



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

**FABRICACIÓN DE ECOFILAMENTO CON LIGNINA
PARA IMPRESIÓN 3D**

Autor: Jaime Álvarez Fernández

Director: Eva Paz Jiménez/

Sara López de Armentia Hernández

Madrid

Julio de 2021

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

Fabricación de ecofilamento con lignina para impresión 3D

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2020/21 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Jaime Álvarez Fernández

Fecha: 07/07/2021

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Eva Paz Jiménez/Sara López

Fecha: 07/07/2021

de Armentia Hernández



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

**FABRICACIÓN DE ECOFILAMENTO CON LIGNINA
PARA IMPRESIÓN 3D**

Autor: Jaime Álvarez Fernández

Director: Eva Paz Jiménez/

Sara López de Armentia Hernández

Madrid

Julio de 2021

FABRICACIÓN DE ECOFILAMENTO CON LIGNINA PARA IMPRESIÓN 3D

Autor: Álvarez Fernández, Jaime.

Directores: Paz Jiménez, Eva y López de Armentia Hernández, Sara.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto tiene como objetivo la fabricación de un ecofilamento polimérico cargado con lignina para su utilización en impresión 3D mediante tecnología FDM y la caracterización de sus propiedades físicas y térmicas.

Palabras clave: Impresión 3D, FDM, PLA, Lignina, madera

1. Introducción

La impresión 3D es una tecnología disruptiva que cada vez está más presente en nuestro día a día, prueba de ello es el papel que ha jugado en la actual pandemia covid-19 en la producción de piezas para equipos de respiración, elaboración de equipos de protección individual, etc. ante los problemas que ha sufrido la cadena de suministros [1-3].

Esta tecnología permite fabricar un objeto en tres dimensiones mediante la superposición de capas sucesivas de un material, partiendo de un modelo digital diseñado mediante herramientas de modelado.

El número de aplicaciones de esta tecnología se encuentra en continua progresión, y cada vez son más los sectores en los que se utiliza este proceso de fabricación. Así, desde las aplicaciones iniciales en el ámbito sanitario con la producción de prótesis u órganos, se van uniendo nuevas aplicaciones en otros sectores como la aeronáutica, automoción, moda y calzado, construcción, joyería, alimentación, etc.

La impresión 3D está llamada a jugar un importante papel en el uso de nuevas tecnologías de fabricación en la llamada “Cuarta Revolución Industrial” o Industria 4.0.

2. Definición del proyecto

En el contexto de crecimiento continuo de la impresión 3D, se hace necesario encontrar materiales alternativos que permitan mejorar/mantener las propiedades de los materiales utilizados actualmente y, que, además, sean sostenibles.

Dentro de los posibles materiales alternativos se encuentra la utilización de polímeros naturales y renovables. Uno de estos polímeros es la lignina, muy abundante en la naturaleza. Se trata de un polímero orgánico que se encuentra en las plantas y aporta sobre todo rigidez a la pared celular, uniendo unas células con otras [4-5].

Este proyecto tiene como objetivo fabricar un filamento polimérico cargado con lignina para su utilización en impresión 3D. Como material principal se utilizará el PLA (Ácido Poliláctico), uno de los materiales más utilizados en la actualidad. Se utiliza en la

tecnología de impresión FDM (Modelado por Deposición Fundida), que actualmente es la que cuenta con una mayor base instalada.

3. Descripción del procedimiento experimental

Para llevar a cabo este Proyecto, se ha seguido el procedimiento experimental que aparece en la siguiente figura.

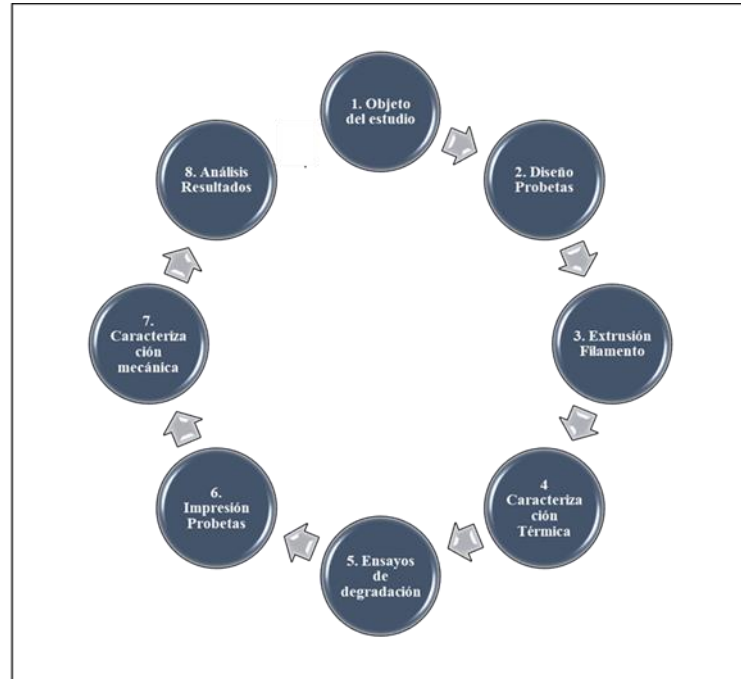


Ilustración 1. Esquema procedimiento experimental

- En primer lugar, se definen los ensayos a realizar para caracterizar el filamento a fabricar. Las características de las probetas de ensayo utilizadas en los ensayos mecánicos están normalizadas en la Norma Española UNE 116005:2012 [6].
- A continuación, se lleva a cabo la extrusión del filamento a fabricar y de los filamentos utilizados como referencia para comparar los resultados obtenidos en los ensayos.
- Una vez fabricados los filamentos se realizan los ensayos térmicos y de degradación frente al agua. En los primeros, se utiliza la técnica de calorimetría diferencial de barrido (DSC) que permite determinar transiciones térmicas de los materiales.
- En paralelo se lleva a cabo la impresión de las probetas para llevar a cabo los tres ensayos mecánicos definidos: tracción, flexión e impacto.
- Por último, se analizan los resultados comparándolos con los filamentos utilizados como referencia.

4. Resultados

En el proyecto se han caracterizado las propiedades del filamento fabricado con PLA y madera, con las propiedades del filamento de PLA comercial y el filamento elaborado de granza de PLA.

Se han realizado dos tipos de ensayos: ensayos mecánicos realizados con probetas normalizadas y ensayos de degradación de filamento.

- Ensayos realizados con las probetas normalizadas.

Se han fabricado las probetas en dos direcciones: longitudinal y transversal al eje principal de la probeta (plano XY). Cada ensayo se ha repetido en cinco ocasiones para cada una de las direcciones de construcción. Se han eliminado del análisis los resultados con valores atípicos para cuya identificación se ha utilizado el programa SPSS.

- En los ensayos a tracción se ha medido la fuerza, la carrera y el tiempo. A partir de estos datos se ha obtenido la tensión, la deformación y el módulo de Young.



Ilustración 2. Resultados ensayos a tracción.

- Ensayo a flexión se miden los mismos valores. A partir de esos datos se ha obtenido la tensión, la deformación y el módulo de flexión



Ilustración 3. Resultados ensayos a flexión.

- Ensayo a impacto: se ha medido la energía necesaria para romper la probeta.

- Ensayos de degradación de filamentos.

Para realizar estos ensayos se han utilizado filamentos de 7 cm de longitud. En el caso del filamento con madera, se ha enfriado el filamento a diferentes velocidades.

Bajo este epígrafe se han llevado a cabo los siguientes ensayos.

- Ensayo de tracción: se ha medido la fuerza, la carrera y el tiempo. A partir de estos datos se ha obtenido la tensión, la deformación y el módulo de Young.

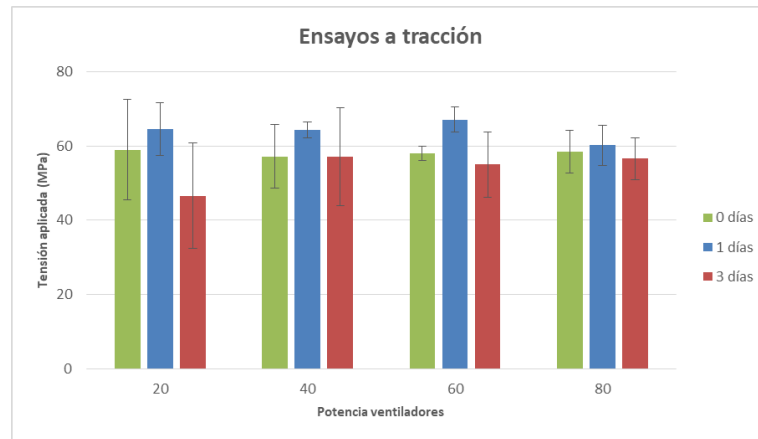


Ilustración 4, Ensayos a tracción según tiempo de degradación y velocidad de enfriamiento

- Ensayo de masa: mide la degradación del material y la cantidad de agua que puede absorber.
- Ensayo térmico: permite calcular la temperatura de transición vítrea, la temperatura de fusión del material y el porcentaje de cristalinidad.

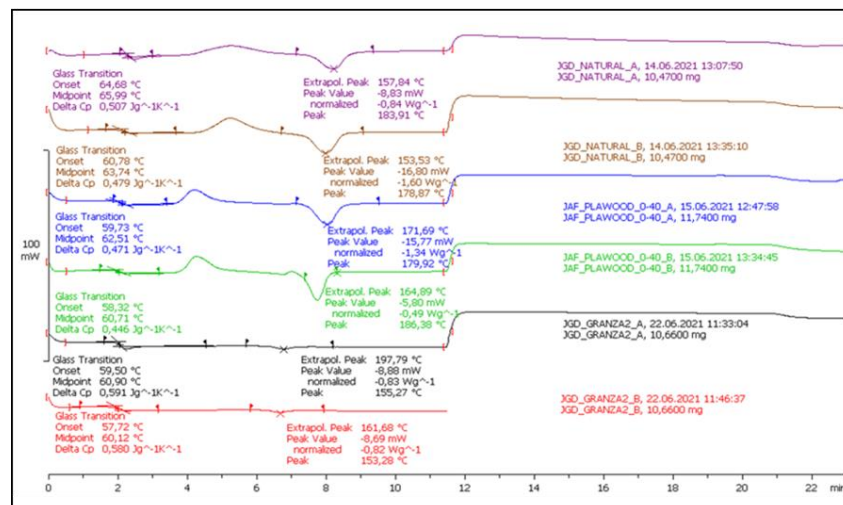


Ilustración 5. Gráfica comparación ensayo térmico

5. Conclusiones

Las conclusiones que se obtienen del análisis de los resultados de los distintos ensayos son las siguientes:

- Ensayos realizados con las probetas normalizadas.

Se concluye que la adición de madera al PLA no mejora ni mantiene las propiedades mecánicas (tracción, flexión e impacto). Se comprueba que la dirección de fabricación en la posición 1 ofrece mejor respuesta a los ensayos a tracción, mientras que, en los ensayos a flexión, la respuesta es mejor en las probetas fabricadas en la posición 2.

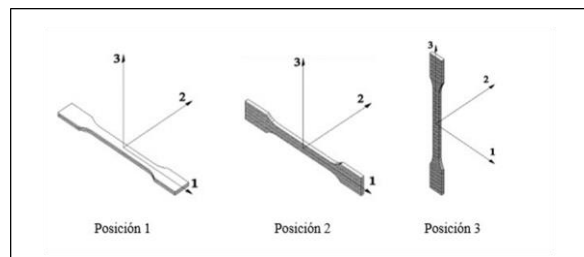


Ilustración 6. Probetas direcciones de impresión [6]

- Ensayos de degradación de filamentos.

No se observa una variación significativa de la masa. El agua absorbida es parcialmente eliminada, siendo la absorción mayor en el filamento de PLA con madera.

En los ensayos de tracción, tampoco se observa mejora en el filamento que contiene madera. Se observa que, en el primer día, el material se plastifica adquiriendo cierta rigidez lo que le permite soportar mayores esfuerzos.

En cuanto a los ensayos térmicos, no se producen variaciones significativas en la temperatura de transición vítrea pero la temperatura de fusión es sensiblemente menor en el filamento de PLA de granza. En cuanto al porcentaje de cristalinidad, éste es considerablemente mayor en el filamento de madera debido al agua que ésta absorbe.

6. Referencias

- [1] Hervás-Gómez, C., Román Graván, P., Domínguez-González, M. Á, & Reina Parrado, M. (2020). Diseño E impresión En 3d DE protectores de Pantallas FACIALES por docentes universitarios Para proteger AL personal sanitario Ante el Covid-19. IJERI: International Journal of Educational Research and Innovation, (15), 35-56. doi:10.46661/ijeri.4970
- [2] Pedraja, J., Maestre, J., Rabanal, J., Morales, C., Aparicio, J., & Del Moral, I. (2020). Papel de la impresión 3D para la Protección de los profesionales del área Quirúrgica Y

críticos en la pandemia DE COVID-19. Revista Española De Anestesiología Y Reanimación, 67(8), 417-424. doi:10.1016/j.redar.2020.07.011

- [3] La Impresión 3d brilla EN TIEMPOS DE Pandemia | TENDENCIAS... (n.d). Retrieved February 11, 2021, from <https://www.computerworld.es/tendencias/la-impresion-3d-brilla-en-tiempos-de-pandemia>
- [4] What is 3d printing? The definitive guide. (n.d). Retrieved February 11, 2021, from <https://www.3dhubs.com/guides/3d-printing/>
- [5] Jiménez Calzado, M. (n.d). FABRICACIÓN ADITIVA Tecnologías actuales y tendencias.
- [6] Norma Española UNE 116005:2012.

MANUFACTURE OF ECOFILAMENT WITH LIGNIN FOR 3D PRINTING

Author: Álvarez Fernández, Jaime.

Supervisors: Paz Jiménez, Eva y López de Armentia Hernández, Sara.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

ABSTRACT

This project aims to manufacture a polymeric ecofilament loaded with lignin for 3D printing purposes using FDM technology and the characterization of its physical and thermal properties.

Keywords: 3D printing, FDM, PLA, Lignin, Wood

1. Introduction

3D printing is a disruptive technology that is increasingly present in our day to day, proof of this is the role it has played in the current covid-19 pandemic in the production of parts for respiratory equipment, manufacture of protective individual equipment, etc. to the problems that the supply chain has suffered [1-3].

This technology makes possible to manufacture an object in three dimensions by superposition successive layers of a material, starting from a digital model designed using modeling tools.

The number of applications of this technology is in continuous progression, and more and more sectors are using this manufacturing process. Thus, from the initial applications in the health field with the production of prostheses or organs, new applications are joining in other sectors such as aeronautics, automotive, fashion and footwear, construction, jewelry, food, etc.

3D printing will play an important role in the use of new manufacturing technologies in the so-called "Fourth Industrial Revolution" or Industry 4.0.

2. Project definition

Due to the continuous growth of 3D printing, it is necessary to find alternative materials that allow to improve / maintain the properties of the materials currently used and, which are also sustainable.

Among the possible alternative solutions is the use of natural and renewable polymers materials. One of these polymers is lignin, which is very abundant in nature. It is an organic polymer which is in plants and above all provides rigidity to the cell wall, joining it with others cells [4-5].

This project aims to manufacture a polymeric filament loaded with lignin for use in 3D printing. PLA (Polylactic Acid) will be used as the main material, one of the most widely

used materials today. It is used in FDM (Fused Deposition Modeling) printing technology, which currently has the largest installed base.

3. Description of the experimental procedure

To carry out this Project, the experimental procedure that appears in the following figure has been followed.

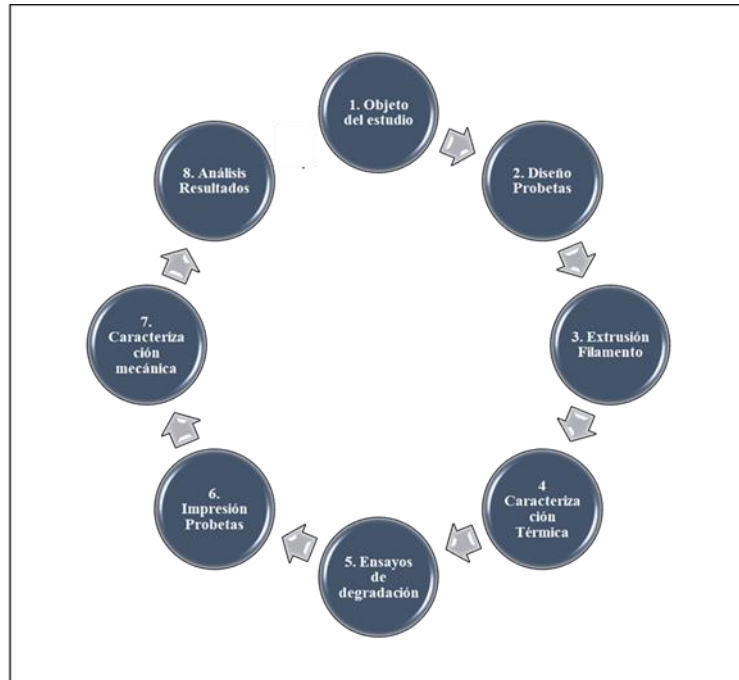


Ilustración 7. Experimental procedure

- First of all, the test that are used to characterize the filament are defined. The characteristics of the specimens used in mechanical test are standardized in the Spanish law UNE 116005:2012 [6].
- Then, the extrusion of the filament manufactured is carried out in order to compare them with the results obtained in the tests of the filaments used as reference.
- Once the filaments are manufactured, the thermal and water degradation tests are carried out. The differential scanning calorimetry (DSC) technique is used to determine thermal transitions of materials.
- The printing of the specimens is carried out to carry out the three defined mechanical tests: traction, bending and impact.
- Finally, the results are analyzed by comparing them with the filaments used as a reference.

4. Results

The properties of the filament made with PLA and wood have been characterized, with the properties of the commercial PLA filament and the filament made of PLA pellets.

Two types of tests have been carried out: mechanical tests carried out with standardized specimens and filament degradation tests.

- Tests carried out with standard specimens.

The specimens have been manufactured in two directions: longitudinal and transverse to the main axis of the specimen (XY plane). Each test has been repeated five times for each of the construction directions. Outlier results for which the SPSS program has been used have been removed from the analysis.

- In the tensile tests, force, stroke and time have been measured. From these data, the stress, strain and Young's modulus have been obtained.



Ilustración 8. Tensile test results.

- In bending test the same values are measured. From these data, the stress, deformation and flexural modulus have been obtained.



Ilustración 9. Bending test results.

- Impact test: the energy required to break the specimen has been measured.

- Filament degradation tests.

To carry out these tests, filaments of 7 cm in length have been used. In the case of the filament with wood, the filament has been cooled at different speeds.

Under this heading the following tests have been carried out.

- Tensile test: force, stroke and time have been measured. From these data, the stress, strain and Young's modulus have been obtained.

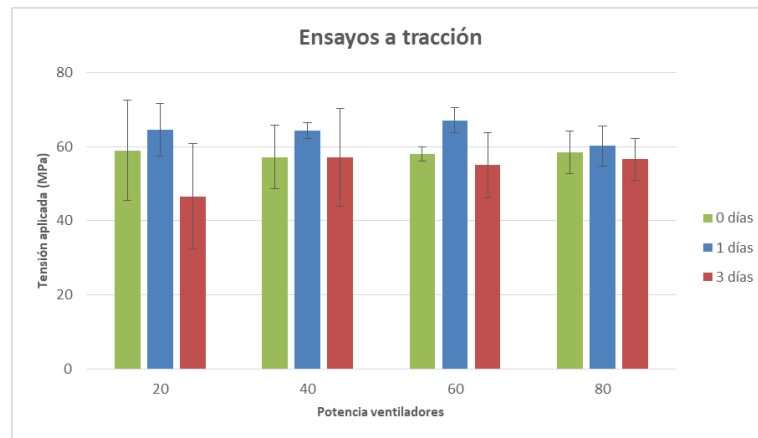


Ilustración 10, Tensile tests according to degradation time and cooling speed

- Mass test: measures the degradation of the material and the amount of water it can absorb.
- Thermal test: allows calculating the glass transition temperature, the melting temperature of the material and the percentage of crystallinity.

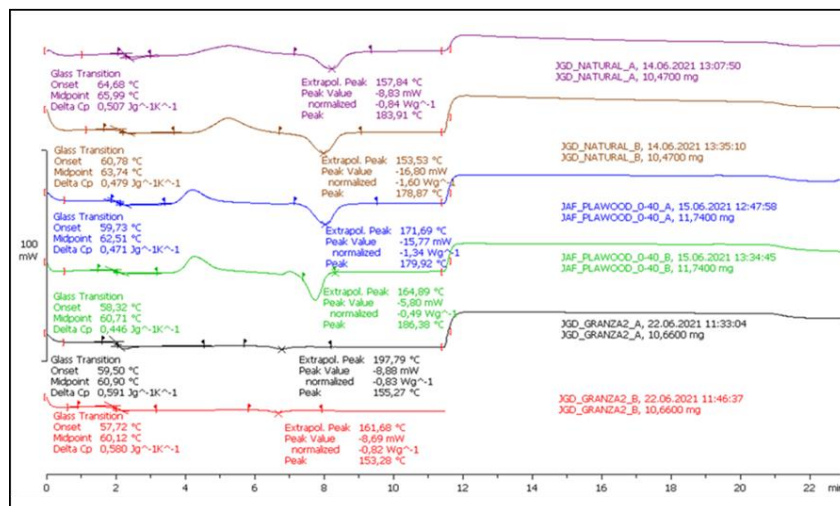


Ilustración 11. Thermal test comparison graph

5. Conclusions

The conclusions obtained from the analysis of the results of the different trials are:

- Tests carried out with the standardized specimens.

In conclusion, the addition of wood to PLA does not improve or maintain the mechanical properties (traction, bending and impact). It is found that the manufacturing direction in position 1 offers a better response to tensile tests, while, in flexural tests, the response is better in the specimens manufactured in position 2.

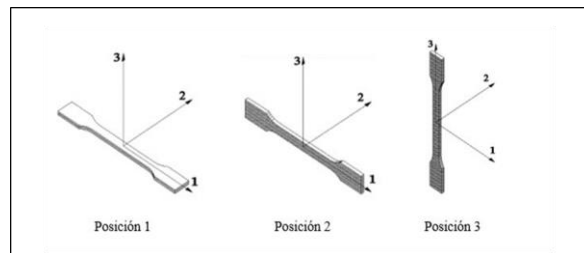


Ilustración 12. Specimen printing directions[6]

- Filament degradation tests.

No significant variation in mass is observed. The absorbed water is partially eliminated, with the highest absorption being in the PLA filament with wood.

In tensile tests, no improvement is observed in the filament containing wood either. It is observed that, on the first day, the material is plasticized, acquiring a certain rigidity, which allows it to withstand greater efforts.

Regarding the thermal tests, there are no significant variations in the glass transition temperature but the melting temperature is significantly lower in the pellet PLA filament. Regarding the percentage of crystallinity, it is considerably higher in the wood filament due to the water that it absorbs.

6. References

- [1] Hervás-Gómez, C., Román Graván, P., Domínguez-González, M. Á, & Reina Parrado, M. (2020). Diseño E impresión En 3d DE protectores de Pantallas FACIALES por docentes universitarios Para proteger AL personal sanitario Ante el Covid-19. IJERI: International Journal of Educational Research and Innovation, (15), 35-56. doi:10.46661/ijeri.4970
- [2] Pedraja, J., Maestre, J., Rabanal, J., Morales, C., Aparicio, J., & Del Moral, I. (2020). Papel de la impresión 3D para la Protección de los profesionales del área Quirúrgica Y

críticos en la pandemia DE COVID-19. Revista Española De Anestesiología Y Reanimación, 67(8), 417-424. doi:10.1016/j.redar.2020.07.011

- [3] La Impresión 3d brilla EN TIEMPOS DE Pandemia | TENDENCIAS... (n.d). Retrieved February 11, 2021, from <https://www.computerworld.es/tendencias/la-impresion-3d-brilla-en-tiempos-de-pandemia>
- [4] What is 3d printing? The definitive guide. (n.d). Retrieved February 11, 2021, from <https://www.3dhubs.com/guides/3d-printing/>
- [5] Jiménez Calzado, M. (n.d). FABRICACIÓN ADITIVA Tecnologías actuales y tendencias.
- [6] Norma Española UNE 116005:2012.

Agradecimientos

En primer lugar, quería dar las gracias a mi familia que siempre han estado ayudándome y apoyándome durante todo mi paso por ICAI. Desde pequeño han logrado transmitirme los valores necesarios para estudiar una carrera así.

También quería dar las gracias a mis dos directoras de proyecto, Eva y Sara, por brindarme la oportunidad de trabajar en este proyecto. Me parecen dos excelentes profesionales que me han guiado a lo largo de todo el proyecto, animándome en los momentos que no salía nada, y ayudándome siempre que lo necesitaba.

Por último, no quiero olvidar a todos mis amigos que han estado acompañándome a lo largo de estos años. En especial, a Juan Diego que ha estado becado conmigo en este proyecto y que sin su ayuda habría sido mucho más duro.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	7
1.1 Motivación del proyecto.....	7
1.2 Objetivo del proyecto	9
1.3 Herramientas utilizadas	10
1.4 Organización del documento.....	11
Capítulo 2. Estado de la Cuestión	13
2.1 Impresión 3D: Situación actual y perspectivas	13
2.2 Aplicaciones de la impresión 3D.....	14
2.3 Métodos y materiales de impresión.....	18
2.4 Mejora de las propiedades del material PLA	20
2.5 La lignina: Aplicaciones en la impresión 3D	21
Capítulo 3. Descripción de las Tecnologías.....	23
3.1 Impresión 3D.....	23
3.1.1 Origen y evolución de la Impresión 3D.....	23
3.1.2 Tecnologías de impresión.....	27
3.1.3 Materiales de impresión	30
3.1.4 Ventajas e inconvenientes de la impresión 3D.....	33
3.2 Tecnología de impresión FDM.....	36
3.2.1 Funcionamiento.....	36
3.2.2 Consideraciones de diseño.....	38
3.2.3 Materiales disponibles.....	40
Capítulo 4. Procedimiento experimental	44
4.1 Objeto del estudio.....	45
4.2 Diseño probetas	45
4.2.1 Dirección fabricación probetas.....	47
4.2.2 Preparación para la impresión de las probetas mediante FDM.....	48
4.3 Extrusión filamento	49
4.4 Caracterización térmica.....	50
4.5 Ensayos de degradación	51

4.6	Impresión probetas	52
4.6.1	<i>Calibración y puesta a punto de la impresora</i>	<i>53</i>
4.7	Caracterización mecánica del filamento.....	53
4.7.1	<i>Ensayo a tracción.....</i>	<i>54</i>
4.7.2	<i>Ensayo a flexión</i>	<i>55</i>
4.7.3	<i>Ensayo a impacto</i>	<i>56</i>
Capítulo 5. Análisis de resultados		57
5.1	Optimización de los parámetros de extrusión	57
5.2	Resultados ensayos probetas impresas fabricadas con PLA	63
5.2.1	<i>Resultados ensayos probetas fabricadas con PLA comercial.....</i>	<i>64</i>
5.2.2	<i>Resultados ensayos probetas fabricadas con granza de PLA.....</i>	<i>70</i>
5.2.3	<i>Comparativa ensayos mecánicos probetas fabricadas con PLA.....</i>	<i>76</i>
5.3	Resultados ensayos probetas pla + madera	78
5.3.1	<i>Comparativa ensayos mecánicos probetas fabricadas con PLA + madera.....</i>	<i>82</i>
5.4	Ensayos de degradación de los filamentos extruidos	84
5.4.1	<i>Ensayo variación de la masa.....</i>	<i>84</i>
5.4.2	<i>Ensayo a tracción.....</i>	<i>89</i>
5.4.3	<i>Ensayo térmico</i>	<i>94</i>
Capítulo 6. Conclusiones y Trabajos futuros		99
6.1	Ensayos mecánicos probetas fabricadas con PLA.....	99
6.2	Ensayos mecánicos probetas fabricadas con PLA + madera.....	100
6.3	Ensayos de degradación	100
6.3.1	<i>Variación de la masa.....</i>	<i>101</i>
6.3.2	<i>Ensayo a tracción.....</i>	<i>101</i>
6.3.3	<i>Ensayo térmico</i>	<i>101</i>
6.4	Líneas de trabajo futuras	102
Capítulo 7. Bibliografía.....		103

Índice de figuras

Figura 1. Evolución uso de la tecnología 3D [6].....	14
Figura 2. Distribución de la fabricación aditiva por sectores de actividad [9].....	15
Figura 3. Prótesis de mano fabricada con una impresora doméstica.....	15
Figura 4. Primer coche fabricado mediante impresora 3D.....	16
Figura 5. Primer avión impreso en 3D.....	17
Figura 6. Uso de la impresión D en el sector de la alimentación, joyería y enseñanza.....	17
Figura 7. Utilización de las tecnologías de impresión 3D [6].....	18
Figura 8. Uso de los materiales de impresión 3D [6].....	19
Figura 9. Evolución del uso de materiales 3D periodo 2015-2020 [6].....	19
Figura 10. Evolución impresión 3D.....	24
Figura 11. RepRap [5].....	26
Figura 12. Evolución impresora 3D: 1984 vs 2015 [6].....	26
Figura 13. Comparativa coste unitario por método de fabricación [24].....	36
Figura 14. Sistemas de extrusión directa y Bowden [28].....	37
Figura 15. Warping de una pieza fabricada mediante FDM [27].....	39
Figura 16. Clasificación materiales usados en la tecnología FDM [27].....	40
Figura 17. Esquema procedimiento experimental.....	44
Figura 18. Probeta a tracción.....	46
Figura 19. Probeta a flexión/impacto.....	47
Figura 20. Direcciones de impresión.....	48
Figura 21. Extrusora 3Devo Composer 350.....	49
Figura 22. Shr3d Plastic Recycler.....	50
Figura 23. Ensayo térmico.....	51
Figura 24. Impresora Geeetech A20m.....	52
Figura 25. Impresora Prusa i3 mk3s.....	52
Figura 26. Gráfica diámetro de impresión granza de PLA.....	59

Figura 27. Posibles problemas y soluciones a las burbujas de aire [14]	61
Figura 28. Gráfica diámetro de impresión PLA reciclado.....	61
Figura 29. Gráfica diámetro de impresión PLA madera	62
Figura 30. Probeta tracción filamento comercial.....	64
Figura 31. Probeta flexión e impacto filamento comercial	64
Figura 32. Gráfica tensión-deformación ensayos tracción filamento comercial	67
Figura 33. Gráfica tensión-deformación ensayos flexión filamento comercial.....	69
Figura 34. Probeta tracción filamento granza de PLA	71
Figura 35. Probeta flexión e impacto filamento granza de PLA	71
Figura 36. Gráfica tensión-deformación ensayos tracción filamento granza PLA.....	73
Figura 37. Gráfica tensión-deformación ensayos flexión filamento granza PLA.....	75
Figura 38. Comparativa ensayos tracción PLA vs Granza de PLA.....	77
Figura 39. Comparativa ensayos flexión PLA vs Granza de PLA	78
Figura 40. Gráfica tensión-deformación ensayos tracción PLA+Madera	80
Figura 41. Gráfica tensión-deformación ensayos flexión PLA + Madera.....	81
Figura 42. Comparativa ensayos tracción PLA / granza de PLA / PLA + madera	83
Figura 43. Comparativa ensayos flexión PLA / granza de PLA / PLA + madera.....	83
Figura 44. Comparativa del porcentaje de agua absorbida por los filamentos.....	88
Figura 45. Comparativa variación de masa degrada.....	88
Figura 46. Modificación filamento de PLA + madera tras el ensayo.....	89
Figura 47. Ensayos a tracción según tiempo de degradación y velocidad de enfriamiento	93
Figura 48. Gráfica térmica filamento usado en la impresión	94
Figura 49. Gráfica comparación ensayo térmico.....	96

Índice de tablas

Tabla 1. Ventajas/inconvenientes tecnología FDM.....	27
Tabla 2. Ventajas/inconvenientes tecnología MJM / IJP.	28
Tabla 3. Ventajas/inconvenientes tecnología 3DP.	28
Tabla 4. Ventajas/inconvenientes tecnología SLA.....	29
Tabla 5. Ventajas/inconvenientes tecnología SLS.	29
Tabla 6. Ventajas/inconvenientes tecnología SLM.....	30
Tabla 7. Clasificación tecnología/tipo de material.	31
Tabla 8. Clasificación tecnología/estado base del material.	32
Tabla 9. Ventajas/inconvenientes material PLA	41
Tabla 10. Ventajas/inconvenientes material ABS	41
Tabla 11. Ventajas/inconvenientes material Nylon.....	42
Tabla 12. Ventajas/inconvenientes material PETG.....	42
Tabla 13. Ventajas/inconvenientes material TPU	42
Tabla 14. Ventajas/inconvenientes material PEI.....	43
Tabla 15. Medidas probeta tracción	46
Tabla 16. Medidas probeta flexión/impacto	47
Tabla 17. Parámetros de impresión granza de PLA	58
Tabla 18. Parámetros de impresión PLA con madera	63
Tabla 19. Resultados ensayos tracción filamento comercial.....	65
Tabla 20. Valores medios y desviación típica ensayos tracción filamento comercial	66
Tabla 21. Resultados ensayos flexión filamento comercial	68
Tabla 22. Valores medios y desviación típica ensayos flexión filamento comercial	68
Tabla 23. Resultados ensayos impacto filamento comercial.....	70
Tabla 24. Valores medios y desviación típica ensayos a impacto filamento comercial.....	70
Tabla 25. Resultados ensayos tracción filamento granza PLA	72
Tabla 26. Valores medios y desviación típica ensayos tracción filamento granza PLA.....	72

Tabla 27. Resultados ensayos flexión filamento granza PLA	74
Tabla 28. Valores medios y desviación típica ensayos flexión filamento granza PLA.....	74
Tabla 29. Resultados ensayos impacto filamento granza PLA	76
Tabla 30. Valores medios y desviación típica ensayos a impacto filamento granza PLA .	76
Tabla 31. Resultados ensayos tracción filamento PLA+Madera.....	79
Tabla 32. Valores medios y desviación típica ensayos tracción PLA+Madera.....	79
Tabla 34. Resultados ensayos flexión filamento PLA + madera.....	80
Tabla 35. Valores medios y desviación típica ensayos flexión filamento PLA+Madera....	81
Tabla 37. Resultados ensayos impacto filamento PLA + madera	82
Tabla 38. Valores medios y desviación típica ensayos a impacto filamento PLA + madera	82
Tabla 39. Variación de la masa periodo un día	85
Tabla 40. Variación de la masa periodo tres días	86
Tabla 41. Variación de la masa periodo siete días	87
Tabla 43. Ensayos a tracción sin degradación.....	90
Tabla 44. Ensayos a tracción con un día de degradación:	91
Tabla 45. Ensayos a tracción con tres días de degradación.....	92
Tabla 46. Comparativa ensayo térmico de los filamentos sin envejecer.....	96
Tabla 47. Comparativa ensayo térmico filamento de PLA cn madera con diferentes degradaciones	97

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

La impresión 3D es una tecnología disruptiva que cada vez está más presente en nuestro día a día, prueba de ello es el papel que ha jugado en la fabricación de piezas para equipos de respiración, equipos de protección individual, etc. ante los problemas que sufrió la cadena de suministros al inicio de la pandemia covid-19 [1-3].

Esta tecnología permite fabricar un objeto en tres dimensiones mediante la superposición de capas sucesivas de un material, partiendo de un modelo digital diseñado previamente mediante herramientas de modelado.

En el ámbito industrial recibe el nombre de fabricación aditiva, ya que la pieza se fabrica partiendo de cero a diferencia de los procesos de fabricación tradicionales, como son la fabricación sustractiva (mecanizado por Control Numérico por Computadora) o la fabricación formativa (modelado por inyección).

El número de posibles aplicaciones de esta tecnología se encuentra en continua progresión y cada vez son más los sectores en los que está presente. Así, a las aplicaciones iniciales en el ámbito sanitario con la producción de prótesis u órganos, se van uniendo nuevas aplicaciones en otros sectores de actividad como la aeronáutica, la automoción, la moda y el calzado, la construcción, la educación, la joyería, la alimentación, etc.

La impresión 3D está llamada a jugar un importante papel en el uso de nuevas tecnologías de fabricación en la llamada “Cuarta Revolución Industrial” o Industria 4.0.

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

En el contexto actual de crecimiento continuo del uso de la impresión 3D, debido en gran parte a la popularización de esta tecnología, se hace necesario encontrar materiales de impresión alternativos que permitan mantener o mejorar las propiedades de los actuales con

el objeto de incrementar su aplicabilidad, reducir su coste y que, además, sean respetuosos con el medio ambiente.

Este proyecto pretende dar respuesta a esta necesidad haciendo foco en la tecnología de impresión más utilizada, la tecnología de impresión por inyección/extrusión FDM (Modelado por Deposición Fundida).

Como material de partida se ha elegido PLA (Ácido Poliláctico), ya que es el material más utilizado por esta tecnología de impresión. Se trata de un termoplástico biodegradable muy utilizado para construir envases para su uso en la industria alimentaria. Sus limitadas propiedades físicas y térmicas restringen su utilización a la realización de prototipos.

El material seleccionado para mejorar las propiedades del PLA es la lignina, una sustancia de origen vegetal muy abundante en la naturaleza. Posee unas buenas propiedades físicas y térmicas aportando sobre todo rigidez a la pared celular de las plantas. Se trata de un material de bajo coste y de carácter ecológico.

Los beneficios que se esperan alcanzar con la ejecución de este proyecto son los siguientes:

- Incrementar el número de posibles aplicaciones de piezas fabricadas a partir de filamento de PLA.

La mejora de las propiedades físicas de las piezas elaboradas con filamento PLA mediante la adición de lignina, permitiría incorporar esta tecnología en otros ámbitos de aplicación.

- Reducir el impacto ambiental que supone la fabricación de materiales de impresión 3D no biodegradables.

El incremento en el uso de filamentos elaborados a partir de PLA y lignina, mejorando o manteniendo sus propiedades mecánicas, facilitaría reducir el consumo de otros materiales de impresión elaborados a partir de termoplásticos no biodegradables de origen fósil.

- *Abaratar costes de fabricación de materiales de impresión 3D.*

El hecho de ser la lignina una de las sustancias más abundantes en la naturaleza y de fácil obtención, permite abaratar el coste de los materiales de impresión que contengan esta sustancia.

- *Mejorar el aprovechamiento de la lignina.*

Dar un mejor uso a la lignina ya que actualmente se considera un desecho en la industria maderera.

1.2 OBJETIVO DEL PROYECTO

El objetivo principal de este proyecto es:

“La fabricación de un filamento polimérico cargado con Lignina para su utilización en impresión 3D mediante tecnología FDM.”

Para la consecución de este objetivo principal han de conseguirse los siguientes objetivos parciales:

- *Desarrollo y optimización de un procedimiento experimental para la fabricación mediante extrusión del filamento cargado con lignina.*
- *Caracterización térmica y mecánica del filamento con lignina.*
- *Ajuste de los parámetros de impresión del filamento con lignina.*
- *Caracterización mecánica y térmica de probetas impresas con el filamento con lignina.*
- *Estudio de la degradación del filamento cargado con lignina.*

1.3 HERRAMIENTAS UTILIZADAS

Para la correcta ejecución de este proyecto ha sido necesario contar con los siguientes recursos:

- *Herramientas de modelado 3D.*

Se ha utilizado la herramienta de mercado Solid Edge para realizar el diseño en 3D de las probetas utilizadas en las pruebas.

- *Máquina de impresión 3D.*

Los modelos de impresoras de tecnología FDM utilizados en la fabricación de las probetas han sido:

- Impresora 3D Prusa i3 MK3S+.
- Impresora 3D Geeetech A10M.

- *Extrusora.*

La extrusora utilizada para la elaboración de los distintos filamentos ha sido el modelo Composer 350 fabricado por la empresa 3D EVO.

- *Materiales de impresión 3D:*

Los materiales utilizados en el proyecto para fabricar los distintos filamentos han sido los siguientes:

- Filamento de PLA comercial, utilizado para construir las probetas que han permitido caracterizar las propiedades mecánicas originales del material.
- Filamento elaborado a partir de granza de PLA, una forma de presentación del PLA (en partículas de 15-25 mm) que facilita su mezcla con otros materiales.
- PLA reciclado, obtenido mediante la reutilización del material de piezas ya impresas.
- Filamento elaborado a partir de granza de PLA cargado con madera.

▪ Máquinas de ensayo:

Los ensayos definidos para realizar la caracterización mecánica y térmica de las probetas se han ejecutado con los siguientes equipos disponibles en el laboratorio de mecánica de la Universidad:

- Máquinas de Ensayos Universales IBTH 500 y ELIB 20 ambas de la empresa Ibertest.
- Máquinas de Ensayos a Tracción IMADA.
- Péndulo Charpy para ensayos de impacto del fabricante Instron.
- Equipo de Calorimetría Diferencial de Barrido DSC 822e suministrado por la empresa Mettler Toledo.

1.4 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

Este documento se ha estructurado en seis capítulos, en los tres primeros se describe el objeto del proyecto, estudios existentes relacionados con el proyecto y las tecnologías utilizadas. En los capítulos siguientes, se detalla el procedimiento experimental utilizado, los resultados obtenidos y líneas futuras de actuación.

A continuación, se describe brevemente el contenido de cada uno de estos capítulos.

1. Introducción:

En este capítulo se describe el objeto del proyecto, el motivo de su realización, los objetivos que se persiguen con la realización del mismo y los principales recursos utilizados en la ejecución.

2. Estado de la cuestión:

En el estado de la cuestión se describen las principales aplicaciones de la impresión 3D en la actualidad, la situación actual de la tecnología de fabricación FDM y los

estudios similares realizados que se han encontrado relacionados con el objeto del proyecto.

3. *Descripción de la tecnología:*

En este capítulo se hace una descripción general de la impresión 3D y de sus principales tecnologías y materiales de impresión, detallando la tecnología de impresión FDM ya que es la utilizada en este proyecto.

4. *Procedimiento experimental:*

Se desarrolla en este capítulo el procedimiento utilizado para llevar a cabo el estudio. Se ha estructurado en siete tareas y en los distintos apartados del capítulo se detallan las actividades a realizar en cada una de ellas.

5. *Análisis de resultados:*

Los resultados obtenidos de los diferentes ensayos realizados son analizados en este capítulo, realizando una comparativa entre los resultados obtenidos para los distintos tipos de filamentos analizados.

6. *Conclusiones y trabajos futuros:*

Se describen las conclusiones obtenidas del estudio realizado y las posibles líneas de actuación para trabajos futuros.

Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

La evolución de la impresión 3D en los últimos años y las perspectivas de crecimiento para la próxima década, hacen que esta tecnología se encuentre en continua evolución para dar respuesta a los retos a los que se enfrenta.

Cada vez son más las necesidades en cuanto a disponer de materiales que permitan el incremento de las aplicaciones de esta tecnología en el ámbito industrial, científico o educativo. La investigación en este ámbito debe continuar para incorporar nuevos materiales o mejorar las propiedades de los existentes, sin olvidar los objetivos que marca el desarrollo sostenible.

2.1 IMPRESIÓN 3D: SITUACIÓN ACTUAL Y PERSPECTIVAS

La tecnología de impresión 3D ha experimentado un gran desarrollo desde su aparición en la década de los 80. Durante los años siguientes a su aparición, se desarrollaron distintas técnicas de impresión y se inició la comercialización de las primeras impresoras. La aparición en 2005 del concepto Open Source en la impresión 3D, fue clave en la popularización de esta tecnología y en el crecimiento experimentado en la última década.

En 2020, se estima que el negocio de impresión 3D generó a nivel mundial en torno a 13.200 millones de dólares, según el estudio *“Mercado de impresión 3D: tendencias globales de la industria, acciones, tamaño, crecimiento, oportunidad y previsión 2021-2026”* de la consultora Research and Markets [4].

Según el informe publicado por la consultora Lux Research, *“¿La impresión 3D reemplazará a la fabricación convencional?”*, se estima que el negocio de la impresión 3D crecerá durante la presente década a un ritmo de un 15% anual, lo que supone que en 2030 este sector generará alrededor de 55.000 millones de dólares [5].

En cuanto a los usos a los que se destina esta tecnología, la empresa francesa de servicios sculpteo señala en su informe anual, que la realización de pruebas de concepto y la elaboración de prototipos continúan siendo los usos más comunes de la impresión 3D. Sin embargo, la utilización en el ámbito de la producción y el uso para fines educativos ha experimentado un importante crecimiento en los últimos años [6].

El estudio anual que realiza esta empresa, se basa en la realización de una encuesta dirigida a más de 1.600 personas de 71 países de los cinco continentes. La mayor parte de las personas encuestadas, son ingenieros y CEOs de compañías de distintos sectores de actividad.

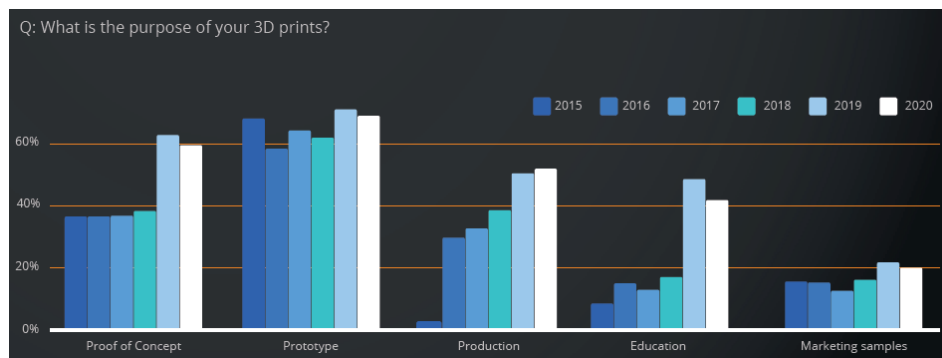


Figura 1. Evolución uso de la tecnología 3D [6]

2.2 APLICACIONES DE LA IMPRESIÓN 3D

Las primeras aplicaciones de relevancia en la aplicación de esta tecnología surgieron en el ámbito de la medicina. Así, a finales de la década de los 90, científicos del Instituto de Wake Forest de Medicina Regenerativa crearon un tejido partiendo de las células del paciente para aumentar su vejiga. En 2002, el mismo Instituto creó un riñón funcional capaz de filtrar sangre y producir orina en un animal. [7-8]

En la actualidad son muchos los sectores que utilizan esta tecnología en diferentes ámbitos de aplicación. Más de las dos terceras partes se concentra en el sector de productos de consumo, automoción, médico/dental y aeroespacial [9].

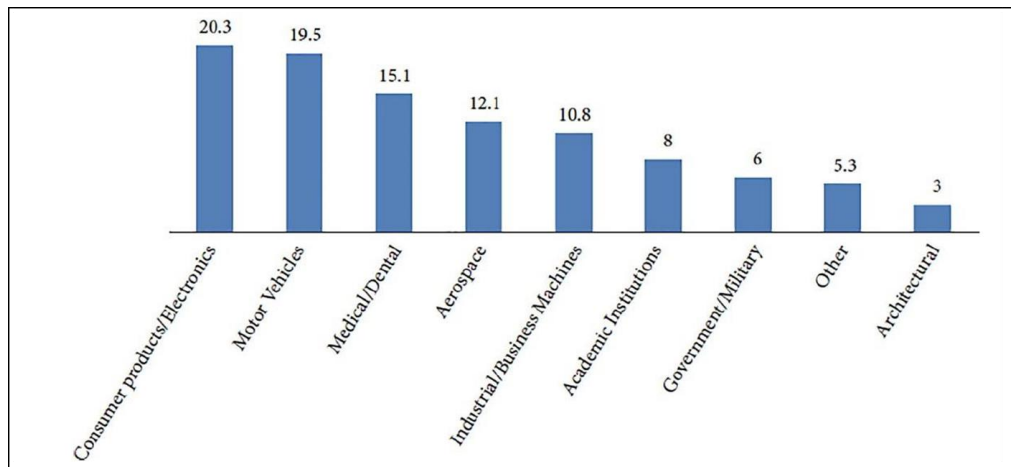


Figura 2. Distribución de la fabricación aditiva por sectores de actividad [9]

Algunos ejemplos en el uso de esta tecnología:

- Medicina:

Como se ha comentado, este sector fue uno de los pioneros en el uso de la tecnología de impresión 3D. La utilización de esta tecnología está permitiendo importantes avances en la mejora de la salud y la calidad de vida de las personas. Algunos ejemplos de aplicación son:

- Prótesis a medida.
- Implantes biomédicos (dentales, ortopédicos, órganos).
- Audífonos.
- Instrumental quirúrgico, equipos de protección personal, formación práctica.



Figura 3. Prótesis de mano fabricada con una impresora doméstica [31]

▪ Automoción:

Los continuos avances de la tecnología de impresión 3D, con el desarrollo y perfeccionamiento de nuevas técnicas y materiales, permiten que esta tecnología esté presente en diferentes puntos de la cadena de fabricación de este sector.

- Creación de prototipos para validación de diseños.
- Fabricación de herramientas de producción: moldes de inyección, plantillas, etc.
- Producción de piezas de vehículos alta gama (volúmenes medios de producción).
- Personalización de componentes complejos.



Figura 4. Primer coche fabricado mediante impresora 3D [32]

▪ Aeroespacial:

Al igual que el sector de la automoción, la industria aeroespacial se ha visto favorecida por la evolución de la tecnología, al aumentar la capacidad para fabricar piezas más resistentes y ligeras. Esta industria comenzó a utilizar esta tecnología a principios de la década de los 90, de ahí su desarrollo.

La impresión 3D está presente en todas las etapas proceso de fabricación de la industria aeroespacial, desde el diseño y la elaboración de prototipos hasta la producción y personalización de piezas. Algunos ejemplos de piezas fabricadas mediante impresión 3D en este sector son: accesorios de cabina, conductos de aire, paneles, compartimiento del motor, luces, etc.



Figura 5. Primer avión impreso en 3D [33]

▪ Otros sectores de actividad:

Otros ejemplos entre los muchos que hoy en día utilizan esta tecnología son

- *Joyería:* este sector está transformando su modelo de producción tradicional. La posibilidad de realizar formas geométricas complejas, la reducción del tiempo de fabricación y la posibilidad de fabricar varias piezas con el consiguiente ahorro de costes, son algunos de los motivos del auge de esta tecnología.
- *Alimentación:* la fabricación aditiva permite el diseño y elaboración de productos alimenticios personalizados en formas geométricas, textura o valores nutricionales.
- *Enseñanza:* el uso de esta tecnología impacta de manera directa en la creatividad, facilita el aprendizaje, aumenta la atención y la capacidad de resolución de problemas.



Figura 6. Uso de la impresión D en el sector de la alimentación, joyería y enseñanza [34-36]

2.3 MÉTODOS Y MATERIALES DE IMPRESIÓN

La tecnología de impresión 3D ha desarrollado desde su aparición distintas técnicas para depositar las distintas capas de material con las que se fabrica el objeto.

En el informe anual 2020 elaborado por sculpteo [6] ante la pregunta realizada en la encuesta sobre el uso que realizaban de las distintas tecnologías, señalaban a la tecnología FDM (Modelado por Deposición Fundida) como el método de impresión más utilizado entre las distintas opciones. Además, según los datos de la misma encuesta, su uso es también el más extendido a nivel doméstico.

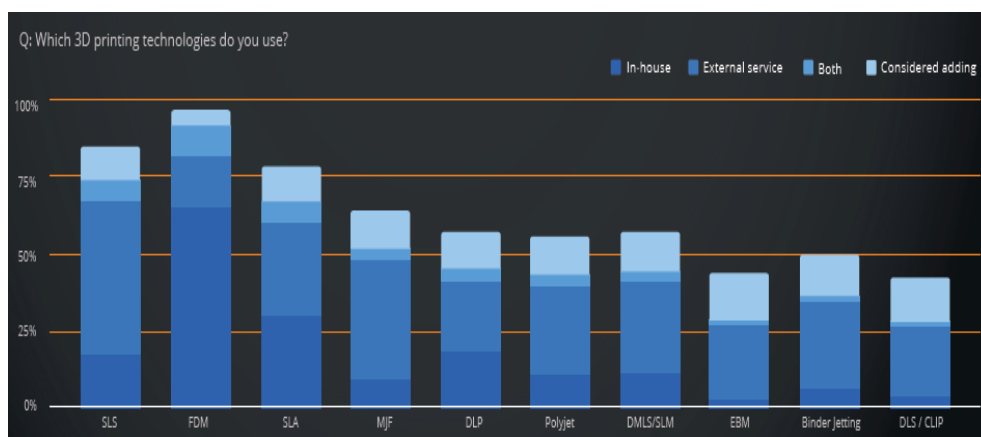


Figura 7. Utilización de las tecnologías de impresión 3D [6]

La evolución de los materiales de impresión sigue un camino similar al de las técnicas de impresión. La creciente utilización de esta tecnología y los usos cada vez más diversos que se hacen de ella, exige que los materiales tengan que dar respuesta a condiciones de trabajo cada vez más exigentes: resistencia mecánica y/o térmica, calidad de los acabados, comportamiento frente a la humedad, o frente a agentes químicos, etc.

Las tendencias de evolución de materiales que se identifican en la encuesta del informe de sculpteo van en una línea similar [6]:

- Búsqueda de nuevos materiales a bajo coste.
- Mejora de las propiedades de los materiales.

- Búsqueda de nuevas tecnologías para obtener mejores acabados.
- Combinación de varios tipos de materiales en la impresión.

En este informe [6], se puede ver que en 2020 los usuarios encuestados señalaban como el tipo de material de impresión más usado los plásticos. Además, a nivel doméstico también aparece como el tipo de material más usado con gran diferencia.

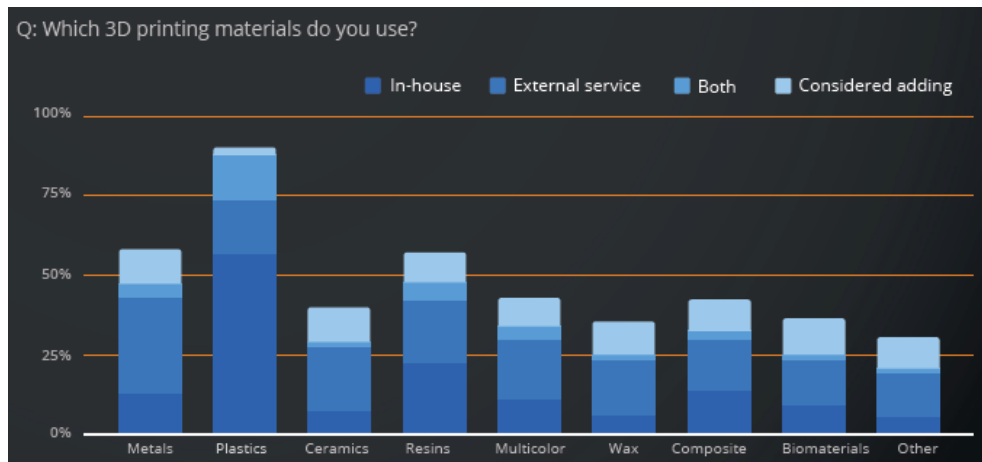


Figura 8. Uso de los materiales de impresión 3D [6]

Si se analiza la evolución en el uso de materiales de impresión desde el 2016, fecha de inicio de publicación del informe sculpteo, se puede observar que los plásticos han sido el tipo de material más utilizado estando, además, muy consolidado su uso [6].

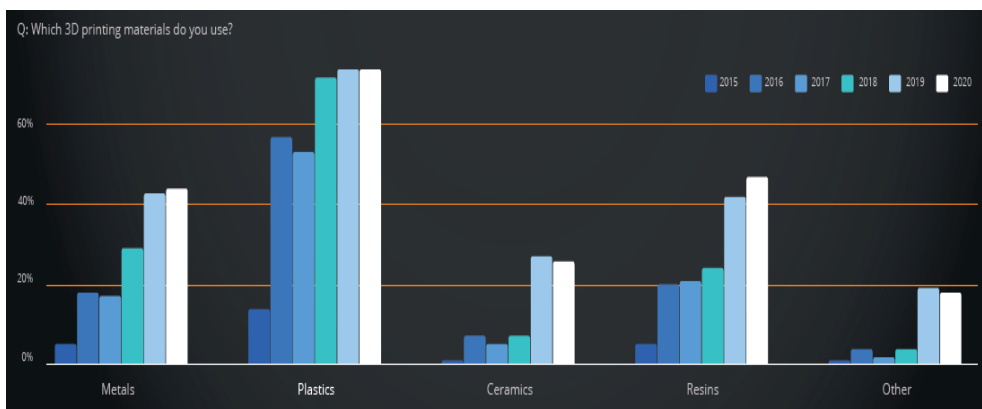


Figura 9. Evolución del uso de materiales 3D periodo 2015-2020 [6]

2.4 MEJORA DE LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL PLA

Como hemos visto en el apartado anterior, los plásticos son los tipos de materiales más utilizados actualmente en la impresión 3D. Existen distintos tipos de materiales plásticos, pero los más usados son el ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) y el PLA (Ácido Poliláctico), ambos de bajo coste.

El ABS es un termoplástico amorfo que posee unas buenas propiedades mecánicas y térmicas lo que permite fabricar objetos aptos para aplicaciones de uso final. El principal inconveniente se encuentra en que no es biodegradable pero sí reciclable.

El PLA es un termoplástico semicristalino biodegradable elaborado a partir de almidón de maíz o caña de azúcar, apto para construir envases para contener alimentos. Sus propiedades son peores a las del ABS, por lo que se utiliza fundamentalmente para la realización de prototipos.

Dado que la producción del material ABS no es ecológica, una alternativa frente al aumento de la demanda de estos materiales, es potenciar el uso del PLA mediante la mejora/mantenimiento de sus propiedades mecánicas y térmicas.

Una de las líneas de trabajo estudiadas es la utilización de PLA reciclado, dando así más usos al material:

- En esta línea, Kumar et al. [10] realizaron una comparativa de las propiedades mecánicas (tracción, flexión e impacto) y térmicas (temperatura de transición vítrea) de material reciclado de PLA, ABS y el poliestireno de alto impacto (HIPS). Las conclusiones que obtuvieron de este estudio fueron que el PLA presentaba un mejor comportamiento a la rotura junto con el ABS.
- Otra línea de investigación, fue la de añadir al PLA reciclado PLA virgen en distintas proporciones para mantener/mejorar las propiedades del material [11].

En primer lugar, se analizaron el número de veces que podía reutilizarse el PLA hasta perder gran parte de sus propiedades. La conclusión a la que llegaron es que el PLA solo podía reutilizarse dos veces ya que, a partir de la tercera reutilización, se producía un deterioro de las propiedades mecánicas. También se producía una disminución de la viscosidad y un aumento de la cristalinidad [11].

Para reducir estos efectos, analizaron la adición de PLA virgen al PLA reciclado en distintas proporciones [11].

- Zhao et al. [12] llevaron a cabo un estudio en el que compararon la resistencia a la tracción del PLA reciclado con un material compuesto de PLA reciclado recubierto con polidopamina. Según los datos obtenidos, el material compuesto de PLA reciclado recubierto con polidopamina mejoraba la tracción máxima y la tensión de rotura frente a los datos obtenidos del material elaborado con PLA reciclado.

2.5 LA LIGNINA: APLICACIONES EN LA IMPRESIÓN 3D

Dentro de los posibles materiales alternativos a explorar se encuentra la utilización de polímeros naturales y renovables para la fabricación de materiales de impresión 3D. Una de las opciones, dentro de la vía de utilización de polímeros naturales, es la utilización de los polímeros que se encuentran en las plantas como son la celulosa, la hemicelulosa y la lignina. Se trata de polímeros muy abundantes en la naturaleza, de hecho, la celulosa es el polímero natural más abundante en la naturaleza, seguida por la lignina [13].

Dentro del uso que actualmente se les da a estos polímeros de origen vegetal, la lignina es una sustancia que se encuentra actualmente infrutilizada. Se considera como un residuo de la madera que se genera como un componente no deseado durante la producción de etanol y papel. Cada año se producen más de 50 millones de toneladas de lignina, de las cuales el 98% se quema para generar energía y sólo el 2% se ha utiliza para otros fines como disolventes, adhesivos y rellenos [14].

La lignina es un polímero orgánico de estructura compleja formada por compuestos fenólicos, polisacáridos, ácidos urónicos y proteínas. Este componente de la madera realiza varias funciones que son esenciales para las plantas. Posee unas buenas propiedades físicas y térmicas, y aporta sobre todo rigidez a la pared celular, uniendo unas células con otras [15].

Se trata, por tanto, de un material que, por sus propiedades mecánicas, su bajo coste y su carácter “eco-friendly”, debe tenerse en cuenta en la posible evolución de los materiales más utilizados en la impresión 3D con tecnología FDM.

Estudios previos han explorado la adición de lignina en diferentes polímeros para la obtención de piezas por FDM:

- Vaidya et al. [16] estudiaron la incorporación de lignina en polihidroxibutirato (PHB) y lograron una reducción en el pandeo en las piezas de composite impresas comparadas con el polímero.
- Por otro lado, Wasti et al. adicionaron lignina a PLA en un 20% y estudiaron el efecto de diferentes plastificantes en el compuesto [17].
- Los estudios realizados por Nguyen et al. [18] han investigado la sustitución de termoplásticos de origen fósil por lignina como, por ejemplo, el ABS, consiguiendo una importante mejora de las propiedades mecánicas.

Capítulo 3. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

A continuación, se hace una descripción de los aspectos más relevantes de la tecnología de impresión 3D, describiendo con mayor detalle el método de impresión FDM (Modelado por deposición fundida), que es el utilizado en este proyecto.

3.1 IMPRESIÓN 3D

Se puede definir la impresión 3D como el conjunto de tecnologías que permiten crear un objeto tridimensional mediante la superposición de capas sucesivas de un material. Parte de un modelo digital, elaborado a partir de una herramienta de modelado, que es transformado en un modelo 3D.

En la actualidad existe una gran variedad de tecnologías y materiales de impresión disponibles en el mercado. Cada una de estas tecnologías/materiales de impresión ofrece diferentes posibilidades en lo que se refiere al diseño de las piezas (precisión, acabado del objeto, etc.) y a las propiedades físicas y térmicas de las mismas.

Esta tecnología se denomina en el ámbito industrial fabricación aditiva y ofrece una mayor flexibilidad frente a los procesos de fabricación tradicionales, aunque también presenta algunos inconvenientes.

3.1.1 ORIGEN Y EVOLUCIÓN DE LA IMPRESIÓN 3D

Aunque parece una tecnología moderna, el concepto de recreación tridimensional aparece por primera vez a finales del siglo XIX, si consideramos algunas innovaciones en el ámbito de la escultura. En 1859, François Willème llevó a cabo el primer intento de escáner 3D mediante la colocación de cámaras para tomar una misma instantánea desde diferentes perspectivas. Posteriormente, en 1892 se registra la patente de Joseph E. Blather para desarrollar mapas tridimensionales usando una técnica similar a la de las impresoras 3D [19].

Sin embargo, es en la década de los 80 cuando se empieza realmente a hablar del concepto de la impresión 3D. Los hitos más destacables en la evolución de esta tecnología se representan en la siguiente figura: [20-21]

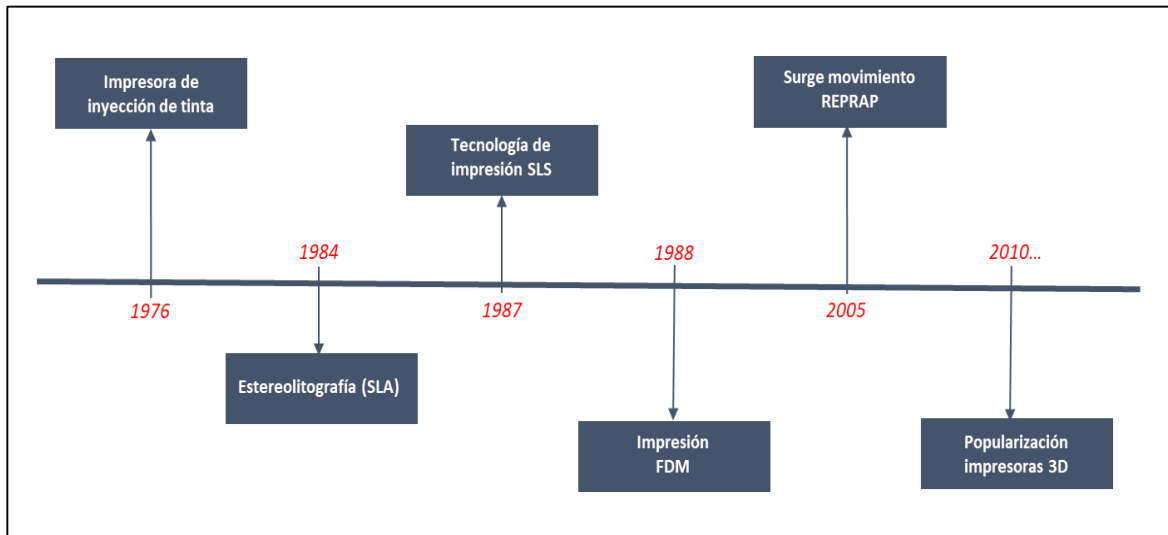


Figura 10. Evolución impresión 3D

1976: Impresora de inyección de tinta.

La aparición en 1976 de la impresora de inyección de tinta, cuando todavía no se había hablado de la fotografía digital, es considerada el origen de la impresión 3D. A partir de este concepto, se fueron realizando adaptaciones y avances que transformaron la tecnología de impresión con tinta a la tecnología de impresión mediante el uso de materiales que permitían imprimir modelos 3D.

1984: Invención de la estereolitografía.

Charles Hull, el co-fundador de 3D Systems, inventa en 1984 la estereolitografía (SLA). Este método de impresión está basado en la sintetización por capas mediante el uso de un láser. Este rayo ultravioleta va solidificando un fotopolímero (líquido viscoso) que va generando capas de dicho material, que se van depositando una encima de otra para fabricar el objeto según el diseño 3D creado.

Años más tarde, en 1992 aparece en el mercado la primera máquina de impresión 3D del tipo SLA desarrollada por la empresa 3D Systems.

3D Systems fue la primera empresa del sector que comercializó una impresora 3D.

1987: Surge la impresión SLS (Sinterización Selectiva por Láser).

Este método de impresión, ideado por Carl Deckard de la Universidad de Texas, sinteriza polvo de resina para convertirlo en sólido. Este método funciona también con un láser, pero en vez de sintetizar resina líquida, utiliza polvo.

La primera máquina comercial con este método de impresión surgió casi dos décadas después, en 2006.

1988: Aparición de la tecnología FDM.

La impresión mediante tecnología FDM es una de los métodos de impresión más conocidos y más utilizados en la actualidad. Aunque podría pensarse que fue anterior a los dos métodos mencionados, su aparición se produjo pocos años después, en 1988. Este método se basa en la deposición de material fundido. El filamento se calienta y es extruido a través de una boquilla depositando el material sobre una plataforma.

Esta tecnología fue patentada por S. Scott Crump y Lisa Crump, que fundaron en 1989 la compañía Stratasys. Se trata de una compañía estadounidense-israelí, que en la actualidad es una de las más importantes en el sector de la fabricación de impresoras 3D.

2005: Open Source en la impresión 3D: movimiento REPRAP.

En el año 2005 tiene lugar un hito muy importante en el desarrollo y evolución de la tecnología 3D. Ese año, el Dr. Adrian Bowyer de la Universidad de Bath funda el proyecto RepRap, una iniciativa que pretende crear una impresora de código abierto con capacidad para imprimir la mayoría de sus propios componentes, es decir, que tenga la capacidad de auto réplica fabricando sus propias piezas para así construir nuevos modelos. El objetivo no

es otro que dar acceso a esta tecnología al mayor número de usuarios mediante la fabricación de unidades de bajo coste.

Finalmente es la Universidad Cronwell que lidera la iniciativa Fab@Home la que se adelanta y comercializa la primera impresora 3D de código abierto.



Figura 11. RepRap [5]

2010: Popularización de las impresoras 3D.

A partir de 2010, se generaliza el uso de esta tecnología llegando a todo tipo de industrias, centros educativos, hogares, etc. Aparece la figura del aficionado a la impresión 3D, se incrementa la producción de impresoras 3D y se reduce su coste.

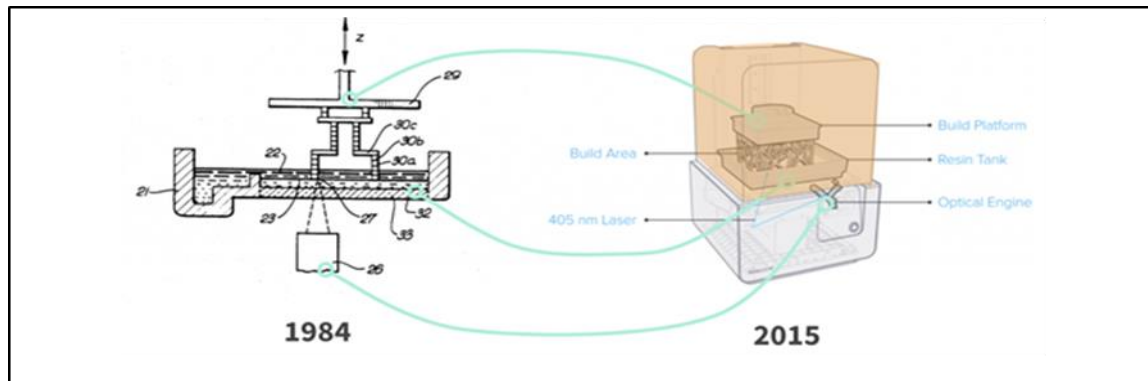


Figura 12. Evolución impresora 3D: 1984 vs 2015 [6]

3.1.2 TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN

El proceso de impresión 3D siempre comienza con un modelo digital: el plano del objeto físico a fabricar. Este modelo es dividido por el software de la impresora en capas delgadas bidimensionales y luego convertido en un conjunto de instrucciones en lenguaje de máquina (STL) para que la impresora las ejecute.

Existen diferentes tecnologías disponibles para la impresión 3D que se diferencian principalmente en la forma en la que las distintas capas son generadas para crear las piezas. Algunas usan métodos de fundido del material para formar las capas, como por ejemplo el SLS o FDM, mientras que otras depositan materiales líquidos que son solidificados con diferentes tecnologías. Dependiendo del principio empleado en la deposición del material podemos clasificarlas en dos grupos: inyección/extrusión y luz o haz de alta energía [22].

A continuación, se describen las principales tecnologías de cada grupo.

A. Inyección/extrusión [23]

- Modelado por deposición fundida (FDM).

En esta tecnología, la construcción de la pieza se realiza depositando, selectivamente, material fundido capa por capa de acuerdo al modelo realizado. Los materiales utilizados son polímeros termoplásticos y vienen en forma de filamentos.

Se trata de la tecnología de impresión 3D más utilizada en la actualidad y la que tiene la mayor base instalada a nivel mundial.

Esta tecnología presenta las siguientes ventajas/inconvenientes:

Tabla 1. Ventajas/inconvenientes tecnología FDM.

Ventajas	Inconvenientes
+ Bajo coste de producción	- Menor precisión y resolución
+ Disponibilidad de la tecnología	- Necesidad de acabado posterior
+ Alto número de materiales disponibles	- Resistencia eje Z menor que en plano XY

▪ Inyección de material (MJM o IJP).

Su funcionamiento es similar al de las impresoras 2D. El material se dispensa a través de un cabezal de impresión que deposita unas gotas de un material fotosensible, que se solidifica bajo la luz ultravioleta (UV), formando capas. Los materiales utilizados son fotopolímeros termoendurecibles.

Una de las principales diferencias respecto a otras tecnologías de impresión, radica en que el material se deposita de forma lineal.

Las principales ventajas/inconvenientes de esta tecnología son:

Tabla 2. Ventajas/inconvenientes tecnología MJM / IJP.

Ventajas	Inconvenientes
+ Precisión alta	- Malas propiedades mecánicas
+ Propiedades mecánicas/térmicas homogéneas	- Degradación propiedades con el tiempo
	- Alto coste de la tecnología

▪ Proyección por aglutinante (3DP).

Este método consiste en depositar selectivamente un aglutinante sobre un lecho de material en polvo que une esas partículas de forma selectiva. Este proceso se repite capa por capa. Los materiales utilizados son metales y cerámicos que se presentan de forma granular.

Sus principales ventajas/inconvenientes:

Tabla 3. Ventajas/inconvenientes tecnología 3DP.

Ventajas	Inconvenientes
+ Bajo coste	- Malas propiedades mecánicas
+ Permite realizar piezas grandes y complejas	- Requiere procesamiento posterior
+ Costes competitivos pequeña/mediana escala	- Limitación de materiales a utilizar

B. Luz o haz de alta energía [23]

- Estereolitografía (SLA).

En esta tecnología, la creación del objeto se lleva a cabo tratando selectivamente una resina de polímero capa por capa mediante un rayo láser ultravioleta (UV). Los materiales utilizados son polímeros fotosensibles que se encuentran en estado líquido.

Se trata de la tecnología de impresión que mejor respuesta ofrece cuando se trata de fabricar objetos que requieren alta precisión y un buen acabado.

Esta tecnología presenta las siguientes ventajas/inconvenientes:

Tabla 4. Ventajas/inconvenientes tecnología SLA.

Ventajas	Inconvenientes
+ Precisión muy alta	- Fragilidad de las piezas
+ Buen acabado	- Degradación propiedades con el tiempo
+ Materiales flexibles y moldeables	- Acabado posterior para eliminar marca soporte

- Sinterización Selectiva por Láser (SLS).

En la tecnología de impresión SLS, un láser sinteriza (fusiona térmicamente) de forma selectiva las partículas de un polímero en polvo, formando una pieza capa por capa. Los materiales utilizados en SLS son polímeros termoplásticos, normalmente nylon.

El principio de funcionamiento de esta tecnología es igual a la tecnología MJF (Multi Jet Fusion). La diferencia entre ambas es la fuente de calor utilizada. En el caso de la tecnología MJF, utiliza una tinta como agente de fusión para absorber la energía.

Las principales ventajas/inconvenientes de esta tecnología son:

Tabla 5. Ventajas/inconvenientes tecnología SLS.

Ventajas	Inconvenientes
+ Buenas propiedades mecánicas	- Necesidad de acabado posterior
+ No requiere soporte	- Baja precisión en determinados diseños
+ Costes competitivos pequeña/mediana escala	- Solo disponible en entornos industriales

- *Fusión Selectiva por Láser de Metales (SLM).*

En esta tecnología de impresión, un láser escanea y fusiona selectivamente las partículas de polvo metálico, uniéndolas y construyendo la pieza capa por capa. Utiliza metales en polvo como materiales.

Otra tecnología que también trabaja con metales en polvo como materiales es la tecnología DMLS (Sinterización Directa por Láser de Metales). El procedimiento de construcción que utiliza es muy similar al utilizado en SLM. La principal diferencia radica en que el material utilizado en la SLM tiene un punto de fusión único mientras que en el caso de DMLS el polvo utilizado está compuesto de materiales con puntos de fusión variables.

Sus principales ventajas/inconvenientes:

Tabla 6. Ventajas/inconvenientes tecnología SLM.

Ventajas	Inconvenientes
+ Permite piezas complejas/personalizadas	- Costes altos
+ Excelentes propiedades físicas	- Tamaño de piezas limitado
+ Admite una amplia gama de metales	

3.1.3 MATERIALES DE IMPRESIÓN

El gran desarrollo que ha tenido la tecnología de impresión 3D en los últimos años tiene su reflejo en la gran variedad de materiales que están disponibles en el mercado. Los materiales de impresión se pueden clasificar según el tipo de material utilizado o el estado base del material en el que deben utilizarse [22].

Si atendemos a la clasificación por tipo de material, los más utilizados son:

- *Polímeros:*

Son utilizados por la mayoría de las tecnologías descritas anteriormente. Existe una gran variedad de materiales de impresión dentro de este grupo, desde los materiales más utilizados como el PLA y el ABS que tienen un bajo coste y presentan unas propiedades limitadas hasta materiales como el TPU, Nylon o PEI, que ofrecen unas altas prestaciones a costes más elevados utilizadas sobre todo en aplicaciones industriales. Más adelante, en el apartado 3.2.3, se describen algunos de estos materiales.

Dentro del grupo de los polímeros, se encuentran las resinas termoendurecibles utilizadas entre otros en la tecnología SLA. Existe una gran variedad de resinas con propiedades, precios y aplicabilidad diferentes. Así, tenemos desde las resinas estándar poco resistentes a impactos, a resinas más evolucionadas con mejores propiedades mecánicas o térmicas. Un ejemplo de resina evolucionada, son las resinas dentales que ofrecen una buena resistencia a la abrasión. Una propiedad común a todas ellas es la alta calidad de los acabados de las piezas fabricadas con este material.

▪ Metales:

Este tipo de material es muy utilizado en distintos sectores de actividad como el sector aeroespacial, automotriz y médico, entre otros. Algunos ejemplos de materiales dentro de este grupo son el aluminio, que ofrece una buena resistencia a las altas temperaturas y al desgaste; y el acero inoxidable, utilizado en forma de polvo en las tecnologías que utilizan procesos de sinterización o fusión.

▪ Cerámicos:

En este grupo nos encontramos una gran variedad de materiales como pueden ser el vidrio, la porcelana o el carborundo (carburo de silicio). Tienen buenas propiedades térmicas, son frágiles y porosos. Son utilizados en diferentes ámbitos como la odontología, la fabricación de piezas que necesitan alta resistencia al calor, artes plásticas, etc.

En el siguiente cuadro se recoge para cada tecnología descrita el tipo de material más comúnmente utilizado.

Tabla 7. Clasificación tecnología/tipo de material.

Tecnología	TIPO DEL MATERIAL		
	Polímeros	Cerámico	Metal
Inyección/extrusión			
FDM	★		
MJM/IJP	★		
3DP		★	★
Luz o haz de alta energía			
SLA	★		
SLS/MJM	★		
SLM/DMLS			★

En el caso de la calificación según el estado base del material nos encontramos con los siguientes tipos:

- Sólido:

Normalmente se presentan en láminas (filamentos). Los plásticos utilizados en la tecnología FDM se utilizan en este estado.

- Líquido:

Las resinas utilizadas en las tecnologías SLA o MJM/IJP se presentan en estado líquido.

- Polvo:

En este estado base se presentan los tipos de materiales metálicos y cerámicos.

A continuación, se presenta un cuadro con los estados de material utilizados por las distintas tecnologías descritas en el apartado anterior.

Tabla 8. Clasificación tecnología/estado base del material.

Tecnología	ESTADO DEL MATERIAL		
	Sólido	Líquido	Polvo
Inyección/extrusión			
FDM	★		
MJM/IJP		★	
3DP			★
Luz o haz de alta energía			
SLA		★	
SLS/MJM			★
SLM/DMLS			★

Para la elección del material de impresión en la fabricación de una pieza es importante tener en cuenta al menos los siguientes factores:

- Tecnología a utilizar.

La tecnología a utilizar en la fabricación del objeto es el primer condicionante en la selección del material de impresión. Como hemos visto, cada tecnología de impresión utiliza habitualmente un tipo de material que además debe ser utilizado en un estado base determinado.

- Uso de la pieza fabricada.

El uso final al cual vaya destinado la pieza condiciona el tipo de material a utilizar. Por ejemplo, piezas destinadas a contener alimentos o prótesis deberán utilizar tipos de materiales que tendrán requerimientos diferentes a los que pueda tener el material utilizado para fabricar un prototipo.

- Propiedades mecánicas y térmicas.

Ligado también al uso de la pieza fabricada, es importante tener en cuenta las propiedades mecánicas o térmicas que debe tener. Si la pieza tiene que trabajar en condiciones de altas temperaturas o debe ser resistente a impactos; o trabajar en un entorno de humedad o en presencia de determinados productos químicos.

- Diseño de la pieza.

Los requerimientos en la geometría de pieza, la precisión que se requiere en su fabricación o la calidad de su acabado superficial, determinan el tipo de material a utilizar.

3.1.4 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA IMPRESIÓN 3D

Como hemos visto en el apartado 3.1.1, la impresión 3D tiene sus orígenes en la década de los 80. En el ámbito industrial, esta tecnología recibe el nombre de fabricación aditiva ya que crea la pieza partiendo de cero a diferencia de los procesos de fabricación tradicionales. En lo que se refiere a los procesos de fabricación tradicionales, nos encontramos con dos métodos diferentes: la fabricación sustractiva (mecanizado por Control Numérico por Computadora) y la fabricación formativa (modelado por inyección).

En la fabricación sustractiva, la pieza se crea eliminando material a partir de un bloque de material inicial que se utiliza para la construcción de la pieza. En el caso de la fabricación

formativa, la fabricación de la pieza se realiza utilizando un molde en el que se inyecta material mediante el uso de calor o presión.

Las ventajas que aporta la tecnología de impresión 3D frente a los procesos de fabricación tradicionales son [24-25]:

- *Posibilidad de realizar diseños complejos sin incremento de costes.*

Debido a que el modelo de fabricación utilizado es un modelo de fabricación aditiva, la impresión 3D permite realizar diseños complejos sin añadir un coste adicional al proceso. En los modelos de fabricación tradicionales, la complejidad de los diseños dificulta y encarece los procesos de fabricación.

- *Reducción del tiempo entre el diseño y la fabricación (time to market).*

La creación de prototipos que nos permitan validar tanto el funcionamiento como la forma de las piezas es una de las principales aplicaciones de la impresión 3D. El tiempo que requiere el proceso completo, desde el diseño a la construcción pasando por las fases de prueba y mejora, es mucho menor con la impresión 3D que con el uso de las tecnologías tradicionales.

- *Flexibilidad del proceso de fabricación.*

La impresión 3D es un proceso de fabricación muy flexible, ya que una impresora permite fabricar diferentes tipos de piezas con solo cambiar el modelo digital y, si es necesario, el tipo de material utilizado. Por el contrario, los modelos de fabricación tradicionales son mucho más rígidos. Cualquier adaptación que se necesite sobre el modelo productivo requiere habitualmente de inversiones adicionales a las realizadas en la puesta en marcha.

- *Facilidad de personalización.*

Los procesos de fabricación tradicionales requieren de la estandarización de los productos fabricados para ser competitivos. Sin embargo, la impresión 3D permite personalizar los productos sin añadir un coste adicional. Para realizar la

personalización solo es necesario cambiar el modelo digital a diferencia de los procesos tradicionales que requieren cambios en su cadena de producción.

- *Reducción de los costes de producción.*

Las ventajas anteriores tienen, como hemos visto, un impacto directo en la reducción de los costes de producción. Adicionalmente, hay que tener en cuenta que la propia naturaleza del modelo de impresión 3D (fabricación aditiva) supone una reducción del material utilizado frente a los procesos de producción sustractiva.

Por el contrario, la fabricación aditiva presenta los siguientes inconvenientes frente a los procesos de fabricación tradicionales:

- *Propiedades mecánicas de los materiales utilizados.*

En general, las piezas fabricadas con materiales plásticos presentan unas propiedades físicas limitadas debido al proceso de construcción por capas y a la naturaleza del propio material. Por este motivo, las piezas construidas con estos materiales son utilizadas en aplicaciones no críticas.

- *Precisión limitada.*

La precisión de los procesos de fabricación con impresoras 3D es menor que la que puede obtenerse mediante procesos tradicionales. De hecho, cuando la pieza fabricada mediante impresión 3D necesita una precisión mayor, el acabado final se lleva a cabo mediante CNC (Control Numérico por Computador).

- *Menor competitividad en altos volúmenes de producción.*

Esta tecnología es competitiva en costes cuando se llevan a cabo volúmenes bajos de producción, cuando se trata de producción a gran escala, la fabricación mediante impresión 3D deja ser competitiva frente a los modelos tradicionales.

En la figura que se recoge a continuación, se puede ver como el coste unitario en la fabricación mediante procesos de fabricación tradicionales es mayor con volúmenes

bajos y van disminuyendo a medida que aumenta el volumen de objetos a producir. Por el contrario, el coste mediante el uso de la impresión 3D es prácticamente constante, independiente del volumen a producir. A grandes volúmenes, la fabricación formativa presenta normalmente los costes unitarios de producción más bajos.

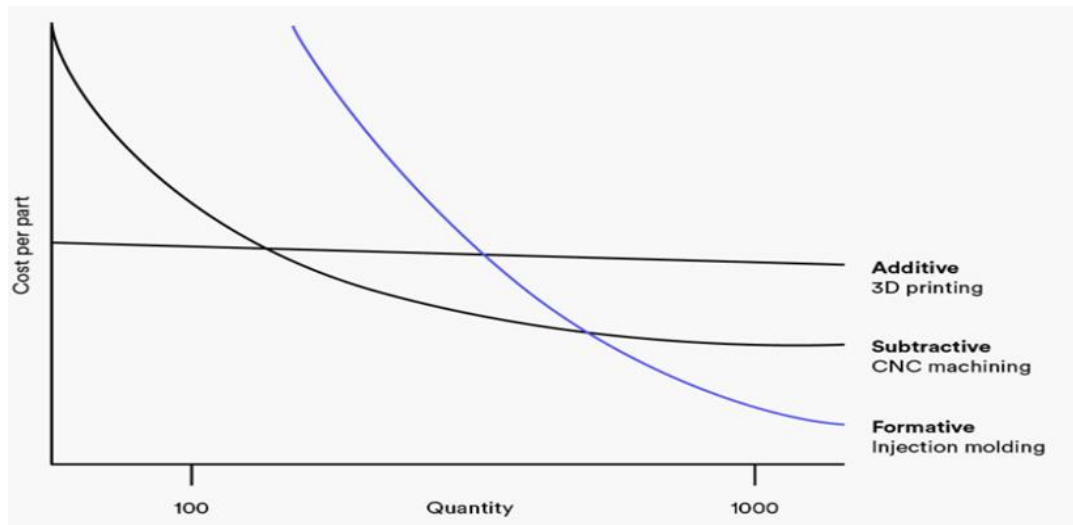


Figura 13. Comparativa coste unitario por método de fabricación [24]

3.2 TECNOLOGÍA DE IMPRESIÓN FDM

Como ya hemos visto anteriormente, la tecnología FDM (Fused Deposition Modeling) pertenece al grupo de las tecnologías de inyección/extrusión. En este capítulo se describe el funcionamiento de esta tecnología, las consideraciones de diseño que hay que tener en cuenta en su utilización, los materiales más comunes y las principales aplicaciones derivadas de sus ventajas/inconvenientes y restricciones [26-27].

3.2.1 FUNCIONAMIENTO

Las máquinas de impresión 3D mediante técnicas de FDM se clasifican en dos según el tipo de sistema de alimentación que tienen. Se puede encontrar una primera clase con alimentación directa donde el motor que empuja el cable y el calentador que funde el filamento están en la misma unidad de extrusión, como es el caso de la impresora Prusa i3,

y la segunda clase con alimentación Bowden que separa ambas partes en dos módulos independientes. La máquina Geetech A 10 M que se utiliza para la impresión de las probetas está dotada de una alimentación Bowden con dos canales de alimentación y una única boquilla extrusora. Esto permite tener dos materiales preparados para cambiar al pasar a otra impresión, pero requiere de una purga previa para realizar la transición de un material a otro en la boquilla de salida.

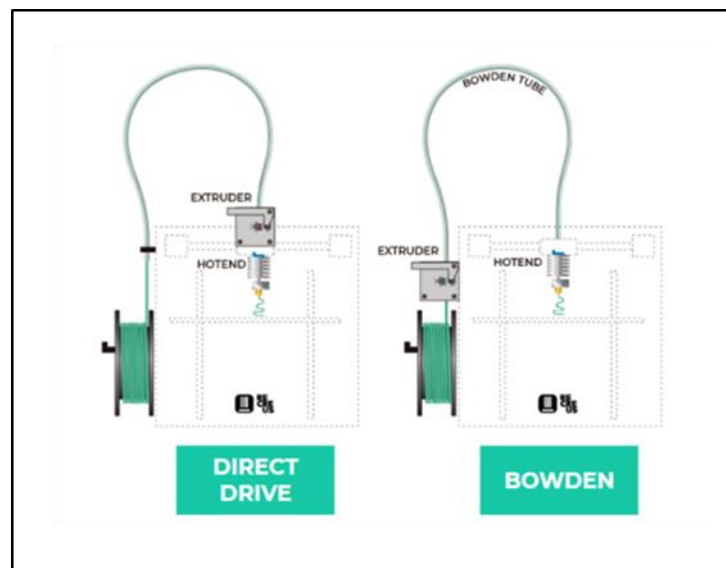


Figura 14, Sistemas de extrusión directa y Bowden [28]

El funcionamiento de la máquina consiste en un pequeño motor con rodillos que mueve el material hacia el calentador. Estos rodillos deben estar en constante contacto con el cable. Esto se consigue por medio de un muelle que ajusta el espacio entre rodillos al diámetro del filamento en todo momento. Así pues, el cable llega al cabezal extrusor el cual está capacitado para moverse en el eje x, y z y se encuentra en nuestro caso a temperaturas de más de 200°C lo cual permite que funda el material y se deposite de manera correcta. Para una correcta deposición de las capas es necesario realizar una nivelación y calentamiento previo de la cama sobre la que se generará la pieza.

La mayoría de los sistemas de impresión FDM permiten realizar ajustes en distintos parámetros del proceso como puede ser la temperatura de la boquilla, la velocidad de los

ventiladores, el espesor de las capas, la temperatura de la estructura de soporte o la velocidad de impresión.

Como se ha mencionado en el apartado 3.1.2, las piezas fabricadas mediante FDM suelen necesitar un acabado posterior. Esta necesidad se pone también de manifiesto cuando se utilizan estructuras de soporte, en estos casos es necesario realizar un posprocesado al menos a la parte de la pieza que se haya en contacto con las mismas. Existen varios métodos de acabado que permiten conseguir unas superficies de gran calidad como el lijado y pulido, soldadura en frío, alisado con vapor, imprimación y pintura, recubrimiento epoxi y enchapado de metal.

La necesidad de utilizar una estructura de soporte depende de la geometría de la pieza a fabricar. Estos soportes suelen estar impresos en el mismo material utilizado para construir la pieza. Existen materiales utilizados para fabricar soportes que se disuelven en líquido que suponen un mayor coste de los mismos, utilizados en impresoras industriales o de alta gama.

En algunas ocasiones las piezas no se imprimen sólidas para reducir el tiempo de impresión y el material utilizado. Se realiza el perímetro exterior, llamado caparazón, y luego se rellena con un material de baja densidad.

3.2.2 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

A la hora de plantear el diseño de una pieza que se desea fabricar mediante la tecnología de impresión FDM conviene tener en cuenta los siguientes aspectos.

- Altura de la capa.

El rango de la altura de la capa en FDM varía entre los 50 y 400 μm . La parte baja del rango proporciona una mayor precisión y un acabado de calidad de la pieza, aunque necesita más tiempo de impresión. Por el contrario, espesores de capa altos proporcionan rapidez en la impresión y menores costes.

- Warping (pandeo).

Uno de los problemas de esta tecnología es la deformación que se produce en la pieza generada al solidificarse el material. Como la impresión va generando capas y éstas se enfrían a diferentes velocidades, sus dimensiones también cambian y se reducen. Esto genera tensiones entre las distintas capas y causa la deformación de la pieza como se puede apreciar en la figura.



Figura 15. Warping de una pieza fabricada mediante FDM [27]

Para intentar minimizar este problema en el proceso de fabricación se puede actuar tanto en una monitorización continua de la temperatura de trabajo del sistema FDM como en la elección de los materiales de impresión. El ABS, por ejemplo, debido a sus propiedades térmicas es más propenso a la deformación que materiales como el PLA o el PET.

Otro factor en el que se puede trabajar es el diseño de la pieza evitando fabricar grandes superficies planas, más propensas a la deformación.

- Dimensiones de las piezas.

Las impresoras industriales pueden manejar piezas de 100x100x100 cm. Si se necesita construir objetos mayores o utilizar impresoras más pequeñas, será necesario dividir las piezas en partes más pequeñas para posteriormente ensamblarlas.

- Dirección de construcción de las piezas.

En la impresión de las piezas, la unión entre las capas contiguas se consigue por la presión que la boquilla ejerce sobre la capa anterior. La presión y la alta temperatura hacen que ésta se vuelva a fundir y se realice la unión con la nueva capa. La fuerza

de unión entre capas es siempre menor que la del propio material, es decir, la fuerza del eje Z siempre es menor que la fuerza en el plano XY. Por este motivo es importante tener en cuenta la dirección en que deben construirse las piezas a la hora de realizar el diseño de las mismas.

3.2.3 MATERIALES DISPONIBLES

Como se ha comentado anteriormente, la tecnología de impresión más utilizada en la actualidad y con mayor base instalada es la tecnología FDM. Este es uno de los motivos por los que existe una amplia gama de materiales disponibles para su uso. En la pirámide que se recoge a continuación se representan los materiales en función de su coste, propiedades y temperatura de trabajo. En la base de la pirámide se sitúan los termoplásticos básicos más comúnmente utilizados como el PLA y el ABS, a continuación, en la parte intermedia aparecen los materiales con aplicaciones en el ámbito de la ingeniería y, por último, en la parte alta se encuentran aquellos materiales que ofrecen un alto rendimiento.

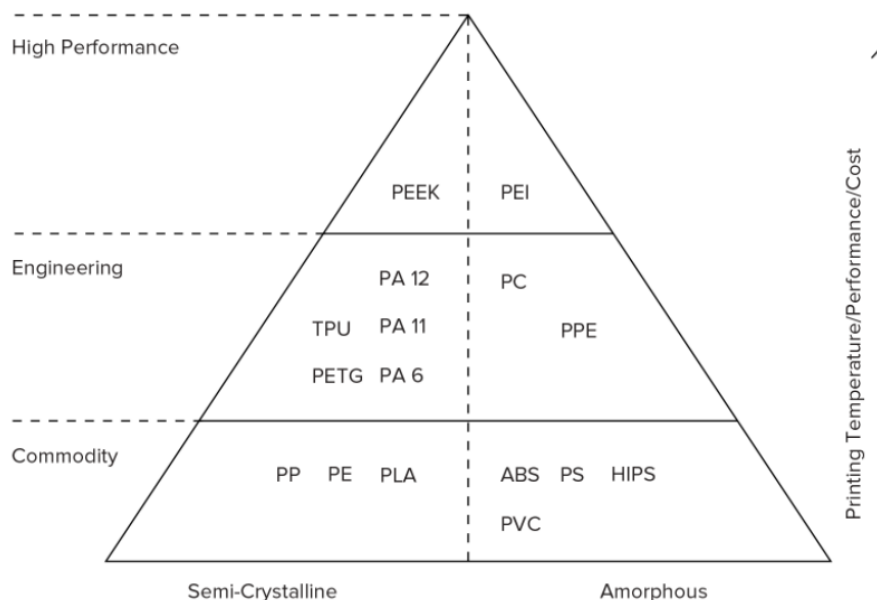


Figura 16. Clasificación materiales usados en la tecnología FDM [27]

Las principales características de estos materiales son las siguientes [27]:

▪ PLA (Ácido Poliláctico):

Se trata de es un termoplástico semicristalino biodegradable elaborado a partir de almidón de maíz o caña de azúcar, apto para construir envases para contener alimentos.

Sus principales ventajas/inconvenientes son:

Tabla 9. Ventajas/inconvenientes material PLA

Ventajas	Inconvenientes
+ Facilidad de impresión	- Frágil
+ Admite posprocesado	- Baja resistencia a la humedad
+ Resistencia rayos UV	- Dificultad en el pegado

▪ ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno):

EL ABS es un termoplástico amorfo que no es biodegradable, aunque sí reciclable. Por sus propiedades se utiliza para la fabricación de objetos de uso final.

Sus principales ventajas/inconvenientes son:

Tabla 10. Ventajas/inconvenientes material ABS

Ventajas	Inconvenientes
+ Buenas propiedades mecánicas	- Sensible a rayos UV
+ Buenas propiedades térmicas	- Susceptible a deformaciones
+ Admite posprocesado con acetona	

▪ Nylon:

Se trata de un polímero sintético que pertenece a la familia de las poliamidas.

Sus principales ventajas/inconvenientes son:

Tabla 11. Ventajas/inconvenientes material Nylon

Ventajas	Inconvenientes
+ Buenas propiedades mecánicas	- Sensible a rayos UV
+ Buenas propiedades térmicas	- Susceptible a deformaciones
+ Admite posprocesado con acetona	

▪ PETG (Tereftalato de Polietileno):

Se trata de un termoplástico semicristalino con propiedades mejoradas respecto al PLA. Puede ser utilizado para conservar alimentos y es reciclable.

Sus principales ventajas/inconvenientes son:

Tabla 12. Ventajas/inconvenientes material PETG

Ventajas	Inconvenientes
+ Alta resistencia al impacto y flexibilidad	- Más pesado que el PLA y el ABS
+ Buena resistencia química	
+ Resistencia a la humedad	
+ Admite posprocesado	

▪ TPU (Poliuretano Termoplástico):

El TPU es un elastómero termoplástico similar al caucho que se utiliza para la realización de tubos, agarraderas, sellos y juntas.

Sus principales ventajas/inconvenientes son:

Tabla 13. Ventajas/inconvenientes material TPU

Ventajas	Inconvenientes
+ Flexibilidad	- Baja precisión
+ Alta resistencia al impacto	- Difícil de pegar
+ Resistencia al aceite y a la grasa	

▪ PEI (Poliéterimida):

Se trata de un plástico de ingeniería que se utiliza en piezas que requieren un alto rendimiento.

Sus principales ventajas/inconvenientes son:

Tabla 14. Ventajas/inconvenientes material PEI

Ventajas	Inconvenientes
+ Alta resistencia al peso	- Alto coste
+ Buena resistencia química	- Tamaño de piezas limitado
+ Excelente resistencia al fuego	

Capítulo 4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe el procedimiento que se ha seguido para alcanzar los objetivos fijados para este proyecto. Como se puede ver en la figura 17, se ha estructurado el procedimiento en ocho bloques o tareas.

La tarea inicial, tiene como objetivo definir el problema que se quiere analizar y las variables a estudiar. Posteriormente, se aborda el diseño de probetas, común para todos los tipos de filamento a analizar. A partir de ahí las tareas definidas se han realizado para cada uno de los distintos tipos de filamento analizados. En la última tarea, Análisis de Resultados, se analizan los resultados obtenidos para cada tipo de material y se comparan entre sí.

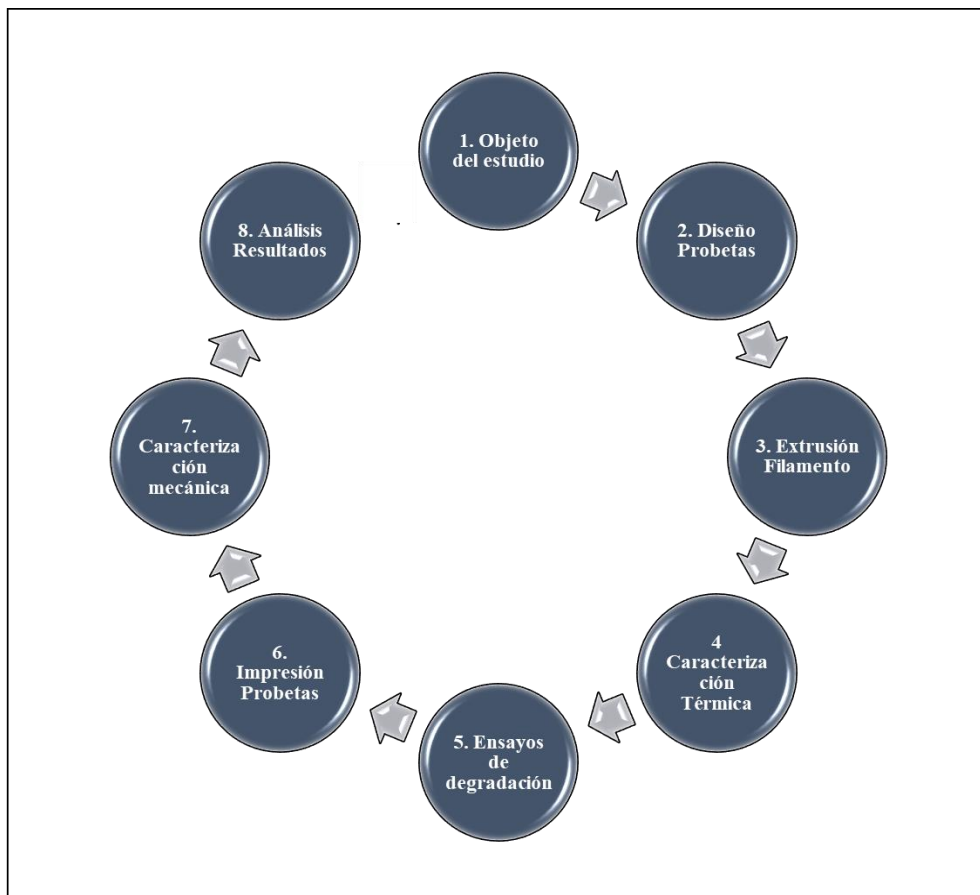


Figura 17. Esquema procedimiento experimental

4.1 OBJETO DEL ESTUDIO

Para abordar este estudio se han utilizado como referencia los siguientes tipos de filamento:

- Filamento de PLA comercial.
- Filamento elaborado a partir de granza de PLA.
- Filamento elaborado a partir de PLA reciclado.

Se han analizado las propiedades de estos filamentos y se han comparado los resultados con los obtenidos del filamento polimérico cargado con madera, que como hemos visto, es el objetivo de este proyecto.

Para todos estos filamentos se han caracterizado las propiedades mecánicas de comportamiento frente a ensayos de tracción, flexión e impacto. Además, se han caracterizado sus propiedades térmicas mediante DSC, calculando la temperatura de transición vítrea, la temperatura de fusión y la cristalinidad.

4.2 DISEÑO PROBETAS

La tecnología de fabricación aditiva permite el diseño de piezas de geometrías más complejas que, por sus particulares características, resultan difíciles de fabricar mediante otras técnicas. El aumento paulatino de piezas diseñadas mediante técnicas de impresión 3D ha llevado a la estandarización de las probetas que sirven de referencia para caracterizar los materiales que se usan en los diseños. El conjunto de estas reglas se recogen en la Norma Española UNE 116005:2012 [29]. Esta norma especifica las normas de preparación de las probetas y los métodos de los ensayos a realizar para la determinación de las propiedades de los materiales de fabricación aditiva.

Como se ha comentado, los ensayos realizados para la caracterización mecánica de las probetas han sido ensayos a tracción, flexión e impacto. Cada uno de estos ensayos dispone de sus propias probetas estandarizadas que permiten determinar las propiedades de los materiales.

▪ Probetas a tracción:

El modelo de probeta a utilizar para estos ensayos tiene el siguiente diseño:

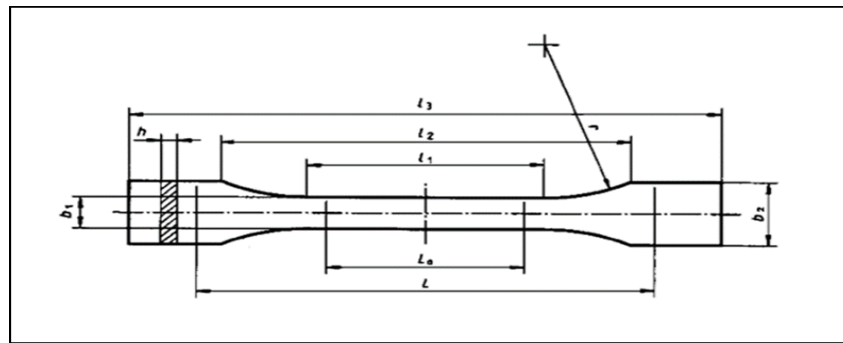


Figura 18. Probeta a tracción [29]

Y los valores a utilizar con sus respectivas tolerancias son los siguientes:

Tabla 15. Medidas probeta tracción

Probeta tracción	Medidas en milímetros
l1, Longitud de la zona paralela estrecha	80 ± 2
l2, Distancia entre zonas paralelas anchas	$104 \div 113$
l3, Longitud total	≥ 150
r, Radio	$20 \div 25$
b1, Anchura en la zona estrecha	10 ± 0.2
b2, Anchura en los extremos	20 ± 0.2
h, Espesor recomendado	4 ± 0.2
L0, Distancia entre marcas	50 ± 0.5
L, Distancia inicial entre mordazas	115 ± 1

- Probetas a flexión e impacto:

Se trata del mismo diseño para ambos ensayos:

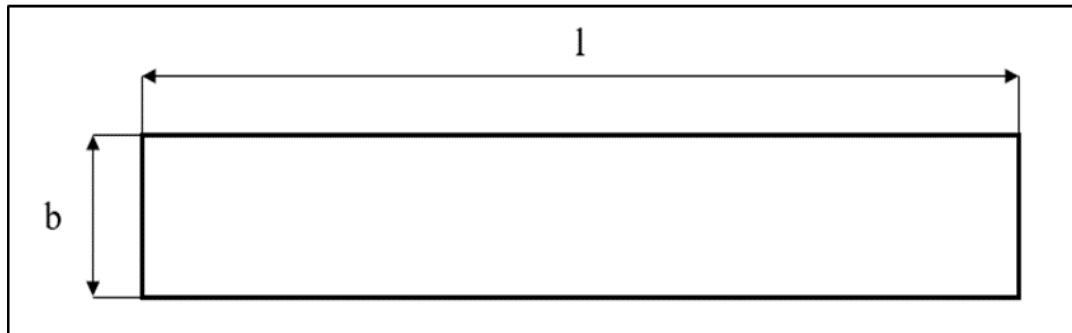


Figura 19. Probeta a flexión/impacto [29]

Este diseño debe llevarse a cabo con los siguientes valores:

Tabla 16. Medidas probeta flexión/impacto

Probeta flexión/impacto	Medidas en milímetros
l, Longitud	80 ± 0.2
b, Ancho	10 ± 0.2
h, Espesor	4 ± 0.2

4.2.1 DIRECCIÓN FABRICACIÓN PROBETAS

Debido a la anisotropía de las probetas fabricadas por FDM, la dirección en la que se realiza la deposición de las capas del material fundido tiene un papel fundamental en las propiedades de las probetas, haciéndolas más adecuadas para unos ensayos u otros.

Existen tres posibles direcciones para la construcción de las probetas que se ilustran en la siguiente figura.

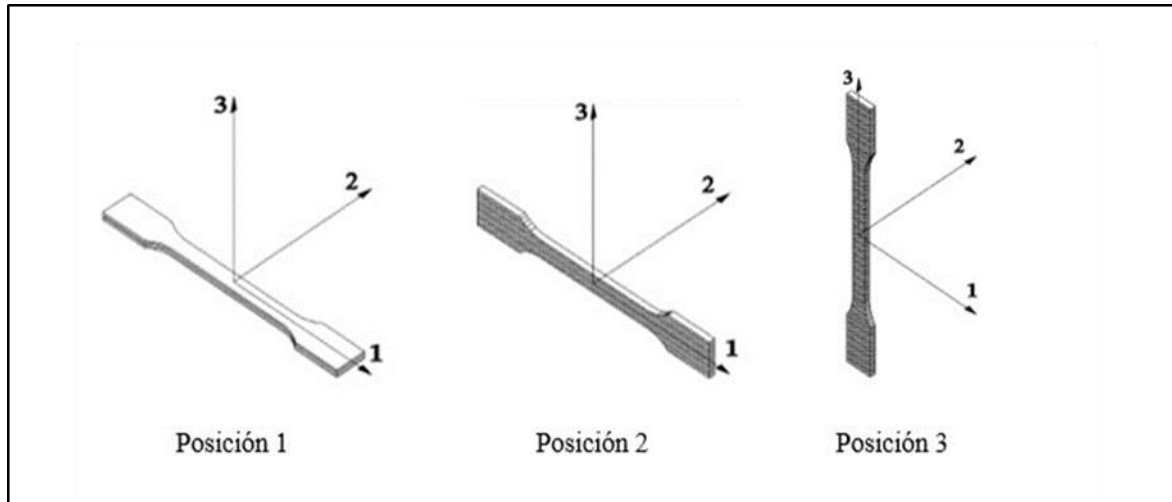


Figura 20. Direcciones de impresión [29]

La forma en la que se deposita el material determinará el esfuerzo máximo que es capaz de soportar las probetas según el ensayo desarrollado. En la figura se observan las tres disposiciones posibles para una probeta a tracción.

La tercera posición se descarta puesto que el filamento es depositado transversalmente a la barra vertical, por lo que la unión entre capas se realiza en la dirección más débil, que será a la que esté sometida al esfuerzo de tracción. También se descarta por la dificultad que tiene la impresión de las mismas.

4.2.2 PREPARACIÓN PARA LA IMPRESIÓN DE LAS PROBETAS MEDIANTE FDM

En el experimento se han utilizado dos máquinas de impresión 3D, la Geeetech (Geeetech Technology Co, Shenzhen, China) y la Prusa i3 (Prusa Research, Praga, República Checa), las cuales utilizan un programa abierto que permite imprimir los documentos “Gcode” que han sido diseñados previamente con el programa Cura multimaker que nos permite dar los parámetros que deseamos para la impresión de las probetas. Para ello, previamente se ha generado el documento “STL” al guardar el archivo de las probetas en Solid Edge asegurándose de que el intervalo de conversión es de 0,01 y el ángulo plano de superficie es de 3° para su correcta impresión. En el programa Cura donde se genera el documento Gcode se han seleccionado los parámetros para la impresión, así como la máquina que se va a

utilizar y el tipo de boquilla que utiliza la máquina para expulsar el filamento fundido. En este estudio interesa un 100% de relleno de la pieza a imprimir puesto que vamos a ensayar posteriormente las piezas a imprimir para caracterizarlas. Las probetas van a disponer de un relleno a 45° y se observará que la principal diferencia entre una dirección de impresión y otra se aprecia en la deposición de las capas finales externas.

4.3 EXTRUSIÓN FILAMENTO

El propósito de este proyecto es generar un filamento, a partir de granza, que posteriormente se utiliza en la impresora 3D de FDM. Para ello se ha utilizado la extrusora de filamento 3devo Composer (3DEvo, Utrecht, Países Bajos) la cual nos permite producir cable de diámetro 1.75 mm de manera homogénea y continuada. La impresora dispone de un spooler que permite bobinar el hilo que se va generando de manera adecuada. Además, esta máquina permite generar cables de distintos materiales, diámetros, características y concentraciones.



Figura 21. Extrusora 3Devo Composer 350 [37]

También se ha utilizado en el proyecto una máquina trituradora, la Shr3d Plastic Recycler, que sirve para triturar el filamento sobrante y las probetas ya usadas, y poder así reciclarlas. De esta forma se consigue dar una segunda vida útil a los materiales. El material se pasa varias veces por la trituradora para asegurar que el tamaño obtenido es apto para ser usado después en la extrusora.



Figura 22. Shr3d Plastic Recycler [38]

4.4 CARACTERIZACIÓN TÉRMICA

La calorimetría diferencial de barrido (DSC) permite determinar transiciones térmicas de los materiales, cómo, por ejemplo, el cálculo de la temperatura de transición vítrea, las temperaturas a las que funden los distintos materiales o la temperatura a la que comienza su descomposición. Para realizar los ensayos se ha utilizado un equipo Mettler Toledo DSC822. El ensayo consiste en un aumento progresivo de manera lineal de las temperaturas a una velocidad de 20°/min, desde temperatura ambiente (20°C) hasta 250°. Los resultados vienen reflejados en una gráfica que representa el calor absorbido o liberado por la muestra respecto al tiempo. Cuando el calor es liberado (transición exotérmica), se observará un pico hacia valores positivos del eje. Con ello, se puede determinar en el pico, que es el mínimo global de la curva, la temperatura y el tiempo en el que se funde dicho material. Se observa que si se trata de un material completamente amorfo este mínimo no existe, ya que no tiene punto de fusión. El material que se utiliza como muestra debe estar comprendido entre 8 y 12 mg y es introducido en un crisol de aluminio que previamente ha sido agujereado para permitir la salida de gases. El crisol con el material a estudiar se compara con una referencia, un crisol vacío, también perforado que permite hacer una comparación con el aire. El proceso necesita de una atmosfera inerte que se conseguirá a través de la introducción de nitrógeno en forma

gaseosa. El ensayo también permite encontrar la T_g o temperatura de transición vítrea en el primer punto de inflexión de la curva.

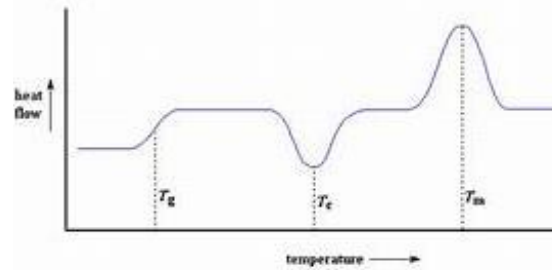


Figura 23. Ensayo térmico [39]

4.5 ENSAYOS DE DEGRADACIÓN

En este ensayo permite medir el nivel de degradación que presenta el material cuando es sometido a diferentes pruebas. Las pruebas consisten en sumergir completamente los filamentos en tubos que contienen agua desionizada e, introducirlos después, en hornos que someten a los filamentos a una temperatura constante de 60° C.

Se han hecho pruebas de un día, tres días y una semana de duración para poder observar el impacto que provoca el agua sobre el material. Se han realizado tres mediciones:

- Una primera medición, antes de realizar la prueba, tras haber tenido el material en un secador durante un día para eliminar toda la humedad posible y poder medirlo en seco.
- Una segunda medición, nada más sacarlo del tubo con agua trascurrido el periodo en el que ha estado el material dentro del horno (un día, tres días y una semana).
- Por último, se realiza una última medición, tras secar el material para eliminar toda la humedad posible.

Este ensayo permite calcular los porcentajes de degradación del material y la cantidad de agua que puede absorber.

4.6 IMPRESIÓN PROBETAS

En este apartado se explica la técnica de impresión utilizada para la obtención de las probetas. Las máquinas de impresión utilizadas son:

- La Geetech A 20m que consta de dos canales de alimentación indirecta y una única boquilla que aporta el material. La alimentación indirecta consiste en un sistema de alimentación donde el motor que empuja el filamento y el calentador que lo funde para depositarlo sobre la cama están separados en dos unidades autónomas una de la otra.



Figura 24. Impresora Geetech A20m [40]

- La Prusa i3 mk3s se caracteriza por ser una impresora de FDM de alimentación directa y una única boquilla con un diseño sencillo que permite impresiones de gran calidad. Consta de un sistema de autonivelado de la cama que permite una perfecta deposición del material capa a capa a la hora de imprimirse.



Figura 25. Impresora Prusa i3 mk3s [41]

Para una adecuada impresión es necesario asegurarse de que una serie de pasos previos se cumplen. Lo primero será necesario asegurarse de que el material de impresión y la temperatura a la que funde están en concordancia con los valores que se han dado en el fichero Gcode y los de la propia impresora. También debe de asegurarse que la cama sobre la que se deposita ha sido precalentada; normalmente a una temperatura media de 60°C permite que el filamento fundido se deposite quedando adherido a la cama facilitando así la deposición capa tras capa. Si por el contrario no consiguiéramos que el material quedase adherido se disponen de varias lacas que facilitan su cohesión. Se debe calibrar la cama de tal manera que las cuatro esquinas queden niveladas permitiendo una adecuada deposición. Por último, es interesante extruir un poco de material antes de lanzar el fichero ya que podría contener restos de otros materiales que podrían dañar la impresión.

4.6.1 CALIBRACIÓN Y PUESTA A PUNTO DE LA IMPRESORA

Para la impresión correcta de las probetas es necesario asegurarse de que el diámetro está dentro del intervalo válido. Este ha supuesto el principal problema en la impresión de las probetas.

En el caso de las probetas hechas a partir del filamento comercial y de la granza de PLA los diámetros del cable se consiguieron con relativa facilidad por lo que solo supuso la particularización del documento Gcode a las características del material de impresión. Es en la granza de PLA con madera donde se requiere de un mayor cuidado. Debido a la especial rugosidad del cable y a su densidad es necesario modificar el Gcode introduciendo los nuevos valores de densidad y temperatura de fusión llevándolas a valores de 1,58g/cm³ y 230°C para conseguir así una buena impresión. Además, se han tenido que cambiar las boquillas de 0,4mm ya que al ser un material más denso provocaba atascos y falta de continuidad en la deposición del material por ello se han sustituido por boquillas de 0,6 mm.

4.7 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL FILAMENTO

La caracterización mecánica de las probetas impresas de PLA y PLA cargado con madera se realiza mediante tres tipos de ensayos: Ensayos a tracción, flexión e impacto. Para la

realización del ensayo se ha utilizado un péndulo Charpy CEAST 9350 de Instron para polímeros y una máquina de ensayos universales IBTH 500 de Ibertest.

4.7.1 ENSAYO A TRACCIÓN

Este ensayo consiste en someter a una probeta a una fuerza axial deformándola plásticamente hasta llegar a la tensión de rotura de la misma. Este ensayo proporciona la distancia recorrida, la fuerza que se ejerce para traccionarlos y el tiempo en el que transcurre el ensayo. Estos datos permiten realizar los cálculos de tensión y deformación para cada punto de medida en cada probeta. Se calculará también el módulo de Young mediante la pendiente de la gráfica con los datos correspondientes a la zona lineal de la gráfica. Los datos se recogerán en unas tablas que comparan todas las probetas de un tipo permitiendo así el cálculo de la media y la desviación típica, que posteriormente permite una comparación a mayor escala con todas las medias de los distintos materiales.

Las fórmulas utilizadas para su cálculo son:

$$\sigma = \frac{F(N)}{h(mm) \cdot b(mm)} \text{ (MPa)}$$

Donde:

- F: fuerza (N)
- h: espesor(mm)
- b: ancho (mm)

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

Donde:

- L: longitud probeta(m)
- ΔL : variación de la longitud (m)

Para la ejecución de manera correcta del ensayo es necesario asegurarse que se colocan las mordazas planas de manera correcta, sujetando bien la probeta impidiendo que esta deslice, ya que alteraría los resultados del ensayo haciendo que este fuera inválido. Para ello, las mordazas deben sujetar hasta el punto en que la probeta comienza a estrecharse. Los ensayos varían los tiempos de duración en función del material del que está compuesto la probeta a ensayar siendo apropiado un tiempo de entre 3 y 5 minutos para la ejecución de este tipo de materiales poliméricos.

4.7.2 ENSAYO A FLEXIÓN

Ensayo a flexión: El ensayo consiste en someter una probeta a una fuerza perpendicular en el punto medio de la misma, consiguiendo de la misma manera que en el ensayo a tracción su deformación y tensión hasta rotura. Los datos obtenidos también serán la fuerza, el tiempo y la carrera con los que se calcularán los mismos valores característicos de tensión máxima, deformación máxima y módulo a flexión. Los datos se recogerán en unas tablas que comparan todas las probetas de un tipo permitiendo así el cálculo de la media y la desviación típica, que posteriormente permite una comparación del ensayo a flexión a mayor escala con todas las medias de los distintos materiales.

Las fórmulas utilizadas para su cálculo son:

$$\sigma = \frac{3 \cdot F (N) \cdot L(mm)}{2 \cdot h^2 (mm^2) \cdot b(mm)} (MPa)$$

Donde:

- F: fuerza (N)
- L: distancia entre apoyos (mm)
- h: espesor(mm)
- b: ancho (mm)

$$\varepsilon = \frac{6 \cdot \Delta L \cdot h}{L^2}$$

Donde:

- L: distancia entre apoyos (mm)
- h: espesor(mm)
- ΔL : deflexión (mm)

En este ensayo es imprescindible asegurarse que la distancia entre apoyos es la adecuada en el soporte sobre el que se apoyará la probeta ya que de lo contrario no será válido el experimento. La distancia adecuada según norma es de 60 mm y la fuerza vertical debe estar aplicada en el punto medio de la misma y se debe aplicar hasta rotura o hasta que la curva de tensión deformación comience a caer.

4.7.3 ENSAYO A IMPACTO

El ensayo a impacto es un método que permite conocer el comportamiento de un material que es sometido a una fuerza puntual. Se mide la energía absorbida por la probeta cuando es sometida a un impacto empleando un péndulo de Charpy. Esta energía permite el cálculo de la resistencia de Charpy que ayuda a poder realizar una mejor comparación de las probetas según la dirección de impresión y el tipo de material del que se trate.

Las fórmulas utilizadas para su cálculo son:

$$R (kJ/m^2) = \frac{E (J) \cdot 1000}{h (mm) \cdot b (mm)}$$

Donde:

- E: Energía de impacto (J)
- h: espesor(mm)
- b: ancho (mm)

Capítulo 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos a los que se han sometido los distintos filamentos analizados. Cada tipo de ensayo de un filamento se ha repetido en cinco ocasiones (con 5 probetas o muestras diferentes) para disponer de una muestra lo suficientemente representativa que permita medir correctamente los distintos valores, eliminando aquellos que pudieran estar fuera de rango. Además, en el caso de las probetas impresas, cada ensayo se ha realizado con probetas construidas en las dos direcciones mencionadas en el apartado 4.2.1, tal y como especifica la norma.

Como criterio para identificar los resultados obtenidos en los diferentes ensayos se ha utilizado la siguiente nomenclatura (D_E_N) en donde el significado de cada valor es el siguiente:

- D: dirección de fabricación de la probeta (A. Dirección 2, B. Dirección 1)
- E: tipo de ensayo (1. Ensayo de tracción, 2. Ensayo de flexión, 3. Ensayo de impacto)
- N: número de ensayo (Valores de 1 a 5)

Por último, para realizar el análisis de los datos obtenidos en los ensayos a tracción de las probetas se ha utilizado el programa IBM SPSS Statistics 26. Este programa permite identificar si los datos obtenidos en los distintos ensayos son anómalos y, por tanto, deben eliminarse.

5.1 OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE EXTRUSIÓN

Previa a la fabricación del filamento, se ha llevado a cabo un estudio para la calibración de la máquina extrusora determinando los posibles parámetros válidos que permitían conseguir el filamento en el intervalo definido para realizar la impresión de manera correcta. Esta calibración, es necesaria hacerla para cada material en particular y se ha realizado variando los valores que la máquina permite modificar los cuales son: la velocidad del husillo, la

velocidad de los ventiladores, el diámetro deseado y las diferentes temperaturas de los cuatro calentadores. Para la calibración del filamento se ha contado con la ayuda del programa DevoVision el cual permite recoger los datos de diámetro del filamento, la velocidad a la que avanza (rpm) a las que avanza y las temperaturas a las que funcionan los calentadores.

La obtención de un filamento de calidad y cuyas dimensiones queden dentro de las tolerancias dimensionales requeridas por las impresoras es compleja. Los principales problemas que se han tenido que enfrentar son:

- Adecuar el diámetro del hilo al intervalo estipulado que de $1,75 \pm 0,05$ mm.
- Controlar la velocidad de enfriamiento que, si es muy rápida, genera un cable muy frágil.
- Falta de fusión del material.

Existen tres casos a parametrizar:

▪ Calibración de granza de PLA:

En este caso, se han utilizado los valores por defecto de la máquina para un cable de PLA de 1,75 mm de diámetro y se han ido modificando para ver cómo afectaban las posibles modificaciones de los valores que caracterizan la extrusión. Los valores base son:

Tabla 17. Parámetros de impresión granza de PLA

Diámetro	RPM	Ventiladores	Heater 1	Heater 2	Heater 3	Heater 4
1,75 mm	3,5	80%	170°C	195°C	185°C	170°C



Figura 26. Gráfica diámetro de impresión granza de PLA

Es importante saber que los calentadores están colocados de menor a mayor siendo el menor el más próximo a la boquilla extrusora. Cabe destacar que las temperaturas en los calentadores no son homogéneas y esto es debido a que, por ejemplo, en el caso del calentador 1 más próximo a la boquilla se requiere de temperaturas menores para que el material no salga excesivamente caliente y le dé tiempo a enfriarse de manera correcta. Si se realiza un estudio preliminar de los datos, se observa que todos los calentadores se encuentran a temperaturas de entre un 10 % y un 15 % superior a la temperatura de fusión del material utilizado, lo que asegurará que el material esté en un estado líquido impidiendo imperfecciones en el cable. Durante la primera impresión se tuvo que hacer frente a este problema, ya que había pellets de PLA que no terminaban de fundir y generaban rugosidades y puntos débiles en el cable que eran inadmisibles para luego lanzar una impresión en la máquina de impresión 3D ya que generaría atascos.

También se jugó con los valores de los ventiladores bajándolos hasta un 30 % con lo cual se descubrió, que para la velocidad a la que salía el material y la velocidad a la que funcionaba el ventilador, no era posible conseguir un enfriamiento lo suficientemente rápido, haciendo que el cable quedara pegado a los rodillos de plástico que aportan al cable el diámetro deseado. Por el contrario, si se subían los valores por encima del 80 % se observaba que el cable adquiría una rigidez y fragilidad no deseadas, ya que estas propiedades serían transmitidas a las probetas. Además, debido a su fragilidad resultaba prácticamente imposible realizar el bobinado del filamento ya que este se partía. La fragilidad se debe a un rápido enfriamiento del material lo cual hace que sea un material muy amorfo. Un resultado válido para la extrusión de filamento sería bajar tanto la

velocidad del husillo como la de los ventiladores, pero resulta ineficiente ya que se puede obtener un hilo de propiedades similares con los valores base.

▪ Calibración de PLA reciclado:

El PLA reciclado proviene de los restos de las probetas y filamento de la granza de PLA que son triturados por la SHR3D. El triturado se realiza en varias etapas para asegurarse de que el tamaño de grano es inferior a 4 mm, que es el admisible por la máquina extrusora y los trozos de material triturado tengan un tamaño más o menos homogéneo.

Antes de extruir, se ha hecho un ensayo térmico al material reciclado para ver si variaban los puntos de fusión del material al tratarse de PLA reciclado y se observa que los valores son muy similares tras solo un uso al original. Esto no será así siempre ya que, tanto la trituración como la extrusión pueden generar alteraciones en el polímero que pueden modificar las temperaturas según se va degradando. Esta degradación se debe a que, según se va fundiendo una y otra vez, las cadenas se van haciendo más cortas y, por tanto, el material se vuelve más cristalino. Por tanto, no se podrá reciclar muchas veces el mismo material ya que cada vez será más frágil.

El segundo problema que puede darse es que aparezcan burbujas. Esto se puede deber principalmente a que el material reciclado contenga altos valores de humedad lo que provoca aglomeraciones de material en la tolva a la entrada, lo que impide la alimentación continua y, por ello, su correcta distribución. La solución pasa por secar previamente el material antes de utilizarlo, poner un vibrador para irlo removiendo constantemente o aumentar las temperaturas de H2 y H3. Existen también otras posibles soluciones las cuales son:

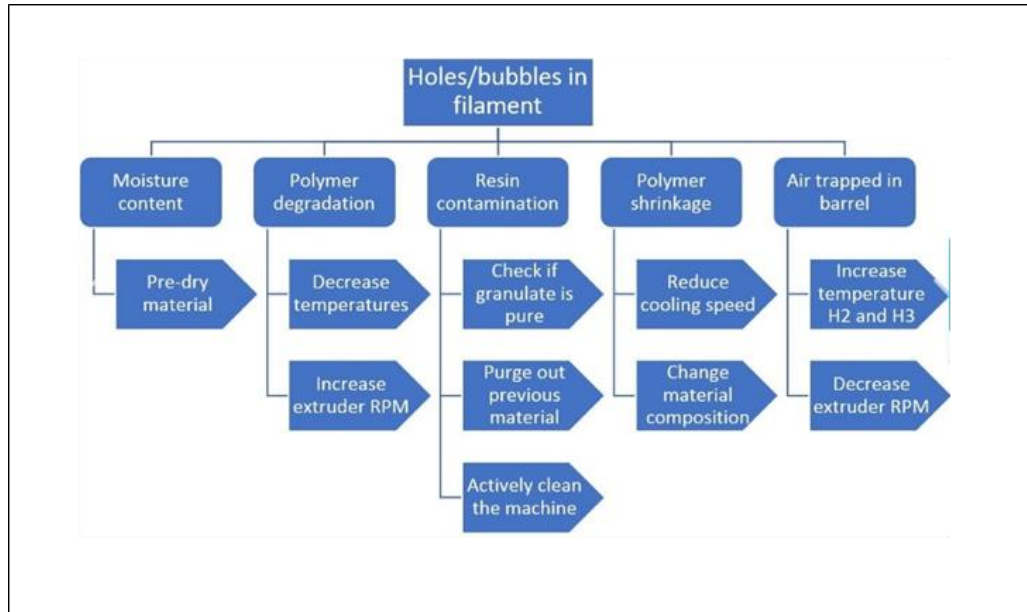


Figura 27. Posibles problemas y soluciones a las burbujas de aire [14]

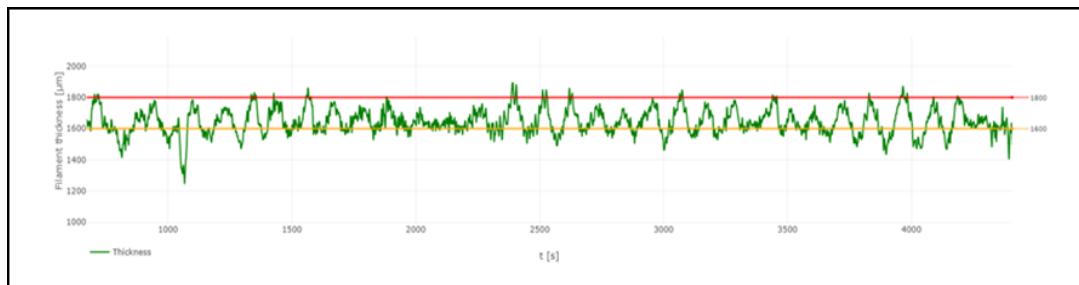


Figura 28. Gráfica diámetro de impresión PLA reciclado

Otro problema al que se tuvo que hacer frente fue que, en ocasiones, la máquina no era capaz de aumentar el diámetro hasta los niveles deseados quedándose entre 0,8 mm y 1,2mm. La única manera que se encontró de solucionarlo fue a través del aumento de la velocidad a la que extruye el husillo el material. Así se consigue homogeneizar el hilo en valores válidos para la impresión, se cree que el motivo de esto puede ser un tamaño de grano excesivamente pequeño, por lo que resulta difícil de controlar la parametrización.

El último problema al que se tuvo que hacer frente fue el de que el filamento saliese muy fundido, lo cual traía problemas a la hora de determinar el diámetro y hacía que el

material se quedase pegado en los rodillos de goma de la máquina. Así pues, la solución encontrada fue bajar las temperaturas de los calentadores o subir la potencia de los ventiladores.

Tras superar todas estas dificultades se logró un hilo comprendido entre 1,6mm y 1,8 mm, tal y cómo se puede ver en la Figura 28, que no entraba en el intervalo de valores deseado y tras muchos intentos se llegó a la conclusión que el material estaba tan degradado que resultaba sumamente frágil y, por ello, era imposible llegar a las especificaciones requeridas y se descartó como opción viable para la impresión de probetas.

- Calibración de PLA con madera:

Para este ensayo se utiliza una granza de PLA con madera la cual contiene ya la lignina. Para poder usarla, es necesario previamente haberla secado eliminando toda la humedad posible del material a extruir. En este caso la etapa de secado es más importante, ya que la adición de madera hace que el material tenga una mayor tendencia a absorber humedad del ambiente. Es necesario también, como en el caso del PLA reciclado, el uso de un vibrador para eliminar las posibles aglomeraciones que hacen que la entrada de material al husillo no sea continua, haciendo que el filamento no se extruya de manera homogénea y evitando así que existan burbujas donde el cable contenga aire.

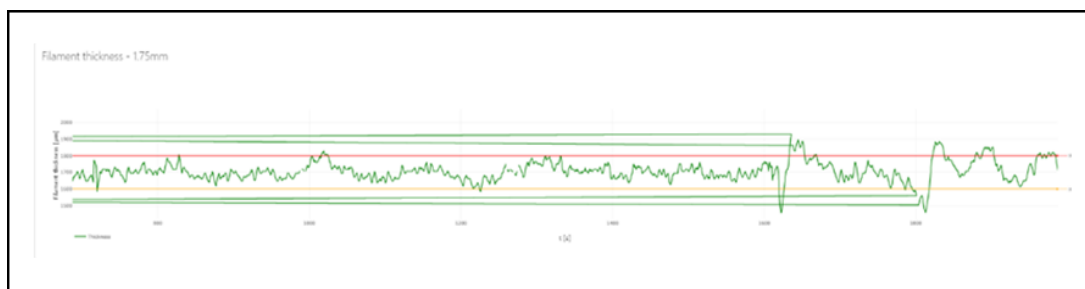


Figura 29. Gráfica diámetro de impresión PLA madera

Para extruir de manera correcta el material lo primero que se ha hecho es un ensayo térmico que nos muestra que el punto de fusión del PLA con madera es mayor que el del

PLA. El punto de fusión del PLA con madera es de 185° C y de acuerdo con las recomendaciones del fabricante de extruir el material con temperaturas de al menos un 10% más altas que el punto de fusión, se han elegido los siguientes parámetros como valores para la extrusión de filamento:

Tabla 18. Parámetros de impresión PLA con madera

Diámetro	RPM	Ventiladores	Heater 1	Heater 2	Heater 3	Heater 4
1,70 mm	3,5	40%	200°C	210°C	210°C	200°C

Cabe destacar que en este caso se adopta como valor medio del diámetro 1,7 mm en vez de 1,75 mm, debido a que el intervalo de valores en torno a los que se mueve el diámetro no debe superar los valores límite que hacen posible la impresión 3D posterior. Se observa que los valores de los calentadores 2 y 3 son algo superiores para asegurarse que no va a haber pompas aire y que todo el material funde por completo.

El problema principal que se encuentra con el PLA con madera es que, al tener contenidos tan altos de agua y una densidad mayor (1,58 g/cm³), hace que se aglomere, lo que genera tramos de cable que no se rellenan por completo.

5.2 RESULTADOS ENSAYOS PROBETAS IMPRESAS FABRICADAS CON PLA

Las propiedades del material de PLA se han medido con los siguientes tipos de filamento:

- Filamento de PLA comercial.
- Filamento fabricado con granza de PLA.

En total, para cada tipo de filamento se han realizado 30 ensayos para caracterizar las propiedades mecánicas de cada uno de ellos (5 repeticiones, 2 direcciones de fabricación y 3 tipos de ensayo).

Además, en la impresión de las probetas se ha tenido en cuenta disponer de un pequeño stock por cada tipo de filamento, por si se produjera algún fallo en los ensayos o se obtuvieran valores anómalos que hicieran recomendable la repetición de los mismos.

5.2.1 RESULTADOS ENSAYOS PROBETAS FABRICADAS CON PLA COMERCIAL

En las imágenes que se muestran a continuación, se pueden ver las probetas construidas con filamento de PLA comercial fabricadas de acuerdo a las especificaciones de la Norma Española UNE 116005:2012 [29].



Figura 30. Probeta tracción filamento comercial



Figura 31. Probeta flexión e impacto filamento comercial

Como se ha mencionado anteriormente, cada una de estas probetas se ha fabricado con las dos direcciones de fabricación especificadas. En total, se han realizado un total de 10 ensayos para caracterizar cada una de las tres propiedades mecánicas analizadas, cinco por cada una de las direcciones de fabricación.

▪ Ensayo a tracción:

Los resultados obtenidos en los ensayos de tracción realizados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 19. Resultados ensayos tracción filamento comercial

Ensayo	Tensión (MPa)	Deformación	Módulo (MPa)
A_1_1	35,65	0,077	1345
A_1_2	27,66	0,137	1284
A_1_3	38,01	0,056	1676
A_1_4	35,20	0,115	1610
A_1_5	37,11	0,043	1532
B_1_1	36,75	0,075	1650
B_1_2	38,52	0,052	1599
B_1_3	45,41	0,068	1970
B_1_4	36,97	0,064	1527
B_1_5	36,98	0,070	1572

En las probetas fabricadas en la dirección A se observa que la probeta “A_1_2” ha soportado menos esfuerzo máximo que las cuatro restantes. Esto es debido a que resbaló la mordaza produciéndose una rotura fuera de la parte estrecha que es la destinada al ensayo. Además, la rotura se produjo de manera longitudinal a la dirección de impresión por lo cual este dato queda descartado. Probablemente, se deba a un fallo en la impresión de la probeta.

En el caso de las probetas fabricadas en la dirección B, se descartó para el cálculo la probeta “B_1_3”, por haber dado valores de tensión muy superiores y ser considerado valor anómalo por el software SPSS. Este valor puede deberse a la manera en que la probeta ha roto, ya que la deformación no ha sido la más alta.

A continuación, se muestran los valores medios y desviaciones por dirección de fabricación:

Tabla 20. Valores medios y desviación típica ensayos tracción filamento comercial

	Dirección A		Dirección B	
	Valor medio	Desv	Valor medio	Desv
F max (N)	1434	52	1339	16
Tensión max (MPa)	36,49	1,30	37,30	0,82
Módulo (MPa)	1541	143	1587	52
Deformación	0,073	0,031	0,065	0,010

En la gráfica que se muestra a continuación, se puede ver el comportamiento de la deformación en función de la tensión aplicada. Se pueden diferenciar tres tramos de comportamiento:

1. Deformación lineal: corresponde a la parte lineal de la curva con pendiente positiva, donde existe una deformación elástica capaz de recuperarse tras desaparecer el esfuerzo.
2. Deformación plástica: a partir del límite elástico, la curva deja de ser lineal y la deformación de la probeta empieza a ser irreversible (deformación plástica). En esta región se encuentra también el máximo esfuerzo capaz de soportar.
3. Rotura: corresponde en el gráfico a la caída brusca de la curva en la que se produce la rotura de la probeta.



Figura 32. Gráfica tensión-deformación ensayos tracción filamento comercial

▪ Ensayo a flexión:

Seguidamente, se presentan los datos del ensayo a flexión de las probetas del filamento de PLA comercial. En este caso se observa que existe una dirección preferente que soporta más tensión, la dirección A. Sin embargo, vemos que esto no afecta al resto de parámetros que caracterizan la muestra y se ve que los resultados obtenidos resultan bastante homogéneos independientemente de la dirección elegida para imprimir.

Tabla 21. Resultados ensayos flexión filamento comercial

Ensayo	Tensión (MPa)	Módulo (MPa)
A_2_1	90,02	2496
A_2_2	87,59	2678
A_2_3	88,24	2559
A_2_4	87,19	2623
A_2_5	89,47	2699
B_2_1	73,27	2492
B_2_2	79,86	2895
B_2_3	78,28	2700
B_2_4	82,87	2968
B_2_5	81,35	2903

La siguiente tabla resume las medias y desviaciones que tienen los datos obtenidos en los ensayos. En este caso no se observa ningún dato anómalo, por lo que se utilizan todos los valores obtenidos.

Tabla 22. Valores medios y desviación típica ensayos flexión filamento comercial

	Dirección A		Dirección B	
	Valor medio	Desv	Valor medio	Desv
F max (N)	154	2	120	4
Tensión max (MPa)	88,50	1,21	79,12	3,69
Módulo (MPa)	2611	84	2792	195

Como en la gráfica de tracción se observa la fuerza por unidad de área, es decir la tensión, enfrentada a la deformación y se observa que la tensión a flexión es significativamente mayor que a tracción. En este caso no existirá un tercer tramo como en el de tracción ya que la probeta es lo suficientemente plástica para no romper y deformarse hasta entrar por el hueco entre apoyos.

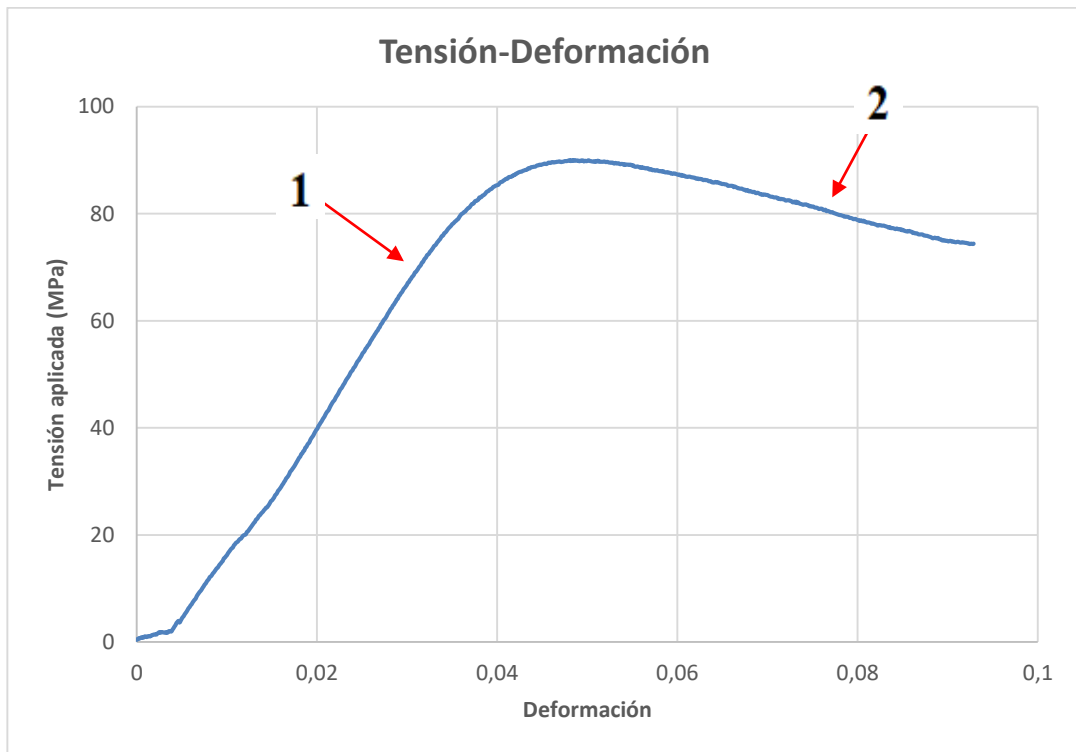


Figura 33. Gráfica tensión-deformación ensayos flexión filamento comercial

- Ensayo a impacto:

En este ensayo se analiza la energía necesaria para romper una probeta mediante un único impacto. A continuación, se procede al cálculo de la resistencia de Charpy que mide la energía medida en kJ que necesita por mm^2 . Se aprecia que no existen diferencias significativas entre una dirección y otra.

Por último, se muestran los resultados obtenidos en el ensayo Charpy:

Tabla 23. Resultados ensayos impacto filamento comercial

Tipo	Ensayo	Energía (J)	Resistencia Charpy (J/mm ²)
A	A_3_1	1,607	41,728
A	A_3_2	1,201	30,934
A	A_3_3	1,599	41,331
A	A_3_4	1,968	50,995
A	A_3_5	1,478	38,029
B	B_3_1	1,097	29,981
B	B_3_2	1,547	42,438
B	B_3_3	1,036	28,335
B	B_3_4	1,645	45,887
B	B_3_5	0,864	23,626

En la tabla 24, se reflejan los valores medios y la desviación para cada dirección de fabricación.

Tabla 24. Valores medios y desviación típica ensayos a impacto filamento comercial

	Dirección A		Dirección B	
	Valor medio	Desv	Valor medio	Desv
Energía (J)	1,571	0,276	1,238	0,340

5.2.2 RESULTADOS ENSAYOS PROBETAS FABRICADAS CON GRANZA DE PLA

Debido a que se trata de granza de PLA, el color del filamento que se usa es transparente, y la probeta por ello adquiere un color blanquecino ya que al fundir y solidificar el material se modifican sus propiedades.

A continuación, se muestra el aspecto actual de los dos tipos de probetas:



Figura 34. Probeta tracción filamento granza de PLA



Figura 35. Probeta flexión e impacto filamento granza de PLA

▪ Ensayo a tracción:

Se han obtenido los siguientes resultados experimentales del ensayo a tracción:

Tabla 25. Resultados ensayos tracción filamento granza PLA

Ensayo	Tensión (MPa)	Deformación	Módulo (MPa)
A_1_1	51,33	0,048	1797
A_1_2	51,80	0,048	1705
A_1_3	50,24	0,047	1786
A_1_4	41,44	0,060	1565
A_1_5	37,89	0,043	1530
B_1_1	56,50	0,035	2004
B_1_2	56,31	0,036	2032
B_1_3	52,75	0,028	1992
B_1_4	56,02	0,034	1985
B_1_5	56,57	0,036	2042

Se observó que el programa clasificaba los valores obtenidos en los ensayos “A_1_4” y “A_1_5” como valores atípicos. Esto se debe a que, en la impresión, la deposición de capa no fue la correcta por lo que generó puntos de debilidad en el interior de la probeta que se pudieron ver con claridad al observar los restos de las probetas. Por ello, no se han tenido en cuenta estos ensayos para el cálculo de la media y la desviación típica en esta dirección, ya que se considerarán “outliers” y desvirtuarían los resultados notablemente.

Tabla 26. Valores medios y desviación típica ensayos tracción filamento granza PLA

	Dirección A		Dirección B	
	Valor medio	Desv	Valor medio	Desv
F max (N)	2114	39	1958	63
Tensión max (MPa)	51,12	0,80	55,63	1,62
Módulo (MPa)	1763	50	2011	25
Deformación	0,048	0,000	0,034	0,003

La gráfica de la tensión enfrentada a la deformación queda de la siguiente forma:



Figura 36. Gráfica tensión-deformación ensayos tracción filamento granza PLA

▪ Ensayo a flexión:

Los resultados obtenidos en los ensayos a flexión, se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 27. Resultados ensayos flexión filamento granza PLA

Ensayo	Tensión (MPa)	Deformación	Módulo (MPa)
A_2_1	92,50	0,052	2677
A_2_2	100,02	0,067	2628
A_2_3	99,50	0,045	2710
A_2_4	94,03	0,061	2637
A_2_5	99,63	0,061	2650
B_2_1	92,39	0,052	2881
B_2_2	96,16	0,048	3014
B_2_3	95,19	0,053	2967
B_2_4	94,96	0,055	3009
B_2_5	88,96	0,055	2783

En este ensayo no se observan valores reseñables que hagan sospechar que puede tratarse de un valor atípico y, por ello, que se tenga que eliminar la probeta en cuestión. Se observa además que existe poca dispersión entre los valores calculados, por lo que se deduce que la impresión ha tenido una gran precisión.

Tabla 28. Valores medios y desviación típica ensayos flexión filamento granza PLA

	Dirección A		Dirección B	
	Valor medio	Desv	Valor medio	Desv
F max (N)	166	5	138	11
Tensión max (MPa)	97,14	3,58	93,53	38,86
Módulo (MPa)	2660	103	2931	98
Deformación	0,057	0,009	0,052	0,003

Y la gráfica de la tensión enfrentada a la deformación queda de la siguiente forma:

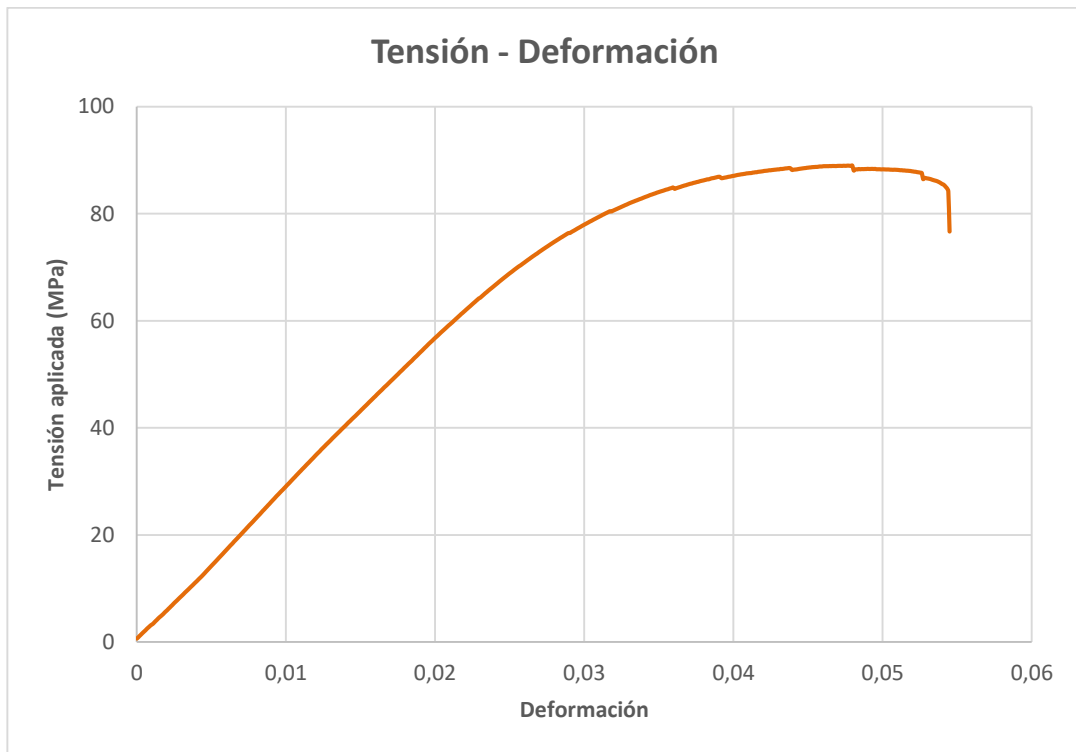


Figura 37. Gráfica tensión-deformación ensayos flexión filamento granza PLA

- Ensayo a impacto:

Se muestran los resultados del ensayo de impacto en las dos direcciones pudiendo observar para este caso que no existen diferencias notables según la dirección en la que se imprime.

Tabla 29. Resultados ensayos impacto filamento granza PLA

Tipo	Ensayo	Energía (J)	Resistencia Charpy (J/mm ²)
A	A_3_1	0,604	15,554
A	A_3_2	0,844	21,762
A	A_3_3	0,880	22,898
A	A_3_4	0,766	19,828
A	A_3_5	0,508	13,243
B	B_3_1	0,753	21,169
B	B_3_2	0,769	19,971
B	B_3_3	0,766	20,620
B	B_3_4	0,855	22,671
B	B_3_5	0,578	16,207

En la tabla 30, se reflejan los valores medios y la desviación para cada dirección de fabricación.

Tabla 30. Valores medios y desviación típica ensayos a impacto filamento granza PLA

	Dirección A		Dirección B	
	Valor medio	Desv	Valor medio	Desv
Energía (J)	0,720	0,159	0,744	0,101

5.2.3 COMPARATIVA ENSAYOS MECÁNICOS PROBETAS FABRICADAS CON PLA

Si se compara los datos obtenidos en los ensayos mecánicos realizados con probetas fabricadas con PLA comercial y filamento extruido a partir de granza de PLA, se obtienen las siguientes conclusiones:

▪ Ensayo a tracción:

Se observa que en general se obtienen mejores valores en los ensayos a tracción de las probetas impresas con filamento de PLA fabricado en el laboratorio que con las impresas con filamento comercial. Se obtienen valores más altos en los tres campos de estudio (tensión, deformación y módulo). Uno de motivos por los que se obtienen estos resultados puede deberse a que el filamento comercial cuenta con aditivos que reducen levemente estas propiedades.

Tras los ensayos, se observa que en las pruebas a tracción es más conveniente la primera dirección de impresión de las probetas (dirección 2), ya que permite unos valores más altos de tensión y deformación hasta rotura.

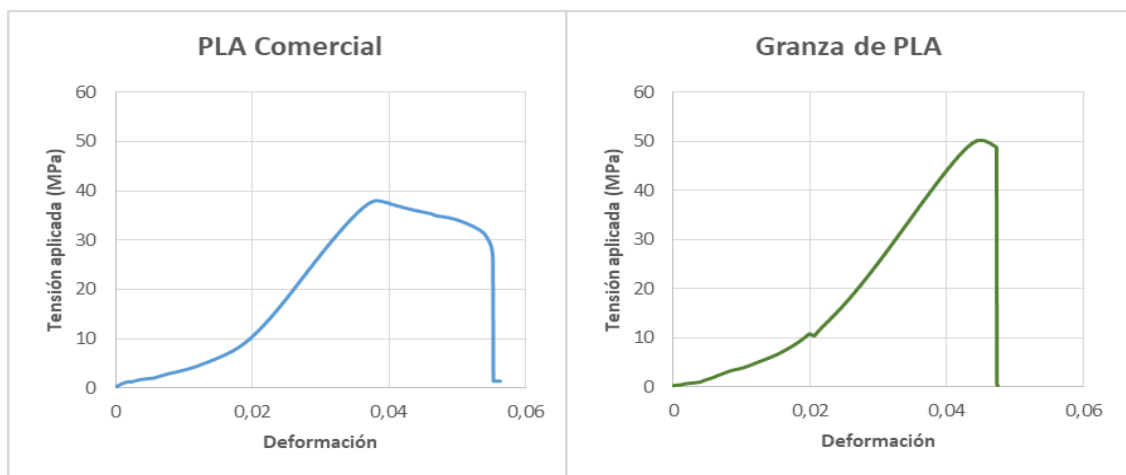


Figura 38. Comparativa ensayos tracción PLA vs Granza de PLA

▪ Ensayo a flexión:

En el caso de los ensayos a flexión, no existen diferencias significativas entre los valores obtenidos, siendo muy similares para los dos filamentos. Si es relevante que, las probetas construidas con filamento comercial no rompen, y las de granza de PLA sí lo hacen.

Sí se concluye que la segunda dirección de impresión (dirección 1) es más eficiente para ensayos a flexión debido a que la deposición de la capa permite una mayor deformación y soporta mayores esfuerzos.

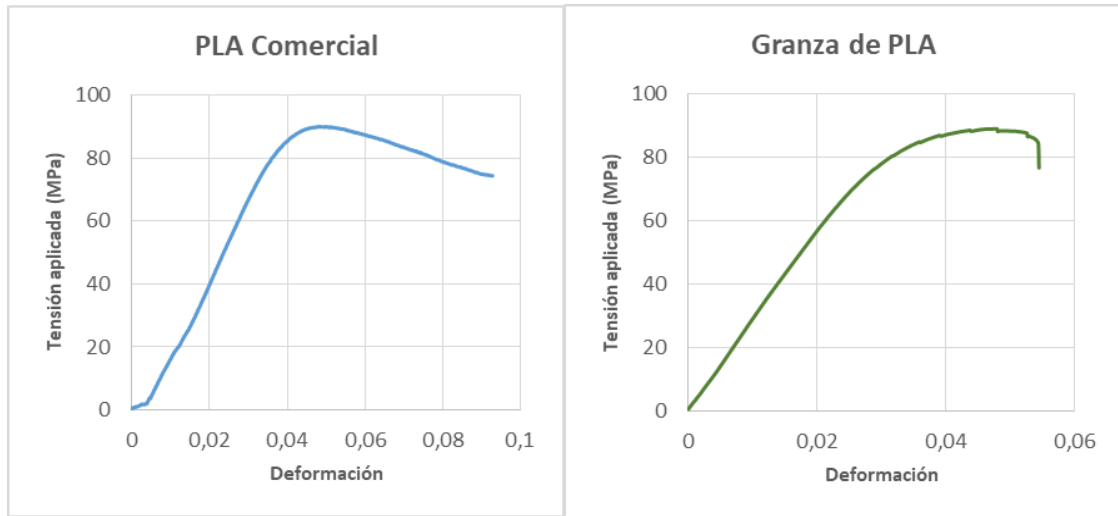


Figura 39. Comparativa ensayos flexión PLA vs Granza de PLA

- Ensayo a impacto:

Comparando los resultados cabe destacar que el filamento comercial es capaz de soportar valores más altos de energía antes de romperse, tiene una mayor tenacidad. Por ello, en este sentido, parece más acertado hacer uso de este filamento si el objeto a diseñar va a estar sometido a este tipo de esfuerzo.

5.3 RESULTADOS ENSAYOS PROBETAS PLA + MADERA

Tras el ensayo de los dos primeros tipos de filamento, se llegaron a las conclusiones ya comentadas anteriormente, que permitieron simplificar la dificultad del estudio y permitieron tomar las direcciones predominantes que eran capaces de soportar mayores esfuerzos como las únicas a imprimir. Así pues, se escogió tanto para la flexión como para el impacto la dirección A al ser la que obtenía mejores resultados. Para el ensayo de tracción se mantuvieron las dos direcciones, pero se redujo a tres las impresiones de cada tipo.

- Ensayo a tracción:

Se han obtenido los siguientes resultados experimentales del ensayo a tracción:

Tabla 31. Resultados ensayos tracción filamento PLA+Madera

Ensayo	Tensión (MPa)	Deformación	Módulo (MPa)
A_1_1	22,14	0,050	880
A_1_2	23,21	0,040	815
A_1_3	13,77	0,032	803
B_1_1	41,54	0,031	2071
B_1_2	22,02	0,027	1030
B_1_3	40,65	0,032	1948

Si se analizan detenidamente los datos, se observa que para la dirección A existe un valor atípico en la tercera probeta ensayada, ya que es capaz de soportar mucha menos tensión que las otras dos. Esto se debe a que hubo un error en la impresión, y la cama sobre la que crecía la parte central de la probeta se imprimió de manera incorrecta, dando lugar a una mala deposición de las capas en la probeta.

Para la disposición B también se eliminó la segunda probeta al dar también valores de tensión muy inferiores. Se observó que la probeta rompió a la altura de las mordazas en ambas partes por lo que la tensión se sometió en esos puntos. Los resultados obtenidos, eliminando los valores atípicos, son los siguientes:

Tabla 32. Valores medios y desviación típica ensayos tracción PLA+Madera

	Dirección A		Dirección B	
	Valor medio	Desv	Valor medio	Desv
F max (N)	760	56	1397	29
Tensión max (MPa)	19,70	0,76	34,74	0,63
Módulo (MPa)	833	46	1683	87
Deformación	0,041	0,007	0,030	0,001

El comportamiento de la tensión frente a la deformación queda de la siguiente forma:



Figura 40. Gráfica tensión-deformación ensayos tracción PLA+Madera

▪ Ensayo a flexión:

Como ya se explicó previamente, en este ensayo solo se ha considerado la dirección A, al considerarse la mejor para la flexión.

Los resultados del ensayo a flexión se muestran a continuación:

Tabla 33. Resultados ensayos flexión filamento PLA + madera

Ensayo	Tensión (MPa)	Deformación	Módulo (MPa)
A_2_1	85,45	0,022	4186
A_2_2	85,99	0,024	5136
A_2_3	83,66	0,024	5166
A_2_4	89,38	0,024	4333
A_2_5	84,98	0,025	4983

Como se puede observar los resultados son muy similares, por lo que, a primera vista, no se descarta ninguno de los valores obtenidos en los ensayos. Estas son las medias y desviaciones típicas:

Tabla 34. Valores medios y desviación típica ensayos flexión filamento PLA+Madera

	Medio A	Desv A
F max (N)	122	4
Tensión max (MPa)	85,89	2,13
Módulo (MPa)	4761	466
Deformación	0,024	0,001

Debida a su alta rigidez podemos ver como la gráfica contiene muchos puntos en la parte lineal o elástica.



Figura 41. Gráfica tensión-deformación ensayos flexión PLA + Madera

▪ Ensayo a impacto:

En este ensayo se muestra la energía absorbida para la fractura por impacto de la probeta. No se observan diferencias significativas de una probeta a otra.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 35. Resultados ensayos impacto filamento PLA + madera

Tipo	Ensayo	Energía (J)	Resistencia Charpy (J/mm ²)
A	A_3_1	0,268	6,389
A	A_3_2	0,383	9,220
A	A_3_3	0,327	8,139
A	A_3_4	0,318	7,796
A	A_3_5	0,310	7,596

En la tabla 24, se reflejan los valores medios y la desviación para cada dirección de fabricación.

Tabla 36. Valores medios y desviación típica ensayos a impacto filamento PLA + madera

	Dirección A	
	Valor medio	Desv
Energía (J)	0,321	0,041

5.3.1 COMPARATIVA ENSAYOS MECÁNICOS PROBETAS FABRICADAS CON PLA + MADERA

A continuación, se comparan los resultados obtenidos en los ensayos realizados con las probetas fabricadas con PLA con las que contienen PLA + madera (que contiene ya de por sí la lignina).

- Ensayo a tracción:

Se observa que, en general, los resultados obtenidos en los ensayos a tracción de las probetas fabricadas con PLA con madera, son peores que los obtenidos en los realizados con filamento de PLA comercial y filamento fabricado en laboratorio. Esto se debe a

que, al añadir madera al PLA, se le aporta una mayor rigidez y fragilidad por lo que las probetas soportarán menos esfuerzos.



Figura 42. Comparativa ensayos tracción PLA / granza de PLA / PLA + madera

▪ Ensayo a flexión:

En el caso de los ensayos a flexión, se observa que el PLA con madera posee un mayor módulo de flexión debido a la rigidez que hace que en esa dirección aumente considerablemente el módulo. La tensión máxima que soporta el PLA con madera resulta algo inferior a la del PLA. Esto se debe, a que en este caso, el material es más frágil y menos plástico, llega a romper la probeta.

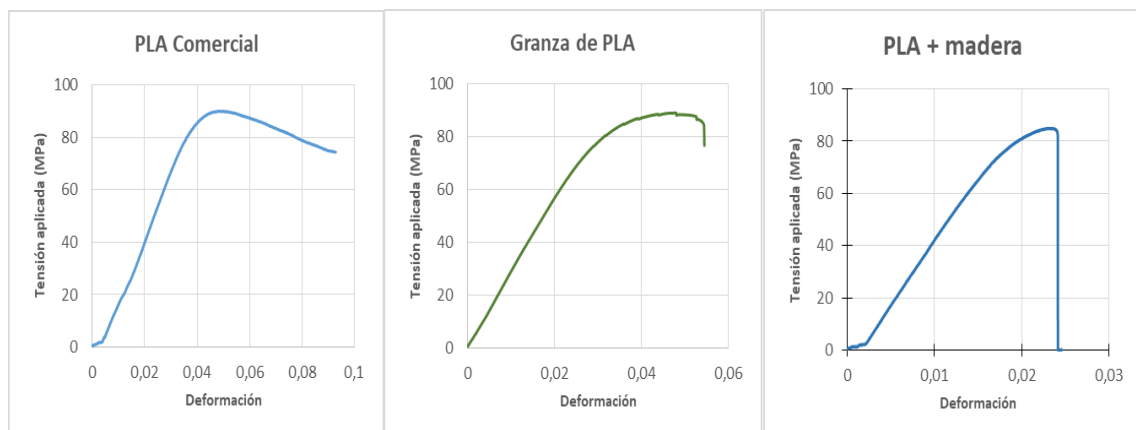


Figura 43. Comparativa ensayos flexión PLA / granza de PLA / PLA + madera

▪ Ensayo a impacto:

La energía capaz de soportar por el PLA con madera resulta considerablemente inferior al filamento comercial y al filamento elaborado en laboratorio, siendo entre cuatro y cinco veces inferior.

5.4 ENSAYOS DE DEGRADACIÓN DE LOS FILAMENTOS EXTRUIDOS

En esta segunda parte del proyecto se ha realizado un estudio del comportamiento de los filamentos frente a la humedad. Para ello, se ha llevado a cabo un ensayo en el que se han sumergido los filamentos en agua durante periodos de uno, tres y siete días. El agua se ha mantenido a una temperatura constante de 60° C durante los periodos indicados.

Se ha analizado el comportamiento a tracción utilizando filamentos de 7 cm de longitud de cada uno de los tres tipos estudiados: PLA comercial, granza de PLA y PLA con madera. Además, en el caso de PLA + madera se ha llevado a cabo el enfriamiento del filamento utilizando diferentes potencias del ventilador (20%, 40%, 60% y 80%), lo que permite que el material se enfríe a diferentes velocidades y estudiar la variación de sus propiedades.

5.4.1 ENSAYO VARIACIÓN DE LA MASA

El ensayo consiste en el cálculo de la variación porcentual de cada uno de los tres periodos mencionados. Se han llevado a cabo tres medidas: una primera al secar el material durante 24 h a 50 °C para eliminar toda la humedad que pueda haber absorbido, la segunda tras el periodo correspondiente sumergido en agua secadas superficialmente con un papel y la tercera, por último, tras otro periodo de 24 h a 50 °C secando el filamento.

De esta forma, la primera medida se tomará como referencia, la segunda dará información sobre la capacidad de absorber agua del material y la tercera mostrará la degradación del mismo.

A continuación se muestran los valores obtenidos en los ensayos: valor medio de las pesadas, desviación típica y % de masa adquirida.

Tabla 37. Variación de la masa periodo un día

Comercial	1ª pesada (en seco)	2ª pesada (húmeda)	3ª pesada (degradada)
Media	295,30	298,74	295,30
Desv.	7,50	7,57	7,59
Porcentaje %		1,166%	0,001%

Granza	1ª pesada (en seco)	2ª pesada (húmeda)	3ª pesada (degradada)
Media	273,15	276,64	273,31
Desv.	4,00	4,03	3,94
Porcentaje %		1,276%	0,057%

PLA + Madera (20%)	1ª pesada (en seco)	2ª pesada (húmeda)	3ª pesada (degradada)
Media	162,43	166,13	162,39
Desv.	15,51	15,86	15,51
Porcentaje %		2,280%	-0,022%

PLA + Madera (40%)	1ª pesada (en seco)	2ª pesada (húmeda)	3ª pesada (degradada)
Media	210,50	215,04	210,44
Desv.	11,41	11,69	11,57
Porcentaje %		2,154%	-0,029%

PLA + Madera (60%)	1ª pesada (en seco)	2ª pesada (húmeda)	3ª pesada (degradada)
Media	190,50	194,53	190,56
Desv.	13,29	13,57	13,22
Porcentaje %		2,111%	0,027%

PLA + Madera (80%)	1ª pesada (en seco)	2ª pesada (húmeda)	3ª pesada (degradada)
Media	213,63	217,94	213,95
Desv.	16,21	16,88	16,29
Porcentaje %		2,016%	0,149%

Tabla 38. Variación de la masa periodo tres días

Comercial	1ª pesada (en seco)	2ª pesada (húmeda)	3ª pesada (degradada)
Media	290,05	293,32	289,94
Desv.	4,14	4,50	4,19
Porcentaje %		1,127%	-0,037%

Granza	1ª pesada (en seco)	2ª pesada (húmeda)	3ª pesada (degradada)
Media	247,21	250,34	247,19
Desv.	4,09	3,97	4,07
Porcentaje %		1,267%	-0,006%

PLA + Madera (20%)	1ª pesada (en seco)	2ª pesada (húmeda)	3ª pesada (degradada)
Media	168,65	172,61	168,49
Desv.	10,63	10,72	10,49
Porcentaje %		2,350%	-0,094%

PLA + Madera (40%)	1ª pesada (en seco)	2ª pesada (húmeda)	3ª pesada (degradada)
Media	193,98	198,58	193,85
Desv.	23,37	23,86	23,36
Porcentaje %		2,369%	-0,068%

PLA + Madera (60%)	pesada en seco	pesada húmeda	pesada degradada
Media	191,96	195,98	191,96
Desv.	27,45	28,01	27,48
Porcentaje %		2,095%	-0,002%

PLA + Madera (80%)	1ª pesada (en seco)	2ª pesada (húmeda)	3ª pesada (degradada)
Media	185,88	190,88	185,86
Desv.	10,89	11,67	10,95
Porcentaje %		2,693%	-0,011%

Tabla 39. Variación de la masa periodo siete días

Comercial	1ª pesada (en seco)	2ª pesada (húmeda)	3ª pesada (degradada)
Media	289,62	293,04	289,97
Desv.	2,18	2,25	2,20
Porcentaje %		1,181%	0,122%

Granza	1ª pesada (en seco)	2ª pesada (húmeda)	3ª pesada (degradada)
Media	252,73	256,57	253,20
Desv.	3,23	3,24	3,21
Porcentaje %		1,519%	0,185%

PLA + Madera (20%)	1ª pesada (en seco)	2ª pesada (húmeda)	3ª pesada (degradada)
Media	161,94	164,62	160,63
Desv.	12,14	15,54	14,95
Porcentaje %		1,656%	-0,809%

PLA + Madera (40%)	1ª pesada (en seco)	2ª pesada (húmeda)	3ª pesada (degradada)
Media	213,81	220,29	214,32
Desv.	5,48	5,62	5,61
Porcentaje %		3,031%	0,239%

PLA + Madera (60%)	1ª pesada (en seco)	2ª pesada (húmeda)	3ª pesada (degradada)
Media	187,44	192,76	188,09
Desv.	8,86	8,69	8,96
Porcentaje %		2,836%	0,345%

PLA + Madera (80%)	1ª pesada (en seco)	2ª pesada (húmeda)	3ª pesada (degradada)
Media	203,91	209,99	204,62
Desv.	14,16	14,55	14,45
Porcentaje %		2,981%	0,346%

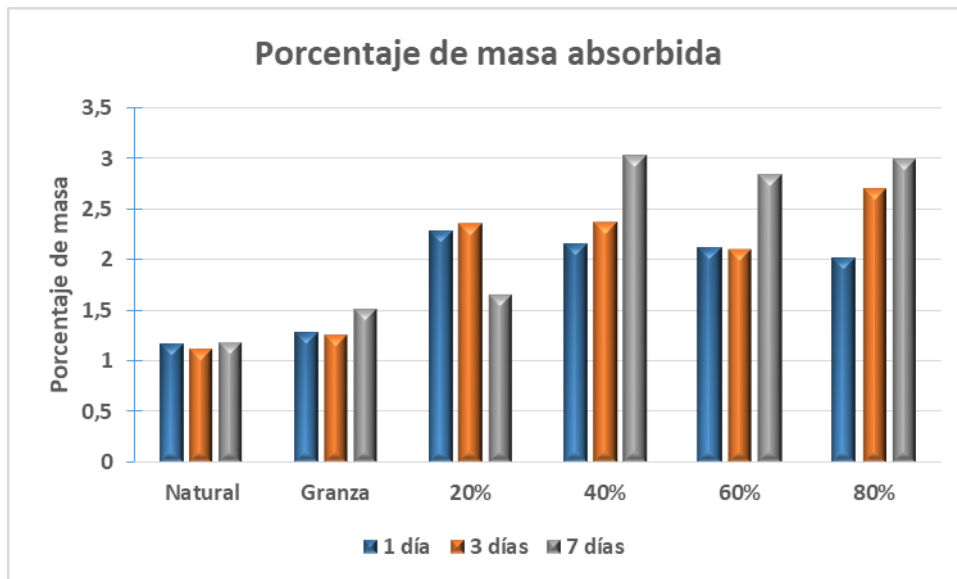


Figura 44. Comparativa del porcentaje de agua absorbida por los filamentos

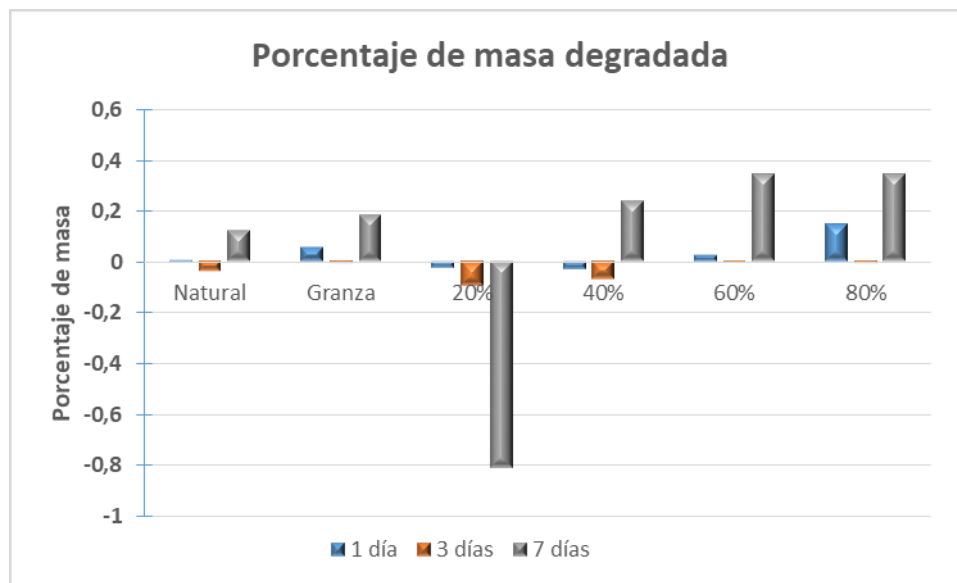


Figura 45. Comparativa variación de masa degradada

Tras analizar los resultados obtenidos se concluye, que como era de esperar, conforme se incrementa el tiempo sumergido en el agua, aumenta la absorción de agua y la degradación. Se observa que de forma genérica se absorbe más agua en los filamentos que contienen madera con respecto a los que solo tienen PLA. Esto se debe a que su estructura al ser más

porosa permite que adquiera una mayor humedad debido a la acción capilar. Cabe destacar que conforme se enfría más lento el filamento de PLA con madera es más fácil que éste acumule humedad y se degrade más rápidamente. En muchos casos no se llega a eliminar por completo el agua debido a que se modifica la estructura molecular esto explica que algunos porcentajes de pérdida de masa por degradación queden negativos.

Mediante la observación al microscopio se ha podido concluir que conforme aumenta el tiempo sumergido aumenta el nivel de cristalización en la estructura interna de la probeta, tal y cómo se puede observar en la Tabla 39.

A continuación, se muestran las imágenes tomadas del filamento de madera y como se modifica con el paso del tiempo:

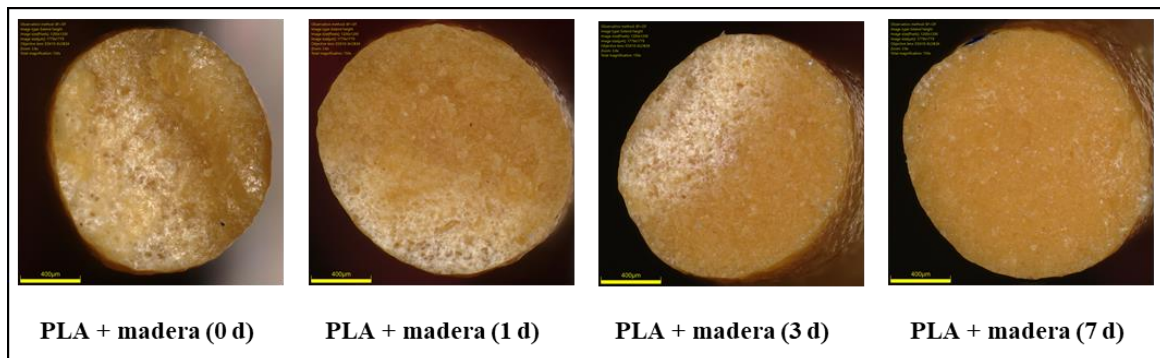


Figura 46. Modificación filamento de PLA + madera tras el ensayo

5.4.2 ENSAYO A TRACCIÓN

Este ensayo ha consistido en someter a los tres tipos de filamentos analizados, el PLA comercial y los fabricados mediante la extrusora, a ensayos de tracción. Estos ensayos se han realizado sometiendo previamente a los filamentos a un proceso de degradación durante un periodo de tiempo uno, tres y siete días. Los resultados obtenidos se han comparado con los ensayos realizados con filamentos sin degradar.

Para el material objeto del estudio, filamento de PLA + madera, el proceso de enfriamiento se ha llevado a cabo utilizando diferentes potencias del ventilador (20%, 40%, 60% y 80%), para conseguir así diferentes velocidades de enfriamiento.

Los resultados obtenidos en los cuatro escenarios analizados son los siguientes:

- Ensayos a tracción sin degradación:

Los resultados obtenidos para los tres tipos de filamentos se recogen en la siguiente tabla.

Tabla 40. Ensayos a tracción sin degradación

		TENSIÓN (Mpa)		DEFORMACIÓN		MÓDULO (Mpa)	
		Media	Desv.	Media	Desv.	Media	Desv.
PLA	Natural	64,17	0,23	0,1983	0,0150	1664	48
	Granza	67,61	1,09	0,1078	0,0332	1429	194
PLA + madera	secado 20%	58,95	13,54	0,0264	0,0059	3024	215
	secado 40%	57,11	8,54	0,0333	0,0030	2597	99
	secado 60%	57,93	1,86	0,0371	0,0072	2756	207
	secado 80%	58,42	5,75	0,0324	0,0031	2875	253

Las primeras conclusiones que se pueden obtener del ensayo es que añadir madera al PLA, hace que, desde el punto de vista de los ensayos de tracción, soporte menos tensión. Se observa, sin embargo, que filamentos compuestos solo por PLA poseen módulos de Young inferiores a los que contienen madera. Por lo tanto, la madera rigidiza el filamento.

Se ha realizado también un estudio estadístico mediante el cálculo del p-valor, que permite determinar si existen diferencias significativas entre los diferentes tipos de filamentos de madera según la rapidez del enfriamiento. Se concluye que solo existen diferencias significativas, es decir que el p-valor que relaciona dos de las muestras es inferior a 0,05, entre el módulo del filamento de PLA con madera enfriado con una potencia del ventilador del 20 % y el módulo del 40 %. En el caso de la deformación, ocurre lo mismo entre el filamento de PLA con madera enfriado con una potencia del ventilador del 20 % y el del

60%. En este último caso (enfriado al 60%), se ha eliminado un valor al considerarse atípico. El programa utilizado es el IBM SPSS Statistics 26, que nos permite el cálculo del p-valor y de los valores atípicos.

Se ha observado que, en general, los valores obtenidos para los filamentos de PLA con madera enfriados con una potencia del ventilador del 20 % han dado valores muy dispares respecto al resto de velocidades de enfriamiento. Esto se debe a que a que un enfriamiento muy lento modifica las propiedades mecánicas considerablemente.

▪ Ensayos a tracción con un día de degradación:

En el caso del ensayo a tracción para los filamentos sometidos a un proceso de degradación de un día son los siguientes:

Tabla 41. Ensayos a tracción con un día de degradación:

		TENSIÓN (Mpa)		DEFORMACIÓN		MÓDULO (Mpa)	
		Media	Desv.	Media	Desv.	Media	Desv.
PLA	Natural	67,17	5,44	0,0686	0,0292	1771	246
	Granza	54,67	2,06	0,0560	0,0130	1600	48
PLA + madera	secado 20%	64,52	7,00	0,0317	0,0088	3259	931
	secado 40%	64,27	2,16	0,0282	0,0048	3198	542
	secado 60%	67,09	3,44	0,0294	0,0050	3330	648
	secado 80%	60,13	5,50	0,0286	0,0047	2923	546

En el ensayo a tracción tras un día de degradación se concluye que, al haber tenido el material tiempo suficiente para degradarse, solo ha podido realizar una primera fase en la que se plastifica y, por ello, los valores obtenidos en la tensión son superiores a los obtenidos en el caso anterior. Del mismo modo, se observa que la deformación producida es menor debido a que se vuelven más rígidos y, por ello, también el módulo es mayor.

En el caso de los ensayos de tracción a un día se ha descartado un valor atípico obtenido en el filamento de PLA con madera enfriado con una potencia del ventilador del 60%, al ser la tensión muy inferior respecto al resto.

Al igual que el caso de sin degradación, se observa que el PLA con madera enfriado con una potencia del ventilador del 20% no sigue la misma tendencia que el resto de filamentos.

▪ Ensayos a tracción con tres días degradación:

En el caso de la degradación a tres días, se han obtenido los siguientes resultados:

Tabla 42. Ensayos a tracción con tres días de degradación

		TENSIÓN (Mpa)		DEFORMACIÓN		MÓDULO (Mpa)	
		Media	Desv.	Media	Desv.	Media	Desv.
PLA	Natural	52,59	1,46	0,0439	0,0017	1684	81
	Granza	41,33	11,22	0,0245	0,0073	1708	184
PLA + madera	secado 20%	46,54	14,21	0,0530	0,0165	1118	242
	secado 40%	57,11	13,22	0,0362	0,0067	1276	155
	secado 60%	54,99	8,84	0,0470	0,0146	1422	165
	secado 80%	56,55	5,70	0,0465	0,0078	1422	146

Lo primero que cabe destacar es que existen unas desviaciones típicas con respecto a la media muy altas. Existe una tendencia a bajar la tensión y el módulo de Young conforme el filamento pasa más tiempo degradándose.

Se observa mediante el programa de IBM, que existe una diferencia notoria entre el material sin envejecer y tras haber envejecido durante tres días. Así, encontramos un pvalor menor que 0,05 en el caso del PLA con madera enfriado con una potencia del ventilador del 20% para los valores de la tensión, deformación y módulo entre ambos casos.

Igualmente encontramos diferencias significativas entre el PLA con madera enfriado con una potencia del ventilador del 80% sin envejecer y el envejecido tres días.

Nuevamente se ha eliminado uno de los valores obtenidos en el ensayo del PLA con madera enfriado con una potencia del ventilador del 60%, al resultar atípico y modificar en exceso la media y la desviación típica.

El caso del PLA con madera enfriado con una potencia del ventilador 20% sigue mostrando una tendencia que no siguen el patrón que sigue el resto de medidas.

▪ Ensayos a tracción con siete días degradación:

El filamento se volvió demasiado frágil por la excesiva degradación por lo que resultaba imposible ensayarlo.

Finalmente se muestra un gráfico comparativo de los ensayos a tracción según el tiempo de degradación y el porcentaje de potencia usado para enfriar el filamento. Las barras verticales representan los valores medios de tensión y los segmentos que aparecen sobre las barras representan la desviación típica. Se observa que por la plastificación existente en el primer día de degradación se obtienen los valores de tensión más altos.

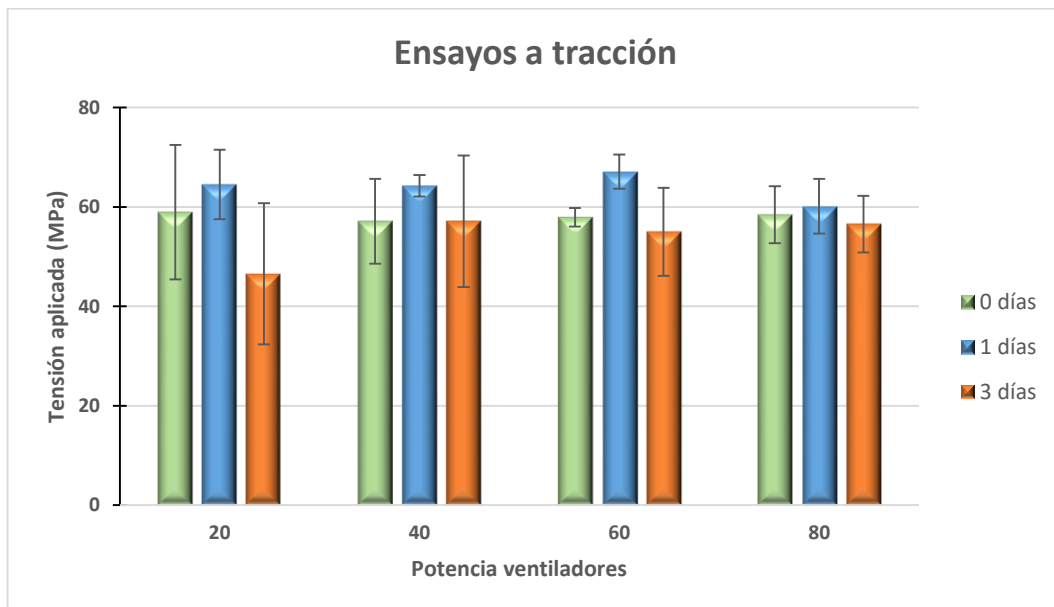


Figura 47. Ensayos a tracción según tiempo de degradación y velocidad de enfriamiento

5.4.3 ENSAYO TÉRMICO

El ensayo térmico o DSC (Differential Scanning Calorimetry) consiste en la elaboración de un barrido diferencial calorimétrico. Para realizar este ensayo se utiliza un recipiente de aluminio, llamado crisol. El proceso consiste en un calentamiento de 20°C/min hasta llegar a los 250°C y un posterior enfriamiento de -20°C/min. Se compara la diferencia de calor en función de la temperatura entre un crisol referencia y otro que contiene el material a estudiar. El resultado obtenido se refleja en una curva de la cual podemos obtener las temperaturas de fusión, transición vítrea y porcentaje de cristalinidad que tiene el material.

En el gráfico 42 se muestra un ejemplo de ensayo térmico o DSC. Se muestran los dos barridos que se hacen a la muestra. El primero (A) muestra la historia térmica y el segundo (B), teniendo en cuenta que ésta queda borrada, se analiza y compara con las distintas temperaturas en las que ocurre cada suceso.

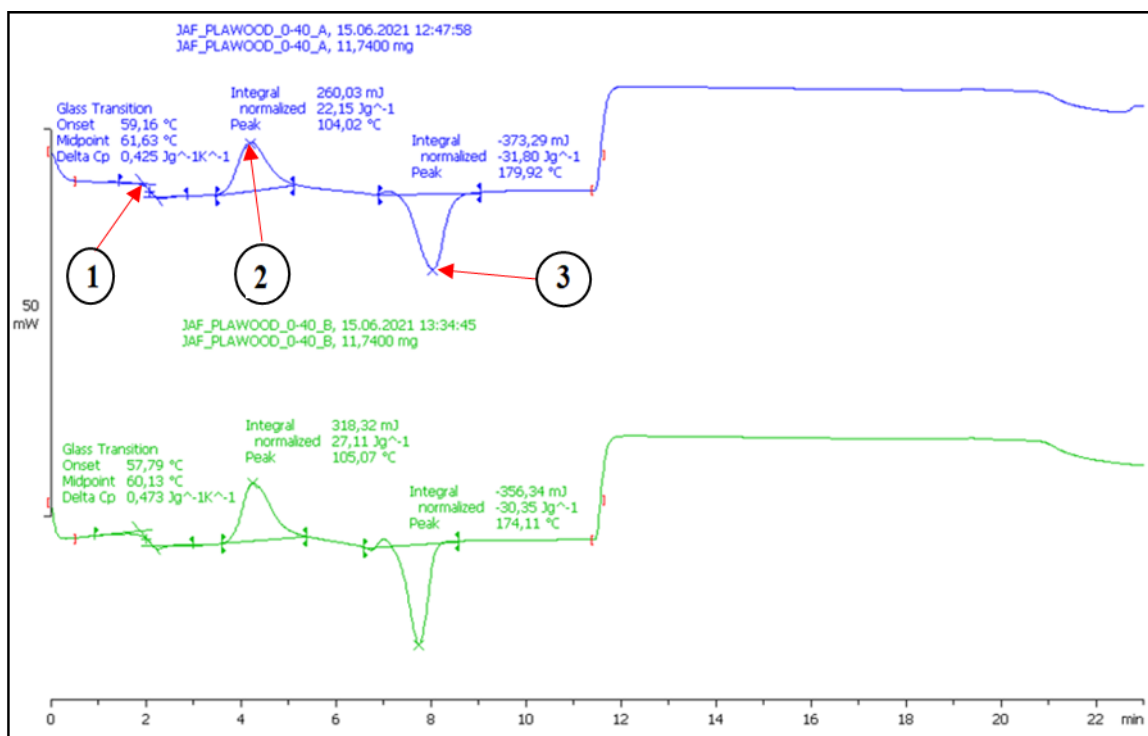


Figura 48. Gráfica térmica filamento usado en la impresión

Los puntos identificados en esta gráfica corresponden a los siguientes valores:

1. Aquí se encuentra un punto de inflexión que corresponde a la temperatura de transición vítrea, una transición de segundo orden en la que la parte amorfa del polímero pasa de un estado rígido a un estado gomoso. También se puede obtener la variación del calor específico, que es la energía necesaria para subir un grado la temperatura del material.
2. A continuación, la curva presenta un pico exotérmico, que indica la temperatura de cristalización fría.
3. Más adelante aparece un pico endotérmico, que corresponde al punto de fusión del material.

Con los datos obtenidos en las gráficas se calcula la diferencia entre áreas que, dividida entre 93,7 J/g (entalpía de cristalización del PLA 100% cristalino) da el índice de cristalinidad inicial. Por ejemplo, para el caso del ensayo mostrado en la Figura 43, el valor de cristalinidad sería el siguiente:

$$\% \text{ Cristalinidad} = \frac{31,8 - 22,15}{93,7} \cdot 100 = 10,3\%$$

En este ensayo se analizan las diferencias entre el filamento de PLA comercial, los elaborados con granza de PLA y PLA con madera enfriado a diferentes velocidades. En la figura 44 se muestra una comparativa con los resultados obtenidos en los ensayos realizados para los tres filamentos analizados. Representa la temperatura en la que se produce la transición vítrea, así como el punto de fusión del material.

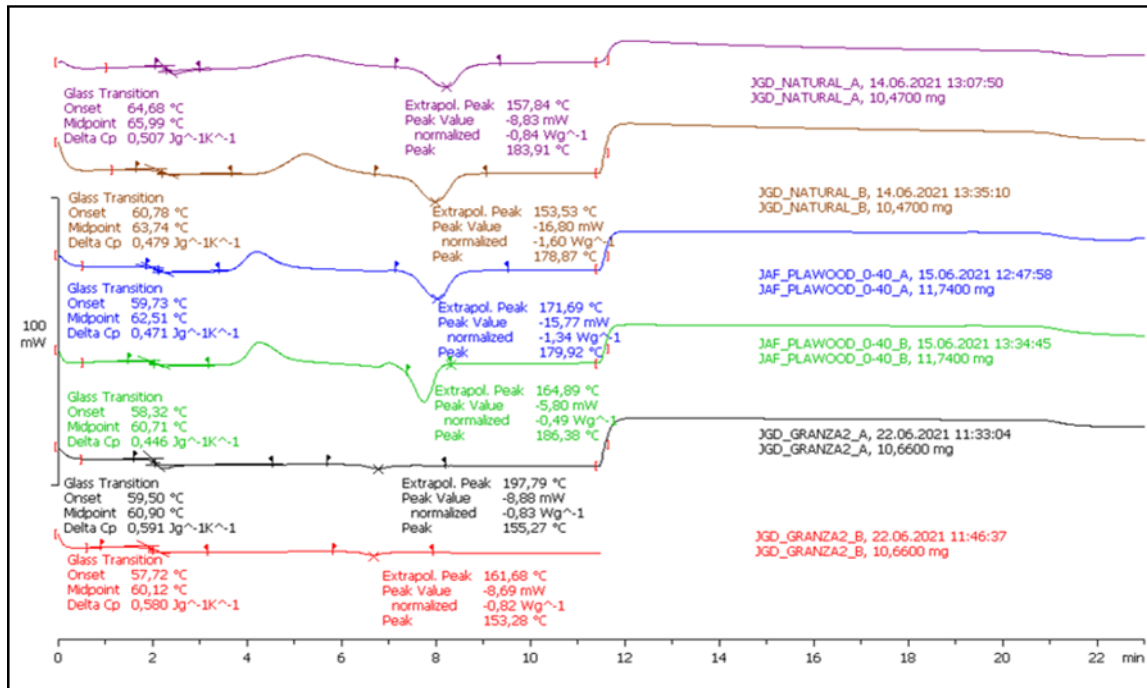


Figura 49. Gráfica comparación ensayo térmico

Se observa que el pico de fusión del PLA con madera es superior al resto lo cual indica que necesita una mayor energía para que se produzca este cambio de estado. Por el contrario, se aprecia que la curva que corresponde al filamento compuesto por granza de PLA es poco pronunciado. Esto es debido a que se trata de un material muy amorfo.

En la siguiente Tabla se comparan los resultados obtenidos en los ensayos térmicos para cada uno de los 3 materiales, antes de someterlos a ningún tipo de envejecimiento.

En la tabla se recoge el índice de cristalinidad calculado para los tres filamentos.

Tabla 43. Comparativa ensayo térmico de los filamentos sin envejecer

		T ^a Transición Vítrea °C	T ^a de fusión °C	% cristalinidad
Pla comercial	A	65,99	183,9	11,30
	B	63,74	178,9	2,84
Pla granza	A	60,90	155,3	4,81
	B	60,12	153,3	3,45
Pla madera	A	62,51	179,9	10,30
	B	60,71	186,4	3,46

En todos los casos, al comparar los dos barridos, se observa que la cristalinidad inicial en todos los materiales es superior en el primer barrido puesto que en este caso todavía no se ha borrado la memoria térmica. Si se comparan las cristalinidades del primer barrido del ensayo, que afectos prácticos es el que nos interesa para este estudio, se puede observar cómo el PLA en granza es considerablemente más amorfo que los otros dos materiales. Sin embargo, al borrar la historia térmica del material (segundo barrido), apenas se aprecian diferencias en el % de cristalinidad de los 3 materiales.

En la siguiente tabla (Tabla 45), se muestran los resultados de los ensayos de DSC para los diferentes tiempos de envejecimiento y diferentes velocidades de enfriamiento para el PLA con madera. Estos ensayos se han realizado tan solo para dos velocidades de enfriamiento, 40% y 80%.

Tabla 44. Comparativa ensayo térmico filamento de PLA cn madera con diferentes degradaciones

		Tª Transición Vítrea °C	Tª de fusión °C	% cristalinidad
40% - 0 Días	A	61,63	179,9	10,30
	B	60,13	174,1	3,46
80% - 0 Días	A	65,14	177,8	25,19
	B	61,06	174,1	-1,78
40% - 1 Días	A	65,35	179,2	0,39
	B	60,72	176,4	0,02
80% - 1 Días	A	70,35	178,1	0,32
	B	61,90	177,6	0,04
40% - 3 Días	A	-	180,8	43,09
	B	61,75	174,3	3,44
80% - 3 Días	A	-	181,0	43,13
	B	61,42	174,9	3,83
40% - 7 Días	A	69,49	178,8	45,71
	B	60,85	172,4	1,42
80% - 7 Días	A	64,27	179,0	50,90
	B	59,89	172,9	4,86

Los resultados muestran, que las temperaturas de fusión y transición vítrea permanecen prácticamente invariantes independientemente del tiempo de degradación al que están

sometidas las muestras. Sin embargo, el índice de cristalinidad sí que se ve especialmente afectado al estar sumergido en el agua. Esto es debido a que, conforme avanza el tiempo en el agua, el filamento va variando su estructura molecular interna y va plastificándose y ordenándose. Se obtienen estructuras más ordenadas y, por tanto, más cristalinas como se mostraba anteriormente en las fotografías de masa degradada. Se observa que no existe casi cristalinidad en el primer día y es debido a que se plastifica el material.

Capítulo 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Una vez realizados los ensayos con las diferentes probetas y tipos de filamento, comparando los resultados obtenidos, se extraen las conclusiones que se describen a continuación.

6.1 ENSAYOS MECÁNICOS PROBETAS FABRICADAS CON PLA

Si se compara los datos obtenidos en los ensayos mecánicos realizados con probetas fabricadas con PLA comercial y filamento extruido a partir de granza de PLA, se obtienen las siguientes conclusiones:

Se observa que, en general, se obtienen mejores valores en los ensayos a tracción de las probetas impresas con filamento de PLA fabricado en el laboratorio que con las impresas con filamento comercial. Se obtienen valores más altos en los tres campos de estudio (tensión, deformación y módulo). Uno de motivos por los que se obtienen estos resultados puede deberse a que el filamento comercial cuenta con aditivos que reducen levemente estas propiedades.

Tras los ensayos, se observa que en las pruebas a tracción es más conveniente la primera dirección de impresión de las probetas (A), ya que permite unos valores más altos de tensión y deformación hasta rotura.

En el caso de la flexión no existen diferencias significativas entre los resultados obtenidos para los distintos materiales, siendo muy similares para los dos filamentos. Si es relevante que, las probetas construidas con filamento comercial no rompen, y las de granza de PLA sí lo hacen.

Sí se concluye que la segunda dirección de impresión (B) es más eficiente para ensayos a flexión en cada material, debido a que la deposición de la capa permite una mayor deformación y soporta mayores esfuerzos.

Comparando los resultados cabe destacar que el filamento comercial es capaz de soportar valores más altos de energía antes de romperse, por lo que, en este sentido, parece más acertado hacer uso de este filamento si el objeto a diseñar va a estar sometido a este tipo de esfuerzo.

6.2 ENSAYOS MECÁNICOS PROBETAS FABRICADAS CON PLA + MADERA

Se observa que, en general, los resultados obtenidos en los ensayos a tracción de las probetas fabricadas con PLA con madera, son peores que los obtenidos en los realizados con filamento de PLA comercial y filamento fabricado en laboratorio. Esto se debe a que, al añadir madera al PLA, se le aporta una mayor rigidez y fragilidad por lo que las probetas soportaran menos esfuerzos.

En el caso de los ensayos a flexión, se observa que el PLA con madera posee un mayor módulo de flexión debido a la rigidez que hace que en esa dirección aumente considerablemente el módulo. La tensión máxima que soporta el PLA con madera resulta algo inferior a la del PLA. Esto se debe, a que, en este caso, el material al ser más frágil y menos plástico, llega a romper la probeta.

La energía capaz de soportar por el PLA con madera resulta considerablemente inferior al filamento comercial y al filamento elaborado en laboratorio, siendo de entre cuatro y cinco veces inferior.

6.3 ENSAYOS DE DEGRADACIÓN

Las conclusiones obtenidas para los tres ensayos realizados se comentarán para cada tipo de ensayo y medida realizados.

6.3.1 VARIACIÓN DE LA MASA

Se observa que apenas se produce degradación de la masa a lo largo del proceso de siete días. El agua que absorben los filamentos es posteriormente eliminada pero no en su totalidad, siendo mayor la absorción en el PLA con madera.

Al analizar los resultados se observa que, en algunos casos, tras estar sumergidos en agua y el posterior secado, la masa es incluso superior a la inicial sin degradar. Apenas existe degradación por lo que la única explicación plausible es que se modifique la estructura interna molecular.

6.3.2 ENSAYO A TRACCIÓN

Existe una primera fase durante el primer día en la que el material se plastifica y, por ello, adquiere una cierta rigidez que le permite soportar mayores esfuerzos a tracción. En la segunda fase, a los tres días se observa que las tensiones bajan con respecto al valor inicial sin envejecer. Finalmente, tras los siete días resulta imposible ensayar los filamentos ya que se han vuelto extremadamente frágiles y se parten al introducirlos en las mordazas.

Se concluye también, que los resultados obtenidos para la tracción de los filamentos de madera son menores que los de los filamentos de PLA ya que se ve más afectada a la degradación al absorber más agua.

6.3.3 ENSAYO TÉRMICO

Se observa que no existen diferencias notables entre los filamentos de PLA y de PLA con madera para las temperaturas de transición vítrea.

En cuanto a la temperatura de fusión, en el caso del PLA elaborado en el laboratorio, es considerablemente inferior a las de los otros dos filamentos.

Por último, el porcentaje de cristalinidad es aproximadamente igual para los dos filamentos de PLA mientras que el que contiene madera es considerablemente mayor conforme avanza

el tiempo de degradación. Esto es debido en parte a la acción capilar de la madera que hace que no sea fácil eliminar el agua que absorbe.

6.4 LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS

En cuanto a las posibles líneas de trabajo que se pueden identificar tras el desarrollo de este proyecto se encuentran:

- Estudiar de forma detallada el comportamiento de los filamentos analizados en los ensayos de degradación durante las primeras 24 horas y ver si mejoran las propiedades mecánicas.
- Realizar un estudio para fabricar filamentos de PLA cargados con lignina en diferentes proporciones para analizar para caracterizar sus propiedades mecánicas y térmicas.
- Llevar a cabo el estudio anterior con otros polímeros naturales.

Capítulo 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Hervás-Gómez, C., Román Graván, P., Domínguez-González, M. Á., & Reina Parrado, M. (2020). Diseño E impresión En 3d DE protectores de Pantallas FACIALES por docentes universitarios Para proteger AL personal sanitario Ante el Covid-19. IJERI: International Journal of Educational Research and Innovation, (15), 35-56. doi:10.46661/ijeri.4970
- [2] Pedraja, J., Maestre, J., Rabanal, J., Morales, C., Aparicio, J., & Del Moral, I. (2020). Papel de la impresión 3D para la Protección de los profesionales del área Quirúrgica Y críticos en la pandemia DE COVID-19. Revista Española De Anestesiología Y Reanimación, 67(8), 417-424. doi:10.1016/j.redar.2020.07.011
- [3] La impresión 3D brilla EN TIEMPOS DE Pandemia | TENDENCIAS... (n.d). Retrieved February 11, 2021, from <https://www.computerworld.es/tendencias/la-impresion-3d-brilla-en-tiempos-de-pandemia>
- [4] <https://impresiondigital.ituser.es/noticias-y-actualidad/2021/03/el-mercado-de-impresion-3d-ingreso-13200-millones-de-dolares-en-2020>
- [5] <https://impresiondigital.ituser.es/noticias-y-actualidad/2021/04/el-mercado-de-impresion-3d-crecera-un-15-anual-hasta-2030>
- [6] The State of 3D printing by sculpteo 2020 Edition
- [7] <https://www.impresoras3d.com/breve-historia-de-la-impresion-3d/>
- [8] <https://bitfab.io/es/blog/historia-impresion-3d/>
- [9] R. Singh, A. Gupta, O. Tripathi, S. Srivastava, B. Singh, A. Awasthi, S.K. Rajput, P. Sonia, P. Singhal, K. K. Saxena, Powder bed fusion process in additive manufacturing: An overview, Materials Today: Proceedings, Volume 26 (2020), pp. 3058-3070.
- [10] Kumar R., Singh R., Farina I. (2018). On the 3Dprinting of recycled ABS, PLA and HIPS thermoplastics for structural applications. PSU Research Review Vol. 2
- [11] Zhao P., Rao C., Gu F., Sharmin N., Fu J. (2018). Close-looped recycling polylactic acid used in 3D printing: An experimental investigation and life cycle assessment. Journal of Cleaner Production 197, 1046-1055.

- [12] Zhao X., Hwang K., Lee D., Kim T., Kim N. (2018). Enhanced mechanical properties of self-polymerized polydopamine-coated recycled PLA filament used in 3D printing. *Applied Surface Science* 441, 381-387.
- [13] Yang, J., An, X., Liu, L., Tang, S., Cao, H., Xu, Q., & Liu, H. (2020). Cellulose, hemicellulose, lignin, and their derivatives as multi-components of bio-based feedstocks for 3d printing. *Carbohydrate Polymers*, 250, 116881. doi:10.1016/j.carbpol.2020.116881
- [14] Tanase-Opedal, M., Espinosa, E., Rodriguez, A., & Chinga-Carrasco, G. (2019). Lignin: A biopolymer from forestry biomass for biocomposites and 3D printing. *Materials (Basel)*, 12.
- [15] Collins, M. N., Nechifor, M., Tanasă, F., Zănoagă, M., McLoughlin, A., Strózyk, M. A., . . . Teacă, C. (2019). Valorization of lignin in polymer and composite systems for advanced engineering applications – a review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 131, 828-849. doi:10.1016/j.ijbiomac.2019.03.069
- [16] Vaidya, A.A., Collet, C., Gaugler, M., Lloyd-Jones, G. (2019). Integrating softwood biorefinery lignin into polyhydroxybutyrate composites and application in 3D printing. *Materials Today Communications* 19, 2086-296
- [17] Wasti, S., Triggs, E.D., Farag, R., Auad, M.L., Adhikari, S., Bajwa, D., Li, M., Ragauskas, A. (2021). Influence of plasticizers on thermal and mechanical properties of biocomposite filaments made from lignin and polylactic acid for 3D printing. *Composites Part B-engineering* 205,
- [13] Nguyen, N.A.; Bowland, C.C.; Naskar, A.K. A general method to improve 3D-printability and inter-layer adhesion in lignin-based composites. *Appl. Mater. Today* 2018, 12, 138–152, doi:10.1016/j.apmt.2018.03.009
- [19] <http://impresorad3d.com/impresoras-3d-historia/>
- [20] <https://www.impresoras3d.com/breve-historia-de-la-impresion-3d/>
- [21] <https://bitfab.io/es/blog/historia-impresion-3d/>
- [22] Jiménez Calzado, M. (n.d.). *FABRICACIÓN ADITIVA Tecnologías actuales y tendencias*.
- [23] Manufacturing processes explained. (n.d). Retrieved February 11, 2021, from <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/collection/material-processes-explained/>
- [24] <https://www.hubs.com/knowledge-base/advantages-3d-printing/>

- [25] <https://www.computerworld.es/pubs/cw1378/index.html?page=13>
- [26] <https://impresoras3d.org.es/impresoras-3d-fdm/>
- [27] <https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/>
- [28] https://filament2print.com/es/blog/94_extrusion-directa-bowden.html
- [29] Norma Española UNE 116005:2012.
- [30] <https://support.3devo.com/category/material-reports/>
- [31] Alberto, campodonico, E., Trapero, D., Paloma, & Carola. (2019, September 9). *Los 15 proyectos top de prótesis hechas con impresión 3D*. Bitfab. <https://bitfab.io/es/blog/protesis-impresion-3d/>.
- [32] Staff. (2020, February 11). *Local Motors lanza un auto inteligente impreso en 3D*. TyN Magazine. <https://www.tynmagazine.com/local-motors-lanza-un-auto-inteligente-impreso-en-3d/>.
- [33] National Geographic. (2020, January 13). *THOR, el primer avión impreso en 3D*. www.nationalgeographic.com.es. https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/actualidad/thor-el-primer-avion-impreso-en-3d_10454.
- [34] David 20 noviembre, David, Carlos Lima 15 febrero, Lima, C., Alex Schneider 28 febrero, Schneider, A., Salvador 30 marzo, Salvador, Felix Medina 9 mayo, Medina, F., 3d modeling 15 febrero, modeling, 3d, Muriel 8 abril, & Muriel. (2015, July 17). *Aplicaciones de la impresión 3D (III) - Textil, Joyería y Arte*. Impresión 3D Prototipado | 3D Printing Prototyping | Dima 3D. <http://www.dima3d.com/aplicaciones-de-la-impresion-3d-iii-textil-joyeria-y-arte/>.
- [35] *Impresión 3D de alimentos, ¿Revolución para tu cocina?* 3Dnatives. (2020, April 14). <https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-de-alimentos-040220192/>.
- [36] *Impresión 3D en la educación: Ventajas y Cómo implantarla*. Sicnova 3D. (2020, June 3). <https://sicnova3d.com/blog/la-impresion-3d-en-la-educacion/>.
- [37] *Composer 350*. 3devo. (2021, July 12). <https://3devo.com/product/composer-350/>.
- [38] *Shred IT*. 3devo. (2021, July 12). <https://3devo.com/product/shr3d-it/>.

- [39] Calorimetra Diferencial de Barrido. (n.d.). <https://pslc.ws/spanish/dsc.htm>.
- [40] H, T., P, A., S, L., P, H., M, G., B, M., P, P., H, D., J, B., & A, G. (2021, June 23). *Kit Original Prusa i3 MK3S*. Prusa Research. https://shop.prusa3d.com/es/impresoras-3d/180-kit-original-prusa-i3-mk3s.html?gmc_currency=2&gclid=CjwKCAjwlrqHBhByEiwAnLmYUAEAQQbv cKZCN4vLOpNwC4W9bEswKys7v-12kODfZt4nsHFSN3-C0xoCeVYQAvD_BwE.
- [41] *Impresora 3D Prusa i3 MK3S+*. impresoras3d.com. (2021, July 13). https://www.impresoras3d.com/producto/impresora-3d-prusa-i3-mk3s/?gclid=CjwKCAjwlrqHBhByEiwAnLmYUAj77p2gGTwUWCzGuFLtSlNm8pLPuUrw9k1ilqJFyq1t065BdbHb8RoCBBAQAvD_BwE.