



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ESTUDIO DE LA DEGRADACION *IN VITRO* DE SCAFFOLDS ÓSEAS CON NANOMATERIALES EN BASE CARBONO IMPRESAS EN 3D

Autor: Manuel Conde Rubio

Directora: Sara López de Armentia Hernández

Co-Directora: Eva Paz Jiménez

Madrid

Julio de 2022



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ESTUDIO DE LA DEGRADACION *IN VITRO* DE SCAFFOLDS ÓSEAS CON NANOMATERIALES EN BASE CARBONO IMPRESAS EN 3D

Autor: Manuel Conde Rubio

Directora: Sara López de Armentia Hernández

Co-Directora: Eva Paz Jiménez

Madrid

Julio de 2022

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título ESTUDIO DE LA DEGRADACION IN VITRO DE SCAFFOLDS ÓSEAS CON NANOMATERIALES EN BASE CARBONO IMPRESAS EN 3D en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2º MII 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.: Manuel Conde Rubio

Fecha: 22/ 08/ 2022



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Eva Paz Jiménez



Fecha: 25/ 08/ 2022

Sara López de Armentia Hernández

ESTUDIO DE LA DEGRADACION *IN VITRO* DE SCAFFOLDS ÓSEAS CON NANOMATERIALES EN BASE CARBONO IMPRESAS EN 3D

Autor: Manuel Conde Rubio.

Directoras del Proyecto: Sara López de Armentia Hernández y Eva Paz Jiménez.

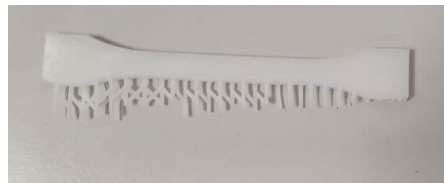
Entidad Colaboradora: ETSI ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

Resumen del Proyecto

En este proyecto se va a estudiar el proceso de degradación de scaffolds, simulando condiciones *in vitro*, en el cuerpo humano (*Figura 1*). Para ello se va a realizar la impresión en **3D** de dichas scaffolds (*1a*), además de la obtención de probetas de tracción (*1b*) y discos de absorción (*1c*), para comprobar sus propiedades mecánicas, así como ensayos de **biodegradación** y absorción de agua.



Scaffold de PLA (a)



Probeta de Tracción de PLA (b)



Disco de Absorción de PLA (c)

Figura 1. Ejemplo de las diferentes piezas obtenidas para la realización de los distintos ensayos

Fuente: Elaboración propia

Para la obtención de los distintos elementos mencionados se hará uso de la tecnología por impresión en 3D conocida como **LCD** (“*Liquid Crystal Device*”), la cual ofrece una buena precisión en las piezas obtenidas (*Figura 2*). Este tipo de impresión se caracteriza por hacer uso de resinas de **polímeros termoestables fotocurables**, las cuales se endurecen en el proceso conocido como **fotopolimerización** del que hace uso la tecnología LCD, como es el caso de la resina empleada en este TFM, el **PLA**.

Además de la resina empleada se hará uso de distintos nanomateriales base grafeno (NBG), las cuales se añadirán de forma individual al PLA, obteniendo un material compuesto, siendo el PLA la matriz y el NBG el material de refuerzo.

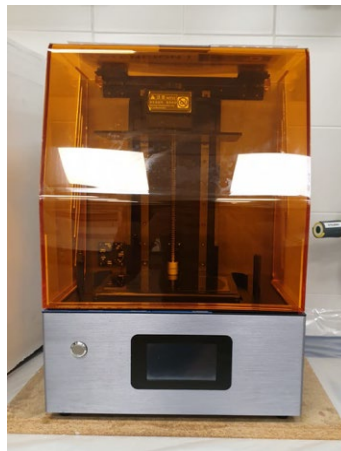


Figura 2. Impresora de Impresión 3D por LCD

Fuente: Laboratorio de Química de ETSI-ICAI

Una vez obtenidas los distintos elementos de ensayos se procederá a la simulación de condiciones *in vitro* en el cuerpo humano. Para ello se introducirán las distintas probetas, scaffolds y discos de absorción, en una solución acuosa con **PBS**, el cual permite mantener un pH constante y se introducirán a 37°C durante 7, 30 y 90 días, con el objetivo de ir comprobando a partir de ensayos a compresión para las scaffolds, de tracción para las probetas y el peso de los discos de absorción, cómo se van degradando y si las distintas formas de grafeno utilizadas afectan al proceso de degradación.

A continuación, una vez obtenidos los resultados, se hará un análisis de los distintos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que este trabajo puede ayudar a cumplir (Figura 3).



Figura 3. Objetivos de Desarrollo Sostenible planteados por la ONU

Fuente: <https://www.un.org>

Finalmente, tras la elaboración de este trabajo se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- La fabricación aditiva es una de las tecnologías con mayor futuro, tanto para el desarrollo de actividades tecnológicas, como para la vida cotidiana, sin embargo, plantea algunos problemas que se han de resolver, sobre todo en las piezas en las que se necesita una buena precisión.
- La utilización de grafeno como material de aporte de la resina para la impresión en 3D aún necesita de una mayor investigación para arrojar unos resultados concluyentes, aunque según los resultados obtenidos sí puede decirse que ayuda a la degradación de dichas resinas.

STUDY DEGRADATION OF BONE SCAFFOLDS *IN VITRO* OBTAINED WITH 3D PRINTED CARBON- BASED NANOMATERIALS

Author: Manuel Conde Rubio.

Project Directors: Sara López de Armentia Hernández y Eva Paz Jiménez.

Collaborating Entity: ETSI ICAI - Comillas Pontifical University.

Abstract

In this project the degradation process of scaffolds will be studied, simulating *in vitro* conditions in the human body. For this purpose, the 3D printing of these scaffolds (*Image a*) will be carried out, as well as obtaining tensile specimens (*Image b*) and absorption discs (*Image c*), to test their mechanical properties, as well as biodegradation and water absorption tests.



Figure 1. PLA Scaffold (a)

Source: Own Elaboration

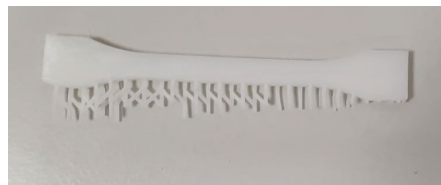


Figure 2. PLA Tencil Specimen (b)

Source: Own Elaboration



Figure 3. PLA Absorption Disc (c)

Source: Own Elaboration

To obtain the different elements mentioned above, the 3D printing technology known as LCD ("*Liquid Crystal Device*") will be used, which offers good precision in the parts obtained (*Figure 2*). This type of printing is characterized by using thermosetting photocurable polymer resins, which are hardened in the process known as photopolymerization used in LCD technology, as is the case of the resin used in this MT is PLA.

In addition to the resin used, different graphene-based nanomaterials (GBN) will be used, which will be added individually to the PLA, obtaining a composite material, being the PLA the matrix and the GBN the reinforcing material.

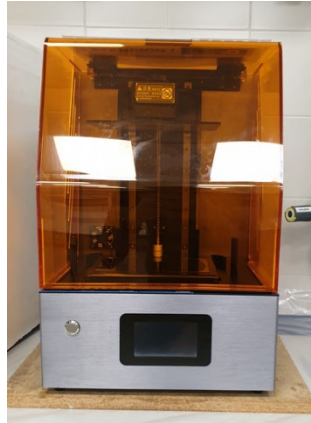


Figure 2. DLP/LCD 3D Printer

Source: ETSI-ICAI'S Chemistry Laboratory

Once the different test elements have been obtained, we will proceed to the simulation of *in vitro* conditions in the human body. For this purpose, the different test specimens, scaffolds and absorption discs, will be introduced in an aqueous solution with PBS, which allows to maintain a constant pH and will be introduced at 37°C for 7, 30 and 90 days, with the objective of verifying from compression tests for the scaffolds, tensile tests for the test specimens and the weight of the absorption discs, how they degrade and if the different forms of graphene used help in the degradation process.

Next, once the results have been obtained, an analysis will be made of the different Sustainable Development Goals (SDGs) that this work can help to achieve (Figure 3).



Figure 3. ONU's Sustainable Development Goals

Source: <https://www.un.org>

Finally, after the elaboration of this work, the following conclusions can be reached:

- Additive manufacturing is one of the technologies with the greatest future, both for the development of technological activities, as well as for everyday life, however, it poses some problems to be solved, especially in parts where good precision is needed.
- The use of graphene as a reinforcing material for resins used in 3D printing still needs further research to provide conclusive results, although according to the results obtained, it can be said that it helps the degradation of these resins.

ÍNDICE

RESUMEN DEL PROYECTO	4
ABSTRACT	7
ÍNDICE.....	10
ÍNDICE DE FIGURAS	12
GLOSARIO	19
1. INTRODUCCIÓN.....	26
2. ESTADO DEL ARTE	28
2.1. TECNOLOGÍA DE FABRICACIÓN ADITIVA O IMPRESIÓN 3D	28
2.1.1. Historia de la Impresión 3D	28
2.1.2. Ventajas de la Impresión 3D.....	31
2.1.3. Limitaciones de la Impresión 3D.....	34
2.1.4. Tecnologías para la Impresión 3D.....	35
2.1.5. Procedimiento para la obtención de una pieza con 3DP.....	43
2.1.6. Futuro de la impresión 3D	50
2.1.7. Conclusiones de la Impresión 3D	51
2.2. INGENIERÍA DE TEJIDOS, SCAFFOLDS Y GRAFENO	53
2.2.1. Introducción.....	53
2.2.2. Historia.....	54
2.2.3. Aspectos fundamentales de la Ingeniería de Tejidos	56
2.2.4. El grafeno	61
2.2.5. Grafeno en la Ingeniería de Tejidos.....	66
2.2.6. Conclusiones.....	70
3. OBJETIVOS.....	73
4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	74
4.1. RECURSOS EMPLEADOS.....	74
4.2. METODOLOGÍA	82
4.3. DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS.....	83
4.3.1. Diseño de las piezas.....	83
4.3.2. Preparación de la mezcla.....	87
4.3.3. Impresión.....	91
4.3.4. Post-Procesado de las piezas.....	91
4.3.5. Degradación de las piezas.....	92
4.3.6. Ensayos realizados.....	93

5. RESULTADOS OBTENIDOS	99
5.1. INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS	99
5.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN	103
5.2.1. Resultados ensayo 0	103
5.2.2. Resultados de los ensayos con PLA	106
5.2.3. Resultados de los ensayos de las probetas de tracción con PLA+G.....	110
5.2.4. Resultados de los ensayos de las probetas de tracción con PLA+GO	113
5.2.5. Resultados de los ensayos de las probetas de tracción con PLA+GNP.....	116
5.2.6. Análisis final de los resultados obtenidos en los ensayos de tracción	118
5.3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN	119
5.3.1. Resultados de los ensayos de compresión sobre las scaffolds de PLA	119
5.3.2. Resultados de los ensayos de compresión sobre las scaffolds de PLA+G ...	122
5.3.3. Resultados de los ensayos de compresión en las scaffolds de PLA+GO.....	124
5.3.4. Resultados de los ensayos de compresión en las scaffolds de PLA+GNP ...	126
5.3.5. Análisis final de los resultados obtenidos en los ensayos de compresión	128
5.4. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE PÉRDIDA DE MASA.....	130
5.4.1. Resultados de los ensayos de pérdida de masa sobre los discos de PLA.....	130
5.4.2. Resultados de los ensayos de pérdida de masa en los discos de PLA+G	132
5.4.3. Resultados de los ensayos de pérdida de masa en los discos de PLA+GO..	134
5.4.4. Resultados de los ensayos pérdida de masa en los discos de PLA+GNP	136
5.4.5. Análisis de los resultados de los ensayos de pérdida de masa	138
6. CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	140
7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	141
8. BIBLIOGRAFÍA	142
ANEXOS	147
ÍNDICE DE ANEXOS	148
ANEXO I.....	150
ANEXO II	155

Índice de figuras

Figura 1. Ejemplo de las diferentes piezas obtenidas para la realización de los distintos ensayos	4
Figura 2. Impresora de Impresión 3D por LCD	5
Figura 3. Objetivos de Desarrollo Sostenible planteados por la ONU	5
Figura 4. Principales Hitos de la impresión 3D.....	30
Figura 5. Porcentaje de usuarios que crean piezas de uso final.....	31
Figura 6. Porcentaje de usuarios que afirman que la sostenibilidad es una ventaja importante de la impresión 3D.	31
Figura 7. Comparativa entre una mordaza de soldadura tradicional y el modelo para la impresión en 3D	32
Figura 8. Arranque de viruta de un proceso de mecanizado por CNC.....	32
Figura 9. Modelo de una prótesis obtenida a partir de un escáner 3D	33
Figura 10. Esfera dentro de otra esfera.....	33
Figura 11. Entorno de visualización de SolidWorks	34
Figura 12. Bobinas de PLA	35
Figura 13. Esquema del proceso FDM	35
Figura 14. Esquema del proceso SLS.....	36
Figura 15. Esquema del proceso SLA	38
Figura 16. Esquema del proceso DLP/LCD	39
Figura 17. Estructura molecular del PLA.....	39
Figura 18. Propiedades del PLA.....	40
Figura 19. Esquema proceso BJ	41
Figura 20. Esquema proceso MJ.....	42
Figura 21. Esquema proceso DED	43
Figura 22. Esquema proceso SHL	43
Figura 23. Proceso de diseño de un producto.....	44
Figura 24. Proceso de impresión 3D	45
Figura 25. Entorno de trabajo de SolidWorks	45
Figura 26. Archivo .stl de una pieza.....	46
Figura 27. Interfaz del slicer chitubox utilizado.....	46
Figura 28. Variación de la curva Tensión vs. Deformación según la orientación de las capas	47
Figura 29. Funcionamiento de un servicio on-line de impresión 3D	48

Figura 30. Alicates utilizados para eliminar el material de soporte	48
Figura 31. Unidad de limpieza	49
Figura 32. Lija utilizada.....	49
Figura 33. Estación de curado	50
Figura 34. Válvulas de respiración obtenidas por impresión 3D	50
Figura 35. Impresión de capsulas para fármacos.....	51
Figura 36. Proyectos de órganos y tejidos obtenidos por impresión 3D	51
Figura 37. Pilares fundamentales de la Ingeniería de Tejidos.....	53
Figura 38. N° de Artículos por año relacionados con la IT	53
Figura 39. Cuadro ‘La curación de Justiniano’	54
Figura 40. Portada original de ‘Frankenstein’ de Mary Shelley.....	54
Figura 41. Implantes dentales encontrados en un cráneo humano	54
Figura 42. Rata Vacanti	55
Figura 43. Matriz Extracelular tomada a partir de un microscopio.....	56
Figura 44. Ejemplo de Scaffold.....	57
Figura 45. Representación gráfica del tipo de injertos oseos	59
Figura 46. Estructura atómica del Grafeno.....	62
Figura 47. Posibles aplicaciones del Grafeno.....	64
Figura 48. Estructuras atómicas de los distintos tipos de Grafeno.....	65
Figura 49. Distintas aplicaciones del Grafeno en la IT oseos	67
Figura 50. Ejemplo de injerto óseo dental.....	68
Figura 51. Medidas de la probeta a tracción 1BA	84
Figura 52. Diseño del disco de absorción.....	84
Figura 53. Prototipo de la scaffold inicial	85
Figura 54. Scaffold final para la elaboración de los ensayos de compresión.....	85
Figura 55. Orientación de las probetas a 5° y a 85°	86
Figura 56. Parámetros del slicer Chitubox	86
Figura 57. Distribución final de los distintos elementos a imprimir	87
Figura 58. Equipo de sonicación utilizado	87
Figura 59. Equipo de agitación mecánica utilizado.....	88
Figura 60. Equipo de ultrasonidos (izq) y estufa de vacío (der) para llevar a cabo la desgasificación	88
Figura 61. Resina (izq) vaso de medición (centro) y balanza (der) utilizados	89

Figura 62. Balanza utilizada para la medición de la cantidad de nanomaterial necesario	89
Figura 63. Elección del tiempo y la amplitud (izq), elección del tiempo pulse on/off (der) en el mando del equipo de sonicación.....	90
Figura 64. Impresora LCD utilizada.....	91
Figura 65. Unidad de limpieza utilizada.....	91
Figura 66. Lijado de una probeta de tracción	92
Figura 67. Estufa utilizada para la realización de la degradación de las piezas	92
Figura 68. PBS utilizado del laboratorio de química de la ETSI-ICAI.....	93
Figura 69. Gráfica tensión-deformación obtenida a partir de un ensayo de tracción.....	94
Figura 70. Parámetros escogidos para la elaboración del ensayo de tracción.....	94
Figura 71. Ensayo de tracción	95
Figura 72. Gráfica tensión-deformación obtenida a partir de un ensayo de compresión.....	95
Figura 73. Parámetros escogidos para la elaboración del ensayo de compresión	96
Figura 74. Ensayo de compresión.....	96
Figura 75. Ejemplo de la toma de medidas realizadas en las scaffolds.....	97
Figura 76. Calentador utilizado	97
Figura 77. Secadores utilizados	98
Figura 78. Ejemplo de la toma de medidas realizadas en los discos de absorción.....	98
Figura 79. Conjunto de las piezas obtenidas (de izquierda a derecha): PLA, Grafeno, GO, NP-GO	99
Figura 80. Ejemplo de la toma de medidas realizadas en las probetas de tracción.....	99
Figura 81. Ejemplo de la curva tensión-deformación obtenida.....	100
Figura 82. Ejemplo de la representación de los datos en Excel	100
Figura 83. Ejemplo de la representación de las tensiones y deformaciones máximas encontradas para los ensayos de tracción de PLA con 3 meses de degradación.....	101
Figura 84. Representación de las medias máximas encontradas para los ensayos de tracción con 3 meses de degradación	101
Figura 85. Representación de los datos para el ensayo de absorción.....	102
Figura 86. Representación de las medias obtenida para el ensayo de absorción con una semana de degradación.....	102
Figura 87. Resultados obtenidos de las probetas de tracción a 5° usando la técnica 1.	103
Figura 88. Resultados obtenidos de las probetas de tracción a 85° usando la técnica 1	104
Figura 89. Resultados obtenidos de las probetas de tracción a 5° usando la técnica 2.	104
Figura 90. Resultados obtenidos de las probetas de tracción a 85° usando la técnica 2	105

Figura 91. Resultados obtenidos del ensayo 0.....	105
Figura 92. Representación gráfica de los resultados medios obtenidos del ensayo 0 según la técnica utilizada	106
Figura 93. Representación gráfica de los resultados medios obtenidos del ensayo 0 según la orientación de las probetas	106
Figura 94. Resultados obtenidos de las probetas de tracción con PLA y 0 días de degradación.....	107
Figura 95. Resultados obtenidos de las probetas de tracción con PLA y 1 semana de degradación.....	107
Figura 96. Resultados obtenidos de las probetas de tracción con PLA y 1 semana de degradación.....	108
Figura 97. Resultados obtenidos de las probetas de tracción con PLA y 3 meses de degradación.....	109
Figura 98. Evolución de las medias de las probetas de tracción con PLA	109
Figura 99. Resultados obtenidos de las probetas de tracción usando PLA y Grafeno para una degradación de 0 días.....	110
Figura 100. Resultados obtenidos de las probetas de tracción usando PLA y Grafeno para una degradación de 1 semana	111
Figura 101. Resultados obtenidos de las probetas de tracción usando PLA y Grafeno para una degradación de 1 mes.....	111
Figura 102. Resultados obtenidos de las probetas de tracción usando PLA y Grafeno para una degradación de 3 meses	112
Figura 103. Evolución de las medias de las probetas de tracción con PLA más Grafeno	112
Figura 104. Resultados obtenidos de las probetas de tracción usando PLA y GO para una degradación de 0 días	113
Figura 105. Resultados obtenidos de las probetas de tracción usando PLA y GO para una degradación de 1 semana.....	114
Figura 106. Resultados obtenidos de las probetas de tracción usando PLA y GO para una degradación de 1 mes	114
Figura 107. Resultados obtenidos de las probetas de tracción usando PLA y GO para una degradación de 3 meses	115
Figura 108. Evolución de las medias de las probetas de tracción con PLA más GO...	115
Figura 109. Resultados obtenidos de las probetas de tracción usando PLA y GNP para una degradación de 0 días.....	116
Figura 110. Resultados obtenidos de las probetas de tracción usando PLA y GNP para una degradación de 0 días.....	116
Figura 111. Resultados obtenidos de las probetas de tracción usando PLA y GNP para una degradación de 1 mes.....	117

Figura 112. Resultados obtenidos de las probetas de tracción usando PLA y GNP para una degradación de 3 meses	117
Figura 113. Evolución de las medias de las probetas de tracción con PLA más GNP.	118
Figura 114. Evolución de las medias de las probetas de tracción	118
Figura 115. Datos totales de los ensayos de tracción	119
Figura 116. Resultados obtenidos de las scaffolds con PLA y 0 días de degradación.	119
Figura 117. Resultados obtenidos de las scaffolds con PLA y 1 semana de degradación	120
Figura 118. Resultados obtenidos de las scaffolds con PLA y 1 mes de degradación.	120
Figura 119. Resultados obtenidos de las scaffolds con PLA y 3 meses de degradación	121
Figura 120. Evolución de las tensiones máxima obtenidas de los ensayos de compresión con PLA.....	121
Figura 121. Resultados obtenidos de las scaffolds de PLA con Grafeno y 0 días de degradación.....	122
Figura 122. Resultados obtenidos de las scaffolds de PLA con Grafeno y 1 semana de degradación.....	122
Figura 123. Resultados obtenidos de las scaffolds de PLA con Grafeno y 1 mes de degradación.....	122
Figura 124. Resultados obtenidos de las scaffolds de PLA con Grafeno y 3 meses de degradación.....	123
Figura 125. Evolución de las tensiones máxima obtenidas de los ensayos de compresión con PLA y Grafeno.....	123
Figura 126. Resultados obtenidos de las scaffolds de PLA con GO y 0 días de degradación	124
Figura 127. Resultados obtenidos de las scaffolds de PLA con GO y 1 semana de degradación.....	124
Figura 128. Resultados obtenidos de las scaffolds de PLA con GO y 1 mes de degradación	125
Figura 129. Resultados obtenidos de las scaffolds de PLA con GO y 3 meses de degradación.....	125
Figura 130. Evolución de las tensiones máxima obtenidas de los ensayos de compresión con PLA y GO.....	126
Figura 131. Resultados obtenidos de las scaffolds de PLA con GNP y 0 días de degradación.....	126
Figura 132. Resultados obtenidos de las scaffolds de PLA con GNP y 1 semana de degradación.....	127

Figura 133. Resultados obtenidos de las scaffolds de PLA con GNP y 1 mes de degradación.....	127
Figura 134. Resultados obtenidos de las scaffolds de PLA con GNP y 3 meses de degradación.....	127
Figura 135. Evolución de las tensiones máxima obtenidas de los ensayos de compresión con PLA y GO	128
Figura 136. Evolución de las medias de tensión de las scaffolds.....	129
Figura 137. Resultados totales de los ensayos de compresión sobre las scaffolds.....	129
Figura 138. Resultados obtenidos de los discos de PLA con 1 semana de degradación	130
Figura 139. Resultados obtenidos de los discos de PLA con 1 mes de degradación ...	130
Figura 140. Resultados obtenidos de los discos de PLA con 3 meses de degradación	131
Figura 141. Resultados obtenidos de los discos de PLA. Error! Bookmark not defined.	
Figura 142. Resultados obtenidos de los discos de PLA y Grafeno para una degradación de 1 semana	132
Figura 143. Resultados obtenidos de los discos de PLA y Grafeno para una degradación de 1 mes.....	132
Figura 144. Resultados obtenidos de los discos de PLA y Grafeno para una degradación de 3 meses.....	133
Figura 145. Resultados obtenidos de los discos de PLA.....	133
Figura 146. Resultados obtenidos de los discos de PLA y GO para una degradación de 1 semana	134
Figura 147. Resultados obtenidos de los discos de PLA y GO para una degradación de 1 mes.....	134
Figura 148. Resultados obtenidos de los discos de PLA y GO para una degradación de 3 meses	135
Figura 149. Resultados obtenidos de los discos de PLA y GO	135
Figura 150. Resultados obtenidos de los discos de PLA y GNP para una degradación de 1 semana	136
Figura 151. Resultados obtenidos de los discos de PLA y GNP para una degradación de 1 mes.....	136
Figura 152. Resultados obtenidos de los discos de PLA y GNP para una degradación de 3 meses	137
Figura 153. Resultados obtenidos de los discos de PLA y GNP.....	137
Figura 154. Evolución de las medias de la masa de los discos de absorción	138
Figura 155. Datos totales de los ensayos de pérdida de masa	138
Figura 156. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	152

Glosario

2D	<i>Two Dimensions</i> : acrónimo del inglés. Hace referencia a las dimensiones de un plano, se dice de un diseño cuando este no presenta volumen
3D	<i>Three Dimension</i> : derivado del anterior. Hace referencia a las tres dimensiones del espacio, se refiere a un diseño cuando ocupa volumen
3DP	<i>Three Dimension Printing</i> : acrónimo del inglés. Impresión en tres dimensiones
ABS	Acrilonitrilo Butadieno Estireno, acrónimo del latín referido a un plástico empleado en la modelación en 3D que destaca por su resistencia y por su estabilidad dimensional a alta temperatura.
Aglutinante	Agente químico usado para unir distintos elementos.
Almidón	Hidrato de carbono que constituye la principal reserva energética de casi todos los vegetales y tiene usos alimenticios e industriales.
Aloinjerto	Trasplante de un órgano o de un tejido en que un mismo individuo es donante y receptor.
Anisotropía	Dicho de una sustancia o de un cuerpo: Que posee propiedades físicas distintas según la dirección en que se mide.
Artroplastia	Es una cirugía para reemplazar solo una parte de una rodilla dañada.
BBC	La <i>British Broadcasting Corporation</i> es el servicio público de radio y televisión del Reino Unido.
Bioactividad	Es la capacidad que tiene el material de interactuar químicamente con los tejidos (blandos y duros) del organismo.
Biocompatible	Ausencia de reacciones alérgicas, inmunitarias, en el contacto entre los tejidos del organismo y algunos materiales.

Biodegradación	Dicho de una sustancia: Que puede ser degradada por acción biológica.
Biomaterial	Material tolerado por el organismo, utilizado para prótesis y otros fines.
CAD	<i>Computer-Aided Design</i> , es el software de ordenador que se utiliza para diseñar. Está enfocado principalmente para ingeniería y arquitectura
CNC	Control numérico por computadora es un sistema que permite el control de la posición de un elemento montado en el interior de una máquina-herramienta mediante un software especialmente diseñado para ello.
Código Abierto	Modelo de desarrollo de software basado en la colaboración entre usuarios.
Cresta ilíaca	Es una estructura anatómica que se encuentra ubicada en el borde superior del hueso coxal, es conocido como hueso ilíaco.
Curado	Endurecimiento de la pieza.
DED	Proceso de fabricación aditiva conocido como Deposición de Energía Directa
Display	Dispositivo de un aparato electrónico o pantalla donde se muestra visualmente cierta información
DLP	Proceso de fabricación aditiva conocido como <i>Direct Light Processing</i>
Efecto Joule	Si por un conductor circula corriente eléctrica parte de la energía cinética de los electrones se transformará en calor.
Estireno	Hidrocarburo insaturado, oleoso y de olor penetrante, usado en la industria para la fabricación de polímeros plásticos y resinas sintéticas, como el poliéster.
Factor de crecimiento	Son un conjunto de sustancias, en su gran mayoría proteínas, que se encuentran en el plasma y en las plaquetas de nuestro sistema sanguíneo. Son esenciales en los procesos de reparación y regeneración celular.

FDM	<i>Fusion Deposition Modelling</i> , acrónimo proveniente del idioma inglés y de significado de Modelado por Deposición Fundida. Se trata de una tecnología de impresión de piezas en 3D mediante extrusión de plástico fundido.
Fluorometalona	La fluorometolona es un medicamento que pertenece al grupo de los medicamentos denominados corticoides o corticosterioides
Forma alotrópica	Propiedad de algunos elementos, pueden presentarse con estructuras moleculares distintas, o con características físicas diversas, como el carbono, que puede aparecer en forma de grafito o de diamante.
Fotocurable	Que se endurece en presencia de una fuente de luz
Fotoiniciador	Un fotoiniciador es una molécula que crea especies reactivas (radicales libres, cationes o aniones) cuando se expone a la radiación (UV o visible).
Fotopolimerización	La fotopolimerización, tal como su nombre lo indica, es una reacción de polimerización inducida por luz.
Fotosensible	Sensible a la luz.
Fresadora	Máquina dedicada al proceso de mecanizado a partir del corte de una herramienta rotativa.
Hidrofilia	Dicho de una materia o una sustancia: Que adsorbe el agua con gran facilidad
In vitro	Producido en el laboratorio por métodos experimentales, simulando las condiciones (temperatura, fluidos...) de un organismo vivo.
In vivo	Producido en un organismo vivo por métodos experimentales.
Industria 4.0	Nueva forma de visión de la industria que implica la promesa de una nueva revolución combinando técnicas avanzadas de producción y operaciones con tecnologías inteligentes que se integrarán en las organizaciones, las personas y los activos.

Isotrópico	Dicho de una sustancia o de un cuerpo: Que posee las mismas propiedades en todas las direcciones.
LCD	Es una pantalla de cristal líquido nombrada por sus siglas en inglés <i>Liquid Crystal Display</i> , que se utiliza para ver imágenes
Ligamento periodontal	Es un tejido blando, compuesto de colágeno, de tipo vascularizado y celular, que envuelve las piezas dentales
Liofilización	Separar el agua de una sustancia, o de una disolución mediante congelación y posterior sublimación.
Lixiviación	Tratar una sustancia compleja, como un mineral, con un disolvente adecuado para separar sus partes solubles de las insolubles.
Material compuesto	En ciencia de materiales reciben el nombre de materiales compuestos aquellos materiales que se forman por la unión de dos o más materiales para conseguir la combinación de propiedades que no es posible obtener en los materiales originales.
MEC	La matriz extracelular (MEC) es el conjunto de materiales extracelulares que forman parte de un tejido.
Mecanizado	Conjunto de operaciones que dan la forma a una pieza mediante el arranque de material.
MEX	Tecnología de fabricación aditiva conocida como <i>Material Extrusion</i> .
MJ	Técnica de fabricación aditiva conocida como <i>Material Jetting</i> .
Módulo de Young	Es un parámetro que caracteriza la rigidez de un material elástico, trabajando en la zona elástica, al aplicarle un esfuerzo de tracción.
Morbilidad	Presentación de una enfermedad o síntoma de una enfermedad.
Neoplasia	Multiplicación o crecimiento anormal de células en un tejido del organismo.
Osteoblastos	Célula que forma el tejido óseo.

Osteoconductor	Es un proceso por el cual el material provee un ambiente, estructura o material físico apropiado para la aposición de hueso nuevo.
Osteogénico	Que forma tejido óseo.
Osteoinductor	Es un proceso que estimula la osteogénesis
Osteointegración	La osteointegración es el proceso por el que se produce una unión sólida entre un implante y el hueso natural del paciente.
PBS	<i>Phosphate Buffered Saline</i> . Es una solución buffer que contiene cloruro de sodio, fosfato de sodio y, en algunas formulaciones, cloruro de potasio y fosfato de potasio. El PBS ayuda a mantener un pH constante y es isotónico y no tóxico para las células.
PLA	Ácido poliláctico, se deriva de materias primas naturales y renovables, como el maíz, y pertenece a los poliésteres como un polímero sintético.
Poliéster	Resina obtenida por polimerización del estireno y otros productos químicos, que se endurece a la temperatura ordinaria, es muy resistente a la humedad a los productos químicos y a las fuerzas mecánicas.
Poliestireno	Material que resulta de la polimerización del estireno, utilizado en la industria del plástico.
Polímero	Compuesto químico, natural o sintético, formado por polimerización y que consiste esencialmente en unidades estructurales repetidas.
Proliferación celular	Aumento del número de células como resultado del crecimiento y la multiplicación celular.
Prótesis	Pieza o aparato empleados para sustituir un órgano o un miembro del cuerpo.
Prototipo	Primer ejemplar que se fabrica de una figura y que sirve de modelo para las siguientes.

Pulpa dental	La Pulpa es el tejido blando del diente que contiene los nervios, los vasos sanguíneos y el tejido conectivo. Está dentro del diente y se extiende desde la corona del diente hasta la punta de las raíces.
Punto de fusión	El punto de fusión de una sustancia es la temperatura a la que cambia de estado de sólido a líquido.
SHL	Tecnología de fabricación aditiva conocida como <i>Sheet Lamination</i> .
Sinterizar	Fabricar objetos mediante el prensado de polvos o materias metálicas o plásticas que previamente han sido calentadas sin llegar a la fusión.
SLA	Se refiere a la tecnología también conocida como Estereolitografía, proceso en el cual se convierte, con un láser, un fotopolímero líquido en plástico sólido, capa por capa.
SLS	Sinterización de Laser Selectivo. Se trata de una tecnología de impresión de piezas en 3D mediante el fundido del material de aporte con un láser.
Solvente	Dicho de una sustancia: Que puede disolver y producir con otra una mezcla homogénea.
Termoestable	Dicho del plástico: Que no pierde su forma por la acción del calor y de la presión.
Termoplástico	Tipo de plástico que se reblandece con el calor y se endurece con el frío.
Tolerancia	Intervalo de valores entre los que debe encontrarse una medida.
UV	Siglas para Radiación Ultravioleta.
Xenoinjerto	Trasplante de un órgano, un tejido o células a un individuo de otra especie.

1. Introducción

Uno de los campos de investigación que más desarrollo está teniendo en los últimos años dentro del sector de la salud, es el de la medicina regenerativa, en el cual se llevan a cabo diversas tareas multidisciplinares, cuyo principal objetivo es conseguir la autocuración de distintos órganos y tejidos del cuerpo. Para conseguir este objetivo esta parte de la medicina se apoya en otras ramas del conocimiento como la terapia celular avanzada, la ingeniería genética y la ingeniería de tejidos¹, esta última rama es la que se abordará en este TFM.

La ingeniería de tejidos es un área de la medicina regenerativa la cual tiene como objetivo la fabricación de tejidos para su utilización terapéutica, permitiendo la restauración, sustitución o incremento de las actividades funcionales de los tejidos originales. En general la ingeniería de tejidos tiene como misión principal proporcionar señales físicas y química en andamios (scaffolds) biodegradables para guiar el anclaje y diferenciación celular en tejidos funcionales².

Estas scaffolds son una matriz porosa, obtenidas a partir de materiales biodegradables y **biocompatibles** con el cuerpo humano y con las propiedades mecánicas suficientes para ser capaces de soportar las distintas tensiones que se producen en el cuerpo humano mientras el tejido se está regenerando. Para la fabricación de scaffolds se debe tener en cuenta los siguientes aspectos³:

- Deben de ser porosas.
- Deben de tener buenas propiedades mecánicas.
- Deben degradarse a medida que se va formando el nuevo tejido.
- No deben de ser tóxicas.

Los métodos de fabricación de este tipo de estructuras son diversos, a continuación, se nombran una serie de estos métodos⁴:

- **Liofilización.**
- **Lixiviación** de sales.
- Impresión 3D.

La tecnología utilizada para la obtención de dichas estructuras en este TFM será la impresión 3D. Dentro de la impresión 3D se encuentran varias técnicas con las que se pueden obtener estas estructuras, pero las que más precisión ofrecen y las que permiten la utilización de materiales compuestos de forma más sencilla, son la tecnología *Stereolithography (SLA)* y la tecnología “*Liquid Crystal Device*” (LCD). Ambas tecnologías tienen en común el mismo principio, se van creando capas de la estructura a crear mediante el curado de una resina, la diferencia entre ambas es el sistema con el que se realiza el curado. Mientras que la tecnología SLA emplea un láser, la tecnología LCD utiliza un **display** que muestra la imagen de la capa que se quiere generar⁵.

Ambas tecnologías ofrecen la precisión adecuada para la creación de piezas pequeñas, por lo que las hace idóneas para la fabricación de las scaffolds.

Para este TFM se ha optado por hacer uso de la tecnología LCD por ofrecer una mayor rapidez.

La resina utilizada como material de fabricación se ha obtenido a partir de polímeros termoestables, este tipo de polímeros permiten la posibilidad que la resina se endurezca, son fotocurables (lo que hace que la resina tenga esta característica es que tiene un **fotoiniciador**), del que hace uso la tecnología LCD⁶. La resina escogida es la conocida como PLA. Este tipo de resina ofrece unas propiedades mecánicas con un alto **módulo de flexión** y además de ser biodegradables en medio acuoso, a temperatura ambiente y el rango de pH entre 5 y 8⁷.

Además del PLA uno de los materiales que más interés está generando en todos los campos tecnológicos y también en el campo de la medicina es el grafeno, debido, entre otros, a sus excelentes propiedades mecánicas y biológicas. Nuevos estudios sugieren que puede ser empleado en aplicaciones biomédicas debido a su biocompatibilidad y actividad antimicrobiana, así como su capacidad de favorecer la **proliferación celular**⁸. Estas propiedades le convierten en el candidato idóneo para ser utilizado como material de refuerzo para la obtención de las mencionadas scaffolds.

En este TFM la obtención de scaffolds se realizará a partir de un **material compuesto**, siendo la resina PLA la matriz y el grafeno va a ser el material de refuerzo.

2. Estado del Arte

A lo largo de este apartado se llevará a cabo una documentación acerca de las distintas técnicas de impresión en 3D usadas actualmente en la industria, en especial la tecnología LCD, la cual ha sido la técnica empleada para la obtención de las distintas piezas usadas para la obtención de los resultados de este TFM. A su vez se comentarán los distintos tipos de nanomateriales base grafeno empleados, sus características y propiedades principales. Además, se comentará cuáles son las técnicas actuales utilizadas para la realización de injertos óseos y porque el uso de scaffolds obtenidas a partir de la impresión 3D pueden ser una mejor solución.

2.1. Tecnología de Fabricación Aditiva o Impresión 3D

En esta primera parte del trabajo se llevará a cabo un repaso a la evolución de la tecnología de fabricación aditiva, reconocida mundialmente por sus siglas en inglés, **3DP** (*Three Dimensions Printing*). Se hará un breve comentario de las principales tecnologías, con un mayor enfoque en la tecnología LCD, para terminar con el tipo de materiales utilizados en este tipo de impresión, sus propiedades y características.

2.1.1. Historia de la Impresión 3D

Se define la fabricación aditiva al proceso de unión de materiales para fabricar piezas u objetos a partir de datos de modelos 3D, generalmente capa a capa, a diferencia de los métodos de fabricación mediante eliminación de material y de conformado⁹.

La historia de la impresión 3D comienza como tal con la invención de la impresora de tinta en 1976¹⁰, elemento fundamental en el día a día de las empresas y de la vida cotidiana. Este tipo de tecnología permitía la obtención rápida de planos en **2D** para la obtención final de piezas tridimensionales, a partir del uso de técnicas ya conocidas y muy desarrolladas como la inyección por plástico. Sin embargo, esta tecnología ya tenía ciertas limitaciones a la hora de obtención de **prototipos**, ya que la fabricación de estos modelos era un proceso lento y costoso¹¹, se necesitaba de un nuevo tipo de tecnología que resolviese este tipo de problemas. No fue hasta 1984 cuando Chuck Hall, un ingeniero de diseño¹¹ realizó la primera patente de una impresora 3D, momento en el cual nace el 3DP.

Principales hitos de la impresión 3D^{12 13}:

- 1980 - Un equipo de ingenieros franceses se interesan por una técnica de fabricación basada en la utilización de resinas **fotosensibles** curadas con luz UV.
- 1984 - Charles Hull fabrica la primera impresora 3D basada en la estereolitografía (SLA).
- 1992 – Se comercializa la primera impresora de SLA: consiguiendo piezas imperfectas, pero demostrando el potencial que tenía este nuevo tipo de tecnología.

- 2002 – Se obtiene el primer órgano humano completamente funcional: obtenido a partir de la impresión 3D en el instituto Wake Forest.
- 2005 – Aparece la primera iniciativa de **código abierto**: desarrollada por el Dr. Adrian Bowyer con el objetivo de la fabricación de una impresora 3D cuyos componentes sean fabricados por ella misma. Esta iniciativa permitió la democratización de este tipo de tecnología para el público general y una disminución de los costes.
- 2006 – Aparece la primera impresora **SLS**: Este tipo de impresoras utilizan un láser que va fundiendo el material de aporte según las especificaciones de la pieza que se quiere obtener. Además, permite una mayor personalización de piezas y la utilización de una gran variedad de materiales.
- 2009 – Gran avance en el desarrollo de la bio-impresión: Se desarrollan los primeros vasos sanguíneos obtenidos a partir de la impresión 3D.
- 2009 – Caduca la patente de la tecnología **FDM**: Este hito permitió una mayor entrada de empresas interesadas en este tipo de tecnología en el mercado, ya que la tecnología FDM tiene una gran relación coste-beneficio, mediante la obtención de piezas de gran precisión a costes relativamente bajos, respecto a los otros tipos de tecnologías de impresión 3D que se encontraban en ese momento en el mercado. La entrada de estas empresas en el sector de la fabricación aditiva disminuyó los costes, permitiendo al público general adquirir este tipo de tecnología.
- 2011 – Impresión 3D usando oro y plata como material de aporte: Se abre un gran abanico de oportunidades para la impresión 3D en el mundo de la joyería y la relojería.
- 2018 - Se fabrica la primera casa habitable mediante fabricación aditiva en Nantes, Francia.
- 2019 – Se obtiene el primer corazón funcional en la universidad de Tel-Aviv.

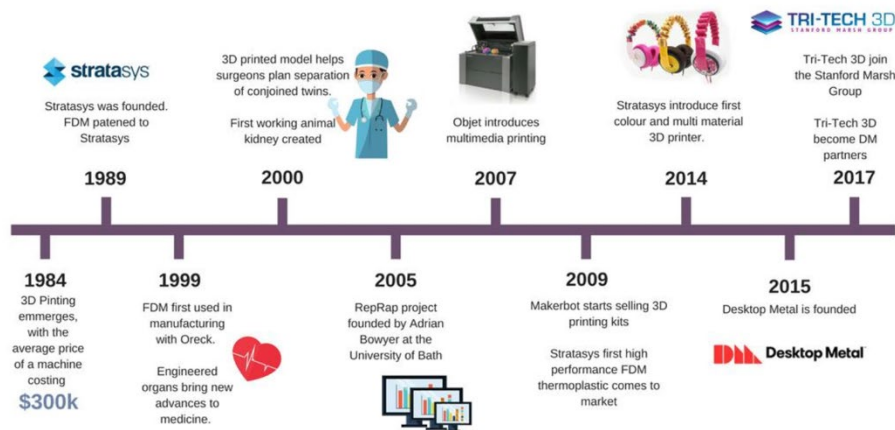


Figura 4. Principales Hitos de la impresión 3D

Fuente: <https://twitter.com/TriTech3D>

2.1.1.1. La Impresión 3D en la actualidad

La fabricación aditiva está teniendo un papel fundamental en el desarrollo de la conocida como cuarta revolución industrial o **Industria 4.0**, un tipo de tecnología que estaba siendo utilizada para la confección de prototipos en sectores industriales muy específicos como pueden ser el aeroespacial o el sector médico, ha pasado a formar parte de la cadena de producción de muchos tipos de industrias¹⁴. Esto se debe principalmente al cambio de paradigma en la industria en lo que lo importante no es el producto final como tal, sino los medios utilizados para la obtención de este producto final con la mayor eficiencia posible. La fabricación aditiva permite esa eficiencia, sobre todo en la etapa de diseño, permitiendo la comprobación de la viabilidad del producto, con la obtención de prototipos de forma rápida, que reflejan fielmente las características del diseño original, minimizando los tiempos de fabricación¹⁵.

Además, nuevos estudios como el realizado por la empresa *Formlabs*, especializada en la fabricación de impresoras 3D sugieren que la fabricación aditiva ya no se dedica exclusivamente a la obtención de prototipos, en el ámbito industrial, sino que se utiliza para la fabricación de productos terminados¹⁶ (Figura 5)

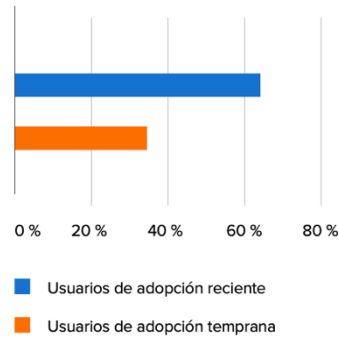


Figura 5. Porcentaje de usuarios que crean piezas de uso final

Fuente: [https://media.formlabs.com/ Report.pdf](https://media.formlabs.com/Report.pdf)

Este informe también destaca el uso de la tecnología 3D para mitigar los efectos del cambio climático, ya que al hacer uso de una menor cantidad de recursos para la creación de piezas y productos se disminuye la emisión de gases de efecto invernadero en relación con las tecnologías de fabricación tradicionales.

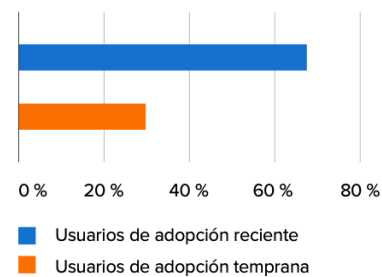


Figura 6. Porcentaje de usuarios que afirman que la sostenibilidad es una ventaja importante de la impresión 3D.

Fuente: [https://media.formlabs.com/ Report.pdf](https://media.formlabs.com/Report.pdf)

2.1.2. Ventajas de la Impresión 3D

Como se ha ido introduciendo en el apartado anterior la impresión 3D tiene una serie de ventajas con respecto a las tecnologías de fabricación tradicionales, como puede ser un mayor compromiso medioambiental debido a la disminución del uso de recursos para la obtención de piezas terminadas. Además de esta ventaja, destacan las siguientes¹⁷:

- Reducción del plazo de lanzamiento al mercado del producto:** La sociedad actual exige que los productos se adapten a su estilo de vida y lo quieren de manera inmediata. La impresión 3D permite satisfacer estas exigencias. Los diseñadores desarrollan sus ideas a partir de modelos CAD, estos modelos se imprimen en 3D como prototipos funcionales, evaluando sus características y ajustándolos a la demanda de los futuros usuarios. Todo este proceso se realiza en días en comparación con los métodos tradicionales que duran semanas.

- Ahorro en costes en la producción de herramientas: Las herramientas son útiles diseñados para solventar problemas concretos de la fábrica. Estas piezas al ser únicas se piden bajo demanda tardando mucho tiempo y siendo muy caras. Este problema se ve incrementado con el deterioro de las herramientas las cuales se tienen que sustituir repercutiendo en la producción de la fábrica y acrecentado los costes. La impresión por 3D disminuye el tiempo en la producción de estas herramientas y por tanto los costes (*Figura 7*).

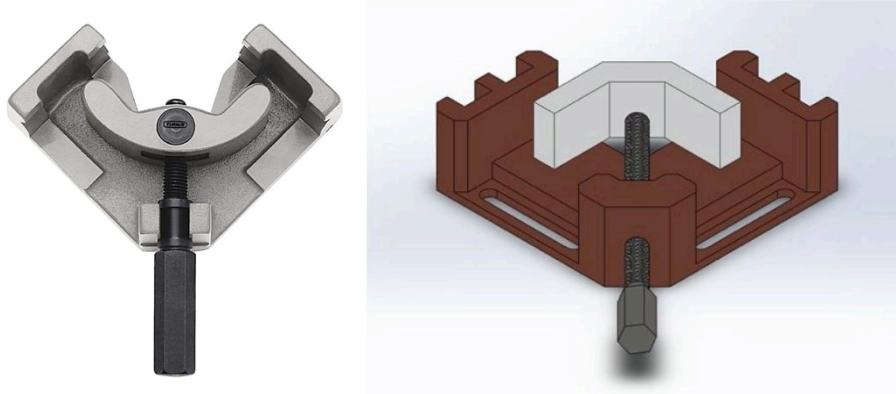


Figura 7. Comparativa entre una mordaza de soldadura tradicional y el modelo para la impresión en 3D

Fuente: Elaboración Propia

- Reducción de los residuos producidos en la fabricación: Las tecnologías tradicionales de fabricación, como pueden ser los procesos de **mecanizado** por CNC generan una gran cantidad de virutas de metal las cuales se deben de recoger y limpiar aumentando los tiempos de producción y por tanto los costes (*Figura 8*). La fabricación aditiva solventa este tipo de problema, ya que de generarse algún residuo este es fácilmente reciclable.



Figura 8. Arranque de viruta de un proceso de mecanizado por CNC

Fuente: <https://mecanicacurriel.com>

- Personalización de las piezas: Una de las grandes ventajas de la impresión 3D es la obtención de piezas que se adecuan a las necesidades de los usuarios. De especial importancia son las **prótesis**. Para que una prótesis se eficaz se debe adaptar a las características de cada paciente, tradicionalmente se realizan numerosas mediciones del miembro afectado para la confección de dicha prótesis. La impresión 3D junto con el uso de técnicas basadas en el escáner 3D de objetos, las cuales permiten recrear de forma rápida y exacta las características del miembro afectado, solventa este tipo de dificultades (*Figura 9*).

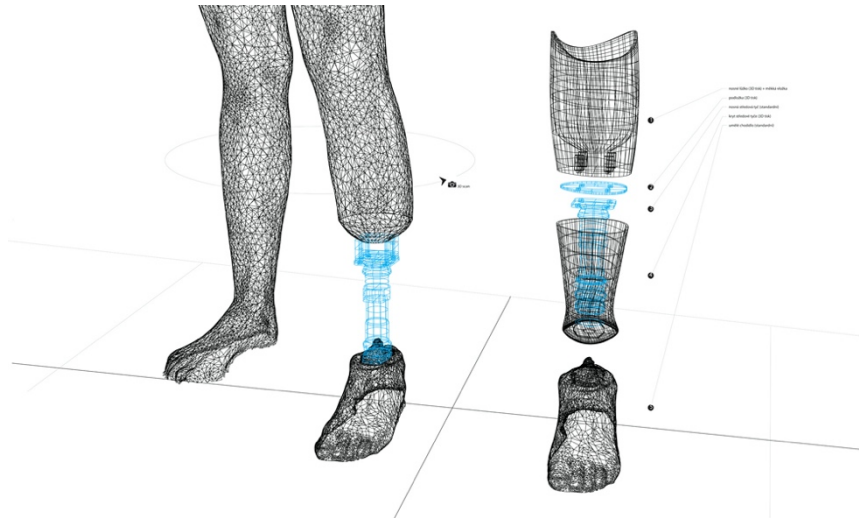


Figura 9. Modelo de una prótesis obtenida a partir de un escáner 3D

Fuente: <https://impresiontresde.com/protesis-pierna-coste-gracias-la-impresion-3d/>

- Mayor libertad en el diseño: La impresión 3D permite la creación de piezas de una gran complejidad geométrica, imposibles de obtener por medio de las técnicas de fabricación tradicionales (*Figura 10*).



Figura 10. Esfera dentro de otra esfera

Fuente: https://www.shutterstock.com/es/search/3d-printing-trend?image_type=photo

2.1.3. Limitaciones de la Impresión 3D

Además de las ventajas mencionadas anteriormente, la impresión 3D tiene ciertas desventajas, comprensibles, al ser una tecnología relativamente nueva, que de no solucionarse con el tiempo pueden ser problemáticas para el avance de este tipo de tecnología¹⁸:

- Tamaño limitado de la impresora: Las piezas obtenidas a partir de la impresión 3D se ven limitadas al tamaño de la zona de impresión. Normalmente en las impresoras más asequibles este tamaño se ve limitado a escasos centímetros, en el caso de que se quieran obtener piezas de grandes dimensiones el precio de las impresoras se incrementa dificultando el acceso al público general.
- Se requiere conocimiento técnico para poder usarlas correctamente: Se debe saber cómo trabajar con archivos CAD para la obtención correcta de piezas. (Figura 11).

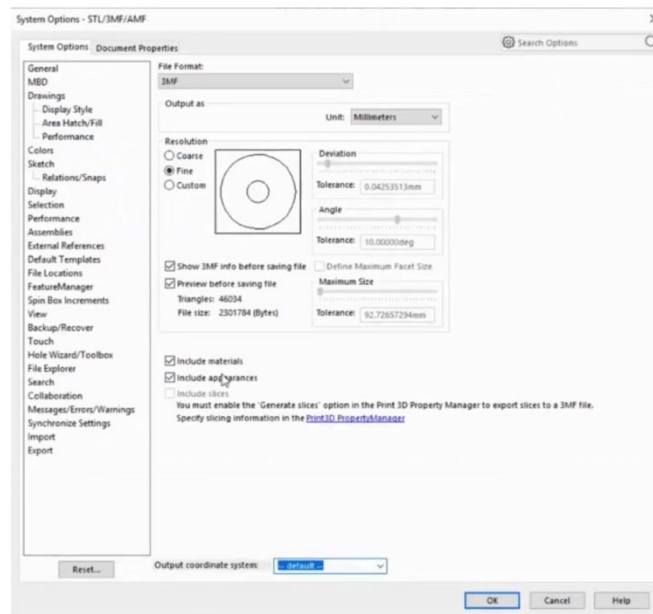


Figura 11. Entorno de visualización de SolidWorks

Fuente: <https://tu3dprintlab.club/limitaciones-de-la-impresion-3d>

- Gran cantidad de softwares: Una desventaja que presentan las impresoras 3D actualmente, es que cada fabricante utiliza su propio software, por lo que el usuario debe conocer cómo manejar una gran variedad de programas, lo que puede conllevar una gran cantidad de tiempo invertido y con ello los costes.
- Materiales de impresión limitados: Aunque el número de materiales disponibles para la fabricación aditiva aumenta a medida que crece la demanda sigue siendo mucho menor con respecto a los métodos tradicionales (Figura 12).



Figura 12. Bobinas de PLA

Fuente: <https://tu3dprintlab.club/limitaciones-de-la-impresion-3d>

2.1.4. Tecnologías para la Impresión 3D

Una vez se han destacado las distintas ventajas e inconvenientes que presenta la impresión 3D se van a nombrar los distintos tipos de tecnología de fabricación aditiva que existen actualmente y a comentar los tres tipos de tecnologías más importantes, destacando la tecnología LCD la cual es la que se ha utilizado para el desarrollo de este TFM.

2.1.4.1. Extrusión de Material

Conocida principalmente por sus siglas en inglés **MEX** (*Material Extrusion*). Esta tecnología se basa principalmente en la deposición de material fundido sobre la base de la impresora, de entre todas las técnicas que se basan en esta tecnología destaca la FDM (*Fused Deposition Modeling*) (Figura 13). El material utilizado es un **termoplástico** normalmente **ABS** o **PLA**, el cual se calienta previamente a ser depositado en la bandeja de la impresora, donde se va enfriando y endureciendo,

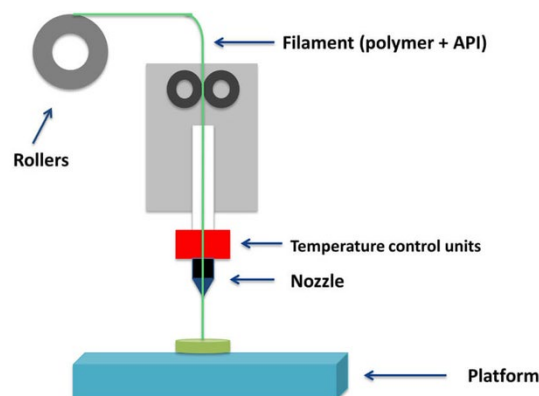


Figura 13. Esquema del proceso FDM

Fuente: <https://tu3dprintlab.club/impresion-3d-de-modelado-por-deposicion-fundida-fdm>

formando las distintas capas que forman la pieza que se quiere obtener. Las impresoras que utilizan este tipo de tecnología son las más baratas y comunes¹⁹.

- Las ventajas que ofrece el FDM son: Impresoras baratas, fáciles de mantener y de utilizar.
- Los inconvenientes que ofrece el FDM son: La calidad superficial de las piezas es menor que la que ofrecen otras tecnologías.
- Campos de aplicación: Fabricación de prototipos, fabricación de herramientas, aplicaciones con altas temperaturas.

2.1.4.2. Fusión en Lecho de Polvo

Este tipo de tecnología se caracteriza por el uso de un láser que **sinteriza** pequeñas partículas de un polímero en polvo y lo endurece para dar forma a la pieza que se quiere obtener²⁰. El tipo de técnica más empleada de esta tecnología se la conoce como SLS (*Selective Laser Sintering*).

La tecnología SLS, se caracteriza porque el polvo, el cual es el material de aporte, se dispersa como una capa delgada sobre la plataforma en la cámara de impresión. La impresora precalienta el polvo a una temperatura justo por debajo del **punto de fusión**, lo que facilita que el láser eleve la temperatura a un punto inferior al punto de fusión del material. Este proceso funde las partículas y las une para formar una parte sólida. El polvo sin fundir se utiliza como soporte de la pieza, sin necesidad de añadir estructuras de soporte específicas. Luego, la plataforma baja, tras formarse una capa, y el proceso se repite para cada capa hasta que se completa la pieza²⁰ (*Figura 14*).

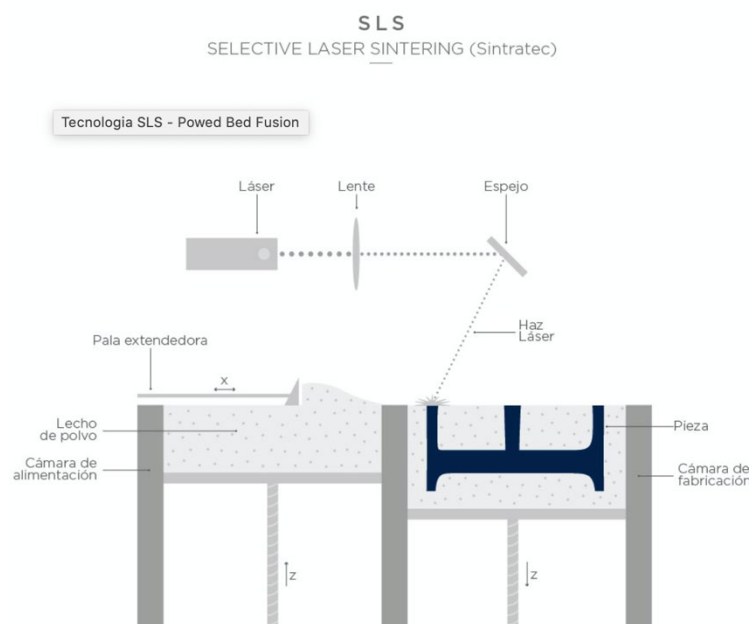


Figura 14. Esquema del proceso SLS

Fuente: <https://eddm.es/blog-ingenius/sinterizado-laser-selectivo-sls/>

- Las ventajas que ofrece la tecnología SLS son: No se necesita de material de soporte, ideal para piezas con geometrías complejas.
- Los inconvenientes que la tecnología SLS son: Sin impresoras muy caras, difíciles de mantener, se necesitan enfriar previamente a retirar la pieza lo que suele durar 12 horas²¹.
- Campos de aplicación: Fabricación de productos terminados, prototipos de dispositivos médicos.

2.1.4.3. Polimerización VAT

Este tipo de tecnología se caracteriza por hacer uso de una fuente de luz, la cual va endureciendo una resina fotosensible que se encuentra en estado líquido dentro de un tanque, formando las distintas capas que componen la pieza que se quiere obtener. Una de las características principales de este tipo de tecnología es que el material de aporte hace a su vez la función de material de soporte de las piezas.

Para hacer uso de esta tecnología se tiene que tener en cuenta las siguientes condiciones de diseño²²:

- El **curado** de la pieza puede no ser completo o puede realizarse de manera accidental, para ello hay que tener en cuenta el tipo de polímero y la cantidad que se va a usar para cada una de las capas.
- La orientación de la pieza a la hora de ser impresa, ya que la distribución de las capas es fundamental a la hora de soportar las tensiones que la pieza va a sufrir.
- Es más caro construir capas que estén orientadas de forma vertical que de forma horizontal.
- Los polímeros que se van a usar deben de tener una alta **reactividad** a la radiación **UV**.

Este tipo de tecnología se puede dividir en dos tipos, según como se aplique la fuente de luz, la tecnología SLA y la tecnología DLP/LCD. La única diferencia principal entre estos dos tipos de tecnología en cuanto a la pieza terminada es la velocidad de fabricación siendo la SLA más lenta que la DLP/LCD, aunque la calidad de las piezas sea un poco mejor:

- a) SLA: Esta forma de impresión se caracteriza principalmente por ser la primera forma de impresión 3D, inventada en 1984 por Charles Hull, el cual tras patentar este tipo de tecnología fundó la empresa 3DSystems para comercializarla. El esquema de funcionamiento es el siguiente²² (*Figura 15*):

1. La plataforma comienza a descender al tanque donde se encuentra la resina.
2. El cabezal se desplaza y enfoca el láser a través de un sistema de espejos a las coordenadas donde se quiere formar la capa de la pieza, es decir, el láser hace un recorrido formando la sección de la pieza, por eso es más lenta que la tecnología LCD/DLP
3. Algunas impresoras disponen de una cuchilla para eliminar las imperfecciones de la capa formada antes de iniciar la siguiente capa.
4. Una vez completado el proceso el tanque se dreña y se puede extraer la pieza.

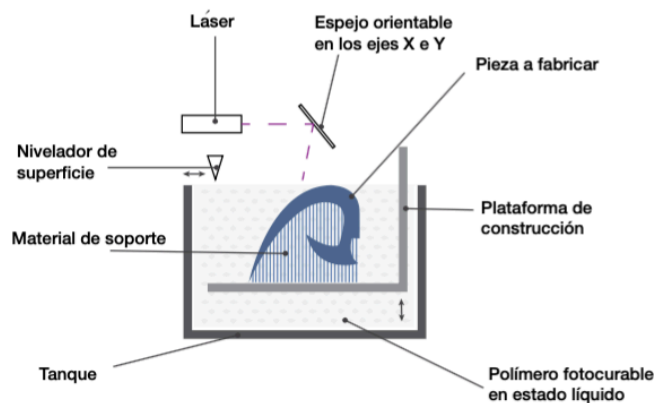


Figura 15. Esquema del proceso SLA

Fuente: *Tecnologías de Fabricación Aditiva* (Pedro Manuel Hernández castellano)

b) DLP/LCD: Este tipo de tecnología al igual que la SLA se caracteriza en llevar a cabo la curación de una resina fotosensible la cual se encuentra en estado líquido dentro de un tanque o una cuba. Esta curación a diferencia de la SLA no utiliza un láser como fuente de luz, sino que lleva a cabo una proyección completa de la capa que se quiere formar. El principio de funcionamiento es el siguiente (*Figura 16*):

1. La plataforma donde se va a formar la pieza comienza a descender al tanque donde se encuentra la resina.
2. En el caso de la tecnología DLP se proyecta la capa de la pieza que se quiere formar, la plataforma sube y se vuelve a iniciar el proceso hasta terminar la pieza. La tecnología LCD muestra una imagen de la capa en el display.

- Una vez terminado el proceso la plataforma asciende hasta la posición inicial con la pieza terminada, momento en el que se puede retirar.

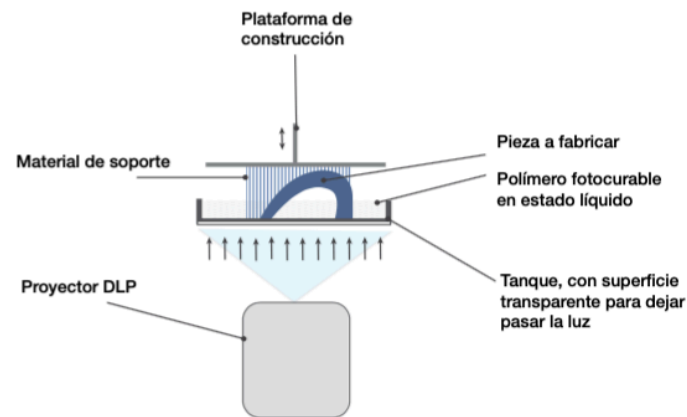


Figura 16. Esquema del proceso DLP/LCD

Fuente: *Tecnologías de Fabricación Aditiva (Pedro Manuel Hernández castellano)*

- Las ventajas que ofrece la tecnología VAT son: Buenas **tolerancias** y acabado superficial, proceso relativamente rápido respecto a otros procesos que ofrecen calidades similares.
- Los inconvenientes que la tecnología VAT son: Son procesos caros, limitado solo a resinas que sean fotopoliméricas, necesitan de postcurados para mejorar sus propiedades estructurales.
- Campos de aplicación: Fabricación de piezas pequeñas, usos médicos.

2.1.4.3.1. Resinas utilizadas en la tecnología VAT

Las resinas utilizadas para imprimir las piezas en este tipo de tecnología se caracterizan por ser unas sustancias líquidas y viscosas similares al aceite, las cuales en presencia de una fuente de luz intensa se endurecen. Estas resinas están formadas principalmente por polímeros, uno de los que más se usan en la industria es el PLA (*Figura 17*).

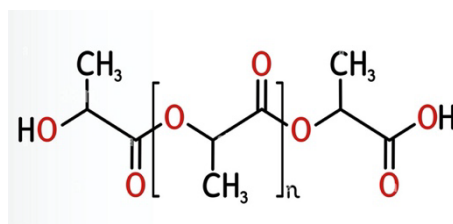


Figura 17. Estructura molecular del PLA

Fuente: <https://www.alamy.es>

El PLA, componente principal de la resina que se va a usar, (Ácido Poliláctico) es un tipo de **poliéster** termoplástico que ha despertado un gran interés en la industria como posible sustituto de los termoplásticos tradicionales, debido a sus buenas propiedades mecánicas y la menor cantidad de energía necesaria para su obtención en comparación con otro tipo de polímeros⁷, ya que se obtiene de fuentes renovables con gran cantidad de **almidón**, como puede ser el maíz a diferencia de los polímeros tradicionales que necesitan de procesos petroquímicos para obtenerse (*Figura 18*).

Propiedad	Valor
Nombre completo	Ácido poliláctico (PLA)
Punto de fusión	150 a 160 °C (302 a 320 °F)
Transición vítrea	60-65 °C
Temperatura del molde de inyección	178 a 240 °C (353 a 464 °F)
Densidad	1.210-1.430 g-cm-3
Fórmula química	(C ₃ H ₄ O ₂) _n
Cristalinidad	37%
Módulo de tracción	2,7-16 GPa
Solubilidad	Disolventes clorados, benceno caliente, tetrahidrofurano y dioxano (no soluble en agua).

Figura 18. Propiedades del PLA

Fuente: <https://descubrearduino.com/que-es-pla/>

Otra de las características del PLA es su característica **biocompatible** y biodegradable, Por lo que, está siendo utilizado y estudiado con gran interés por parte de la comunidad médica para posibles aplicaciones como puede ser la ingeniería de tejidos.

Sin embargo, la resina que se utiliza para la creación de piezas de este tipo de piezas no está formado solo por PLA, además se incorporan monómeros, fotoiniciadores y colorantes:

- **Monómeros:** Los monómeros son los **solventes** usados para reducir la viscosidad de la mezcla para adaptarla mejor a las necesidades de la impregnación y a las condiciones de formación; pero nunca deberá pasarse los límites fijados por el fabricante de las resinas. Además, serán los encargados de iniciar la reacción química para la formación del polímero. El más conocido es el **estireno**. Se pueden adicionar cantidades limitadas de estireno, pues un exceso perjudica las propiedades del poliéster por formación de **poliestireno**: se vuelve quebradizo y sensible al calor, pierde resistencia a la intemperie y es más susceptible al fisuramiento superficial, cuando son expuestos al sol²³.

- **Fotoiniciadores:** Es un compuesto con la capacidad de transformar energía luminosa en energía química en la forma de especies reactivas, para llevar a cabo una reacción. Las especies reactivas son capaces de reaccionar y formar polímeros; que transforman una formulación líquida y soluble en un recubrimiento insoluble y resistente²⁴.

2.1.4.4. Proyección de Aglutinante

Proceso de impresión 3D en la que un **aglutinante** líquido une selectivamente regiones de un lecho de polvo. El tipo de procedimiento para llevar a cabo este tipo de impresión se le conoce como BJ (*Binder Jetting*)²⁵.

Se trata de una tecnología de impresión 3D similar al SLS, que requiere una capa inicial de polvo en la plataforma de construcción, pero, a diferencia del SLS, que utiliza un láser para sinterizar el polvo, la inyección de aglutinante mueve un cabezal de impresión sobre la superficie de polvo depositando pequeñas gotas de aglutinante, estas gotas unen las partículas de polvo para generar cada capa del objeto²⁵. Este tipo de procedimiento puede realizarse tanto con polvo metálico, como con arena (*Figura 19*).

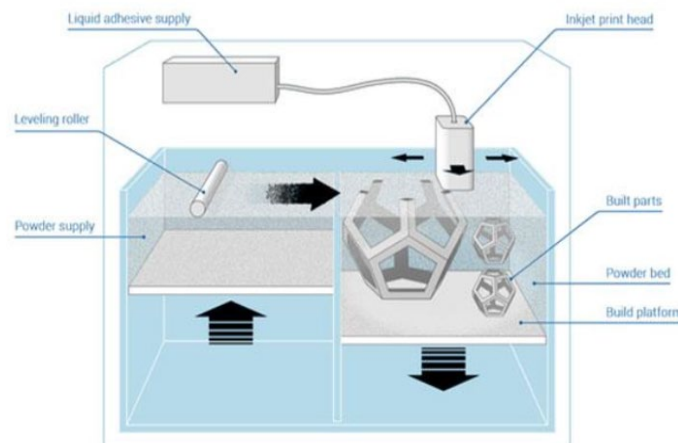


Figura 19. Esquema proceso BJ

Fuente: Rubio MC, Guerrero

2.1.4.5. Inyección de Material

La inyección de material es un tipo de tecnología 3D, la cual se basa en la deposición de gotas del material de aporte, las cuales se van curando de manera selectiva en una placa de construcción. El material de aporte suele ser resinas o polímeros que se curan cuando se exponen a la luz. Una de las características más reconocidas de este tipo de impresión, es que permite la impresión de una pieza utilizando distintos materiales de manera simultánea. El método más empleado para llevar a cabo esta forma de impresión se le conoce como **MJ** (*Material Jetting*) es un tipo de técnica que funciona de forma similar a como lo haría una impresora tradicional. Un cabezal va depositando gotitas del material de aporte que se van curando gracias al uso de una luz UV²⁵ (*Figura 20*).

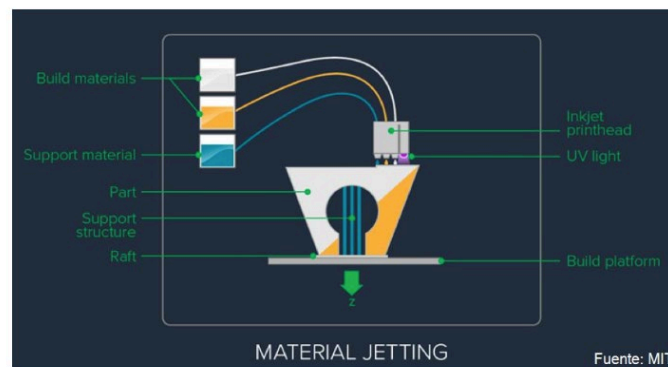


Figura 20. Esquema proceso MJ

Fuente: Rubio MC, Guerrero

2.1.4.6. Deposición de Energía Focalizada

La Deposición de Energía Directa (**DED**) es un proceso de impresión 3D más complejo, que generalmente se utiliza para reparar o agregar material adicional a piezas existentes. Es completamente posible fabricar modelos desde cero utilizando esta tecnología, pero su uso principal es para aplicaciones industriales como la reparación de turbinas o hélices que han sido dañadas.

De manera similar a algunas tecnologías de lecho de polvo, la deposición de energía directa utiliza una fuente de energía enfocada, como un láser o un haz de electrones para fundir el material. Sin embargo, el material se funde al mismo tiempo que se deposita en una boquilla. En cierto modo, la tecnología está en la frontera entre la extrusión de material y la fusión de lecho de polvo²⁶ (*Figura 21*).

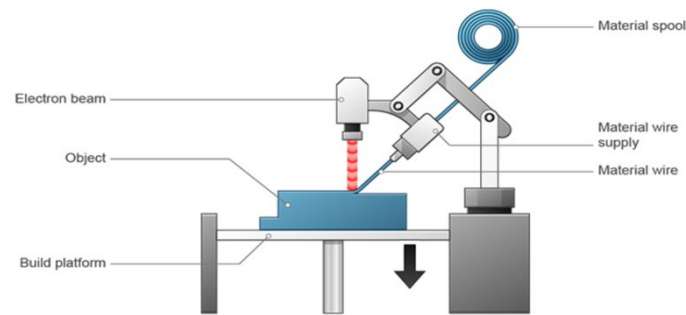


Figura 21. Esquema proceso DED

Fuente: <https://www.3dnatives.com/es/guia-deposicion-de-energia-directa>.

2.1.4.7. Laminado de Hojas

Este proceso de impresión 3D es diferente a los comentados anteriormente: en la laminación de hojas, SHL (*Sheet Lamination*), no interviene una fuente de calor, lo que supone un cambio importante en el enfoque de esta tecnología. Sobre una plataforma de impresión se van superponiendo capas del material elegido, normalmente algunos tipos de plásticos, papeles o metales. Una vez dispuestas las capas de material un láser CO₂ o una herramienta más tradicional como una **fresadora** esculpirán la pieza hasta su forma final²⁷ (Figura 22).

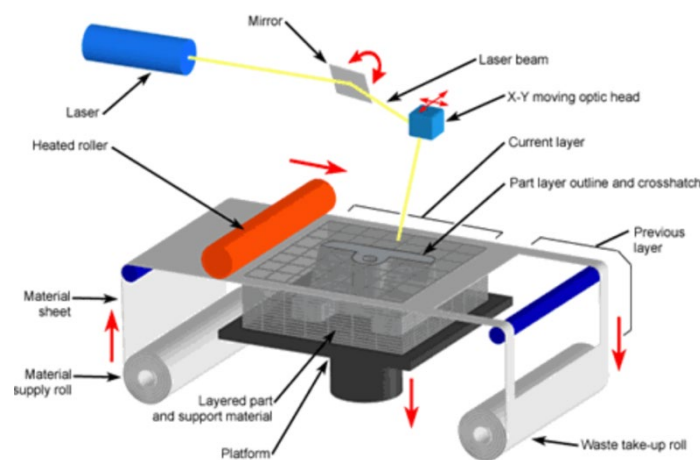


Figura 22. Esquema proceso SHL

Fuente: <http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>

2.1.5. Procedimiento para la obtención de una pieza con 3DP

Una vez se han visto los distintos tipos de tecnologías disponibles de impresión 3D, es momento de comentar cuál es el proceso que se debe de seguir para la obtención correcta de una pieza.

Así, como en cualquier proceso de fabricación inicialmente se debe de tener una idea original que contribuya a satisfacer alguna necesidad detectada en el ámbito industrial o en la sociedad. Una vez se ha identificado esta oportunidad en el mercado se debe de realizar un boceto del producto o de la pieza en cuestión, basándose en piezas ya existentes o diseñando desde cero el producto. Este boceto se suele realizar haciendo uso de herramientas CAD como puede ser *SolidWorks*.

Una vez realizado el diseño se realizarán los análisis necesarios para comprobar que las hipótesis originales se ajustan con la realidad del diseño y realizar los cambios necesarios para que así sea. Estos análisis y comprobaciones pueden realizarse o bien por medio de simulaciones haciendo uso de distintos softwares como ANSYS, o bien realizando ensayos prácticos, a partir de prototipos, como pueden ser los ensayos de tracción o ensayos de compresión los cuales ofrecerán detalles acerca de las propiedades mecánicas de la pieza ensayada.

Si los resultados de los análisis no se ajustan a las necesidades del mercado se deberán de hacer los cambios necesarios en el diseño original.

Finalmente, una vez se han realizado los cambios necesarios para que el producto se ajuste a las necesidades del mercado se inicia la fabricación del producto terminado usando las técnicas tradicionales de fabricación (moldeado, conformado...) o bien haciendo uso de técnicas nuevas como puede ser la fabricación aditiva (*Figura 23*)

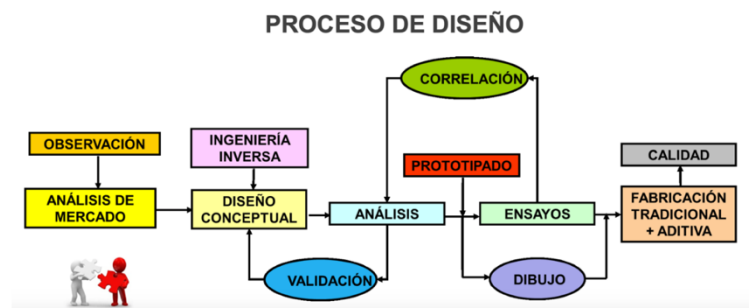


Figura 23. Proceso de diseño de un producto

Fuente: <https://sifo.comillas.edu/pluginfile.php/Tema-Fabricaci3Aditiva.pdf>

Este proceso ha sido el que se ha seguido para la fabricación de las scaffolds usando la tecnología de impresión 3D LCD.

Para ello se han seguido los siguientes pasos (*Figura 24*), los cuales se explicarán a continuación:

Proceso de impresión 3D

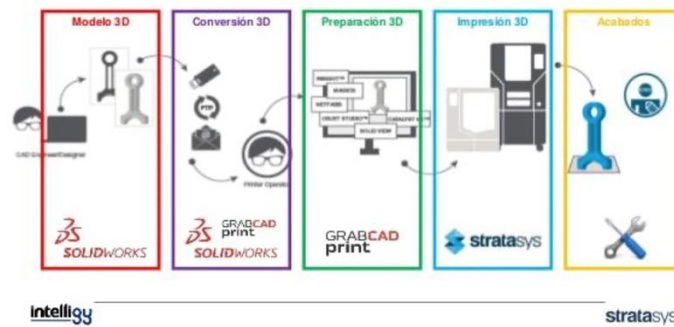


Figura 24. Proceso de impresión 3D

Fuente: <https://www.stratasys.com/es/>

2.1.5.1. Modelo 3D

Este primer paso para la obtención de la pieza se basa en llevar a cabo el diseño de esta a partir de un software CAD como puede ser SolidWorks (Figura 25). Este tipo de programas permiten la visualización de la idea original, permitiendo llevar a cabo los cambios necesarios, cuando se detectan los fallos, con relativa sencillez y poco tiempo, con el objetivo de obtener un producto que cumpla con las especificaciones buscadas.

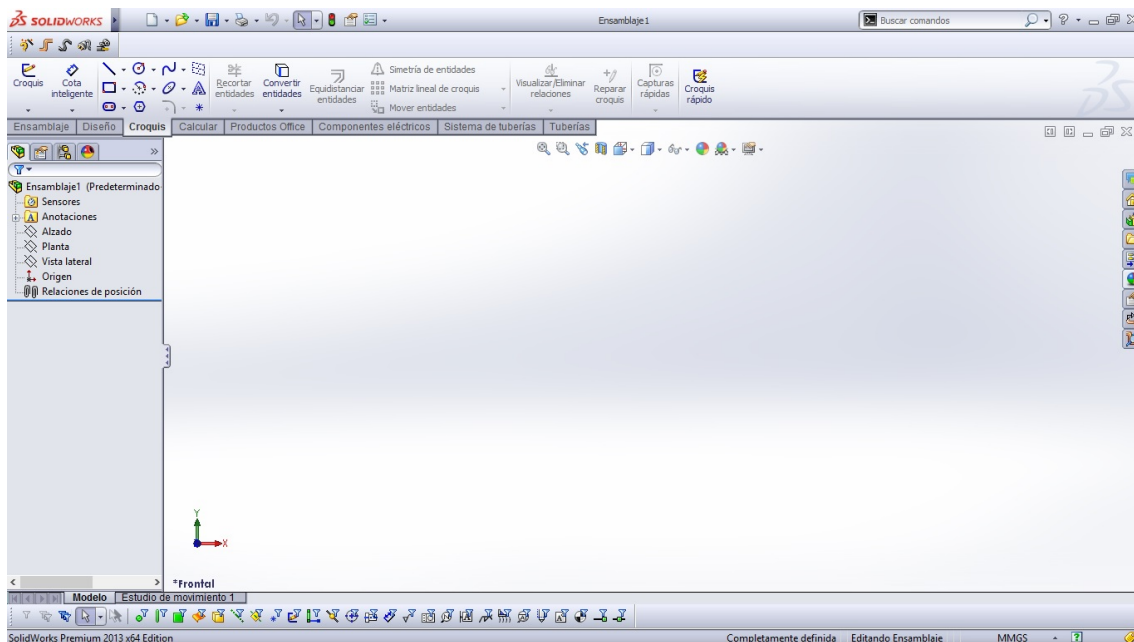


Figura 25. Entorno de trabajo de SolidWorks

Fuente: *Elaboración Propia*

2.1.5.2. Conversión 3D

Una vez se ha obtenido el diseño de la pieza a imprimir, lo que se conoce como archivo ‘.par’ se debe de utilizar un tipo de archivo compatible con las impresoras. Este tipo de archivo, conocido como ‘.stl’, lo que hace es dividir la pieza en triángulos con el objetivo de identificar la geometría de la misma y obteniendo lo que se conoce como malla. Cuanto más compleja sea la pieza más triángulos debe de tener (*Figura 26*).

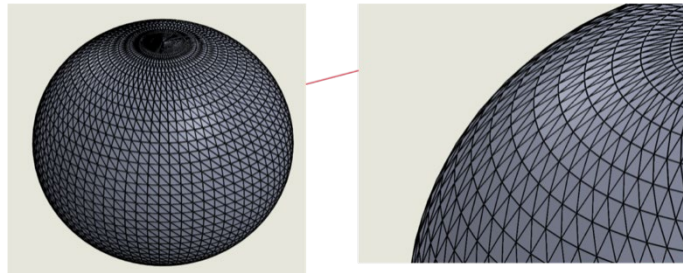


Figura 26. Archivo .stl de una pieza

Fuente: <https://rapidfab.ricoh-europe.com/es/>

2.1.5.3. Preparación de la impresión

Una vez se obtiene el archivo .stl se debe de volver a convertir el archivo en un software conocido como *slicer*. Estos programas se caracterizan en que dividen a la pieza en capas, las cuales serán las que se impriman y de las que estará formada la pieza final. Además de determinar el número de capas se pueden ajustar otros parámetros como la altura de la capa, el tiempo de exposición, la temperatura o la velocidad de impresión, dependiendo del tipo de tecnología de impresión que se use. Una consideración para tener en cuenta es que la mayor parte de las impresoras necesitan de un *slicer*. (*Figura 27*)

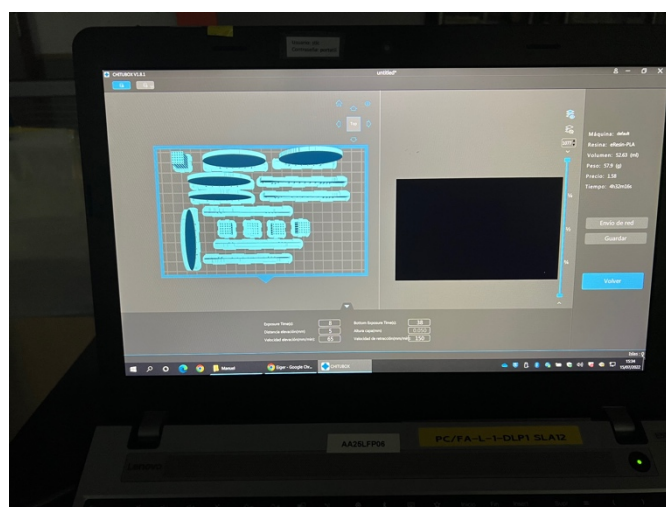


Figura 27. Interfaz del slicer chitubox utilizado

Fuente: Elaboración propia

Además, es en este momento donde se puede especificar la orientación de la pieza que se va a imprimir, parámetro muy importante a tener en cuenta conocido como, **anisotropía**. La orientación de la pieza indicara como se van a disponer las capas que la forman en el momento de la impresión, provocando que la pieza tenga unas propiedades mecánicas u otras según la orientación, esto se produce fundamentalmente en la tecnología FDM (*Figura 28*). En el caso de la tecnología LCD, se obtienen piezas muy **isotrópicas**, es decir no se aprecia una gran diferencia en la variación de la curva tensión-deformación según la orientación de las capas.

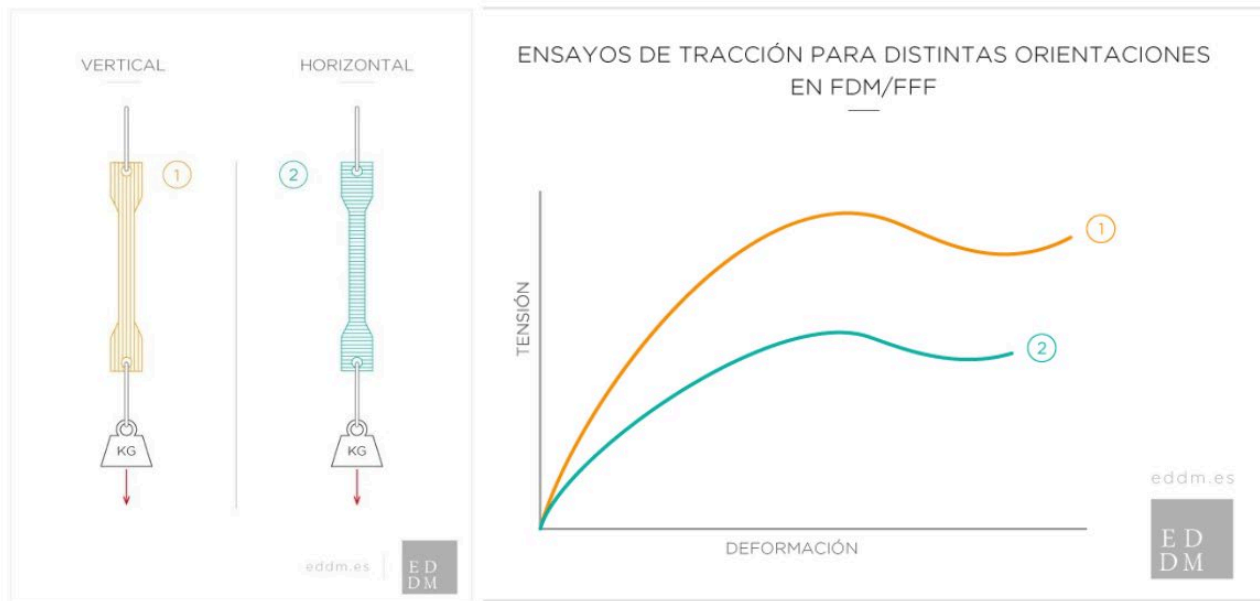


Figura 28. Variación de la curva Tensión vs. Deformación según la orientación de las capas

Fuente: <https://eddm.es/>

2.1.5.4. Impresión

Una vez se ha configurado el archivo digital para que pueda ser impreso y se ha elegido el tipo de tecnología de impresión 3D, la pieza puede fabricarse.

La impresión la puede realizar el usuario si dispone de una impresora o puede recurrir a servicios on-line, donde envía el archivo ya digitalizado para que una empresa obtenga la pieza y una vez terminada será enviada al usuario. Algunas de estas empresas son: materialise, imprimakers...(*Figura 29*).

¿Cómo funciona?



Figura 29. Funcionamiento de un servicio on-line de impresión 3D

Fuente: <https://www.materialise.com/>

2.1.5.5. Post-Procesado

Este paso a pesar de ser el final antes de la obtención de la pieza puede ser considerado como el más importante ya que un buen post-procesado determinara en mayor o menor medida la calidad del producto final. Este paso es tan variado como tipos de tecnología de impresión existen, a continuación, se destacan los tipos de post-procesado utilizados en la impresión por DLP/LCD, ya que es el procedimiento usado en este TFM:

- Eliminación del material de Soporte: El material de soporte puede ser retirado fácilmente con el uso de cuchillas o alicates (*Figura 30*).



Figura 30. Alicates utilizados para eliminar el material de soporte

Fuente: *Elaboración Propia*

- Limpieza de la pieza: La pieza puede introducirse en cubas con determinados tipos de alcohol para la eliminación de la resina sobrante (*Figura 31*).



Figura 31. Unidad de limpieza

Fuente: Elaboración Propia

- Lijado de la superficie: Una vez se ha retirado el material de soporte puede llevarse a cabo un lijado de la superficie de la pieza para tener un mejor acabado (*Figura 32*).

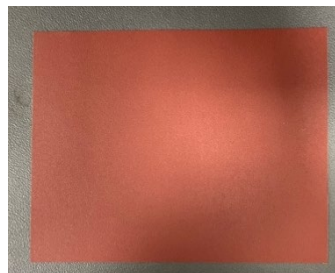


Figura 32. Lija utilizada

Fuente: Elaboración Propia

- Curado de la pieza: Una vez se ha terminado de imprimir la pieza puede ser que el curado de la pieza no se haya conseguido completamente, lo que puede provocar que la pieza no tenga las propiedades mecánicas deseadas. Por lo que se le aplica una nueva cantidad de luz UV y calor para asegurar que la pieza adquiera dichas propiedades. (*Figura 33*). En la obtención de las piezas de este TFM no se ha usado esta técnica ya que el fabricante de la resina utilizada no lo recomienda



Figura 33. Estación de curado

Fuente: *Elaboración Propia*

2.1.6. Futuro de la impresión 3D

La impresión 3D vive el momento más dulce desde sus inicios, especialmente motivado por la pandemia del COVID-19 en el que la escasez de suministros sanitarios este tipo de tecnología ayudó con la producción rápida y eficaz de algunos productos como componentes de los respiradores, máscaras de protección, isopos...etc. (Figura 34). Demostrando así la gran capacidad que tiene este tipo de tecnología demostrando su rapidez de fabricación y su capacidad de adaptación a las necesidades del mercado.



Figura 34. Válvulas de respiración obtenidas por impresión 3D

Fuente: <https://www.3dnatives.com/es/italia-impresion-3d-salvo-vida-pacientes-covid-19/>

Este nuevo interés ha provocado que cada vez más empresas se lancen al desarrollo de este tipo de tecnología acercándola aún más al consumidor. Según datos de la reconocida consultora PWC²⁸, la impresión 3D será la tecnología de referencia para la obtención de piezas de repuesto en aquellas industrias en los que la rapidez de diseño y fabricación es clave como pueden ser la aeroespacial o la industria médica.

No solo en el sector de la industria va a tener un gran desarrollo este tipo de tecnología, también en el campo de la investigación. Este tipo de tecnología ya se está usando para la obtención de nuevas formas de administración de fármacos (*Figura 35*), o para el desarrollo de órganos completamente funcionales y totalmente personalizados para cada paciente (*Figura 36*).

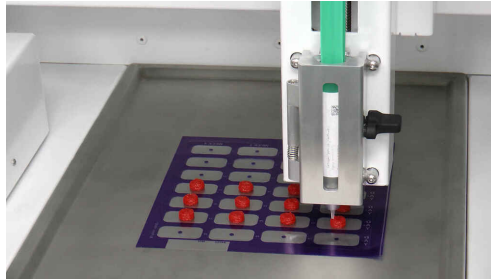


Figura 35. Impresión de capsulas para fármacos

Fuente: <https://www.elespanol.com/primer-impresora-farmacos-sello-espanol.html>

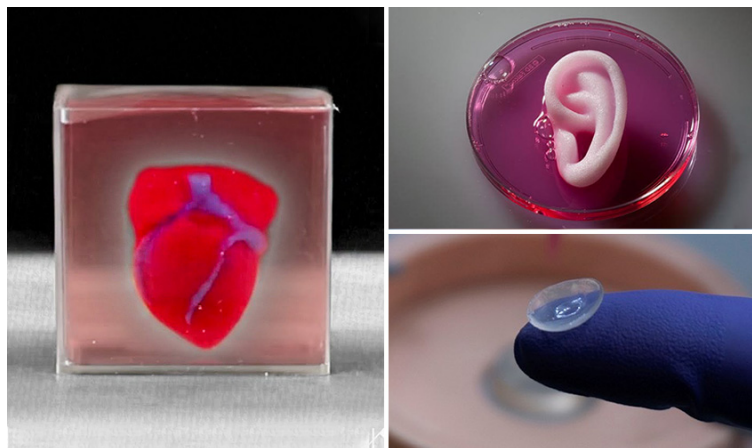


Figura 36. Proyectos de órganos y tejidos obtenidos por impresión 3D

Fuente: <https://www.3dnatives.com/es/proyectos-bioimpresion-organos>.

Todos estos avances necesitan aún de ser perfeccionados para poder ser aplicados de forma segura a los pacientes por lo que es necesario una mayor investigación.

2.1.7. Conclusiones de la Impresión 3D

A lo largo de esta primera parte se ha llevado a cabo un pequeño resumen de los que es la tecnología de impresión 3D y hacia donde se dirige. De toda la información desarrollada se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La tecnología de impresión 3D ha sufrido un gran avance en los últimos años motivado especialmente por la COVID-19 que ha provocado un mayor interés de la industria y la investigación y también del público general.
- La tecnología de impresión 3D supone un ahorro para la industria, no solo en la disminución de residuos sino también en el ahorro de costes provocados en su mayoría por tiempos de espera muy altos en la fabricación tradicional y que la impresión 3D soluciona.
- Esta tecnología tiene el inconveniente de que no tiene un software único para poder controlar los distintos tipos de impresoras, lo que supone que el usuario/empresa tenga que conocer una gran cantidad de programas.
- El Post-Procesado de la pieza es fundamental si se quiere tener un producto final de calidad.
- Esta tecnología tiene un gran potencial en el ámbito de la medicina y la farmacia en el que debe de seguir desarrollándose, gracias a la capacidad de personalización que ofrece.

2.2. Ingeniería de Tejidos, Scaffolds y Grafeno

En esta segunda parte, se comentará el ámbito al que va a estar orientado este TFM, que es el de la ingeniería de tejidos, destacando el uso de grafeno como material novedoso para la construcción de andamios o scaffolds comentando sus propiedades y sus distintos tipos.

2.2.1. Introducción

La ingeniería de tejidos (IT), hace referencia a la práctica de combinar andamios (scaffolds), células y moléculas para la creación de tejidos funcionales⁴. El objetivo es la obtención de tejidos que restauren las propiedades de tejidos dañados e incluso la obtención de órganos completos (*Figura 37*).

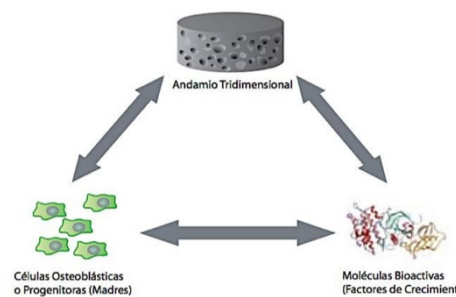


Figura 37. Pilares fundamentales de la Ingeniería de Tejidos

Fuente: <https://repositorio.unican.es/>

La IT es un área muy interdisciplinar ya que en ella además de médicos se encuentran también químicos, farmacéuticos, biólogos e ingenieros, todos ellos con el objetivo del diseño de **biomateriales** que soporten las células encargadas de la regeneración tisular². Es un campo que está teniendo un gran interés (*Figura 38*) y avance en los últimos años debido a la necesidad de buscar nuevas soluciones a tratamientos médicos relacionados con el daño o la pérdida de tejidos como el cáncer o enfermedades degenerativas².

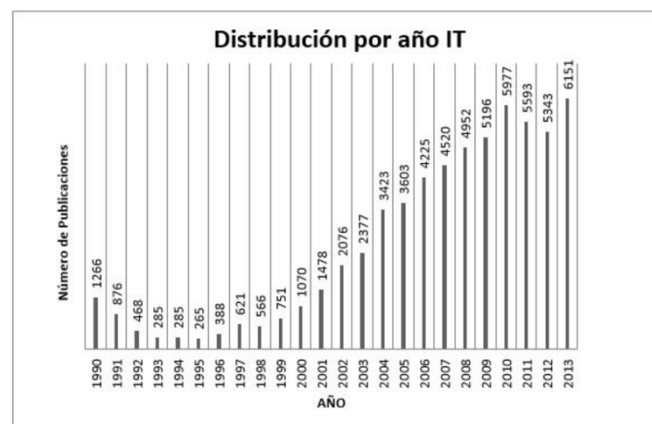


Figura 38. N° de Artículos por año relacionados con la IT

Fuente: <https://www.scopus.com/home.uri>

2.2.2. Historia

El objetivo de poder regenerar partes del cuerpo dañados, o incluso totalmente nuevos, no es algo nuevo en el campo de la medicina, hay una gran cantidad de ejemplos en el arte (*Figura 39*), o en la literatura (*Figura 40*) que dan constancia que el ser humano tiene esta misión desde hace mucho tiempo²⁹.



Figura 39. Cuadro 'La curación de Justiniano'

Fuente: <https://www.artehistoria.com/es/obra/curación>



Figura 40. Portada original de 'Frankenstein' de Mary Shelley

Fuente: <http://ilustrandoenlaescueladearte/frankenstein.html>

Además de estas representaciones en el arte y la literatura se han encontrado implantes dentales realizados en la época romana a soldados, con el objetivo de producir un alineamiento de los dientes (*Figura 41*)²³.



Figura 41. Implantes dentales encontrados en un cráneo humano

Fuente: <https://www.implantesdentales.site/>

Posteriormente la ingeniería de tejidos continuó su desarrollo con la aparición de los injertos de piel realizados en animales por el cirujano Johann Friedrich Dieffenbach²⁹.

Los injertos de piel se convirtieron en la primera forma conocida de la IT realizada en humanos inicialmente realizados como autotransplante y más recientemente como **aloinjertos** y **xenoinjertos** utilizados principalmente en la curación de quemaduras².

Estos avances motivaron aún más la investigación en este campo, de especial importancia es el estudio realizado por el médico alemán Rudolf Virchow quien en su obra *Cellular Pathology*, confirmaba que la restauración de los tejidos dependía de la proliferación celular, este trabajo desarrollo numerosos estudios de cómo realizar el cultivo de células fuera del cuerpo, lo que se conoce como *in vitro*².

El gran avance en este tipo de técnica basado en el cultivo celular se alcanzó con R.G.Harrison, biólogo estadounidense que demostró el crecimiento de dichas células fuera del cuerpo humano, convirtiendo esta técnica en la base principal de la IT, ya que el cultivo de células llevo al trasplante de dichas células al cuerpo humano, mediante lo que se conoce como andamios o scaffolds y finalmente a lo que se conoce hoy en día como ingeniería de tejidos².

El término de la IT, como lo conocemos actualmente no se introdujo hasta 1987, definiéndola como ‘como la aplicación de principios y métodos de ingeniería y ciencias biológicas para entender la función, estructura y relaciones en un tejido normal y patológico y desarrollar sustitutos biológicos para restaurar, mantener o mejorar la función’²⁹.

La IT fue dada a conocer al público general a partir de las emisiones de la **BBC** que demostraban las grandes posibilidades que ofrecía este nuevo tipo de investigaciones para mejorar las condiciones de vida de las personas, mostrando por ejemplo a la rata Vacanti, a la cual a partir de IT se le hizo crecer una oreja humana (*Figura 42*).



Figura 42. Rata Vacanti

Fuente: <https://www.lainformacion.com/>

Desde entonces la IT ha tenido un gran desarrollo, considerada como una de las tecnologías biomédicas más prometedoras², desarrollándose numerosas técnicas para conseguir la regeneración exitosa total o parcial de distintos órganos o tejidos en los pacientes. Un ejemplo de éxito es la regeneración de hueso y cartílago, creando productos para su uso clínico aprobados por la EMEA (Agencia Médica Europea)³⁰.

Por tanto, la IT se encuentra en un periodo dulce de gran expansión y desarrollo incorporando nuevas técnicas como pueden ser la impresión 3D, que desde luego va a suponer un cambio a mejor en las condiciones de vida de los futuros pacientes.

2.2.3. Aspectos fundamentales de la Ingeniería de Tejidos

Como se ha visto, la IT abarca numerosos campos médicos entre los que se encuentra la regeneración ósea, campo de investigación en el que se sitúa este TFM, aun así, hay conceptos clave que se deben de conocer y que se desarrollan en todo tipo de injertos.

Las células son el componente fundamental de los tejidos y los tejidos son el componente fundamental de los órganos y por tanto del cuerpo humano, por lo que como se ha visto en el apartado anterior y a partir de esta sencilla explicación el objetivo de la IT es la proliferación celular para la generación de tejidos.

Para que estas células se puedan agrupar y formar un tejido necesitan de un soporte conocido como matriz extra celular (MEC)²⁹ (Figura 43).

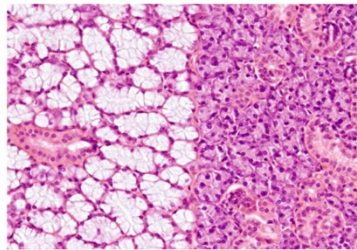


Figura 43. Matriz Extracelular tomada a partir de un microscopio.

Fuente: <http://azolla.fc.ul.pt/atlas-celula-02-matriz-extracelular.pdf>

Las funciones de la MEC se pueden resumir en cinco²⁹:

- Soporte estructural para que las células puedan unirse y formar los tejidos
- Proporciona al tejido sus propiedades mecánicas
- Proporciona las señales para que las células regulen sus actividades
- Proporciona un entorno degradable para la cicatrización de heridas.

Por tanto, intuitivamente la mejor forma de permitir la proliferación celular sería la replicación de la MEC, desarrollando lo que se conoce como andamiaje o scaffold, sin embargo, la gran complejidad de la MEC y su naturaleza dinámica hace muy difícil realizar esta replicación.

2.2.3.1. Características básicas de los andamios

A pesar de las dificultades para replicar la MEC se han desarrollado distintas técnicas que actualmente permiten replicar de buen grado sus principales características, de todas estas técnicas para la obtención de un andamio se han obtenido las siguientes conclusiones, que indican cuales son los aspectos fundamentales que deben de tener las scaffolds²⁹ (Figura 44).

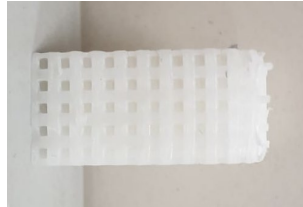


Figura 44. Ejemplo de Scaffold

Fuente: Propia

- **Arquitectura:** Los andamios deben de proporcionar un espacio que permita la proliferación celular, desarrollando la formación de nuevo tejido. Los materiales utilizados deben de ser lo suficientemente porosos para permitir el transporte de nutrientes sin comprometer la estabilidad mecánica del andamio. Además de ser porosos, los materiales deben de ser degradables, con la misma velocidad a la que se desarrolla el nuevo tejido.
- **Biocompatibilidad:** Los andamios deben de proporcionar soporte para que las células se adhieran tanto durante el cultivo *in vitro* como en la implantación *in vivo*. Para ello los materiales utilizados deben de ser compatibles con los componentes celulares de los tejidos, para evitar posibles riesgos muy perjudiciales para el paciente como pueden ser el rechazo por parte del cuerpo al implante.
- **Bioactividad:** Los andamios van a interactuar con los componentes celulares, para ello los materiales utilizados deben de incluir señales para mejorar la unión o influir en la morfología celular, también estas estructuras pueden utilizarse para ir liberando un fármaco que ayude a esta regeneración. Es decir, los andamios y sus materiales deben de ser compatibles con las biomoléculas del cuerpo humano.
- **Propiedades mecánicas:** Las características técnicas de los andamios deben de coincidir con las del tejido huésped. Estudios recientes, han destacado la importancia de las propiedades mecánicas de un andamio en las células sembradas. Al ejercer las fuerzas de tracción, muchos tipos de células, tales como células epiteliales, células musculares y neuronas, detectan la rigidez y muestran características morfológicas y adhesivas diferentes.

2.2.3.2. Implantes Óseos y Scaffolds

La capacidad de autorregeneración del hueso ha sido objeto de estudio e intriga desde los tiempos de Hipócrates y Galeno. A pesar de ello, las patologías congénitas y adquiridas, como los traumatismos, las infecciones, las **neoplasias** y las **artroplastias** fallidas, siguen siendo capaces de dejar a los pacientes con defectos óseos más allá de un tamaño crítico que el cuerpo no puede curar. Estos pacientes a menudo requieren una intervención quirúrgica invasiva para ayudar a la curación. Esto puede implicar el uso clínico de injertos óseos, materiales sustitutivos del hueso, factores de crecimiento, injertos vascularizados de peroné libre y la inserción de piezas metálicas para ayudar a la estabilidad y la regeneración ósea. En consecuencia, el hueso es el segundo tejido más trasplantado en todo el mundo, con al menos cuatro millones de operaciones en las que se utilizan injertos óseos y materiales sustitutivos del hueso cada año³¹.

Actualmente los tipos de trasplantes óseos (injertos) que se realizan se pueden clasificar en³² (*Figura 45*):

- **Injerto autólogo**: Este tipo de injertos se basan en utilizar una pequeña parte de un hueso de nuestro propio cuerpo, normalmente se suelen obtener de la zona de la tibia o la **cresta iliaca**, dependiendo del tipo de hueso y de la cantidad que se necesita. Este tipo de injertos tienen la ventaja de ser **osteogénicos, osteoinductores y osteoconductores**.

Es el mejor tipo de injerto, debido a la gran compatibilidad. El inconveniente que presentan es que se necesita de una intervención quirúrgica con la consiguiente recuperación que precisa el paciente.

- **Aloinjertos**: Este tipo de injertos proceden de partes de huesos de individuos ya fallecidos, por lo que no hay una igualdad genética. Presenta unas propiedades osteoconductoras y en menor grado osteoinductoras. Tiene las ventajas de poder obtener la cantidad y el tamaño que deseemos, ya que lo distribuyen los bancos de sangre y tejidos. No se precisa de intervención quirúrgica, evitando así **morbilidad** al paciente. El inconveniente que presentan es que pueden provocar rechazos.
- **Xenoinjertos**: Este tipo de injertos se caracterizan por hacer uso de partes de huesos procedentes de otras especies, por lo que la compatibilidad genética es mínima, pero contienen una cantidad de minerales similares a los del cuerpo humano, por lo que para la realización de pequeños injertos su uso puede ser viable, el inconveniente más claro que presentan este tipo de injertos es el rechazo del cuerpo por la diferencia genética entre especies.

- **Injertos sintéticos:** Son aquellos injertos que se realizan a partir de la utilización de biomateriales, como pueden ser los polímeros o materiales cerámicos o el uso de materiales metálicos. Tienen la ventaja de que, con la fabricación adecuada, se adaptan totalmente a las necesidades del paciente sin la necesidad de la realización de una intervención quirúrgica. Uno de los problemas que están generando este tipo de injertos, además de su fabricación, es el grado de toxicidad que generan los materiales utilizados en el cuerpo humano.

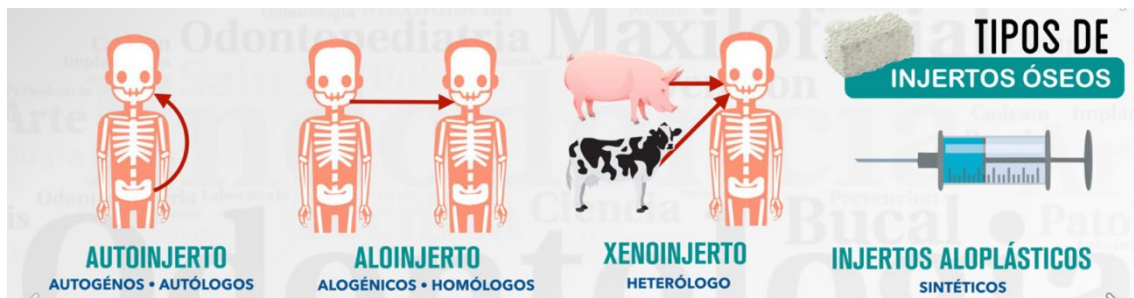


Figura 45. Representación gráfica del tipo de injertos óseos

Fuente: <https://www.facebook.com/ArteyCienciaOdontologica/posts/>

Como se puede ver, las opciones de tratamiento actuales tienen importantes limitaciones³¹:

- Los injertos óseos extraídos de una parte de un paciente para su uso en su propio cuerpo (autoinjertos) se consideran el estándar de oro, pero están limitados por el tamaño del injerto que puede extraerse y conllevan un riesgo adicional de morbilidad en la zona del donante, incluida la infección y el dolor continuo tras la cirugía.
- El tejido de aloinjerto obtenido de fuentes vivas y de cadáveres (como las cabezas de fémur extraídas para las prótesis de cadera) es relativamente más abundante que el tejido de autoinjerto. Sin embargo, los aloinjertos conllevan un riesgo potencial de transmisión de enfermedades y de respuesta inmunitaria, al tiempo que carecen de un componente celular que ayude a la regeneración del tejido.
- También se pueden insertar sustitutos metálicos y óseos para ayudar a la regeneración ósea; las limitaciones asociadas a su uso incluyen el adelgazamiento del hueso debido a la protección contra la tensión, el desgaste y el fracaso con el tiempo y el riesgo de cirugía de revisión.
- Las terapias no invasivas, incluido el tratamiento con ultrasonidos, también se han mostrado prometedoras para ayudar a la cicatrización ósea, aunque su uso suele estar restringido a fracturas estables, en pacientes adultos.

Para superar las limitaciones de las opciones de tratamiento actuales, se han llevado a cabo importantes investigaciones en el campo de la ingeniería de tejidos óseos, para crear nuevas alternativas a los injertos óseos tradicionales. Se han utilizado andamios porosos en 3D fabricados mediante diversos métodos y que incluyen una serie de biomateriales para ayudar y dirigir la regeneración ósea. Sin embargo, aún no se ha encontrado el material de andamiaje perfecto y, por lo tanto, el uso clínico de los andamios 3D está siendo limitada³¹.

Una de estas limitaciones es la necesidad de que el material utilizado para el desarrollo de la scaffold debe de ser respetuoso con la actividad celular del cuerpo humano y tener unas características mecánicas similares a las del tejido a reparar, este tipo de materiales se conocen como **biomateriales**.

2.2.3.3. Características de los Biomateriales

Se define como biomaterial a una sustancia natural o sintética cuya misión es la de reemplazar una parte o una función de nuestro organismo de forma segura o fisiológicamente aceptable³⁰.

Algunos biomateriales pueden contener fármacos por lo que se consideran medicamentos, otros pueden contener células vivas.

Dependiendo de su obtención pueden ser clasificados según³⁰:

- Su composición química: metales, polímeros, composites, cerámicos.
- Su origen: naturales o sintéticos.
- Su uso: temporal o permanente.
- Su localización: intra o extracorpórea.
- Su función: soporte, diagnóstico o tratamiento.

Las propiedades requeridas del biomaterial para su uso como prótesis para el cuerpo humano son muy limitadas. Como objetivo principal deben de provocar el mínimo rechazo por el cuerpo humano, además, se deben considerar varios factores:

- Los fluidos corporales son muy susceptibles a la erosión, por lo que el material debe poder resistir dicha erosión.
- La prótesis debe tener buenas propiedades mecánicas, ya que el cuerpo humano debe soportar fuerzas grandes y variables.

- Los materiales biológicos utilizados para reemplazar partes de las articulaciones deben tener una cierta resistencia al desgaste. Debido a este desgaste, los desechos pueden acumularse y causar dolor e inflamación, por lo que es mejor evitarlos en la medida de lo posible.
- Priorizar el uso de materiales ligeros, estables, duraderos y asequibles. Los biomateriales más utilizados en el desarrollo de prótesis y remodelación ósea son los biopolímeros y los materiales cerámicos. Los primeros son más fáciles de fabricar y bastante flexibles, pero tienen menor resistencia mecánica y se degradan con el tiempo; Si bien los compuestos cerámicos muestran una buena biocompatibilidad y una alta resistencia a la corrosión, tienen una menor flexibilidad y pueden romperse bajo una tensión de alto impacto.

Además de utilizar los biopolímeros y los materiales cerámicos como elementos estructurales de los andamios por su biocompatibilidad con el cuerpo humano, nuevos estudios han sugerido el uso de materiales basados en el carbono como puede ser el grafeno.

2.2.4. El grafeno

Desde su descubrimiento en 2007³³ el grafeno ha provocado un gran interés en la comunidad científica por sus increíbles características y su múltiples campos de aplicación.

La estructura molecular del grafeno se conoce desde hace casi un siglo, pero no existía un método práctico de fabricarlo. Los científicos rusos Andre Geim y Konstantin Novoselov consiguieron hacerlo a temperatura ambiente y con métodos sencillos, y por eso ganaron el Premio Nobel en 2010.

El grafeno, es un material formado por una lámina de carbono puro de un átomo de espesor, en donde los átomos forman panales de abejas. Es un millón de veces más fina que una hoja de papel³⁴. El grafeno es lo que se conoce como una **forma alotrópica** del carbono, otras formas alotrópicas del carbono, más conocidas son el diamante y el grafito. Está formado por anillos hexagonales de átomos de carbono y su importancia se debe a que es la unidad elemental básica en 2D para construir todos los materiales grafiticos de las demás dimensiones³⁵. (*Figura 46*).

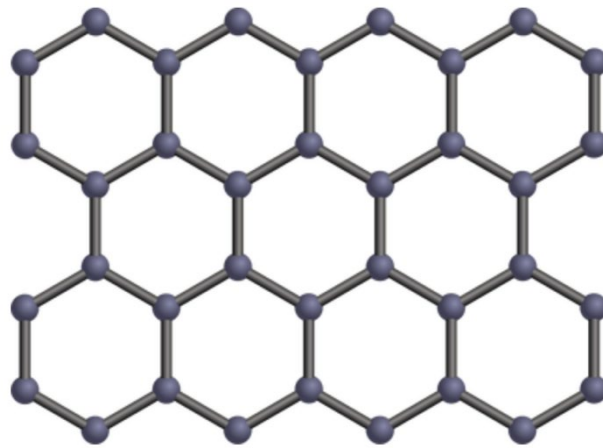


Figura 46. Estructura atómica del Grafeno

Fuente: <https://www.atriainnovation.com/grafeno-caracteristicas-aplicaciones/>

2.2.4.1. Historia

A pesar de que la historia del grafeno puede ser considerada temprana, ya que, como se ha visto, se consiguió obtener a temperatura ambiente en 2010, su obtención comienza a fraguarse a finales del siglo XIX con el estudio del carbono y sus productos derivados. A continuación, se presentan los hitos más importantes en torno al estudio del grafeno³⁶:

- 1889 – Se obtuvo la posibilidad de crear filamentos de carbono a partir de la descomposición de hidrocarburos.
- 1907 – Descubrimiento teórico del grafeno a partir del estudio de las estructuras atómicas del grafito y el diamante.
- 1975 – Se obtiene grafeno por primera vez a partir de la aplicación de un tratamiento térmico.
- 1994 – Se adopta el término grafeno para referirse al nuevo supermaterial.
- 2004 – Se aíslan las primeras muestras de grafeno.
- 2005 – Descubren el comportamiento de sus electrones
- 2010 – Se obtiene grafeno a temperatura ambiente, lo que posibilita la realización de una gran cantidad de estudios debido a la disminución de los costes para su obtención.

2.2.4.2. Características del Grafeno

El gran interés que atrae el grafeno en la comunidad científica se debe a su gran cantidad de propiedades, lo que le otorga el título de ‘supermaterial’.

Algunas de estas características son³⁵:

- Alta conductividad térmica.
- Alta conductividad eléctrica.
- Alta elasticidad.
- Alta dureza.
- Alta resistencia, es aproximadamente 200 veces más resistente que el acero, similar a la del diamante.
- Biocompatible.
- Es más flexible que la fibra de carbono, pero igual de ligero.
- Presenta un bajo **efecto de Joule**.
- Para una misma tarea el grafeno consume menos electricidad que el silicio, componente fundamental y básico en los componentes electrónicos.
- Es capaz de generar electricidad por exposición solar.
- Es transparente.
- Auto-reparación. Si una capa de grafeno pierde algunos átomos de carbono por cualquier motivo, los átomos cercanos al hueco dejado se acercan y cierran dicho hueco.

2.2.4.3. Campos de aplicación del Grafeno

Todas estas características del grafeno ya estudiadas y demostradas pueden utilizarse en ciertos campos tecnológicos como pueden ser la electrónica, en el cual se han empezado a realizar ensayos en la fabricación de procesadores, los cuales tienen el potencial de ser mucho más rápidos que los actuales³⁵. Además del sector de la electrónica, el grafeno tiene el potencial de utilizarse en otras actividades como pueden ser³⁵ (*Figura 47*):

- Destilación de etanol a temperatura ambiente para combustible y consumo humano.
- Detectores ultrasensibles de gas.
- Aplicaciones médicas, como material para prótesis.
- Transistores de grafeno.
- Circuitos integrados más rápidos y eficientes.
- Células solares.
- Desalinización.
- Aplicaciones antibacterianas.

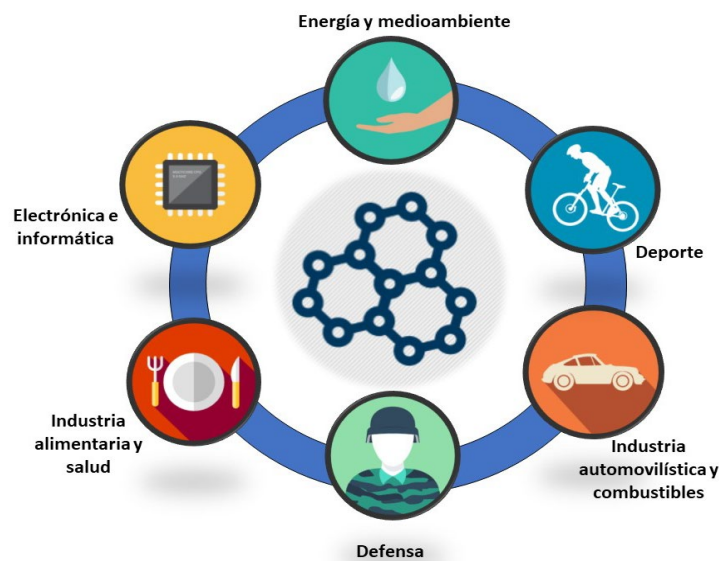


Figura 47. Posibles aplicaciones del Grafeno

Fuente: <https://www.createwebquest.com/el-grafeno-7>

2.2.4.4. Problemas actuales con el Grafeno

El principal problema que presenta el grafeno y por lo que está siendo tan difícil su implementación en la industria es su dificultad para producirse en grandes cantidades, a pesar de haber reducido su coste tras el descubrimiento en 2010 de obtener grafeno a temperatura ambiente, aún está en estudio la posibilidad de reducir aún más los costes para su uso eficiente.

Además de la dificultad de procesamiento está el erróneo pensamiento de que el grafeno es la panacea tecnológica destinado a sustituir materiales más comunes como puede ser el silicio para su uso en los circuitos electrónicos por su alta conductividad eléctrica, sin embargo, el grafeno no presenta resistencia eléctrica, es decir, no puede dejar de conducir electricidad lo que supone un gran problema³⁵.

Todas las propiedades mostradas anteriormente solo aparecen si el grafeno obtenido es de máxima calidad³⁴.

2.2.4.5. Tipos de Grafeno

Además del grafeno tal y como se conoce en la actualidad por el público general, se trabajan y se estudian otras formas de grafeno que pueden ser igual de útiles, a continuación, se nombran los más importantes y que serán usados para la fabricación de scaffolds y probetas en este TFM (*Figura 48*).

2.2.4.5.1. Oxido de Grafeno

El Óxido de Grafeno (GO) se obtiene básicamente a partir de la oxidación del grafeno, sus características pueden modificarse según el grado de oxidación aplicado³³. Sus propiedades mecánicas son muy buenas sin llegar a las del grafeno sin oxidar. Nuevos estudios han demostrado que el GO puede facilitar la proliferación celular.

2.2.4.5.2. Nano-plaquetas de Grafeno

Las Nano-plaquetas de Grafeno (GNP), tiene una estructura similar al grafeno, pero su forma de obtención es más sencilla y por lo tanto menos costosa³³. El GNP ofrece unas buenas propiedades mecánicas y también destaca por favorecer la proliferación y la diferenciación celular.

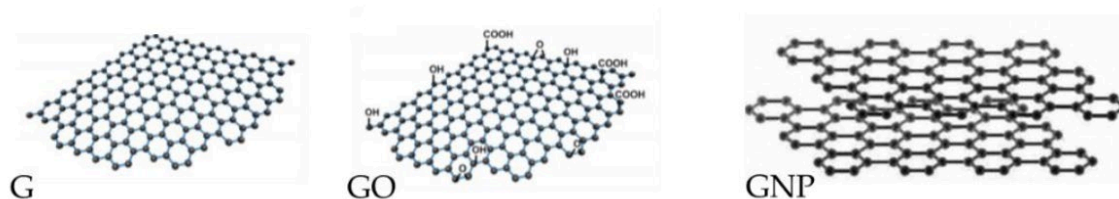


Figura 48. Estructuras atómicas de los distintos tipos de Grafeno

Fuente: Lopez de Armentia S, del Real JC, Paz E, Dunne N. Advances in Biodegradable 3D Printed Scaffolds with Carbon-Based Nanomaterials for Bone Regeneration.

Tanto el GO como las GNP usadas en este TFM tienen grupos funcionales oxigenados, los cuales favorecen la dispersión de los nanomateriales en la matriz polimérica.

2.2.5. Grafeno en la Ingeniería de Tejidos

Los nanomateriales basados en el carbono como puede ser el grafeno y sus productos derivados (GO y GNP), son unos muy buenos candidatos a ser usados como materiales para la realización de distintas actividades dentro de la IT, gracias a sus propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas y sobre todo a sus capacidades de regeneración y proliferación celular³³.

De todas las aplicaciones que abarca la IT, la más representativa donde se están usando este tipo de materiales es en la regeneración ósea.

El hueso tiene la capacidad intrínseca de curarse a sí mismo tras una lesión. Sin embargo, en condiciones clínicas complejas en las que se requiere hueso en grandes cantidades o en las que el proceso regenerativo está comprometido esta capacidad puede verse afectada. Con el aumento mundial de la incidencia de trastornos y afecciones óseas, es imperativo idear estrategias para superar las limitaciones actuales y desarrollar sustitutos de injertos óseos que puedan regenerar con éxito el hueso en todas sus capacidades. El éxito de este enfoque depende de que se proporcionen los estímulos bioquímicos y mecánicos de forma precisa para promover la osteogénesis y la **osteointegración** con el huésped.³⁷

Un injerto óseo ideal debe ser³⁷:

- I) Biocompatibles: soportar la actividad celular normal sin provocar ningún efecto tóxico local o sistémico en el tejido del huésped.
- II) Osteoconductor: permitir que las células óseas se adhieran, proliferen y crezcan en su superficie.
- III) Osteoinductor: inducir la osteogénesis mediante el reclutamiento de células progenitoras y la estimulación de su diferenciación en células óseas.
- IV) Mecánicamente competentes: igualando las propiedades del hueso huésped y soportar y transferir eficazmente las cargas.
- V) Porosos: con tamaños de poros interconectados apropiados para el crecimiento de células y tejidos.
- VI) Biodegradables: con una tasa de degradación controlada que coincida con el crecimiento del hueso nuevo.

Debido a sus características únicas, los nanomateriales basados en el carbono han surgido como una nueva oportunidad para la ingeniería regenerativa de diferentes tejidos, y en particular del hueso. La inclusión de este tipo de biomateriales, en general, conduce a mejoras en las propiedades mecánicas de las construcciones y en las características biológicas, que son necesarias para la formación y en las características

biológicas, que son necesarias para la formación y regeneración de los tejidos óseos³⁷ (Figura 49).

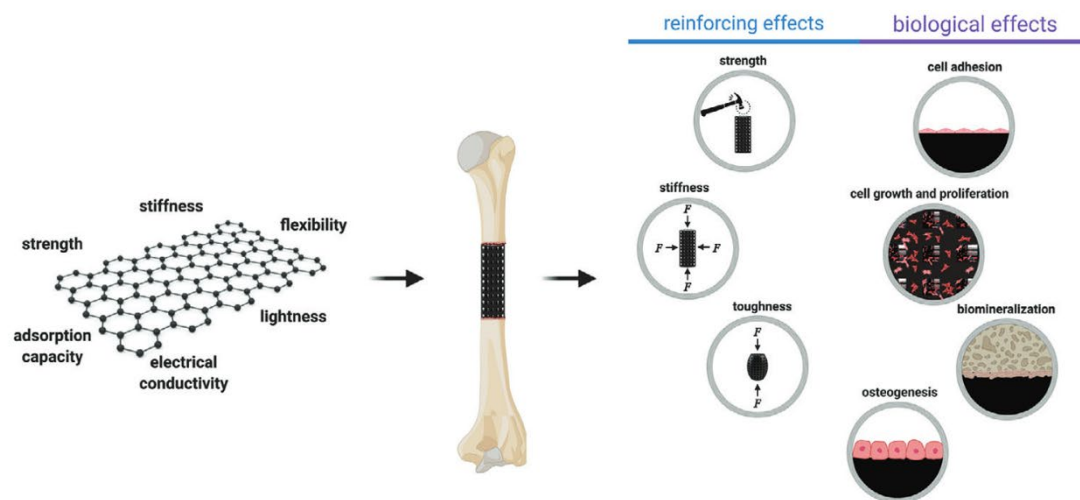


Figura 49. Distintas aplicaciones del Grafeno en la IT oseos

Fuente: Daneshmandi L, Barajaa M, Tahmasbi Rad A, Sydlik SA, Laurencin CT. Graphene-Based Biomaterials for Bone Regenerative Engineering

A su vez las características que presentan los nanomateriales basados en el carbono, que lo hacen ideales para ser utilizados en los implantes óseos son³⁷:

- Promover la adhesión y el crecimiento de las células:** La capacidad del grafeno para promover la adherencia y la proliferación de las células se demostró inicialmente en 2010. El estudio reveló que no sólo los sustratos recubiertos de grafeno no son tóxicos para las células y los **osteoblastos** humanos, sino que pueden servir como sustratos para el cultivo de células para estimular la adherencia y la proliferación de estas, un criterio importante en el desarrollo de andamios para la regeneración de tejidos. Desde entonces, muchos estudios han documentado las capacidades de los nanomateriales basados en el carbono para promover la adhesión, el crecimiento y la proliferación de varios tipos de células. La capacidad de los sustratos basados en grafeno para promover la adhesión, la morfología y el crecimiento de las células se debe en parte a su gran capacidad para adsorber proteínas. Las proteínas adsorbidas crean una capa que media la adhesión, la propagación y el crecimiento de las células³⁷.
- Efectos osteoinductores:** Un estudio pionero realizado en 2011 demostró que el recubrimiento de varios sustratos con grafeno induce la osteogénesis en las células humanas. En un medio osteogénico, el recubrimiento de grafeno aceleró notablemente la diferenciación celular. Desde entonces, se han llevado a cabo varios estudios para dilucidar los mecanismos que subyacen a los efectos osteoinductivos del grafeno.

Las vías de señalización molecular por las que el grafeno mejora la diferenciación de las células madre sólo han empezado a investigarse.

El aumento de la rigidez del sustrato observado en las matrices incorporadas con GO también puede desempeñar un papel en la promoción de la diferenciación osteogénica³⁷.

Es por estas características que el grafeno y sus productos derivados son unos muy buenos candidatos a ser usados en la Ingeniería de Tejidos, especialmente en aquellos implantes que se realicen para la regeneración ósea.

2.2.5.1. El Grafeno en Scaffolds Óseas

Algunos de estos implantes se basan en el uso de scaffolds o andamios, fabricados a partir del uso de grafeno. Los andamios como ya se ha visto, son plantillas temporales en 3D que proporcionan a las células un entorno adecuado para la formación y regeneración de tejidos.

El grafeno y sus derivados se han empleado además para mejorar el rendimiento de los andamios construidos a partir de polímeros. La incorporación del grafeno y sus productos derivados en este tipo de estructuras reduce el diámetro de las fibras y mejora la porosidad, la **hidrofilia**, la estabilidad térmica, las propiedades mecánicas y la actividad biológica de las matrices³⁷. Además, el uso de los materiales basados en grafeno se ha empleado ya en el campo de la medicina en andamios dentales.

El uso de los materiales basados en el grafeno en andamios dentales influye en la diferenciación osteogénica y odontoblástica de las células de la **pulpa dental** y de las células del **ligamento periodontal**, lo que los hace adecuados para su uso en la regeneración de tejidos dentales³⁷ (*Figura 50*).



Figura 50. Ejemplo de injerto óseo dental

Fuente: <https://rociomompo.com/blog/tecnicas-dentales-para-perdida-de-hueso-dental/>

Los andamios basados en grafeno se preparan principalmente combinando el grafeno o algunos de sus productos derivados con otros biomateriales para mejorar sus características, como puede ser productos poliméricos como el PLA.³⁷

El rendimiento óptimo de los implantes depende de la biocompatibilidad del material, de sus propiedades mecánicas y de su resistencia a la corrosión. El PLA y sus mezclas se han utilizado en implantes durante más de tres décadas. Por ejemplo, se desarrollaron implantes oculares utilizando PLA para la administración de **fluorometolona** en los que la tasa de liberación aumentaba con el incremento de PLA³⁸.

2.2.6. Conclusiones

- La Ingeniería de Tejidos se ha situado como un campo interdisciplinar con un alto potencial en la medicina regenerativa.
- La investigación en el desarrollo y aplicación de los materiales biocompatibles es fundamental para el desarrollo de la Ingeniería de Tejidos y su aplicación segura en los pacientes.
- La Ingeniería de Tejidos reduce la necesidad de utilizar donantes de órganos, así como facilitar el desarrollo de nuevos fármacos, proporcionando modelos basados en células humanas para la liberación de los mismos, los cuales eventualmente pueden eliminar la necesidad de trasplantes de órganos y mejorar en general la evolución de patología, daño o lesión³⁹.
- Actualmente la Ingeniería de Tejidos tiene el desafío de seguir desarrollándose disminuyendo los costes para facilitar la investigación y facilitar una mayor entrada de empresas en este sector.
- Los defectos óseos son cada vez más frecuentes y su reparación sigue siendo un gran reto tanto para los ingenieros de tejidos como para los cirujanos ortopédicos, a pesar de las importantes y novedosas investigaciones realizadas para su tratamiento. Los retos actuales incluyen la adaptación de la degradación y el aumento de la producción de scaffolds para tratar defectos a gran escala en un número potencialmente elevado de pacientes.
- Para maximizar la osteogénesis de los injertos óseos basados en el uso de scaffolds en el futuro, será necesario lograr una réplica aún más cercana de los estímulos mecánicos y bioquímicos naturales a los que están expuestas las células.
- Las tecnologías de impresión en 3D ofrecen un control cada vez más preciso en la construcción de scaffolds. Cuando se combinan con la creciente variedad de biomateriales disponibles, **factores de crecimiento**, y mejora en el diseño. El potencial para crear complejos andamios adaptados a las aplicaciones específicas de los pacientes en el futuro es enorme.
- Desde los estudios que demostraron los efectos osteoinductores del grafeno en 2011³⁷, varios investigadores han estudiado el uso del grafeno y sus productos derivados para desarrollar biomateriales óseos con propiedades mecánicas y biológicas mejoradas.
- Las excelentes propiedades mecánicas del grafeno (alta resistencia, rigidez y flexibilidad) y sus características fisicoquímicas favorables pueden utilizarse para reforzar físicamente los andamios e implantes y producir biomateriales mejor equipados para soportar el entorno de carga del tejido óseo.

- El uso del grafeno y sus productos derivados como biomateriales óseos mejora su rendimiento biológico. Al favorecer la adhesión, la propagación, la morfología y el crecimiento de las células, y al mejorar y acelerar la osteogénesis, se han encontrado aplicaciones en diversos andamios, implantes y compuestos³⁷.
- No se ha establecido la seguridad a largo plazo del grafeno y sus productos derivados y se sabe poco sobre su mecanismo de captación celular y su destino intracelular, por lo que se necesita realizar una mayor investigación en este campo.
- No se conocen suficientemente la biodegradabilidad y la biodistribución del grafeno y sus productos derivados, ni sus efectos adversos agudos y crónicos en el organismo, se necesita mayor investigación.

3. Objetivos

El objetivo principal de este TFM sería:

- Obtención de scaffolds para regeneración ósea por impresión 3D empleando una resina biodegradable reforzada con diferentes nanomateriales base carbono.

Como objetivos secundarios para alcanzar el objetivo principal:

- Estudio de las distintas formas de incorporar el grafeno en la resina de impresión 3D PLA.
- Estudio y comparación de las propiedades mecánicas entre las distintas probetas obtenidas con y sin grafeno.
- Estudio y optimización del diseño de Scaffolds y su impresión en 3D.
- Estudio del efecto de la degradación de la resina, con y sin grafeno, en las propiedades mecánicas y en la capacidad de absorción para distintas unidades de tiempo (0 días, 7 días, 30 días y 90 días)


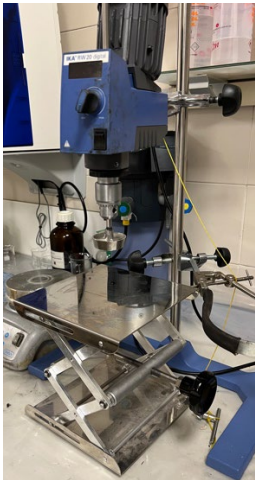

4. Procedimiento experimental





En esta sección de la memoria se profundizará en el trabajo de laboratorio realizado para la elaboración de este TFM, se detallarán las practicas realizadas, así como el tipo de equipos utilizados.





4.1. Recursos empleados





Para la elaboración de las distintas piezas obtenidas para la elaboración de este TFM, así como la obtención de los resultados, se han hecho uso de los siguientes equipos y materiales:



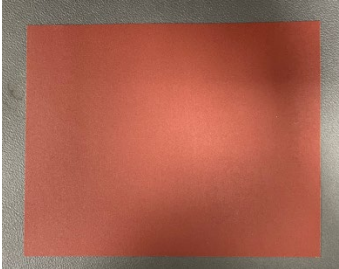

Equipos Utilizados



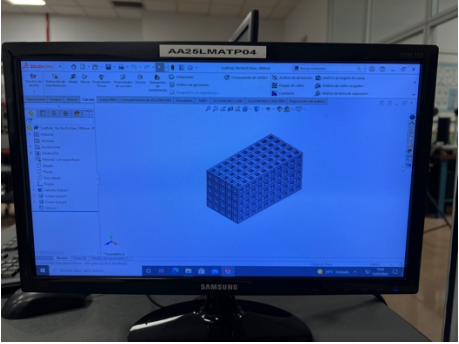

<p>Agitador magnético</p>	<p>J.P.Selecta, 230V</p>	
<p>Agitador mecánico</p>	<p>IKA RW 20 digital</p>	
<p>Alicate cortador</p>	<p>-</p>	

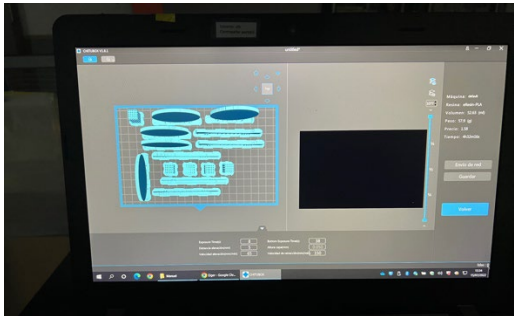

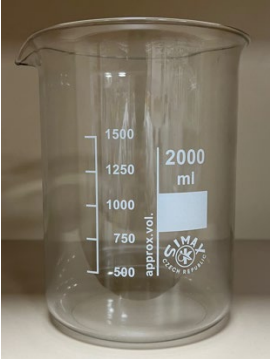

<p>Báscula</p>	<p>COBOS C-2000-SX</p>	
<p>Báscula de precisión</p>	<p>METTLER TOLEDO AG285</p>	
<p>Calibre digital</p>	<p>Tekniker</p>	
<p>Desecador</p>	<p>-</p>	

<p>Equipo de agua desionizada</p>	<p>MedicalExpo</p>	
<p>Equipo de desgasificación</p>	<p>Estufa de vacío, P.Selecta</p>	
<p>Equipo de desgasificación (1)</p>	<p>Baño de ultrasonidos, Elma</p>	
<p>Equipo de ultrasonicación</p>	<p>Digital Sonifier 450, Branson, USA</p>	





<p>Estación de limpieza de resina</p>	<p>FormWash (Formlabs)</p>	
<p>Estufa (1)</p>	<p>P. Selecta</p>	
<p>Estufa (2)</p>	<p>-</p>	
<p>Extensómetro (1)</p>	<p>-</p>	<p>-</p>
<p>Extensómetro (2)</p>	<p>Ibertest, IB-CBY1-25-5</p>	


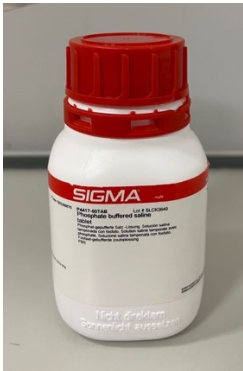

<p>Frascos de plástico</p>	<p>200 mL</p>	
<p>Impresora 3D por LCD</p>	<p>Linant 3D SL3-4K</p>	
<p>Lija</p>	<p>1913 siawat Tipo P320</p>	
<p>Máquina universal de ensayos</p>	<p>IBTH 500, Ibertest, España</p>	

<p>Mordazas planas</p>	<p>IBTH/ELIB 20</p>	
<p>Platos de compresión</p>	<p>IBTH/ELIB 20</p>	
<p>Programa de CAD</p>	<p>SolidWorks 2021-2022</p>	
<p>Secador</p>	<p>PrintDry</p>	

<p>Slicer</p>	<p>Software Chitubox</p>	
<p>Utensilios varios de laboratorio</p>	<p>Vidrio de reloj y espátula</p>	
<p>Vaso de precipitados (1)</p>	<p>2000 mL</p>	
<p>Vaso de precipitados (2)</p>	<p>250 mL</p>	

Materiales Utilizados

<p style="text-align: center;">Acetona</p>	<p style="text-align: center;">-</p>	
<p style="text-align: center;">Alcohol isopropílico</p>	<p style="text-align: center;">-</p>	
<p style="text-align: center;">Grafeno (G)</p>	<p style="text-align: center;">Avanzare Nanotechnology</p>	
<p style="text-align: center;">Nano plaquetas de grafeno (GNP)</p>	<p style="text-align: center;">NanoInnova Technologies</p>	

<p>Óxido de grafeno (GO)</p>	<p>NanoInnova Technologies</p>	
<p>PBS</p>	<p>SIGMA</p>	
<p>PLA</p>	<p>eSun, eResin-PLA</p>	

4.2. Metodología

Para llevar a cabo el TFM se realizarán varios pasos:

- En un paso inicial se deberá elegir la forma en la que se va a integrar el grafeno en la resina PLA, los tres métodos que se plantean serán:
 - La integración en resina PLA solamente con sonicación durante diez minutos.
 - Integración del grafeno en resina PLA con sonicación durante diez minutos, agitación mecánica durante una hora y sonicación durante otros diez minutos.

-
- La integración en resina PLA dispersión del grafeno en etanol, adición de la resina poco a poco, duplicando cada vez el volumen de la mezcla, y luego evaporación del etanol durante una noche en vacío. Este método será realizado en otro TFM cuyos resultados serán utilizados para determinar qué método es el más correcto.
 - Para elegir el método en el que se va a integrar el grafeno en la resina PLA se imprimirán probetas de tracción con los tipos de resina obtenida y se llevarán a cabo ensayos de tracción sobre las probetas, escogiendo el método en el que mayor resistencia a la tracción y deformación unitaria se haya obtenido.
 - Una vez seleccionado el método de integración del grafeno en la resina PLA se estudiará y optimizará la obtención de las scaffolds por impresión 3D. Tras haber optimizado dicho proceso se realizarán ensayos de compresión sobre dichas scaffolds.
 - Finalmente, se llevarán a cabo diversos experimentos para determinar el grado de absorción y degradación de las Scaffolds para distintos tiempos (0 días, 7 días, 30 días y 90 días).

4.3. Descripción de los trabajos realizados

En este apartado se describirá el proceso seguido para la obtención de las distintas piezas impresas, así como el procedimiento seguido para la obtención de los distintos resultados.

4.3.1. Diseño de las piezas

El primer paso será el diseño 3D de las distintas piezas empleadas. Para ello se ha hecho uso del software CAD, SolidWorks.

Las probetas de tracción, las cuales tienen medidas (*Figura 51*) correspondientes a las probetas de tracción 1BA de la norma UNE-EN ISO 527-2⁴⁰.

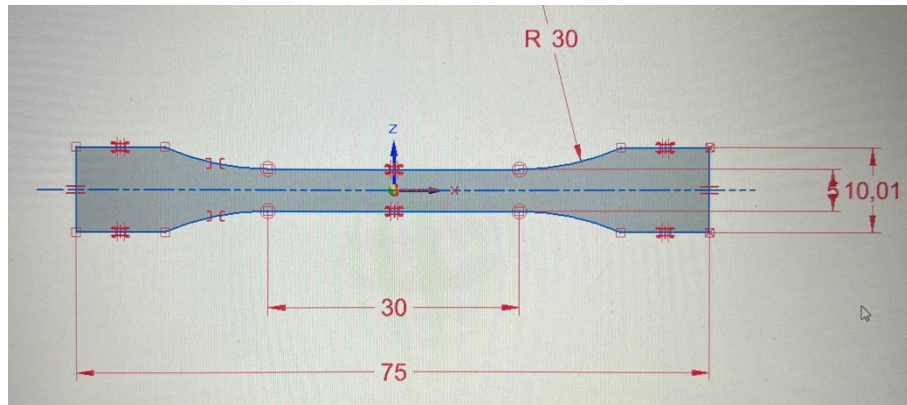


Figura 51. Medidas de la probeta a tracción 1BA

Fuente: Sara Lopez de Armentia Hernández

Los discos de absorción, a los cuales, se les hará el ensayo de pérdida de masa, se han diseñado siguiendo las siguientes medidas: 50,80 mm de diámetro y 3,20 mm de espesor, siguiendo la norma ASTM D570-98⁴¹ (*Figura 52*):

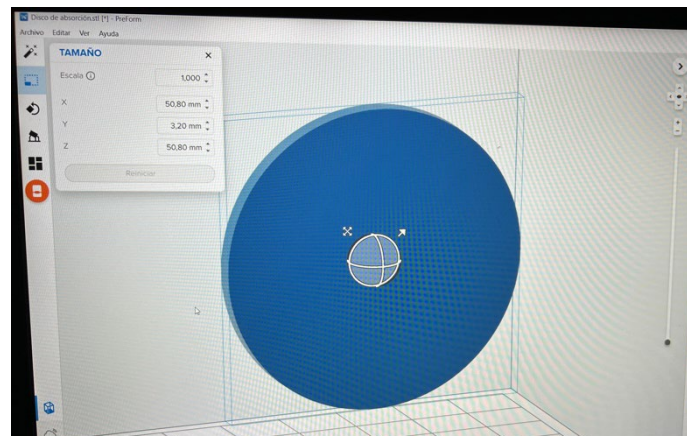


Figura 52. Diseño del disco de absorción

Fuente: Sara Lopez de Armentia Hernández

En cuanto a las scaffolds, a las cuales se les hará los ensayos de compresión, primero se diseñaron con unas dimensiones de 20x20x50 mm (ancho x largo x profundidad) con un tamaño de poro de 100 μm (Figura 53).

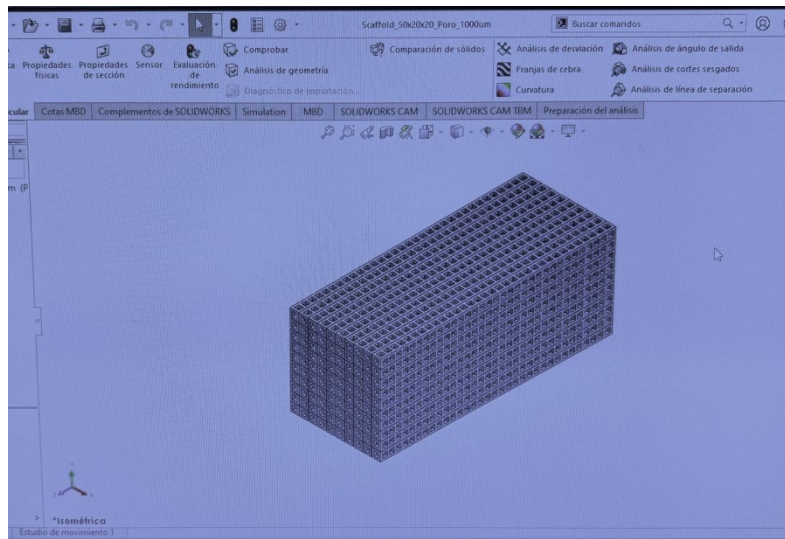


Figura 53. Prototipo de la scaffold inicial

Fuente: Saúl Dorado Nuño

Sin embargo, al realizar los primeros ensayos de compresión, se detectó que sufrían mucho pandeo, por lo que se optó por disminuir sus dimensiones, manteniendo el mismo tamaño de poro. Las nuevas dimensiones, las cuales se mantendrán hasta la finalización de los ensayos serán de 10x10x20 mm (Figura 54).

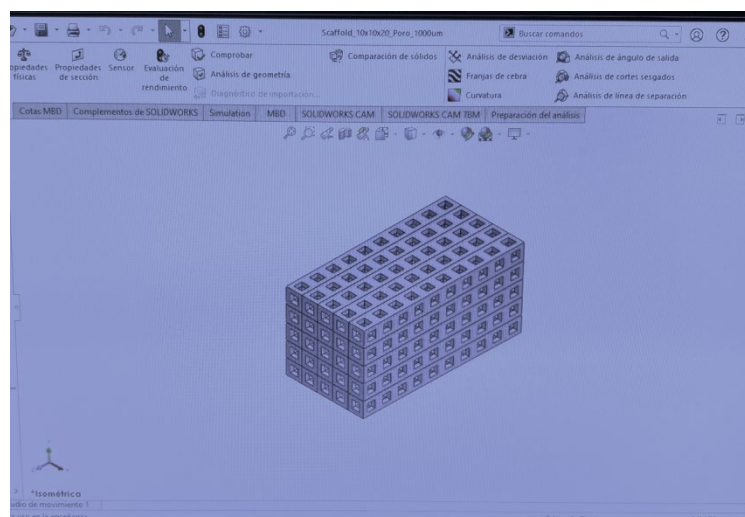


Figura 54. Scaffold final para la elaboración de los ensayos de compresión

Fuente: Elaboración Propia

Una vez diseñadas las piezas y tras haber obtenido el archivo .par de cada una de ellas se hará uso del *slicer* Chitubox. Este *slicer* además de dividir el archivo .par en capas, para que pueda ser impreso, permite modificar una serie de parámetros como la orientación de las piezas y el tiempo de exposición.

La orientación de las piezas se usará para determinar cuándo las probetas de tracción ofrecen unas mejores propiedades mecánicas, si verticales u horizontales, respecto a la plataforma de impresión (*Figura 55*). Para ello se imprimirán 5 probetas de tracción a 85° y 5 probetas de tracción a 5°.

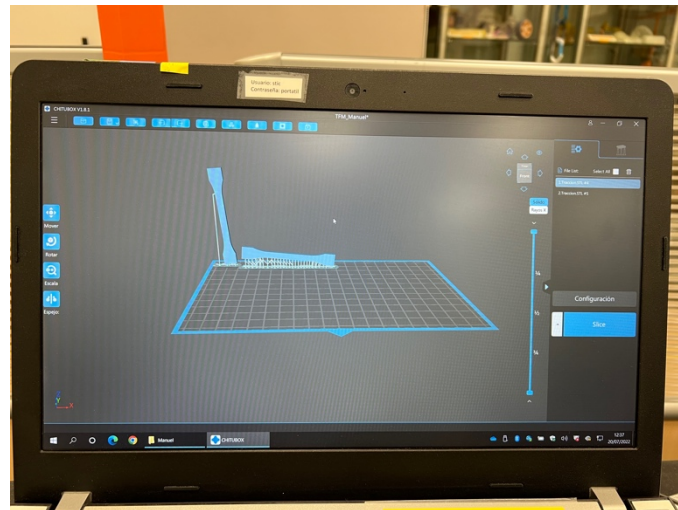


Figura 55. Orientación de las probetas a 5° y a 85°

Fuente: Elaboración Propia

Además de las probetas de tracción, se escogerá la orientación vertical para las scaffolds y para los discos de absorción, de esta forma se disminuye la cantidad de material de soporte necesario para la impresión.

El tiempo de exposición (*Figura 66*) sirve para indicar a la impresora la cantidad de tiempo que debe someter a la resina a la fuente de luz para ser curada. El tiempo de exposición elegido será de 9s. Este tiempo se ha escogido según las recomendaciones del fabricante de la resina empleada (*Anexo II*).

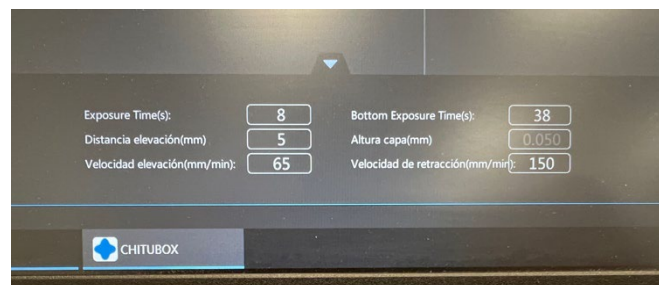


Figura 56. Parámetros del slicer Chitubox

Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, tras haber configurado la impresión se obtiene un archivo que la impresora es capaz de leer y puede realizar la impresión (.ctb). Para ello se pondrán todas las piezas en un solo conjunto, 5 discos de absorción, 5 probetas de tracción y 5 scaffolds, con las orientaciones ya elegidas y el tiempo de exposición escogido (*Figura 57*).

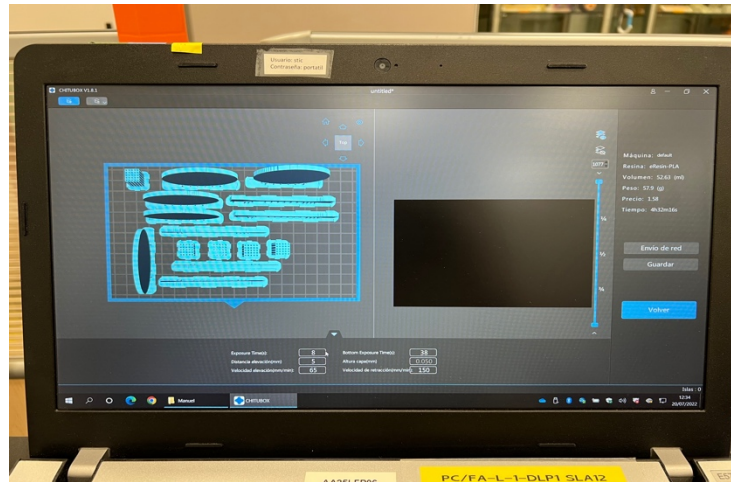


Figura 57. Distribución final de los distintos elementos a imprimir

Fuente: Elaboración Propia

4.3.2. Preparación de la mezcla

Antes de describir los distintos pasos para la obtención de la mezcla de resina PLA junto con los distintos nanomateriales base carbono, se va a definir las distintas técnicas empleadas para lograrlo:

- **Sonicación:** La sonicación es una técnica basada en la aplicación de ondas de alta frecuencia para agitar las partículas de una muestra, normalmente líquida o viscosa. Su funcionamiento es sencillo, consiste en transformar la energía eléctrica en energía mecánica con la utilización de piezoeléctricos que vibran de acuerdo con la frecuencia necesitada. En aplicaciones de nanotecnología se utiliza para llevar a cabo la dispersión de las nanopartículas por todo el volumen del fluido (*Figura 58*).



Figura 58. Equipo de sonicación utilizado

Fuente: Elaboración Propia

- Agitación mecánica: La agitación mecánica se realiza como forma de apoyo a la sonicación, asegurando conseguir una mezcla homogénea de la mezcla (*Figura 59*)



Figura 59. Equipo de agitación mecánica utilizado

Fuente: Elaboración Propia

- Desgasificación: La desgasificación permite la eliminación de gases disueltos en un líquido. Mediante un baño de ultrasonidos, cuando una onda de alta presión golpea la pared de una burbuja, esta explota, y la energía que se libera ayuda a romper los lazos entre las partículas y elimina el gas ocluido en la disolución⁴². A su vez la aplicación de vacío a la mezcla permite la eliminación total de los gases disueltos en ella (*Figura 60*)



Figura 60. Equipo de ultrasonidos (izq) y estufa de vacío (der) para llevar a cabo la desgasificación

Fuente: Elaboración Propia

4.3.2.1. Pasos realizados para la obtención de la mezcla

- Pesaje de la resina PLA: Se pesa la una cantidad de 150 mL de resina PLA (p) utilizando para ello un vaso de medición y una báscula (*Figura 61*).



Figura 61. Resina (izq) vaso de medición (centro) y balanza (der) utilizados

Fuente: Elaboración Propia

- Obtención de la cantidad de nanomaterial de carbono: La cantidad de nanomaterial necesario (w) será un 0,05% del peso de los 150 mL de PLA obtenidos en el paso anterior (p) (*Ecuación 1*).

$$w \text{ (mg)} = \frac{p \cdot 0,05 \cdot 1000}{100} \quad (1)$$

- Sonicación: Una vez incorporado el nanomaterial, medido en una báscula de precisión (*Figura 62*) en la resina PLA, se llevará a cabo la sonicación para conseguir la dispersión del nanomaterial en todo el volumen de la resina. Para ello se someterá durante 10 minutos a una sonicación.



Figura 62. Balanza utilizada para la medición de la cantidad de nanomaterial necesario

Fuente: Elaboración Propia

Para la realización de la sonicación se tendrán en cuenta los siguientes parámetros (*Figura 63*):

- Amplitud: permite ajustar la amplitud de la onda generada. Se escogerá una amplitud del 50%.
- Pulse-ON: permite ajustar la cantidad de tiempo en el que se estará generando la onda o pulso. Se escogerá un tiempo de 20s.
- Pulse-OFF: permite ajustar la cantidad de tiempo entre pulsos. Se escogerá un tiempo de 10s.

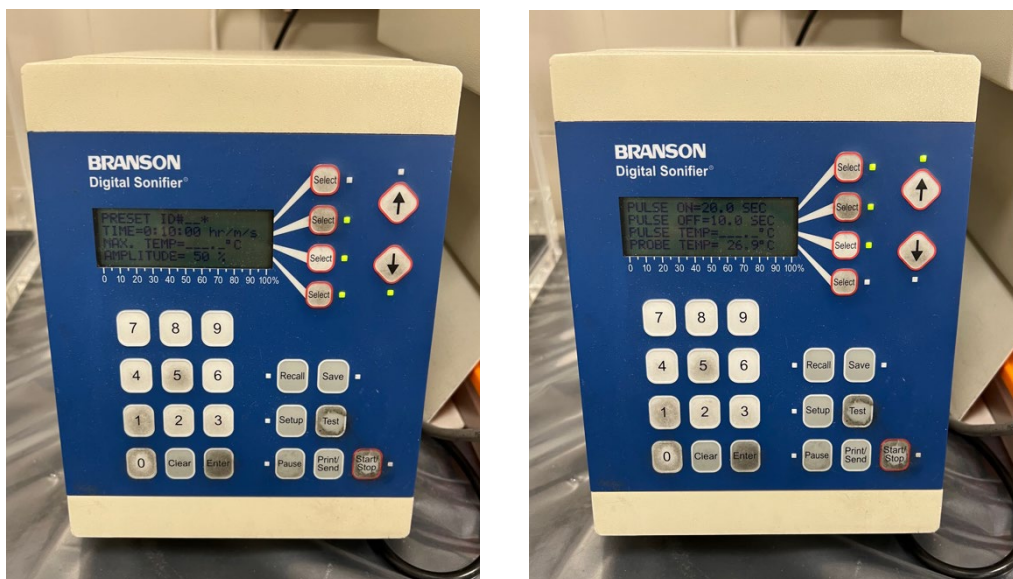


Figura 63. Elección del tiempo y la amplitud (izq), elección del tiempo pulse on/off (der) en el mando del equipo de sonicación

- Agitación mecánica: Una vez realizada la sonicación se procederá a realizar la agitación mecánica durante 1 hora a una velocidad de 1000 rpm.
- Tras finalizar la agitación mecánica se volverá a realizar una sonicación durante 10 minutos con los mismos parámetros escogidos en la anterior sonicación.
- Desgasificación: Acabada la segunda sonicación se introducirá el recipiente con la mezcla ya homogénea en el equipo de desgasificación durante 15 minutos, para ello se pulsará el botón ‘degas’ y no se aplicará ningún tipo de calor a la mezcla. Una vez terminados esos 15 minutos se introducirá el recipiente en la estufa de vacío, durante 15 minutos y sin la aplicación de calor. Finalizados esos 15 minutos la mezcla esta lista para ser impresa.

4.3.3. Impresión

Una vez obtenida la mezcla homogénea se puede llevar a cabo la impresión en la impresora LCD. El proceso de impresión suele durar entre 4 y 5 horas (*Figura 64*).

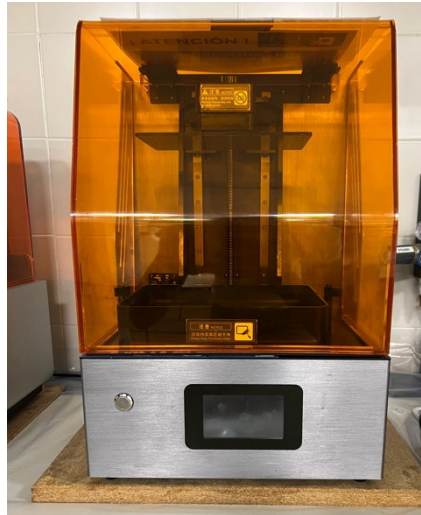


Figura 64. Impresora LCD utilizada

Fuente: Elaboración Propia

4.3.4. Post-Procesado de las piezas

Una vez se han obtenido las piezas impresas se procederá a su limpieza y retirada del material de soporte. Para la limpieza de la resina sobrante se hará uso de la estación de limpieza de Formlabs (*Figura 65*), durante 3 minutos, la cual limpia mediante agitación y uso de alcohol isopropílico las piezas impresas.



Figura 65. Unidad de limpieza utilizada

Fuente: Elaboración Propia

Una vez limpias las piezas se procederá a quitar el material de soporte con alicates y a lijar su superficie para tener un mejor acabado superficial facilitando la medición del área transversal de las probetas y scaffolds, necesaria para la realización de los ensayos de tracción y compresión. En los discos de absorción también se lija su superficie para evitar errores en las mediciones del peso (*Figura 66*).



Figura 66. Lijado de una probeta de tracción

Fuente: Elaboración Propia

4.3.5. Degradación de las piezas

Para la realización del envejecimiento de las piezas se pondrán las distintas piezas en una solución a base de agua desionizada y PBS, se meterán en unos distintos frascos de plástico y se meterán en una estufa a 37°C durante 1 semana, 1 mes y tres meses, con el objetivo de replicar las condiciones del cuerpo humano (*Figura 67*).



Figura 67. Estufa utilizada para la realización de la degradación de las piezas

Fuente: Elaboración Propia

Este paso como se puede ver se utilizan principalmente dos tipos de componentes para la realización de la disolución en la que se encontraran las diferentes piezas:

- **PBS:** también conocido como buffer de fosfatos salinos es una solución amortiguadora e isotónica, cuya función es mantener el pH y la presión osmótica lo más constante posible y parecida a la del cuerpo humano⁴³. Para la realización de pruebas in vitro es imprescindible que el pH sea controlado, especialmente en reacciones bioquímicas, ya que estas pueden variar o no ejecutarse si los reactantes están en un pH inadecuado (*Figura 68*).



Figura 68. PBS utilizado del laboratorio de química de la ETSI-ICAI

Fuente: Elaboración Propia

- **Agua desionizada:** El agua desionizada es aquella que está completamente despojada de iones sueltos, los que se eliminan mediante cargas eléctricas positivas y negativas. Luego de este proceso, el agua queda libre de elementos como el sodio, calcio, hierro, y cobre entre otros. Esta agua se utiliza en los laboratorios en procesos en los que los iones sueltos podrían interferir en los resultados requeridos⁴⁴.

Para la realización de esta disolución se seguirán las recomendaciones descritas en el frasco de PBS utilizado, esto es 1 tableta de PBS por cada 200mL.

4.3.6. Ensayos realizados

Una vez se han terminado de degradar las diferentes piezas para los distintos tiempos se realizarán los ensayos para la determinación de las propiedades físicas de las probetas de tracción, las scaffolds y los discos de absorción. Los ensayos que se van a realizar son:

- **Ensayos de tracción:** este tipo de experimentos entran dentro de los conocidos como ensayos destructivos, los cuales a partir de la rotura parcial o total del material ensayado se logran determinar diferentes propiedades físicas y mecánicas, tales como el **módulo de Young**, la **deformación unitaria** o la **resistencia máxima a rotura** (*Figura 69*).

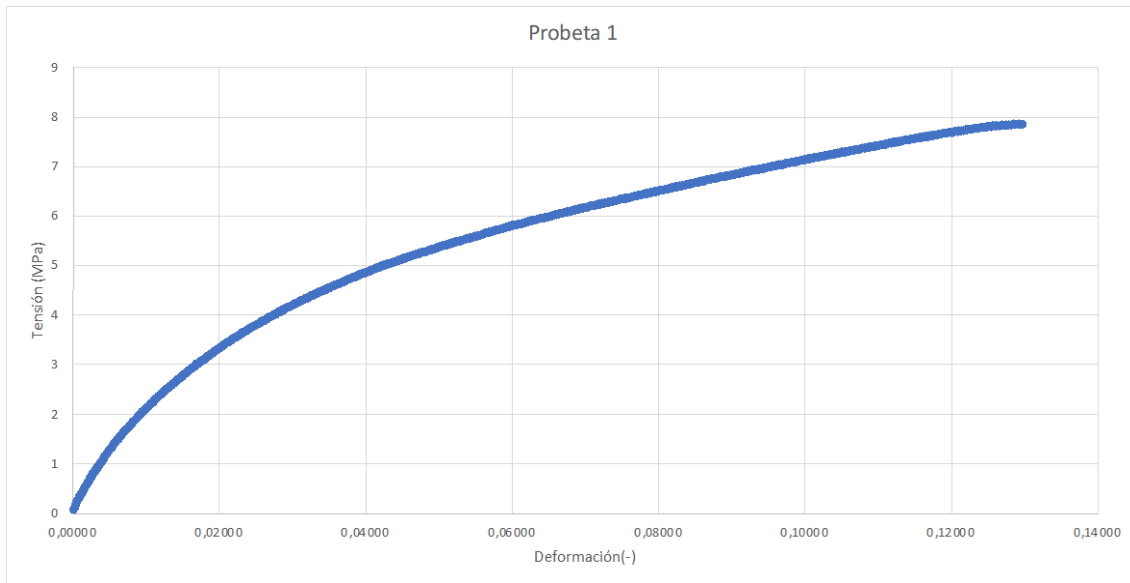


Figura 69. Gráfica tensión-deformación obtenida a partir de un ensayo de tracción

Fuente: Elaboración Propia

Este tipo de ensayos se basan principalmente en la aplicación de una fuerza axial ascendente a la pieza, a una velocidad controlada, en este caso se establecerá una velocidad de 3 mm/min (Figura 70).

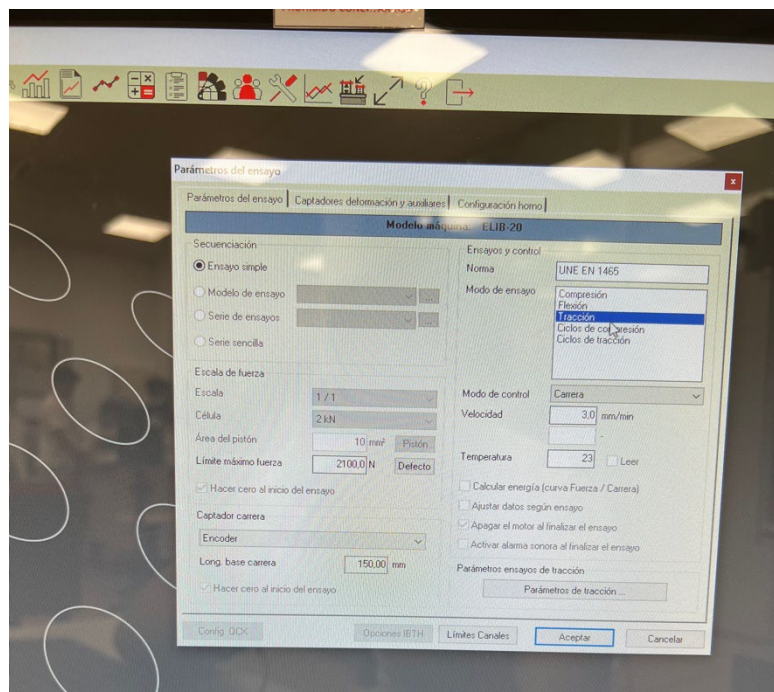


Figura 70. Parámetros escogidos para la elaboración del ensayo de tracción

Fuente: Elaboración Propia

Para la realización de estos ensayos además de las probetas de tracción se hará uso de la máquina de tracción y de un extensómetro, el cual proporcionará información acerca del alargamiento de la pieza (*Figura 71*).



Figura 71. Ensayo de tracción

Fuente: Elaboración Propia

Todos los datos necesarios para la obtención de los resultados serán obtenidos a partir del propio software de la máquina de tracción.

- Ensayos de compresión: este tipo de ensayos entran en la misma categoría que los anteriores, ensayos destructivos. Sirven al igual que los ensayos de tracción a determinar las propiedades mecánicas de un material, a partir de la aplicación de una fuerza axial negativa (*Figura 72*).

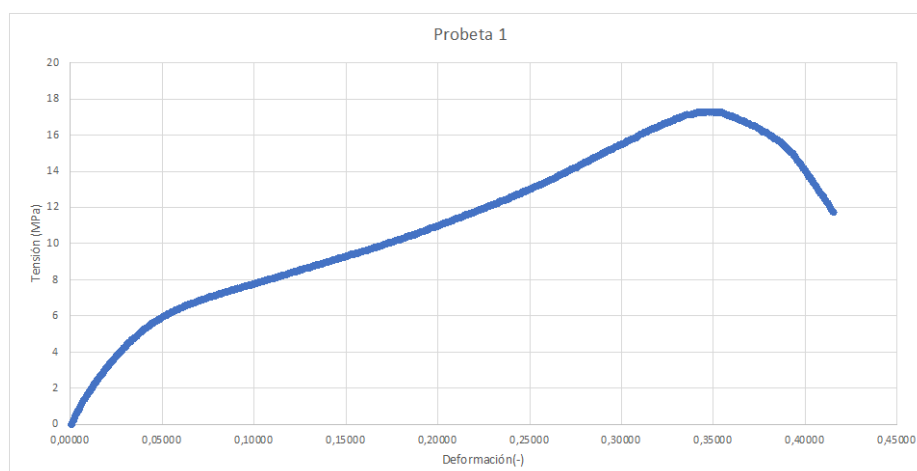


Figura 72. Gráfica tensión-deformación obtenida a partir de un ensayo de compresión

Fuente: Elaboración Propia

En este caso la velocidad de aplicación de la fuerza se fijará en 20 mm/min (*Figura 73*).

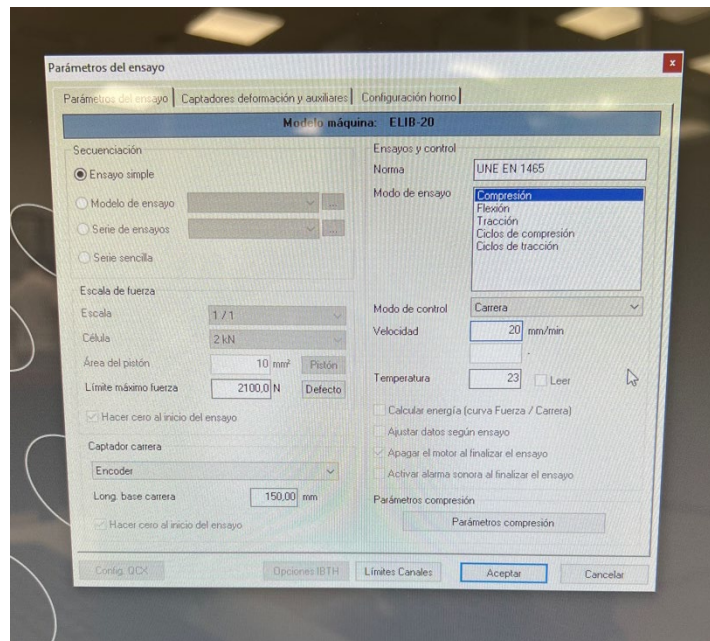


Figura 73. Parámetros escogidos para la elaboración del ensayo de compresión

Fuente: Elaboración Propia

Para la realización de estos ensayos se hará uso de la máquina universal de ensayos y de las scaffolds impresas (*Figura 74*).

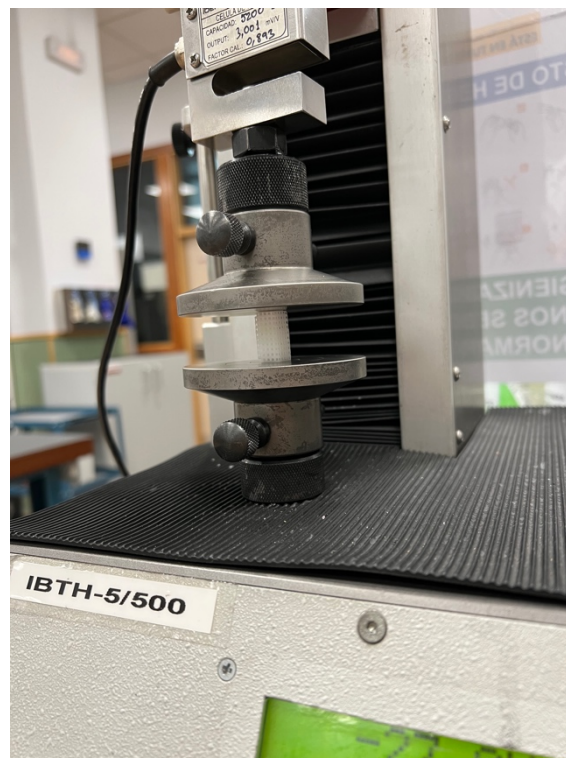


Figura 74. Ensayo de compresión

Fuente: Elaboración Propia

Para ambos ensayos y previamente a su realización se tomarán las medidas del área transversal tanto de las probetas como de las scaffolds, esta medida servirá para determinar la tensión a la que las piezas se verán sometidas. Para esta medición se hará uso de un calibre digital (*Figura 75*).

	Dimensiones Scaffolds PLA 0 días		
	Largo (mm)	Ancho (mm)	Area Transversal (mm ²)
Scaffold 1	10,23	10,22	104,551
Scaffold 2	10,21	10,12	103,325
Scaffold 3	10,25	10,31	105,678
Scaffold 4	10,18	10,11	102,920

Figura 75. Ejemplo de la toma de medidas realizadas en las scaffolds.

Fuente: Elaboración Propia

- Ensayo de absorción: Este tipo de ensayo se realizarán para determinar si la pieza se ve afectada por la adición del nanomaterial de carbono, en cuanto a si pierde masa respecto a la pieza original. Para realizar estos ensayos se pesarán todos los discos de absorción después de ser impresos, anotada esta medida se procederá a realizar el ensayo de degradación anteriormente descrito. Tras haber pasado el tiempo estipulado, el disco se introducirá en un calentador a 45°C durante un día entero (*Figura 76*).



Figura 76. Calentador utilizado

Fuente: Elaboración Propia

Una vez transcurrido ese día se introducirán los discos en un secador durante un día (*Figura 77*).

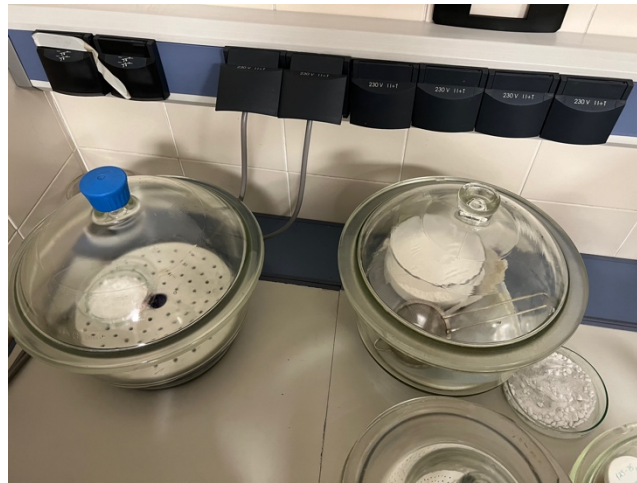


Figura 77. Secadores utilizados

Fuente: Elaboración Propia

Finalmente se pesarán y se determinará la variación de masa de cada uno de los discos (*Figura 78*).

PLA 1 Semana	Peso antes ensayo	Peso después de ensayo (g)	Variación (g)
Pastilla 1	8,5	7,8	0,7
Pastilla 2	8,5	7,8	0,7
Pastilla 3	8,5	7,6	0,9
Pastilla 4	8,5	7,8	0,7
Pastilla 5	8,6	7,8	0,8
Media	8,5	7,8	0,8

Figura 78. Ejemplo de la toma de medidas realizadas en los discos de absorción

Fuente: Elaboración Propia

Este proceso se realizará para eliminar la cantidad de líquido y humedad sobrante y obtener una medida más representativa.

5. Resultados obtenidos

En este apartado se detallarán todos los resultados obtenidos para todos los ensayos realizados sobre las probetas de tracción, las scaffolds y los discos de absorción. Se analizarán dichos resultados y sus consecuencias.

Para llevar a cabo esta representación de los resultados se ha hecho uso de los datos obtenidos a partir del software de la máquina de tracción para los ensayos sobre las probetas de tracción y las scaffolds, los cuales con el uso de Excel se ha conseguido obtener los datos sobre la tensión máxima, el alargamiento máximo y el módulo de Young.

A continuación, se muestra un ejemplo del conjunto de las piezas impresas con los diferentes materiales utilizados (*Figura 79*):



Figura 79. Conjunto de las piezas obtenidas (de izquierda a derecha): PLA, Grafeno, GO, NP-GO

Fuente: Elaboración Propia

5.1. Interpretación de los datos obtenidos

Como paso inicial se anotarán las medidas de la sección transversal de las probetas de tracción y de las scaffolds, con el objetivo de determinar el área de la sección transversal (A_T) que será necesaria para la obtención de la tensión soportada (σ), a partir de los datos de la fuerza (F) recogidos por el software de la máquina de tracción (*Figura 80*) (*Ecuación 2*).

$$\sigma = \frac{F}{A_T} \quad (2)$$

	Ensayo Probetas PLA 1 Mes		
	Anchura (mm)	Espesor (mm)	Area Transversal (mm ²)
Probeta 1	5,23	3,17	16,58
Probeta 2	5,23	3,21	16,79
Probeta 3	5,28	3,13	16,53
Probeta 4	5,29	3,14	16,61
Probeta 5	5,27	3,07	16,18

Figura 80. Ejemplo de la toma de medidas realizadas en las probetas de tracción

Fuente: Elaboración Propia

A partir de estas medidas se pueden obtener las medidas de la tensión soportada. El siguiente paso será obtener las medidas de la deformación unitaria, para ello se utilizarán los datos recogidos por el extensómetro, los cuales indican cual ha sido el alargamiento sufrido, con estos datos y a partir de la siguiente ecuación (*Ecuación 3*), siendo L el alargamiento y L_0 el alargamiento inicial del extensómetro, se obtienen las medidas de la deformación unitaria, necesarias para la construcción de la curva tensión deformación (*Figura 81*)

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (3)$$

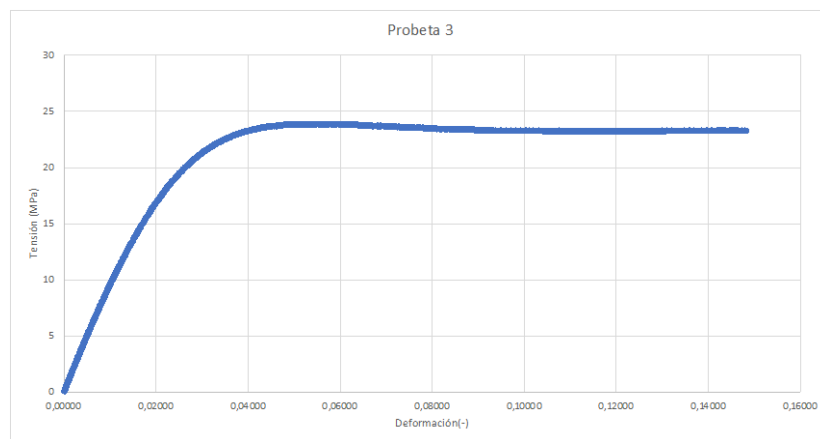


Figura 81. Ejemplo de la curva tensión-deformación obtenida

Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se puede ver una representación de cómo se han ordenado los datos en el Excel para la obtención de todas las medidas (*Figura 82*)

Fuerza(kN)	Carrera(mm)	Tensión (Mpa)	Deformación unitaria	Deformación unitaria (%)
0,002624	0,00008	0,158271559	0,0000032	0,00032

Figura 82. Ejemplo de la representación de los datos en Excel

Fuente: Elaboración Propia

A continuación, una vez obtenidas todas estas medidas se puede determinar el valor de la tensión máxima, tanto para las probetas de tracción como para las scaffolds y de la deformación unitaria máxima sufrida por las probetas de tracción (*Figura 83*).

	Tensión Máxima (Mpa)		Deformación unitaria (%)
Probeta 1	7,85	Probeta 1	12,96
Probeta 2	7,86	Probeta 2	10,97
Probeta 3	8,47	Probeta 3	11,69
Probeta 4	8,89	Probeta 4	12,99
Probeta 5	8,47	Probeta 5	16,24
Media	8,31	Media	12,97
Desviación	0,44	Desviación	2,02

Figura 83. Ejemplo de la representación de las tensiones y deformaciones máximas encontradas para los ensayos de tracción de PLA con 3 meses de degradación

Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, tras realizar todos los ensayos de todas las mezclas preparadas para un tiempo de degradación concretos se representarán en una misma gráfica las medias obtenidas de la tensión máxima (*Figura 84*).



Figura 84. Representación de las medias máximas encontradas para los ensayos de tracción con 3 meses de degradación

Fuente: Elaboración Propia

En cuanto a los resultados de los ensayos de absorción se representarán de la siguiente forma (*Figura 85*). Se pesarán los discos una vez han sido impresos y otra vez al terminar el ensayo de absorción, anteriormente descrito, se anotará la variación y se hará su media.

PLA 1 Semana	Peso antes ensayo (g)	Peso después de ensayo (g)	Variación (%)
Disco 1	8,47	7,81	7,79
Disco 2	8,50	7,76	8,71
Disco 3	8,53	7,63	10,55
Disco 4	8,47	7,77	8,26
Disco 5	8,60	7,81	9,19
Media	8,51	7,76	8,90

Figura 85. Representación de los datos para el ensayo de absorción

Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, tras realizar todos los ensayos de todas las mezclas preparadas para un tiempo de degradación concretos se representarán en una misma gráfica las medias obtenidas de la variación de la masa en los discos de absorción (Figura 86).

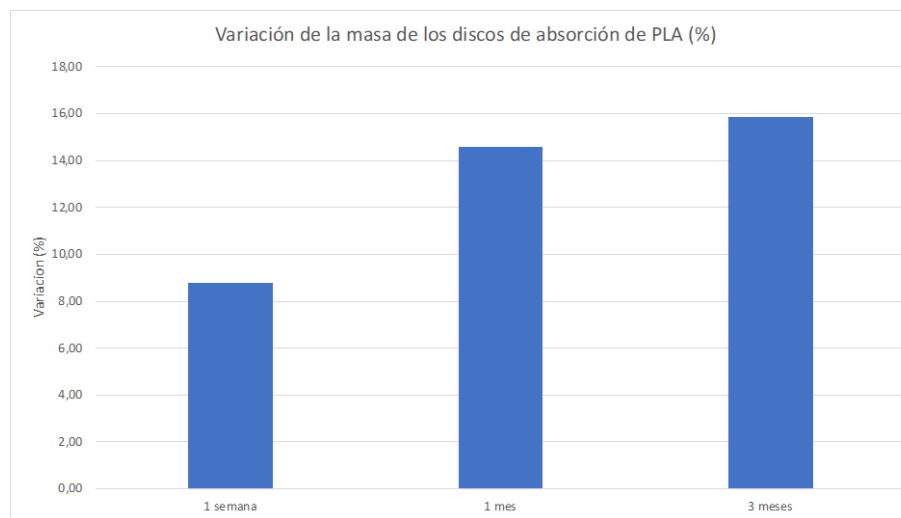


Figura 86. Representación de las medias obtenida para el ensayo de absorción con PLA

Fuente: Elaboración Propia

5.2. Resultados de los ensayos de tracción

Como paso inicial se determinó cual era el método más adecuado para preparar la mezcla y la orientación de las probetas de tracción a 5° o a 85° respecto al eje x de la bandeja de impresión, estos ensayos se dominarán como **ensayo 0**. Para ello se realizaron varias mezclas de PLA y grafeno usando dos técnicas de preparación: sonicación durante 10 minutos (**técnica 1**) y sonicación durante 10 minutos más 1 hora de agitación mecánica más 10 minutos de sonicación (**técnica 2**).

5.2.1. Resultados ensayo 0

- Probetas de tracción a 5° usando la técnica 1:

	Tensión Máxima (MPa)
Probeta 1	29,02
Probeta 2	25,09
Probeta 3	29,23
Probeta 4	27,47
Probeta 5	27,82
Media	27,73
Desviación	1,48

	Deformación unitaria (%)
Probeta 1	4,32
Probeta 2	7,89
Probeta 3	9,06
Probeta 4	12,15
Probeta 5	11,30
Media	8,94
Desviación	3,10

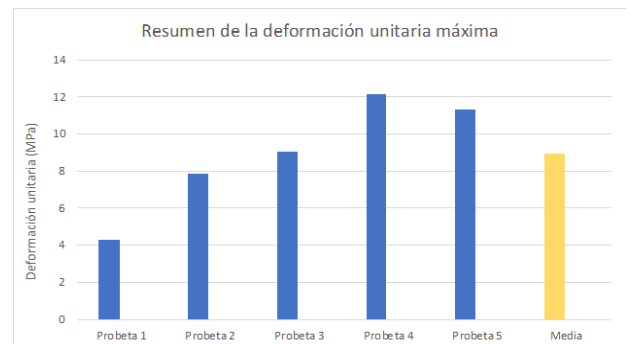
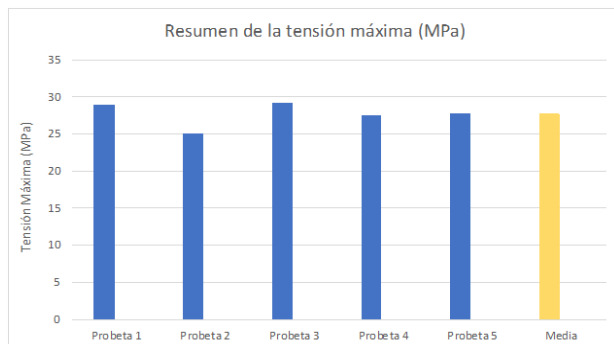


Figura 87. Resultados obtenidos de las probetas de tracción a 5° usando la técnica 1

Fuente: Elaboración propia

- Probetas de tracción a 85° usando la técnica 1:

	Tensión Máxima (Mpa)
Probeta 1	25,08
Probeta 2	24,84
Probeta 3	24,54
Probeta 4	24,47
Probeta 5	23,67
Media	24,52
Desviación	0,53

	Deformación unitaria (%)
Probeta 1	20,44
Probeta 2	17,17
Probeta 3	21,40
Probeta 4	14,65
Probeta 5	21,74
Media	19,08
Desviación	3,07

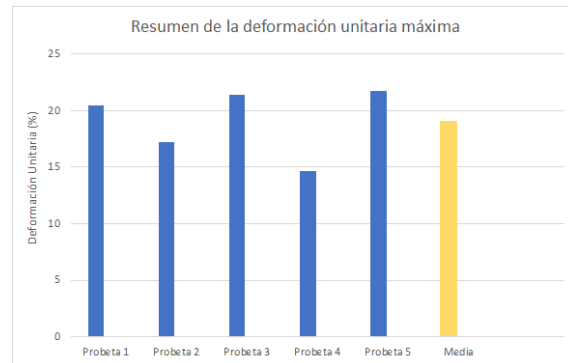
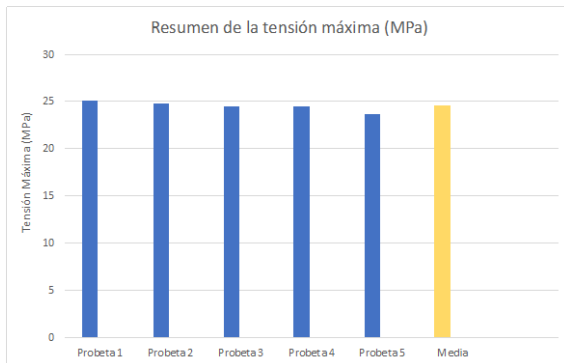


Figura 88. Resultados obtenidos de las probetas de tracción a 85° usando la técnica 1

Fuente: Elaboración propia

- Probetas de tracción a 5° usando la técnica 2:

	Tensión Máxima (MPa)
Probeta 1	30,91
Probeta 2	29,36
Probeta 3	30,21
Probeta 4	30,50
Probeta 5	26,06
Media	29,41
Desviación	1,96

	Deformación unitaria (%)
Probeta 1	11,03
Probeta 2	17,23
Probeta 3	15,22
Probeta 4	14,02
Probeta 5	15,41
Media	14,58
Desviación	2,29

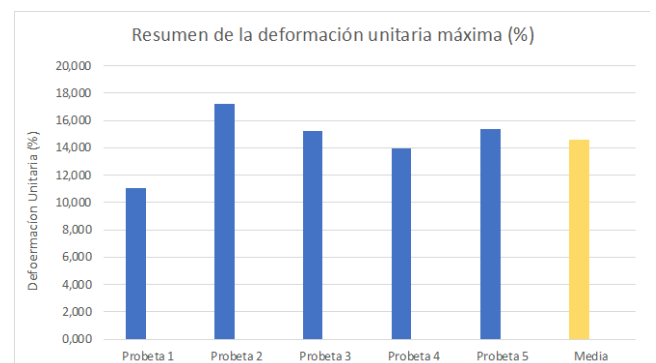
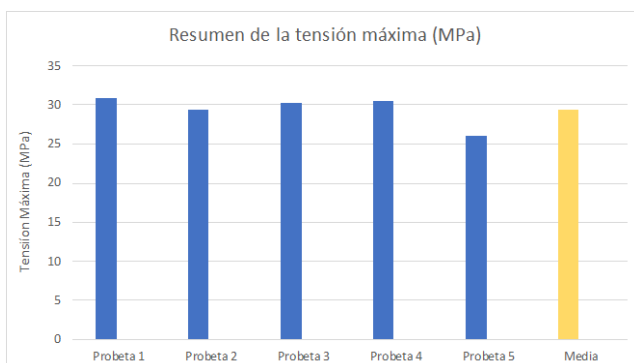


Figura 89. Resultados obtenidos de las probetas de tracción a 5° usando la técnica 2

Fuente: Elaboración propia

- Probetas de tracción a 85° usando la técnica 2:

	Tensión Máxima (Mpa)
Probeta 1	26,29
Probeta 2	25,98
Probeta 3	24,99
Probeta 4	26,37
Probeta 5	24,44
Media	25,61
Desviación	0,86

	Deformación unitaria (%)
Probeta 1	14,53
Probeta 2	18,52
Probeta 3	15,90
Probeta 4	14,02
Probeta 5	20,72
Media	16,74
Desviación	2,83

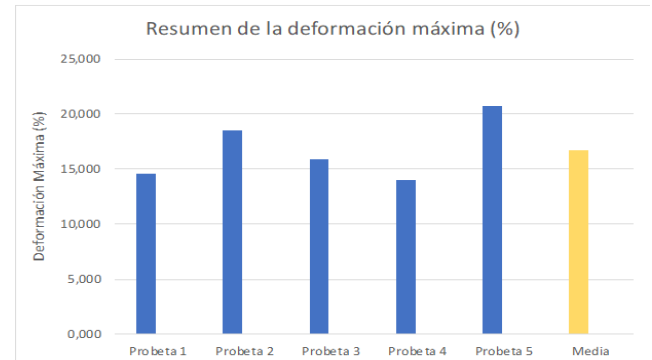
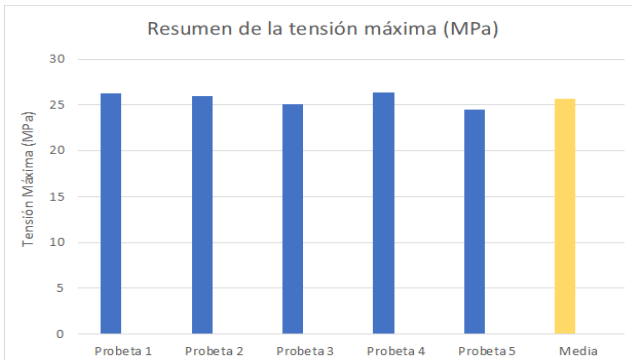


Figura 90. Resultados obtenidos de las probetas de tracción a 85° usando la técnica 2

Fuente: Elaboración propia

5.2.1.1. Análisis de los resultados ensayo 0

Tras analizar los resultados del ensayo 0 (Figura 91) se determinó que la mejor forma de preparar la mezcla sería usando la técnica 2 (sonicación durante 10 minutos, agitación mecánica durante 1 hora y sonicación durante 10 minutos), ya que se obtuvieron unos resultados de tensión y deformación unitaria mayores que los obtenidos realizando la técnica 1 (Figura 92).

	Valores Medios de Tensión (MPa)		
	Técnica 1	Técnica 2	Media
Probetas a 5º	27,73	29,41	28,57
Probetas a 85º	24,52	25,61	25,065
Media	26,125	27,51	

	Valores Medios de Deformación Unitaria (%)		
	Técnica 1	Técnica 2	Media
Probetas a 5º	8,94	14,58	11,76
Probetas a 85º	19,08	16,74	17,91
Media	14,01	15,66	

Figura 91. Resultados obtenidos del ensayo 0

Fuente: Elaboración propia

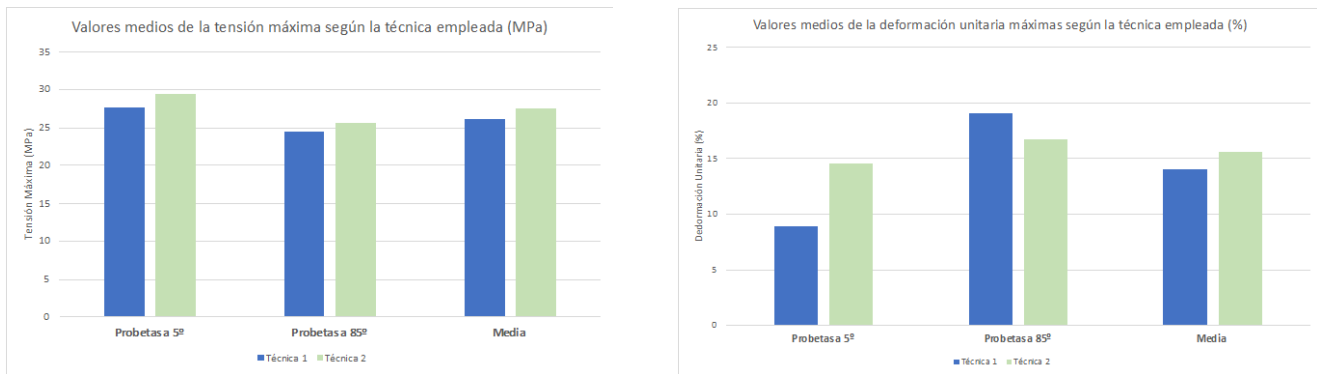


Figura 92. Representación gráfica de los resultados medios obtenidos del ensayo 0 según la técnica utilizada

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la orientación de las probetas se escogió la orientación de 5° respecto al eje x de la bandeja de impresión, ya que, de la misma forma se obtuvieron valores mayores de tensión y deformación (destacar que en el caso de la deformación unitaria máxima los valores obtenidos tienen una gran desviación respecto a la media por lo que se dio más importancia a los valores máximo de las tensiones) (Figura 93).

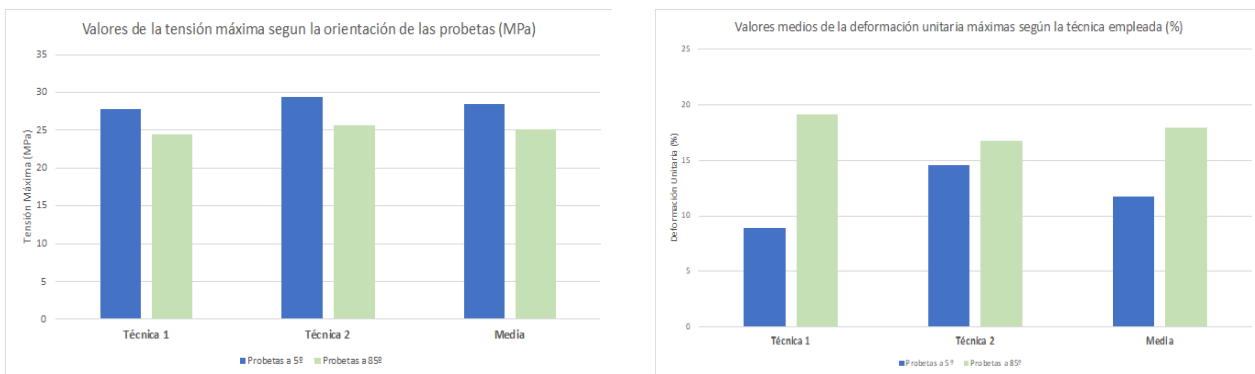


Figura 93. Representación gráfica de los resultados medios obtenidos del ensayo 0 según la orientación de las probetas

Fuente: Elaboración propia

5.2.2. Resultados de los ensayos con PLA

A continuación, se mostrarán los resultados de las probetas de tracción impresas sólo a partir de PLA:

- Resultados probetas de tracción con 0 días de degradación

	Tensión Máxima (MPa)
Probeta 1	26,94
Probeta 2	26,28
Probeta 3	24,17
Probeta 4	28,06
Probeta 5	27,19
Media	26,53
Desviación	1,46

	Deformación unitaria (%)
Probeta 1	14,54
Probeta 2	17,37
Probeta 3	20,41
Probeta 4	11,33
Probeta 5	13,62
Media	15,45
Desviación	3,52

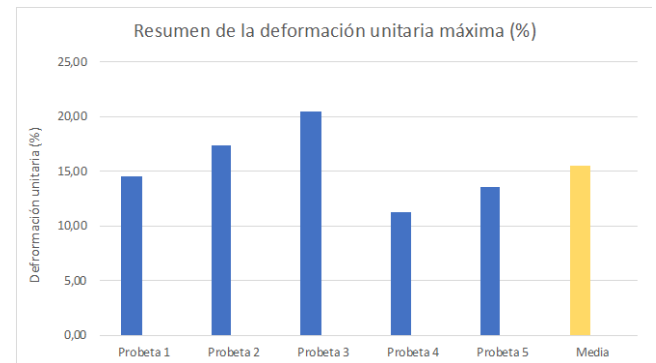
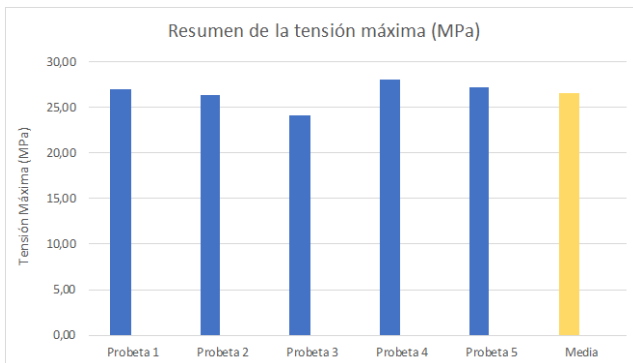


Figura 94. Resultados obtenidos de las probetas de tracción con PLA y 0 días de degradación

Fuente: Elaboración propia

Se aprecia en estos resultados cierta variación de los resultados, provocada principalmente por errores en la impresión de las probetas, sin embargo, la variación no es muy grande y los resultados son aceptados.

- Resultados de las probetas de tracción con 1 semana de degradación

	Tensión Máxima (MPa)
Probeta 1	22,793
Probeta 2	23,314
Probeta 3	24,349
Probeta 4	23,521
Media	23,494
Desviación	0,647

	Deformación unitaria (%)
Probeta 1	15,294
Probeta 2	16,213
Probeta 3	14,000
Probeta 4	14,781
Media	15,072
Desviación	0,929

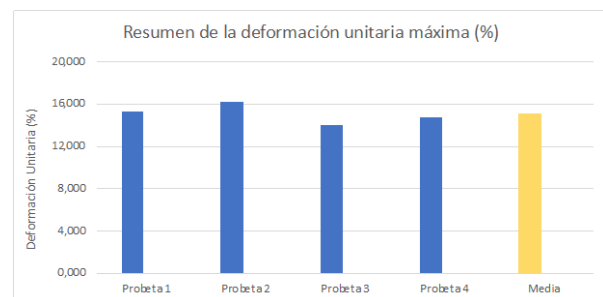
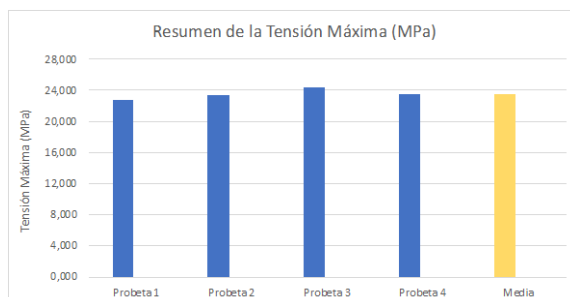


Figura 95. Resultados obtenidos de las probetas de tracción con PLA y 1 semana de degradación

Fuente: Elaboración propia

No se aprecian grandes variaciones en las medidas obtenidas, los resultados son válidos.

- Resultados de las probetas de tracción con 1 mes de degradación

	Tensión Máxima (MPa)
Probeta 1	15,90
Probeta 2	15,19
Probeta 3	15,64
Probeta 4	16,42
Probeta 5	16,43
Media	15,92
Desviación	0,53

	Deformación unitaria (%)
Probeta 1	25,71
Probeta 2	38,91
Probeta 3	32,77
Probeta 4	36,80
Probeta 5	30,94
Media	33,02
Desviación	5,17

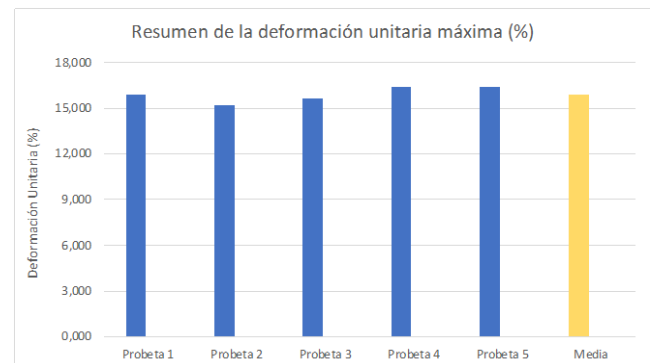
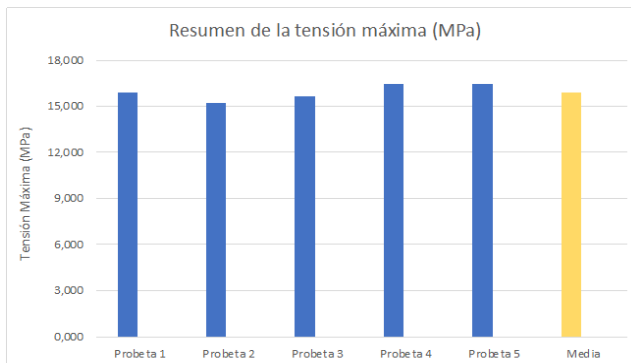


Figura 96. Resultados obtenidos de las probetas de tracción con PLA y 1 semana de degradación

Fuente: Elaboración propia

No se aprecian grandes variaciones en las medidas obtenidas, los resultados son válidos.

- Resultados de las probetas de tracción con 3 meses de degradación

	Tensión Máxima (MPa)
Probeta 1	14,14
Probeta 2	16,05
Probeta 3	14,40
Probeta 4	14,22
Probeta 5	14,39
Media	14,64
Desviación	0,79

	Deformación unitaria (%)
Probeta 1	12,96
Probeta 2	10,97
Probeta 3	11,69
Probeta 4	12,99
Probeta 5	16,24
Media	12,97
Desviación	2,02

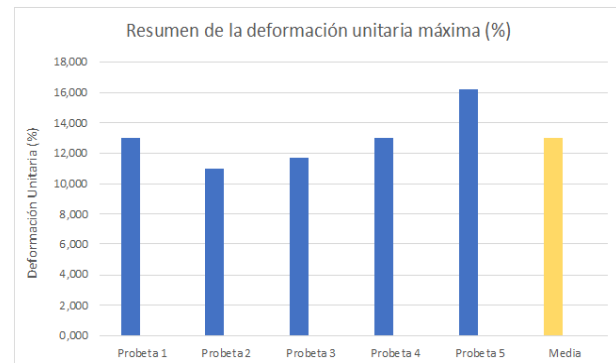
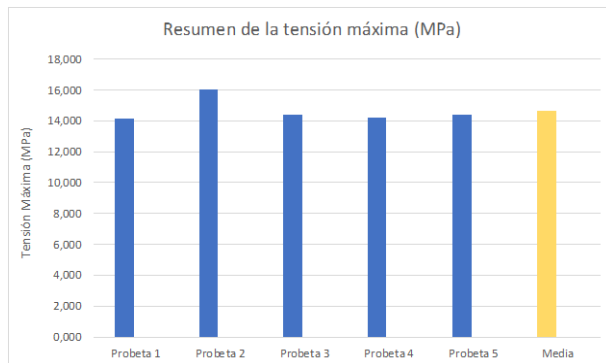


Figura 97. Resultados obtenidos de las probetas de tracción con PLA y 3 meses de degradación

Fuente: Elaboración propia

5.2.2.1. Análisis de los resultados de las probetas de tracción de PLA

En la siguiente gráfica se recoge la evolución de los valores de las medias para cada uno de los tiempos de degradación (Figura 98):

PLA	Tensión Media Máxima (MPa)
Media 0 días	26,53
Media 1 semana	23,49
Media 1 mes	15,92
Media 3 meses	14,64

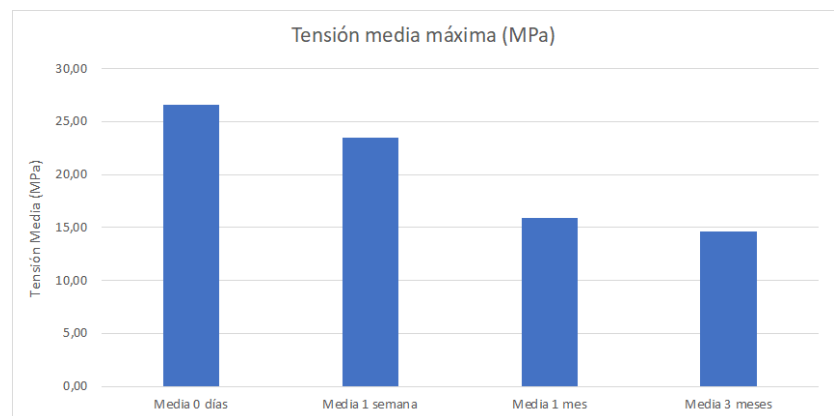


Figura 98. Evolución de las medias de las probetas de tracción con PLA

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar hay claros indicios que confirma que, a mayor tiempo de degradación de la probeta, menor será su resistencia a la tracción.

5.2.3. Resultados de los ensayos de las probetas de tracción con PLA+G

A continuación, se mostrarán los resultados de las probetas de tracción impresas a partir de PLA+G.

- Resultados de las probetas de tracción con 0 días de degradación

	Tensión Máxima (MPa)
Probeta 1	30,91
Probeta 2	29,36
Probeta 3	30,21
Probeta 4	30,50
Probeta 5	26,06
Media	29,41
Desviación	1,96

	Deformación unitaria (%)
Probeta 1	11,03
Probeta 2	17,23
Probeta 3	15,22
Probeta 4	14,02
Probeta 5	15,41
Media	14,58
Desviación	2,79

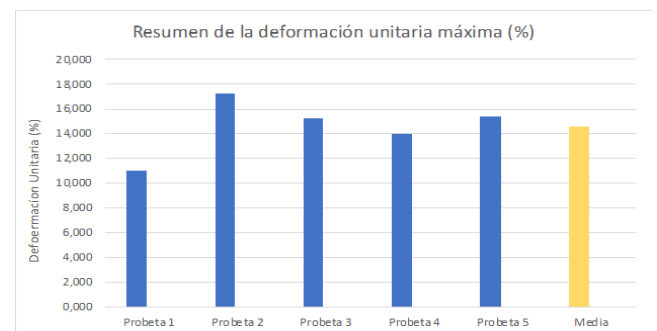
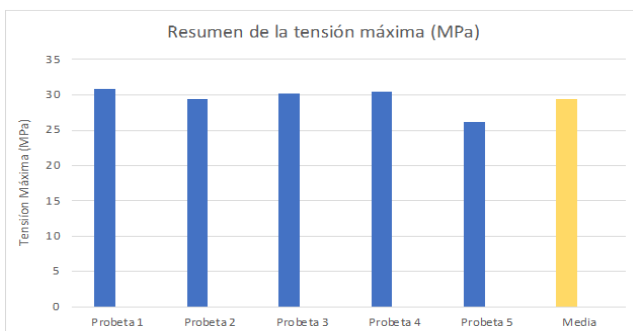


Figura 99. Resultados obtenidos de las probetas de tracción usando PLA+G para una degradación de 0 días

Fuente: Elaboración propia

Estos resultados son los mismos que los utilizados en el ensayo 0 descrito anteriormente.

- Resultados de las probetas de tracción con 1 semana de degradación

	Tensión Máxima (MPa)
Probeta 1	14,60
Probeta 2	12,52
Probeta 3	11,71
Probeta 4	13,06
Probeta 5	10,81
Media	12,54
Desviación	1,43

	Deformación unitaria (%)
Probeta 1	28,88
Probeta 2	22,59
Probeta 3	20,40
Probeta 4	33,32
Probeta 5	22,84
Media	25,61
Desviación	5,34

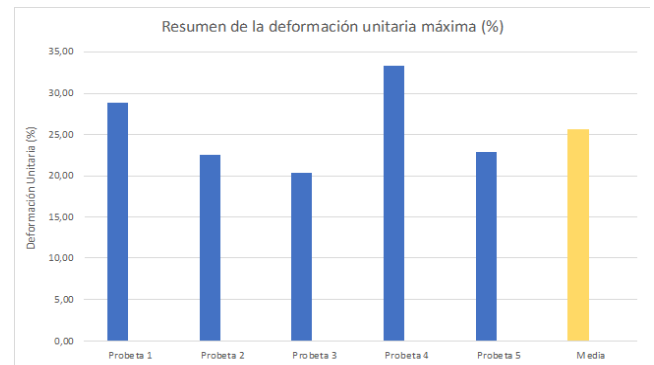
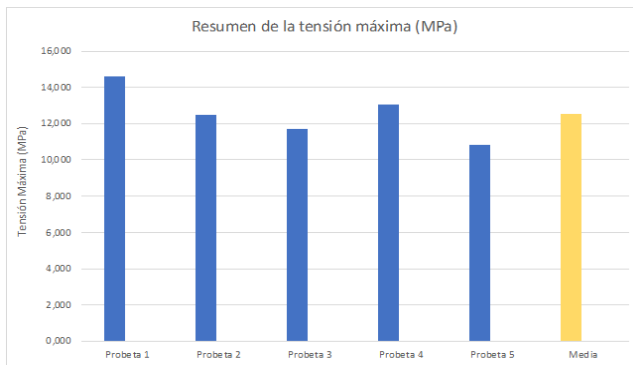


Figura 100. Resultados obtenidos de las probetas de tracción usando PLA+G para una degradación de 1 semana

Fuente: Elaboración propia

- Resultados de las probetas de tracción con 1 mes de degradación

	Tensión Máxima (MPa)
Probeta 1	10,20
Probeta 2	10,29
Probeta 3	10,50
Probeta 4	11,08
Probeta 5	9,68
Media	10,35
Desviación	0,51

	Deformación unitaria (%)
Probeta 1	3,37
Probeta 2	3,90
Probeta 3	3,91
Probeta 4	3,91
Probeta 5	3,90
Media	3,80
Desviación	0,24

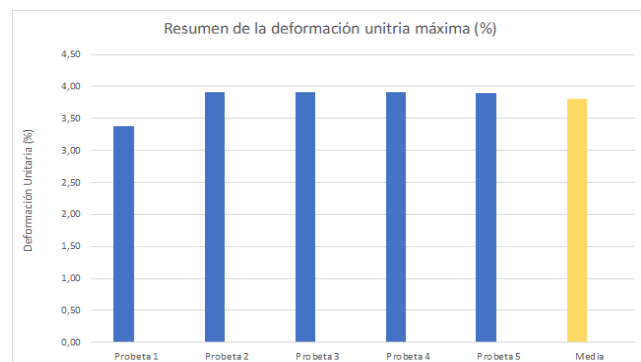
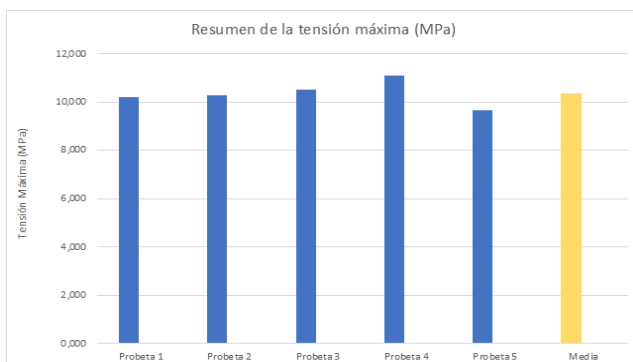


Figura 101. Resultados obtenidos de las probetas de tracción usando PLA+G para una degradación de 1 mes

Fuente: Elaboración propia

- Resultados de las probetas de tracción con 3 meses de degradación

	Tensión Máxima (MPa)
Probeta 1	7,85
Probeta 2	7,86
Probeta 3	8,47
Probeta 4	8,89
Probeta 5	8,47
Media	8,31
Desviación	0,44

	Deformación unitaria (%)
Probeta 1	12,96
Probeta 2	10,97
Probeta 3	11,69
Probeta 4	12,99
Probeta 5	16,24
Media	12,97
Desviación	2,02

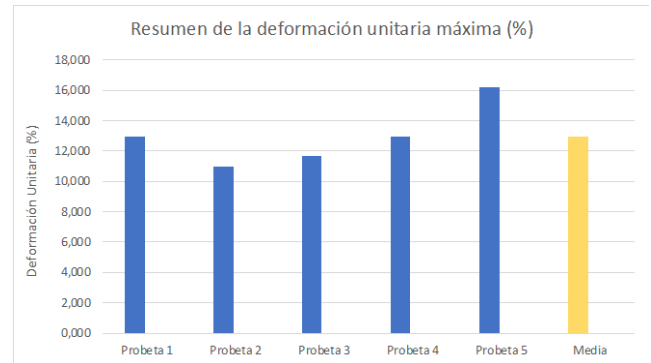
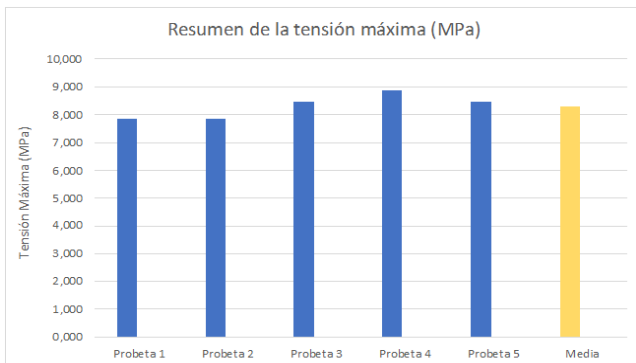


Figura 102. Resultados obtenidos de las probetas de tracción usando PLA+G para una degradación de 3 meses

Fuente: Elaboración propia

5.2.3.1. Análisis de los resultados de las probetas de tracción de PLA más Grafeno

En la siguiente gráfica se recoge la evolución de los valores de las medias para cada uno de los tiempos de degradación (Figura 103):

PLA + Grafeno	Tensión Media Máxima (MPa)
Media 0 días	29,41
Media 1 semana	12,54
Media 1 mes	10,35
Media 3 meses	8,31

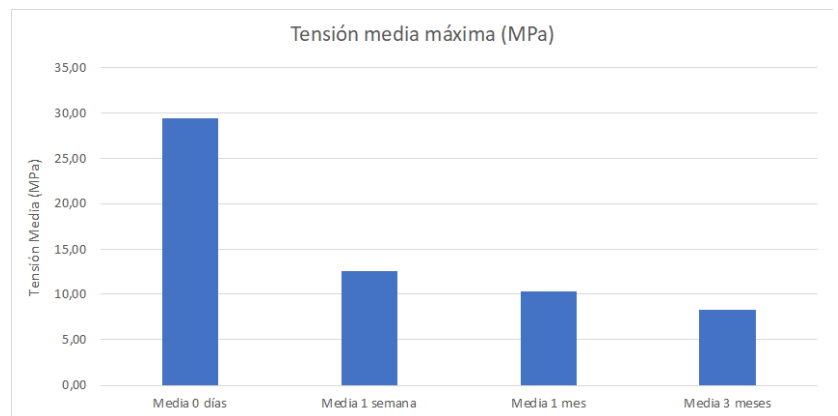


Figura 103. Evolución de las medias de las probetas de tracción con PLA más Grafeno

Fuente: Elaboración propia

Para la mezcla de PLA+G también se confirma que a mayor tiempo de degradación menor es la tensión máxima que soportan las probetas. En este caso la disminución de la tensión es mayor entre las probetas.

5.2.4. Resultados de los ensayos de las probetas de tracción con PLA+GO

A continuación, se mostrarán los resultados de las probetas de tracción impresas a partir de PLA+GO.

- Resultados de las probetas de tracción con 0 días de degradación

	Tensión Máxima (Mpa)
Probeta 1	17,76
Probeta 2	16,59
Probeta 3	19,86
Probeta 4	19,12
Probeta 5	19,51
Media	18,57
Desviación	1,36

	Deformación unitaria (%)
Probeta 1	17,28
Probeta 2	16,92
Probeta 3	17,58
Probeta 4	17,10
Probeta 5	19,19
Media	17,61
Desviación	0,91

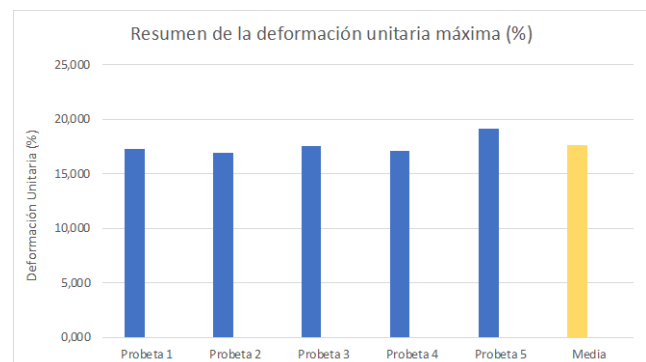
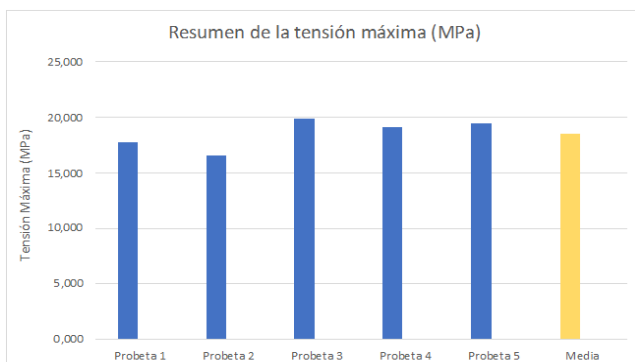


Figura 104. Resultados obtenidos de las probetas de tracción usando PLA+GO para una degradación de 0 días

Fuente: Elaboración propia

- Resultados de las probetas de tracción con 1 semana de degradación

	Tensión Máxima (MPa)
Probeta 1	15,98
Probeta 2	16,25
Probeta 3	16,11
Media	16,11
Desviación	0,14

	Deformación unitaria (%)
Probeta 1	9,71
Probeta 2	12,21
Probeta 3	15,52
Media	12,48
Desviación	2,91

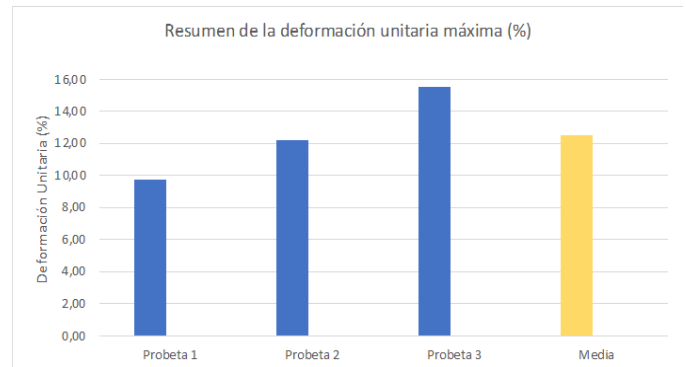
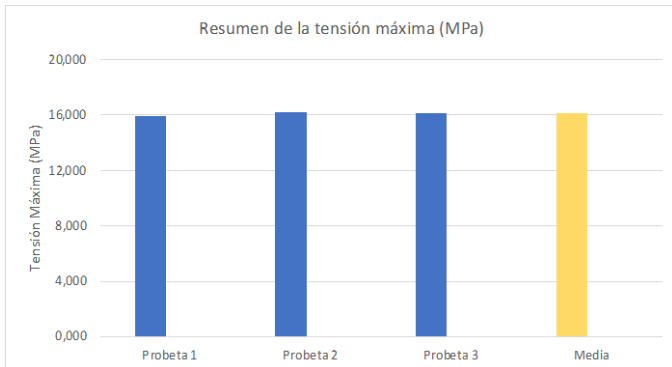


Figura 105. Resultados obtenidos de las probetas de tracción usando PLA+GO para una degradación de 1 semana

Fuente: Elaboración propia

- Resultados de las probetas de tracción con 1 mes de degradación

	Tensión Máxima (MPa)
Probeta 1	8,64
Probeta 2	9,91
Probeta 3	9,83
Probeta 4	10,03
Probeta 5	9,34
Media	9,55
Desviación	0,57

	Deformación unitaria (%)
Probeta 1	39,98
Probeta 2	39,99
Probeta 3	37,16
Probeta 4	35,69
Probeta 5	39,86
Media	39,05
Desviación	2,00

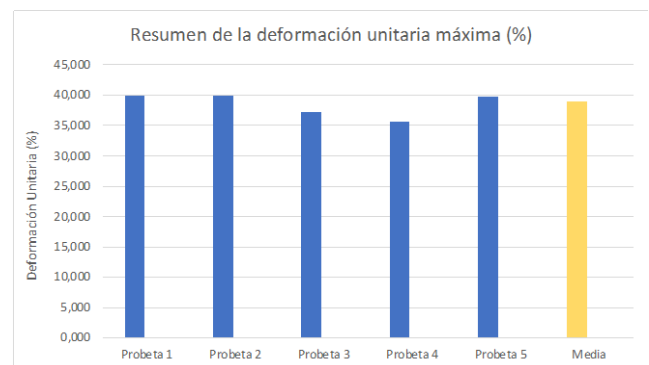
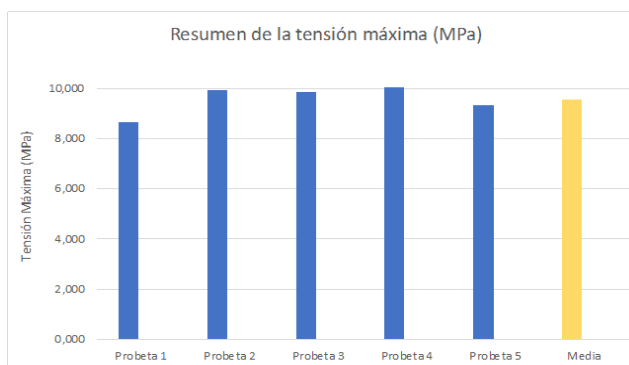


Figura 106. Resultados obtenidos de las probetas de tracción usando PLA+GO para una degradación de 1 mes

Fuente: Elaboración propia

- Resultados de las probetas de tracción con 3 meses de degradación

	Tensión Máxima (Mpa)
Probeta 1	6,15
Probeta 2	7,64
Probeta 3	7,58
Media	7,12
Desviación	0,84

	Deformación unitaria (%)
Probeta 1	13,34
Probeta 2	13,03
Probeta 3	13,90
Media	13,42
Desviación	0,44

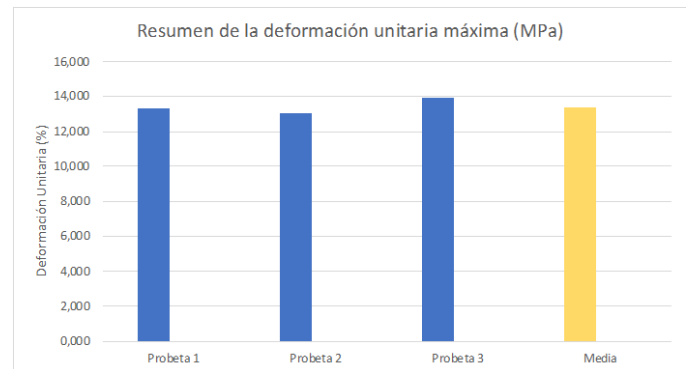
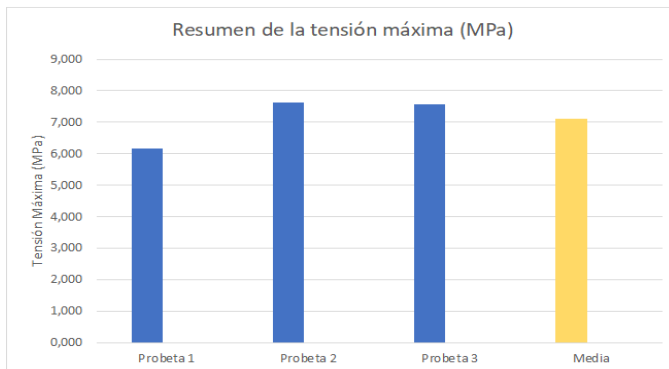


Figura 107. Resultados obtenidos de las probetas de tracción usando PLA+GO para una degradación de 3 meses

Fuente: Elaboración propia

5.2.4.1. Análisis de los resultados de las probetas de PLA+GO

En la siguiente gráfica se recoge la evolución de los valores de las medias para cada uno de los tiempos de degradación (Figura 108):

PLA + GO	Tensión Media Máxima (MPa)
Media 0 días	18,57
Media 1 semana	16,11
Media 1 mes	9,55
Media 3 meses	7,12

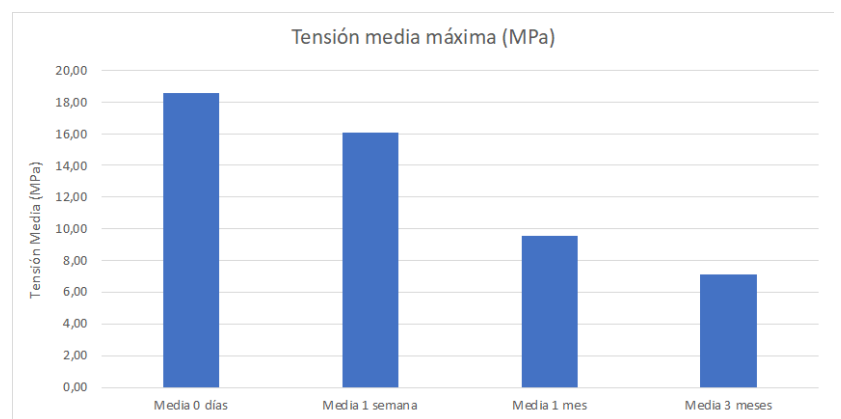


Figura 108. Evolución de las medias de las probetas de tracción con PLA+GO

Fuente: Elaboración propia

Para el caso de la mezcla de PLA+GO se ve en la gráfica anterior que la tensión sigue una evolución similar a las mezclas anteriores, pero con unos valores más bajos.

5.2.5. Resultados de los ensayos de las probetas de tracción con PLA+GNP

- Resultados de las probetas de tracción con 0 días de degradación

	Tensión Máxima (MPa)
Probeta 1	19,36
Probeta 2	19,45
Probeta 3	12,90
Probeta 4	18,38
Media	17,52
Desviación	3,12

	Deformación unitaria (%)
Probeta 1	18,09
Probeta 2	15,35
Probeta 3	16,98
Probeta 4	22,31
Media	18,18
Desviación	2,97

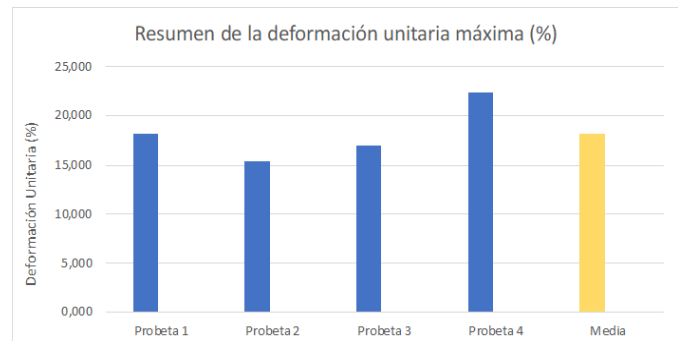
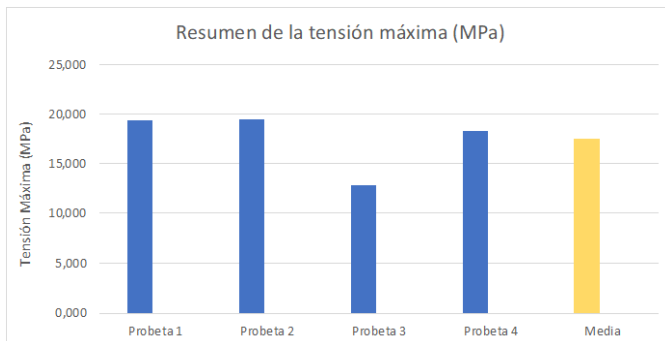


Figura 109. Resultados obtenidos de las probetas de tracción usando PLA+GNP para una degradación de 0 días

Fuente: Elaboración propia

- Resultados de las probetas de tracción con 1 semana de degradación

	Tensión Máxima (MPa)
Probeta 1	12,40
Probeta 2	14,46
Probeta 3	13,60
Probeta 4	14,45
Probeta 5	10,47
Media	13,08
Desviación	1,68

	Deformación unitaria (%)
Probeta 1	17,32
Probeta 2	12,92
Probeta 3	12,83
Probeta 4	13,24
Probeta 5	14,84
Media	14,23
Desviación	1,91

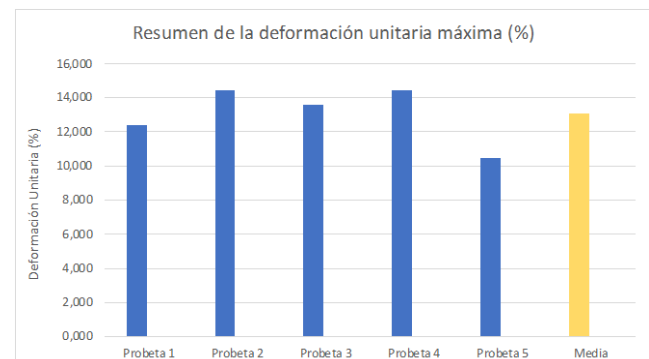
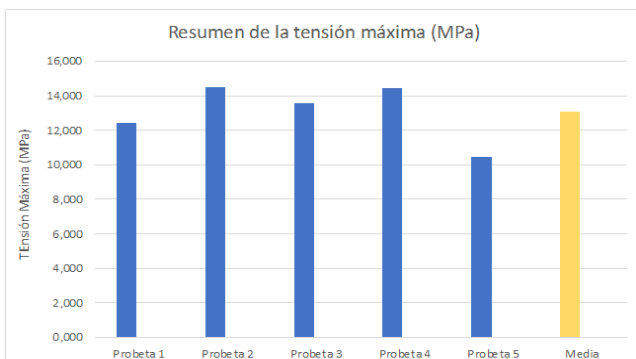


Figura 110. Resultados obtenidos de las probetas de tracción usando PLA+GNP para una degradación de 0 días

Fuente: Elaboración propia

- Resultados de las probetas de tracción con 1 mes de degradación

	Tensión Máxima (MPa)
Probeta 1	10,49
Probeta 2	9,73
Probeta 3	9,32
Probeta 4	9,32
Probeta 5	10,44
Media	9,86
Desviación	0,58

	Deformación unitaria (%)
Probeta 1	35,98
Probeta 2	35,98
Probeta 3	28,45
Probeta 4	30,16
Probeta 5	31,67
Media	32,45
Desviación	3,42

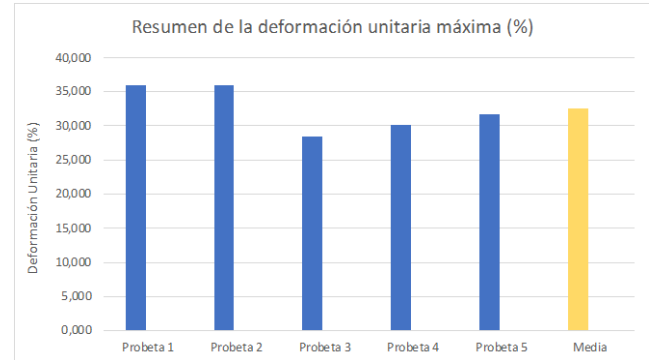
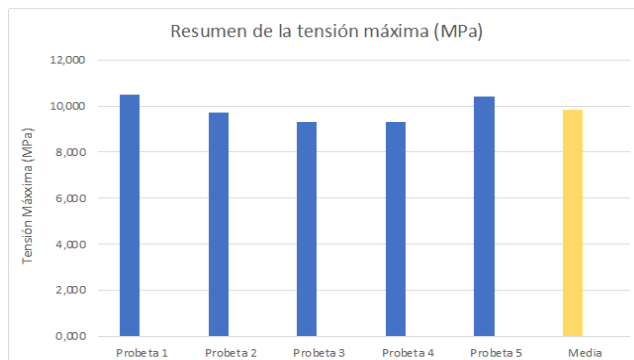


Figura 111. Resultados obtenidos de las probetas de tracción usando PLA+GNP para una degradación de 1 mes

Fuente: Elaboración propia

- Resultados de las probetas de tracción con 3 meses de degradación

	Tensión Máxima (Mpa)
Probeta 1	8,55
Probeta 2	8,29
Probeta 3	8,93
Probeta 4	8,00
Probeta 5	7,96
Media	8,34
Desviación	0,40

	Deformación unitaria (%)
Probeta 1	15,78
Probeta 2	14,20
Probeta 3	14,95
Probeta 4	13,74
Probeta 5	13,71
Media	14,48
Desviación	0,89

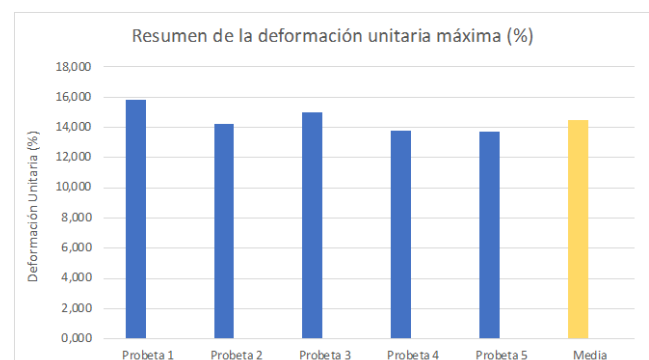
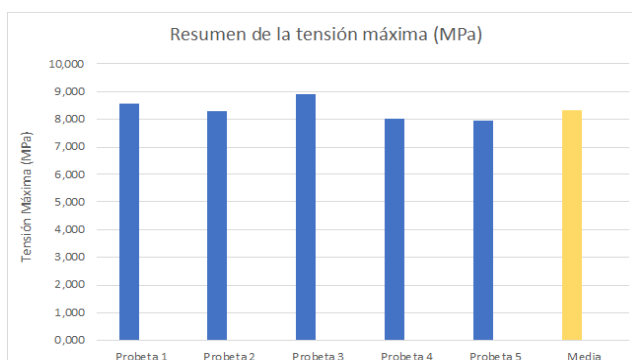


Figura 112. Resultados obtenidos de las probetas de tracción usando PLA+GNP para una degradación de 3 meses

Fuente: Elaboración propia

5.2.5.1. Análisis de los resultados de las probetas de PLA+GNP

En la siguiente gráfica se recoge la evolución de los valores de las medias para cada uno de los tiempos de degradación (*Figura 113*):

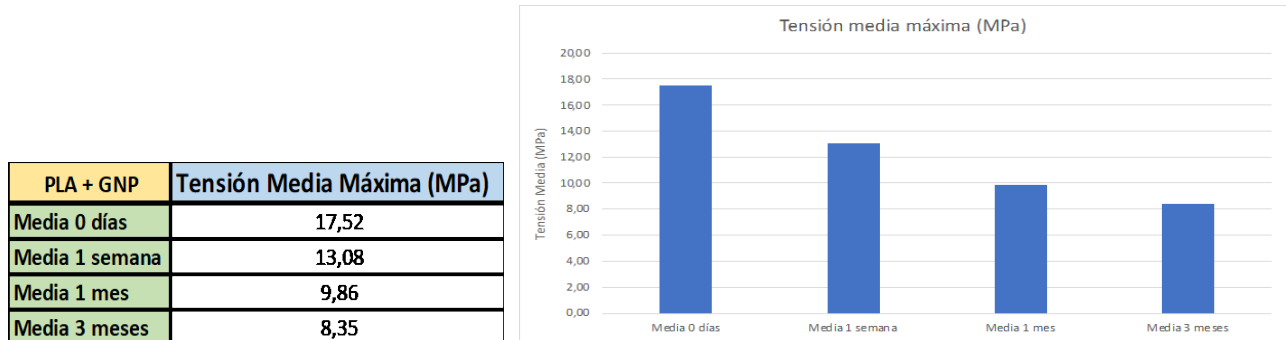


Figura 113. Evolución de las medias de las probetas de tracción con PLA+GNP

Fuente: Elaboración propia

Se sigue confirmando la misma tendencia en cuanto a la evolución de las tensiones las cuales disminuyen más rápidamente en las mezclas con algún tipo de nanomaterial que en la mezcla sólo con PLA.

5.2.6. Análisis final de los resultados obtenidos en los ensayos de tracción

A continuación, se analizarán todos los resultados de los ensayos sobre las probetas de tracción obtenidos. Como se puede ver en la siguiente gráfica (*Figura 114*) los valores de las tensiones disminuyen claramente para aquellas hechas de algún tipo de nanomaterial, salvo para las probetas con grafeno sin degradar:

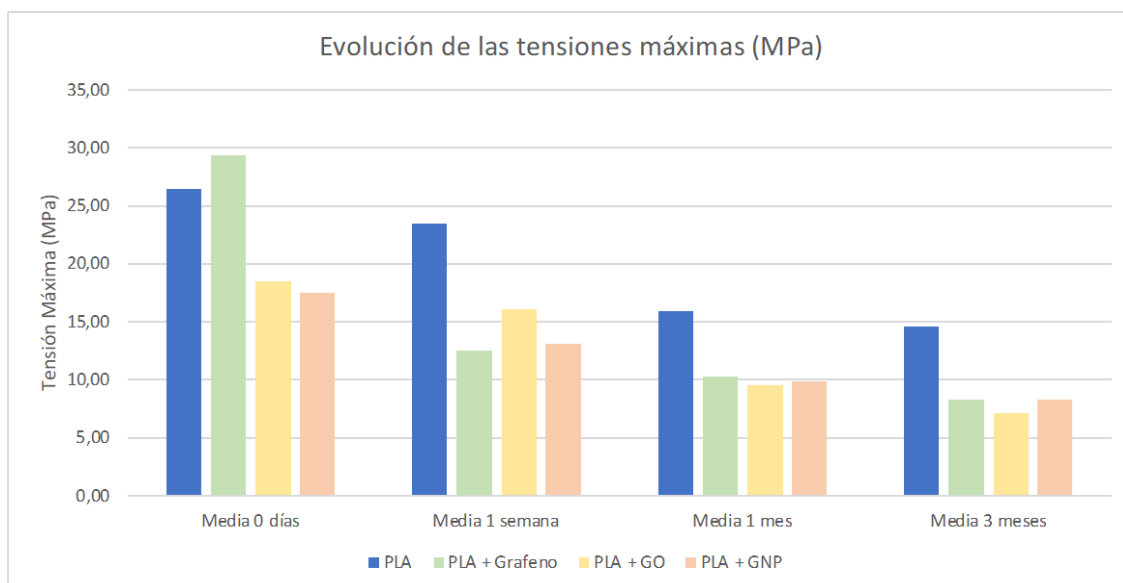


Figura 114. Evolución de las medias de las probetas de tracción

Fuente: Elaboración propia

Las probetas que están hechas sólo de PLA sufren una reducción de la tensión máxima de un 44,82%, las probetas de PLA con Grafeno del 71,74%, las de PLA con GO del 61,66% y las probetas hechas a partir de PLA y GNP del 52,34% (Figura 115).

	Valores de la tensión máxima (MPa)			
	PLA	PLA + Grafeno	PLA + GO	PLA + GNP
Media 0 días	26,53	29,41	18,57	17,52
Media 1 semana	23,49	12,54	16,11	13,08
Media 1 mes	15,92	10,35	9,55	9,86
Media 3 meses	14,64	8,31	7,12	8,35
Variación (%)	44,82	71,74	61,66	52,34

Figura 115. Datos totales de los ensayos de tracción

Fuente: Elaboración propia

Según estos datos se podría afirmar que el grafeno ayuda a la degradación del PLA, obteniendo un valor de la tensión incluso mejor que las probetas obtenidas solo de PLA. El GNP, sin embargo, no sufre una degradación tan alta (su variación porcentual es muy similar a la de las probetas de PLA) iniciando los ensayos con un valor bastante bajo de tensión, su uso no sería recomendado.

5.3. Resultados de los ensayos de compresión

A continuación, se exponen los resultados de los ensayos de compresión realizados sobre las scaffolds:

5.3.1. Resultados de los ensayos de compresión sobre las scaffolds de PLA

- Resultados de los ensayos de compresión con 0 días de degradación

	Tensión Máxima (MPa)
Probeta 1	14,61
Probeta 2	23,13
Probeta 3	20,72
Probeta 4	23,74
Media	20,55
Desviación	4,17

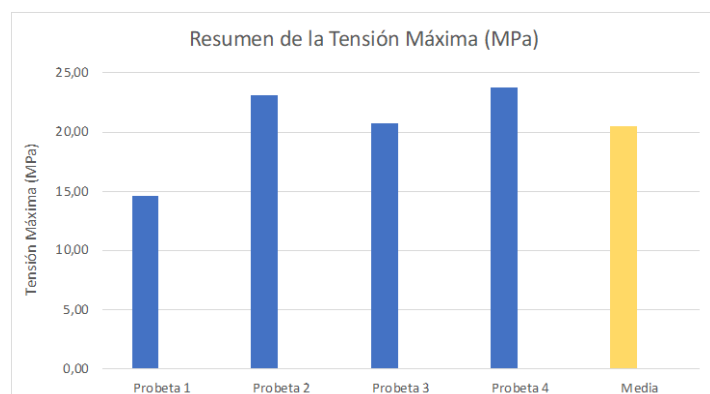


Figura 116. Resultados obtenidos de las scaffolds con PLA y 0 días de degradación

Fuente: Elaboración propia

Se obtienen valores de acuerdo con lo esperado, a pesar de una alta desviación que puede estar provocada por errores en la impresión.

- Resultados de los ensayos de compresión con 1 semana de degradación

	Tensión Máxima (MPa)
Probeta 1	20,11
Probeta 2	19,39
Probeta 3	19,30
Probeta 4	18,84
Media	19,41
Desviación	0,53

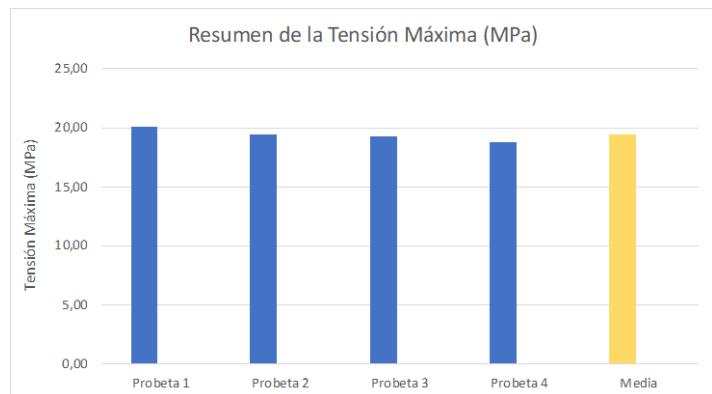


Figura 117. Resultados obtenidos de las scaffolds con PLA y 1 semana de degradación

Fuente: Elaboración propia

Esta vez se obtiene una desviación menor en los resultados.

- Resultados de los ensayos de compresión con 1 mes de degradación

	Tensión Máxima (MPa)
Probeta 1	18,80
Probeta 2	19,33
Probeta 3	19,06
Probeta 4	20,30
Media	19,37
Desviación	0,65

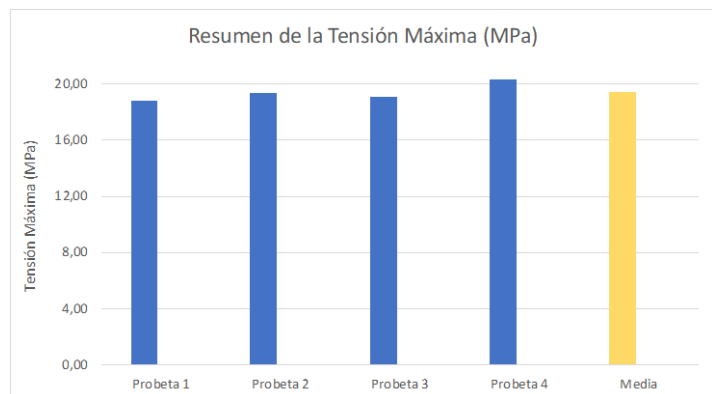


Figura 118. Resultados obtenidos de las scaffolds con PLA y 1 mes de degradación

Fuente: Elaboración propia

- Resultados de los ensayos de compresión con 3 meses de degradación

	Tensión Máxima (MPa)
Probeta 1	17,29
Probeta 2	20,94
Probeta 3	20,25
Probeta 4	16,82
Media	18,82
Desviación	2,07

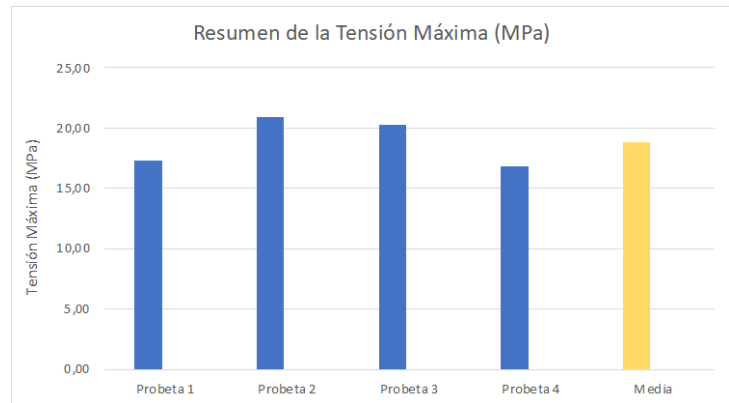


Figura 119. Resultados obtenidos de las scaffolds con PLA y 3 meses de degradación

Fuente: Elaboración propia

5.3.1.1. Análisis de los ensayos de compresión de las scaffolds con PLA

En la siguiente gráfica se recoge la evolución de los valores de las medias para cada uno de los tiempos de degradación (Figura 120):

PLA	Tensión Media Máxima (MPa)
0 DÍAS	20,55
1 SEMANA	19,41
1 MES	19,37
3 MESES	18,82

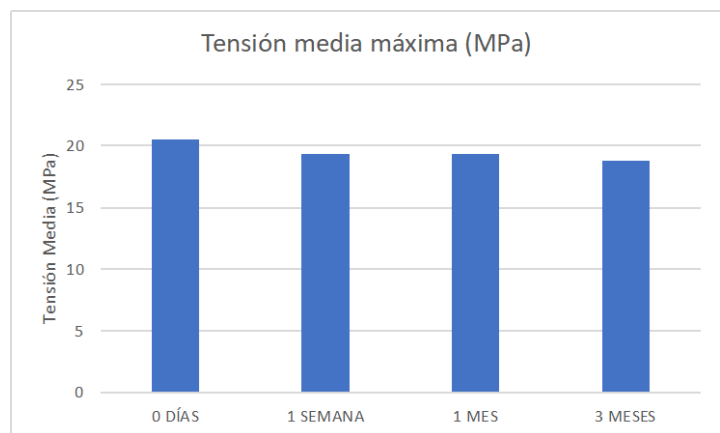


Figura 120. Evolución de las tensiones máxima obtenidas de los ensayos de compresión con PLA

Fuente: Elaboración propia

En este caso no se observa una disminución muy significativa en cuanto a los valores de las tensiones resultantes de los ensayos de compresión sobre las scaffolds de PLA.

5.3.2. Resultados de los ensayos de compresión sobre las scaffolds de PLA+G

- Resultados de los ensayos de compresión con 0 días de degradación

	Tensión Máxima (MPa)
Probeta 1	5,01
Probeta 2	6,03
Probeta 3	4,99
Probeta 4	6,48
Media	5,63
Desviación	0,75

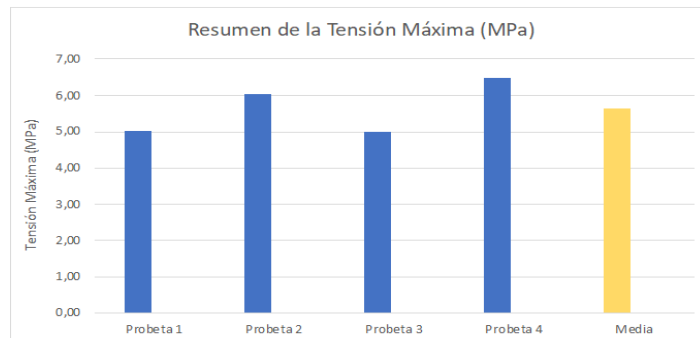


Figura 121. Resultados obtenidos de las scaffolds de PLA+G y 0 días de degradación

Fuente: Elaboración propia

- Resultados de los ensayos de compresión con 1 semana de degradación

	Tensión Máxima (MPa)
Probeta 1	2,92
Probeta 2	2,99
Probeta 3	2,66
Media	2,86
Desviación	0,17

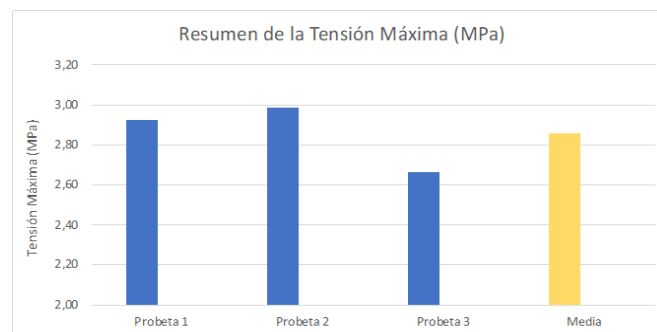


Figura 122. Resultados obtenidos de las scaffolds de PLA+G y 1 semana de degradación

Fuente: Elaboración propia

- Resultados de los ensayos de compresión con 1 mes de degradación

	Tensión Máxima (MPa)
Probeta 1	2,01
Probeta 2	2,50
Probeta 3	2,75
Probeta 4	2,82
Media	2,52
Desviación	0,36

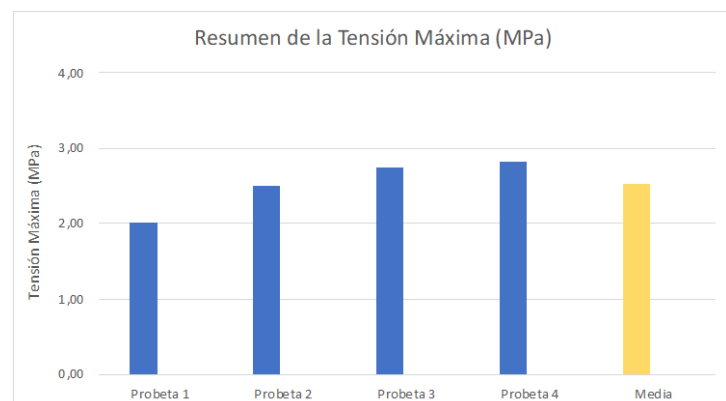


Figura 123. Resultados obtenidos de las scaffolds de PLA+G y 1 mes de degradación

Fuente: Elaboración propia

- Resultados de los ensayos de compresión con 3 meses de degradación

	Tensión Máxima (MPa)
Probeta 1	2,18
Probeta 2	2,14
Probeta 3	2,85
Probeta 4	2,65
Media	2,45
Desviación	0,35

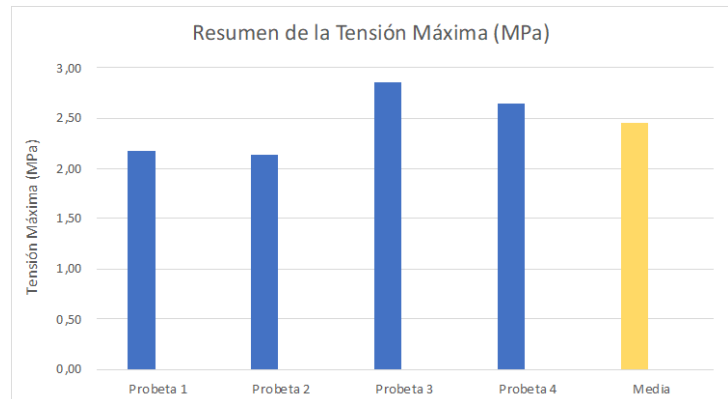


Figura 124. Resultados obtenidos de las scaffolds de PLA+G y 3 meses de degradación

Fuente: Elaboración propia

5.3.2.1. Análisis de los ensayos de compresión de las scaffolds con PLA+G

En la siguiente gráfica se recoge la evolución de los valores de las medias para cada uno de los tiempos de degradación (Figura 125):

PLA + Grafeno	Tensión Media Máxima (MPa)
0 DÍAS	5,63
1 SEMANA	2,86
1 MES	2,52
3 MESES	2,45

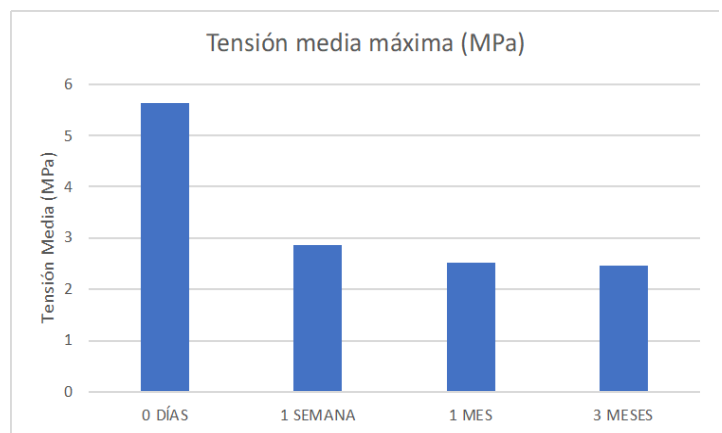


Figura 125. Evolución de las tensiones máxima obtenidas de los ensayos de compresión con PLA+G

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos muestran unos valores muy bajos de las tensiones que sufren las scaffolds, respecto a las ensayadas a partir de la mezcla de PLA, además, la degradación es muy baja, sin haber apenas diferencia en los valores según el tiempo ensayado. Esto puede deberse a errores en la impresión de las scaffolds.

5.3.3. Resultados de los ensayos de compresión sobre las scaffolds de PLA+GO

- Resultados de los ensayos de compresión con 0 días de degradación

	Tensión Máxima (MPa)
Probeta 1	9,30
Probeta 2	5,65
Probeta 3	5,90
Probeta 4	7,19
Media	7,01
Desviación	1,67

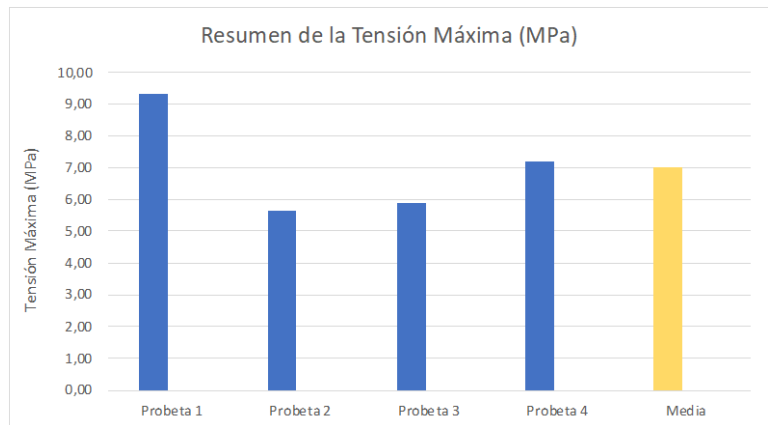


Figura 126. Resultados obtenidos de las scaffolds de PLA+GO y 0 días de degradación

Fuente: Elaboración propia

- Resultados de los ensayos de compresión con 1 semana de degradación

	Tensión Máxima (MPa)
Probeta 1	3,77
Probeta 2	3,30
Probeta 3	3,52
Probeta 4	3,77
Probeta 5	3,89
Media	3,65
Desviación	0,24

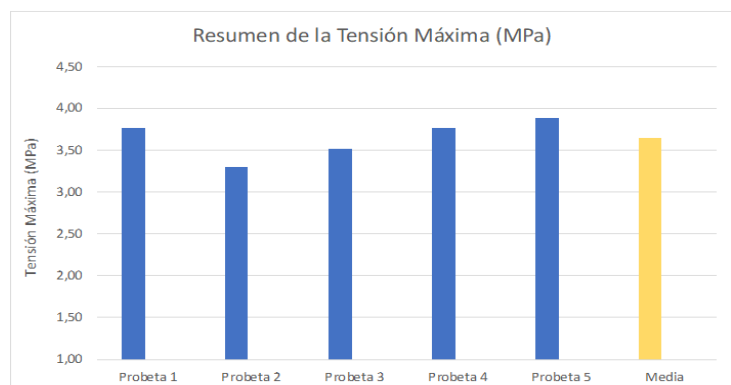


Figura 127. Resultados obtenidos de las scaffolds de PLA+GO y 1 semana de degradación

Fuente: Elaboración propia

- Resultados de los ensayos de compresión con 1 mes de degradación

	Tensión Máxima (MPa)
Probeta 1	2,68
Probeta 2	3,69
Probeta 3	3,76
Probeta 4	3,85
Probeta 5	3,45
Media	3,48
Desviación	0,48

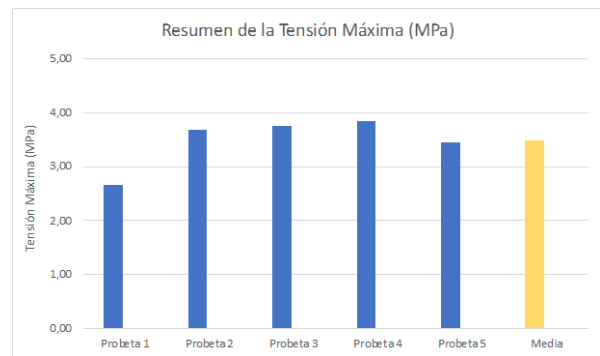


Figura 128. Resultados obtenidos de las scaffolds de PLA+GO y 1 mes de degradación

Fuente: Elaboración propia

- Resultados de los ensayos de compresión con 3 meses de degradación

	Tensión Máxima (MPa)
Probeta 1	3,11
Probeta 2	3,18
Probeta 3	3,11
Probeta 4	2,08
Probeta 5	2,41
Media	2,78
Desviación	0,50

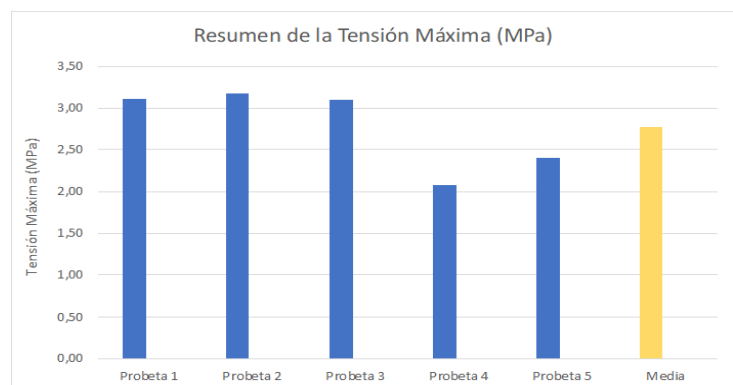


Figura 129. Resultados obtenidos de las scaffolds de PLA+GO y 3 meses de degradación

Fuente: Elaboración propia

5.3.2.1. Análisis de los ensayos de compresión de las scaffolds con PLA+GO

En la siguiente gráfica se recoge la evolución de los valores de las medias para cada uno de los tiempos de degradación (Figura 130):

PLA + GO	Tensión Media Máxima (MPa)
0 DÍAS	7,01
1 SEMANA	3,86
1 MES	3,48
3 MESES	2,78

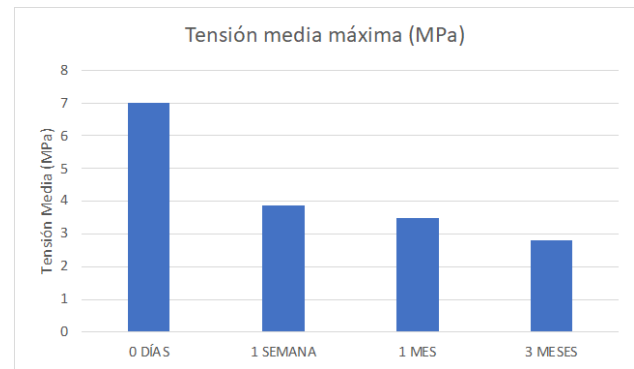


Figura 130. Evolución de las tensiones máxima obtenidas de los ensayos de compresión con PLA+GO

Fuente: Elaboración propia

Al igual que en el caso de las scaffolds con PLA+G los resultados obtenidos muestran unos valores muy bajos de las tensiones que sufren las scaffolds, respecto a las ensayadas a partir de la mezcla de sólo PLA, sin embargo, hay una mayor degradación que la sufrida por las scaffolds de PLA.

5.3.4. Resultados de los ensayos de compresión sobre las scaffolds de PLA+GNP

- Resultados de los ensayos de compresión con 0 días de degradación

	Tensión Máxima (MPa)
Probeta 1	9,93
Probeta 2	9,28
Probeta 3	9,77
Probeta 4	9,94
Probeta 5	7,93
Media	9,37
Desviación	0,85

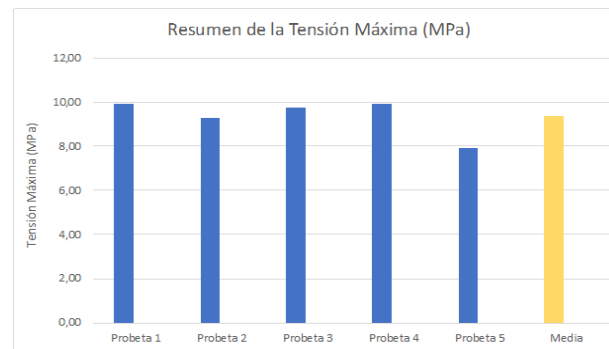


Figura 131. Resultados obtenidos de las scaffolds de PLA+GNP y 0 días de degradación

Fuente: Elaboración propia

- Resultados de los ensayos de compresión con 1 semana de degradación

	Tensión Máxima (MPa)
Probeta 1	4,70
Probeta 2	3,63
Probeta 3	4,02
Probeta 4	3,10
Media	3,86
Desviación	0,67

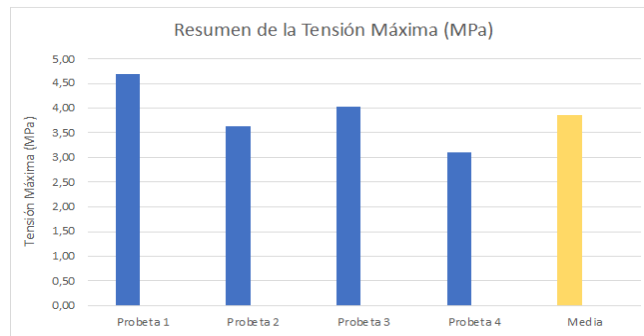


Figura 132. Resultados obtenidos de las scaffolds de PLA+GNP y 1 semana de degradación

Fuente: Elaboración propia

- Resultados de los ensayos de compresión con 1 mes de degradación

	Tensión Máxima (MPa)
Probeta 1	3,79
Probeta 2	3,73
Probeta 3	2,70
Probeta 4	2,51
Probeta 5	2,69
Media	3,18
Desviación	0,67

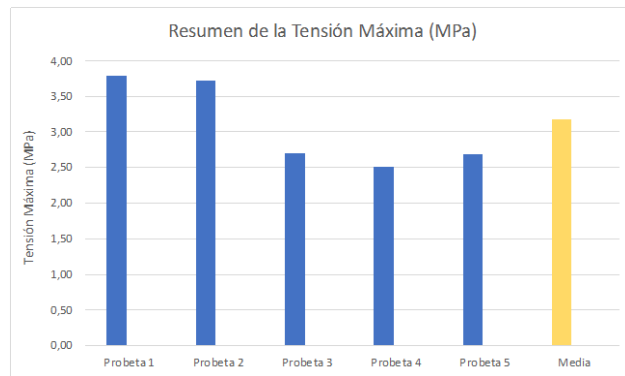


Figura 133. Resultados obtenidos de las scaffolds de PLA+GNP y 1 mes de degradación

Fuente: Elaboración propia

- Resultados de los ensayos de compresión con 3 meses de degradación

	Tensión Máxima (MPa)
Probeta 1	3,10
Probeta 2	2,54
Probeta 3	2,23
Probeta 4	2,58
Media	2,61
Desviación	0,36

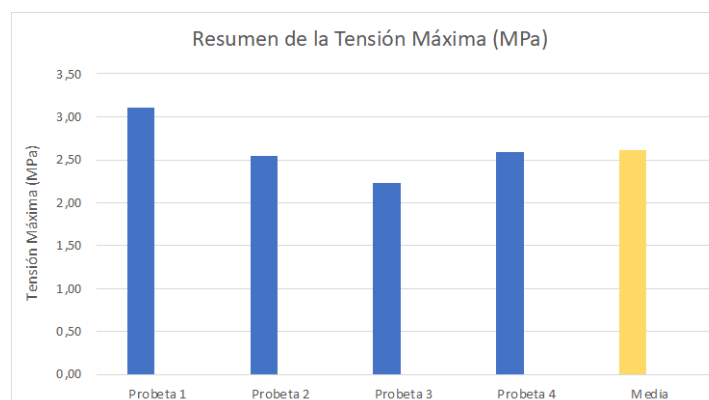


Figura 134. Resultados obtenidos de las scaffolds de PLA+GNP y 3 meses de degradación

Fuente: Elaboración propia

5.3.4.1. Análisis de los ensayos de compresión de las scaffolds con PLA+GNP

En la siguiente gráfica se recoge la evolución de los valores de las medias para cada uno de los tiempos de degradación (*Figura 135*):

PLA + GNP	Tensión Media Máxima (MPa)
0 DÍAS	9,37
1 SEMANA	3,65
1 MES	3,18
3 MESES	2,61

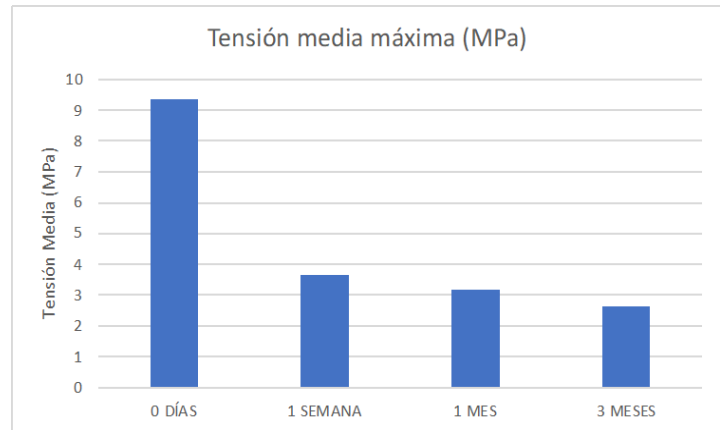


Figura 135. Evolución de las tensiones máxima obtenidas de los ensayos de compresión con PLA+GNP

Fuente: Elaboración propia

Al igual que en el caso de las scaffolds con PLA+G y PLA+GO, los resultados obtenidos muestran unos valores muy bajos de las tensiones que sufren las scaffolds, respecto a las ensayadas a partir de la mezcla de sólo PLA, además, la degradación es muy baja, sin haber apenas diferencia en los valores según el tiempo ensayado, se produce una alta degradación al estar 1 semana en PBS, pero los siguientes meses se mantienen las tensiones sin apenas cambios.

5.3.5. Análisis final de los resultados obtenidos en los ensayos de compresión

A continuación, se analizarán todos los resultados de los ensayos sobre las scaffolds obtenidos. Se puede ver que las scaffolds soportan unas tensiones de compresión mucho menores que las probetas de tracción, debido sobre todo a su estructura porosa, pero también puede deberse a distintos errores de impresión, estos errores se dan por la geometría tan compleja de este tipo de piezas.

Como se puede ver en la siguiente gráfica (*Figura 136*) las scaffolds de PLA sufren una degradación constante sin apenas cambios en las tensiones que soportan. Las scaffolds hechas a partir de algún tipo de nanomaterial soportan unas tensiones muy bajas incluso sin degradar, muy alejadas de las tensiones que soportan las scaffolds de PLA, sin embargo, parece que los nanomateriales favorecen la degradación, sobre todo en la primera semana de ensayo cuando las tensiones soportadas bajan mucho, luego se mantienen más o menos constantes. Esto puede deberse a errores en la impresión de las scaffolds

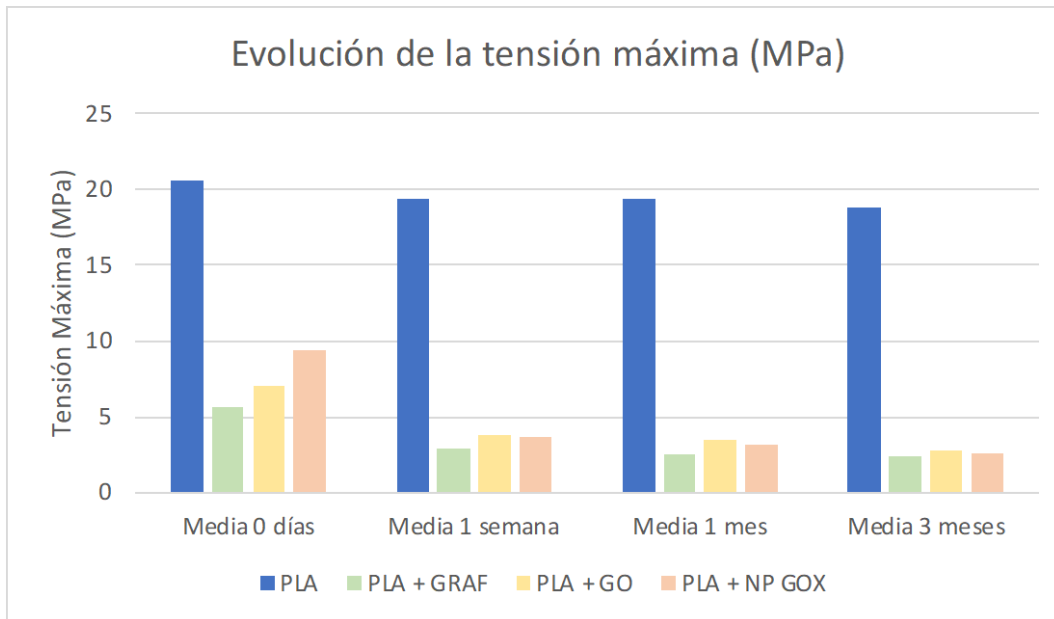


Figura 136. Evolución de las medias de tensión de las scaffolds

Fuente: Elaboración propia

Como puede verse en la siguiente tabla (Figura 137), el nanomaterial que más sufre degradación respecto a la tensión inicial soportada es el GNP con un 72,15% seguido del GO con un 60,34% y el Grafeno con un 56,48%, concluyendo que el nanomaterial que mejor degrada el PLA es el GNP a pesar de obtener unas tensiones iniciales muy bajas.

	Valores de la tensión máxima (Mpa)			
	PLA	PLA + Grafeno	PLA + GO	PLA + GNP
Media 0 días	20,55	5,63	7,01	9,37
Media 1 semana	19,41	2,86	3,86	3,65
Media 1 mes	19,37	2,52	3,48	3,18
Media 3 meses	18,82	2,45	2,78	2,61
Variación (%)	8,42	56,48	60,34	72,15

Figura 137. Resultados totales de los ensayos de compresión sobre las scaffolds

Fuente: Elaboración propia

A diferencia de los resultados obtenidos en las probetas de tracción, los cuales, la mayor variación de la tensión ocurría para las piezas de PLA+G, en los ensayos de compresión la mayor variación ocurre para las scaffolds de PLA+GNP.

5.4. Resultados de los ensayos de pérdida de masa

A continuación, se exponen los resultados de los ensayos realizados sobre los discos de absorción:

5.4.1. Resultados de los ensayos de pérdida de masa sobre los discos de PLA

- Resultados de los ensayos de pérdida de masa con 1 semana de degradación

PLA 1 Semana	Peso antes ensayo (g)	Peso después de ensayo (g)	Variación (%)
Disco 1	8,47	7,81	7,79
Disco 2	8,50	7,76	8,71
Disco 3	8,53	7,63	10,55
Disco 4	8,47	7,77	8,26
Disco 5	8,60	7,81	9,19
Media	8,51	7,76	8,90

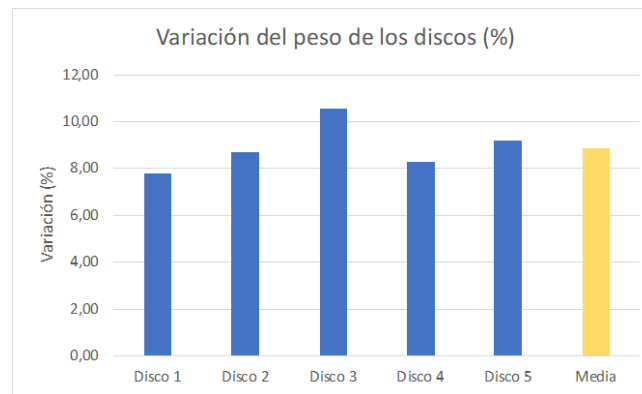


Figura 138. Resultados obtenidos de los discos de PLA con 1 semana de degradación

Fuente: Elaboración propia

- Resultados de los ensayos de pérdida de masa con 1 mes de degradación

PLA 1 Mes	Peso antes ensayo (g)	Peso después de ensayo (g)	Variación (%)
Disco 1	8,47	7,10	16,17
Disco 2	8,50	7,20	15,29
Disco 3	8,53	7,10	16,76
Disco 4	8,47	7,60	10,27
Media	8,49	7,25	14,63

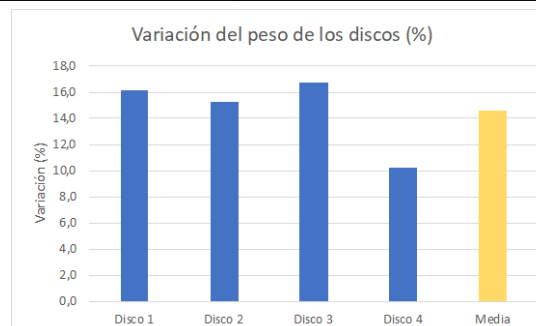


Figura 139. Resultados obtenidos de los discos de PLA con 1 mes de degradación

Fuente: Elaboración propia

- Resultados de los ensayos de pérdida de masa con 3 meses de degradación

PLA 3 meses	Peso antes ensayo (g)	Peso después ensayo (g)	Variación (%)
Disco 1	8,46	7,10	16,08
Disco 2	8,72	7,05	19,15
Disco 3	8,68	7,29	16,01
Disco 4	8,67	7,47	13,84
Disco 5	8,65	7,43	14,10
Media	8,64	7,27	15,84

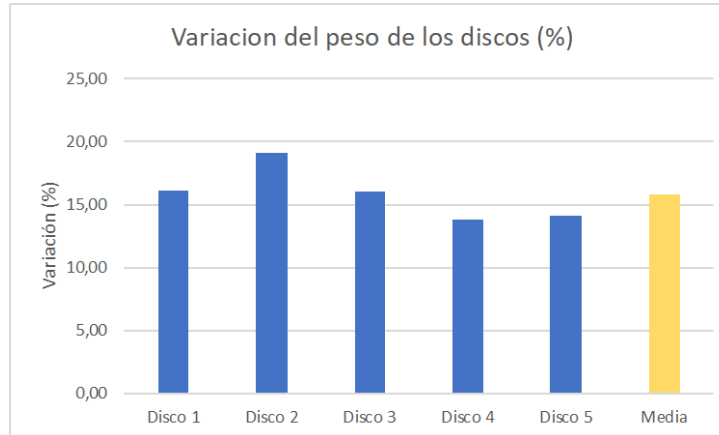


Figura 140. Resultados obtenidos de los discos de PLA con 3 meses de degradación

Fuente: Elaboración propia

5.4.1.1. Análisis de los ensayos de pérdida de masa de los discos de PLA

En la siguiente gráfica se recoge la evolución de los valores de las medias para cada uno de los tiempos de degradación.

PLA	Peso medio antes de ensayo (g)	Peso medio después de ensayo (g)	Variación (%)
1 semana	8,51	7,76	8,81
1 mes	8,49	7,25	14,61
3 meses	8,64	7,27	15,86

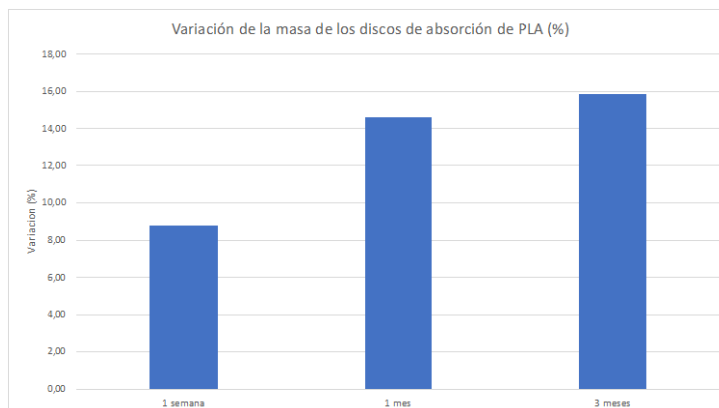


Figura 141. Resultados obtenidos de los discos de PLA

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar una ligera pérdida de masa en los discos de PLA que crece a medida que pasa el tiempo ensayado, destacando la escasa variación entre los ensayos de 1 mes y los ensayos de tres meses.

5.4.2. Resultados de los ensayos de pérdida de masa sobre los discos de PLA+G

- Resultados de los ensayos de pérdida de masa con 1 semana de degradación

PLA y Grafeno	Peso antes ensayo (g)	Peso después de ensayo (g)	Variación (g)
Pastilla 1	8,50	7,71	9,29
Pastilla 2	8,52	7,74	9,15
Pastilla 3	8,54	7,69	9,95
Pastilla 4	8,60	7,73	10,12
Pastilla 5	8,51	7,74	9,05
Media	8,53	7,72	9,51

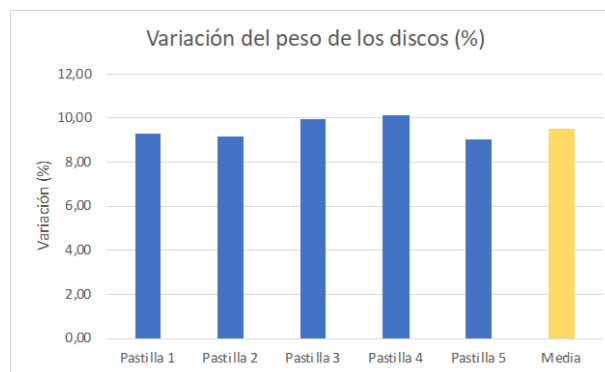


Figura 142. Resultados obtenidos de los discos de PLA+G para una degradación de 1 semana

Fuente: Elaboración propia

- Resultados de los ensayos de pérdida de masa con 1 mes de degradación

PLA y Grafeno	Peso antes ensayo (g)	Peso después de ensayo (g)	Variación (%)
Disco 1	8,50	7,15	15,88
Disco 2	8,52	7,08	16,90
Disco 3	8,54	7,10	16,86
Media	8,52	7,11	16,55



Figura 143. Resultados obtenidos de los discos de PLA+G para una degradación de 1 mes

Fuente: Elaboración propia

- Resultados de los ensayos de pérdida de masa con 3 meses de degradación

PLA y Grafeno	Peso antes ensayo (g)	Peso después ensayo (g)	Variación (%)
Disco 1	8,50	6,97	18,00
Disco 2	8,59	7,05	17,93
Disco 3	8,58	6,93	19,23
Disco 4	8,58	6,91	19,46
Disco 5	8,45	6,90	18,34
Media	8,54	6,95	18,59

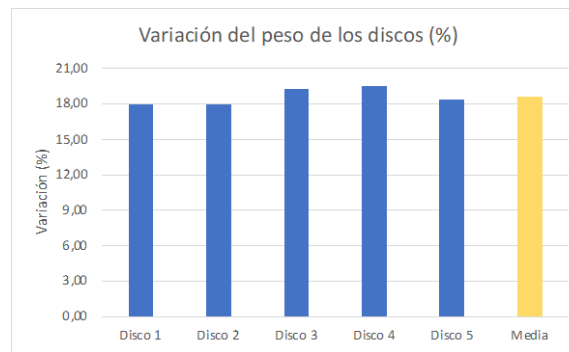


Figura 144. Resultados obtenidos de los discos de PLA+G para una degradación de 3 meses

Fuente: Elaboración propia

5.4.2.1. Análisis de los ensayos de pérdida de masa de los discos de PLA+G

En la siguiente gráfica se recoge la evolución de los valores de las medias para cada uno de los tiempos de degradación (Figura 145):

PLA+G	Peso medio antes de ensayo (g)	Peso medio después de ensayo (g)	Variación (%)
1 semana	8,53	7,72	9,50
1 mes	8,52	7,11	16,55
3 meses	8,54	6,95	18,62

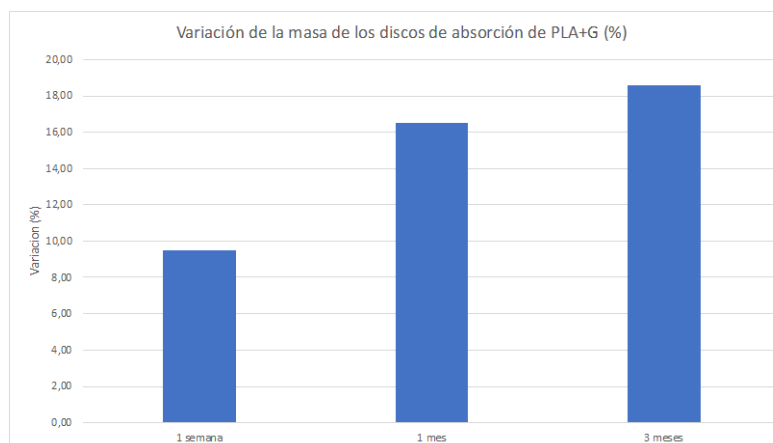


Figura 145. Resultados obtenidos de los discos de PLA+G

Fuente: Elaboración propia

Para la mezcla de PLA+G se sigue la misma tendencia que para los discos impresos solo de PLA, una alta variación en la masa para los ensayos de 1 semana y una degradación muy pequeña entre los ensayos de 1 mes y 3 meses.

5.4.3. Resultados de los ensayos de pérdida de masa sobre los discos de PLA+GO

- Resultados de los ensayos de pérdida de masa con 1 semana de degradación

PLA+GO	Peso antes ensayo (g)	Peso después ensayo (g)	Variación (%)
Disco 1	8,61	7,72	10,34
Disco 2	8,58	7,70	10,26
Disco 3	8,63	7,80	9,62
Disco 4	8,57	7,74	9,68
Media	8,60	7,74	9,97

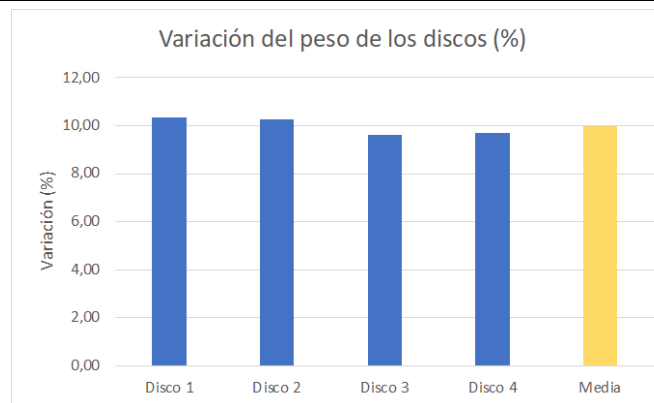


Figura 146. Resultados obtenidos de los discos de PLA+GO para una degradación de 1 semana

Fuente: Elaboración propia

- Resultados de los ensayos de pérdida de masa con 1 mes de degradación

PLA+GO	Peso antes ensayo (g)	Peso después ensayo (g)	Variación (%)
Disco 1	8,61	7,21	16,26
Disco 2	8,58	7,14	16,78
Disco 3	8,63	7,18	16,80
Disco 4	8,57	7,19	16,10
Disco 5	8,60	7,15	16,86
Media	8,60	7,17	16,56

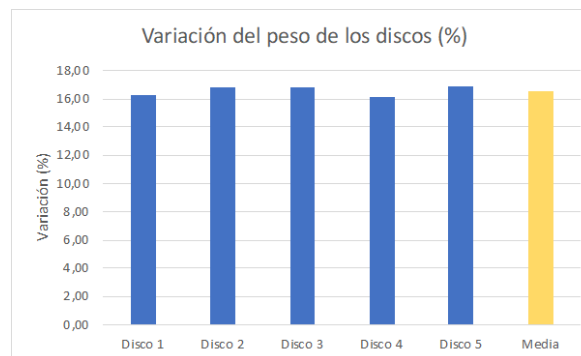


Figura 147. Resultados obtenidos de los discos de PLA+GO para una degradación de 1 mes

Fuente: Elaboración propia

- Resultados de los ensayos de pérdida de masa con 3 meses de degradación

PLA+GO	Peso antes ensayo (g)	Peso después ensayo (g)	Variación (%)
Disco 1	8,61	6,52	24,27
Disco 2	8,51	6,23	26,79
Disco 3	8,61	6,47	24,85
Disco 4	8,59	6,34	26,19
Disco 5	8,62	6,32	26,68
Media	8,59	6,38	25,76

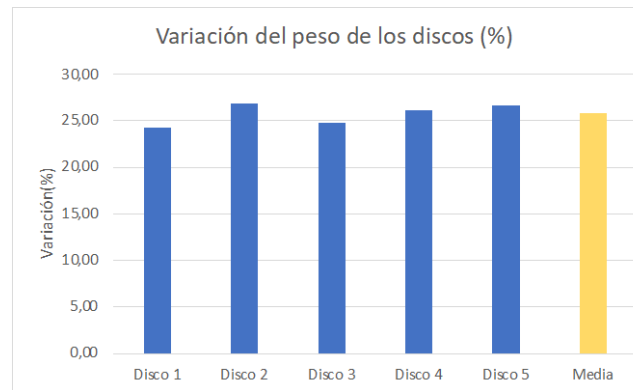


Figura 148. Resultados obtenidos de los discos de PLA+GO para una degradación de 3 meses

Fuente: Elaboración propia

5.4.3.1. Análisis de los ensayos de pérdida de masa de los discos de PLA+GO

En la siguiente gráfica se recoge la evolución de los valores de las medias para cada uno de los tiempos de degradación (Figura 149):

PLA+GO	Peso medio antes de ensayo (g)	Peso medio después de ensayo (g)	Variación (%)
1 semana	8,60	7,74	10,00
1 mes	8,60	7,17	16,63
3 meses	8,59	6,38	25,73

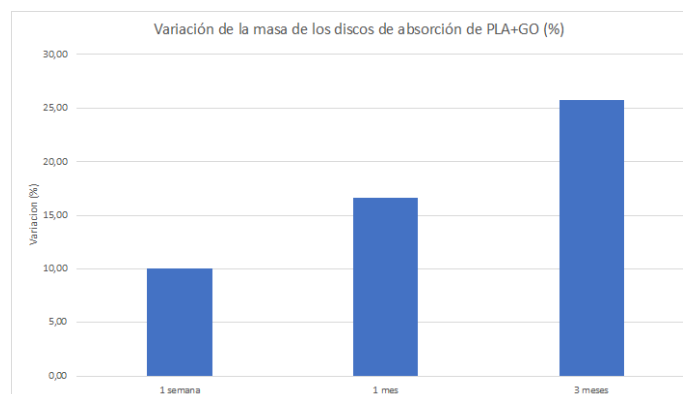


Figura 149. Resultados obtenidos de los discos de PLA+GO

Fuente: Elaboración propia

La mezcla de PLA+GO, según los resultados obtenidos, obtiene una degradación constante según el tiempo ensayado, más alta que en las mezclas anteriores.

5.4.4. Resultados de los ensayos de pérdida de masa sobre los discos de PLA+GNP

- Resultados de los ensayos de pérdida de masa con 1 semana de degradación

PLA+GNP	Peso antes ensayo (g)	Peso después ensayo (g)	Variación (%)
Disco 1	8,50	7,89	7,18
Disco 2	8,64	7,72	10,65
Disco 3	8,63	7,51	12,98
Disco 4	8,67	7,44	14,19
Disco 5	8,62	7,98	7,42
Media	8,61	7,71	10,50

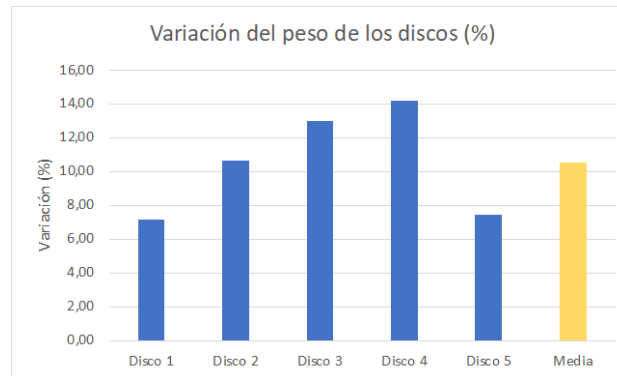


Figura 150. Resultados obtenidos de los discos de PLA+GNP para una degradación de 1 semana

Fuente: Elaboración propia

- Resultados de los ensayos de pérdida de masa con 1 mes de degradación

PLA+GNP	Peso antes ensayo (g)	Peso después ensayo (g)	Variación (%)
Disco 1	8,50	7,39	13,06
Disco 2	8,64	7,32	15,28
Disco 3	8,63	7,52	12,86
Disco 4	8,67	7,48	13,73
Disco 5	8,62	7,33	14,97
Media	8,61	7,41	13,98



Figura 151. Resultados obtenidos de los discos de PLA+GNP para una degradación de 1 mes

Fuente: Elaboración propia

- Resultados de los ensayos de pérdida de masa con 3 meses de degradación

PLA+GNP	Peso antes ensayo (g)	Peso después ensayo (g)	Variación (%)
Disco 1	8,47	6,54	22,79
Disco 2	8,38	6,69	20,17
Disco 3	8,46	6,65	21,39
Disco 4	8,43	6,59	21,83
Media	8,44	6,62	21,55

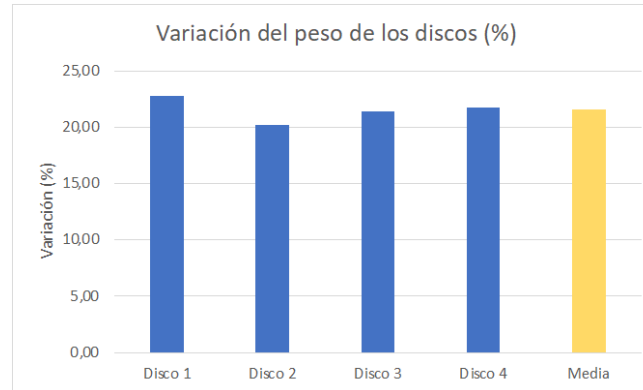


Figura 152. Resultados obtenidos de los discos de PLA+GNP para una degradación de 3 meses

Fuente: Elaboración propia

5.4.4.1. Análisis de los ensayos de pérdida de masa de los discos de PLA+GNP

En la siguiente gráfica se recoge la evolución de los valores de las medias para cada uno de los tiempos de degradación (Figura 153):

PLA+GNP	Peso medio antes de ensayo (g)	Peso medio después de ensayo (g)	Variación (%)
1 semana	8,61	7,71	10,45
1 mes	8,61	7,41	13,94
3 meses	8,44	6,62	21,56



Figura 153. Resultados obtenidos de los discos de PLA+GNP

Fuente: Elaboración propia

La mezcla de PLA y GNP, según los resultados obtenidos, obtiene una degradación menor que la mezcla anterior, pero muy similar a los resultados obtenidos para la mezcla de PLA y Grafeno.

5.4.5. Análisis de los resultados de los ensayos de pérdida de masa

A continuación, se analizarán todos los ensayos sobre los discos de absorción obtenidos. Como se puede ver en la siguiente gráfica (Figura 154). Se puede ver como todos los discos sufren una misma degradación para el ensayo de 1 semana. Para el caso de los discos de PLA, sufren una degradación constante de acuerdo con lo esperado, mientras que los discos que contienen algún tipo de nanomaterial aumentan su degradación, en los tiempos de ensayo siguientes a los ensayos de 1 semana con especial importancia aquellos discos que están hechos de GO, los cuales llegan a conseguir una degradación de 2 gramos.

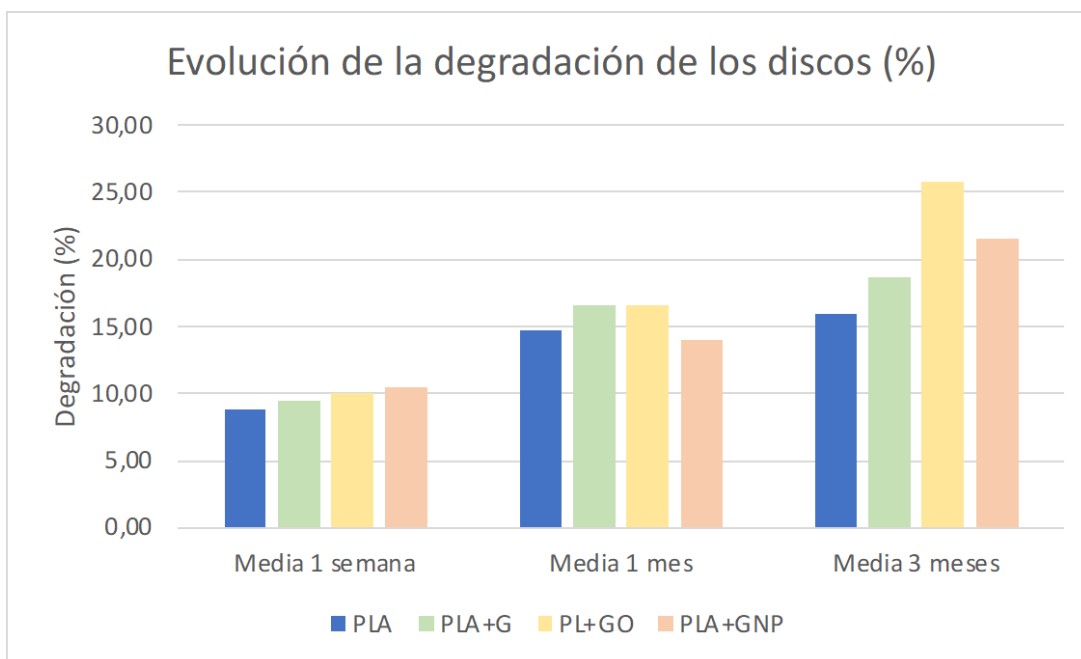


Figura 154. Evolución de las medias de la variación de la masa de los discos de absorción

Fuente: Elaboración propia

Los discos que están hechos sólo de PLA sufren una reducción máxima de su masa, conseguida en los ensayos de 3 meses de un 15,86%, los discos de PLA+G del 18,62%, los de PLA+GO del 25,73% y los discos hechos a partir de PLA+GNP del 21,56% (Figura 155).

	Variación del peso (%)			
	PLA	PLA+G	PL+GO	PLA+GNP
Media 1 semana	8,81	9,50	10,00	10,45
Media 1 mes	14,61	16,55	16,63	13,94
Media 3 meses	15,86	18,62	25,73	21,56

Figura 155. Datos totales de los ensayos de pérdida de masa

Fuente: Elaboración propia

Como sucede en los ensayos anteriores se podría afirmar que el grafeno ayuda a la degradación del PLA, ya que a pesar de que los valores de la masa de los discos de absorción disminuyan no lo hacen tanto como los discos en los que se encuentra algún tipo de nanomaterial, desatacando los discos hechos de GO que son los que sufren la mayor degradación, a diferencia de los ensayos de tracción donde el PLA+G era el material que conseguía una mayor degradación.

6. Conclusiones de los resultados obtenidos

- Los ensayos muestran que los nanomateriales ayudan a la degradación del PLA en todos los ensayos. Estos resultados son muy positivos ya que el PLA a pesar de ser biodegradable, su velocidad de degradación es muy baja, por lo que es muy interesante haber conseguido acelerar un poco esta degradación.
- Para los ensayos de tracción la mayor variación de la tensión soportada por las probetas fue para el caso de la mezcla PLA y Grafeno con una reducción del 71,74%.
- Para los ensayos de compresión sobre las scaffolds la mayor variación de la tensión soportada fue para el caso de la mezcla PLA y GNP con una reducción del 72,15%. De estos ensayos se destaca que las tensiones iniciales obtenidas de las scaffolds obtenidas a partir de algún tipo de nanomaterial no son muy altas respecto a las conseguidas inicialmente en las scaffolds de sólo PLA. Esto puede deberse a errores en la impresión, ya que es una estructura muy porosa, cuyos poros son muy pequeños.
- Para los ensayos de pérdida de masa la mayor variación de masa se consigue para los discos hechos a partir de PLA y GO con un 61,09% de pérdida de la masa inicial.
- En algunos ensayos se obtiene una alta desviación de los datos respecto a la media por lo que algunos resultados obtenidos no son fiables.
- Se necesita mejorar la impresión de las scaffolds para evitar errores en la fabricación que perjudican sus propiedades mecánicas.
- Según los resultados obtenidos el Grafeno, es el material más interesante para seguir investigando; tiene una mayor resistencia a tracción inicial y favorece la degradación

7. Futuras líneas de investigación

Durante la confección de este trabajo se han descubierto nuevos campos de investigación que necesitan ser estudiados para conseguir la aplicación final de este tipo de implantes óseos a los potenciales pacientes que los necesiten.

Algunos de estos nuevos campos de investigación pueden ser:

- Se debe de estudiar cómo van a interactuar las células del cuerpo humano con este nuevo tipo de piezas
- Se debe profundizar el grado de toxicidad que los distintos tipos de nanomateriales base carbono provocan en el cuerpo humano.
- Se debe de estudiar cómo mejorar la dispersión del nanomaterial utilizado en la matriz de PLA, ya que este paso es crítico para la obtención de piezas de calidad y buenas propiedades mecánicas.
- En cuanto a la fabricación de las scaffolds a partir de impresión 3D se necesita explorar nuevas técnicas, además de la impresión 3D por LCD como ha sido el caso de este TFM, para determinar cuál de estas técnicas ofrece una mejor calidad final.
- Otro campo para estudiar sería el de la inclusión de fármacos en las scaffolds y su liberación controlada.
- Finalmente, una vez se ha mejorado la forma de obtener scaffolds de calidad y conocido cuales son los efectos de los nanomateriales base carbono en el cuerpo humano se debería de estudiar el proceso para la fabricación en grandes cantidades de este nuevo tipo de implantes, en el menor tiempo y coste.

8. Bibliografía

1. Elsevier, Ecuador A. La medicina regenerativa: la cura del futuro (alzhéimer, párkinson, cáncer,...). Elsevier Connect. Accessed November 27, 2021. <https://www.elsevier.com/es-es/connect/ciencia/la-medicina-regenerativa-la-cura-del-futuro-alzheimer-parkinson-cancer>
2. Roldn Vasco et al. - 2016 - Ingeniera de tejidos y aplicaciones.pdf.
3. Sabino MA, Loaiza M, Dernowsek J, Rezende R. TÉCNICAS PARA LA FABRICACIÓN DE ANDAMIOS POLIMÉRICOS CON APLICACIONES EN INGENIERÍA DE TEJIDOS. :28.
4. Figueroa Hernández C. Ingeniería de Tejidos. Published online June 1, 2020.
5. Impresión 3D en resina (SLA/DLP) por Bitfab. Bitfab. Accessed November 27, 2021. <https://bitfab.io/es/impresion-3d-resina/>
6. 7 tipos de Resinas para Impresoras SLA/DLP/LCD. Accessed November 27, 2021. <https://impresora-3d.online/resina-3d/>
7. PLA | Acido Poliláctico - Polímeros termoplásticos, elastómeros y aditivos. Accessed November 27, 2021. <https://www.mexpolimeros.com/pla.html>
8. Daneshmandi L, Barajaa M, Tahmasbi Rad A, Sydlik SA, Laurencin CT. Graphene-Based Biomaterials for Bone Regenerative Engineering: A Comprehensive Review of the Field and Considerations Regarding Biocompatibility and Biodegradation. *Adv Healthc Mater.* 2021;10(1):2001414. doi:10.1002/adhm.202001414
9. UNE EN-ISO 52900.pdf.
10. Historia y Evolución de la Impresión 3D y las Impresoras. Accessed November 27, 2021. <https://impresioni3d.com/evolucion-de-la-impresion-3d/>
11. Historia de la impresión 3D: cómo empezó todo | Stratasy. Accessed July 5, 2022. <https://www.stratasy.com/es/explore/article/3d-printing-history>
12. Breve Historia de la impresión 3D - impresoras3d.com. Accessed July 5, 2022. <https://www.impresoras3d.com/breve-historia-de-la-impresion-3d/>
13. 3D Printing Day - Historia de la impresión 3D - Recreus. Accessed July 5, 2022. <https://recreus.com/es/noticias/aprende-con-recreus/3d-printing-day-historia-de-la-impresion-3d>
14. La creciente aceptación de la fabricación aditiva en la industria.3Dnatives.<https://www.3dnatives.com/es/>

15. La fabricación aditiva clave en la Industria 4.0 - Dynatec. Accessed July 5, 2022. <https://dynatec.es/2020/07/13/la-fabricacion-aditiva-clave-en-la-industria-4-0/>
16. -ES-The-2022-3D-Printing-Applications-Report.pdf. Accessed July 5, 2022. <https://media.formlabs.com/m/139ee4c2ee736f9a/original/-ES-The-2022-3D-Printing-Applications-Report.pdf>
17. Cinco ventajas de la impresión 3D | Stratasy. Accessed July 5, 2022. <https://www.stratasys.com/es/explore/article/five-benefits-of-3d-printing>
18. 10 limitaciones de la impresión 3D - [julio 2022]. Accessed July 5, 2022. <https://tu3dprintlab.club/limitaciones-de-la-impresion-3d>
19. Tipos de impresoras 3D: las 7 tecnologías de impresión 3D | All3DP. Accessed July 6, 2022. <https://all3dp.com/es/1/tipos-de-impresoras-3d-tecnologia-de-impresion-3d/>
20. Guía de impresión 3D mediante sinterizado selectivo por láser (SLS). Accessed July 6, 2022. <https://formlabs.com/es/blog/que-es-sinterizado-selectivo-laser/>
21. Sinterización selectiva por láser: todo lo que necesita saber sobre la impresión 3D SLS. Accessed July 6, 2022. <https://3dbuilders.pro/sinterizacion-selectiva-por-laser-todo-lo-que-necesita-saber-sobre-la-impresion-3d-sls/>
22. Hernández Castellano PM, ProQuest. *Tecnologías de fabricación aditiva*. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Servicio de Publicaciones y Difusión Científica; 2018. Accessed July 6, 2022. <https://elibro.net/ereader/elibrodemo/57246>
23. Curso de Resina Poliester 6, monómero de estireno | El blog de LosAbalorios.com. Accessed July 13, 2022. <http://losabalorios.com/blog/2013/10/curso-de-resina-poliester-6-monomero-de-estireno/>
24. Información técnica de los Fotoiniciadores para curado con luz uv. Accessed July 13, 2022. <https://www.cosmos.com.mx/wiki/fotoiniciadores-para-curado-con-luz-uv-dpdd.html>
25. Rubio MC, Guerrero LR. Diseño y fabricación de utillaje de sujeción mecánica mediante tecnologías de fabricación aditiva (Rapid Tooling). :143.
26. Guía completa: Deposición de energía directa - 3Dnatives. Accessed July 13, 2022. <https://www.3dnatives.com/es/guia-deposicion-de-energia-directa-100920192/>
27. Técnicas en impresión digital en 3D (4ª parte). Accessed July 13, 2022. <https://impresoras3dtop.com/tecnicas-en-impresion-digital-4a-parte/>
28. The future of 3D-printing: Strategic insight. Accessed July 7, 2022. <https://www.strategyand.pwc.com/gx/en/about/media/videos/2018/3d-printing.html>

-
29. 2019_ingenieria_tejidos_odontologia.pdf. Accessed July 8, 2022. https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/15222/3/2019_ingenieria_tejidos_odontologia.pdf
30. Quintanilla Cavia Susana.pdf. Accessed July 8, 2022. <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/11709/Quintanilla%20Cavia%20Susana.pdf?sequence=4>
31. Turnbull G, Clarke J, Picard F, et al. 3D bioactive composite scaffolds for bone tissue engineering. *Bioact Mater.* 2018;3(3):278-314. doi:10.1016/j.bioactmat.2017.10.001
32. Técnicas quirúrgicas y tipos de injerto de hueso: regeneración ósea - Centre Dental Puig&Baldrich. Accessed July 12, 2022. <https://puigbaldrich.com/tecnicas-tipos-injerto-hueso-regeneracion-osea/>
33. Lopez de Armentia S, del Real JC, Paz E, Dunne N. Advances in Biodegradable 3D Printed Scaffolds with Carbon-Based Nanomaterials for Bone Regeneration. *Materials.* 2020;13(22):5083. doi:10.3390/ma13225083
34. ¿Qué es lo que ha pasado con el grafeno? Promesas y avances que nunca llegaron | Tecnología - ComputerHoy.com. Accessed November 27, 2021. <https://computerhoy.com/reportajes/tecnologia/que-ha-quedado-grafeno-2018-promesas-avances-que-nunca-llegaron-302241>
35. El Grafeno: propiedades, características y aplicaciones | Blog SEAS. Accessed July 11, 2022. <https://www.seas.es/blog/automatizacion/el-grafeno-propiedades-caracteristicas-y-aplicaciones/>
36. Grafeno, una revolución a la energía sustentable. Accessed July 11, 2022. <https://es.slideshare.net/Berenice01061996/grafenouna-revolucin-a-la-energia-sustentable>
37. Daneshmandi L, Barajaa M, Tahmasbi Rad A, Sydlik SA, Laurencin CT. Graphene-Based Biomaterials for Bone Regenerative Engineering: A Comprehensive Review of the Field and Considerations Regarding Biocompatibility and Biodegradation. *Adv Healthc Mater.* 2021;10(1):2001414. doi:10.1002/adhm.202001414
38. Saini P, Arora M, Kumar MNVR. Poly(lactic acid) blends in biomedical applications. *Adv Drug Deliv Rev.* 2016;107:47-59. doi:10.1016/j.addr.2016.06.014
39. Roldán Vasco S, Vargas Isaza CA, Mejía Suaza ML, Zapata Giraldo J, Moncada Acevedo ME. *Ingeniería de tejidos y aplicaciones*. Instituto Tecnológico Metropolitano; 2016.
-

40. UNE EN-ISO 527-2.
41. D20 Committee. *Test Method for Water Absorption of Plastics*. ASTM International doi:10.1520/D0570-98R18
42. ¿Qué es desgasificación y para qué sirve? - Labprocess. Accessed August 10, 2022. <https://www.labprocess.es/que-es-desgasificacion-y-para-que-sirve>
43. Buffer de fosfatos (PBS): fundamento, preparación y usos. Accessed August 10, 2022. <https://www.lifeder.com/buffer-fosfatos/>
44. Agua desionizada: Usos prácticos y en el laboratorio - Cromtek. Accessed August 10, 2022. <https://www.cromtek.cl/2021/06/18/agua-desionizada-usos-practicos-y-en-el-laboratorio/>
45. Objetivos y metas de desarrollo sostenible – Desarrollo Sostenible. Accessed November 27, 2021. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

ANEXOS

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO I.....	150
ANEXO II.....	155

ANEXO I

OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

1. Introducción

Los objetivos de desarrollo sostenible también conocidos como “ODS”, son un grupo de medidas adoptadas por la Asamblea General de la ONU en 2015 dentro de la conocida como Agenda 2030. Estas medidas son el objetivo por cumplir para las siguientes dos décadas, y su misión es la de trazar un plan de acción en favor de las personas, el planeta, la prosperidad, la paz mundial y el acceso a la justicia⁴⁵.

Todos los países firmantes de esta agenda están de acuerdo en que el principal objetivo para conseguir un desarrollo sostenible es el de la erradicación de la pobreza.

Esta estrategia compromete a los países firmantes a la movilización de los medios necesarios y recurso propios para cumplir con dichos objetivos. A pesar de que la agenda implica un compromiso universal, cada uno de los países se enfrenta a distintos retos en busca de su propio desarrollo sostenible, por lo que la Agenda también especifica que los países seguirán teniendo plena soberanía sobre su riqueza, recursos y economía, fijando sus propias metas para cumplir con la Agenda.

A continuación, se presentan los diecisiete objetivos⁴⁵.

2. Las diecisiete Metas por conseguir

1. Fin de la Pobreza
2. Hambre y Seguridad Alimentaria
3. Salud y Bienestar
4. Educación de Calidad
5. Igualdad de Género
6. Agua Limpia y Saneamiento
7. Energía Asequible y No Contaminante
8. Trabajo Decente y Crecimiento Económico
9. Industria, Innovación e Infraestructuras
10. Reducción de las Desigualdades
11. Ciudades y Comunidades Sostenibles
12. Producción y Consumo Responsable
13. Acción por el Clima
14. Vida Submarina
15. Vida de Ecosistemas Terrestres
16. Paz Justicia e Instituciones Sociales
17. Alianza para lograr los objetivos.



Figura 156. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Fuente: <https://www.un.org>

3. Objetivos que este TFM puede cumplir

Como compromiso para poder cumplir estos objetivos durante la década de 2020, es muy importante que todas las instituciones de los países miembros estén unidas y comprometidas en esta misión.

Una de las medidas más importantes que se puede adoptar desde el Gobierno de cada país es dar a conocer estos ODS mediante la educación, ya sea desde edades tempranas, como en los últimos cursos de aprendizaje en la Universidad.

Mediante una correcta transmisión de la importancia que tiene cumplir con estos ODS, la sociedad en su conjunto puede aportar su granito de arena y conseguir esta meta de una forma más sencilla a la vez que nos hace mejores como sociedad.

Respecto a los objetivos que este TFM puede o tiene la intención de satisfacer son:

- Salud y Bienestar (ODS-3)
- Reducción de las desigualdades (ODS-10)

3.1. Salud y Bienestar (ODS-3)

El objetivo de este ODS es el de conseguir que el acceso al sistema sanitario sea universalmente gratuito independientemente de cuál sea el tipo de dolencia que el paciente tenga, así como el de un acceso sencillo a vacunas y fármacos.

Otra de las metas de este ODS es conseguir una correcta integración de las personas con alguna discapacidad en la sociedad mejorando su calidad de vida⁴⁵.

Una de las formas con las que se puede cumplir este ODS es con el aumento de la inversión en I+D permitiendo así una mayor capacidad para la investigación en la erradicación de enfermedades y la creación de vacunas.

Este TFM puede satisfacer el cumplimiento de este ODS, ya que tras realizar una correcta investigación y desarrollo de la tecnología utilizada (Diseño de Scaffolds e impresión 3D), la obtención de dichas Scaffolds puede resultar muy barata para el tratamiento de fracturas óseas en comparación con la tecnología utilizada en la actualidad.

3.2. Reducción de las desigualdades (ODS-10)

Este ODS está estrechamente relacionado con el cumplimiento del descrito anteriormente, ya que conseguir abaratar un tratamiento médico de tanta importancia como las fracturas óseas, puede permitir que más personas con este tipo de dolencias, que hasta ahora no podían costearse dichos tratamientos porque vivían en una situación de pobreza o desigualdad y simplemente se tomaban fármacos para aliviar el dolor, puedan acceder a un tratamiento completo para eliminar dichas dolencias.

Esto es posible ya que una de las características más importantes de la impresión 3D es la gestión eficiente de los recursos utilizados, además la mayoría de los productos fabricados con este tipo de tecnología es a partir de plásticos reutilizables, permitiendo aprovechar aún más los materiales y abaratando costes.

ANEXO II

Ficha técnica del PLA utilizado

Safety Data Sheet(SDS)

eResin-LC1001

Section 1. Product and Company Identification

Product identifier : eResin-LC1001
Chemical name : Not applicable
Other means of identification : Not available
Product type : liquid
Recommended use : 3D Printing
Company : Shenzhen Esun Industrial Co.,Ltd.
Website : www.brightcn.net
ADD : Wuhan University Building A403- I ,No.6 Yuexing2 Road,
Nanshan District, Shenzhen, China
Tel : (086)-0755-26031975
(086)-0755-26031982
E-mail : lj@brightcn.net

Section 2. Hazard(s) Identification

Classification of the substance or mixture:

LONG-TERM AQUATIC HAZARD- Category 4
SERIOUS EYE DAMAGE/EYE IRRITATION- Category 2
SKIN SENSITIZATION-Category 1
ACUTE TOXICITY- Category 4

GHS label elements:



Signal word : Warning
Hazard statements : H302-Swallowing poison
H317-May be harmful in contact with skin
H318 –Causes serious eye irritation
H401-Toxic to aquatic life

Precautionary statements

Prevention : P280-Wear protective gloves, eye and face protectors

Date : Feb.22 , 2019

Report No. : ESUN20190222-02-7E

Section 2. Hazard(s) Identification

P273- Avoid emissions into the environment

P261- Avoid breathing vapour

Response:

P305+P351+P338- If in eyes: Rinse cautiously with water for several minutes.If contact lenses are worn, remove and continue to rinse.

P337+P313 If eye irritation persists, get medical attention.

P302+P352 If on skin : Wash with plenty of soap and water.Please wash the contaminated clothes before reuse.

P308+P313 If it causes skin inflammation or rash;Please go to a doctor.

Storage: Not applicable

Disposal:

P501 Dispose of items and containers in accordance with local and national regulations.

Other hazards which do not result in classification: None known.

Section 3. Composition/Information on Ingredients

Substance/mixture: mixture

Chemical concentration: 100

Chemical Name	CAS No.	% by Weight
Polyurethane acrylate	25035-69-2	30%min
Monomer	13048-33-4	30%min
Photoinitiators	947-19-3	5%max
Color pigment		5%max

As far as the supplier is aware of the concentration, the health or safety aspects of this material have not been fully evaluated.

Section 4. First-Aid Measures

Description of necessary first aid measures

Eye contact:

If in eyes: rinse cautiously with water for a few minutes and always open the eyes and face.If you wear contact lenses, remove the contact lens and continue to rinse for 10 minutes.get medical attention.

Inhalation: Remove from site to air-conditioned area.If breathing is difficult, give oxygen and getmedical attention immediately.

Date : Feb.22 , 2019

Report No. : ESUN20190222-02-7E

Section 4. First-Aid Measures

Skin contact:

Remove contaminated clothing and rinse thoroughly with medical alcohol, soap and water.

Ingestion:

Drink enough warm water to induce vomiting.get doctor attention.

Indication of immediate medical attention and special treatment needed ,if necessary

Treat for symptoms.If large amounts of poison have been ingested or inhaled, contact a toxicology expert immediately.

Section 5. Fire-Fighting Measures

Dangerous characteristic:

If open fire, high heat combustible, and release toxic gases.When exposed to light, it reacts violently and gives off intense heat, turning the liquid into a solid.

Hazardous thermal decomposition product :

Carbon monoxide and carbon dioxide.

suitable:

Water mist, anti-ethanol foam, dry powder or carbon dioxide fire extinguishing.

Not suitable: None known.

Remarks:

Fire-fighters should wear appropriate protective equipment and self-contained breathing apparatus(SCBA) with a full face-piece operated in positive pressure mode.Move the container from the fire to an open area if possible.Spray water to keep the fire container cool until the endof the fire.Containers in a fire must be immediately discolored oraudible from a safety relief device.

Section 6. Accidental Release Measures

For emergency responders:

Please use chemical protective equipment.Avoid inhaling steam.Ensure adequate ventilation.Evacuate people to safe areas.Do not touch or walk past leaking

Date : Feb.22 , 2019

Report No. : ESUN20190222-02-7E

Section 6. Accidental Release Measures

material. When ventilation is insufficient, wear a respirator.

Environmental precautions:

Avoid dispersal of spilt material and runoff and contact with soil, waterways, drains and water bodies. Inform the relevant authorities if the product has caused environmental pollution.

Methods and materials for containment and cleaning up:

It is absorbed with inert adsorbent and treated as hazardous waste. Place in a suitable closed container for disposal

Section 7. Handling and Storage

Precautions for safe handling

Protective measures:

Closed operation. Operators must be specially trained and strictly abide by the operating procedures. It is suggested that operators should wear self-inhalation filter respirator, chemical safety glasses, protective clothing and rubber gloves.

Advice on general occupational hygiene :

Keep away from fire and heat. Smoking is strictly prohibited in the workplace. Use explosion-proof ventilation systems and equipment. Do not weld, cut, etc before removing liquid. Avoid contact with oxidants. The container and the transmission device need to be grounded to prevent static electricity. The filling speed should be controlled, and there is a grounding device to prevent the accumulation of static electricity. Equipped with the corresponding varieties and quantities of fire equipment and leakage emergency treatment equipment. Product residue (liquid) remains in empty containers and may be dangerous.

Conditions for safe storage:

Store in a cool, dry, ventilated place in a dark, airtight container. Prevent direct sunlight, and oxidant, acid, alkali and other separate storage, do not mix storage. The opened container must be re-sealed and held upright to prevent leakage. The storage area shall be provided with emergency equipment and

Date : Feb.22 , 2019

Report No. : ESUN20190222-02-7E

Section 7. Handling and Storage

suitable materials to deal with leakage.

Advice on storage temperature: 18-35°C

Section 8. Exposure Controls / Personal Protection

China MAC(mg/m³) : None known

TLV-STEL(mg/m³): None known

Allowable concentration of occupational exposure: None known

Engineering controls: The production process is closed. Ensure good natural ventilation and heat dissipation.

Respiratory protection: Advice in air breathing apparatus.

Eye protection: Wear chemical safety glasses.

Body protection : Wear protective clothing.

Hand protection : Wear rubber gloves.

Other protection : After work, shower and change. Pay attention to personal hygiene.

Section 9. Physical and Chemical Properties

Physical state: Liquid

Colour: Yellow, White, Red, Grass Green, Orange, Skin, Black, Gray, Green, Sky blue, Clear

Odor: slight, ester-like

Melting point: Not available

Boiling point : Not available

Flash point: Not available

Evaporation rate : Not available

Flammability: Not available

Vapour pressure: Not available

Vapour density: Not available

Decomposition temperature: Not available

viscosity: 250±50mPa·s (25°C)

Relative density (g/ml, $\rho_{\text{水}}=1$) : 1.104 (25°C)

Date : Feb.22 , 2019

Report No. : ESUN20190222-02-7E

Section 9. Physical and Chemical Properties

Solubility: Soluble in ethanol, ethyl acetate, benzene and other organic solvents,
insoluble in water

Section 10. Stability and Reactivity

Chemical stability: The product is stable

Hazardous decomposition products:

Under normal conditions of storage and use, hazardous decomposition products
should not be produced.

Conditions to avoid: Oxidizing acid, alkali and water; Strong illuminant

Possibility of hazardous reactions:

light may cause spontaneous violent chemical reaction, give off strong heat and
irritating gas, liquid into solid.

Hazardous decomposition products : Carbon monoxide and carbon dioxide

Section 11. Toxicological information

Acute toxicity: None known

Major irritant effects

Skin: Irritating to skin and mucous membranes

Eye: Stimulate an eye

Sensitisation : None known significant effects or critical hazards

Potential chronic health effects

Carcinogenicity: None known significant effects or critical hazards

Reproductive toxicity: None known significant effects or critical hazards

Consultations for sex: None known significant effects or critical hazards

Respiratory risk: None known significant effects or critical hazards

Symptoms associated with physical, chemical, and toxicological properties

Eye contact: Pain or irritation, tears, redness

The suction: No specific data

Skin contact: Excitement, redness

eat: No specific data

Date : Feb.22 , 2019

Report No. : ESUN20190222-02-7E

Section 12: Ecological Information

Water hazard category 1:

Do not expose undiluted or large products to groundwater, waterways or sewage systems. Do not release materials into the environment without permission.

Mobility in soil: Not available.

Other adverse effects : None known significant effects or critical hazards.

Section 13. Disposal Considerations

Disposal methods :

refer to relevant state, local and national regulations. Deliver the product to the hazardous waste handler. Must be dealt with in accordance with government regulations.

Uncleaned packaging:

The packaging should be discarded in accordance with official regulations.

Section 14. Transport Information			
	UN	IMDG	IATA
UN No.	Not regulated	Not regulated	Not regulated
UN proper shipping name	-	-	-
Hazard class(es)	-	-	-
Packing group	-	-	-
Environmental hazards	No	No	No
Marine Pollutant	No	No	No

Land transport(ADG):Not regulated for transport of dangerous goods.

Air transport(ICAO-IATA/DGR):Not regulated for transport of dangerous goods.

Sea transport(IMDG-Code/GGVSee):Not regulated for transport of dangerous goods.

Transport in bulk according to Annex II of MARPOL and the IBC code.

Transport within user's premises:always transport in closed containers that are upright and secure.Ensure that persons transporting the product know what to do in the event of an accident or spillage.

Date : Feb.22 , 2019

Report No. : ESUN20190222-02-7E

Section 15. Regulatory Information

Safety and environmental regulations for this product: no known national or regional regulation may regulate this product.

SARA302: no chemical in this material is subject to the SARA Title III section 302 reporting requirements. Subject to section 3, SARA, and section 40, section 372, part 372, of the superfund amendment and reauthorization act of 1986, this product does not contain chemicals that meet the reporting requirements under section 313.

California proposition 65: this product does not contain chemicals known to cause cancer in California.

Regulations on the safe administration of hazardous chemicals (promulgated by the state council on March 15, 2002), regulations on the safe use of chemicals in the workplace ([1996] issued by the ministry of labor no. 423) and other regulations have made corresponding provisions on the safe use, production, storage, transportation, loading and unloading of hazardous chemicals.

Section 16. Other Information

This information can only be used as a supplement to other information. Please use and protect the health and safety of your employees. This information is provided without warranty, and the user fails to use the product in accordance with the material safety data sheet, or USES it in connection with other products and operations at his own risk.

Filling department: r&d department

ADR: Accord européen sur le transport des marchandises dangereuses par

RouteIMDG: Route for the international matirisla of dangerous goods by sea

DOT: U.S. department of transportation

IATA: International air transport association

EINECS: European Inventory of Existing Chemical Substance

CAS: Chinese Academy of Sciences

VbF: Verordnung über brennbare Flüssigkeiten, Österreich

LC50: Lethal concentration, 50% lethal dose, 50%

Date : Feb.22 , 2019

Report No. : ESUN20190222-02-7E

vPvB: very Persistent and very Bioaccumulative

ACGIH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists (USA)

OSHA: Occupational safety and health administration (USA)

NTP: National Toxicology Program (USA)

IARC: International Agency for Research on Cancer

EPA: Environmental Protection Agency (USA)

安全数据单完

Date : Feb.22 , 2019

Report No. : ESUN20190222-02-7E

