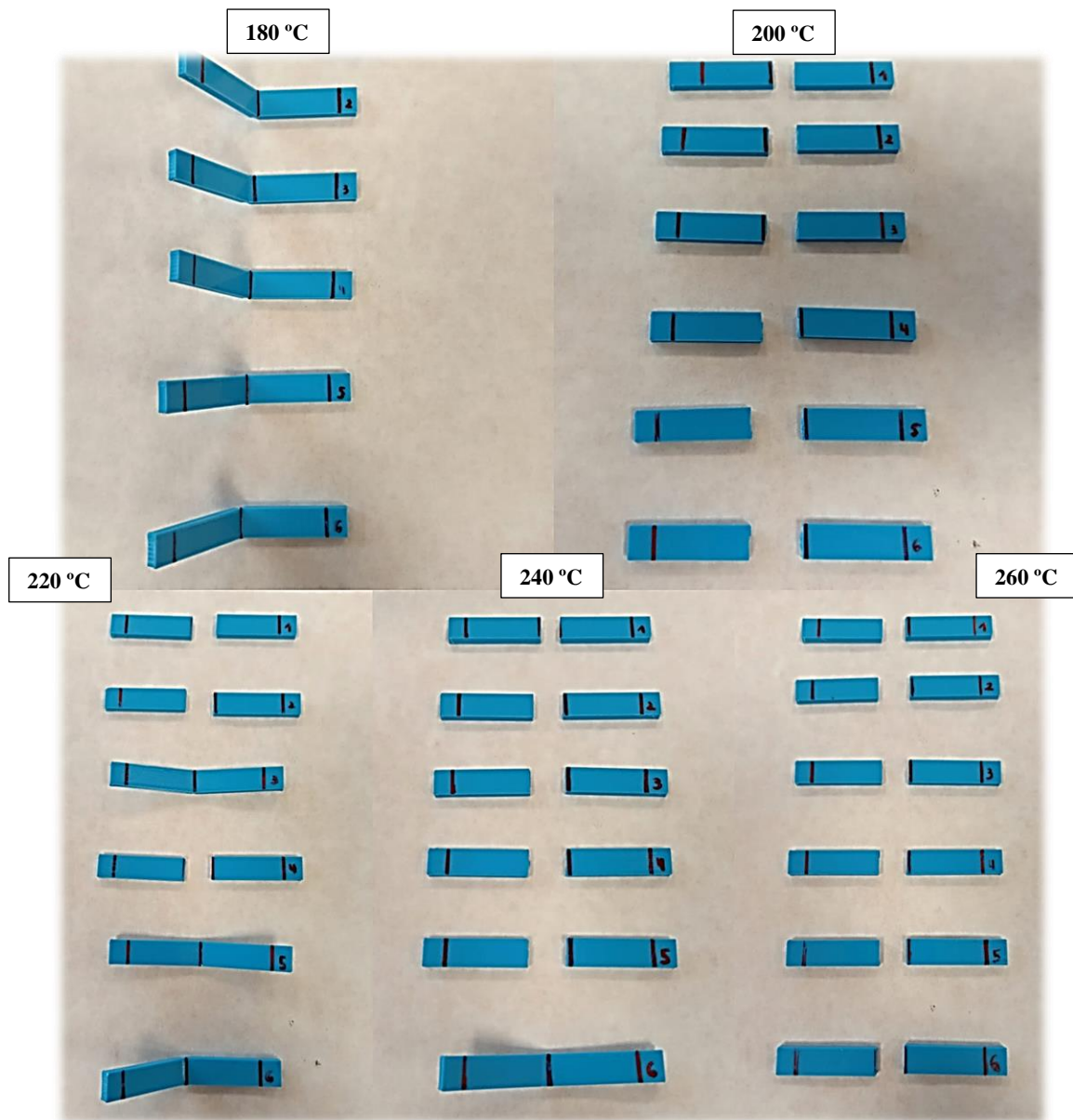
18.2 Tracción eje Z



18.3 Compresión



18.4 Flexión



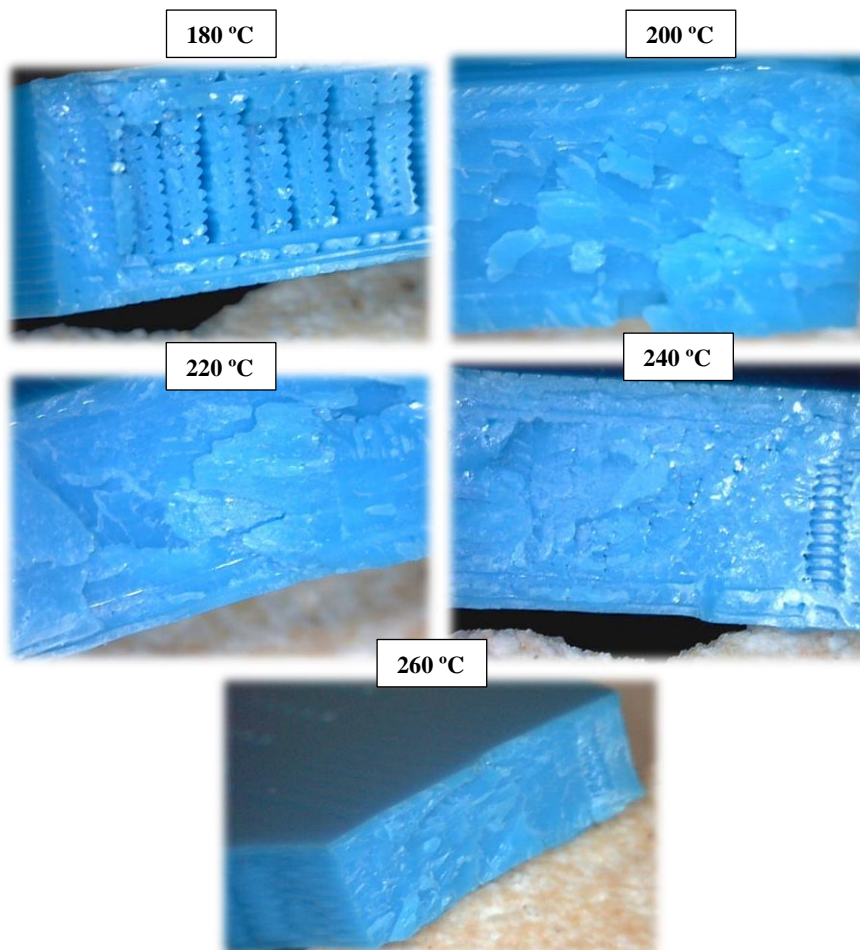
19. Anexo VII: Microfotografías

Para la realización de las microfotografías, se emplea el microscopio digital Dino-Lite AM-211 mostrado en la *Imagen 5*.

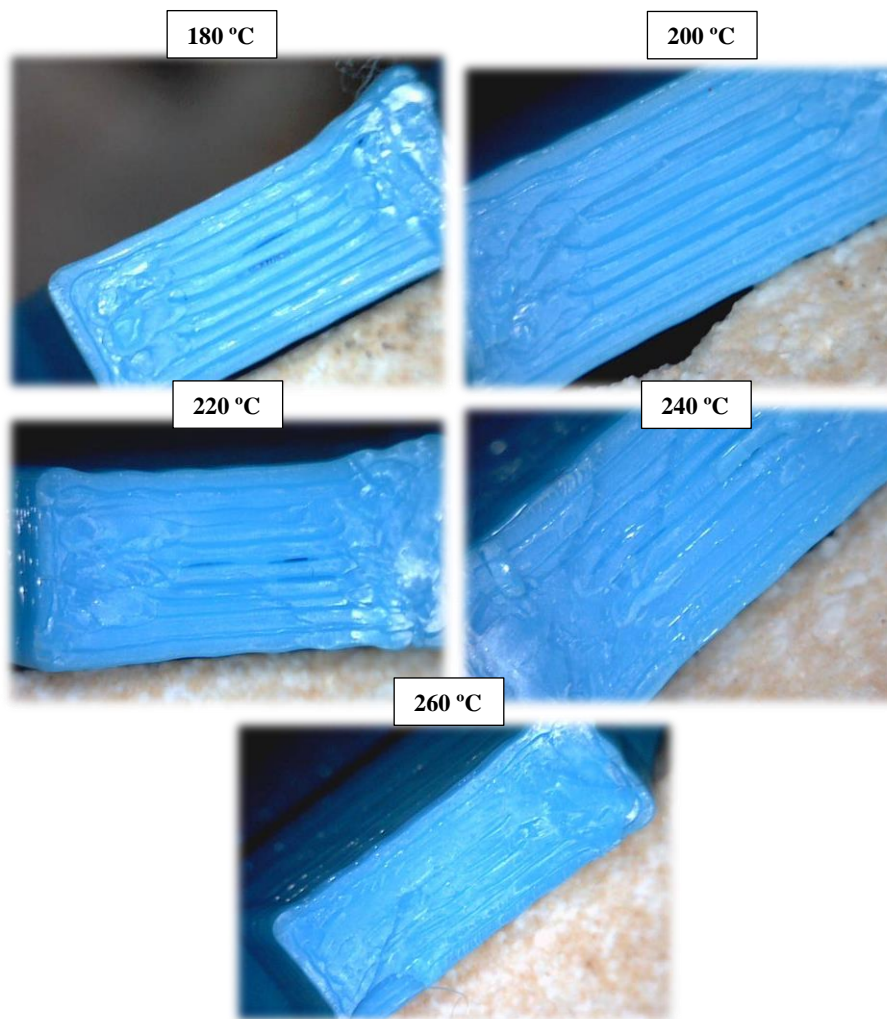


Imagen 5. Microscopio digital Dino-Lite AM-211.

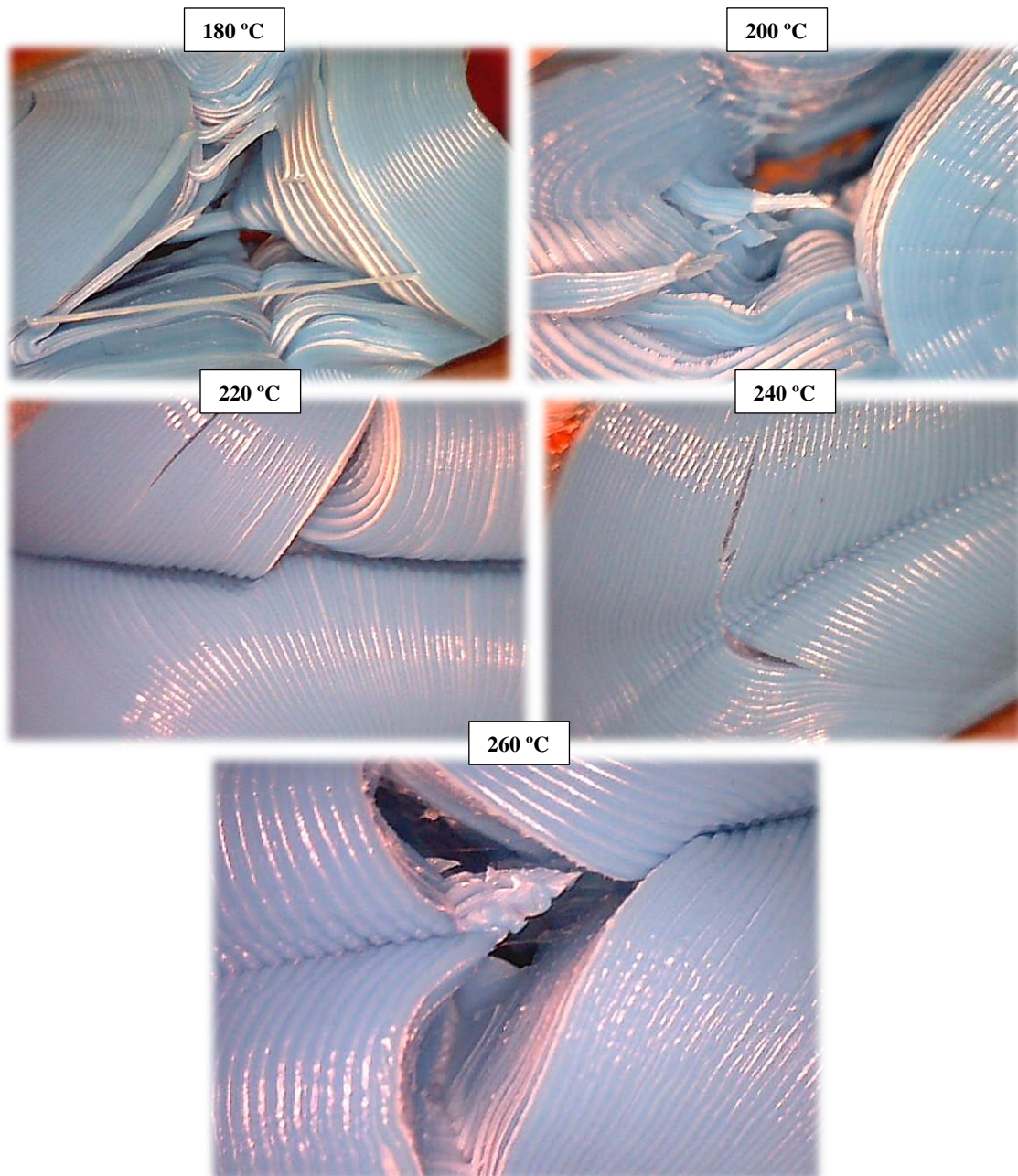
19.1 Tracción eje X



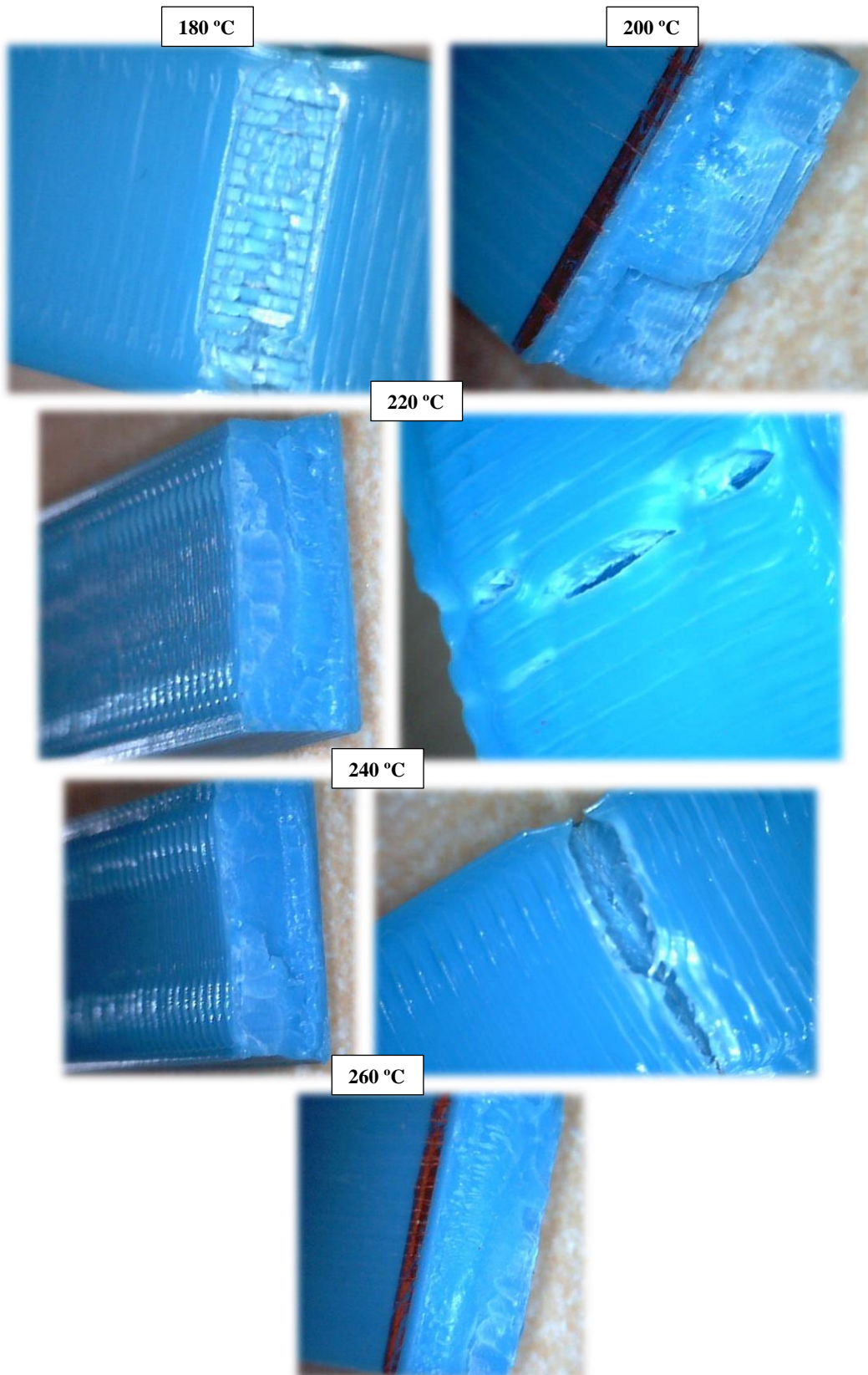
19.2 Tracción eje Z

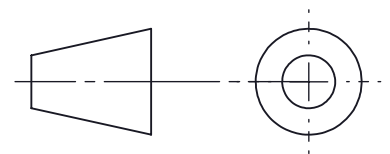
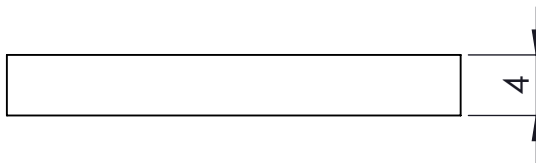
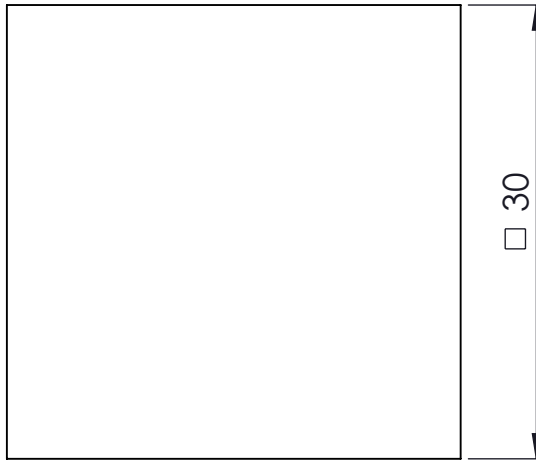


19.3 Compresión



19.4 Flexión





DISEÑO DE PROBETAS PARA IMPRESIÓN 3D MEDIANTE FDM

EDUARDO CABELLO CORREA

Id. s. normas:
UNE-EN-DIN



Universidad
de La Laguna

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

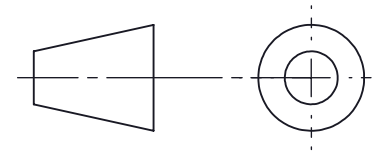
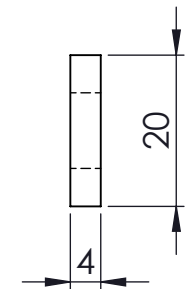
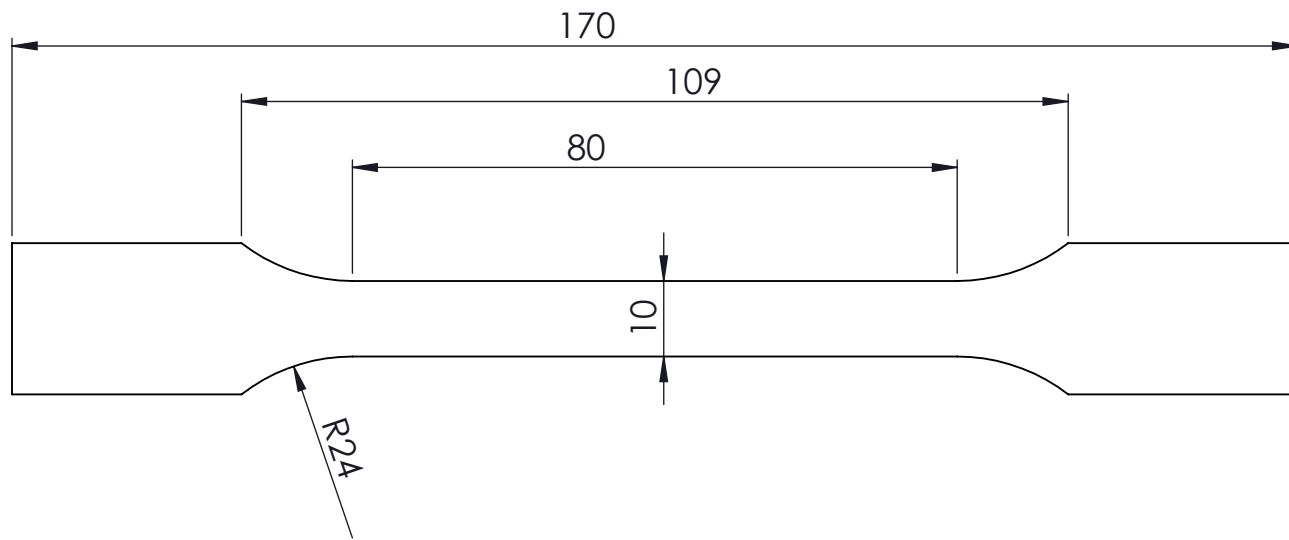
Grado Ingeniería Mecánica
Universidad de La Laguna

06/2021

ESCALA:
2:1

Pieza para análisis DRX

Nº PLANO:
1



DISEÑO DE PROBETAS PARA IMPRESIÓN 3D MEDIANTE FDM

EDUARDO CABELLO CORREA

Id. s. normas:

UNE-EN-DIN



Universidad
de La Laguna

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Grado Ingeniería Mecánica

Universidad de La Laguna

06/2021

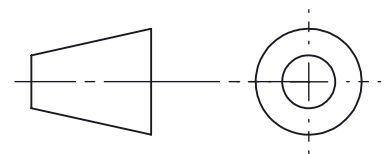
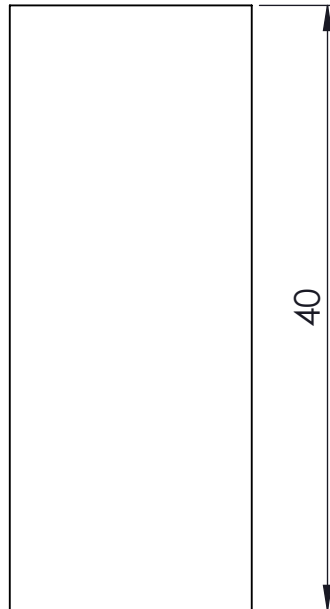
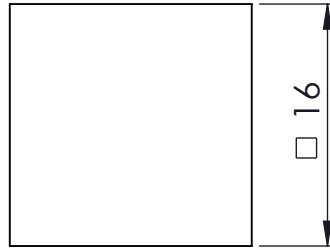
ESCALA:

1:1

PROBETA PARA TRACCIÓN

Nº PLANO:

2



DISEÑO DE PROBETAS PARA IMPRESIÓN 3D MEDIANTE FDM

EDUARDO CABELLO CORREA

Id. s. normas:
UNE-EN-DIN



Universidad
de La Laguna

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

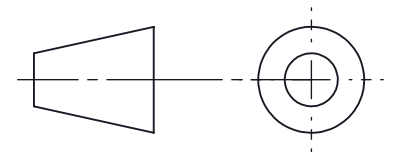
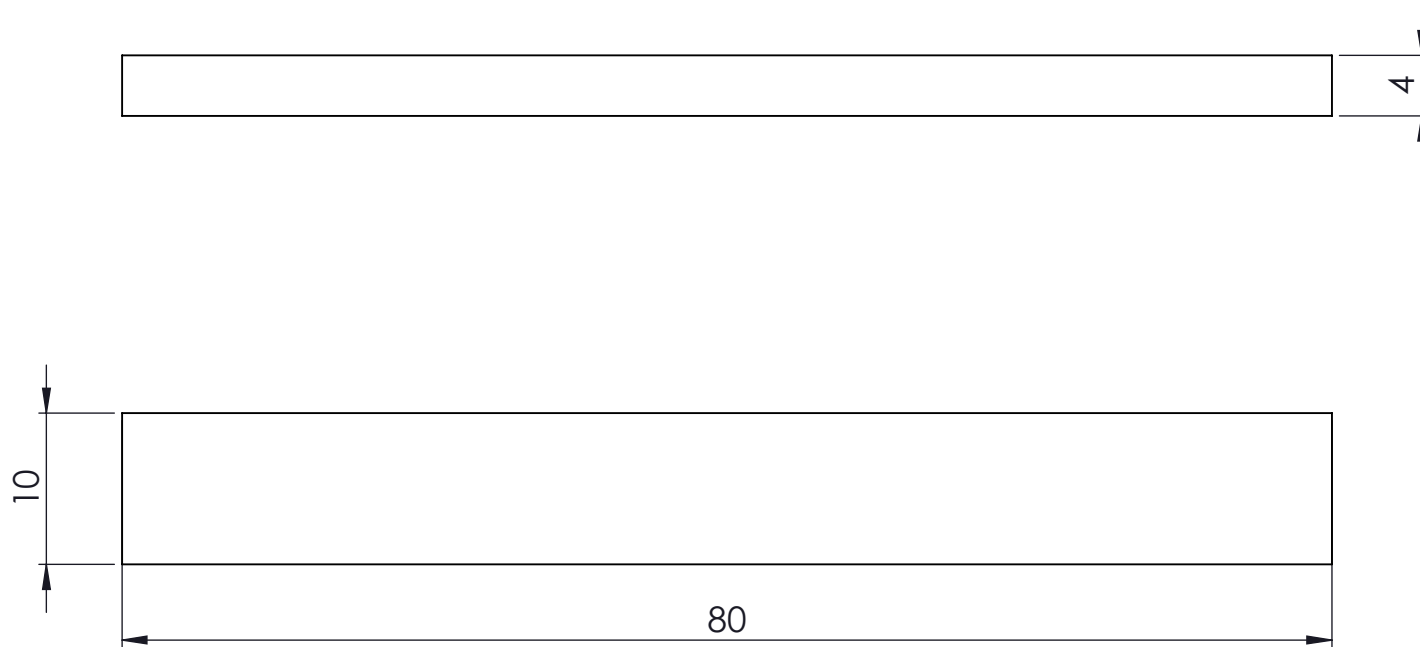
Grado Ingeniería Mecánica
Universidad de La Laguna

06/2021

ESCALA:
2:1

PROBETA PARA COMPRESIÓN

Nº PLANO:
3



DISEÑO DE PROBETAS PARA IMPRESIÓN 3D MEDIANTE FDM

EDUARDO CABELLO CORREA

Id. s. normas:
UNE-EN-DIN



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Grado Ingeniería Mecánica

Universidad de La Laguna

06/2021

ESCALA:

2:1

PROBETA PARA FLEXIÓN

Nº PLANO:

4