

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y  
TECNOLOGÍA**

TRABAJO FIN DE GRADO

**FABRICACIÓN ADITIVA CON PLA. ESTUDIO  
DE PROPIEDADES SEGÚN SU  
MORFOLOGÍA DE RELLENO**

**Titulación**

Grado en Ingeniería Mecánica

**Autor**

Jaime Belda Rodríguez

**Tutores**

José Antonio Valido García

José Miguel Cáceres Alvarado

Julio, 2023



**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**FABRICACIÓN ADITIVA CON PLA. ESTUDIO  
DE PROPIEDADES SEGÚN SU MORFOLOGÍA  
DE RELLENO**

## **INDICE GENERAL**

**Titulación**

Grado en Ingeniería Mecánica

**Autor**

Jaime Belda Rodríguez





## Índice General

<b>MEMORIA .....</b>	<b>3</b>
Índice Memoria.....	5
<b>ANEXOS .....</b>	<b>103</b>
Índice Anexos .....	105



Jaime Belda Rodríguez

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**

TRABAJO FIN DE GRADO

**FABRICACIÓN ADITIVA CON PLA. ESTUDIO  
DE PROPIEDADES SEGÚN SU MORFOLOGÍA  
DE RELLENO**

**MEMORIA**

**Titulación**

Grado en Ingeniería Mecánica

**Autor**

Jaime Belda Rodríguez



## Índice Memoria

<b>0. Hoja de Identificación .....</b>	<b>7</b>
<b>1. Resumen .....</b>	<b>8</b>
<b>2. Abstract .....</b>	<b>9</b>
<b>3. Objeto del Proyecto .....</b>	<b>10</b>
<b>4. Alcance del Proyecto.....</b>	<b>11</b>
<b>5. Antecedentes del proyecto.....</b>	<b>13</b>
<b>6. Introducción a la fabricación aditiva.....</b>	<b>16</b>
6.1 Historia de la fabricación aditiva .....	16
6.2 Técnicas de fabricación aditiva.....	17
6.2.1 <i>Fusión por lecho en polvo</i> .....	18
6.2.2 <i>Inyección de aglutinante</i> .....	19
6.2.3 <i>Extrusión</i> .....	20
6.2.4 <i>Inyección de material</i> .....	22
6.2.5 <i>Deposición de energía dirigida</i> .....	23
6.2.6 <i>Laminación por capas</i> .....	24
6.2.7 <i>Fotopolimerización en tanque</i> .....	25
6.3 Rellenos .....	26
6.3.1 <i>Modelos y figuras (baja dureza)</i> .....	27
6.3.2 <i>Impresiones 3D estándar (dureza media)</i> .....	28
6.3.3 <i>Impresiones 3D funcionales (alta dureza)</i> .....	30
6.3.4 <i>Impresiones 3D flexibles</i> .....	32
6.4 Materiales.....	33
6.4.1 <i>Ácido Poliláctico (PLA)</i> .....	34
6.4.2 <i>Tereftalato de Polietileno modificado con Glicol (PETG)</i> .....	34
6.4.3 <i>Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS)</i> .....	35
6.4.4 <i>Nylon</i> .....	36
6.4.5 <i>Elastómeros Termoplásticos (TPE)</i> .....	36
6.4.6 <i>Plástico de Policarbonato (PC)</i> .....	37
6.5 Aplicaciones.....	37
6.5.1 <i>Productos de consumo electrónicos</i> .....	38
6.5.2 <i>Automoción</i> .....	39
6.5.3 <i>Medicina</i> .....	40
6.5.4 <i>Aeroespacial</i> .....	42
<b>7. Introducción a los ensayos a compresión.....</b>	<b>43</b>

7.1 Aplicaciones.....	44
<b>8. Equipamiento empleado .....</b>	<b>46</b>
8.1 Impresora 3D .....	46
8.2 Estación meteorológica.....	47
8.3 Envasadora al vacío .....	48
8.4 Báscula.....	48
8.5 Pie de rey .....	49
8.6 Máquina universal de ensayos .....	49
<b>9. Impresión de probetas.....</b>	<b>51</b>
9.1 Selección del filamento.....	51
9.2 Diseño de las probetas .....	52
9.3 Selección de los parámetros de impresión.....	52
9.4 Fabricación de las probetas.....	55
9.5 Problemas surgidos durante la impresión .....	58
<b>10. Ensayo de resistencia a compresión .....</b>	<b>66</b>
10.1 Mediciones de las probetas .....	66
10.2 Puesta a punto de la máquina de ensayos .....	67
10.3 Creación del método de ensayo a utilizar .....	67
10.4 Realización del ensayo.....	68
<b>11. Análisis de los resultados .....</b>	<b>70</b>
11.1 Concentric .....	70
11.2 Grid .....	72
11.3 Lines.....	74
11.4 Triangles.....	76
11.5 Zigzag.....	78
11.6 Comparación General .....	80
11.7 Comparación con datos anteriores .....	85
<b>12. Conclusiones.....</b>	<b>87</b>
<b>13. Conclusions .....</b>	<b>88</b>
<b>14. Líneas futuras de trabajo.....</b>	<b>89</b>
<b>15. Bibliografía.....</b>	<b>90</b>
<b>16. Glosario de términos .....</b>	<b>95</b>
<b>17. Índice de figuras .....</b>	<b>98</b>
<b>18. Índice de tablas .....</b>	<b>101</b>

## 0. Hoja de Identificación

### Proyecto

---

- **Título:** “Fabricación aditiva con PLA. Estudio de propiedades según su morfología de relleno”

### Peticionario

---

- **Cliente:** Universidad de La Laguna (Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología)
- **Dirección:** Camino San Francisco de Paula, s/n. Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología. Apartado 456.
- **Localidad:** San Cristóbal de La Laguna
- **C.P.:** 38200
- **Provincia:** Santa Cruz de Tenerife
- **Teléfono de contacto:** 922318220
- **Email:** [iindustri@ull.es](mailto:iindustri@ull.es)

### Autor

---

- **Nombre:** Jaime Belda Rodríguez
- **DNI:** 79093207W
- **Teléfono:** 605561110
- **Email:** [alu0101240473@ull.edu.es](mailto:alu0101240473@ull.edu.es)

## 1. Resumen

Hoy en día la impresión 3D cada vez toma más importancia en la sociedad, esto se debe a que ofrece una amplia gama de beneficios en diversos campos. En primer lugar, destaca la posibilidad de personalización ya que nos permite imprimir objetos a medida y adaptados a las necesidades individuales. Otro beneficio importante de la impresión 3D es la capacidad de realizar prototipado rápido, esto permite crear rápidamente prototipos de productos, acelerando el proceso de diseño y desarrollo, eliminando la necesidad de herramientas y moldes costosos, lo que reduce los costos asociados y permite una mayor agilidad en la iteración del diseño. La impresión 3D también permite la fabricación de objetos con formas y geometrías complejas que serían difíciles o incluso imposibles de lograr mediante métodos convencionales.

Sin embargo, para poder hacer un adecuado uso de los objetos impresos, se deben conocer sus propiedades mecánicas, las cuales varían mucho en función de los parámetros de impresión elegidos. Es por ello, que en el siguiente Trabajo Fin de Grado se ha estudiado como influye en el comportamiento de las propiedades de resistencia a compresión, la alteración de los parámetros de relleno.

Este trabajo es una continuación al realizado por Gonzalo Lugo Velázquez en 2022, en este caso, el utilizó los patrones de relleno giroide, octeto, cúbico, cúbico bitruncado y subdivisión cúbica con densidades del 10, 20, 30, 40 y 50 %. En esta continuación, se han estudiado los patrones grid, zigzag, lines, triangles y concentric, para las mismas densidades de relleno que en el anterior trabajo.

De esta forma, se podrá tener una idea bastante completa de las capacidades mecánicas a compresión del material PLA fabricado por medio de impresión FDM, lo cual puede servir de mucha utilidad para saber en qué condiciones puede ser recomendable utilizarlo frente a otros materiales tradicionales.



## 2. Abstract

Nowadays, 3D printing is increasingly gaining importance in society due to its wide range of benefits in various fields. Firstly, the ability to customize stands out as it allows us to print objects tailored to individual needs. Another significant benefit of 3D printing is the capability for rapid prototyping, enabling quick creation of product prototypes and accelerating the design and development process. This eliminates the need for expensive tools and molds, reducing associated costs and facilitating design iteration. Moreover, 3D printing enables the fabrication of objects with complex shapes and geometries that would be difficult or even impossible to achieve using conventional methods.

However, to properly utilize the printed objects, it is necessary to understand their mechanical properties, which can vary greatly depending on the chosen printing parameters. Therefore, this following Bachelor's thesis focuses on studying how the alteration of infill parameters influences the compressive strength properties.

This work is a continuation of the research conducted by Gonzalo Lugo Velázquez in 2022, where he used gyroid, octet, cubic, truncated cubic, and subdivided cubic infill patterns, testing each with densities of 10%, 20%, 30%, 40%, and 50%. In this continuation, grid, zigzag, lines, triangles, and concentric patterns have been studied, using the same infill densities as in the previous work.

By doing so, a comprehensive understanding of the compressive mechanical capabilities of PLA material manufactured through FDM printing can be obtained. This information can be highly valuable in determining under which conditions it may be recommended to use PLA compared to other traditional materials.

### **3. Objeto del Proyecto**

El objetivo del siguiente proyecto es el estudio del cambio de la propiedad de resistencia a compresión de distintas probetas, alterando su estructura y densidad internas.

Para poder realizar este análisis, previamente deberán ser fabricadas las distintas probetas, en este caso se hará por medio de impresión 3D tipo FDM, usando PLA como material de impresión. A continuación, se ensayarán las piezas a compresión, para su posterior análisis y comparación de los distintos resultados obtenidos.

A su vez, a lo largo de este proyecto, se aprovecha para hacer una recopilación de información que explica de forma detallada numerosos aspectos teóricos referentes a la impresión 3D y a los ensayos a compresión, lo cual asentará una buena base de conocimientos para posteriormente poder hacer los correctos análisis y conocer en profundidad el temario tratado en este Trabajo Fin de Grado.

## 4. Alcance del Proyecto

El alcance del siguiente proyecto no es otro que el de ofrecer un estudio específico de la variación de las propiedades mecánicas de una serie de probetas, dependiendo de su densidad y estructuras internas. Este proyecto es la continuación de un Trabajo Fin de Grado, y su alcance es muy amplio ya que posee una gran variedad de líneas de trabajo por las que poder desarrollarlo.

Este proyecto ha sido promovido y financiado por la Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología de la Universidad de La Laguna, en concreto por el área de conocimiento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, del departamento de Ingeniería Industrial.

Cabe destacar que este proyecto es una continuación del trabajo de fin de grado titulado “Resistencia a compresión de probetas fabricadas en PLA con distinto relleno” [1] realizado en el año 2022 por Gonzalo Lugo Velázquez, por lo que se han intentado reproducir sus procedimientos de la forma más precisa posible, para posteriormente poder comparar ambos trabajos.

De esta forma el alcance del proyecto será el siguiente:

- **Selección del filamento:** elección del filamento con el que se van a realizar las probetas, en función al elegido anteriormente.
- **Diseño de las dimensiones de las probetas:** elección de las medidas de las probetas de acuerdo con lo más indicado para nuestro análisis.
- **Diseño de la probeta en Solidworks:** creación de las probetas que se desea comprobar en el software de diseño 3D Solidworks, con las medidas anteriormente seleccionadas.
- **Importación del archivo STL al software Ultimaker Cura:** extracción del archivo al software que utiliza la impresora 3D
- **Selección de los parámetros de impresión:** elegir los parámetros adecuados para que el estudio de las propiedades de compresión, alterando el relleno de las probetas, sea el óptimo.
- **Obtención del G-Code:** se extrae el G-Code del programa, con los parámetros de impresión deseados.

- **Preparación de la impresora:** se limpia el interior de la impresora con un filamento de limpieza, se nivela la cama y se coloca el filamento con el que se desea imprimir.
- **Impresión de las probetas:** se aplica el adhesivo en la cama, se selecciona el archivo que se quiera imprimir, y una vez precalentada la cama y la boquilla comenzará la impresión.
- **Etiquetado y envasado al vacío de las probetas:** se escribe en la bolsa al vacío los datos de las probetas y posteriormente se envasan para conservar sus propiedades hasta el momento de su ensayo.
- **Pesado y medición de las probetas:** se pesan todas las probetas para comprobar que no ha habido error en su impresión y se toman las medidas de las aristas para conocer el área de contacto de la probeta con los platos de compresión
- **Configuración de la máquina de ensayos:** se dispone la máquina en el tipo de ensayo que se desee, en este caso a compresión, se retiran las protecciones y se enciende.
- **Diseño del método de ensayo:** se seleccionan los parámetros de ensayo de las probetas, en este caso velocidad de 1 mm/min y desplazamiento máximo de 7,5 mm.
- **Realización de los ensayos:** se coloca la probeta en el centro de los platos de compresión, se ajustan para que hagan contacto con ella, se hace cero el alargamiento y se comienza el ensayo.
- **Obtención de valores y gráficas:** con los valores obtenidos se calcula la tensión (MPa) y la deformación (%) de la probeta y se representa en una gráfica.
- **Análisis de los resultados:** se analizan los distintos resultados obtenidos
- **Conclusiones**

## 5. Antecedentes del proyecto

Debido al desarrollo que están experimentando las tecnologías de impresión 3D, cada vez se hacen más estudios sobre las propiedades de los materiales, rellenos y parámetros de impresión, en búsqueda de aportar información para conocerlos mejor.

El principal antecedente de este trabajo, y en torno al cual ha girado ya que es una continuación de este, es el trabajo de fin de grado titulado “Resistencia a compresión de probetas fabricadas en PLA con distinto relleno” [1] realizado en el año 2022 por Gonzalo Lugo Velázquez, en este trabajo de investigación, se examina el impacto de los parámetros de patrón y densidad de relleno en la resistencia a compresión de piezas fabricadas con ácido poliláctico (PLA), utilizando una impresora 3D de tipo FDM. Se realizaron impresiones de probetas cúbicas con diferentes patrones de relleno (giroide, octeto, cúbico, cúbico bitruncado, subdivisión cúbica) y densidades (10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %), manteniendo los demás parámetros constantes. A continuación, se sometieron las probetas a ensayos de compresión para evaluar su resistencia, así como otras propiedades de interés. Además de los parámetros de patrón y densidad de relleno, también se consideraron el tiempo de impresión y la cantidad de filamento utilizado. Al analizar todos estos parámetros en conjunto, fue posible determinar la combinación óptima de patrón de relleno y densidad para lograr la resistencia a compresión deseada.

En el artículo “Influencia del porcentaje de relleno en la resistencia mecánica en impresión 3D, por medio del método de Modelado por Deposición Fundida (FDM)” [2] publicado en 2016 por Kenny L. Alvarez C, Rodrigo F. Lagos C. y Miguel Aizpun, se investigó la influencia del porcentaje de relleno en la resistencia a la tracción de piezas fabricadas con ABS utilizando una impresora Makerbot Replicator 2X. Se fabricaron y ensayaron probetas específicas para pruebas de tracción, variando el porcentaje de relleno mientras se mantenían constantes los demás parámetros. A través de los ensayos, se obtuvieron datos sobre la resistencia a tracción, lo que permitió evaluar la influencia del porcentaje de relleno en esta propiedad mecánica. Además, se analizó el tiempo efectivo de impresión para establecer un rango recomendado de impresión en función de este parámetro, considerando también la resistencia a tracción. Se observó que el porcentaje de relleno máximo (100%) resultó en una resistencia a la tracción promedio de 34,57 [MPa].

En el trabajo fin de grado “Estudio sobre la optimización de los parámetros de fabricación en una impresora 3D con tecnología FDM” [3] realizado por Martí Rodríguez, Bernat en 2017, se examina detalladamente el comportamiento mecánico de objetos fabricados utilizando la tecnología de fabricación aditiva de tipo FDM, con el material "Timberfill" de Fillamentum. Este material tiene como objetivo principal imitar la apariencia de objetos de madera, gracias a su composición de polímeros biodegradables combinados con fibras de madera. Para comprender mejor el comportamiento mecánico de este material, se realizó un análisis experimental utilizando un enfoque de Diseño de Experimentos (DOE). Mediante este, se obtuvieron una serie de resultados que permiten predecir cómo se verá afectado el comportamiento mecánico de las piezas fabricadas al modificar diferentes parámetros estudiados, lo que permitirá optimizar el proceso de fabricación y ajustar los parámetros para lograr resultados deseados en términos de propiedades mecánicas.

También se encuentra que en el trabajo fin de grado “Estudio y caracterización de propiedades mecánicas de piezas compuestas de Fibras Carbono y Nylon producidas mediante impresión 3D” [4] hecho por Patiño Crespo, Geovanny David, en septiembre de 2022, se llevó a cabo una investigación y caracterización de las propiedades mecánicas del material PA12 utilizado en piezas compuestas impresas mediante tecnología de impresión 3D. Los datos obtenidos revelan que la configuración óptima para una pieza impresa en 3D depende de la calidad, el patrón y el porcentaje de relleno, en combinación con el uso de un filamento de PA12 compuesto por un 15% de fibra de carbono y un 85% de nylon. Se determinó que una altura de capa de 0.15 mm es preferible debido a la baja altura de adherencia entre capas, lo que contribuye a una mejor calidad de la pieza impresa. El patrón de relleno concéntrico se encontró como la opción más adecuada, ya que su estructura entrelazada proporciona una mayor resistencia a la pieza. Además, se recomienda utilizar un porcentaje de relleno del 90%, ya que esto permite ocupar un mayor espacio entre las líneas de relleno, lo que resulta en una configuración estable y óptima para el material PA12.

Como último antecedente que se proporcionará, se encuentra el proyecto “Comparación tecnológica de patrones de relleno en impresión 3D por extrusión usando simulación” [5] publicado en 2021 por Acosta Camacho, et al. En este proyecto se llevó a cabo una comparativa tecnológica de las cualidades físicas y mecánicas de 10 patrones de relleno, determinando las propiedades mecánicas que cada patrón de relleno aporta a un objeto

impreso en 3D. Se siguieron las normas ISO 527 para ensayos de tensión y la norma ISO 604 para ensayos de compresión. En el estudio, se aplicaron respectivamente fuerzas fijas de 9 MPa y 33 MPa para los ensayos de compresión y tensión en todas las probetas. Finalmente se observó que el patrón de relleno Curva de Hilbert mostró un buen desempeño en el ensayo de tensión, sin embargo, en el ensayo de compresión sus propiedades mecánicas disminuyeron en comparación con otros patrones. Por el contrario, el patrón HoneyComb mostró un buen rendimiento en el ensayo de compresión. Los patrones de relleno como concéntrico, rectilíneo, HoneyComb y Grid, que presentan líneas rectas distribuidas en toda la probeta, mostraron un comportamiento promedio tanto en tensión como en compresión. Concluyendo que estos patrones son adecuados para aplicaciones que requieran resistencia tanto a la tensión como a la compresión de manera simultánea. Sin embargo, los patrones de relleno con diseño espiral no proporcionaron buenas características mecánicas en respuesta a estímulos de tensión y compresión.

## **6. Introducción a la fabricación aditiva**

La impresión 3D o fabricación aditiva consiste en la creación de objetos físicos en tres dimensiones a partir de la superposición de capas de material, siguiendo un modelo digital previamente creado. A diferencia de la fabricación sustractiva, que implica la eliminación de material de un bloque, la fabricación aditiva combina varias piezas para construir el objeto final.

Este proceso es utilizado principalmente por ingenieros, arquitectos y jefes de obra como una alternativa al dibujo manual. La fabricación aditiva permite a los usuarios crear diseños en 3D, lo que facilita la visualización de la construcción y posibilita la optimización, modificación y desarrollo del proceso de diseño. Con esta herramienta, los ingenieros pueden realizar representaciones más precisas y modificarlas con mayor facilidad, lo que resulta en una mejora en la calidad del diseño. [6]

### 6.1 Historia de la fabricación aditiva

El concepto de fabricación aditiva se remonta a los años 80, cuando el Dr. Kodama del Instituto Municipal de Investigación Industrial de Nagoya desarrolló una técnica de prototipado rápido a través de la fabricación de un objeto capa a capa. Años después, en 1984, un equipo de investigación francés presentó la primera patente, que, sin embargo, fue abandonada más tarde.

En 1986, el ingeniero Chuck Hull retomó la idea y presentó la primera patente comercial de una técnica llamada "Estereolitografía", que utilizaba resina líquida como material de impresión solidificado bajo la luz ultravioleta. Hull se convirtió en el fundador de 3D Systems y la Estereolitografía fue el comienzo de lo que hoy conocemos como la cuarta revolución industrial. Se identificaron rápidamente las aplicaciones de la impresión 3D en sectores tan diversos como la medicina, la industria, la aeronáutica, el arte y la joyería.

Desde entonces, la fabricación aditiva ha evolucionado y ha ganado cada vez más protagonismo. A la técnica de Estereolitografía se le han sumado otras más avanzadas, como Sinterización Selectiva por Láser (Selective Laser Sintering - SLS), modelado por deposición fundida (Fused Deposition Modeling - FDM), inyección de aglutinante (Binder Jetting), sinterización de metal por láser directo, fusión por haz de electrones e impresión por procesamiento de luz digital (Digital Light Processing - DLP).



Hoy en día, los centros de producción aditiva seleccionan la tecnología más adecuada para cada sector o pieza en función de diversos factores, como la funcionalidad de la pieza o el material utilizado (polímeros o aleaciones metálicas). [7]

## 6.2 Técnicas de fabricación aditiva

Existen diversas tecnologías que permiten la construcción de piezas capa a capa y se encuentran en distintas etapas de desarrollo. Debido a la necesidad de adaptarse a distintos materiales, mejorar los tiempos de construcción y aumentar la resistencia de las piezas, han surgido diversas tecnologías.

Algunas de estas tecnologías ya están disponibles comercialmente para la fabricación de prototipos, mientras que otras están en proceso de convertirse en formas viables de producción y se están desarrollando constantemente nuevas tecnologías. [8]

Cada tecnología utilizada en las impresoras 3D está dirigida a un público específico, ya que no todas son adecuadas para alcanzar el mismo resultado. Además, el precio varía mucho según la tecnología, lo que significa que dependiendo de la cantidad, calidad y tamaño de las piezas que se deseen obtener, una impresora 3D puede ser más adecuada que otra. Debido a estos factores, es complicado determinar cuáles son las mejores impresoras 3D disponibles en el mercado, ya que la mejor opción para cada individuo dependerá de sus necesidades particulares. [9]

Hay varios métodos o procedimientos para crear piezas mediante fabricación aditiva, que permiten obtener piezas funcionales con una amplia variedad de materiales, como metales, cerámicas, polímeros (plásticos) y sus combinaciones. La organización ASTM, a través de su norma F42,[10] identifica 7 categorías o procesos distintos para crear piezas mediante fabricación aditiva. [11]

- Fusión por lecho de polvo
- Inyección de aglutinante
- Extrusión
- Inyección de material
- Deposición de energía dirigida
- Laminación por capas
- Fotopolimerización en tanque

Las técnicas nombradas serán explicadas a continuación de forma más detallada.

### *6.2.1 Fusión por lecho en polvo*

La fusión por lecho de polvo es una tecnología costosa de fabricación aditiva, a no ser que esta sea subcontratada, y se usa en su mayoría en aplicaciones comerciales e industriales. Tanto los procesos de metal como los de polímeros pueden utilizarse para piezas finales y de prototipado rápido.

Para utilizar esta tecnología, se necesita crear un archivo CAD 3D y cargarlo en la máquina. El proceso comienza calentando el lecho de polvo hasta que alcance una temperatura constante. Luego, la máquina comienza a dibujar la primera capa de la pieza o los elementos de soporte y, al hacerlo, fusiona las partículas de polvo. Este proceso continúa capa por capa hasta que se completa la pieza.

Los procesos de fusión por lecho de polvo de metal requieren estructuras de soporte para fijar la pieza a la plataforma de fabricación. De lo contrario, las piezas se curvarían hacia arriba debido a las tensiones internas durante el proceso de fusión.

En cambio, los procesos de fusión por lecho de polvo basados en polímeros no necesitan estructuras de soporte.

Para lograr una calidad de acabado de superficie adecuada, se requiere un postprocesamiento en la mayoría de las piezas fabricadas mediante fusión por lecho de polvo. En el caso de las piezas de metal, se debe realizar un tratamiento térmico para reducir las tensiones internas y retirar las estructuras de soporte antes de aplicar el postprocesamiento adicional. Mientras que, en el caso de las piezas de plástico, se eliminan del lecho de polvo sin fundir y se utiliza un chorro de arena para eliminar el exceso de material y lograr un acabado uniforme de la superficie.

Los materiales más utilizados en esta técnica de fabricación aditiva son entre otros el aluminio, el cromo cobalto (Cr-Co), el inconel, el acero inoxidable (316L), el nilón (SLS y MJF), el nilón con relleno de vidrio (SLS) y el nilón con relleno de carbono (SLS).[12]

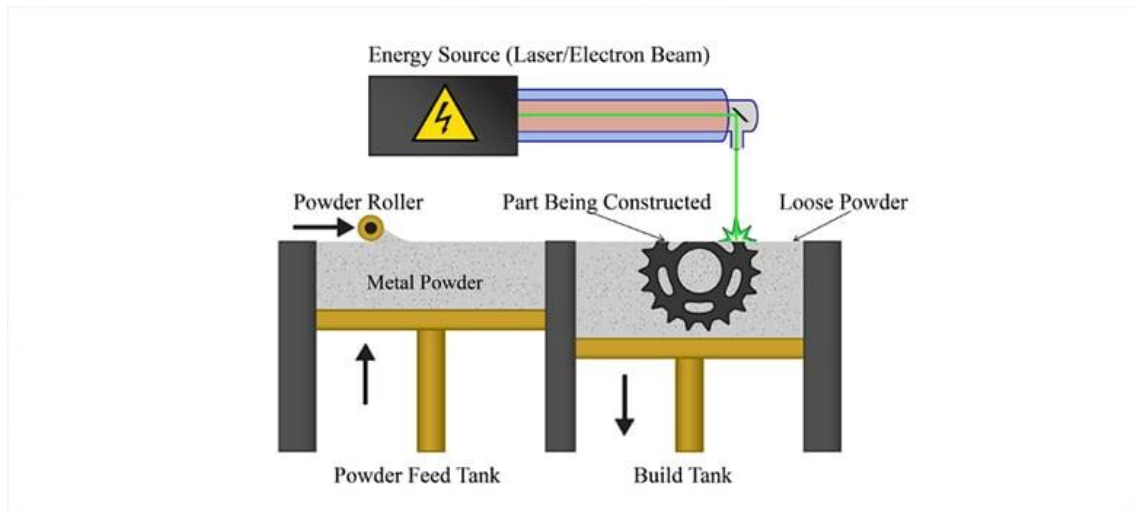


Figura 6.1. Fusión por lecho en polvo [13]

### 6.2.2 Inyección de aglutinante

La impresión con tecnología de aglutinación consiste en rociar un agente aglutinante líquido sobre un lecho de polvo que se solidifica en sección transversal, utilizando materiales como yeso, arena, cerámicas, metales y polímeros en gránulos.

Para comenzar el proceso de impresión, es necesario diseñar el objeto o pieza en un software CAD y enviar la información sobre las capas horizontales al cabezal de impresión. La impresión comienza colocando la primera capa de polvo a través del rodillo en la plataforma de construcción, donde se añade el agente aglutinante en forma de gotas de 80  $\mu\text{m}$ . El proceso se repite hasta que la pieza está completamente formada.

Después de la impresión, es necesario liberar las piezas del encapsulamiento de polvo y curarlas para aumentar su resistencia. Los restos de polvo se eliminan con un cepillo o aire presurizado. Para ciertos materiales, como los metales, puede ser necesario un paso adicional, como la sinterización o la infiltración de bronce.

La impresión con esta tecnología permite imprimir con varios materiales, incluyendo aleaciones metálicas, y recientemente se ha añadido la posibilidad de imprimir con algunos polímeros termoplásticos y poliamidas. Se ha desarrollado también, la capacidad de impresión con arena, el cuál es el único material que no requiere un procesamiento adicional final.[14]

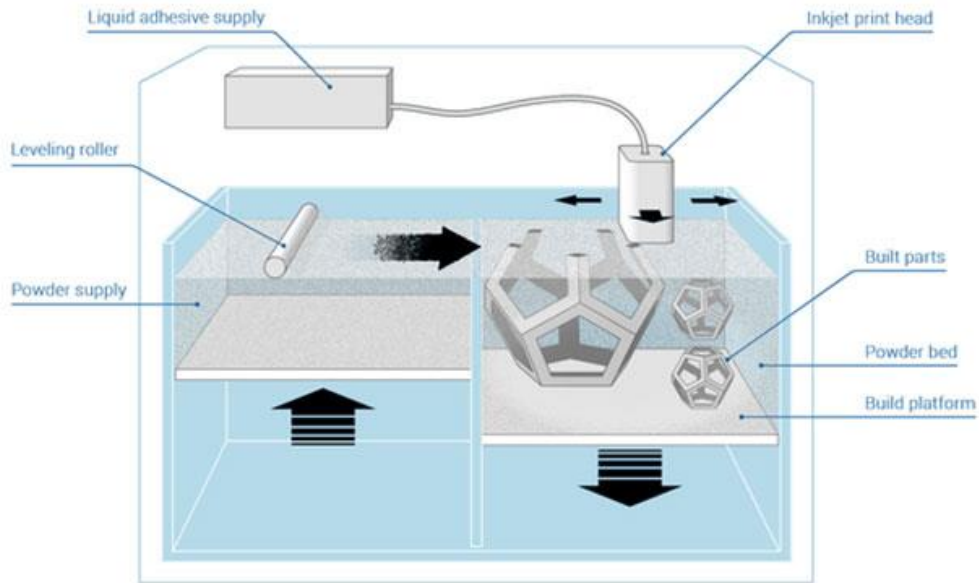


Figura 6.2. Inyección por aglutinante [14]

### 6.2.3 Extrusión

La técnica de extrusión de materiales, también conocida comúnmente como FDM o FFF, es ampliamente conocida y utilizada, siendo posiblemente la tecnología más popular entre los aficionados y las impresoras de sobremesa, representando más del 90% del mercado. Además, es la opción más común en el entorno profesional, con un uso del 36% en la industria, según el informe "The state of 3D printing 2020" de Sculpteo.[15]

Para llevar a cabo esta técnica, un motor paso a paso empuja el filamento desde la bobina hasta que sale por la boquilla del extrusor. Luego, el material se calienta en el extrusor para fundirlo y depositarlo en pequeñas cantidades a través de la boquilla. El extrusor es capaz de moverse en las direcciones xz, para depositar una capa de material sobre la cama, la cual se mueve en el eje y. Después de imprimir la primera capa, se mueve ligeramente hacia arriba para imprimir la siguiente capa sobre ella. Además, la impresora suele incluir tubos de guía y engranajes para garantizar el correcto movimiento del filamento durante todo el proceso de impresión.

La precisión de la impresora y la calidad del producto fabricado dependen de varios factores, como la precisión del motor, la altura de cada capa, el ancho de la boquilla del extrusor y la precisión en el movimiento del extrusor. Todos estos factores son ajustables mediante el software controlador de la impresora, lo que ofrece al usuario una amplia

variedad de opciones para imprimir con diferentes niveles de calidad y velocidad, siempre limitado por la capacidad física del hardware utilizado.

En algunos casos, la plataforma es fija y es el extrusor el que se mueve en las tres dimensiones, pero el funcionamiento es esencialmente el mismo. Sin embargo, la técnica de extrusión de materiales tiene la limitación de no poder imprimir en el aire, lo que requiere la impresión de soportes y la posterior eliminación de estos en una fase de post-procesado. [16]

Además, es importante destacar que, en la técnica de extrusión de materiales, cabe la posibilidad de que la impresora tenga doble boquilla en el extrusor, o con doble extrusor independiente, lo que permite imprimir con dos filamentos diferentes a la vez.

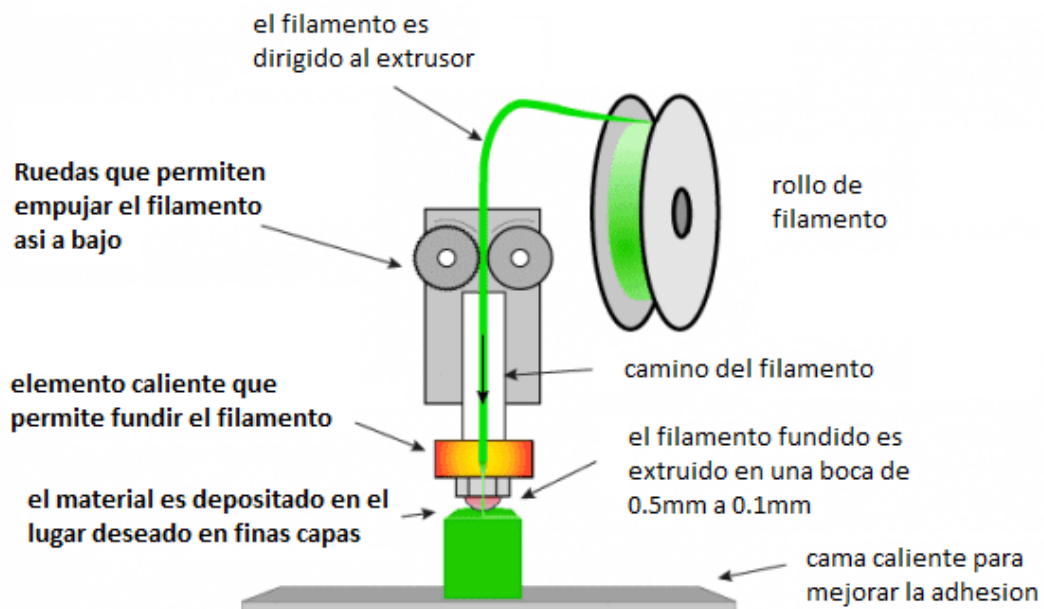


Figura 6.3. Fabricación Aditiva por extrusión [17]

El filamento se transporta hacia el extrusor mediante un tubo guía flexible que asegura su correcto movimiento. Una vez dentro, el filamento alcanza un elemento calefactor conocido como hot-end, que lo calienta hasta su temperatura de fusión. La boquilla final del extrusor dirige el material fundido hacia la plataforma o hacia la capa previa del objeto en fabricación. Es crucial mantener una temperatura óptima para una correcta deposición de material, por lo que el extrusor cuenta con un sensor de temperatura que controla el elemento calefactor en la zona de calentamiento. Además, un equilibrio adecuado entre la zona de calentamiento y la zona de disipación térmica evita que el filamento se funda

antes de tiempo, lo que podría causar problemas en el movimiento controlado. Las aletas de disipación del comienzo del extrusor mantienen el filamento en estado sólido hasta su paso por el hot-end.

La boquilla de salida, que es un fino cono, se encarga de mantener caliente el material fusionado, que sale por su parte más estrecha final. El ancho de esta boquilla, que suele oscilar entre 0,3 y 0,8 mm, es uno de los factores que influyen en la calidad de impresión, siendo las medidas más pequeñas las que proporcionan una mayor precisión.

Hay muchos materiales plásticos empleados en esta tecnología, pero los más populares (y baratos) son PLA y ABS. Ambos son termoplásticos, esto es plásticos que alcanzan fácilmente un estado moldeable al ser calentados y vuelven a un estado sólido adecuado al enfriarse. [16]



Figura 6.4. Bobina de PLA. [18]

Esta es la tecnología de fabricación aditiva con la cual se ha realizado la impresión de las probetas en el siguiente proyecto.

#### 6.2.4 *Inyección de material*

La técnica de impresión 3D por inyección de material comparte ciertas similitudes con la tecnología de inyección de tinta utilizada en la impresión 2D. En lugar de tinta, se utiliza un material como fotopolímeros, metales o cera, que se solidifican cuando se exponen a la luz o al calor, y que permite la construcción de objetos físicos capa por capa, al igual

que en la estereolitografía. La impresión por inyección de material permite la utilización de diferentes materiales en una sola pieza.

Este proceso implica la dispensación de un fotopolímero a través de cientos de boquillas diminutas en un cabezal de impresión, para construir la pieza capa por capa de manera rápida y lineal. Las gotas son depositadas en la plataforma de construcción y se curan y solidifican mediante luz ultravioleta (UV). Durante el proceso, se necesita un soporte que a menudo se imprime en 3D simultáneamente y que luego se retira en la fase de postprocesamiento.

La impresión 3D por inyección de material es una opción ideal para la creación de prototipos realistas, ya que ofrece un alto nivel de detalle, precisión y un acabado suave. Además, permite la impresión en múltiples colores y materiales en una sola impresión. Sin embargo, esta tecnología tiene algunas desventajas, como su elevado costo y el hecho de que los fotopolímeros activados por UV pueden volverse frágiles con el tiempo y perder propiedades mecánicas. [19]

Los materiales más comúnmente utilizados son fotopolímeros o gotas de cera. [20]

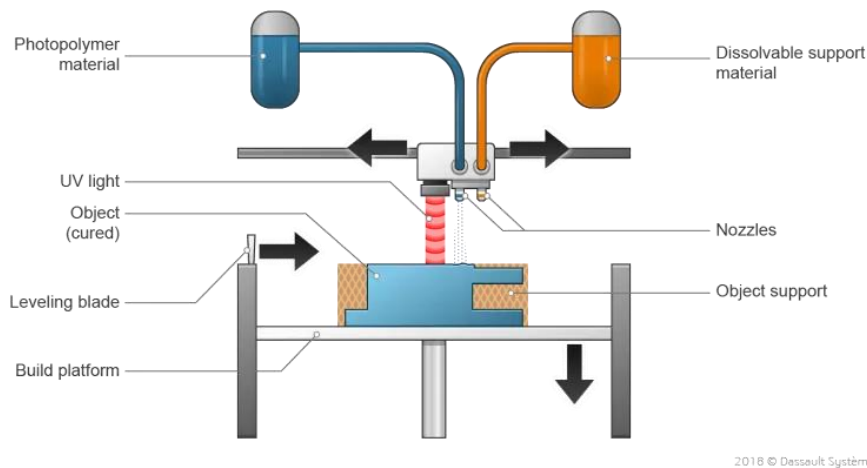


Figura 6.5. Fabricación Aditiva por inyección de material [19]

### 6.2.5 Deposición de energía dirigida

La técnica de impresión 3D de Deposición de Energía Dirigida (DED) es un proceso de fabricación aditiva que utiliza polvos metálicos o materiales de alambre para fundir y depositar capa a capa los materiales directamente en la pieza. Conocida también como

conformación de redes por ingeniería láser, fabricación por luz dirigida, deposición directa de metal, soldadura por deposición láser (LDW) y revestimiento láser 3D, la DED es capaz de construir piezas complejas desde cero o reparar piezas dañadas como hélices o palas de turbina.

Las impresoras 3D de DED son máquinas industriales de gran tamaño que operan en un entorno cerrado y controlado. Una boquilla montada en un brazo multieje dentro de un marco cerrado deposita el material fundido en la superficie de la pieza, solidificándolo. A diferencia de la técnica de impresión 3D por extrusión de material, con la DED la boquilla se puede mover en múltiples direcciones, con hasta cinco ejes diferentes, lo que permite mayor flexibilidad en la creación de piezas complejas. [21]

Respecto a los materiales que son utilizados en este tipo de impresión 3D, se destaca el uso de metales entre los que se encuentran el aluminio, el cobre, el titanio, el acero inoxidable, el acero para herramientas, así como diversas aleaciones de níquel y acero. Cada uno de estos metales posee características únicas que los hacen adecuados para diferentes aplicaciones, y su capacidad de impresión en 3D mediante la técnica DED ofrece una gran versatilidad para la fabricación de piezas complejas con formas específicas y con altas exigencias mecánicas. [21]

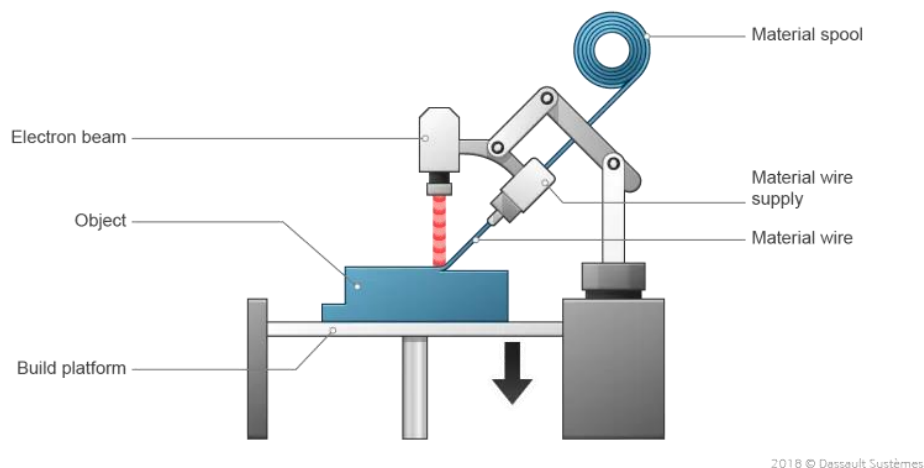


Figura 6.6. Fabricación Aditiva por deposición de energía dirigida. [21]

### 6.2.6 Laminación por capas

La fabricación de objetos laminados (LOM) es un método de prototipado rápido en el que se construyen objetos a partir de capas de papel recubierto con adhesivo, plástico o láminas metálicas que se unen y se cortan para dar forma al objeto con un cuchillo o



cortador láser. Luego de ser impresos, los objetos pueden ser sometidos a maquinado o taladrado para ser modificados. La resolución de la capa en este proceso depende del material utilizado y normalmente varía entre el grosor de una hoja de papel a varias hojas de papel de copia.

El proceso de fabricación de objetos laminados (LOM) se lleva a cabo en varias etapas. En primer lugar, se adhiere una lámina a un sustrato mediante el uso de un rodillo calentado. Luego, el láser traza las dimensiones del prototipo deseado y corta las áreas sin partes para facilitar la eliminación de los residuos. Después de cada corte, la plataforma con la capa completa se mueve hacia abajo y es apartada, mientras que una nueva hoja fresca de material se enrolla en su lugar. A continuación, la plataforma se desplaza hacia abajo a una nueva posición para recibir la siguiente capa. Este proceso se repite varias veces hasta que se completa el modelo o prototipo deseado. [22]

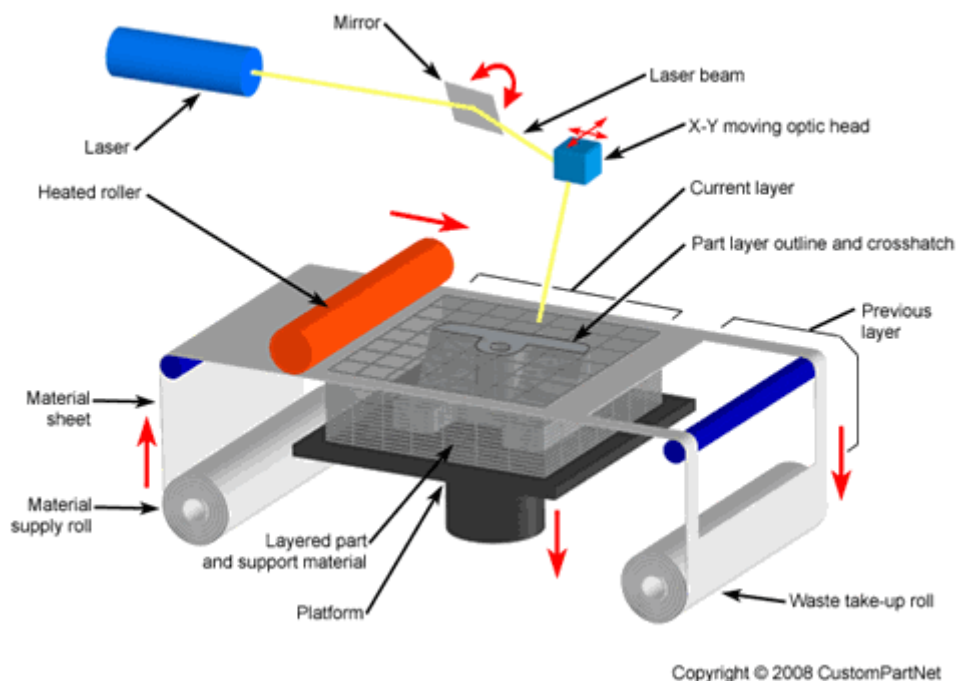


Figura 6.7. Fabricación aditiva por laminación por capas. [23]

### 6.2.7 Fotopolimerización en tanque

La impresión 3D por fotopolimerización es una técnica que utiliza un fotopolímero líquido para crear objetos tridimensionales. Este proceso se realiza capa a capa, donde cada capa se cura selectivamente mediante una fuente de calor. El láser es la técnica más antigua, pero hoy en día existen dispositivos de curado que utilizan proyectores de procesamiento digital de la luz e incluso pantallas LCD. Estas técnicas ofrecen una alta

resolución y curan una capa completa de resina simultáneamente, lo que las hace más eficientes que el láser.

La fotopolimerización tiene aplicaciones en el modelado médico, ya que permite la creación de modelos 3D precisos de diversas regiones anatómicas del paciente. Además, es una técnica ideal para la producción en masa y la creación de prototipos con detalles finos y un acabado superficial suave. También es ampliamente utilizada en la joyería, la fundición a la cera perdida y en aplicaciones dentales y médicas.

La variedad de resinas de fotopolímeros disponibles en el mercado presenta distintas propiedades físicas y colores, cada una con un uso específico. Estas resinas incluyen la resistente, la de bajo residuo, la transparente y la de poliuretano flexible. A pesar de las ventajas de la polimerización en cuba, sus principales limitaciones son el tamaño de construcción y la resistencia de la pieza impresa. [24]

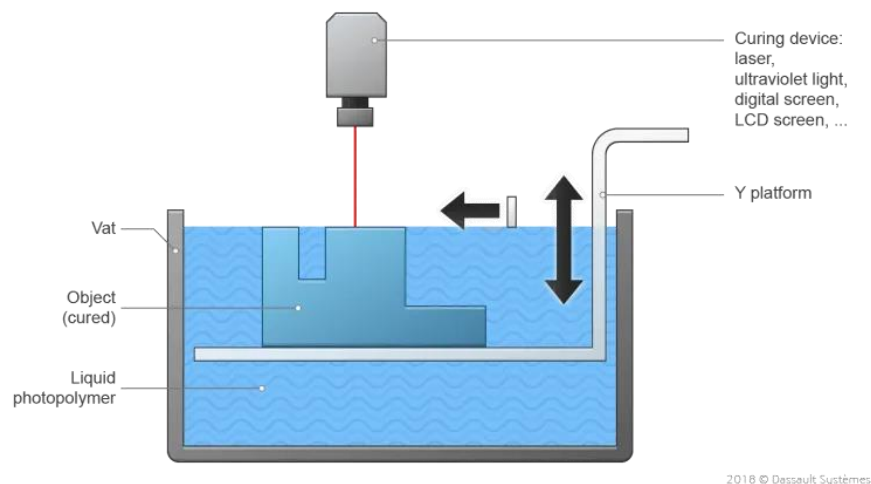


Figura 6.8. Fabricación aditiva por fotopolimerización de tanque. [24]

### 6.3 Rellenos

A menudo, la impresión 3D se utiliza para producir piezas que podrían obtenerse fácilmente mediante otras técnicas de fabricación. Sin embargo, aunque el aspecto exterior de la pieza impresa pueda ser similar, el interior puede ser muy diferente.

Una ventaja importante (y a la vez necesidad) de la impresión 3D es que permite producir piezas con diferentes proporciones de hueco. Desde el punto de vista de la producción, esto reduce la cantidad de material utilizado, así como los costos y el peso del producto final. Desde la perspectiva de la impresión, también permite ahorrar tiempo valioso.

El relleno, también conocido como infill en inglés, es el material que se encuentra dentro de la carcasa de una pieza impresa en 3D. Podemos ajustar el patrón y la densidad del relleno, desde un 0 (hueco) hasta un 100 % (sólido). [25]

A continuación, se explicarán de forma breve los distintos tipos de rellenos que nos ofrece la versión del programa Ultimaker Cura de impresión 3D que ha sido utilizado.

### 6.3.1 Modelos y figuras (baja dureza)

Para modelos y figuras la densidad de relleno se encuentre entre el 0 y el 15%, normalmente, las impresiones 3D no necesitan tener una gran resistencia debido a que no están expuestas a un manejo riguroso ni a situaciones de tensión, y lo que se suele buscar es simplemente una rápida impresión. [25]

En esta clasificación, los patrones más utilizados son los siguientes:

- Lightning:



Figura 6.9. Patrón de relleno Lightning al 20%. [F.P]

- Lines:

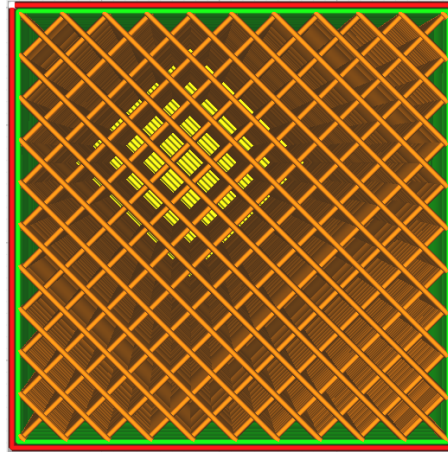


Figura 6.10. Patrón de relleno Lines al 20%. [F.P]

- ZigZag:

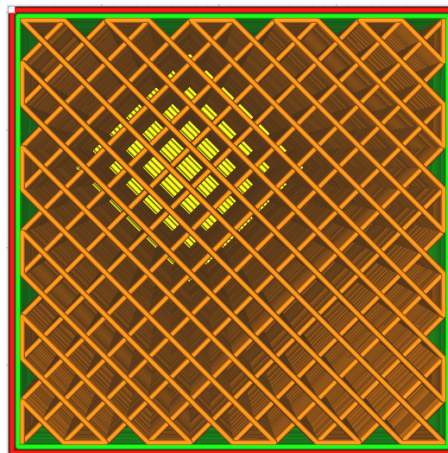


Figura 6.11. Patrón de relleno ZigZag al 20%. [F.P]

La diferencia entre los patrones ZigZag y Líneas, es que el patrón de líneas genera varias líneas en una única dirección por capa, mientras que el patrón de zigzag genera una malla formada por una línea constante.

Para impresiones de modelos y figuras, se recomiendan patrones de relleno simples. Estos patrones también son efectivos para la creación de prototipos que no requieren alta resistencia o durabilidad. [25]

### 6.3.2 Impresiones 3D estándar (dureza media)

Para impresiones 3D que estén sometidas a baja tensión, es recomendable utilizar un patrón de relleno con una dureza media. Los patrones de relleno como el grid, triangles y tri-hexagon son los más adecuados para este tipo de impresiones, a una densidad de relleno de entre 15 y 50%. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estos patrones

pueden aumentar el tiempo de impresión hasta en un 25% en comparación con patrones más simples como el lines. Se encuentran los siguientes patrones en esta categoría: [26]

- Grid: es el más sencillo de los tres, lo que lo hace el patrón más rápido para imprimir.

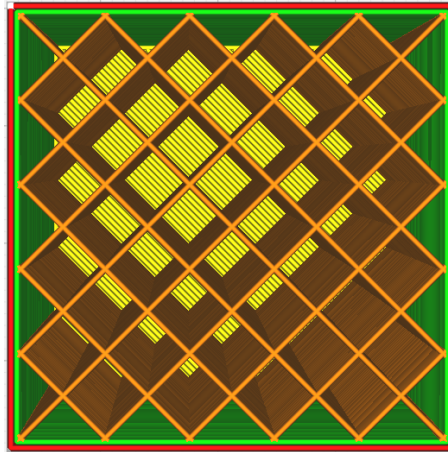


Figura 6.12. Patrón de relleno Grid al 20%. [F.P]

- Triangles: es una malla 2D formada por triángulos que destaca por su dureza al aplicar una carga perpendicular a la cara del objeto. Este patrón también es recomendable para piezas con componentes finos y rectangulares, que, de otra manera, tendrían muy pocas conexiones entre las paredes.

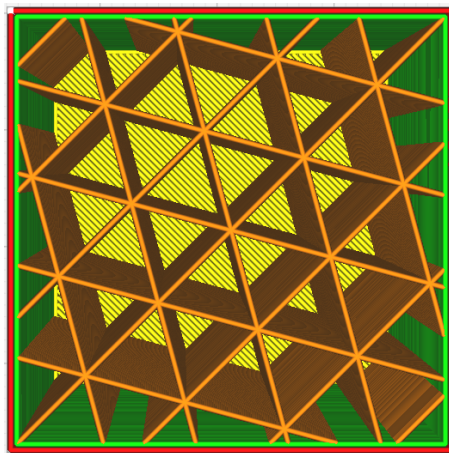


Figura 6.13. Patrón de relleno Triangles al 20%. [F.P]

- Tri-hexagon: este patrón, genera hexágonos intercalados con triángulos. Este patrón es resistente en relación el uso de material que supone, y presenta líneas más cortas para conectar cada lado, lo que reduce la probabilidad de que la pieza se combe debido a una refrigeración inadecuada durante la impresión. [25]

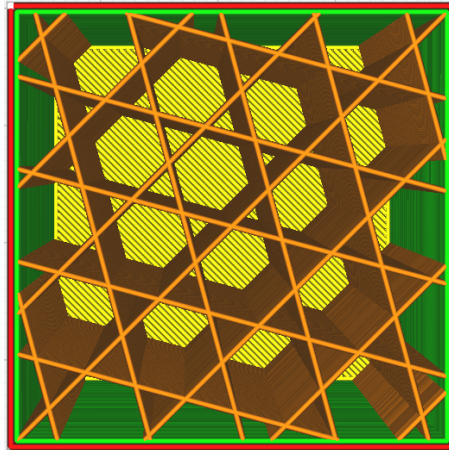


Figura 6.14. Patrón de relleno Tri-Hexagon al 20%. [F.P]

### 6.3.3 Impresiones 3D funcionales (alta dureza)

Para las impresiones 3D que necesitan una alta dureza en múltiples direcciones, se recomiendan patrones de relleno como el cubic, cubic subdivision, el quarter cubic, el octet y el gyroid, los cuales se suelen emplear con una densidad superior al 50%. Estos patrones permiten crear estructuras fuertes y resistentes que son ideales para piezas que deben soportar cargas o impactos. [26]

- Cubic: Se compone de cubos apilados e inclinados en un patrón 3D.

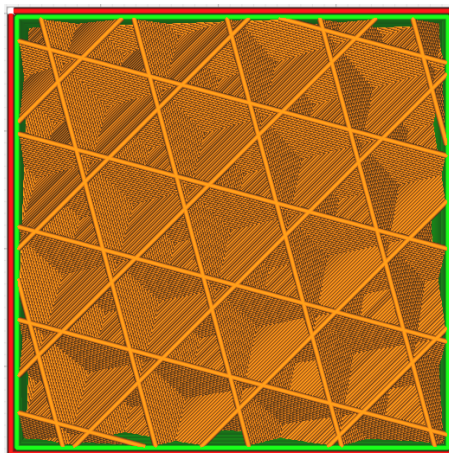


Figura 6.15. Patrón de relleno Cubic al 20%. [F.P]

- Cubic Subdivision: Variante del patrón cúbico que utiliza menos material.



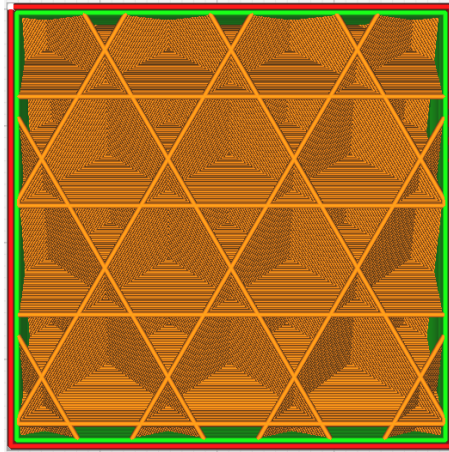


Figura 6.16. Patrón de relleno Cubic Subdivision al 20%. [F.P]

- Quarter cubic: Es similar al patrón octeto, pero la mitad de las formas piramidales están desplazadas con respecto a la otra mitad.

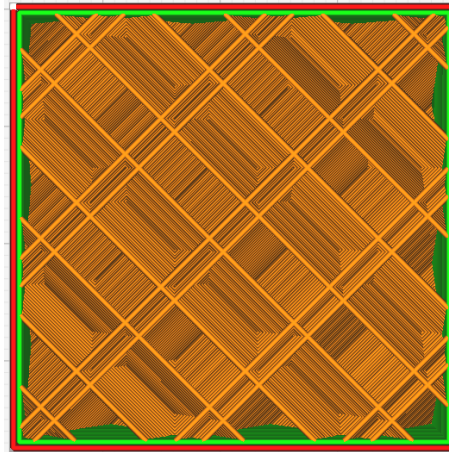


Figura 6.17. Patrón de relleno Quarter Cubic al 20%. [F.P]

- Octet: También conocido como relleno tetraédrico, en este patrón se apilan formas piramidales.

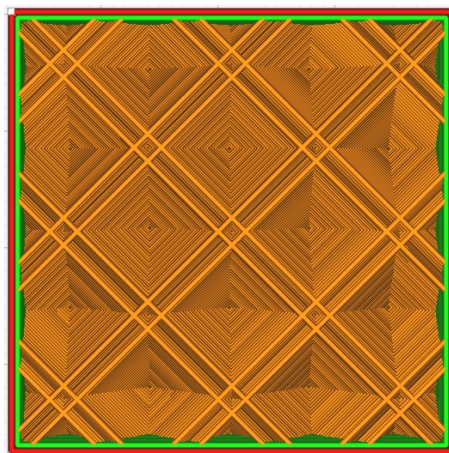


Figura 6.18. Patrón de relleno Octet al 20%. [F.P]

- Gyroid: Este patrón 3D es único en su aspecto, ya que parece olas, pero es igualmente resistente en cualquier dirección. Es una buena opción para piezas sometidas a tensión en diferentes direcciones. [25]

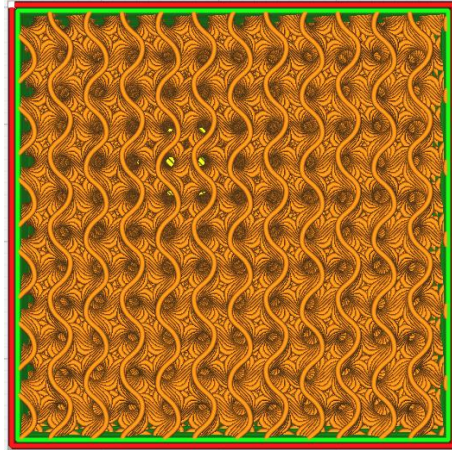


Figura 6.19. Patrón de relleno Gyroid al 20%. [F.P]

#### 6.3.4 Impresiones 3D flexibles

Los filamentos flexibles son un tipo especial de material que requiere patrones de relleno específicos para mantener su flexibilidad. En este caso, los patrones de relleno concentric, cross y cross 3D son los más adecuados, siendo estos utilizados normalmente con una densidad muy variable entre el 0 y el 100% dependiendo de la flexibilidad que se desee que tenga la impresión. [26]

- Concentric: es un patrón 2D en el que se imprimen círculos concéntricos, que proporcionan una buena resistencia en diferentes direcciones y permiten que la impresión se mantenga flexible.

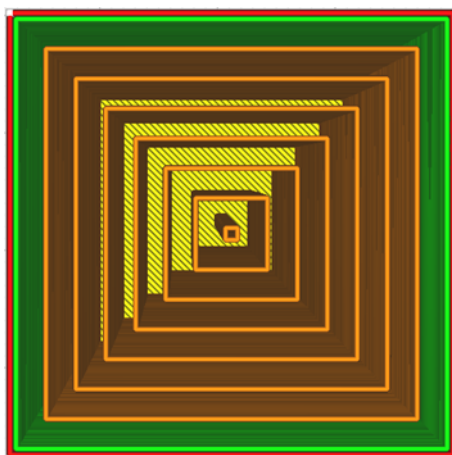




Figura 6.20. Patrón de relleno Concentric al 20%. [F.P]

- Cross: genera un patrón con forma de cruces, espaciadas por rejillas. Los espacios entre las cruces y las rejillas permiten doblar y torcer el objeto.

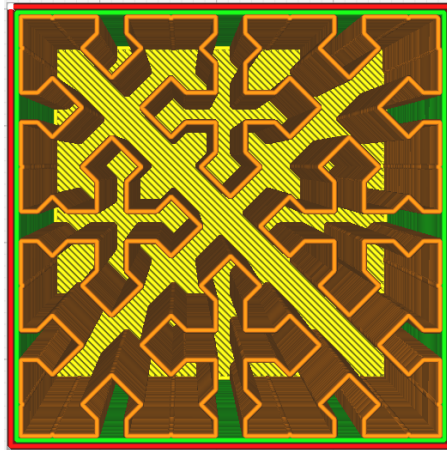


Figura 6.21. Patrón de relleno Cross al 20%. [F.P]

- Cross 3D: este patrón de relleno 3D es una variante del patrón en cruz, ya que a medida que se construye la impresión, las líneas se van inclinando gradualmente. Esta inclinación produce un objeto que tiene mayor rigidez y resistencia en comparación con el patrón en cruz tradicional.[25]

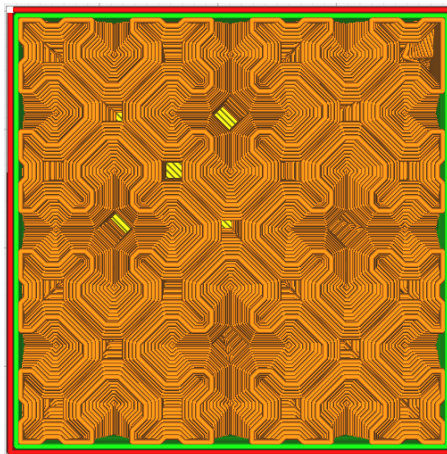


Figura 6.22. Patrón de relleno Cross 3D al 20%. [F.P]

## 6.4 Materiales

Los materiales empleados por las impresoras 3D varían según la tecnología utilizada, sin embargo, los más comunes son los materiales termoplásticos. [27]

Un termoplástico es un tipo de plástico que tiene la capacidad de fundirse a altas temperaturas, lo que permite darle diferentes formas y al enfriarse se solidifica nuevamente. [28]

Estos materiales se utilizan respectivamente en forma de filamento, resina líquida y polímero en polvo. También encontramos otros materiales, como el metal, utilizado en el proceso de fusión por láser de lecho de polvo, o la cerámica.[27]

A continuación, hablaremos de los más comunes:

#### *6.4.1 Ácido Poliláctico (PLA)*

Es el filamento más popular debido a su estabilidad. Se produce a partir de materias primas como el maíz y el trigo, lo que evita la emisión de gases tóxicos y lo convierte en un material reciclable. Es una opción ideal para principiantes en la impresión 3D, ya que es fácil de usar y está disponible en una amplia gama de colores.

Posee una alta dureza, baja flexibilidad y son de duración media. La temperatura de impresión oscila entre los 180 - 230 ° C, mientras que la temperatura a la que se deberá encontrar la cama se encuentra entre 20 - 60 ° C. [29]



Figura 6.23. Bobinas de PLA. [30]

#### *6.4.2 Tereftalato de Polietileno modificado con Glicol (PETG)*

Este tipo de plástico se emplea en la fabricación de envases para alimentos y bebidas, destaca por su alta resistencia a la corrosión, temperaturas extremas, impactos y ciertos agentes químicos. Además, es impermeable y tiene una baja absorción de humedad, lo que lo convierte en el material ideal para preservar la frescura de los alimentos.

Tanto su dureza como durabilidad son altas, y su flexibilidad es media. La temperatura de impresión oscila entre 220 - 250 ° C y la temperatura de la cama entre 50 – 70 ° C. [29]



Figura 6.24. Bobina de PETG. [31]

### 6.4.3 *Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS)*

Este tipo de filamento destaca por su resistencia y es ampliamente utilizado en entornos profesionales debido a su capacidad para resistir impactos de alta intensidad y elevadas temperaturas.

El ABS se encuentra presente en numerosos procesos de fabricación en la actualidad, desde piezas de Lego hasta carcasas de electrodomésticos y componentes de automóviles, entre muchos otros usos.

Es importante destacar que el ABS también se puede pulir, lijar, limar, perforar, pintar y pegar con gran facilidad, manteniendo un acabado de alta calidad.

Sus características son una elevada dureza y durabilidad, combinadas con una flexibilidad media. La temperatura de impresión ha de ser entre 210 – 250 ° C y la temperatura de la cama 80 – 110 ° C. [29]



Figura 6.25. Plástico ABS. [32]

#### 6.4.4 Nylon

El nylon es un polímero que se utiliza extensamente en la fabricación aditiva. Este termoplástico está disponible en forma de polvo o filamento, adecuado para tecnologías como sinterización selectiva por láser, multi jet fusion y modelado por deposición fundida.

Este, es un material altamente útil y versátil. Destaca por su flexibilidad y resistencia, con una alta durabilidad, lo que lo convierte en una opción ideal para diversas aplicaciones en la industria automotriz, como la producción de piezas resistentes a la fricción y deformación. [33]

Su temperatura de impresión oscila entre los 240 – 260 ° C, teniéndose que encontrar la plataforma a 70 – 100 ° C. [35]



Figura 6.26. Engranajes fabricados con nylon. [34]

#### 6.4.5 Elastómeros Termoplásticos (TPE)

Son plásticos con características elásticas que les confieren una gran flexibilidad y durabilidad. Por esta razón, se utilizan comúnmente en componentes de automóviles, electrodomésticos y equipos médicos.

A parte de su elevada flexibilidad, se puede destacar su alta durabilidad, teniendo también una dureza media. La temperatura de impresión se encuentra entre 210 – 230 °C, y a la que se debe encontrar la plataforma 30 – 60 °C.



Figura 6.27. Zapatilla fabricada con TPE [36]

#### 6.4.6 *Plástico de Policarbonato (PC)*

Este material es un tipo de plástico termoformable que posee propiedades eléctricas muy buenas, una resistencia excepcional a los impactos y una resistencia química moderada. Gracias a su baja cristalinidad y su estructura amorfa, el PC posee una notable transparencia. [37]

Su temperatura de impresión es de 270 – 310 ° C y la de la plataforma de 90 – 110 ° C. [29]



Figura 6.27. Bobina de PC. [38]

### 6.5 Aplicaciones

Conforme el paso de los años, la fabricación aditiva cada vez va teniendo un mayor impacto en nuestra sociedad, debido al amplio espectro de industrias en las que puede verse implementada por las numerosas ventajas que ofrece, de esta forma, a continuación, se explicarán las aplicaciones que tiene en las industrias más destacadas.

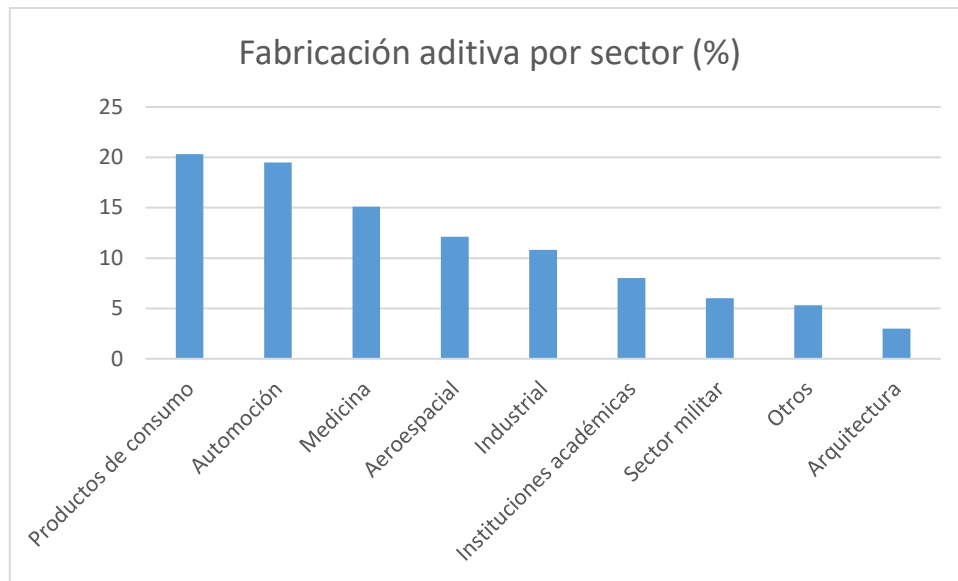


Figura 6.28. Porcentajes de utilización de fabricación aditiva por sectores. [39]

### 6.5.1 *Productos de consumo electrónicos*

La fabricación aditiva en el ámbito de la electrónica es un enfoque emergente que lleva la impresión de circuitos a la tercera dimensión. Al imprimir tanto los materiales estructurales como las trazas conductoras, se obtienen diversas ventajas, como una libertad de diseño amplia, un desarrollo rápido de iteraciones y dispositivos más compactos.

Esta tecnología permite crear características como antenas helicoidales, condensadores integrados y vías en relieve que son difíciles o incluso imposibles de producir mediante métodos convencionales. Además, es posible incorporar componentes de montaje superficial (SMD) dentro de la propia estructura.

Una de las aplicaciones clave de la fabricación aditiva electrónica es la creación de prototipos de circuitos. Los circuitos multicapa complejos pueden ser producidos internamente con mayor rapidez en comparación con enviar los diseños a una empresa de prototipos externa. Otro campo prometedor, con un mercado potencialmente enorme, es el encapsulado de productos electrónicos avanzados. En este enfoque, las matrices desnudas se incrustan dentro de una estructura impresa que contiene trazas electrónicas finas. Las ventajas de este método en comparación con el encapsulado electrónico convencional, es que los circuitos integrados de silicio se pueden colocar más cerca entre sí, lo que resulta en un sistema más compacto en su conjunto. [40]



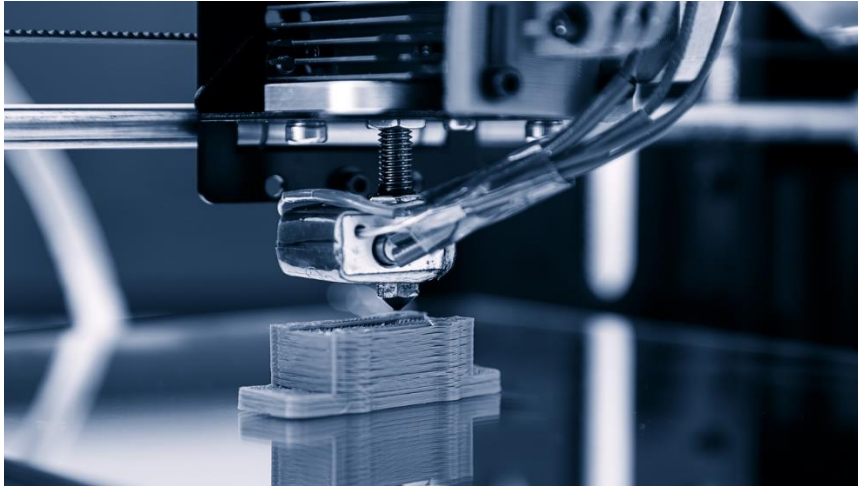


Figura 6.29. Fabricación aditiva de componente electrónico. [41]

### 6.5.2 Automoción

La manufactura aditiva está reemplazando la fabricación convencional de partes y componentes en la industria automotriz. Proporciona a diseñadores y fabricantes la capacidad de crear prototipos rápidos con una alta precisión.

La impresión 3D se utiliza para crear herramientas y accesorios personalizados para la producción en masa de piezas de automóviles. Esto permite la producción rápida de piezas de repuesto sin la necesidad de herramientas o accesorios específicos.

Este método de fabricación permite a los diseñadores crear piezas con formas y estructuras complejas que son difíciles de producir utilizando métodos tradicionales. Las piezas creadas mediante técnicas de impresión 3D industrial son más ligeras, pero igualmente resistentes, lo que reduce el peso del vehículo y mejora su eficiencia en la automoción. Estas piezas pueden también ser personalizadas para adaptarse a vehículos específicos.

Como resultado de estas ventajas, se obtienen beneficios tales como la reducción de costos, la aceleración del proceso de diseño, la mejora de la eficiencia del combustible, la personalización de piezas y componentes, y la mejora en la calidad y confiabilidad.

Es por ello que la fabricación aditiva presenta un futuro altamente prometedor al tener un potencial transformador en la industria automotriz. [42]

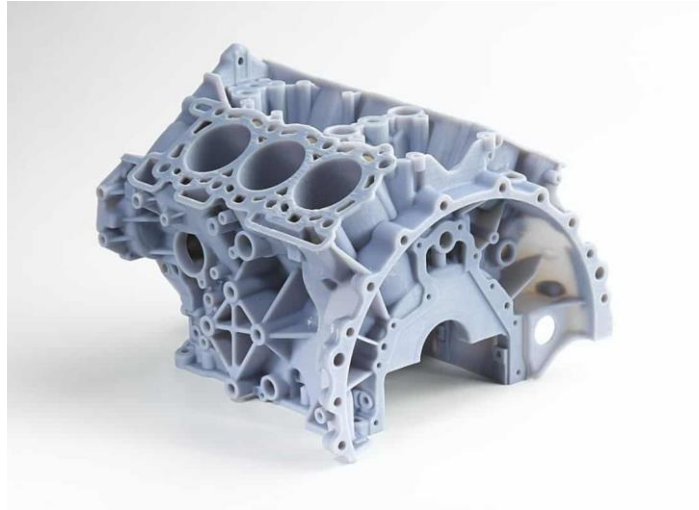


Figura 6.30. Carcasa del motor impresa en 3D. [43]

### 6.5.3 Medicina

La fabricación aditiva ha causado una revolución tanto en la industria de productos sanitarios como en el campo de la medicina. En concreto se hablará de biomodelos, piezas de utillaje y las prótesis.

- **Biomodelos:** son réplicas de partes del cuerpo que brindan apoyo a los médicos en la planificación quirúrgica, simulaciones, estudios anatómicos y brindan información al paciente. Estas réplicas no tienen requisitos funcionales específicos, lo que permite su fabricación en diversos materiales y tecnologías disponibles. Los termoplásticos como el PLA en FDM y las resinas fotopoliméricas en SLA, incluyendo opciones flexibles, son los materiales más comunes utilizados debido a su accesibilidad económica. [44]

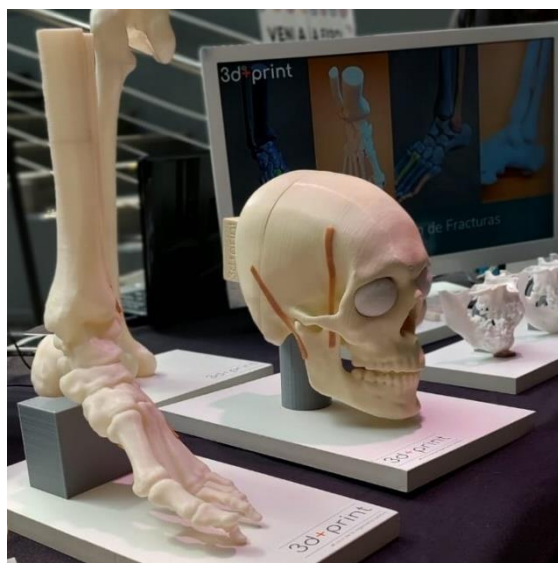




Figura 6.31. Biomodelos creados con impresión 3D. [45]

- **Piezas de Utillaje:** consisten en herramientas auxiliares que optimizan las intervenciones médicas de diversas formas.

Por un lado, se encuentran las guías de corte, diseñadas principalmente para estructuras óseas (osteotomía), que proporcionan una orientación precisa durante el procedimiento. También se utilizan accesorios que mejoran la ergonomía en el quirófano, como adaptaciones de herramientas específicas para operaciones particulares.

En este contexto, se requieren materiales biocompatibles de alta calidad y un riguroso control de los procesos de fabricación. Las tecnologías más utilizadas son principalmente FDM (Modelado por Deposición Fundida) y SLA, permitiendo así cumplir con los estándares exigidos. [44]

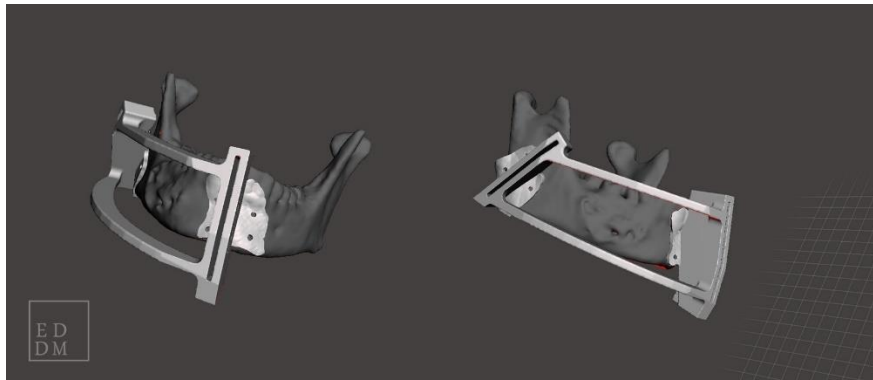


Figura 6.32. Guías para cortar estructuras óseas. [44]

- **Prótesis:** Estos elementos son diseñados para reemplazar, en la medida de lo posible, las partes dañadas del cuerpo. Gracias a la fabricación aditiva, se logra una libertad de diseño que incluye geometrías orgánicas y estructuras microporosas, lo que representa un avance médico significativo al crear prótesis que se ajustan de manera más precisa a la anatomía original.

Desde una perspectiva ingenieril, estas prótesis presentan requisitos que van desde la resistencia básica hasta complejas consideraciones biomecánicas. Por ejemplo, una prótesis craneal puede tener la función de proteger el cerebro, mientras que una prótesis de la cabeza del fémur permite el movimiento relativo respecto a la cadera y compensa las cargas correspondientes.

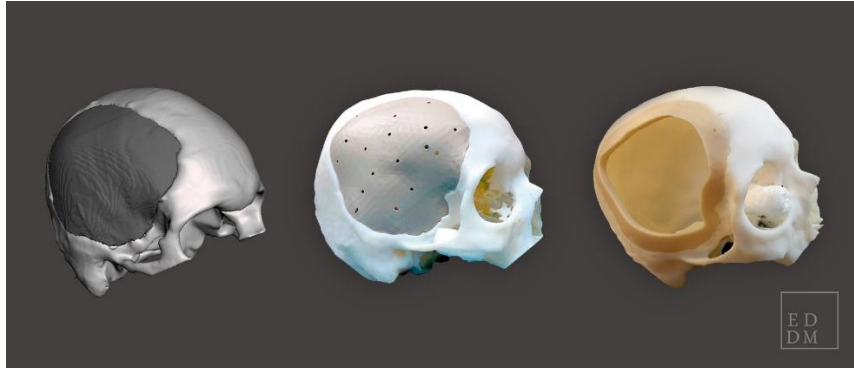


Figura 6.33. Prótesis craneales fabricadas por impresión 3D. [46]

#### 6.5.4 Aeroespacial

Las tecnologías de fabricación aditiva de metales, especialmente la fusión por láser selectiva, ofrecen la capacidad de cumplir con los requisitos de certificación necesarios para fabricar piezas complejas que no pueden ser mecanizadas. Estas tecnologías mejoran el rendimiento y la funcionalidad de los componentes.

Cuando se trata de piezas estructurales con altas demandas mecánicas, la tecnología SLM brinda a los ingenieros la libertad de diseño necesaria para consolidar piezas y lograr una reducción de peso y costos.

La optimización de las piezas permite que se fabriquen utilizando la cantidad exacta de material necesaria. Esto posibilita la producción de estructuras hasta un 50% más livianas.

Gracias a este tipo de fabricación, ya no es necesario fabricar una pieza compleja descomponiéndola en elementos más pequeños que luego se mecanizan, sin embargo, ahora podemos producir directamente esa pieza de una sola vez, evitando procesos costosos y lentos de ensamblaje y control de calidad innecesarios. [47]

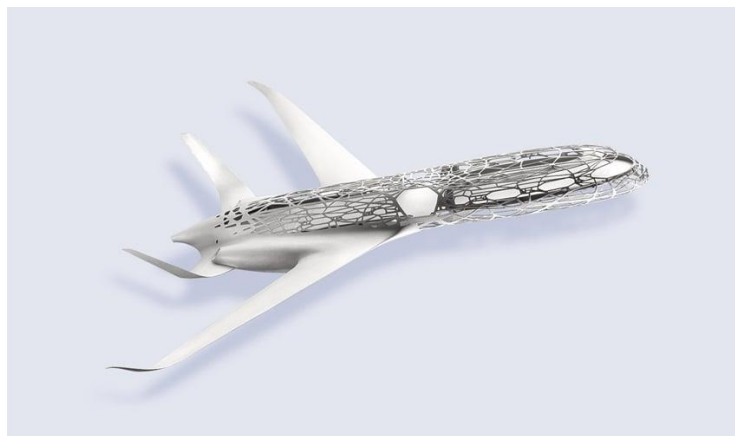


Figura 6.34. Fabricación aditiva en ingeniería aeroespacial. [48]

## 7. Introducción a los ensayos a compresión

Los ensayos a compresión son utilizados para analizar cómo se comporta un material al ser sometido a una carga gradualmente creciente, aplicada en modo de compresión. Estos ensayos permiten evaluar la seguridad, durabilidad e integridad de diferentes materiales y componentes.[49]

Mediante esta prueba se obtienen datos como un diagrama de tensión-deformación, que se utiliza para determinar cualidades tales como límite elástico, punto de deformación, límite de fluencia, límite proporcional y la resistencia a la compresión. [50]

Las pruebas de compresión se llevan a cabo utilizando máquinas universales de ensayo. Estas máquinas constan de un marco que puede ser simple o doble, equipado con una célula de carga, software de prueba y placas y accesorios especializados para cada aplicación. Las máquinas de ensayo universales están disponibles en una amplia gama de capacidades de fuerza, que van desde 0,02 N hasta 2000 kN. [50]

Dependiendo del material ensayado y de las propiedades que tenga se obtendrán gráficas con distintos perfiles característicos, como el caso del hormigón que se muestra a continuación como ejemplo ilustrativo:

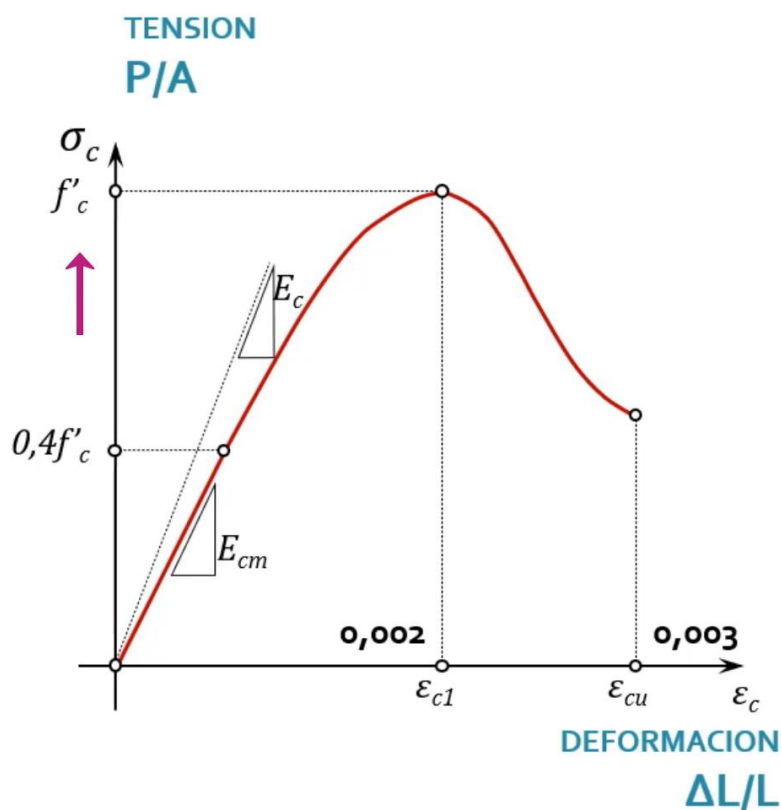


Figura 7.1. Diagrama Tensión-Deformación Hormigón. [51]

En la vertical se encuentra la tensión aplicada en la probeta, se calculará dividiendo la carga aplicada entre el área que está en contacto con la pieza, de esta forma:

$$Tensión [MPa] = \frac{Fuerza [N]}{Área [mm^2]}$$

Ec. (1)

Mientras en el eje horizontal se encuentra la deformación, es decir, la reducción de la longitud en función de la longitud inicial.

El punto  $f'_c$  nos indica la resistencia máxima alcanzada.

La pendiente del tramo lineal inicial de la curva de la figura 7.1 se conoce como módulo de elasticidad, el cual es la constante de proporcionalidad entre tensión y deformación (ley de Hooke), y el punto mostrado como  $E_{cm}$  es el límite de elasticidad, este nos indica que el material hasta ese punto tiene un comportamiento elástico, lo que quiere decir que mientras la tensión se mantenga en ese rango el material volverá a su estado original.

### 7.1 Aplicaciones

Algunas aplicaciones comunes incluyen evaluar la resistencia a la compresión de espumas, medir la capacidad de soporte de papel y cartón bajo compresión, y probar la resistencia de resortes metálicos. [49]

También, a diferencia de las pruebas de tracción, que se utilizan principalmente para evaluar las propiedades de un material en particular, los ensayos de compresión se enfocan frecuentemente en productos terminados. Diversos elementos comunes, como pelotas de tenis, pelotas de golf, botellas de agua, estuches protectores, tuberías de plástico y muebles, muelles son ejemplos de productos que requieren evaluarse en términos de su capacidad de resistencia a la compresión.



Figura 7.2. Ensayo a compresión de una pelota de tenis. [52]

## 8. Equipamiento empleado

### 8.1 Impresora 3D

La impresora empleada para la fabricación de las probetas es la *3D Creality CR-10 S4*. Posee un marco de aluminio, cuyas dimensiones son de 590x700x615 mm y pesa en total 18.2 kg.

La 3D Creality CR-10 S4 cuenta con un nozzle de 0.4 mm y un diseño de doble tornillo en el eje Y, lo que mejora la estabilidad y precisión de la impresión. Además, permite imprimir hasta unas dimensiones de 400x400x400 mm, lo que nos ofrece la posibilidad de realizar modelos de gran tamaño.

La velocidad de impresión puede alcanzar hasta 200 mm/s y la cama caliente es capaz de llegar a una temperatura de 90 ° C. Los materiales con los que puede trabajar esta impresora incluyen varios, como PLA y ABS siempre que no superen una temperatura de 240 ° C.

En términos de conectividad, la impresora ofrece opciones tanto por puerto USB como a través de tarjeta microSD. Además, es compatible con software de impresión como Cura, Simplify3D y Repetier Host.

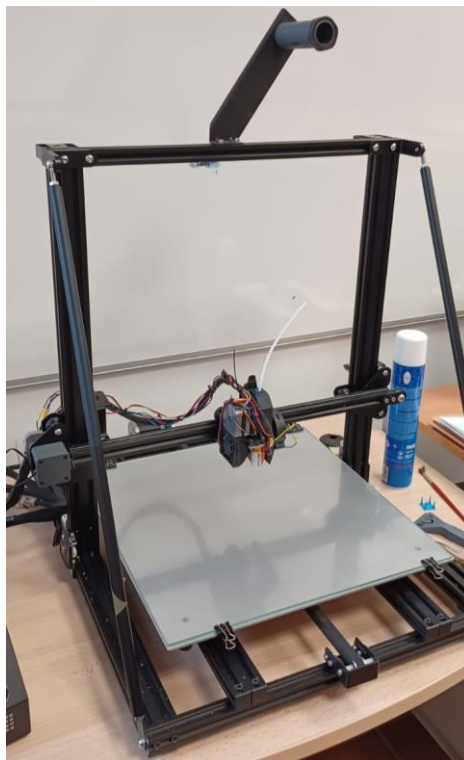


Figura 8.1. Impresora 3D [F.P]

La impresora ha sufrido modificaciones para mejorar sus prestaciones, añadiéndole un sensor de nivelación automática llamado *3D Touch* y un extrusor *BondTech BMG*.

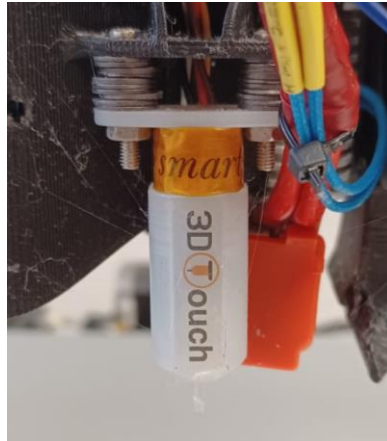


Figura 8.2. 3D Touch [F.P]



Figura 8.3. BondTech BMG [F.P]

## 8.2 Estación meteorológica

Se ha utilizado una estación meteorológica *MISOL HP3001*, para medir las condiciones ambientales a las que se imprimieron las probetas, en esta estación se muestran en la pantalla los valores de temperatura y humedad relativa tomados por distintos sensores.

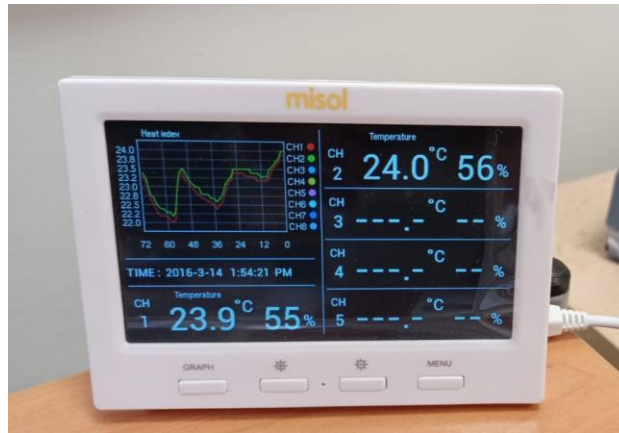


Figura 8.4. Estación Meteorológica [F.P]

### 8.3 Envasadora al vacío

Debido al largo periodo de tiempo que hay entre la impresión de las primeras probetas y su ensayo a compresión, las probetas una vez impresas se almacenaban al vacío para preservar sus condiciones y que no se vieran afectadas por cambios en las condiciones ambientales.



Figura 8.5. Envasadora al vacío [F.P]

### 8.4 Báscula

Para medir la masa de las piezas con exactitud se usó la báscula *Ohaus Pioneer PA413*, la cual dispone de una precisión de 0,001 g, y es capaz de medir hasta 410 g.



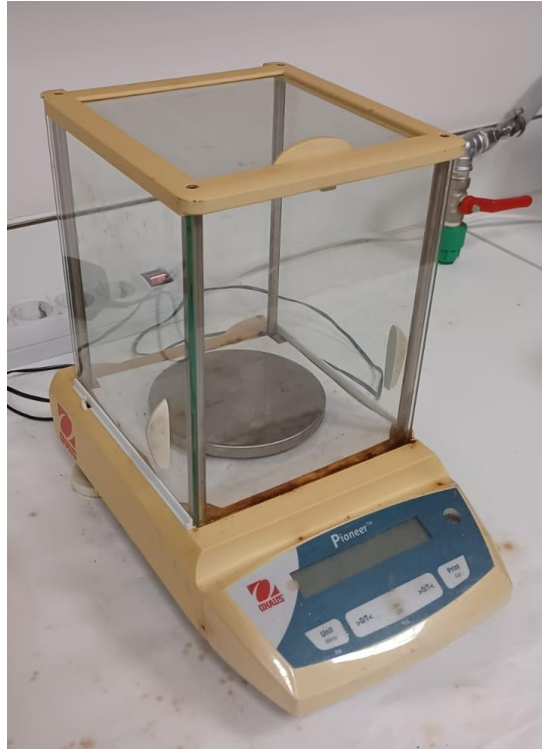


Figura 8.6. Báscula [F.P]

### 8.5 Pie de rey

Esta herramienta ha sido utilizada para tomar las medidas de las probetas, se utilizó un calibrador digital para hacerlo de una forma más rápida y exacta, con una precisión de 0,01 mm.



Figura 8.7. Pie de rey [F.P]

### 8.6 Máquina universal de ensayos

Jaime Belda Rodríguez

Para el estudio del comportamiento de las piezas a compresión se utilizó la máquina de ensayos *Shimadzu Autograph*, la cual tiene una capacidad máxima de carga de 50 KN. Esta máquina, se encuentra conectada a un ordenador el cual tiene instalado el software *Trapezium*, permitiendo regular los parámetros del ensayo.



Figura 8.8. Máquina de ensayos. [F.P]

## 9. Impresión de probetas

Al ser este Trabajo Fin de Grado una continuación del realizado en 2022 por Gonzalo Lugo Velázquez [1], se debían seleccionar los mismos parámetros de trabajo, por lo que se explicará cómo se tomaron los mismos.

### 9.1 Selección del filamento

El filamento utilizado fue el mismo que en el trabajo anterior, el *Smartfil Coral*, del fabricante *Smart Materials 3D*. Este material fue en su momento escogido aleatoriamente entre los disponibles, sin embargo, para esta ocasión, hubo que hacer un pedido del mismo. Finalmente se acabaron consumiendo 3 bobinas de la talla L (1 Kg). En el anexo I se encuentra la ficha técnica del filamento.



Figura 9.1. Envoltorio del filamento. [F.P]



Figura 9.2. Filamento Smartfil Coral. [53]

## 9.2 Diseño de las probetas

Las normas *ASTM D695* [54] y *UNE-EN ISO 604:2003* [55] establecen unas dimensiones para las probetas, sin embargo, en este caso se optó por un cubo (hexaedro regular) de 30 mm cada lado. Esta decisión se tomó para que el patrón de relleno tuviera una importancia mayor, ya que con probetas más pequeñas el patrón no podría haber sido bien representado ni por la impresora, ni por tener la suficiente área el mismo.

	Longitud (mm)	Anchura (mm)	Espesor (mm)
Probeta utilizada	30.0	30.0	30.0
ASTM D695	25.4	12.7	12.7
UNE-EN ISO 604:2003	10.0	10.0	4.0

Tabla 9.1 Dimensiones Probetas

Una vez seleccionadas las dimensiones de las probetas, se procede a hacer su diseño en 3D mediante el software *Solidworks*, a continuación, se extrae el archivo STL y se importa al programa de modelado de las piezas que se desee utilizar, en este caso el *Ultimaker Cura 4.6*, ya que este fue el programa empleado en el TFG precursor.

## 9.3 Selección de los parámetros de impresión

Exportado el archivo STL de nuestra pieza, se colocan en la posición deseada, en este caso se querían imprimir 6 piezas para cada tanda de probetas, por lo que se dispusieron en dos filas de 3.

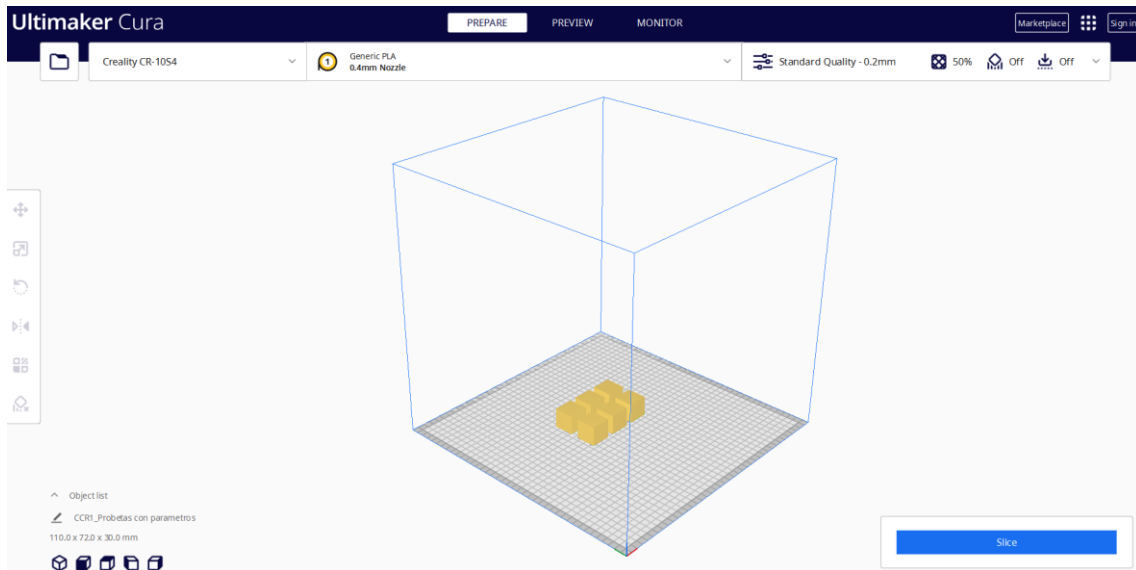


Figura 9.3. Piezas en posición. [F.P]

A continuación, se despliega el panel para alterar los parámetros de impresión, y colocamos los seleccionados en el anterior TFG.

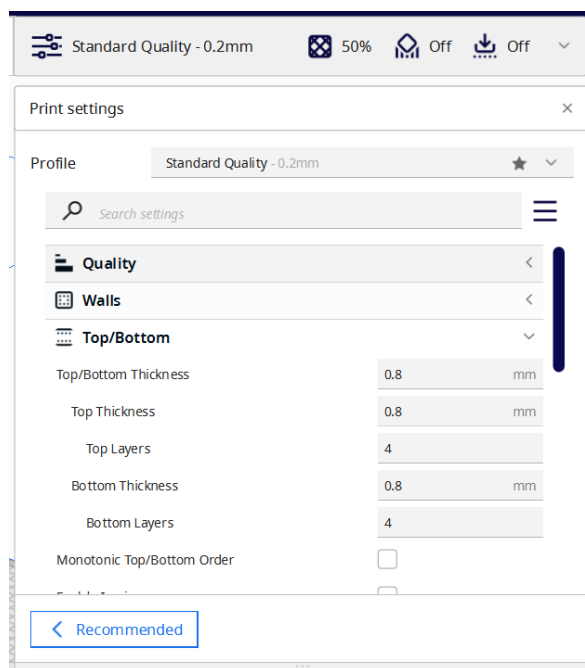


Figura 9.4. Panel de parámetros de impresión

Se mantendrán constantes todos los parámetros, excepto los de densidad y patrón de relleno, ya que son estos los que se desea ir alterando sucesivamente para su posterior análisis. De esta forma los valores que se deben seleccionar son los siguientes:

Altura de capa	0.2 mm
----------------	--------

Líneas de pared	3
Capas superiores	4
Capas inferiores	4
Temperatura de impresión	215 °C
Temperatura de la placa de impresión	50 °C
Velocidad de impresión	60 mm/s
Densidad de relleno	10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %
Patrón de relleno	Concentric, Grid, Triangles, ZigZag, Lines

Tabla 9.2. Parámetros de impresión.

Se ha seleccionado una altura de capa de 0.2 mm ya que el diámetro de la boquilla es de 0.4 mm, y se considera que, para esta boquilla, la altura de capa de 0.2 mm permitirá imprimir la pieza con un correcto acabado superficial, ya que es un cubo y no posee una geometría compleja, y buena duración de esta.

Respecto a las líneas de pared, se ha reducido su número lo máximo posible, en este caso 3, ya que lo deseado es estudiar el comportamiento de la probeta en función del patrón y el relleno, y un elevado número de capas de pared podría intervenir en este resultado.

El número de capas superiores e inferiores se ha fijado en 4, ya que se considera que son las suficientes capas para que los platos de la máquina de ensayos tengan una buena superficie de apoyo, a parte, este número de capas asegura que las probetas de menor relleno mantengan la forma deseada.

Se optó por una temperatura de impresión de 215 ° C, ya que se encuentra en lo recomendado por el fabricante, así como la cama de impresión a 50 °C.

La velocidad de impresión se fijó en 60 mm/s ya que se considera que se considera el punto óptimo entre una impresión de calidad, sin requerir excesivo tiempo.

Respecto a los parámetros variables referentes al relleno, para cada tipo de relleno, en nuestro caso, Concentric, Grid, Triangles, ZigZag y Lines, se han impreso 5 tandas, variando el porcentaje de relleno en 10 %, 20 %, 30 %, 40 % y 50 %. Esto hace un total de 25 tipos de probetas distintas, de las cuales cada tanda contiene 6 piezas, haciendo un total de 150 probetas impresas. Los diferentes rellenos se muestran en el siguiente muestrario.



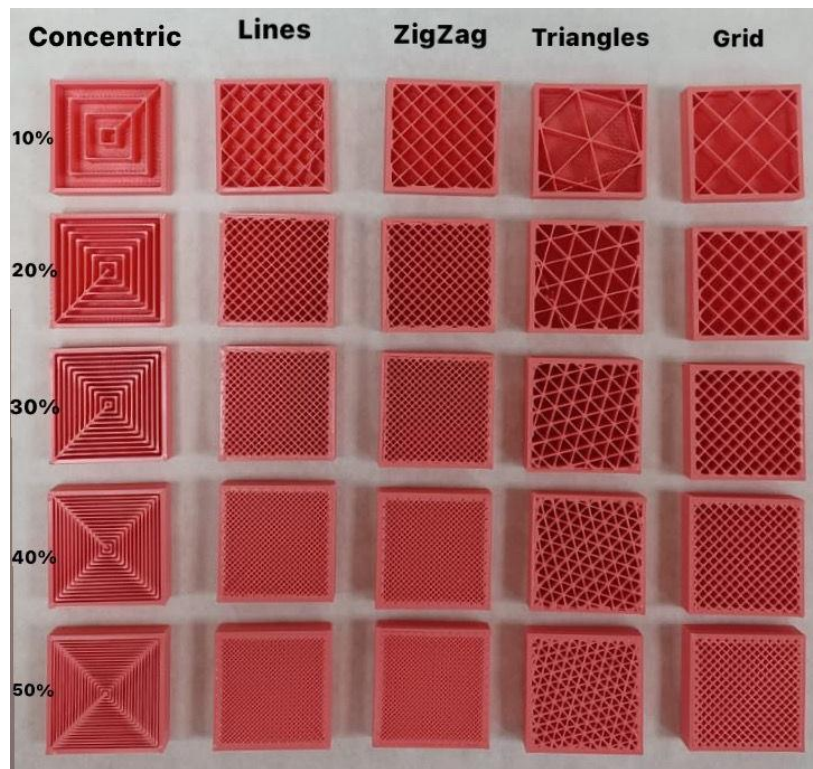


Figura 9.5. Muestrario de probetas [F.P]

#### 9.4 Fabricación de las probetas

Ya diseñadas las muestras con los parámetros y la disposición de estas deseada, se pulsa el botón Slice, de esta forma el programa creará un archivo G-Code, el cual define capa a capa los movimientos que ha de realizar la impresora. Los archivos G-Code se exportan a una tarjeta SD que será introducida en la impresora, de esta forma ya estarían cargados los archivos.

A continuación, se inserta el filamento de limpieza, esta acción se realiza para que en el interior del extrusor no queden restos de filamento de impresiones anteriores que pudieran afectar a las probetas que se deseen imprimir en ese momento.



Figura 9.6. Filamento de limpieza. [56]

Una vez la impresora se encuentra limpia, se extrae el filamento de limpieza y se introduce el filamento que se empleará, el SmartFil Coral. Cabe destacar que para realizar estos cambios de filamento la boquilla se debe encontrar a una temperatura de 210 °C, de esta forma se podrá realizar el cambio sin dificultad.

Acto seguido se debe nivelar la cama, esta acción se realizará por medio del Software de la impresora, o si fuera necesario, de forma manual ajustando la altura de los tornillos de la cama.

Para finalmente comenzar la impresión, se selecciona el G-Code que se desee imprimir y se aplica el adhesivo en la cama para que las piezas no se despeguen durante la impresión, en este caso se usó laca en spray de la marca Nelly.



Figura 9.7. Adhesivo utilizado [F.P]



En el momento en el que la impresora comienza la impresión, lo primero que realiza es una serie de líneas de purga, estas líneas se hacen en el lateral de la cama y sirven para eliminar las acumulaciones de material que hubieran podido surgir en el extrusor. Después de esto, realiza la falda, la cual delimitará un perímetro de lo que se desee imprimir. Finalmente comienza la impresión de las piezas en el centro de la cama.

Es necesario estar pendiente en la impresión de las primeras capas, ya que en caso de que estas sean defectuosas, también lo será toda la pieza. Vigilar durante las primeras capas ayuda también a comprobar que todos los parámetros de diseño están bien seleccionados.

Una vez impresas las primeras capas, no es necesario permanecer durante toda la impresión, ya que las piezas más cortas tienen una duración de poco más de 5 horas y las más largas de más de 10 horas.

Cuando la impresión ha finalizado se debe esperar a que la plataforma se enfríe para poder despegar las piezas con facilidad.



Figura 9.8. Piezas finalizadas. [F.P]

A continuación, las piezas se numeran siempre en el mismo orden, por si el orden en el que son impresas pudiera influir en sus propiedades. En este caso se numeraron del uno al seis, comenzando de izquierda a derecha por la fila superior y de la misma forma con la inferior.



Figura 9.9. Probetas numeradas. [F.P]

Una vez numeradas, se toman los datos del tiempo de impresión que finalmente fue requerido y las condiciones ambientales a las que fueron impresas, datos recogidos en el Anexo II. A continuación, se etiquetan y envasan al vacío para conservar sus propiedades hasta que sean ensayadas.



Figura 9.10. Probetas etiquetas, numeradas y al vacío. [F.P]

### 9.5 Problemas surgidos durante la impresión

A lo largo de la impresión de las probetas surgieron numerosos problemas que fueron retrasando la finalización de esta parte del trabajo, obligando a repetir muchas impresiones. Estos problemas fueron los siguientes:

- **Distancia de retracción:** este fue el principal problema surgido, conforme se imprimía se observaba una falta de material que ocurría en diferentes capas, algunas piezas si se conseguían imprimir perfectamente, sin embargo, en la gran mayoría surgía este fallo, tal y como se muestra en las figuras 9.11 y 9.12.

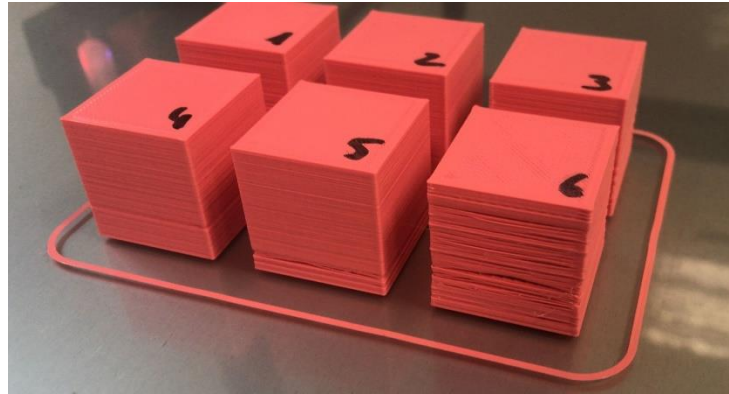


Figura 9.11. Tanda afectada por la retracción. [F.P]

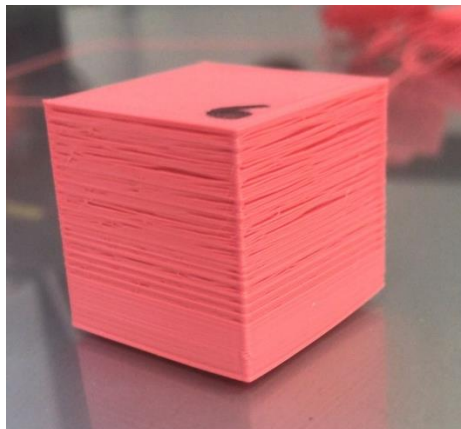


Figura 9.12. Cubo afectado por la retracción. [F.P]

Al principio se creyó que era un problema de obstrucción de la boquilla, por lo que se hicieron numerosos cambios de esta, sin solventar el problema. También se desmontó el extrusor completamente, para limpiar todas las piezas de su interior de forma minuciosa, pero el problema persistía. Finalmente, tras la asistencia por parte de un técnico especialista en esta tecnología, que revisó el G-Code de las probetas, se observó que el valor de la retracción se encontraba en 5 mm, lo cual es un valor que viene de serie, sin embargo, al estar el sistema de extrusión modificado, este valor debía ser de 0,7 mm. Todo este se resume en que al tener una mayor retracción la impresora expulsaba demasiado filamento líquido en la zona caliente del hot-end, al enfriarse ese plástico se pegaba en las paredes,

y al intentar continuar con la impresión el filamento no conseguía salir de la forma correcta, provocando esa falta de material en ciertas capas.

- **Pérdida de referencia del origen:** en un determinado momento la impresora perdió completamente la referencia del origen, esto provocaba que comenzara la impresión fuera de la cama, imprimiera a demasiada altura o excesivamente pegado a la cama. Este problema fue debido a los numerosos cambios de boquillas y desmontajes y montajes de las piezas de la impresora, lo que provocó que se soltara un cable encargado de transmitir la información de la localización del extrusor.

Este problema fue solucionado por la asistencia técnica especializada citada anteriormente, a la vez que el anterior de la retracción.

- **Obstrucción de la boquilla:** este problema se podía percibir por la pérdida de aporte de material de la pieza, como se puede observar en las figuras 9.13 y 9.14.



Figura 9.13. Tanda afectada por obstrucción de la boquilla. [F.P]

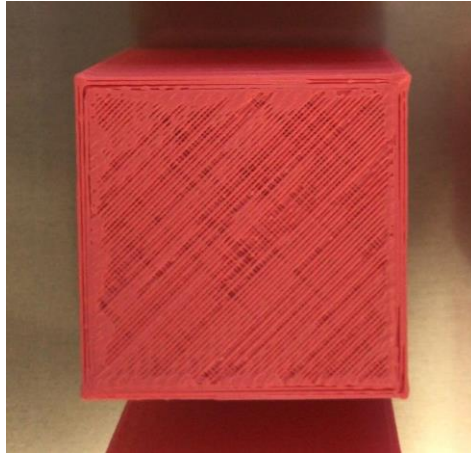


Figura 9.14. Probeta afectada por obstrucción de la boquilla. [F.P]

Las boquillas se obstruían debido a la acumulación de filamento que se había secado en la salida de esta. Se puede apreciar en la figura 9.15.



Figura 9.15. Boquilla parcialmente obstruida. [F.P]

Para solucionar este problema, en primer lugar, se intentaba limpiar con una aguja de limpieza, introduciéndola por la boquilla para intentar expulsar los trozos de filamento de su interior.

En caso de que lo anterior no funcionara, se procedía al cambio de toda la boquilla por una completamente nueva o por una que hubiera sido limpiada mediante tratamiento térmico. Este tratamiento consistía en introducir la boquilla en el horno a 300 °C durante un 2 horas y media, por medio de esto se conseguía derretir el material del interior y que este saliera de la boquilla.

- **Fallo de fábrica del filamento:** este inconveniente solo ocurrió en una ocasión. Lo que ocurrió en este caso es que, debido a un engrosamiento del diámetro del filamento, defecto de fábrica, este se atascó y aunque la impresora terminó de ejecutar al G-Code la impresión de las probetas no se completó al no poder extruir



el material necesario. El engrosamiento del filamento se puede apreciar en las figuras 9.16 y 9.17.

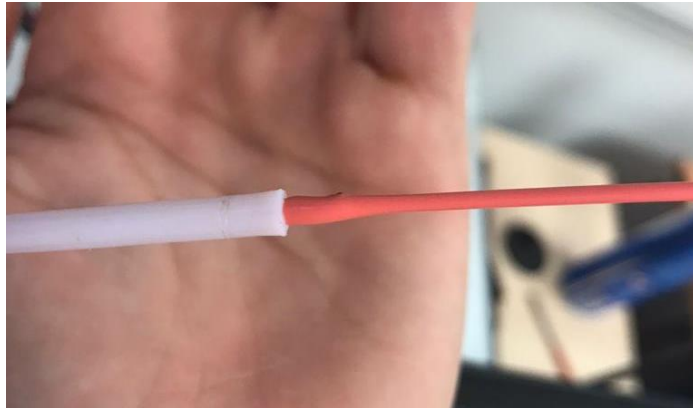


Figura 9.16. Engrosamiento del filamento a la entrada del tubo guía. [F.P]



Figura 9.17. Engrosamiento del filamento. [F.P]

Este pequeño engrosamiento del filamento impedía el paso de este al extrusor, lo que provocó que se partiera en el interior de este. Para solucionarlo se expulsó el filamento y se cortó este tramo para evitar que volviera a ocurrir.

Sin embargo, era necesario extraer el filamento que había quedado en el interior del extrusor, por lo que se procedió a desmontarlo completamente.

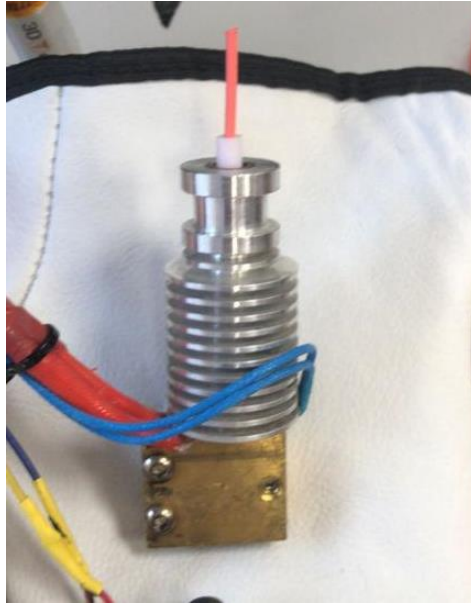


Figura 9.18. Filamento obstruyendo el extrusor. [F.P]

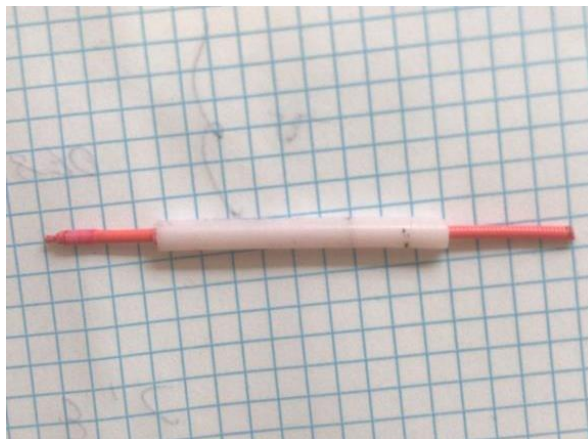


Figura 9.19. Filamento en el conducto interior del extrusor. [F.P]

Solucionado esto se cambió la boquilla nuevamente ya que a causa de esto se había obstruido nuevamente, y se continuó imprimiendo sin problema.

- **Desnivelación de la cama:** este percance ocurrió en aisladas ocasiones, consistía en que la cama se desnivelaba encontrándose las esquinas a distintas cotas, lo que provocaba que las probetas se imprimieran de forma distinta dependiendo del lugar donde estuvieran situadas, dependiendo de si la boquilla estaba más pegada o separada a la cama.

Para solucionar este problema se podía regular la cama de forma automática seleccionándolo en el panel de control de la impresora y en caso de que esto no funcionara, manualmente por medio del ajuste de los tornillos que se encontraban en cada esquina de la cama que regulaban la altura de esta.

- **Desfase de la sonda Z:** este parámetro que se tuvo que alterar en varias ocasiones, regula la distancia entre la boquilla y la cama. Debido a los numerosos cambios de boquilla este parámetro se tenía que cambiar cuando la impresora no funcionaba de forma correcta. Cuando el desfase de la sonda Z se encontraba mal regulado se podía observar que, en el caso que estuviera muy pegada la boquilla, esta aplastaba demasiado el filamento contra la cama, provocando que este no se adhiriera donde debía. En el caso en el que el desfase fuera demasiado y la boquilla estuviera a una distancia superior a lo debido de la cama, el filamento se depositaba con un grosor menor al que debía, ya que la boquilla no lo comprimía lo suficiente, tal y como se puede observar en la figura 9.20.

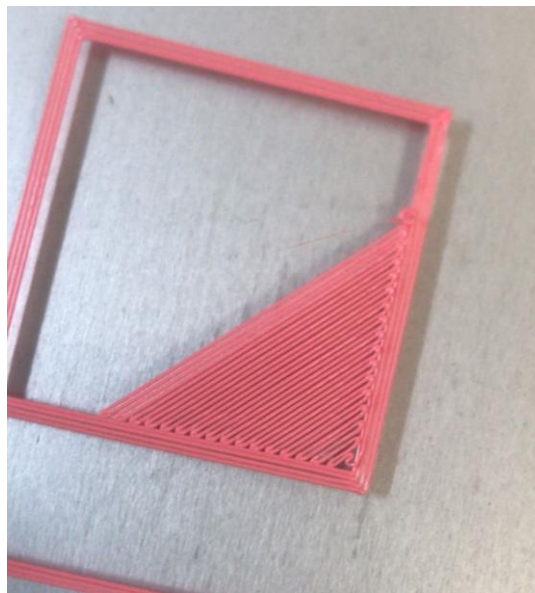


Figura 9.20. Primera capa de la probeta con desfase de sonda Z erróneo. [F.P]

- **Pérdida de adherencia de la cama:** debido a la posible incorrecta colocación del adhesivo en la cama, en una ocasión se produjo el despegue de una pieza, resultando la impresión como se muestra en la figura 9.21.





Figura 9.21. Probeta despegada de la cama. [F.P]

## 10. Ensayo de resistencia a compresión

Finalizada la impresión de todas las probetas se realizaron los ensayos a compresión de estas en el menor plazo de tiempo posible, para que todas las piezas fueran ensayadas en condiciones similares.

### 10.1 Mediciones de las probetas

Se comenzará tomando las medidas de las probetas, para ello se pesaron en la balanza *Ohaus Pioneer PA413*, de esta forma se comprueba que todas tengan una masa similar y que no ha habido fallo alguno. A continuación, se toman las medidas de las aristas, de esta forma se calcula el área con la cual se obtendrá la tensión soportada por las probetas. Esta área se calcula haciendo un promedio entre el área que está en contacto con los platos superior e inferior. A su vez el área de cada superficie será el resultado de la multiplicación entre la media de una arista y la enfrentada a ella y su perpendicular. Las medidas de las probetas se muestran en el Anexo III.

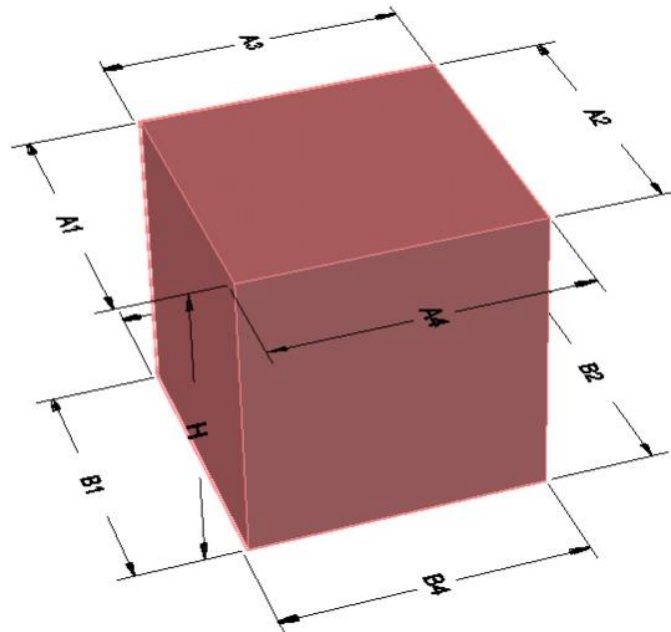


Figura 10.1. Aristas de las probetas. [F.P]

Como se ha dicho anteriormente el área superior se calcularía de la siguiente forma:

$$A_s = \left( \frac{A1 + A2}{2} \right) \times \left( \frac{A3 + A4}{2} \right)$$

Ec. (2)

$$Bs = \left( \frac{B1 + B2}{2} \right) \times \left( \frac{B3 + B4}{2} \right)$$

Ec (2.1)

Para la superficie inferior será igual, pero llamando a las aristas “B” como en la Ec (2.1), por lo tanto, el área empleada en el cálculo será:

$$A = \frac{As + Bs}{2}$$

Ec. (3)

También se toma la medida de la altura de las probetas.

## 10.2 Puesta a punto de la máquina de ensayos

Los ensayos a compresión se realizaron con la máquina *Shimadzu Autograph*, que posee un límite de carga de 50 kN. Esta máquina permite realizar ensayos a compresión, tracción y flexión dependiendo del cabezal seleccionado.

En primera instancia se tuvo que colocar el cabezal deseado, ya que la máquina se encontraba con los de tracción, aparte de retirar las diferentes protecciones para la adecuada conservación de esta, tales como una lona y sacos de sílice para evitar la humedad.

Después de esto se arranca la máquina y se deja media hora antes de que se pueda proceder con los ensayos.

## 10.3 Creación del método de ensayo a utilizar

A continuación, por medio del software Trapezium se crea el método que seguiremos para realizar los ensayos. En este caso se seleccionó la velocidad de ensayo indicada por el anterior TFG realizado (1 mm/min), esta decisión se tomó ya que es la recomendada por la norma *UNE-EN ISO 604:2003* [55], sin embargo, se decidió disminuir el desplazamiento máximo de 15 mm a 7,5 mm. Esto se hizo ya que, analizando las gráficas obtenidas anteriormente, se observó que no es de utilidad realizar unos ensayos con tanto desplazamiento ya que el límite de tensión se encontraba mucho antes, empezando a dar lecturas incorrectas debido a que los esfuerzos que se obtenían eran los que hacía la propia máquina de ensayos entre sus platos.

Configurados estos parámetros se introducían los valores de las probetas a analizar y se guardaba el método.

#### 10.4 Realización del ensayo

Configurado el método que se va a utilizar se abre y se selecciona el ensayo para poder comenzar.

El primer paso será sacar una fotografía de las 6 probetas previamente al ensayo, para así al finalizar tomar otra y poder observar las diferencias, estas fotografías se muestran en el Anexo VI. A continuación, se coloca la probeta que se desee ensayar entre los platos, de la forma más centrada que posible y se ajusta la altura del plato superior para que entre en contacto con la pieza, sabremos que ha entrado en contacto cuando la carga varíe del valor nulo que debería tener previamente. Después de esto se hace el valor del alargamiento igual a cero para que los datos que se toman de la probeta sean a partir de ese punto. Para finalizar se desactiva el manejo manual de la máquina y se pulsa “Empezar” en el software.

Una vez finalizado el ensayo se extrae la probeta y se fotografía.

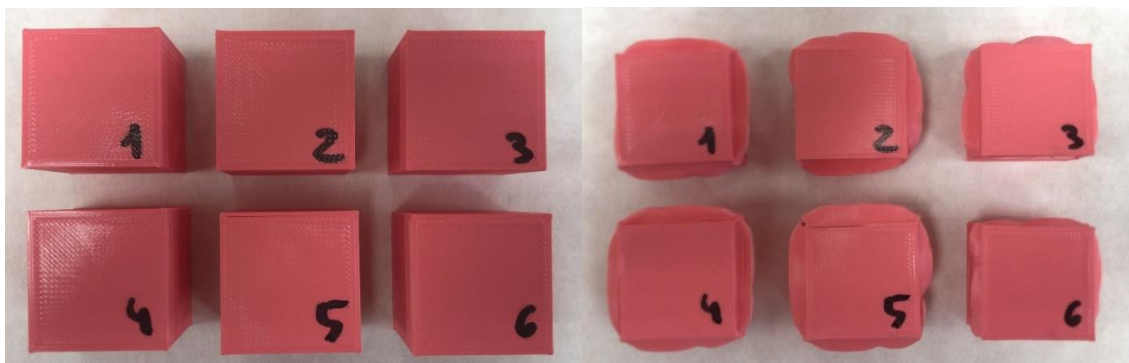


Figura 10.2. Probetas antes y después del ensayo. [F.P]

Del ensayo se exportan los datos a una hoja de notas, donde para cada probeta nos aparecerá todos los valores que ha recogido de tiempo (seg), carga (kN) y alargamiento (mm)

1- 1 Tiempo seg	Carga kN	Alargamiento mm
0,00	0,0171875	0
0,25	0,01875	0,003
0,50	0,0171875	0,007
0,75	0,0265625	0,012
1,00	0,028125	0,016
1,25	0,0390625	0,02
1,50	0,046875	0,024
1,75	0,05625	0,028
2,00	0,0640625	0,032
2,25	0,0828125	0,037
2,50	0,0859375	0,041
2,75	0,0953125	0,045

Figura 10.3. Extracto de los datos obtenidos en el ensayo de una probeta. [F.P]

## 11. Análisis de los resultados

Finalizado el ensayo de compresión, se procederá al análisis de los datos obtenidos. Para ello se obtendrán los valores promedio, máximo y mínimo de cada tanda de probetas, así como su desviación estándar y coeficiente de variación para conocer la exactitud de los datos obtenidos. A continuación, se representa en un diagrama de barras el valor promedio de la resistencia a compresión, frente a las densidades de relleno para observar su evolución.

### 11.1 Concentric

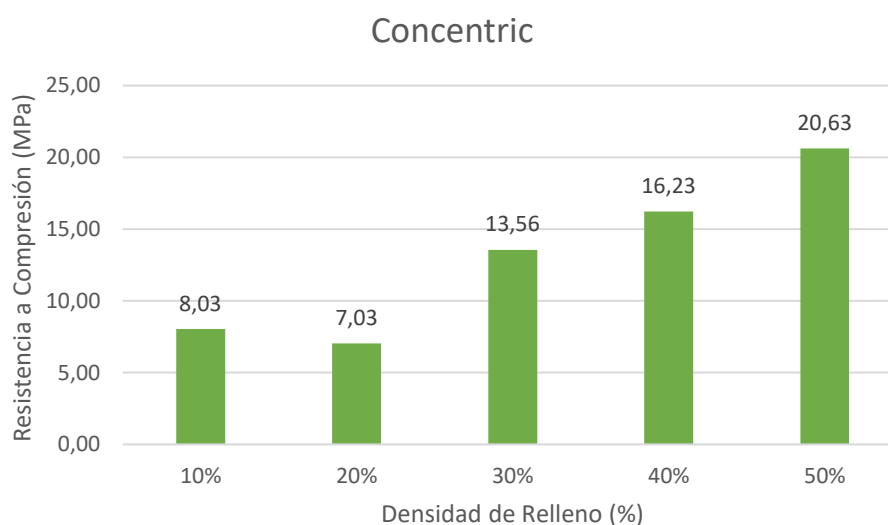


Figura 11.1. Diagrama de barras resistencia a compresión Concentric [F.P]

En la figura 11.1 se representa la resistencia a compresión para las distintas densidades de relleno para el patrón concentric. Como se puede observar, conforme se aumenta la densidad de relleno, lo hace también la resistencia, excepto en el salto de 10 % a 20 %, en este caso la resistencia disminuye en 1 MPa, este resultado no sigue el patrón esperado y seguramente se deba a algún fallo en la impresión de la tanda del 20 %, por una obstrucción en la boquilla, o los problemas con la retracción de la boquilla.

Se observa como la resistencia a compresión aumenta de forma irregular, variando entre un aumento máximo de 6,53 MPa del 20 al 30 % y un mínimo de 2,67 MPa del 30 al 40 %.

	Resistencia a Compresión (MPa)				
	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %
Promedio	8,03	7,03	13,56	16,23	20,63

<b>Máximo</b>	8,09	7,44	13,78	16,53	20,91
<b>Mínimo</b>	7,94	6,85	13,48	15,62	20,49
<b>Des. Estándar</b>	0,05	0,22	0,11	0,32	0,15
<b>Coef. Variación</b>	0,67	3,18	0,81	1,95	0,75

Tabla 11.1 Resistencia a compresión Concentric

Estudiando los valores estadísticos se aprecia que en su conjunto la desviación estándar tiene valores muy bajos, ya que en ningún momento sobrepasa los 0,4 MPa. Para las probetas del 20 %, que han sido las que posiblemente hayan salido defectuosas, se aprecia un valor máximo de 7,44 MPa y uno mínimo de 6,85 MPa, sin embargo, el valor mínimo para el 10 % es de 7,94 MPa, lo que hace que la diferencia de resistencia a compresión apenas sea significativa, respecto a los otros aumentos.

El coeficiente de variación máximo se encuentra para las probetas del 20 % con un 3,18 %, y en el 40 % con un 1,95 %, en el resto de los casos no supera el 1 % con lo cual los valores promedio son muy representativos.

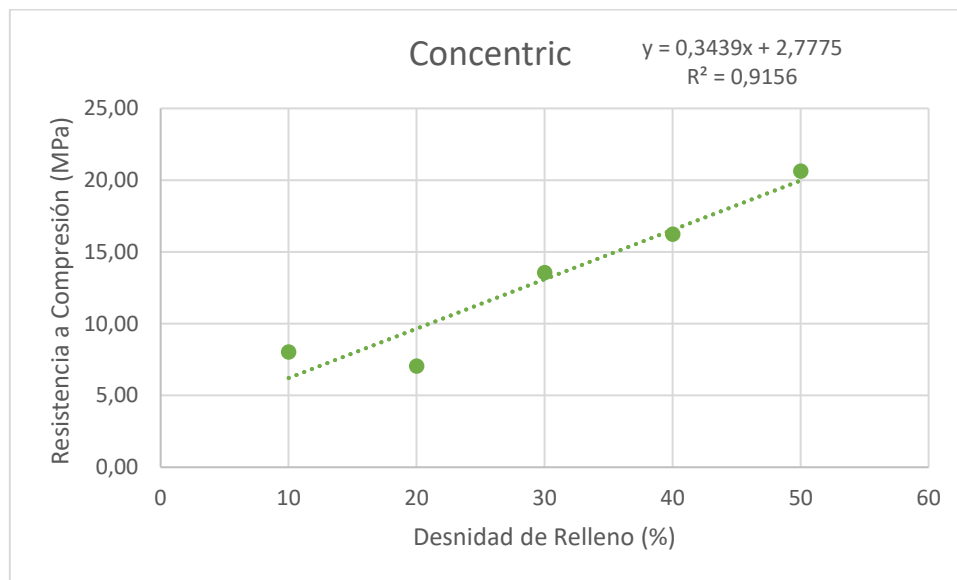


Figura 11.2. Gráfica resistencia a compresión Concentric. [F.P]

En la figura 11.2 se aprecia la tendencia lineal alcista de la resistencia a compresión, con una pendiente de 0,34. Sin embargo se puede ver un valor de  $R^2$  de 0,91, esto es debido a la cierta irregularidad del aumento de la resistencia entre los distintos valores, no ajustándose del todo al valor lineal.

## 11.2 Grid

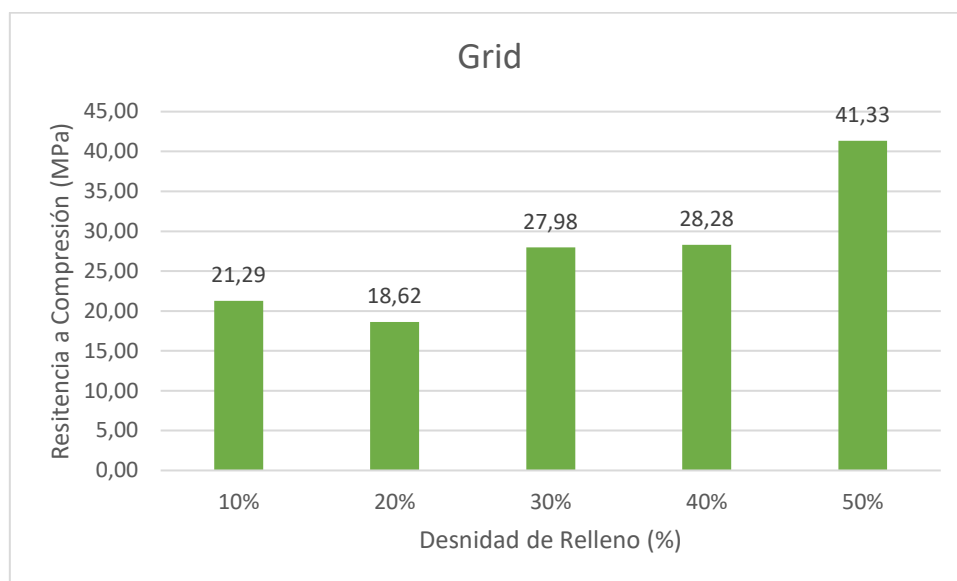


Figura 11.3. Diagrama de barras resistencia a compresión Grid [F.P]

Para el patrón de relleno grid, en el diagrama de la figura 11.3, se puede observar un comportamiento muy irregular. Destaca la disminución de la resistencia a compresión de 2,67 MPa entre las densidades del 10 al 20 %. También llama la atención que para el cambio del 30 al 40 %, la resistencia se mantiene prácticamente constante, aumentando tan solo en 0,3 MPa. Sin embargo, se puede apreciar un notorio incremento cuando se varía del 40 al 50 %, aumentando el valor de la resistencia en 13,05 MPa, alcanzando así un máximo de 41,33 MPa, lo que es un valor de la resistencia a compresión muy elevado.

### Resistencia a Compresión (MPa)

	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %
<b>Promedio</b>	21,29	18,62	27,98	28,28	41,33
<b>Máximo</b>	21,52	21,22	28,14	30,22	41,62
<b>Mínimo</b>	20,59	13,04	27,86	23,85	41,06
<b>Des. Estándar</b>	0,35	3,12	0,12	2,56	0,25
<b>Coef. Variación</b>	1,64	16,73	0,45	9,04	0,61

Tabla 11.2 Resistencia a compresión Grid

Estudiando los valores estadísticos, se ve que hay una gran desviación en los valores para el 20 %, variando entre un máximo de 21,22 MPa, y un mínimo de 13,04 MPa. Esta variación tan alta se debe a un error en la impresión, por obstrucción de la boquilla o por los problemas con la distancia de retracción. Se puede observar que el valor máximo del 20 %, supera al mínimo del 10 %, y analizando también el coeficiente de variación se aprecia un valor muy elevado del 16,73 % para las probetas del 20 % de relleno, lo que



significa que el valor promedio no es realmente significativo, debido a los errores dichos anteriormente.

Se observa también un coeficiente de variación muy elevado para las probetas del 40 %, un 9,04 %, esto es debido a que el máximo se encuentre en 30,22 MPa y el mínimo en 23,85 MPa, con lo cual el valor promedio tampoco resulta muy significativo.

El resto de los valores si tienen una desviación y coeficientes de variación dentro de los parámetros aceptables.

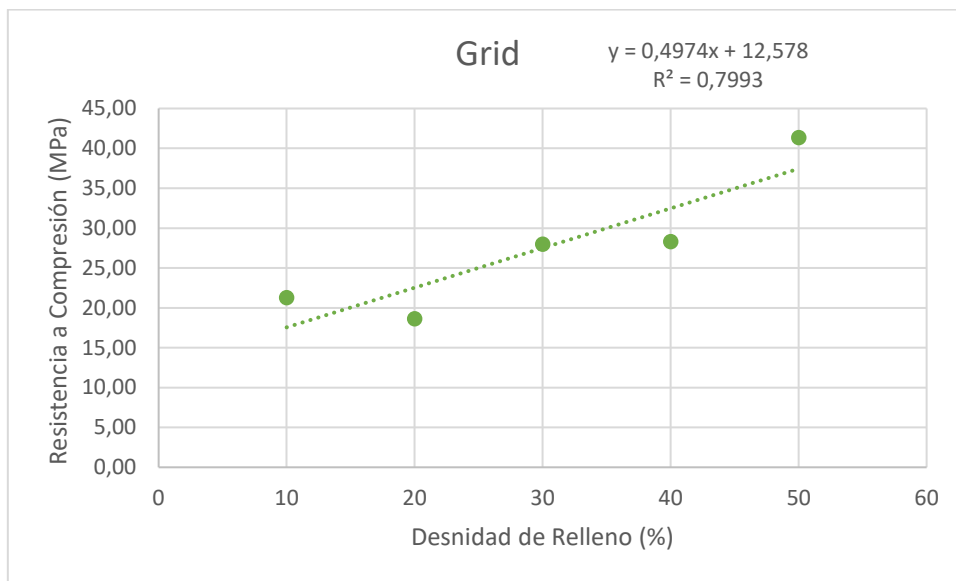


Figura 11.4. Gráfica resistencia a compresión Grid. [F.P]

Estudiando la gráfica se observa un comportamiento lineal ascendente, con una pendiente del 0,49. El valor de  $R^2$  dista bastante de la unidad ya que el comportamiento irregular de las tandas al 20 y 40 % debido a los posibles fallos, desajusta mucho el valor que se ajusta mejor al comportamiento lineal.

### 11.3 Lines

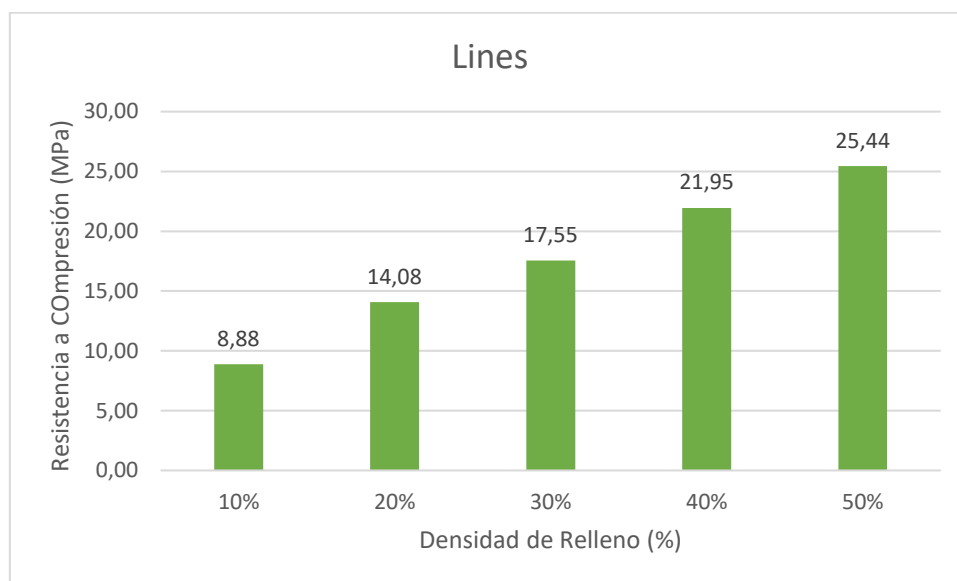


Figura 11.5. Diagrama de barras resistencia a compresión Lines [F.P]

Como se puede observar en el diagrama, conforme se aumenta la densidad de relleno, lo hace también la resistencia a compresión, de una forma bastante proporcionada, siendo el mayor salto entre el 10 % y el 20 %, con una diferencia de 5,2 MPa y la menor diferencia del 40 % al 50 % con 3,44 MPa esta diferencia es prácticamente la misma que en el salto de 20 % a 30 %, que es de 3,47 MPa.

	<b>Resistencia a Compresión (MPa)</b>				
	<b>10 %</b>	<b>20 %</b>	<b>30 %</b>	<b>40 %</b>	<b>50 %</b>
<b>Promedio</b>	8,88	14,08	17,55	21,95	25,44
<b>Máximo</b>	9,15	14,15	17,65	22,13	25,77
<b>Mínimo</b>	8,66	13,93	17,35	21,62	25,03
<b>Des. Estándar</b>	0,22	0,10	0,11	0,19	0,26
<b>Coef. Variación</b>	2,45	0,68	0,63	0,86	1,02

Tabla 11.3 Resistencia a compresión Lines

El valor promedio máximo se encuentra al 50 %, con 25,44 MPa y el mínimo con la densidad del 10 % con una resistencia de 8,88 MPa.

En general no hay mucha variación entre los máximos y los mínimos para cada densidad de relleno, con lo cual la desviación estándar y el coeficiente de variación tienen valores muy bajos. La mayor variación se encuentre para la densidad de 10 % con una desviación de 0,22 MPa y un coeficiente de variación del 2,45.

Con lo cual de esta tanda la probeta que más resistencia a compresión obtuvo fue una de tanda del 50 % con un valor de 25,77 MPa, y la que menos una del 10 % con 8,66 MPa.

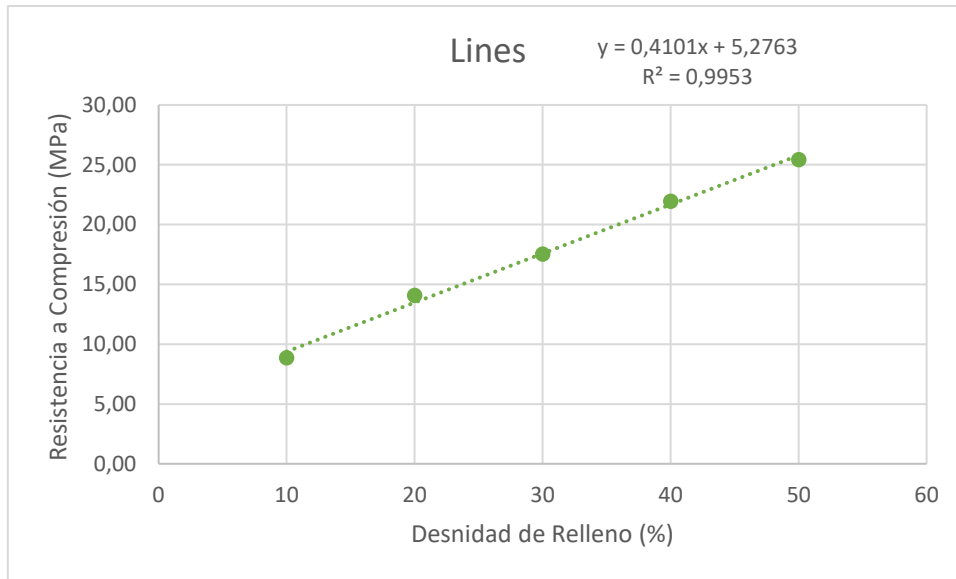


Figura 11.6. Gráfica resistencia a compresión Lines [F.P]

En la gráfica de la figura 11.6 se puede apreciar mejor el comportamiento lineal nombrado anteriormente, con una pendiente de 0,41 y un  $R^2$  de 0,99, este valor tan próximo a la unidad indica un ajuste prácticamente perfecto a la tendencia lineal.

## 11.4 Triangles

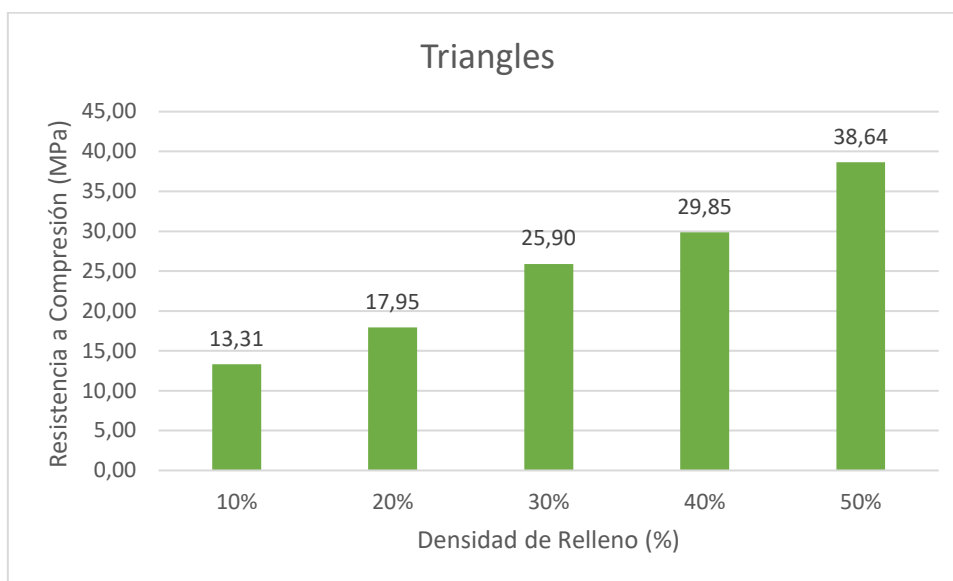


Figura 11.7. Diagrama de barras resistencia a compresión Triangles [F.P]

Para el caso del patrón de relleno triangles se observan diferencias bastante grandes conforme se van cambiando las densidades de relleno, con diferencias de 8,79 MPa entre el 40 % y el 50 % y de 7,95 MPa del 20 % al 30 %.

Una vez más se puede observar el comportamiento lineal, de esta forma va aumentando la resistencia a compresión conforme se va aumentando la densidad de relleno, siendo el valor promedio mínimo para el 10 % con 13,31 MPa y el máximo para el 50 % con 38,64 MPa, con lo cual se obtiene una resistencia a compresión muy elevada.

	<b>Resistencia a Compresión (MPa)</b>				
	<b>10 %</b>	<b>20 %</b>	<b>30 %</b>	<b>40 %</b>	<b>50 %</b>
<b>Promedio</b>	13,31	17,95	25,90	29,85	38,64
<b>Máximo</b>	13,34	18,15	28,14	31,07	39,50
<b>Mínimo</b>	13,25	17,65	21,59	26,54	37,43
<b>Des. Estándar</b>	0,03	0,19	2,34	1,87	0,90
<b>Coef. Variación</b>	0,25	1,08	9,05	6,26	2,32

Tabla 11.4 Resistencia a compresión Triangles

Respecto a la desviación se observan valores muy pequeños en las densidades del 10, 20 y 50 %, y un poco más elevados para los porcentajes intermedios de 30 y 40 %, alcanzando un máximo en la desviación estándar de 2,34 MPa, con un coeficiente de variación del 9,05 % para la densidad del 30 %.

El máximo valor obtenido son 39,50 MPa para una probeta al 50 %, y el mínimo 13,25 MPa para una del 10 %, esto hace una diferencia de 26,25 MPa entre los valores más extremos.

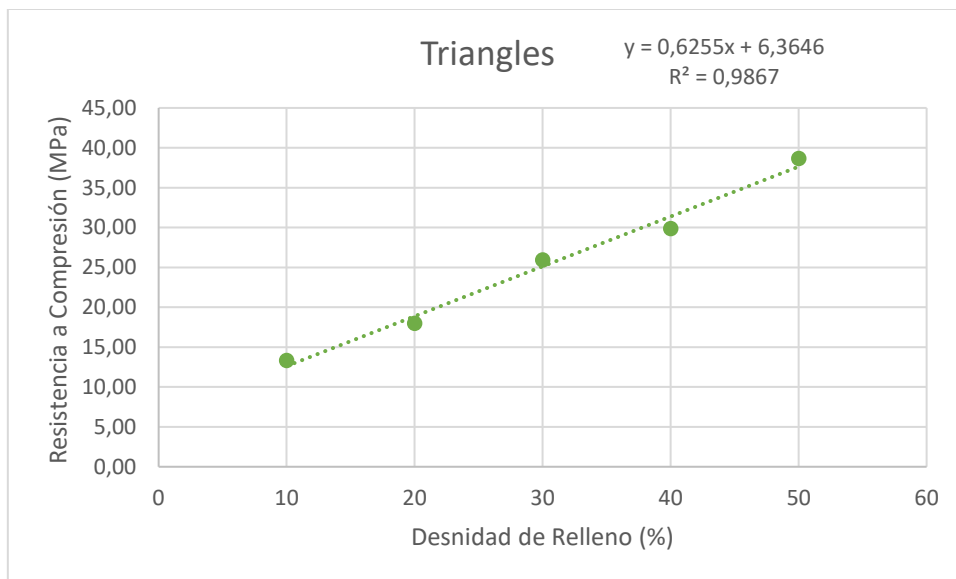


Figura 11.8. Gráfica resistencia a compresión Triangles [F.P]

En esta representación gráfica se observa que la tendencia lineal tiene una pendiente del 0,62, y ya que la  $R^2$  es de 0,98 se comprueba que los distintos valores de la resistencia a compresión se ajustan en gran medida al valor lineal.

### 11.5 Zigzag

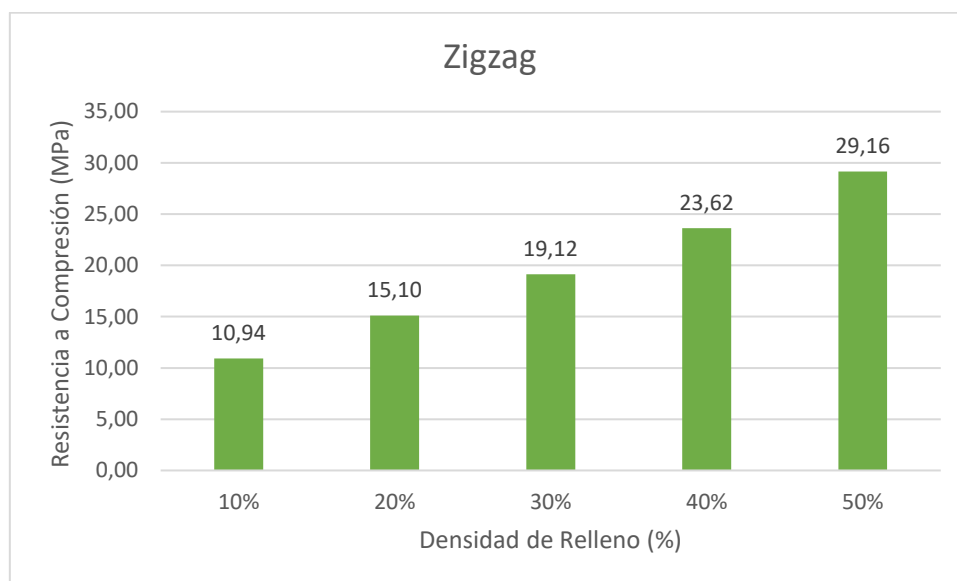


Figura 11.9. Diagrama de barras resistencia a compresión Zigzag [F.P]

Para los resultados obtenidos con el patrón de relleno zigzag se aprecia el mismo patrón de tendencia lineal visto anteriormente, aumentando progresivamente la resistencia a compresión conforme se incrementa el porcentaje de relleno. Destaca que en todos los casos el aumento es muy parecido, rondando a los 4,5 MPa en cada incremento, siendo la mayor diferencia de 5,54 MPa del 40 al 50 % y la menor de 4,1 MPa del 20 al 30 %.

El máximo valor de resistencia lo proporcionan las probetas del 50 % de relleno con un valor de 29,16 MPa, siendo el mínimo el de las de 10 % con 10,94 MPa.

	<b>Resistencia a Compresión (MPa)</b>				
	<b>10 %</b>	<b>20 %</b>	<b>30 %</b>	<b>40 %</b>	<b>50 %</b>
<b>Promedio</b>	10,94	15,10	19,12	23,62	29,16
<b>Máximo</b>	12,14	15,31	19,50	23,85	29,87
<b>Mínimo</b>	9,17	14,46	18,84	23,24	27,97
<b>Des. Estándar</b>	1,00	0,32	0,22	0,22	0,70
<b>Coef. Variación</b>	9,13	2,10	1,18	0,94	2,41

Tabla 11.4 Resistencia a compresión Zigzag

Analizando los parámetros estadísticos se observa una desviación estándar bastante baja, por debajo de 1 MPa en todos los casos, siendo la máxima desviación 1 MPa para el 10 % de relleno y el mínimo 0,22 para las densidades del 30 y 40 %. Por lo tanto, el coeficiente de variación más elevado es también el del 10 % de relleno, con un valor elevado de 9,13, lo que muestra que el valor promedio de la resistencia a compresión es menos representativo para este caso que para el resto.

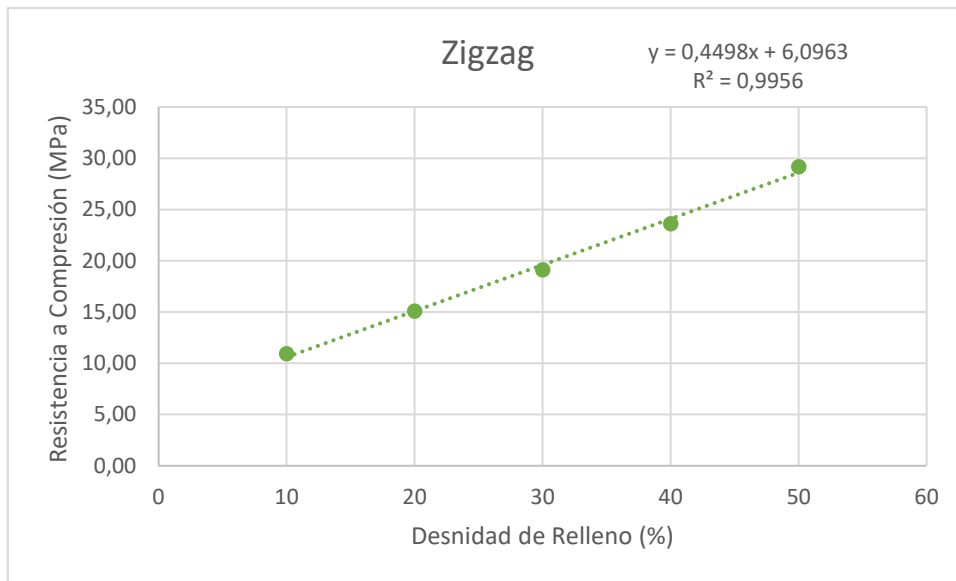


Figura 11.10. Gráfica resistencia a compresión Triangles [F.P]

Analizando gracias a la figura 11.10 el comportamiento lineal anteriormente nombrado, se ve que los puntos se ajustan altamente a la recta, devolviendo un valor de  $R^2$  de 0,99.

La pendiente tiene un valor de 0,45 aproximadamente, con lo cual se interpreta que el incremento de la resistencia a compresión conforme se eleva la densidad de relleno, no es muy pronunciado.

## 11.6 Comparación General

A continuación, se realiza una comparativa entre todos los resultados obtenidos para los distintos patrones de rellenos. En primer lugar, en la tabla 11.5 se muestran los valores de la resistencia a compresión de todas las probetas, en negrita se destacan los máximos para cada densidad de relleno.

Resistencia a Compresión (MPa)

	Concentric	Grid	Lines	Triangles	Zigzag
10 %	8,03	<b>21,29</b>	8,88	13,31	10,94
20 %	7,03	<b>18,62</b>	14,08	17,95	15,10
30 %	13,56	<b>27,98</b>	17,55	25,90	19,12
40 %	16,23	28,28	21,95	<b>29,85</b>	23,62
50 %	20,63	<b>41,33</b>	25,44	38,64	29,16

Tabla 11.5 Resistencia a compresión de todas las probetas

Para las densidades del 10 %, el patrón con una mayor resistencia a compresión es con diferencia, el patrón grid, alcanzando los 21,29 MPa, en segundo lugar, y con una resistencia un 37 % menor, se encuentra el patrón triangles con 13,31 MPa. El patrón zigzag se encuentra en una posición intermedia, con 10,94 MPa, y por debajo de el con unos valores muy próximos, se sitúan los patrones lines y concentric con respectivamente 8,88 y 8,03 MPa, siendo concentric el patrón con menor resistencia para este relleno.

Para una densidad del 20 %, nuevamente el patrón concentric es el que menor resistencia posee, con 7,03 MPa, quedando muy por detrás del segundo valor más bajo, que corresponde al patrón lines con 14,08 MPa, significando esto un incremento del 50 %. Nuevamente el valor máximo se encuentra en el patrón grid, con 18,62 MPa y tan solo un valor del 3,6 % inferior, se encuentra el patrón triangles con 17,95 MPa, estando esta vez muy próximos los valores entre ellos.

Si se observan los valores obtenidos para una densidad del 30%, se repite el patrón visto anteriormente, siendo otra vez la máxima resistencia correspondiente a las probetas con patrón grid con 27,98 MPa y muy poco por debajo el patrón triangles con 25,90 MPa. Ina vez más el valor mínimo corresponde al concentric con 13,56 MPa. Los patrones lines y zigzag se encuentran bastante próximos en esta densidad de relleno con 17,55 y 19,12 MPa respectivamente.

Respecto a los valores al 40 % se observa una diferencia, esta vez el valor máximo de resistencia a compresión lo obtiene el patrón triangles, con 29,85 MPa un 5,2% más que



el valor de 28,28 MPa del patrón grid, sin embargo, este cambio en el patrón de los resultados seguramente se deba al posible fallo en la impresión de las probetas de este porcentaje para el patrón grid. Los demás patrones siguen en los parámetros esperados, siendo el patrón concéntrico el de menor resistencia con 16,23 MPa, seguido de los patrones líneas y zigzag con 21,95 y 23,62 MPa respectivamente.

Finalmente, analizando los valores de la resistencia para las probetas al 50% de densidad, se observa una vuelta a la tendencia que se lleva viendo para los casos del 10, 20 y 30 %, alcanzado el máximo de resistencia el patrón grid con 41,33 MPa, una resistencia a compresión bastante elevada, seguida de la desarrollada por el patrón triángulos, 38,64 MPa, lo que representa un valor de un 6,5 % menos que el patrón grid. De nuevo el siguiente patrón con más resistencia es el zigzag con 29,16 MPa, seguido por el patrón líneas con 25,44 MPa y finalmente, el mínimo de resistencia lo obtiene de nuevo el patrón concéntrico con 20,63 MPa.

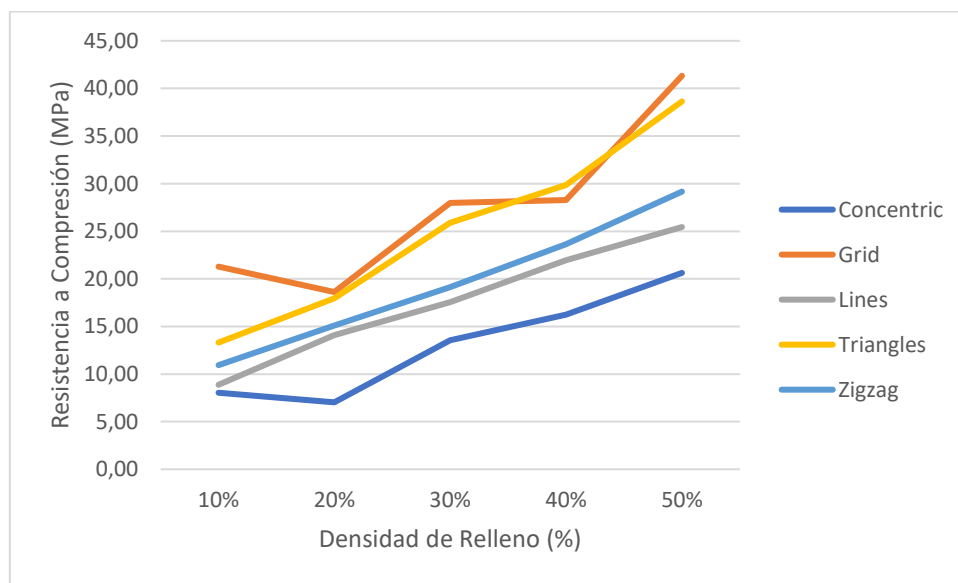


Figura 11.11. Gráfica de resistencia a compresión de todas las probetas. [F.P]

Si se observa la gráfica de la figura 11.11, se aprecia como en todo momento el patrón de relleno es el que tiene los valores más reducidos de resistencia a compresión.

Los patrones zigzag y líneas tienen un comportamiento muy constante y lineal, muy próximos en todo momento en su resistencia, pero siempre estando el patrón zigzag ligeramente por encima.

A continuación, se puede ver como los patrones grid y triángulos comienzan con bastante diferencia de resistencia, pero posteriormente debido a la gran pendiente que desarrolla

el patrón triangles, los valores se aproximan llegando a ser muy similares, o incluso a superar en el 40% de densidad, el patrón triangles al grid.

Destaca el comportamiento lineal prácticamente perfecto que tienen los patrones triangles, lines y zigzag, sin embargo, este comportamiento no es tan apreciable en los patrones grid y concentric debido a las fluctuaciones en sus valores.

A continuación, en la tabla 11.6 y la figura 11.12 se representan los distintos tiempos de impresión que han requerido las probetas.

**Tiempo de impresión (h:min)**

	Concentric	Grid	Lines	Triangles	Zigzag
10 %	5:32	6:29	5:41	5:36	5:45
20 %	6:20	6:32	6:45	6:40	6:48
30 %	7:25	7:47	8:02	7:52	7:45
40 %	8:29	8:47	9:08	8:50	9:00
50 %	9:32	9:48	9:53	10:18	9:53

Tabla 11.6. Tiempo de impresión de todas las probetas

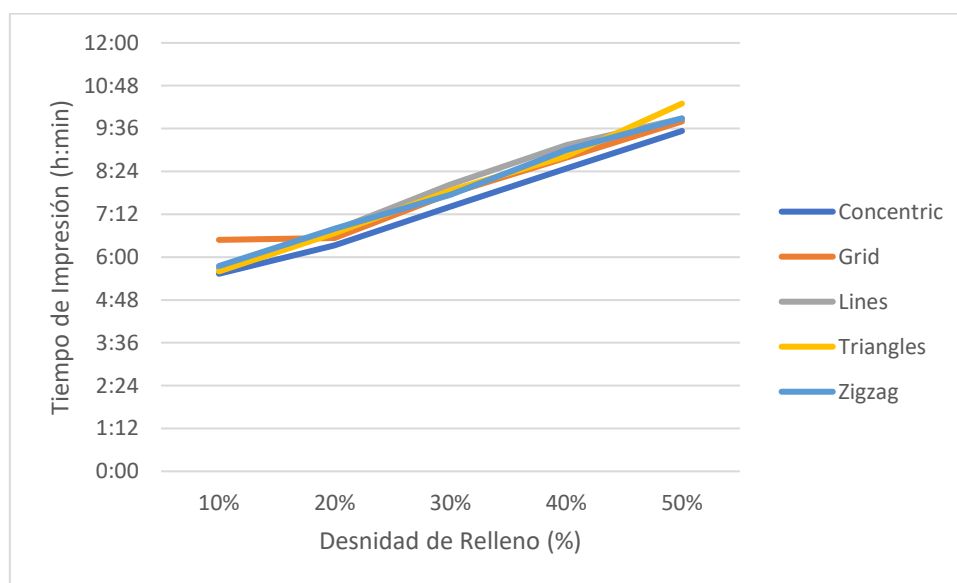


Figura 11.12. Tiempos de impresión de las probetas. [F.P]

Como se puede observar, los tiempos de impresión van aumentando conforme se incrementa la densidad de relleno, debido a que la impresora debe aportar una cantidad de material mayor. Estos tiempos varían desde unas 5 horas y media hasta las 10 horas para los porcentajes de mayor densidad.

Por lo general, el patrón que menos tiempo de impresión requiere, aunque no sea mucha la diferencia, es el concentric, coincidiendo así con el patrón que menos resistencia tiene. Se puede apreciar que los tiempos se encuentran bastante agrupados, solo habiendo dos valores que destacan, el tiempo del grid al 10 %, que es prácticamente una hora superior a los demás, y el tiempo del patrón triangles al 50 %, que no es una diferencia tan elevada, pero ronda a la media hora de diferencia respecto al resto.

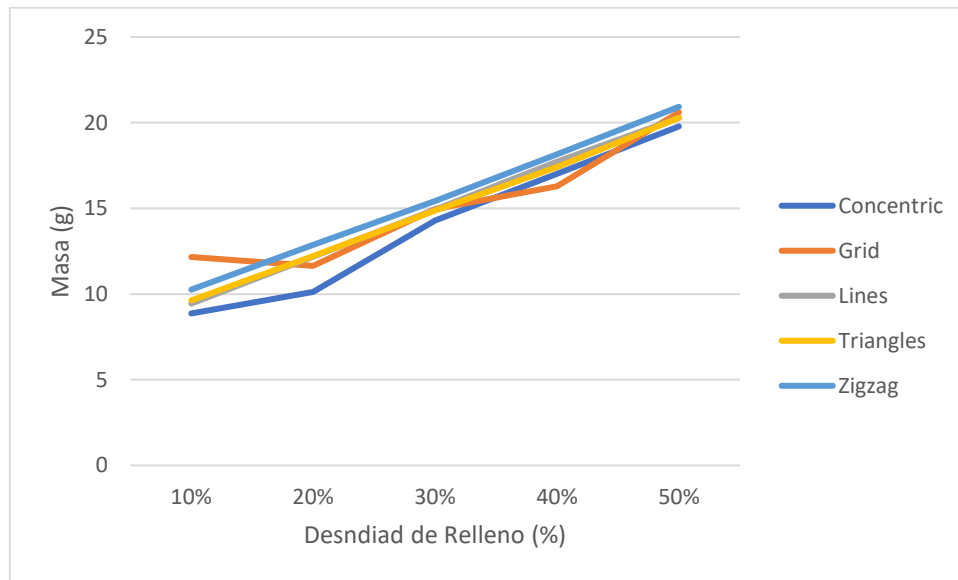


Figura 11.13. Masa de las probetas. [F.P]

En la figura 11.13 se representa la masa de las probetas frente a la densidad de relleno. Se observa nuevamente que debido a que, a mayor densidad, mayor aporte de material, por lo tanto, la masa va aumentando de forma lineal.

Se puede ver que los patrones lines y triangles poseen prácticamente la misma masa en todo momento, junto con el patrón zigzag, siendo esta un poco superior. Para los porcentajes más pequeños se observa que el patrón concentric es el que menor masa posee, esto está directamente relacionado con que sea uno de los que menos capacidad de resistencia tengan.

Respecto al patrón grid se puede apreciar que para la densidad del 10 % su masa es superior a las demás, rondando a los 12 gramos frente a los 10 gramos que poseen los demás rellenos aproximadamente. Sin embargo, el punto que realmente sorprende es el de la densidad de 40 %, ya que se coloca en la masa mínima respecto a los demás patrones, esto es un claro indicativo de que durante la impresión hubo problemas con el aporte de material en esta tanda de probetas.

Al llegar al 50 % de densidad, todos los valores se agrupan en torno a los 20 gramos, siendo el patrón con la masa más elevada el zigzag.

Para estudiar de una forma más detallada la relación entre la resistencia a compresión y la masa, se ha decidido realizar el gráfico de la figura 11.14.

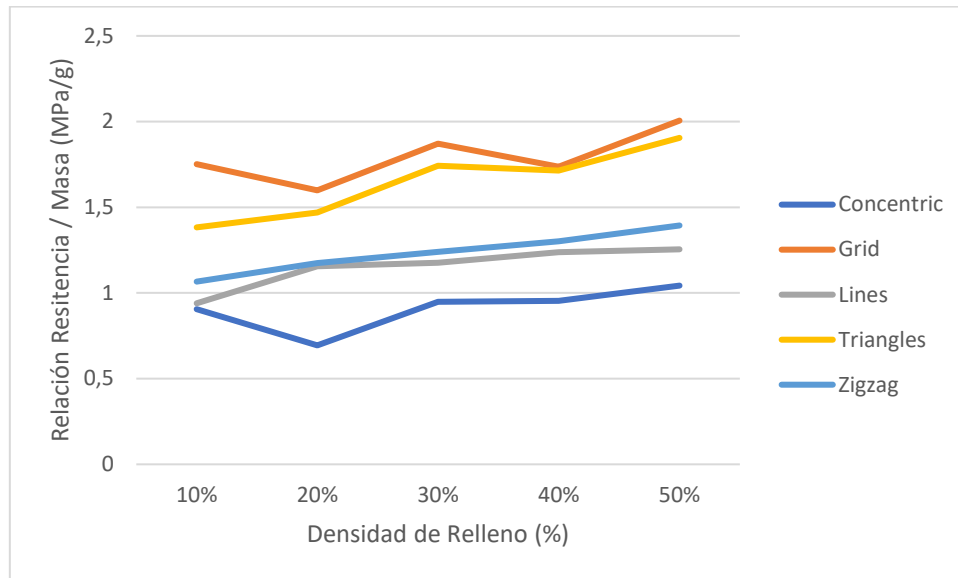


Figura 11.14. Resistencia a compresión/Masa de las probetas. [F.P]

En esta gráfica se encuentran unos valores semejantes a los anteriores. Una vez más el patrón triangles y grid son los que más resistencia desarrollan por gramo, comenzando el grid con un valor muy superior al del patrón triangles, unos 0,5 MPa por gramo por encima, para posteriormente igualarse. Sin embargo, al llegar al 40 % se ve como en esta comparación, el patrón grid sigue teniendo un valor mayor al de triangles, por lo tanto, se termina de comprobar que el patrón triangles tiene más resistencia a compresión al 40 %, porque la tanda de probetas de grid salió defectuosa.

Los patrones lines y zigzag siguen estando muy próximos y el patrón concentric continúa siendo el que menor resistencia puede soportar, independientemente de la masa de filamento utilizada.

### 11.7 Comparación con datos anteriores

Del TFG de Gonzalo [1], se ha extraído la siguiente gráfica de resultados:

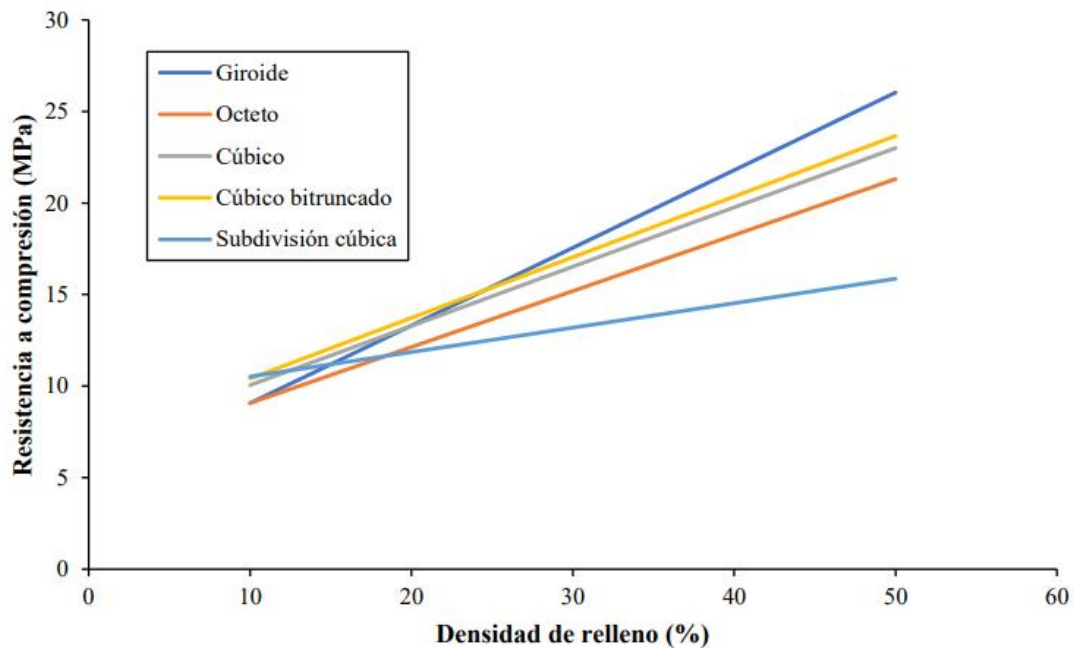


Figura 11.15. Resistencia a compresión de probetas de Gonzalo. [1]

Se observa que el patrón de subdivisión cúbica posee la mayor resistencia a compresión con la densidad del 10 %, con un valor de 10,84 MPa, sin embargo, conforme se va aumentando la densidad, el crecimiento de la resistencia es menor respecto a los demás patrones, siendo el que, para densidades del 30, 40 y 50 % menor resistencia posee.

Es apreciable un comportamiento inverso para el patrón giroide, comenzando este con la menor resistencia, pero al este tener una gran pendiente de crecimiento, alcanza los valores máximos para el 30, 40 y 50 % de relleno, siendo el mayor valor de los patrones estudiados 25,53 MPa.

Para el resto de los patrones se observa un comportamiento lineal continuo, siendo el patrón cúbico bitruncado el que posee mayor resistencia, seguido por el cúbico y finalmente por el patrón octeto.

Comparando estos resultados con los obtenidos en este proyecto, se aprecia el mismo comportamiento lineal ascendente conforme se aumenta la densidad. Sin embargo, el rango de valores de resistencia si varia considerablemente siendo el máximo del TFG de Gonzalo 25,53 MPa para el patrón giroide al 50 % y el de este proyecto 41,33 MPa para el grid al 50 %, haciendo esto una diferencia del 38 %.

En la figura 11.16, se representan los valores obtenidos por Gonzalo, y los de este trabajo en una única gráfica.

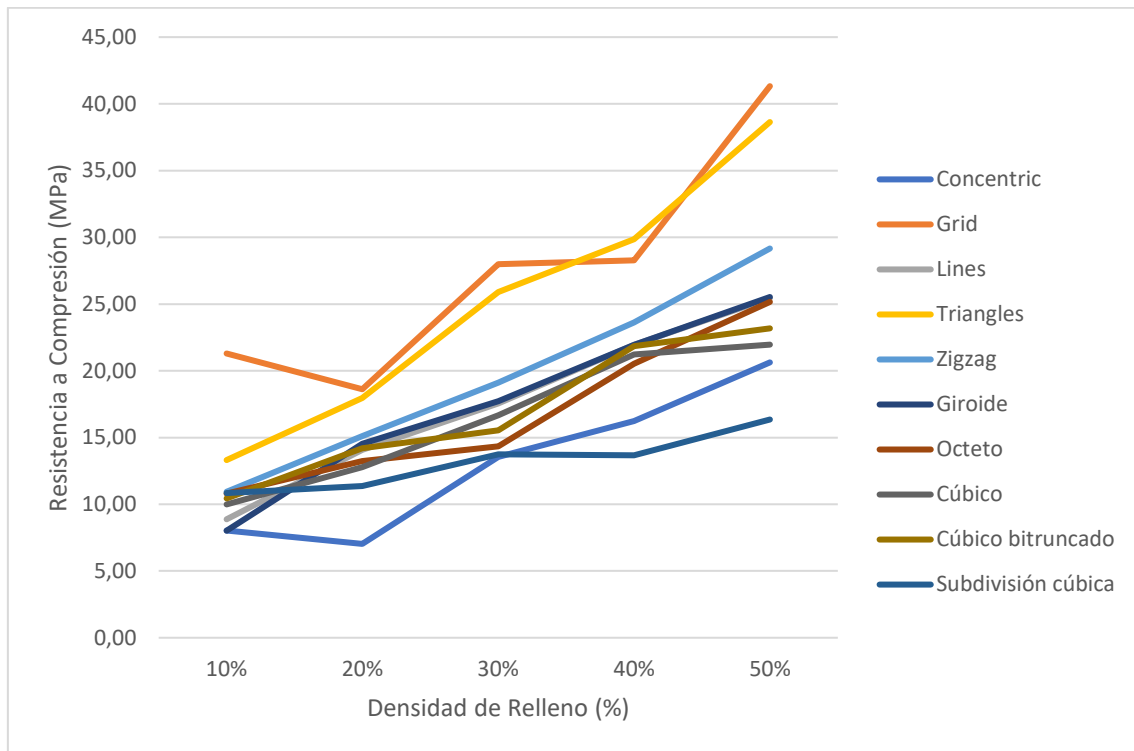


Figura 11.16. Resistencia a compresión de todas las probetas. [F.P]

Los valores de resistencia máximos son los obtenidos por los patrones grid y triangles con mucha diferencia respecto a los demás, seguidos por los valores del zigzag. Se puede apreciar una zona media donde se concentran los valores de la mayoría de los patrones, muy próximos entre ellos, estos patrones son el giroide, cúbico bitruncado, cúbico, lines y el octeto.

Los valores mínimos los registran los patrones concentric y subdivisión cúbica, siendo este último el que posee un valor mínimo de resistencia de todos los patrones analizados, con 16,35 MPa, lo que hace una diferencia total del 152 % entre este valor y el máximo de 41,33 MPa del patrón grid.

## 12. Conclusiones

Tras haber realizado este proyecto, se han llegado a las siguientes conclusiones:

- Este estudio, permite conocer en más profundidad como afectan los cambios de los parámetros de los rellenos de probetas impresas en 3D, alterando su densidad y patrón de relleno.
- Conforme se aumenta la densidad de relleno de la probeta, aumenta su resistencia a compresión, de una forma aproximadamente lineal.
- El patrón de relleno con menos resistencia a compresión es en todo momento el concentric, siendo este a la vez el que menos tiempo y material de impresión requiere. Debido a su baja resistencia, no es recomendable que sea utilizado en situaciones que supongan una elevada fuerza de compresión.
- Los patrones triangles y grid son los que más resistencia poseen, destacando con diferencia frente a los demás patrones, siendo el patrón grid el que desarrolla una mayor resistencia, alcanzando un máximo de 41,33 MPa. Las resistencias a compresión tan elevadas que soportan estos patrones de relleno, los hacen bastante adecuados para ser empleados en situaciones de altas cargas de compresión.
- El patrón grid destaca sobre todos los demás a una densidad del 10 %, teniendo un 37 % más de resistencia que el patrón triangles, que es el más próximo.
- El patrón grid alcanza el máximo de resistencia para los porcentajes del 10, 20, 30 y 50 %. Al 40 % la resistencia máxima la obtiene el patrón triangles, lo más probable es que debido a un fallo de impresión con las probetas al 40% del patrón grid.
- Los patrones lines y zigzag se sitúan en todo momento en una zona media y muy próxima, destacando su incremento lineal, conforme se aumenta la densidad, prácticamente perfecto.
- El patrón zigzag es el que más material utiliza, por lo que no sería recomendable emplear este patrón, ya que otros patrones como el grid o triangles, requieren menos material y desarrollan una mayor resistencia.
- Con el aumento de la densidad de relleno, aumenta también el tiempo de impresión considerablemente, ya que es necesario aportar más material, estos tiempos varían desde las 5 horas y media, a las 10 horas.

## 13. Conclusions

After completing this project, the following conclusions have been reached:

- This study provides a deeper understanding of how changes in the parameters of 3D printed test specimen infills affect their density and infill pattern.
- As the infill density of the test specimen increases, its compressive strength also increases in an approximately linear manner.
- The concentric infill pattern consistently exhibits the lowest compressive strength, while requiring the least amount of time and printing material. Due to its low strength, it is not recommended for situations involving high compressive forces.
- The triangle and grid infill patterns demonstrate the highest strength, with the grid pattern significantly outperforming the others, reaching a maximum strength of 41.33 MPa. These infill patterns exhibit such high compressive strength, making them suitable for situations with high compressive loads.
- The grid pattern excels over all others at a density of 10%, displaying 37% more strength than the nearest pattern, triangles.
- The grid pattern reaches maximum strength at 10%, 20%, 30%, and 50% infill densities. At 40% infill density, the triangles pattern achieves the highest strength, possibly due to a printing failure with the grid pattern test specimens at 40% density.
- The lines and zigzag patterns consistently occupy a middle and closely spaced zone, displaying a nearly perfect linear increase as the infill density increases.
- The zigzag pattern requires the most material, making it less recommended compared to other patterns such as grid or triangles, which require less material while offering greater strength.
- As the infill density increases, the printing time also increases significantly, as more material needs to be deposited. These printing times range from 5 and a half to 10 hours.



## 14. Líneas futuras de trabajo

Este TFG ya de por sí es una continuación de un estudio anterior sobre cómo afectan en la resistencia a compresión los cambios en el patrón y densidad de relleno en probetas de PLA, sin embargo, aún queda mucho trabajo de investigación que se puede realizar en este ámbito, como pueden ser las siguientes propuestas:

- Probar con otros materiales de impresión, como pueden ser ABS o PETG.
- Realizar el mismo estudio para otros patrones de relleno.
- Aunque sea más laborioso, debido al aumento del tiempo de impresión y de material empleado, se podría continuar el estudio aumentando las densidades de relleno, por ejemplo, al 60, 70, 80 y 90 %.
- Se podría probar a hacer un estudio similar, pero empleando otro tipo de tecnología de impresión.
- Estudiar cómo afecta la variación de ciertos parámetros de impresión, como velocidad, temperatura de la boquilla, número de capas exteriores, etc.

## 15. Bibliografía

- [1] Lugo Velázquez, G. (2022). *Resistencia a compresión de probetas fabricadas en pla con distinto relleno*. RIULL Principal. <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/26853>
- [2] Alvarez C, K. L., Lagos C, R. F., & Aizpun, M. (2016). *Influencia del Porcentaje de Relleno en la Resistencia Mecánica en impresión 3d, por medio del método de modelado por deposición fundida (FDM)*. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*. [https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-33052016000500003&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-33052016000500003&script=sci_arttext)
- [3] Martí Rodríguez, Bernat. (2017). *Estudio sobre la Optimización de los parámetros de fabricación en una impresora 3D con tecnología FDM* [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/106056/TFG\\_Volumen%20I\\_Memoria.pdf?sequence=1](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/106056/TFG_Volumen%20I_Memoria.pdf?sequence=1)
- [4] Patiño Crespo, G. D. (2022, septiembre). *Estudio y Caracterización de Propiedades mecánicas de piezas compuestas de Fibras Carbono y Nylon Producidas mediante impresión 3D*. Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana: Página de inicio. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/23647>
- [5] Acosta Camacho, J. A., Ramón Vidal, A. B., & Helguero Alcívar, C. (2021). *Comparación Tecnológica de patrones de relleno en impresión 3d por extrusión USANDO simulación*. DSpace en ESPOL: Home. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/54726>
- [6] (2021). *Fabricación aditiva: ¿Qué es la fabricación aditiva?* Autodesk. Retrieved May 5, 2023, from <https://www.autodesk.es/solutions/additive-manufacturing#:~:text=La%20fabricaci%C3%B3n%20aditiva%2C%20tambi%C3%A9n%20conocida,partir%20de%20un%20modelo%20digital>.
- [7] (2020). *Fabricacion Aditiva: Definición, procesos y beneficios*. Electrónica Edimar. Retrieved May 5, 2023, from <https://edimar.com/fabricacion-aditiva-que-es/#:~:text=El%20origen%20del%20concepto%20de,un%20objeto%20capa%20a%20capa>.
- [8] (2021). *Fabricación aditiva: ¿Qué es y qué tipos existen?* Innovación y Tecnología. Retrieved May 5, 2023, from <https://www.innovacion-tecnologia.com/fabricacion-aditiva/>
- [9] Servitec3D. (2022). *Tipos de impresoras 3d que existen y sus usos*. Servitec3D. Retrieved May 5, 2023, from <https://servitec3d.com/blog/tipos-de-impresoras-3d/>
- [10] L. Serrano-Cinchilla, L. Bustamante-Góez, Villarraga-Ossa, Junes Abdul, “Influencia de la densidad y de los parámetros de relleno en las propiedades mecánicas compresivas de probetas fabricadas en manufactura aditiva de PLA”, *Revista UIS Ingenierías*, 2022, Vol.21 (2), p.107-114
- [11] (2020). *División de Manufactura Aditiva y componentes*. ICAMYCYL. Retrieved May 5, 2023, from <https://www.icamcyl.com/es/division-de-manufactura-aditiva-y-componentes>

- [12] (s.f). *Comprender la Tecnología de Fusión por lecho de polvo*. Protolabs. Retrieved May 5, 2023, from <https://www.protolabs.com/es-es/recursos/sugerencias-de-diseno/comprender-la-tecnologia-de-fusion-por-lecho-de-polvo/#:~:text=La%20fusi%C3%B3n%20por%20lecho%20de%20polvo%20es%20una%20tecnolog%C3%ADa%20de,capa%20hasta%20completar%20la%20pieza.>
- [13] (2023). *Impresoras 3d metal: Guía de compra de 2023*. All3DP Pro. Retrieved May 5, 2023, from <https://all3dp.com/es/1/impresion-3d-metal-impresora-3d-metal/>
- [14] C., L. (2023). *Guía completa: Binder jetting O inyección de aglutinante, ¡Te Lo contamos todo!*. 3Dnatives. Retrieved May 6, 2023, from <https://www.3dnatives.com/es/inyeccion-aglutinante-te-lo-contamos-23032016/#!>
- [15] Sculpteo. (2020). *The state of 3D printing: The data you need to understand the 3D printing world and build your 3D printing strategy*.
- [16] *Fabricación Aditiva*. Fabricacionaditiva.online. (n.d.). Retrieved May 6, 2023, from <http://www.fabricacionaditiva.online/101.htm>
- [17] Admin. (2022). *Impresoras 3d Como Funcionan*. 3D Market. Retrieved May 6, 2023, from <https://www.3dmarket.mx/consejos-impresion/impresora-3d-amazon/>
- [18] *Filamento SMARTFIL Pla Coral*. Filamento SMARTFIL PLA Coral. (n.d.). <https://www.3dfilamento.es/es/product/6551717-bobina-filamento-smartfil-pla-coral->
- [19] (2023). *Inyección de material*. Dassault Systèmes. Retrieved May 6, 2023, from <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/material-jetting>
- [20] (2022). *Tipos de impresoras 3D: Las 7 tecnologías de Impresión 3D*. All3DP. Retrieved May 6, 2023, from <https://all3dp.com/es/1/tipos-de-impresoras-3d-tecnologia-de-impresion-3d/#:~:text=Tipo%20de%20impresora%203D%3A%20inyecci%C3%B3n%20de%20material,-Inyecci%C3%B3n%20de%20material&text=Usando%20fotopol%C3%ADmeros%20o%20gotas%20de,materiales%20en%20el%20mismo%20objeto.>
- [21] (2022). *Deposición de Energía Dirigida*. Dassault Systèmes. Retrieved May 7, 2023, from <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/directed-energy-deposition>
- [22] (s.f). Hisour Arte Cultura Historia. (n.d.). Retrieved May 7, 2023, from <https://www.hisour.com/es/sheet-lamination-manufacturing-40663/>
- [23] Orozco, J. (n.d.). Las 7 categorías de la Manufactura Aditiva. Retrieved May 8, 2023, from <https://blog.laminasyaceros.com/blog/las-7-categor%C3%ADas-de-la-manufactura-aditiva>
- [24] *Fotopolimerización*. Dassault Systèmes. (2022, July 5). Retrieved May 8, 2023, from <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/photopolymerization>

- [25] (2022). *Infill en Cura: Los Mejores patrones de Relleno*. All3DP. <https://all3dp.com/es/2/infill-cura-relleno-impresion-3d/>
- [26] *Patrones de Relleno*. Prusa Knowledge Base. (n.d.). <https://help.prusa3d.com/es/article/patrones-de-relleno-177130>
- [27] M., A. (2023, June 22). *¿Qué es la fabricación aditiva?*. 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/fundamentos-fabricacion-aditiva/#:~:text=Los%20materiales%20en%20la%20fabricaci%C3%B3n%20aditiva&text=Estos%20utilizan%20respectivamente%20el%20material,de%20polvo%20o%20la%20cer%C3%A1mica.>
- [28] *¿Qué son los termoplásticos?*. Aristegui Maquinaria. (2022, June 21). <https://www.aristegui.info/que-son-los-termoplasticos/>
- [29] Martínez., S. (2021, July 8). *Los Materiales de Impresión 3d Más utilizados*. <http://intelligy.com/>. <https://intelligy.com/blog/2021/07/08/los-materiales-de-impresion-3d-mas-utilizados/>
- [30] impresoras3d.com. (2023, April 28). *Guía de Uso: Filamento Pla para impresoras 3D*. impresoras3d.com. <https://www.impresoras3d.com/filamento-pla-consejos-caracteristicas-y-mucho-mas/>
- [31] *PETG transparente 1,75 mm / 1000 g*. 3DJake España. (n.d.). <https://www.3djake.es/3djake/petg-transparent-1>
- [32] *¿Qué es el plástico abs y es reciclable? - colectores de Plástico*. Plastic Collectors. (2020, April 23). <https://www.plasticcollectors.com/es/blog/what-is-abs-plastic/>
- [33] M., A. (2023a, April 19). *¿Qué características tiene el nylon en la impresión 3D?*. 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/caracteristicas-tiene-nylon-en-impresion-3d-120320202/#!>
- [34] *Filamento Nylon Para impresoras 3D*. impresoras3d.com. (n.d.). <https://www.impresoras3d.com/filamento/nylon/>
- [35] *TPE: Tipos de Polímeros*. Resinex. (n.d.). <https://www.resinex.es/tipos-de-polimeros/tpe.html#:~:text=E1%20TPE%20es%20el%20nombre,moldeo%20K%20o%20la%20extrusi%C3%B3n.>
- [36] *Flexible (TPE)*. LA FACTORÍA 3D - Flexible (TPE). (n.d.). [https://www.lafactoria3d.es/servicios/impresion/materiales/27/flexible\\_tpe](https://www.lafactoria3d.es/servicios/impresion/materiales/27/flexible_tpe)
- [37] *Plástico de policarbonato PC - tecanat*. Ensinger. (n.d.). <https://www.ensingerplastics.com/es-es/semielaborados/plasticos-de-ingenieria/policarbonato-pc>
- [38] *PC (policarbonato)*. Filament2Print. (n.d.). <https://filament2print.com/es/pc-policarbonato/661-pc-policarbonato.html>

- [39] *La Fabricación Aditiva. la evidencia de una necesidad*. Interempresas. (n.d.). <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/116342-La-fabricacion-aditiva-La-evidencia-de-una-necesidad.html>
- [40] *Oportunidades para la electrónica de fabricación aditiva*. Revista Electrónica Convertronic - Noticias y Actualidad Electrónica. (n.d.). <https://convertronic.net/noticias/tecnologia/9369-oportunidades-para-la-electronica-de-fabricacion-aditiva.html>
- [41] (2020, June 3). *Fabricacion Aditiva: Definición, procesos y beneficios*. Electrónica Edimar. <https://edimar.com/fabricacion-aditiva-que-es/>
- [42] Busto, L. (2023, March 10). *Todo sobre la Fabricación Aditiva en la automoción*. Mint for people. <https://mintforpeople.com/noticias/fabricacion-aditiva-automocion/>
- [43] Álvarez., D. (2019, August 2). *La impresión 3D y la industria automotriz: Lo que necesita saber*. <http://intelligy.com/>. <https://intelligy.com/blog/2019/08/02/la-impresion-3d-y-la-industria-automotriz-lo-que-necesita-saber/>
- [44] (2020, January 10). *Fabricación Aditiva y aplicaciones en medicina*. Blog Ingenius. <https://eddm.es/blog-ingenius/fabricacion-aditiva-aplicaciones-en-medicina/#:~:text=La%20fabricaci%C3%B3n%20aditiva%20se%20est%C3%A1,la%20fabricaci%C3%B3n%20de%20productos%20sanitarios.&text=Se%20define%20como%20bioimpresi%C3%B3n%20la,de%20tecnolog%C3%ADas%20de%20impresi%C3%B3n%203D>.
- [45] VI Congreso de Impresión 3D – 3D + print - 3dplusprint.com. (n.d.). <https://3dplusprint.com/vi-congreso-de-impresion-3d/>
- [46] (2020a, January 10). *Fabricación Aditiva y aplicaciones en medicina*. Blog Ingenius. <https://eddm.es/blog-ingenius/fabricacion-aditiva-aplicaciones-en-medicina/>
- [47] *Industria Aeroespacial*. DELTECO. (2022, July 4). <https://delteco.com/fabricacion-aditiva/industria-aeroespacial/#:~:text=La%20fabricaci%C3%B3n%20aditiva%20es%20la,un%20menor%20coste%20de%20suministro>.
- [48] C., L. (2021, October 28). *La Fabricación Aditiva de metal en la Industria Aeroespacial*. 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/fabricacion-aditiva-de-metal-291120172/#!>
- [49] *Ensayo de Compresión y Máquinas de Ensayos de Compresión*. Ensayo de compresión. (n.d.). <https://www.zwickroell.com/es/sectores/ensayo-de-materiales/ensayo-de-compresion/>
- [50] ¿En qué consiste un ensayo de compresión? | instron. (n.d.-a). <https://www.instron.com/es-es/resources/test-types/compression-test>

- [51] YouTube. (2021, December 28). *Diagrama tension - DEFORMACION Del Hormigón \*resistencia a compresion, traccion y flexotraccion\**. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=T6lu82mWN78>
- [52] *¿Por qué se realizan pruebas de compresión?*. RSS. (n.d.). <https://www.blog.metalinspec.com.mx/post/por-que-realizar-pruebas-de-compresion>
- [53] *Smartfil Pla Neo Pink (Rosa Fluorescente)*. El Tucán. (n.d.). [https://eltucan.es/pla/113-2991-smartfil-pla-neo-pink-rosa-fluorescente.html?gclid=Cj0KcQjw1\\_SkBhDwARIsANbGpFuq3XSpcN4jToEEYZmuaIjRDZU8k-Gsxp1SzlR13N2LHyOJthLih0gaAuzCEALw\\_wcB#/20-diametro-175\\_mm/119-tamano-330gr](https://eltucan.es/pla/113-2991-smartfil-pla-neo-pink-rosa-fluorescente.html?gclid=Cj0KcQjw1_SkBhDwARIsANbGpFuq3XSpcN4jToEEYZmuaIjRDZU8k-Gsxp1SzlR13N2LHyOJthLih0gaAuzCEALw_wcB#/20-diametro-175_mm/119-tamano-330gr)
- [54] “Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics.” <https://www.astm.org/d0695-15.html> (accessed Feb. 20, 2022).
- [55] “UNE-EN ISO 604:2003 Plásticos. Determinación de las propiedades en compresión.”
- [56] *Filamento de Limpieza clean smart materials*. ENANDDES. (2023, May 27). <https://enanddes.es/producto/filamento-limpieza-smartfil-clean-smart-materials/>

## 16. Glosario de términos

- **Fabricación aditiva:** Proceso de construcción de objetos tridimensionales mediante la deposición de capas sucesivas de material.
- **Estereolitografía (SLA):** Tecnología de impresión 3D que utiliza un láser para solidificar resinas fotosensibles capa por capa, creando objetos con alta precisión y detalles finos.
- **SLS (Selective Laser Sintering):** Proceso de impresión 3D en el que un láser fusiona partículas de polvo de un material termoplástico o metálico, capa por capa, para construir un objeto.
- **FDM (Fused Deposition Modeling):** Método de impresión 3D en el que un filamento termoplástico es extruido a través de una boquilla (nozzle) y depositado capa por capa para construir el objeto.
- **Binder Jetting:** Proceso de impresión 3D que utiliza un aglutinante líquido para unir partículas de polvo y crear objetos. El exceso de polvo no aglutinado se elimina después del proceso.
- **DLP (Digital Light Processing):** Tecnología de impresión 3D similar a la estereolitografía (SLA), pero utiliza una fuente de luz proyectada a través de una máscara digital para solidificar resinas fotosensibles.
- **Polímero:** Material compuesto por moléculas orgánicas enlazadas entre sí. Los polímeros se utilizan ampliamente en la impresión 3D, ya sea en forma de resinas líquidas o filamentos sólidos.
- **Extrusión:** Proceso en el que un material termoplástico se calienta y fuerza a través de una boquilla para formar un hilo continuo o filamento que se utiliza en la impresión 3D.
- **Fotopolimerización:** Proceso de solidificación de un material líquido utilizando luz ultravioleta (UV) o luz visible. Se utiliza en tecnologías como SLA y DLP.

- **Aglutinante:** Sustancia utilizada para unir partículas de polvo en la tecnología de impresión 3D por binder jetting.
- **Aleación metálica:** Material compuesto por la combinación de dos o más elementos metálicos. En la impresión 3D, se utilizan aleaciones metálicas para fabricar objetos metálicos mediante procesos como SLS o DED.
- **Termoplástico:** Tipo de polímero que puede fundirse y moldearse repetidamente cuando se calienta. Ejemplos comunes son el PLA y ABS.
- **Poliamida:** Tipo de polímero termoplástico utilizado en la impresión 3D, conocido comúnmente como nylon.
- **PLA:** Ácido poliláctico, es un termoplástico biodegradable ampliamente utilizado en la impresión 3D debido a su facilidad de uso y baja toxicidad.
- **ABS:** Acrilonitrilo butadieno estireno, un termoplástico ampliamente utilizado en la impresión 3D debido a su resistencia al impacto y durabilidad.
- **Luz ultravioleta:** Rango de radiación electromagnética que tiene una longitud de onda más corta que la luz visible. Se utiliza en la fotopolimerización en la impresión 3D.
- **DED (Directed Energy Deposition):** Proceso de impresión 3D en el que un material se deposita y funde utilizando un haz de energía concentrado, como un láser o un arco eléctrico.
- **LOM (Laminated Object Manufacturing):** Proceso de impresión 3D en el que se cortan capas de material (generalmente papel o plástico) y se unen para construir un objeto.
- **Dureza:** Propiedad mecánica que describe la resistencia de un material a la deformación por penetración o abrasión.



- **PETG:** Tipo de termoplástico utilizado en la impresión 3D conocido por su resistencia, transparencia y facilidad de impresión.
- **TPE (Thermoplastic Elastomer):** Tipo de polímero termoplástico que exhibe propiedades elásticas y flexibles.
- **Helicoidal:** Un patrón o diseño que se asemeja a una hélice o espiral.
- **Condensador:** Dispositivo utilizado para almacenar y liberar energía eléctrica en forma de carga.
- **Prototipo:** Producto o modelo inicial que se crea para probar y evaluar antes de la producción en masa.
- **Tensión:** Fuerza interna que actúa sobre un material cuando se somete a una carga externa.
- **Límite elástico:** Punto en el que un material deja de deformarse elásticamente y comienza a deformarse permanentemente bajo carga.
- **Resistencia a compresión:** Capacidad de un material para resistir fuerzas de compresión sin deformarse o fracturarse.
- **Nozzle:** Boquilla utilizada en la impresión 3D para extruir o depositar material de manera controlada.
- **Software:** Programas o aplicaciones utilizadas para diseñar, preparar y controlar procesos.
- **G-Code:** Lenguaje de programación utilizado en la impresión 3D para controlar y comunicarse con las impresoras mediante comandos específicos.

## 17. Índice de figuras

Figura 6.1. Fusión por lecho en polvo [13] .....	19
Figura 6.2. Inyección por aglutinante [14] .....	20
Figura 6.3. Fabricación Aditiva por extrusión [17] .....	21
Figura 6.4. Bobina de PLA. [18] .....	22
Figura 6.5. Fabricación Aditiva por inyección de material [19].....	23
Figura 6.6. Fabricación Aditiva por deposición de energía dirigida. [21].....	24
Figura 6.7. Fabricación aditiva por laminación por capas. [23].....	25
Figura 6.8. Fabricación aditiva por fotopolimerización de tanque. [24].....	26
Figura 6.9. Patrón de relleno Lightning al 20%. [F.P].....	27
Figura 6.10. Patrón de relleno Lines al 20%. [F.P] .....	28
Figura 6.11. Patrón de relleno ZigZag al 20%. [F.P].....	28
Figura 6.12. Patrón de relleno Grid al 20%. [F.P] .....	29
Figura 6.13. Patrón de relleno Triangles al 20%. [F.P] .....	29
Figura 6.14. Patrón de relleno Tri-Hexagon al 20%. [F.P].....	30
Figura 6.15. Patrón de relleno Cubic al 20%. [F.P].....	30
Figura 6.16. Patrón de relleno Cubic Subdivision al 20%. [F.P].....	31
Figura 6.17. Patrón de relleno Quarter Cubic al 20%. [F.P].....	31
Figura 6.18. Patrón de relleno Octet al 20%. [F.P].....	32
Figura 6.19. Patrón de relleno Gyroid al 20%. [F.P] .....	32
Figura 6.20. Patrón de relleno Concentric al 20%. [F.P].....	33
Figura 6.21. Patrón de relleno Cross al 20%. [F.P] .....	33
Figura 6.22. Patrón de relleno Cross 3D al 20%. [F.P] .....	33
Figura 6.23. Bobinas de PLA. [30].....	34
Figura 6.24. Bobina de PETG. [31].....	35
Figura 6.25. Plástico ABS. [32].....	35
Figura 6.26. Engranajes fabricados con nylon. [34].....	36
Figura 6.27. Zapatilla fabricada con TPE [36] .....	37
Figura 6.27. Bobina de PC. [38].....	37
Figura 6.28. Porcentajes de utilización de fabricación aditiva por sectores. [39].....	38
Figura 6.29. Fabricación aditiva de componente electrónico. [41] .....	39
Figura 6.30. Carcasa del motor impresa en 3D. [43].....	40
Figura 6.31. Biomodelos creados con impresión 3D. [45].....	41
Figura 6.32. Guías para cortar estructuras óseas. [44].....	41
Figura 6.33. Prótesis craneales fabricadas por impresión 3D. [46].....	42

Figura 6.34. Fabricación aditiva en ingeniería aeroespacial. [48].....	42
Figura 7.1. Diagrama Tensión-Deformación Hormigón. [51].....	44
Figura 7.2. Ensayo a compresión de una pelota de tenis. [52] .....	45
Figura 8.1. Impresora 3D [F.P].....	47
Figura 8.2. 3D Touch [F.P] .....	47
Figura 8.3. BondTech BMG [F.P] .....	47
Figura 8.4. Estación Meteorológica [F.P].....	48
Figura 8.5. Envasadora al vacío [F.P].....	48
Figura 8.6. Báscula [F.P] .....	49
Figura 8.7. Pie de rey [F.P].....	49
Figura 8.8. Máquina de ensayos. [F.P] .....	50
Figura 9.1. Envoltorio del filamento. [F.P].....	51
Figura 9.2. Filamento Smartfil Coral. [53].....	52
Figura 9.3. Piezas en posición. [F.P] .....	53
Figura 9.4. Panel de parámetros de impresión .....	53
Figura 9.5. Muestrario de probetas [F.P] .....	55
Figura 9.6. Filamento de limpieza. [56] .....	56
Figura 9.7. Adhesivo utilizado [F.P].....	56
Figura 9.8. Piezas finalizadas. [F.P] .....	57
Figura 9.9. Probetas numeradas. [F.P].....	58
Figura 9.10. Probetas etiquetas, numeradas y al vacío. [F.P] .....	58
Figura 9.11. Tanda afectada por la retracción. [F.P].....	59
Figura 9.12. Cubo afectado por la retracción. [F.P].....	59
Figura 9.13. Tanda afectada por obstrucción de la boquilla. [F.P] .....	60
Figura 9.15. Boquilla parcialmente obstruida. [F.P].....	61
Figura 9.16. Engrosamiento del filamento a la entrada del tubo guía. [F.P] .....	62
Figura 9.17. Engrosamiento del filamento. [F.P] .....	62
Figura 9.18. Filamento obstruyendo el extrusor. [F.P] .....	63
Figura 9.19. Filamento en el conducto interior del extrusor. [F.P].....	63
Figura 9.20. Primera capa de la probeta con desfase de sonda Z erróneo. [F.P] .....	64
Figura 9.21. Probeta despegada de la cama. [F.P].....	65
Figura 10.1. Aristas de las probetas. [F.P] .....	66
Figura 10.2. Probetas antes y después del ensayo. [F.P] .....	68
Figura 10.3. Extracto de los datos obtenidos en el ensayo de una probeta. [F.P].....	69
Figura 11.1. Diagrama de barras resistencia a compresión Concentric [F.P].....	70

Figura 11.2. Gráfica resistencia a compresión Concentric. [F.P] .....	71
Figura 11.3. Diagrama de barras resistencia a compresión Grid [F.P] .....	72
Figura 11.4. Gráfica resistencia a compresión Grid. [F.P] .....	73
Figura 11.5. Diagrama de barras resistencia a compresión Lines [F.P].....	74
Figura 11.6. Gráfica resistencia a compresión Lines [F.P].....	75
Figura 11.7. Diagrama de barras resistencia a compresión Triangles [F.P].....	76
Figura 11.8. Gráfica resistencia a compresión Triangles [F.P].....	77
Figura 11.9. Diagrama de barras resistencia a compresión Zigzag [F.P] .....	78
Figura 11.10. Gráfica resistencia a compresión Triangles [F.P].....	79
Figura 11.11. Gráfica de resistencia a compresión de todas las probetas. [F.P].....	81
Figura 11.12. Tiempos de impresión de las probetas. [F.P].....	82
Figura 11.13. Masa de las probetas. [F.P].....	83
Figura 11.14. Resistencia a compresión/Masa de las probetas. [F.P].....	84
Figura 11.15. Resistencia a compresión de probetas de Gonzalo. [1].....	85
Figura 11.16. Resistencia a compresión de todas las probetas. [F.P] .....	86

## 18. Índice de tablas

Tabla 9.1 Dimensiones Probetas.....	52
Tabla 9.2. Parámetros de impresión.....	54
Tabla 11.1 Resistencia a compresión Concentric .....	71
Tabla 11.2 Resistencia a compresión Grid .....	72
Tabla 11.3 Resistencia a compresión Lines .....	74
Tabla 11.4 Resistencia a compresión Triangles .....	76
Tabla 11.4 Resistencia a compresión Zigzag.....	78
Tabla 11.5 Resistencia a compresión de todas las probetas.....	80
Tabla 11.6. Tiempo de impresión de todas las probetas .....	82



Jaime Belda Rodríguez

## ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

TRABAJO FIN DE GRADO

# FABRICACIÓN ADITIVA CON PLA. ESTUDIO DE PROPIEDADES SEGÚN SU MORFOLOGÍA DE RELLENO

## ANEXOS

### **Titulación**

Grado en Ingeniería Mecánica

### **Autor**

Jaime Belda Rodríguez





## Índice Anexos

<b>I. Dimensiones de las probetas.....</b>	<b>107</b>
I.1 Concentric.....	108
I.2 Grid.....	110
I.3 Lines .....	112
I.4 Triangles .....	114
I.5 Zigzag.....	116
<b>II. Datos de impresión .....</b>	<b>118</b>
II.1 Concentric .....	118
II.2 Grid .....	118
II.3 Lines.....	118
II.4 Triangles.....	118
II.5 Zigzag.....	118
<b>III. Gráficas de resultados individuales.....</b>	<b>120</b>
III.1 Concentric .....	120
III.2 Grid.....	125
III.3 Lines.....	130
III.4 Triangles.....	135
III.5 Zigzag .....	140
<b>IV. Ficha técnica PLA .....</b>	<b>145</b>
<b>V. Imágenes de roturas .....</b>	<b>146</b>
V.1 Concentric.....	146
V.2 Grid.....	147
V.3 Lines .....	148
V.4 Triangles .....	149
V.5 Zigzag.....	150



## **I. Dimensiones de las probetas**

I.1 Concentric

Tipo	NºProbeta	Superior (mm)					Inferior (mm)					AREA (mm <sup>2</sup> )	Altura (mm)	Peso (g)
		A1	A2	A3	A4	As	B1	B2	B3	B4	Bs			
Concentric 10%	1	30,46	30,35	30,16	30,25	918,38	30,42	30,3	30,28	30,35	920,36	919,37	30,09	8,87
	2	30,36	30,4	30,38	30,19	920,06	30,44	30,33	30,24	30,12	917,02	918,54	30,03	8,872
	3	30,36	30,32	30,23	30,21	916,87	30,27	30,27	30,16	30,13	912,49	914,68	30,02	8,861
	4	30,27	30,33	30,14	30,19	914,00	30,34	30,26	30,09	30,11	912,03	913,01	30,02	8,876
	5	30,32	30,27	30,18	30,16	914,00	30,42	30,35	30,12	30,1	914,89	914,45	30,05	8,863
	6	30,32	30,31	30,1	30,19	913,85	30,31	30,28	30,08	30,04	910,67	912,26	30	8,862
Concentric 20%	1	30,5	30,42	30,31	30,25	922,33	30,54	30,44	30,21	30,3	922,47	922,40	29,96	10,18
	2	30,39	30,48	30,4	30,21	922,33	30,43	30,47	30,31	30,28	922,48	922,41	30,04	10,112
	3	30,46	30,47	30,29	30,25	922,18	30,47	30,45	30,27	30,22	921,26	921,72	29,96	10,074
	4	30,49	30,44	30,3	30,25	922,33	30,46	30,46	30,23	30,31	922,02	922,18	29,94	10,177
	5	30,4	30,46	30,29	30,27	921,42	30,4	30,48	30,35	30,33	923,55	922,49	29,95	10,124
	6	30,43	30,45	30,25	30,28	921,27	30,44	30,49	30,3	30,24	922,18	921,72	30,01	10,113
Concentric 30%	1	30,37	30,35	30,15	30,24	916,72	30,41	30,39	30,11	30,21	916,86	916,79	30,06	14,306
	2	30,45	30,39	30,2	30,15	917,92	30,42	30,32	30,17	30,16	916,11	917,02	30,05	14,292
	3	30,36	30,37	30,15	30,11	914,90	30,34	30,36	30,13	30,09	913,84	914,37	30,11	14,295
	4	30,3	30,31	30,1	30,18	913,39	30,32	30,3	30,15	30,26	915,51	914,45	29,95	14,294
	5	30,37	30,34	30,17	30,14	915,36	30,45	30,31	30,14	30,25	917,32	916,34	30,08	14,295
	6	30,32	30,32	30,1	30,13	913,09	30,35	30,34	30,04	30,1	912,47	912,78	30,03	14,281
Concentric 40%	1	30,43	30,35	30,13	30,23	917,17	30,43	30,38	30,16	30,27	918,69	917,93	29,97	17,047
	2	30,38	30,41	30,25	30,15	917,93	30,38	30,34	30,3	30,1	916,87	917,40	30,05	17,038
	3	30,47	30,44	30,2	30,14	918,83	30,44	30,36	30,2	30,15	917,32	918,07	30,09	17,012
	4	30,36	30,33	30,21	30,2	916,57	30,39	30,37	30,18	30,2	917,17	916,87	29,97	17,022
	5	30,38	30,48	30,22	30,16	918,68	30,35	30,38	30,1	30,2	915,50	917,09	30,03	17,028
	6	30,34	30,37	30,14	30,13	914,75	30,34	30,38	30,26	30,14	916,87	915,81	29,95	16,998

<b>Concentric 50%</b>	1	30,37	30,4	30,18	30,27	918,39	30,38	30,34	30,13	30,24	916,42	917,40	30,01	19,789
	2	30,33	30,41	30,23	30,2	917,63	30,35	30,36	30,25	30,14	916,57	917,10	29,99	19,773
	3	30,36	30,38	30,26	30,2	918,09	30,36	30,36	30,19	30,21	916,87	917,48	30,14	19,783
	4	30,29	30,33	30,2	30,27	916,42	30,29	30,34	30,15	30,19	914,60	915,51	30	19,791
	5	30,32	30,36	30,17	30,16	915,21	30,35	30,39	30,21	30,15	916,57	915,89	29,97	19,787
	6	30,35	30,4	30,18	30,21	917,17	30,3	30,35	30,28	30,18	916,72	916,95	29,99	19,764

I.2 Grid

Tipo	N°Probeta	Superior					Inferior					AREA	Altura	Peso
		A1	A2	A3	A4	As	B1	B2	B3	B4	Bs			
<b>Grid 10%</b>	1	30,52	30,44	30,22	30,32	922,63	30,53	30,45	30,26	30,35	924,00	923,31	30,02	12,151
	2	30,59	30,22	30,26	30,31	920,82	30,46	30,43	30,53	30,21	924,61	922,72	30,05	12,155
	3	30,62	30,46	30,26	30,36	925,67	30,46	30,44	30,48	30,47	927,96	926,82	30,34	12,156
	4	30,41	30,45	30,23	30,25	920,20	30,53	30,52	30,22	30,26	923,08	921,64	29,95	12,155
	5	30,41	30,47	30,29	30,3	922,18	30,4	30,43	30,31	30,35	922,49	922,33	29,92	12,142
	6	30,31	30,46	30,24	30,29	919,60	30,38	30,48	30,27	30,27	921,12	920,36	30	12,163
<b>Grid 20%</b>	1	30,49	30,47	30,25	30,29	922,63	30,51	30,35	30,16	30,15	917,62	920,12	29,98	11,323
	2	30,46	30,4	30,21	30,18	918,83	30,41	30,35	30,28	30,17	918,24	918,53	30,01	12,246
	3	30,42	30,5	30,27	30,2	920,96	30,39	30,37	30,15	30,17	916,26	918,61	30,04	12,253
	4	30,33	30,43	30,18	30,15	916,41	30,28	30,3	30,29	30,15	915,36	915,89	29,97	11,14
	5	30,42	30,45	30,24	30,26	920,66	30,35	30,35	30,42	30,2	919,91	920,28	30,09	12,222
	6	30,31	30,46	30,13	30,23	917,02	30,36	30,38	30,22	30,03	914,90	915,96	30,09	10,695
<b>Grid 30%</b>	1	30,53	30,42	30,17	30,3	921,41	30,33	30,32	30,23	30,22	916,57	918,99	29,98	14,941
	2	30,45	30,38	30,15	30,32	919,60	30,37	30,36	30,25	30,25	918,54	919,07	30,1	14,948
	3	30,43	30,36	30,11	30,16	915,95	30,46	30,4	30,02	30,14	915,33	915,64	30,16	14,969
	4	30,33	30,23	30,18	30,2	914,15	30,36	30,45	30,27	30,3	920,82	917,48	29,95	14,949
	5	30,38	30,4	30,16	30,22	917,47	30,37	30,37	30,21	30,3	918,84	918,16	30	14,96
	6	30,4	30,39	30,16	30,26	918,23	30,36	30,45	30,16	30,28	918,84	918,54	29,99	14,954
<b>Grid 40%</b>	1	30,47	30,45	30,29	30,26	922,18	30,39	30,36	30,14	30,2	916,41	919,30	30,01	16,779
	2	30,48	30,5	30,38	30,2	923,54	30,4	30,36	30,3	30,2	919,00	921,27	30,03	16,644
	3	30,57	30,42	30,24	30,19	921,41	30,44	30,42	30,26	30,15	919,14	920,27	29,99	16,768
	4	30,47	30,41	30,27	30,27	921,42	30,44	30,3	30,06	30,03	912,47	916,94	30	15,711
	5	30,47	30,48	30,25	30,23	921,56	30,28	30,4	30,23	30,27	917,79	919,67	30,07	16,466
	6	30,44	30,46	30,28	30,26	921,72	30,27	30,33	30,29	30,06	914,30	918,01	30,01	15,363

<b>Grid 50%</b>	1	30,41	30,31	30,27	30,25	918,69	30,4	30,31	30,28	30,37	920,52	919,60	30,06	20,613
	2	30,48	30,37	30,21	30,23	919,44	30,37	30,46	30,35	30,21	920,97	920,20	30,08	20,595
	3	30,38	30,39	30,3	30,29	920,51	30,52	30,42	30,26	30,24	921,72	921,12	30,1	20,603
	4	30,36	30,39	30,15	30,22	916,87	30,36	30,3	30,18	30,18	915,36	916,11	30,04	20,603
	5	30,34	30,32	30,25	30,35	919,00	30,31	30,4	30,22	30,2	917,02	918,01	30	20,615
	6	30,33	30,32	30,18	30,23	915,97	30,3	30,34	30,19	30,27	916,57	916,27	30,05	20,59

I.3 Lines

		Superior (mm)					Inferior (mm)					AREA	Altura	Peso
Tipo	NºProbeta	A1	A2	A3	A4	As	B1	B2	B3	B4	Bs	(mm <sup>2</sup> )	(mm)	(g)
<b>Lines 10%</b>	1	30,33	30,34	30,12	30,25	915,66	30,12	30,26	30,31	30,25	914,15	914,91	30,04	9,434
	2	30,42	30,37	30,31	30,4	922,64	30,11	30,2	30,26	30,16	910,98	916,81	30,02	9,444
	3	30,17	30,2	30,1	30,27	911,13	30,08	30,25	30,35	30,23	913,70	912,42	30,01	9,454
	4	30,33	30,43	30,16	30,37	919,45	30,3	30,2	30,19	30,05	911,13	915,29	29,98	9,446
	5	30,45	30,26	30,4	30,25	920,52	30,39	30,34	30,27	30,44	921,73	921,12	30,02	9,443
	6	30,44	30,37	30,05	30,41	919,14	30,06	30,32	30,43	30,14	914,30	916,72	30,03	9,442
<b>Lines 20%</b>	1	30,45	30,4	30,11	30,27	918,53	30,32	30,29	30,14	30,19	914,15	916,34	30,02	12,176
	2	30,37	30,12	30,32	30,2	915,21	30,28	30,08	30,22	30,44	915,36	915,29	30,01	12,178
	3	30,12	30,24	30,3	30,41	916,11	30,27	30,18	30,26	30,14	912,80	914,45	30	12,182
	4	30,45	30,17	30,21	30,09	913,85	30,29	30,27	30,3	30,29	917,33	915,59	29,99	12,177
	5	30,45	30,11	30,41	30,43	921,12	30,31	30,07	30,2	30,14	910,83	915,97	30,04	12,171
	6	30,3	30,41	30,2	30,07	914,75	30,08	30,21	30,23	30,1	909,32	912,04	30,04	12,177
<b>Lines 30%</b>	1	30,36	30,4	30,19	30,4	920,36	30,07	30,34	30,39	30,45	918,84	919,60	30,02	14,937
	2	30,19	30,39	30,22	30,31	916,73	30,2	30,23	30,26	30,22	913,70	915,21	29,99	14,938
	3	30,41	30,43	30,4	30,2	921,73	30,25	30,2	30,39	30,26	916,57	919,15	30,05	14,927
	4	30,12	30,25	30,22	30,08	910,08	30,36	30,3	30,41	30,42	922,49	916,28	30	14,926
	5	30,19	30,4	30,29	30,43	919,76	30,1	30,08	30,14	30,12	906,61	913,18	29,98	14,915
	6	30,38	30,17	30,05	30,22	912,34	30,12	30,22	30,4	30,44	917,77	915,05	30,06	14,919
<b>Lines 40%</b>	1	30,13	30,32	30,3	30,1	912,80	30,12	30,25	30,13	30,1	909,02	910,91	30,06	17,733
	2	30,31	30,34	30,15	30,3	916,57	30,12	30,18	30,29	30,17	911,43	914,00	30,06	17,728
	3	30,42	30,26	30,42	30,09	917,94	30,2	30,31	30,35	30,35	918,24	918,09	29,97	17,716
	4	30,09	30,05	30,34	30,24	910,82	30,41	30,17	30,05	30,37	915,06	912,94	30,04	17,719
	5	30,16	30,45	30,22	30,2	915,51	30,2	30,19	30,33	30,39	916,72	916,12	30,03	17,71
	6	30,23	30,13	30,34	30,3	915,06	30,33	30,12	30,09	30,14	910,23	912,64	30,02	17,723



<b>Lines 50%</b>	1	30,16	30,16	30,22	30,44	914,75	30,08	30,3	30,27	30,23	913,25	914,00	30,04	19,891
	2	30,15	30,15	30,14	30,37	912,19	30,19	30,4	30,17	30,19	914,30	913,25	30	19,857
	3	30,3	30,4	30,4	30,21	919,76	30,13	30,09	30,2	30,21	909,47	914,61	30,06	19,835
	4	30,12	30,37	30,17	30,31	914,61	30,05	30,26	30,25	30,13	910,38	912,49	30,02	19,879
	5	30,34	30,14	30,16	30,05	910,38	30,12	30,45	30,17	30,05	911,88	911,13	29,97	19,839
	6	30,4	30,41	30,4	30,36	923,70	30,14	30,43	30,22	30,39	917,79	920,75	29,98	19,841

## I.4 Triangles

Tipo	N°Probeta	Superior (mm)					Inferior (mm)					AREA (mm <sup>2</sup> )	Altura (mm)	Peso (g)
		A1	A2	A3	A4	As	B1	B2	B3	B4	Bs			
Tirangles 10%	1	30,41	30,38	30,1	30,27	917,47	30,41	30,35	30,11	30,25	916,87	917,17	29,97	9,72
	2	30,39	30,36	30,22	30,15	916,87	30,32	30,38	30,22	30,12	915,66	916,26	30,01	9,715
	3	30,34	30,37	30,22	30,14	916,11	30,45	30,34	30,17	30,1	915,95	916,03	30,02	9,175
	4	30,49	30,34	30,11	30,23	917,62	30,46	30,47	30,34	30,12	920,96	919,29	30,07	9,72
	5	30,32	30,35	30,17	30,22	915,97	30,3	30,41	30,17	30,22	916,57	916,27	30,06	9,722
	6	30,31	30,31	30,15	30,19	914,45	30,29	30,32	30,35	30,22	917,79	916,12	29,95	9,71
Triangles 20%	1	30,42	30,37	30,09	30,35	918,54	30,39	30,37	30,1	30,21	916,11	917,32	30,07	12,205
	2	30,44	30,41	30,22	30,17	918,68	30,4	30,39	30,24	30,18	918,23	918,46	30,05	12,201
	3	30,38	30,44	30,29	30,28	920,97	30,33	30,37	30,3	30,08	916,27	918,62	30,09	12,22
	4	30,33	30,33	30,18	30,19	915,51	30,31	30,35	30,25	30,27	917,79	916,65	30,05	12,217
	5	30,32	30,33	30,11	30,2	914,45	30,33	30,41	30,18	30,13	915,81	915,13	29,96	12,226
	6	30,31	30,35	30,17	30,27	916,57	30,34	30,31	30,3	30,12	916,12	916,35	30	12,246
Triangles 30%	1	30,44	30,45	30,21	30,32	921,42	30,3	30,4	30,34	30,17	918,24	919,83	30,08	14,973
	2	30,44	30,45	30,37	30,22	922,33	30,31	30,45	30,48	30,17	921,27	921,80	29,99	14,735
	3	30,4	30,46	30,41	30,27	923,25	30,36	30,39	30,26	30,14	917,33	920,29	29,96	15,036
	4	30,42	30,47	30,2	30,31	921,11	30,48	30,36	30,16	30,23	918,53	919,82	3,09	15,154
	5	30,44	30,53	30,25	30,41	924,61	30,27	30,31	30,54	30,48	924,15	924,38	30,02	14,823
	6	30,38	30,43	30,24	30,13	917,77	30,35	30,39	30,11	30,2	915,81	916,79	29,95	14,445
Triangles 40%	1	30,5	30,49	30,27	30,34	924,15	30,4	30,47	30,24	30,28	920,96	922,56	30,07	17,414
	2	30,49	30,47	30,4	30,31	925,22	30,48	30,47	30,38	30,26	924,00	924,61	30,06	17,431
	3	30,35	30,26	30,5	30,49	924,15	30,31	30,4	30,53	30,5	926,28	925,22	30,13	17,411
	4	30,49	30,39	30,32	30,29	922,48	30,53	30,58	30,39	30,29	927,04	924,76	30,01	17,429
	5	30,42	30,42	30,34	30,35	923,09	30,46	30,45	30,33	30,29	923,09	923,09	30,03	17,424
	6	30,43	30,46	30,28	30,38	923,40	30,44	30,46	30,28	30,31	922,48	922,94	30,02	17,401

<b>Triangles 50%</b>	1	30,47	30,5	30,48	30,42	928,27	30,48	30,45	30,32	30,33	923,85	926,06	30,1	20,457
	2	30,47	30,54	30,32	30,34	925,22	30,46	30,36	30,31	30,29	921,42	923,32	30,15	20,474
	3	30,51	30,41	30,49	30,25	925,07	30,28	30,32	30,42	30,37	920,97	923,02	30,04	20,466
	4	30,52	30,45	30,35	30,37	925,52	30,34	30,23	30,25	30,26	916,27	920,90	30,04	19,994
	5	30,43	30,46	30,37	30,44	925,68	30,24	30,26	30,27	30,23	915,06	920,37	30,02	19,872
	6	30,14	30,17	30,26	30,13	910,53	30,12	30,19	30,24	30,2	911,28	910,91	30,03	20,429

I.5 Zigzag

Tipo	N°Probeta	Superior (mm)					Inferior (mm)					AREA (mm <sup>2</sup> )	Altura (mm)	Peso (g)
		A1	A2	A3	A4	As	B1	B2	B3	B4	Bs			
<b>ZigZag 10%</b>	1	30,46	30,42	30,22	30,47	923,70	30,45	30,45	30,17	30,48	923,40	923,55	29,96	10,253
	2	30,35	30,39	30,28	30,23	918,84	30,45	30,43	30,25	30,24	920,66	919,75	30,17	10,259
	3	30,43	30,43	30,2	30,19	918,83	30,51	30,58	30,27	30,31	925,21	922,02	30	10,258
	4	30,4	30,35	30,38	30,21	920,21	30,45	30,36	30,28	30,4	922,49	921,35	29,88	10,26
	5	30,32	30,38	30,25	30,25	918,09	30,58	30,5	30,31	30,28	925,21	921,65	29,99	10,264
	6	30,35	30,37	30,22	30,25	917,93	30,38	30,44	30,22	30,26	919,60	918,77	30,2	10,258
<b>Zigzag 20%</b>	1	30,49	30,44	30,21	30,31	921,87	30,46	30,44	30,45	30,29	924,77	923,32	30,05	12,857
	2	30,44	30,45	30,33	30,28	922,64	30,37	30,41	30,26	30,24	919,30	920,97	30,07	12,857
	3	30,42	30,41	30,29	30,2	919,90	30,4	30,38	30,23	30,17	917,78	918,84	30,11	12,847
	4	30,37	30,39	30,2	30,28	918,69	30,42	30,48	30,17	30,34	921,26	919,98	29,9	12,88
	5	30,41	30,43	30,29	30,27	921,12	30,38	30,42	30,48	30,22	922,64	921,88	30,08	12,87
	6	30,34	30,42	30,22	30,25	918,54	30,33	30,47	30,22	30,25	919,14	918,84	29,99	12,868
<b>Zigzag 30%</b>	1	30,41	30,4	30,22	30,26	919,45	30,43	30,37	30,17	30,23	918,08	918,76	29,99	15,423
	2	30,35	30,37	30,24	30,2	917,48	30,39	30,29	30,22	30,2	916,57	917,03	30,04	15,442
	3	30,39	30,41	30,19	30,14	917,02	30,36	30,38	30,23	30,21	917,78	917,40	30,01	15,423
	4	30,34	30,39	30,21	30,24	917,78	30,54	30,34	30,21	30,15	918,68	918,23	29,91	15,435
	5	30,36	30,38	30,15	30,19	916,26	30,38	30,35	30,14	30,13	915,05	915,66	30,02	15,432
	6	30,38	30,4	30,14	30,16	916,26	30,36	30,32	30,05	30,19	913,84	915,05	30,11	15,433
<b>Zigzag 40%</b>	1	30,53	30,45	30,28	30,3	923,54	30,46	30,58	30,19	30,47	925,67	924,61	30,19	18,146
	2	30,41	30,45	30,37	30,27	922,64	30,39	30,39	30,33	30,18	919,45	921,04	30,13	18,159
	3	30,42	30,46	30,36	30,24	922,33	30,28	30,4	30,34	30,23	918,85	920,59	30,15	18,159
	4	30,45	30,42	30,29	30,34	922,64	30,42	30,52	30,28	30,38	924,16	923,40	29,96	18,147
	5	30,47	30,45	30,3	30,29	922,79	30,43	30,46	30,26	30,23	920,81	921,80	30,17	18,146
	6	30,44	30,48	30,3	30,34	923,55	30,37	30,44	30,25	30,22	919,30	921,42	30,05	18,149

<b>Zigzag 50%</b>	1	30,48	30,37	30,19	30,28	919,90	30,42	30,41	30,11	30,26	918,08	918,99	30,1	20,927
	2	30,45	30,41	30,26	30,15	919,14	30,38	30,3	30,23	30,18	916,42	917,78	30,11	20,925
	3	30,4	30,39	30,29	30,26	920,21	30,39	30,43	30,38	30,14	920,21	920,21	30,03	20,935
	4	30,38	30,32	30,22	30,26	917,78	30,43	30,43	30,17	30,19	918,38	918,08	29,96	20,926
	5	30,36	30,36	30,23	30,25	918,09	30,32	30,34	30,49	30,18	920,06	919,07	29,99	20,918
	6	30,21	30,43	30,19	30,2	915,51	30,32	30,38	30,16	30,14	915,05	915,28	30,05	20,926

## II. Datos de impresión

### II.1 Concentric

Relleno (%)	Humedad (%)	Temp (°C)	Tiempo (h:min)
10	65	22	5:32
20	58	19,2	6:20
30	71	21,3	7:25
40	70	21	8:29
50	71	20,8	9:32

Tabla II.1. Datos de impresión Concentric

### II.2 Grid

Relleno (%)	Humedad (%)	Temp (°C)	Tiempo (h:min)
10	59	19,7	6:29
20	67	21,3	6:32
30	66	22,1	7:47
40	62	19,5	8:47
50	68	20,6	9:48

Tabla II.2. Datos de impresión Grid

### II.3 Lines

Relleno (%)	Humedad (%)	Temp (°C)	Tiempo (h:min)
10	60	22,6	5:41
20	61	22	6:45
30	64	21,4	8:02
40	72	20,9	9:08
50	61	19,1	9:53

Tabla II.3. Datos de impresión Lines

### II.4 Triangles

Relleno (%)	Humedad (%)	Temp (°C)	Tiempo (h:min)
10	75	21,1	5:36
20	69	20,8	6:40
30	65	20,5	7:52
40	61	19,2	8:50
50	65	20	10:18

Tabla II.4. Datos de impresión Triangles

### II.5 Zigzag

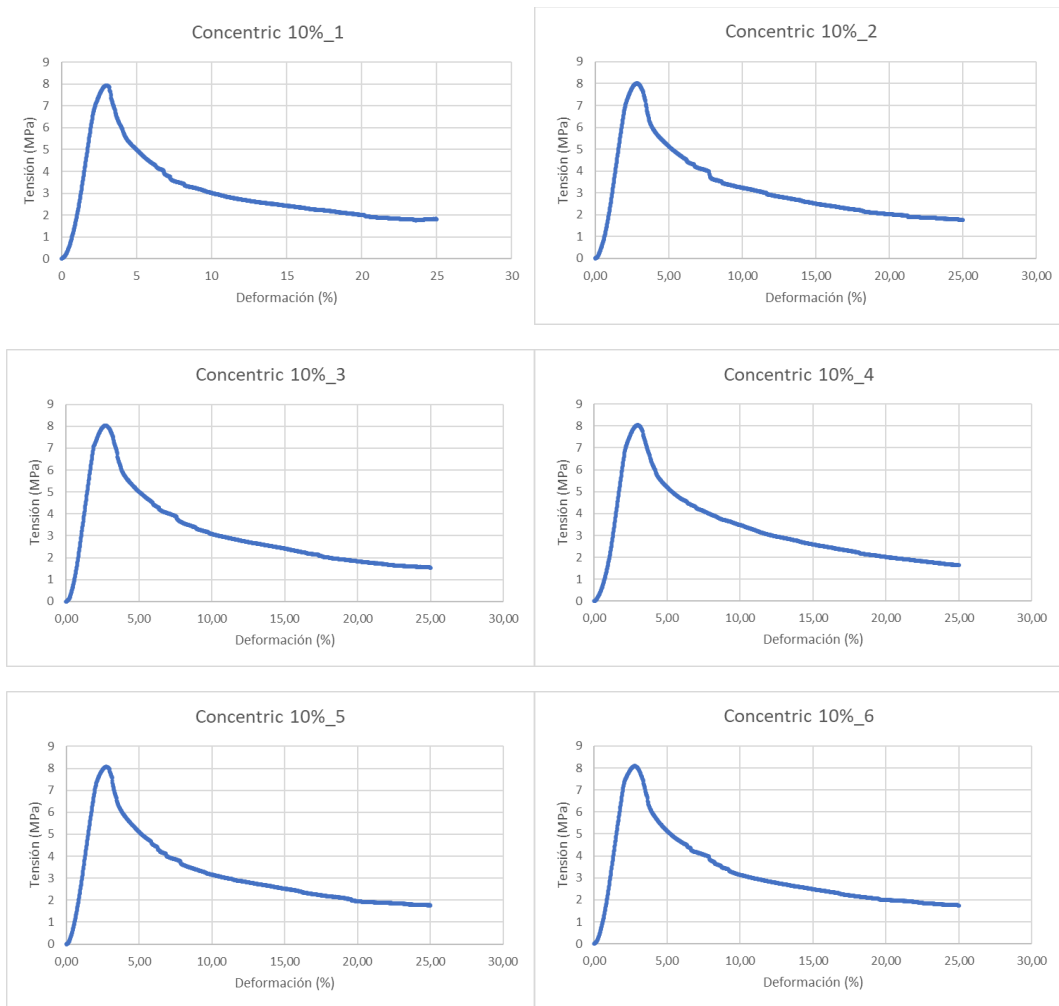
Relleno (%)	Humedad (%)	Temp (°C)	Tiempo (h:min)
10	65	19,8	5:45
20	67	19,5	6:48
30	62	21,8	7:45
40	61	19,7	9:00

50	62	19,8	9:53
----	----	------	------

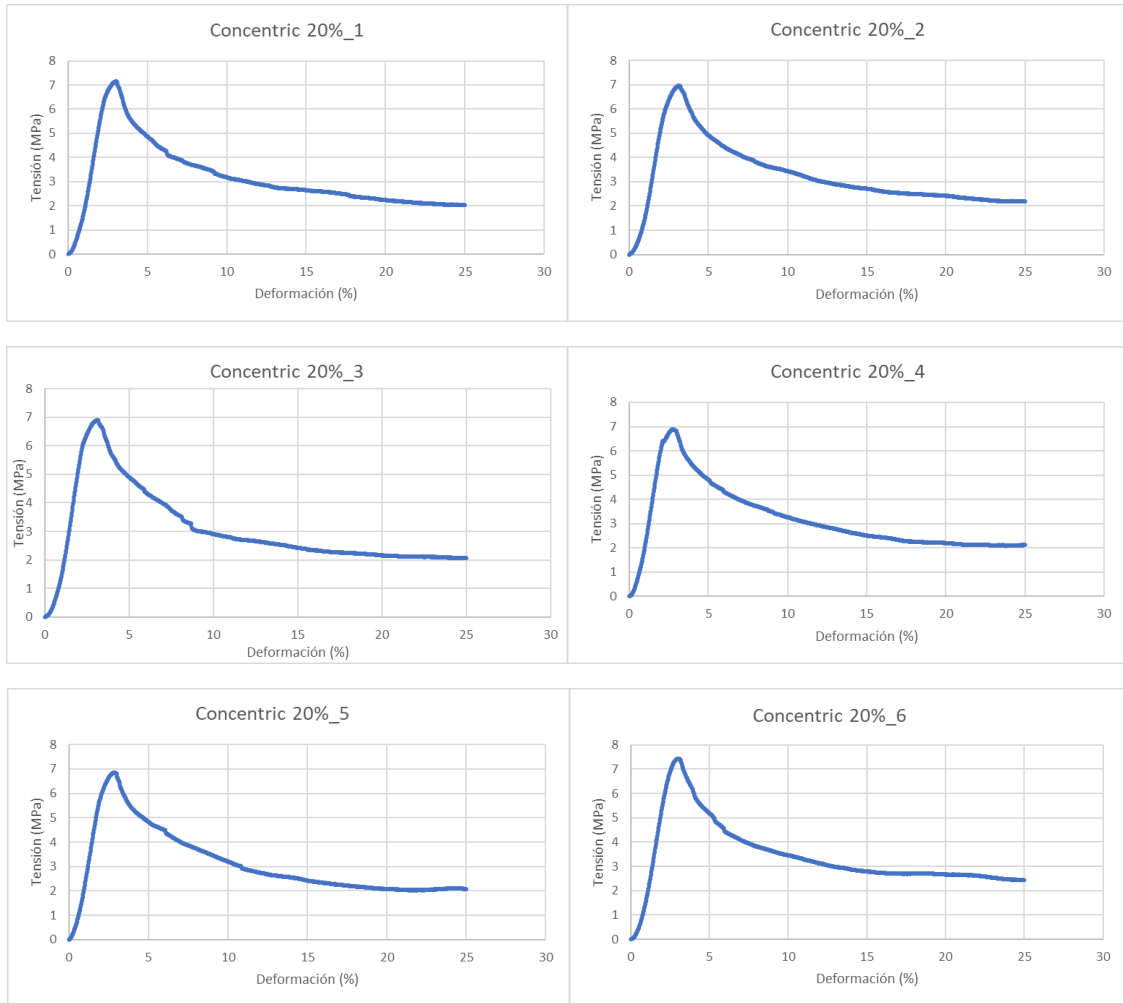
Tabla II.5. Datos impresión Zigzag

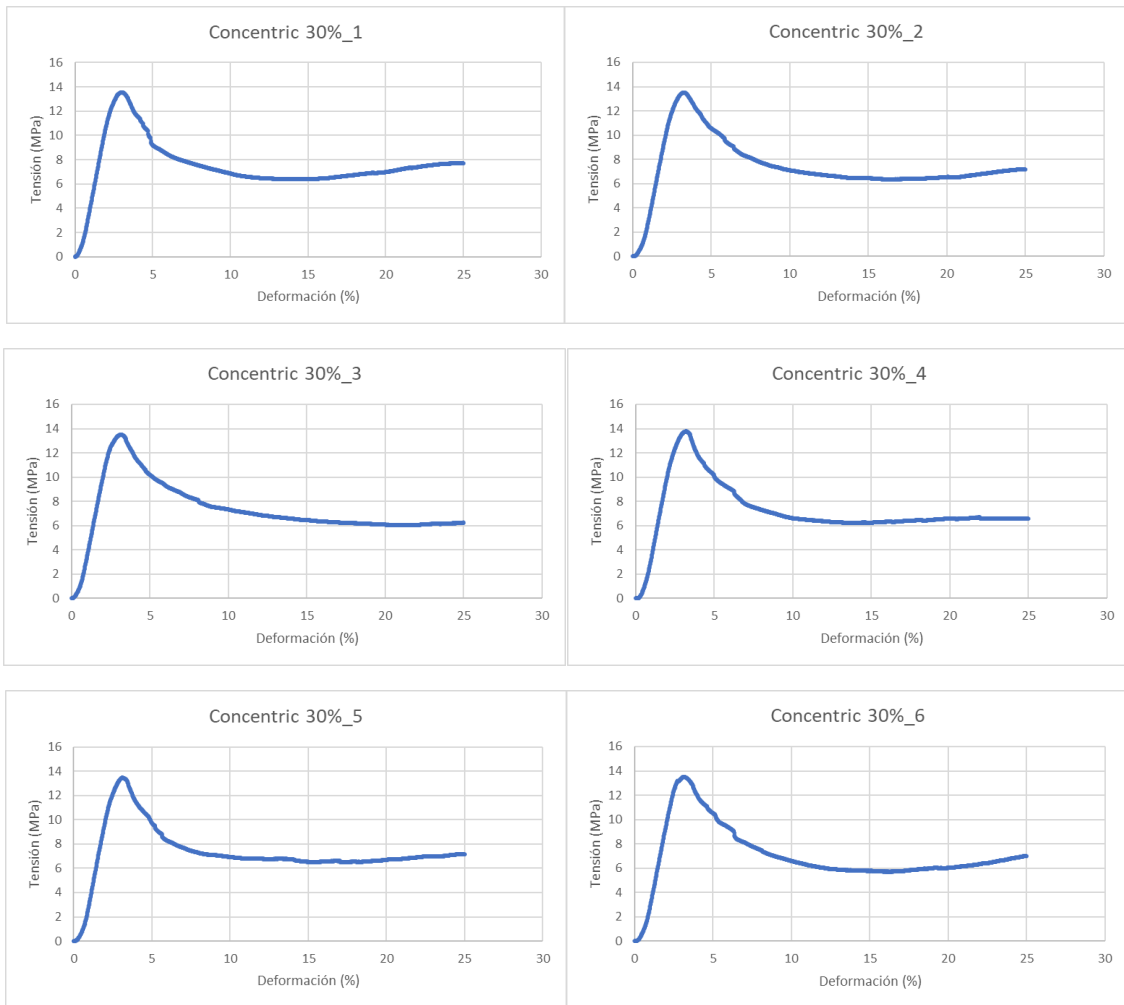
### III. Gráficas de resultados individuales

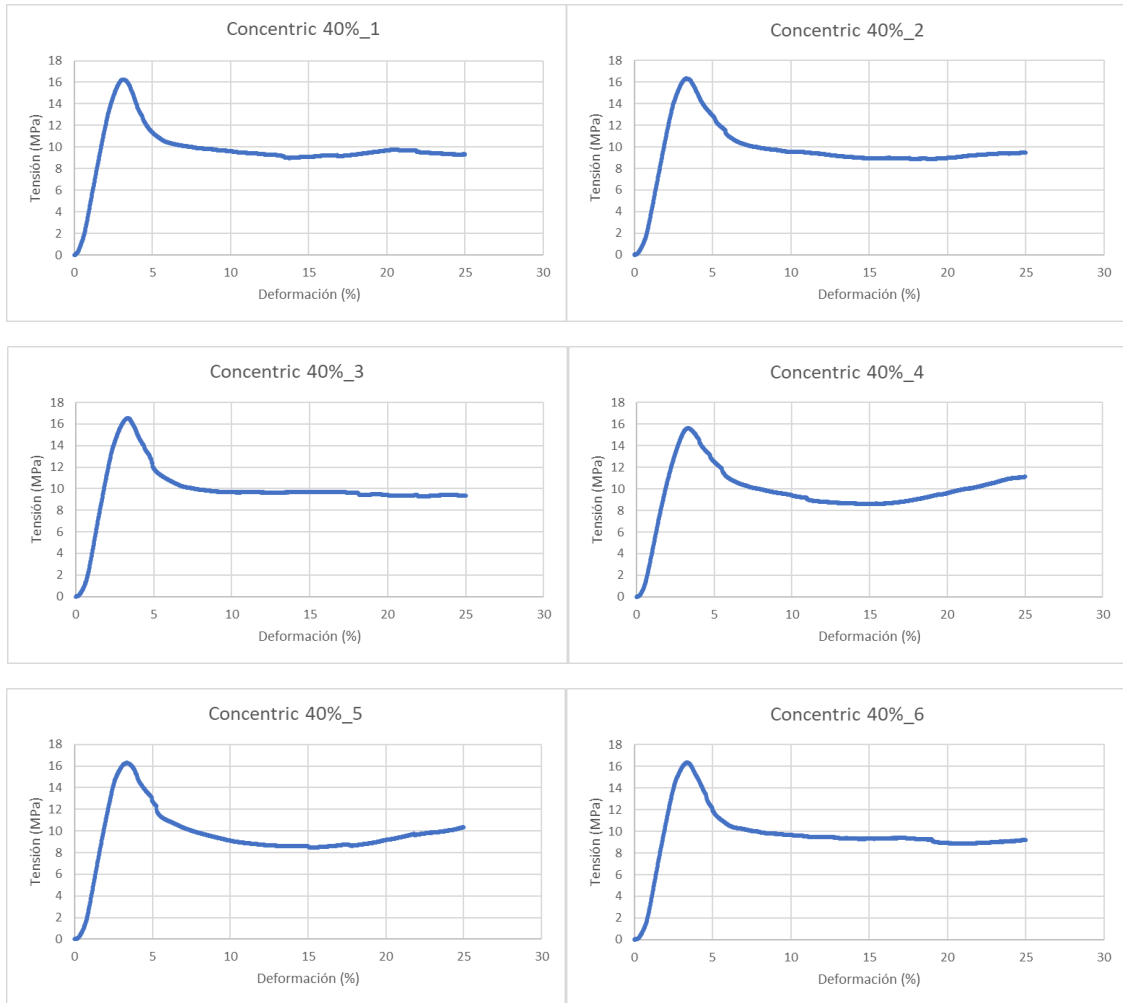
#### III.1 Concentric

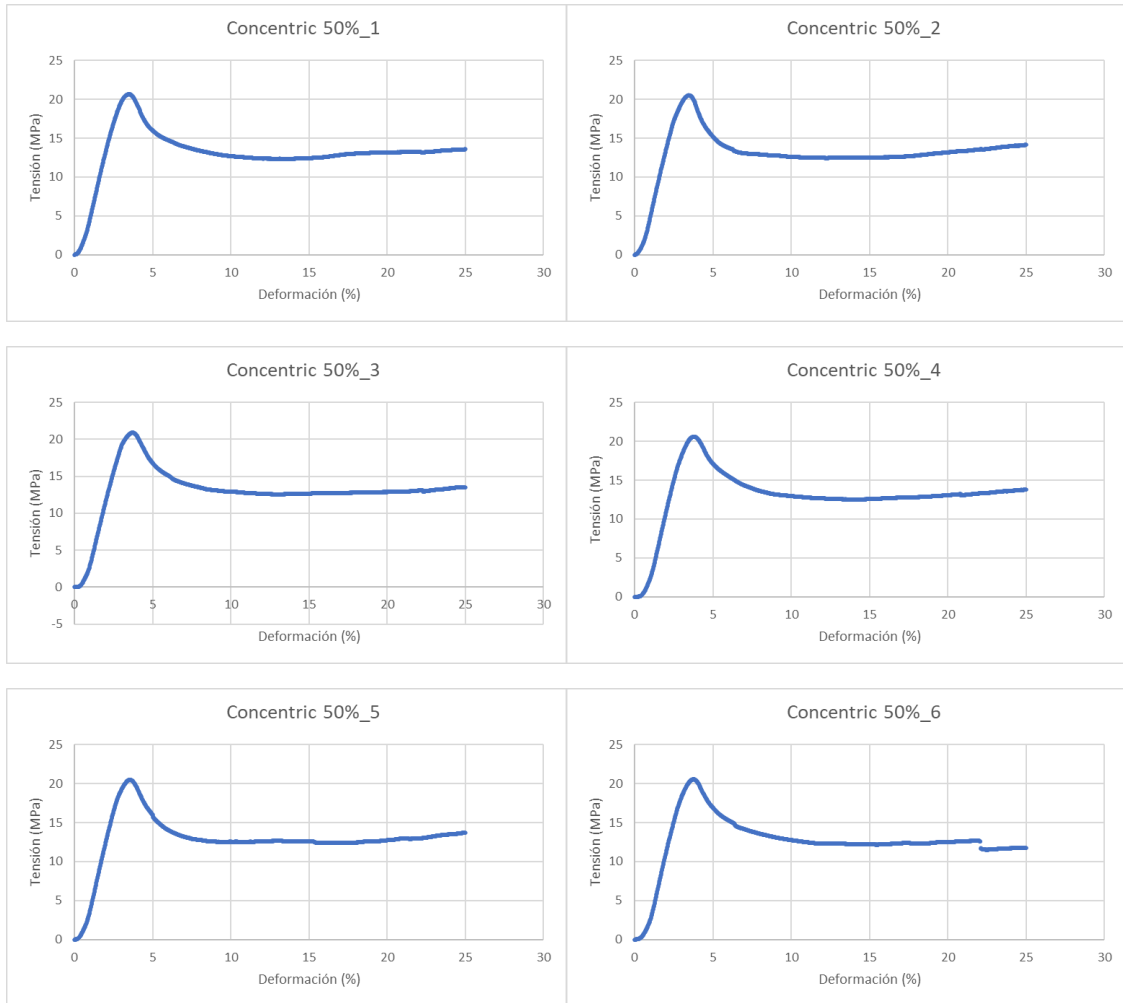




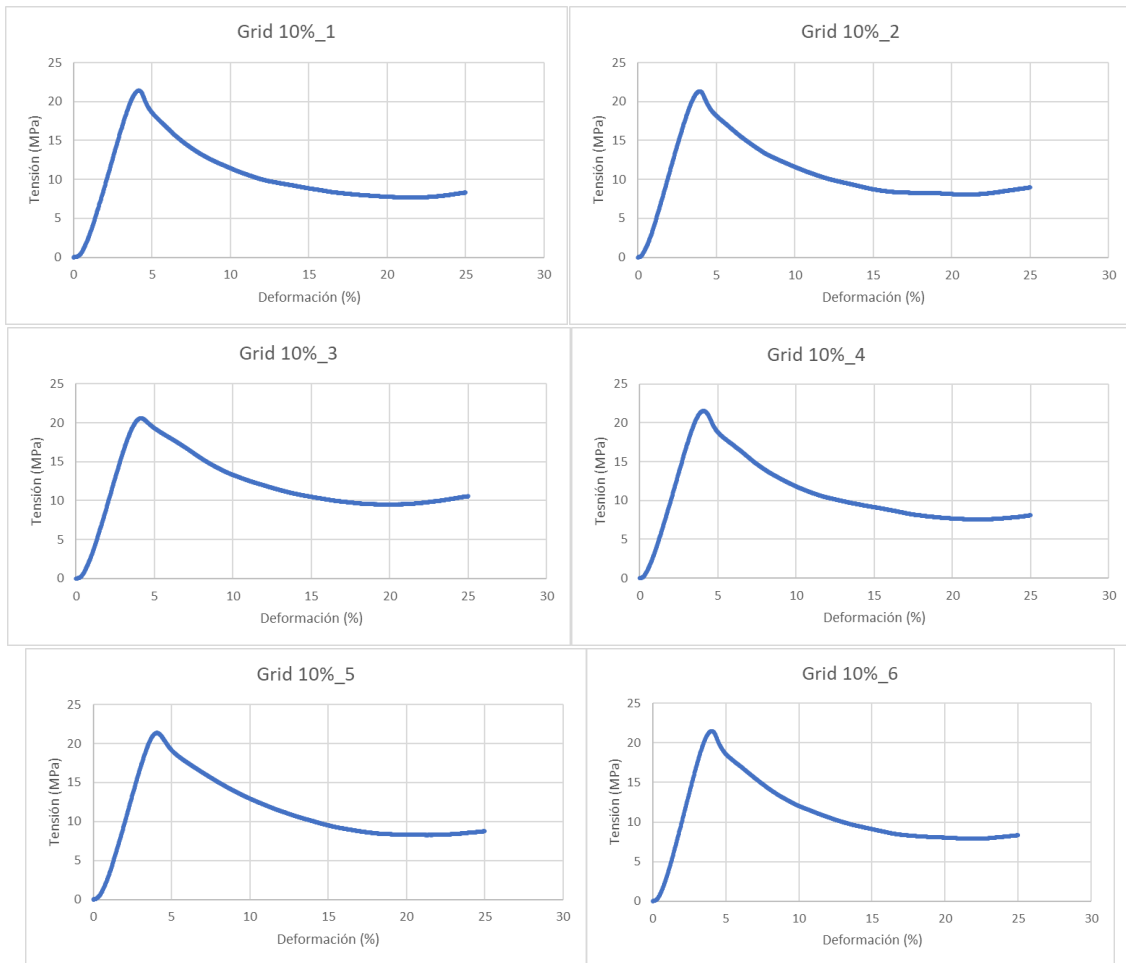


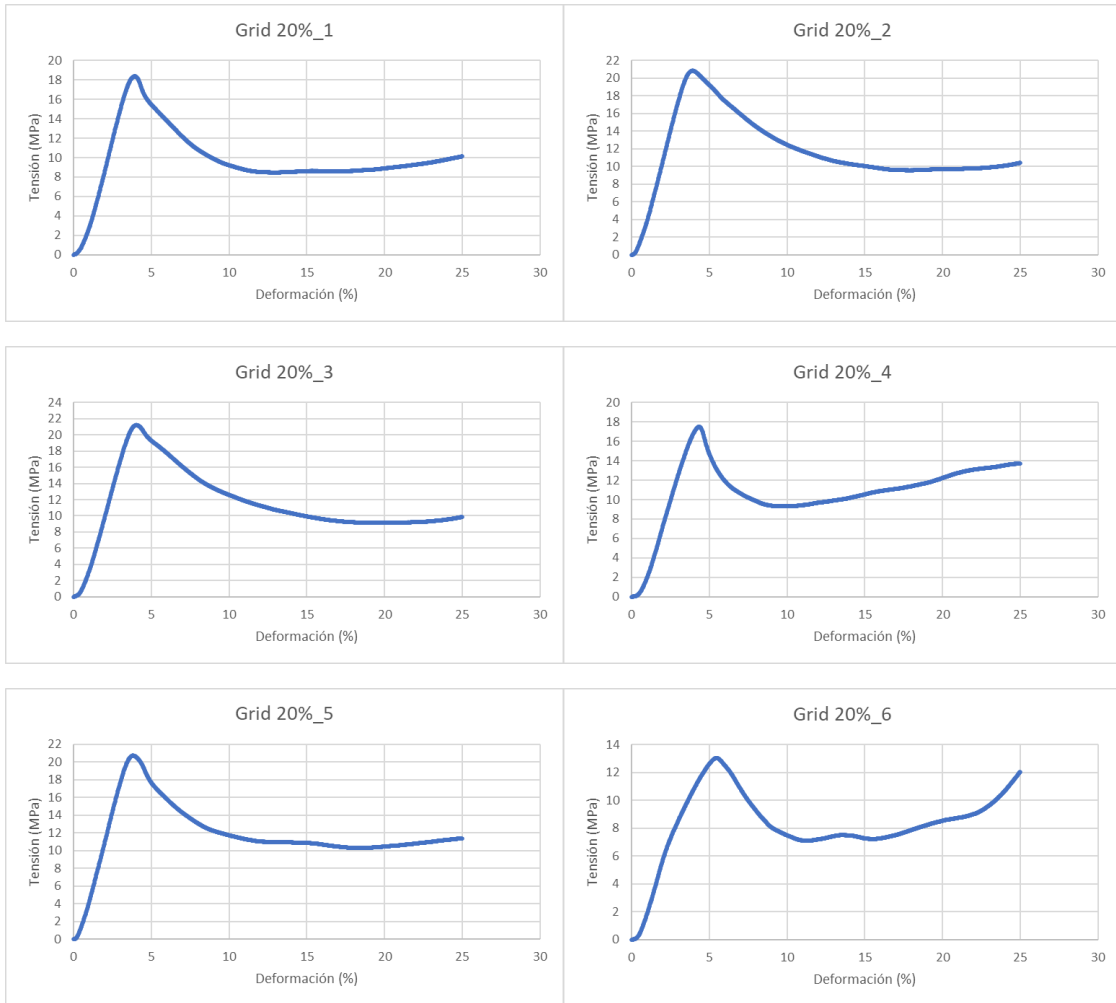


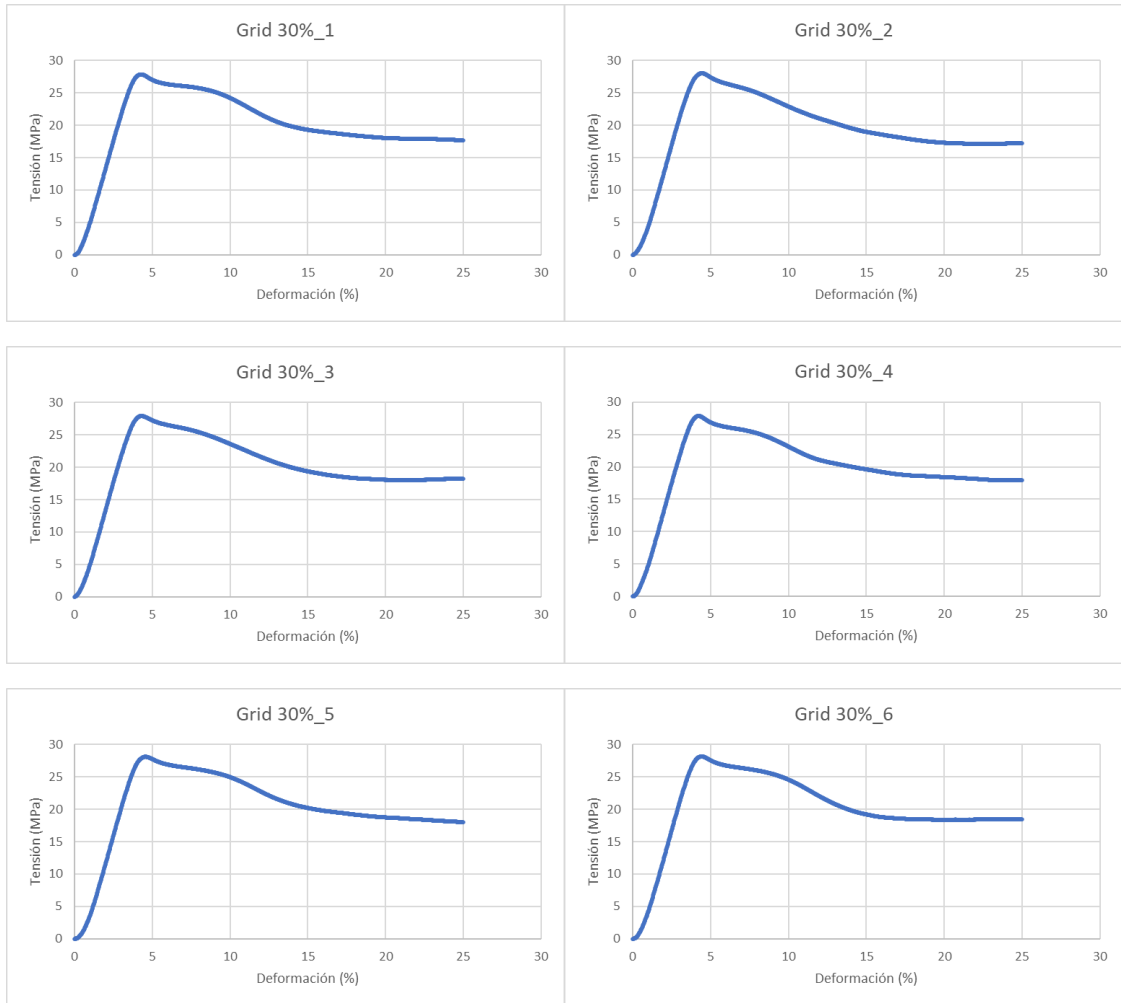


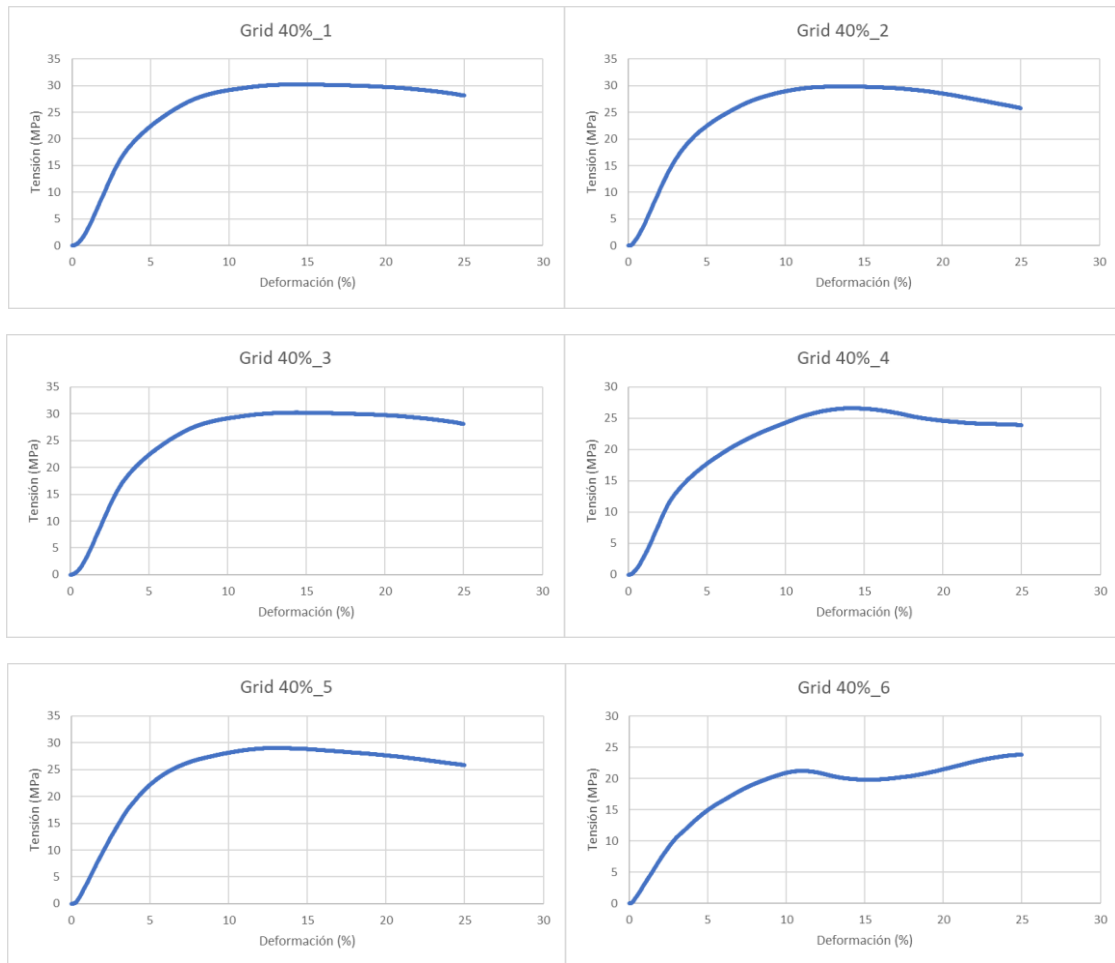


### III.2 Grid

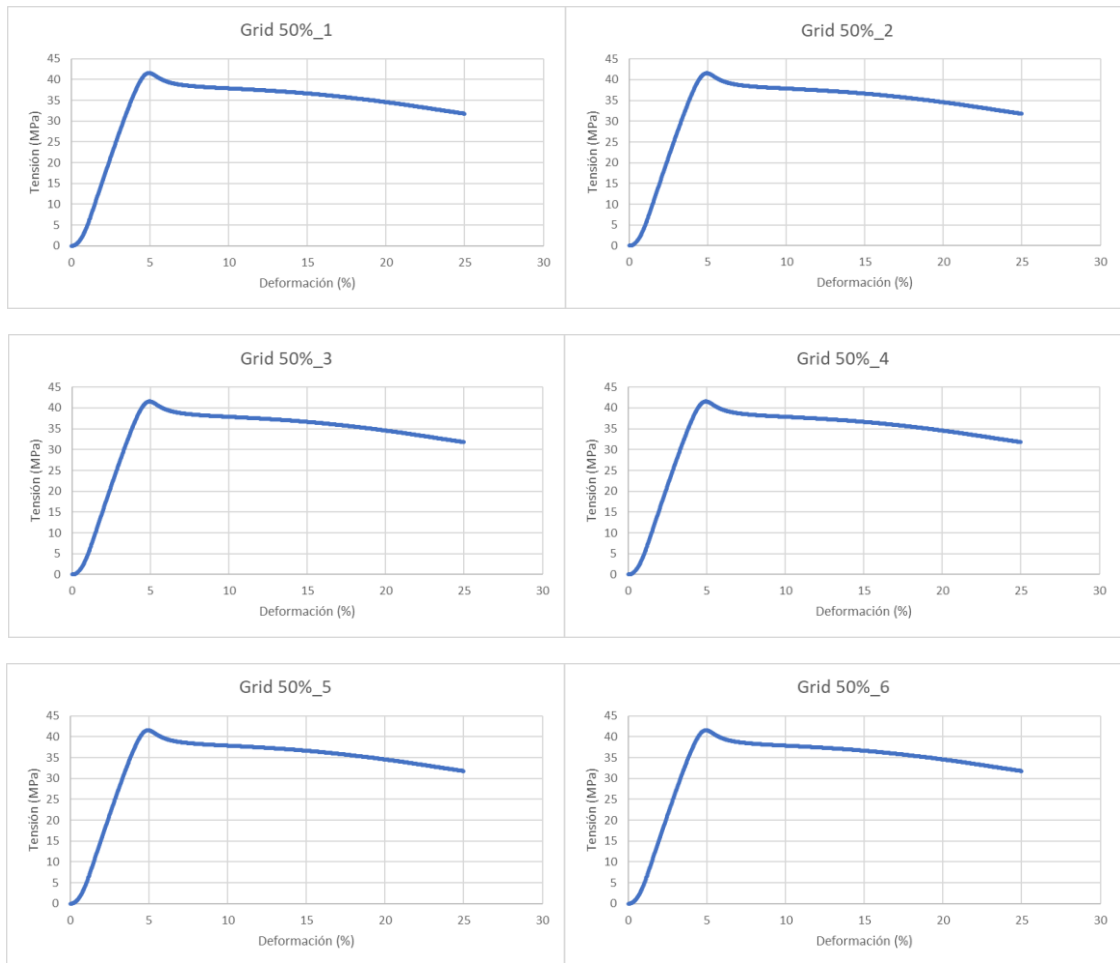




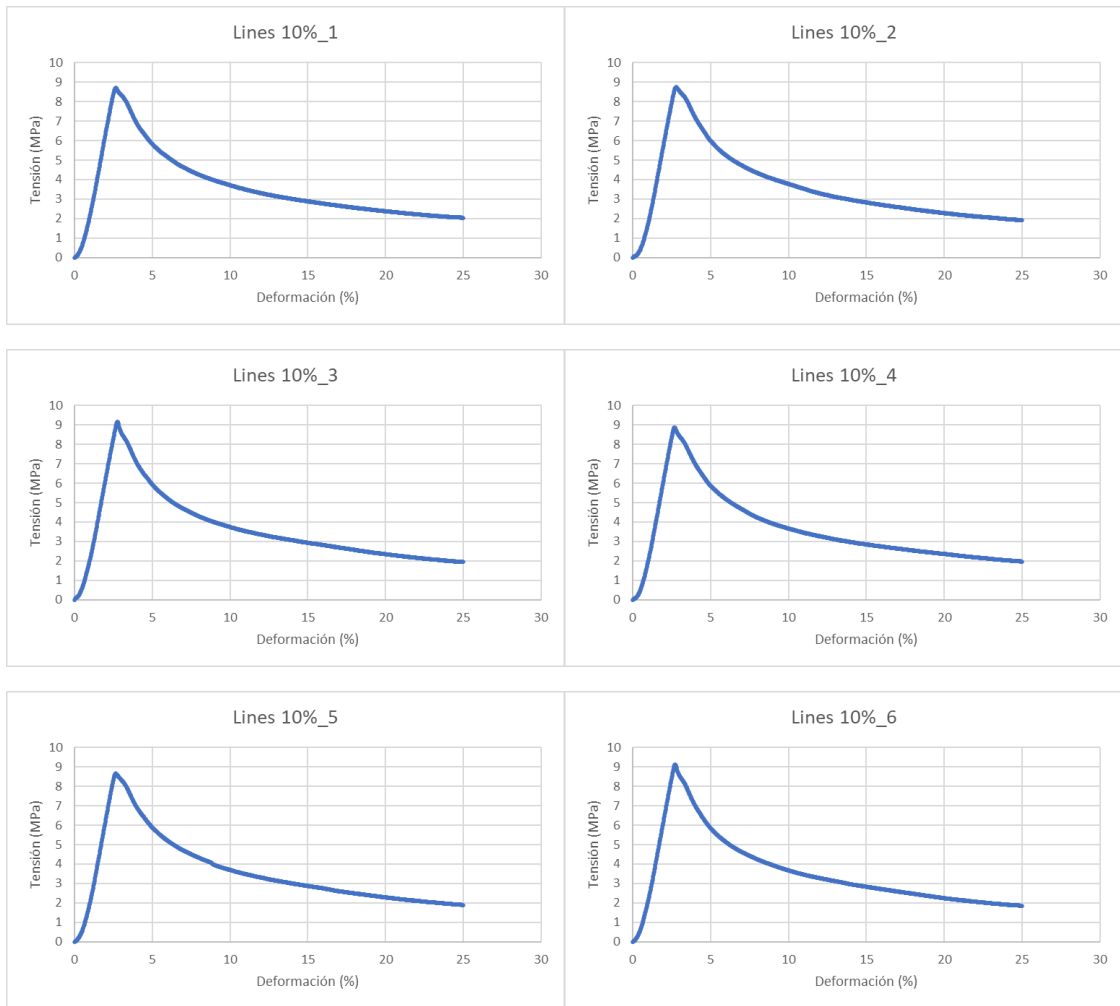


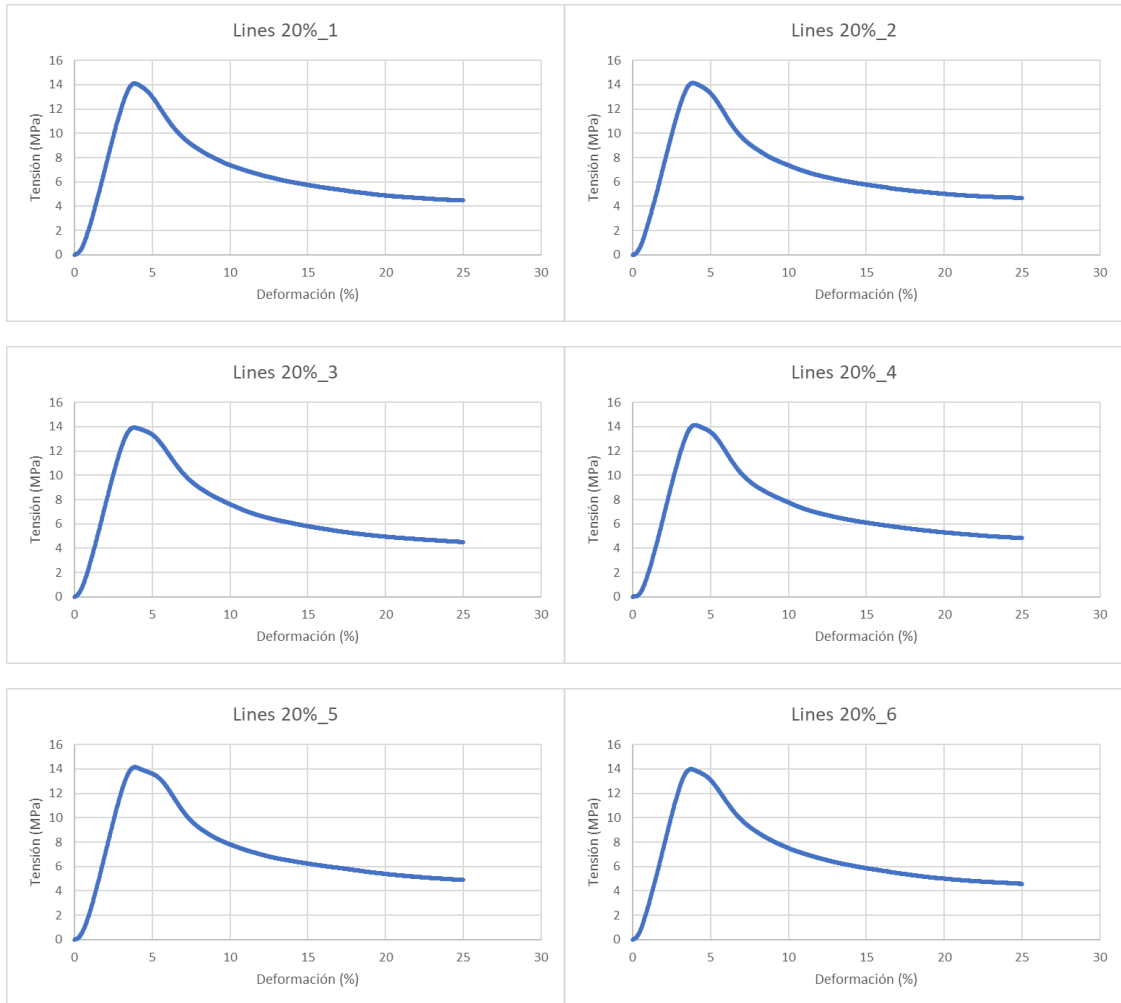


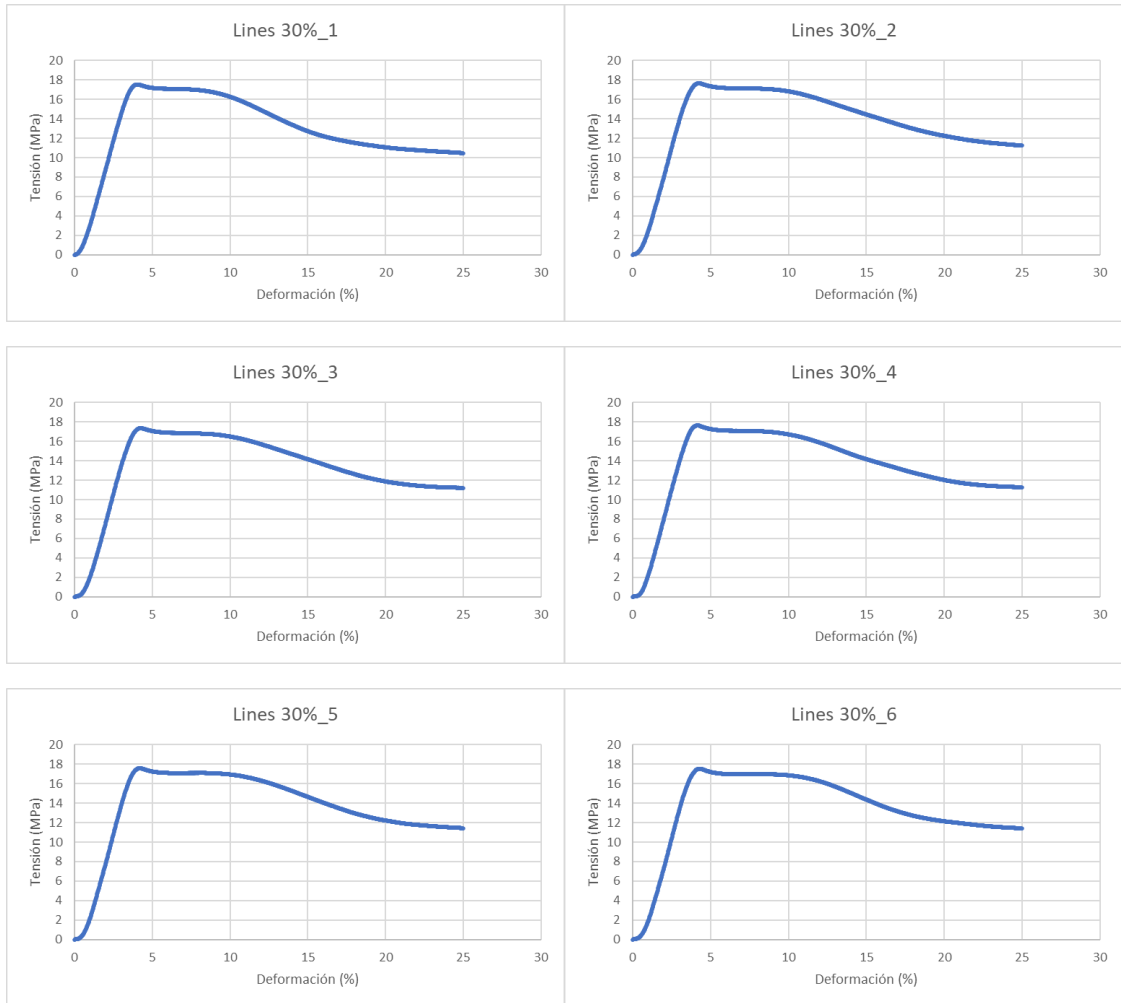


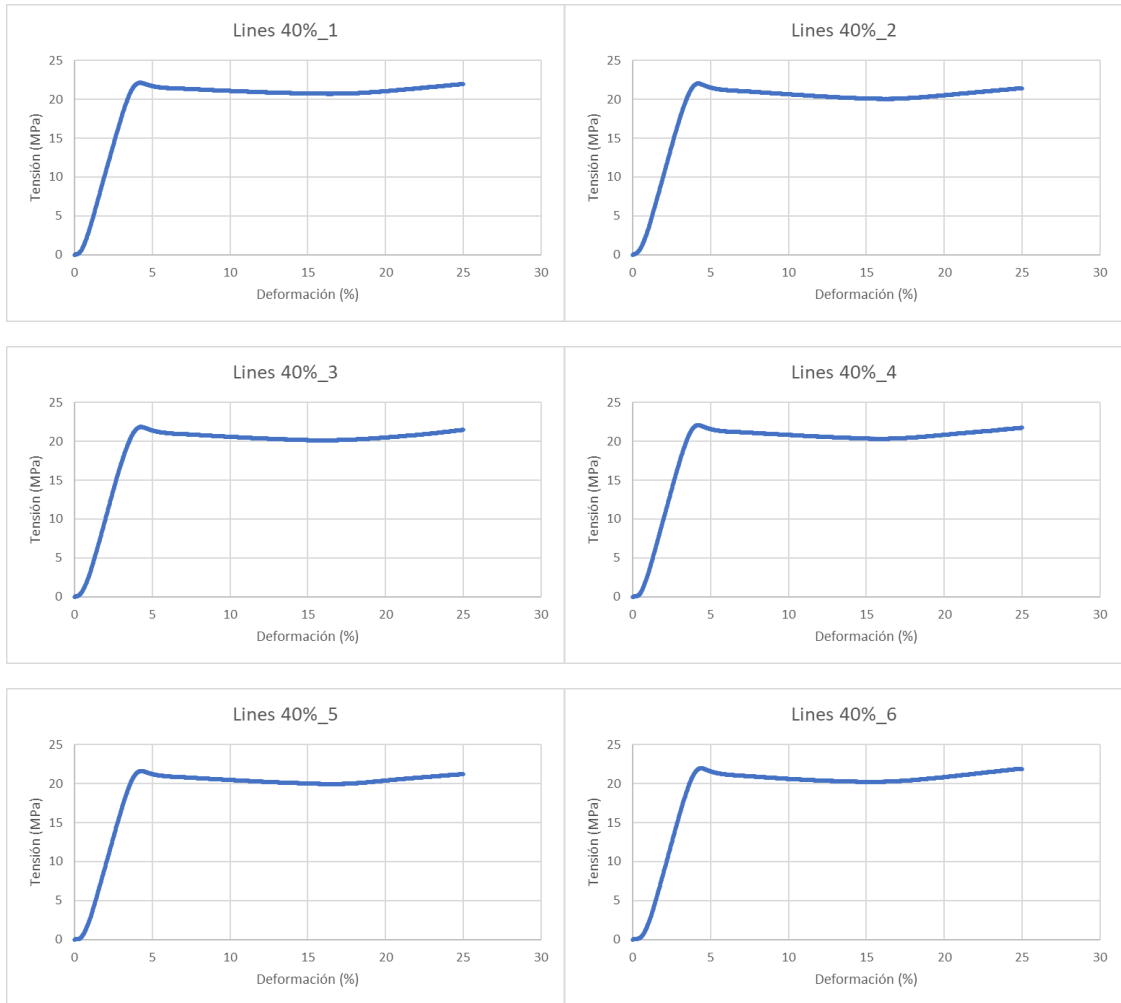


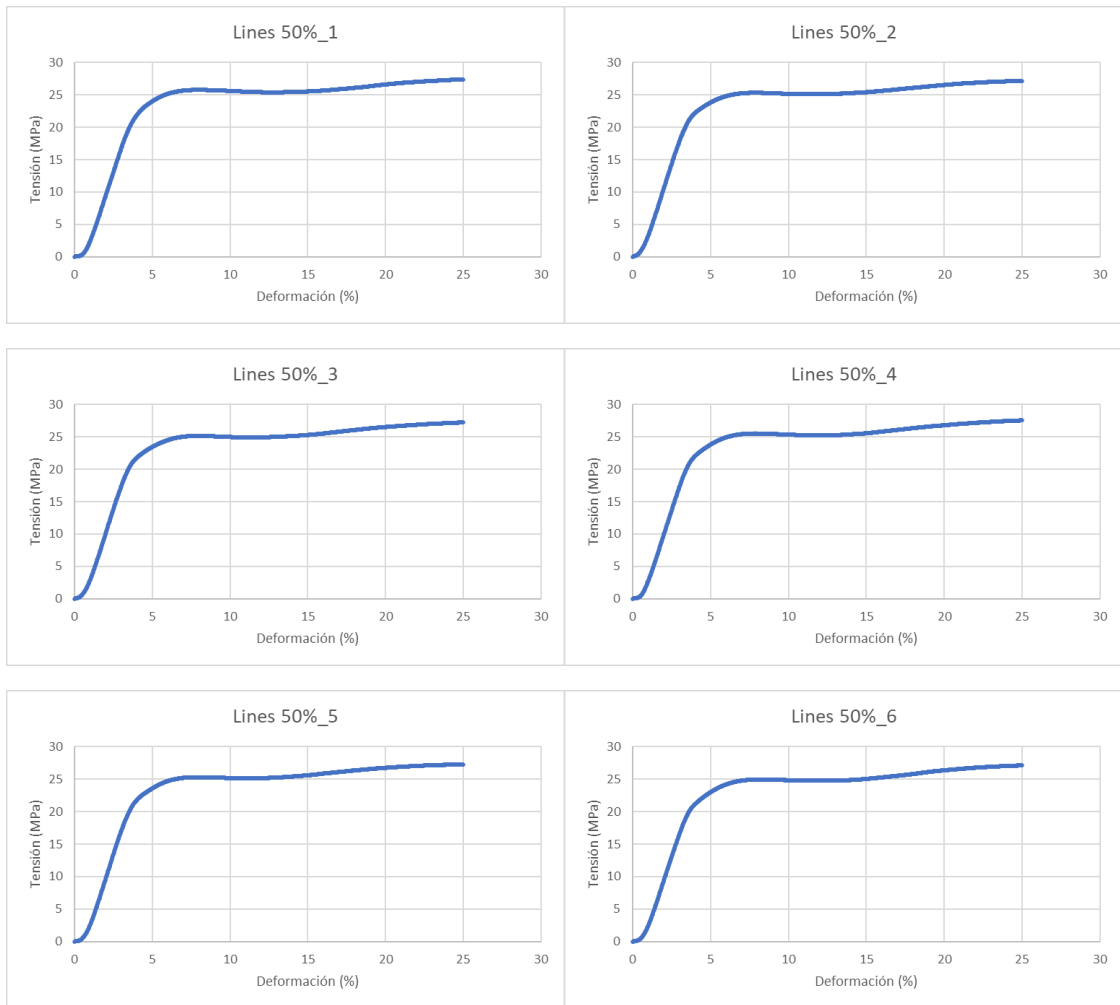
### III.3 Lines



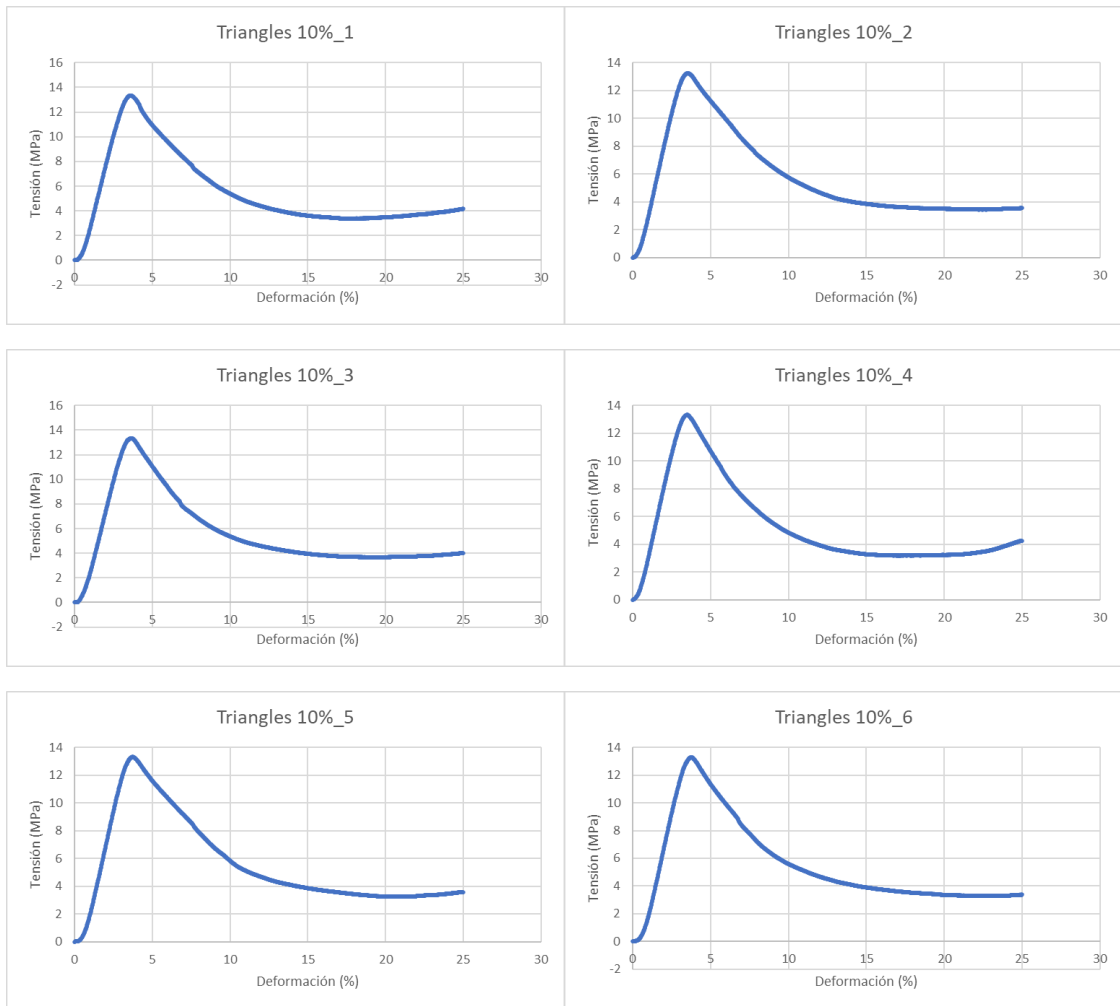


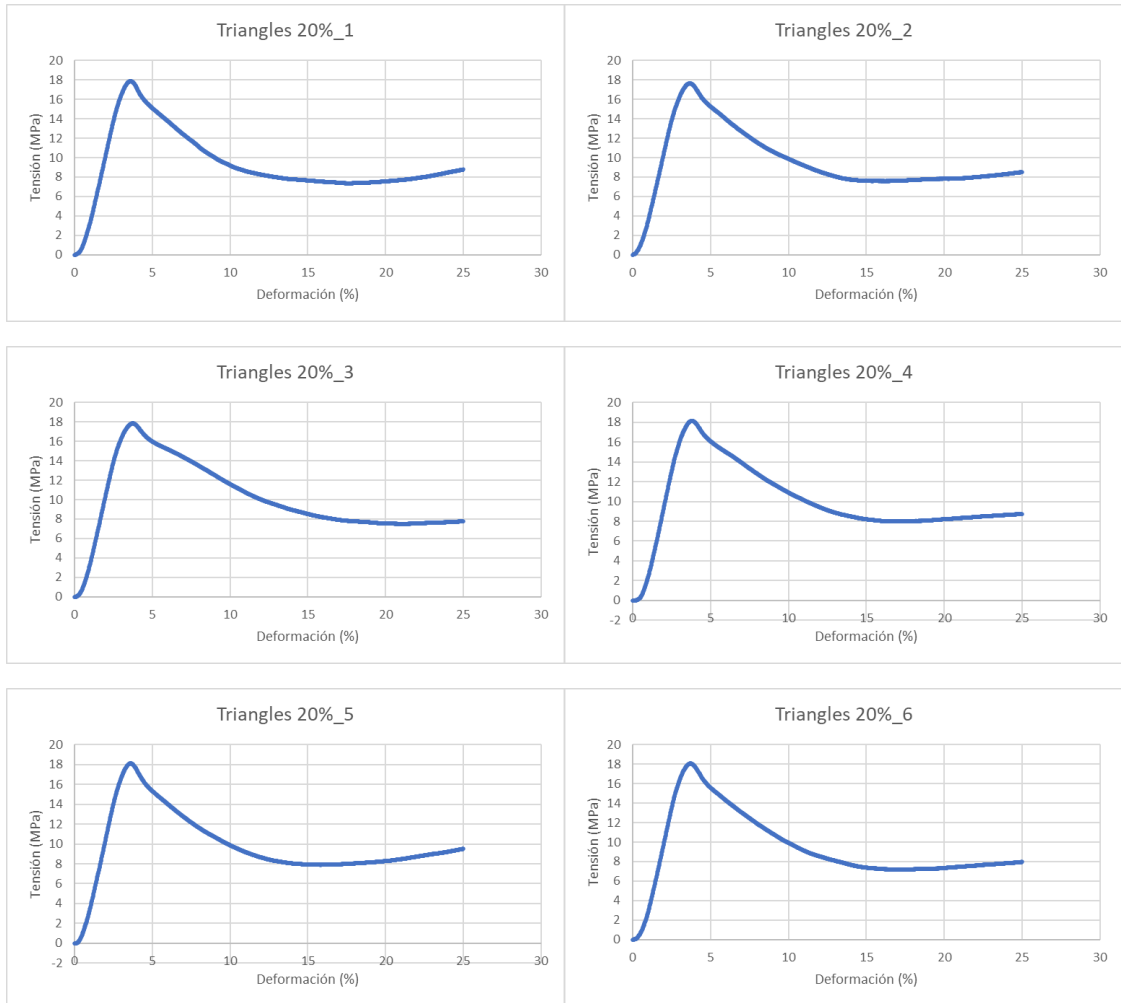




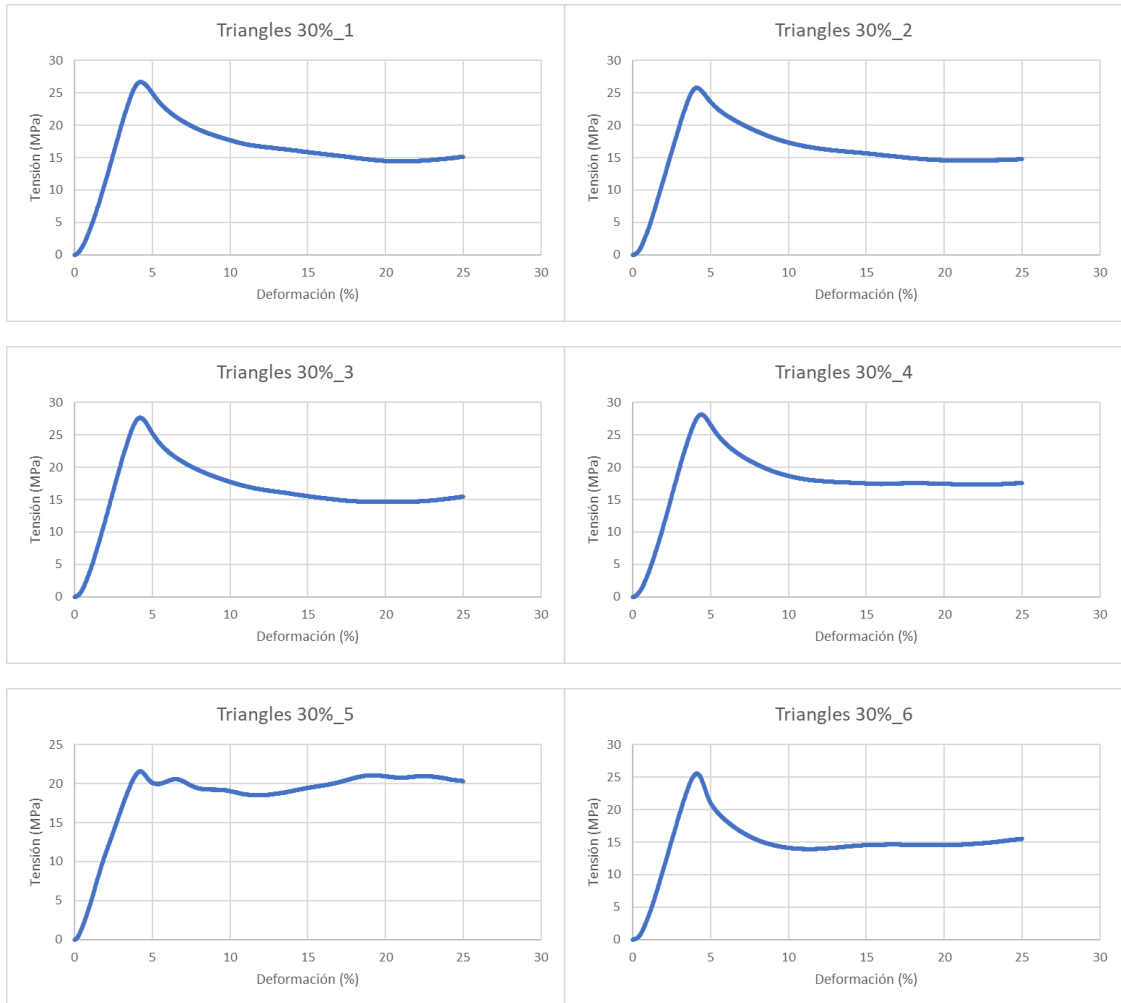


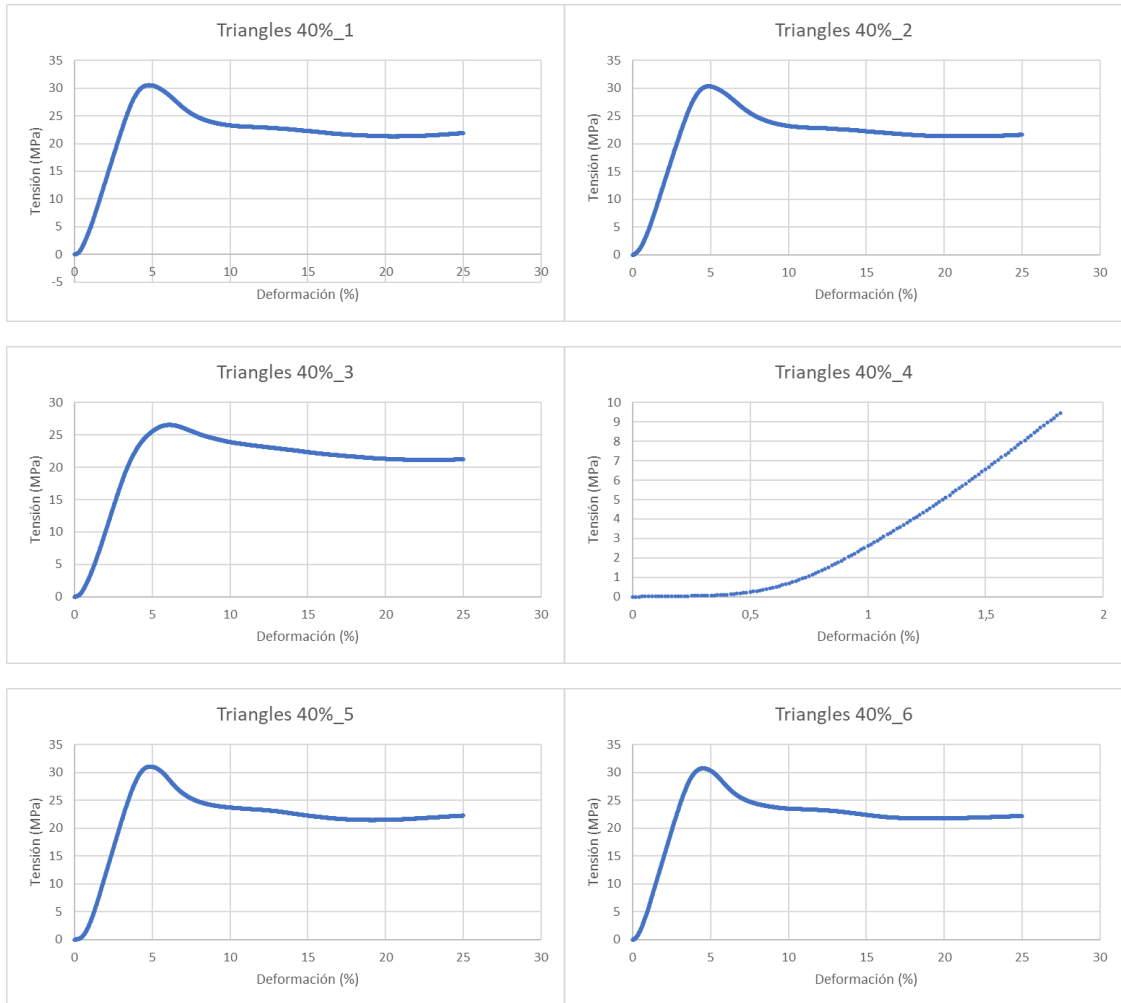
### III.4 Triangles

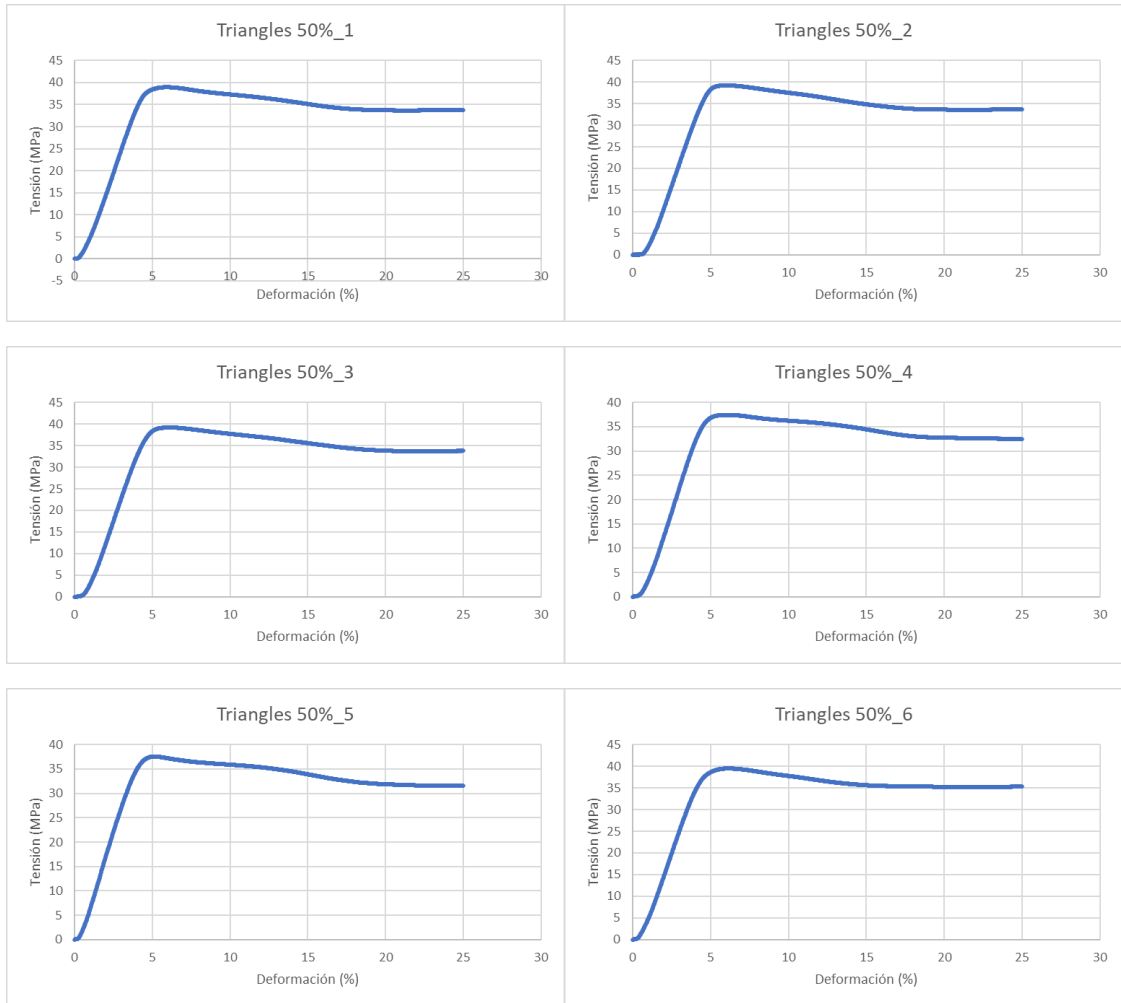




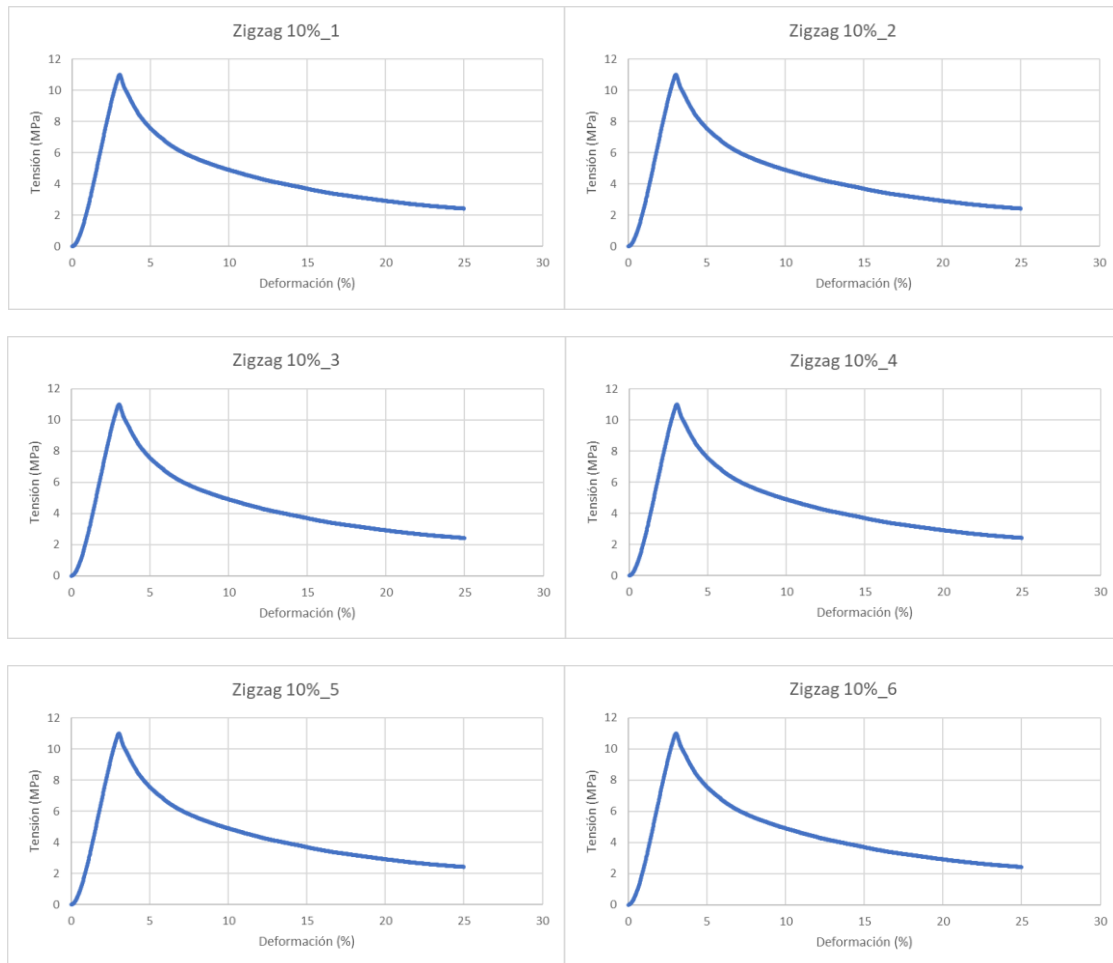


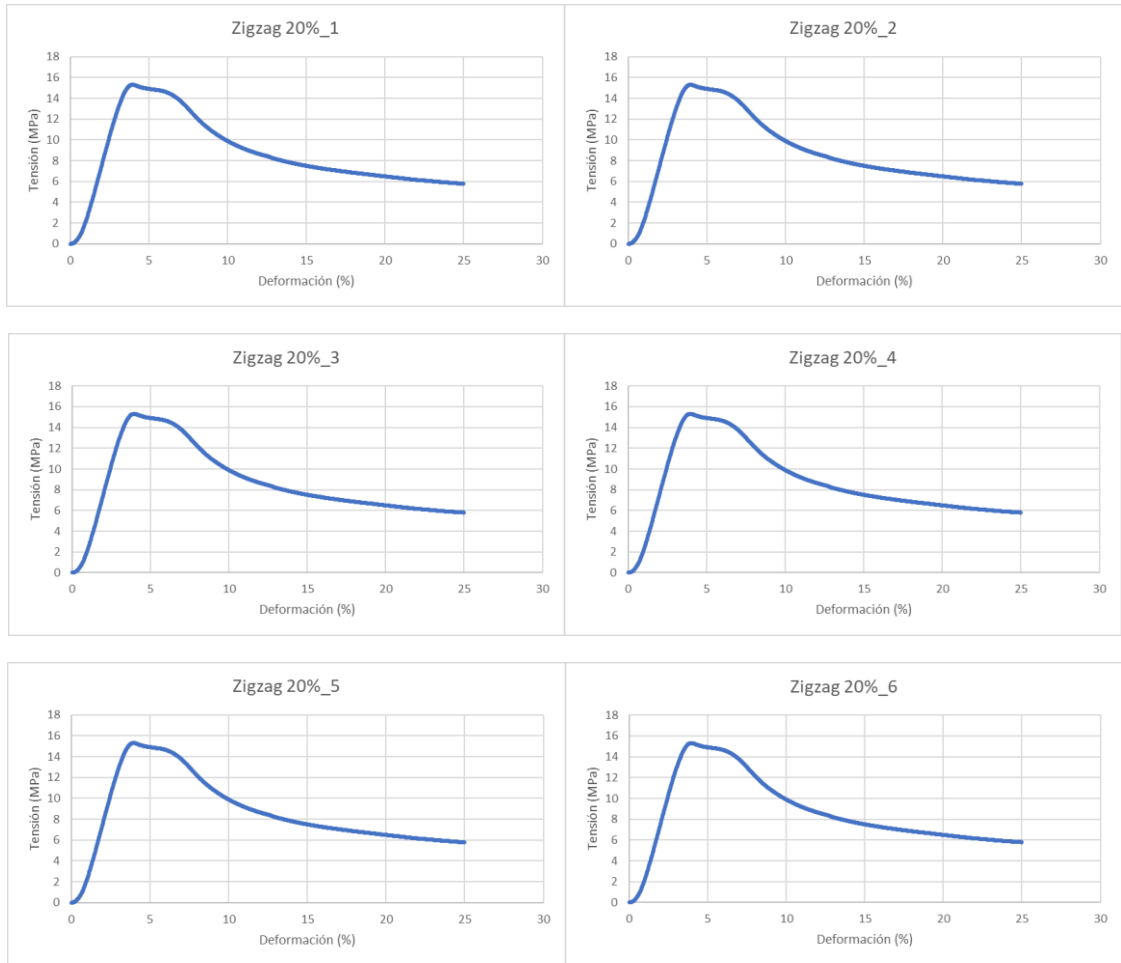


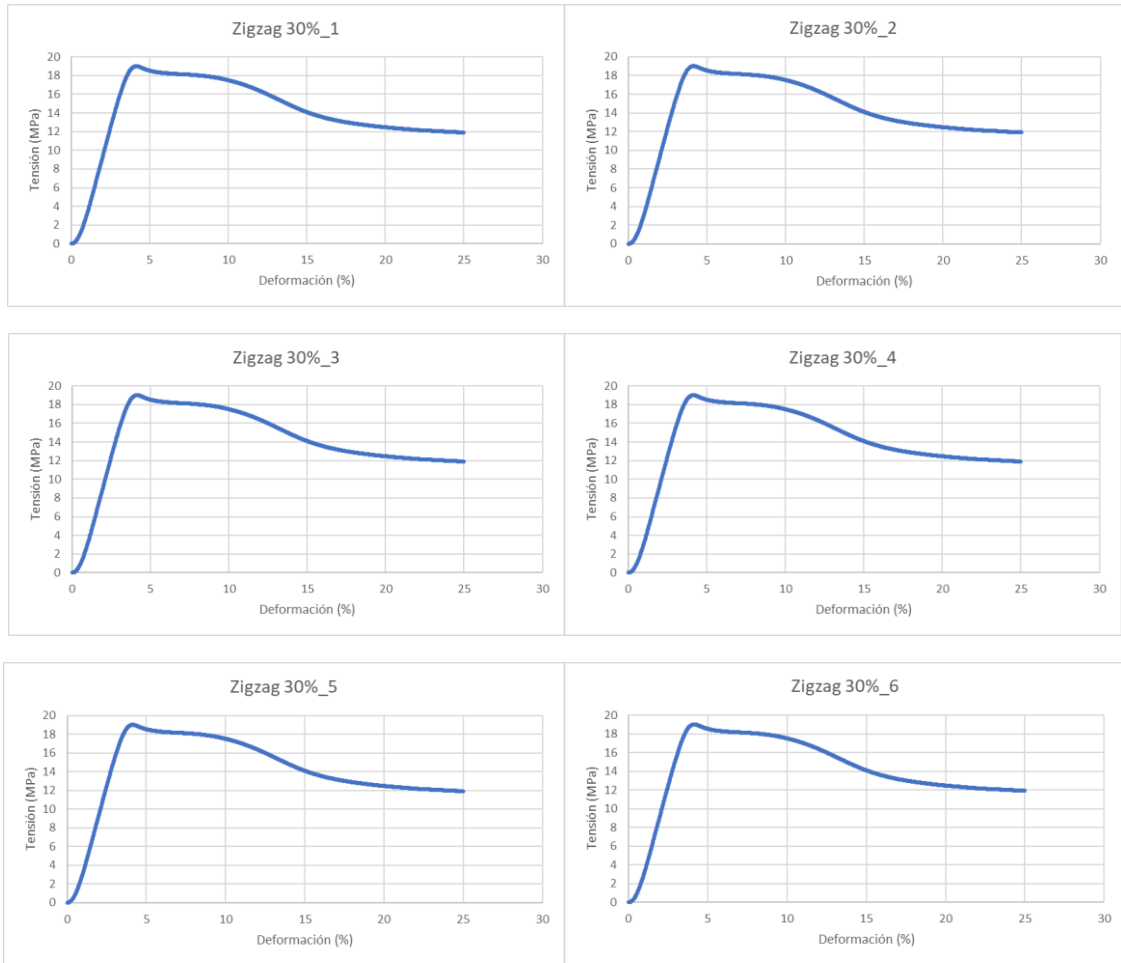


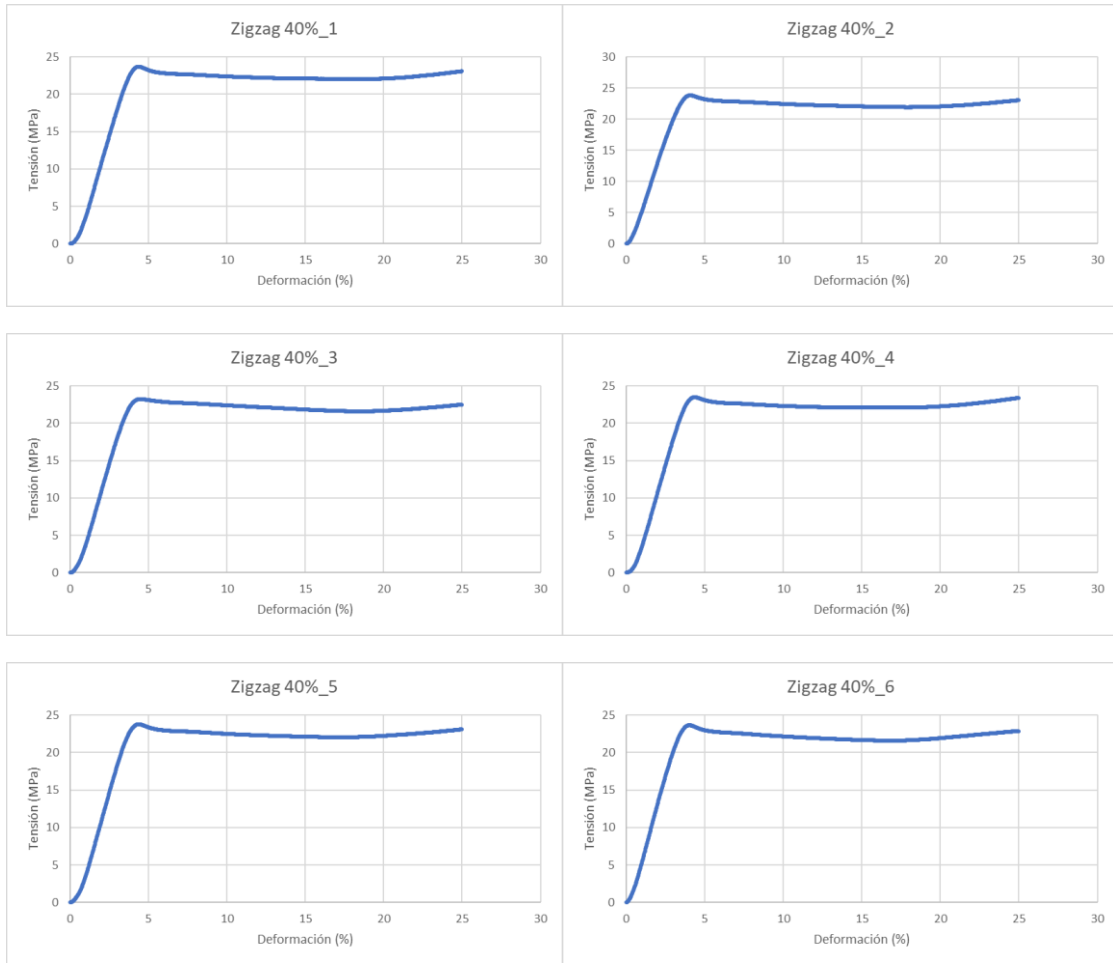


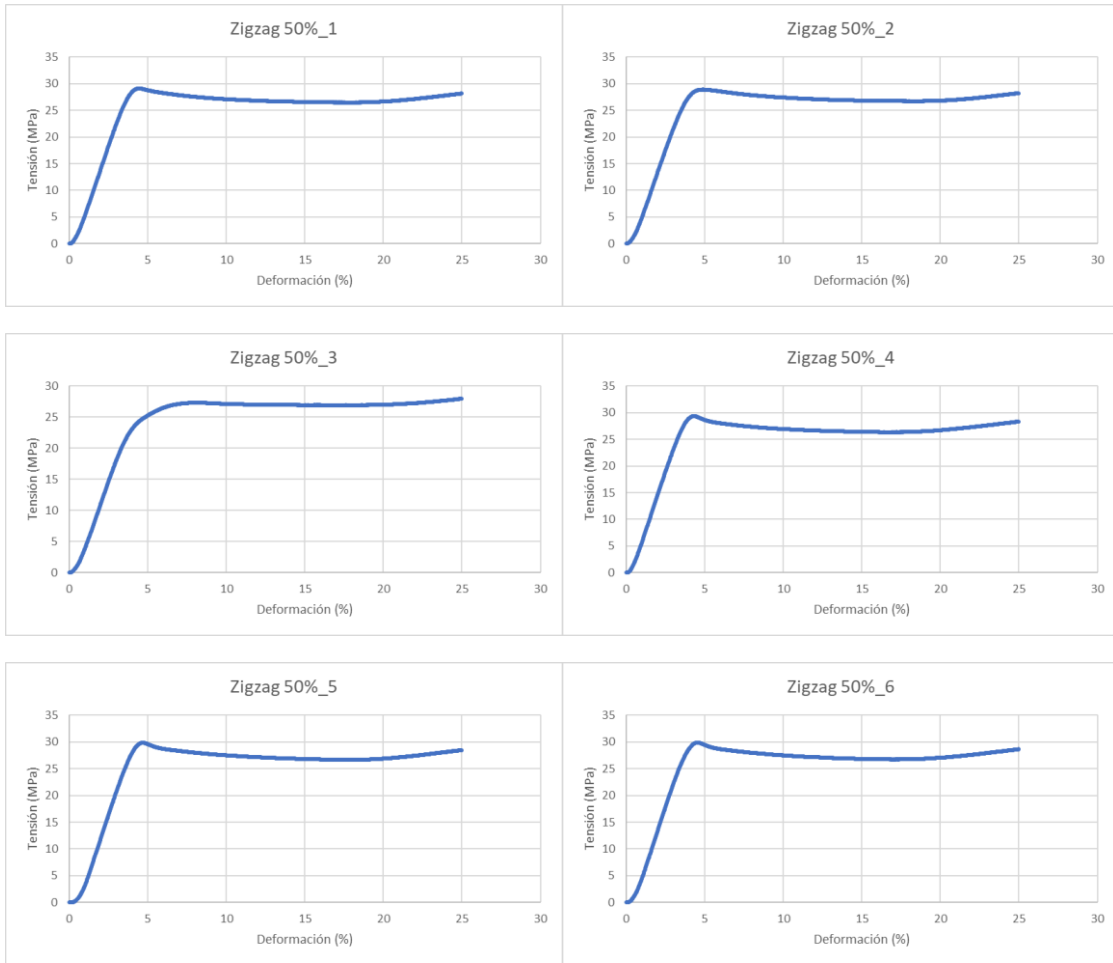
### III.5 Zigzag













## IV. Ficha técnica PLA



### SMARTFIL® PLA

PLA de primera calidad, no incorpora reciclado ni recuperado. Totalmente estabilizado y con una variabilidad en diámetro de 0.03 mm. No produce warping. Excelente resolución en la impresión.

PLA 100% premium. It does not incorporate recycled or recovered material. Fully stabilized and a variability in the diameter only of 0.03 mm. No warping occurs. Excellent resolution for printing.

# PLA

Physical Properties	Typical Value	Test Method
Material Density	1.24 g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183
Chemical Name	Polylactic Acid	
Mechanical Properties	Typical Value	Test Method
Tensile Strength	MD 110 MPa	ASTM D882
	TD 114 MPa	ASTM D882
Tensile Modulus	MD 3309 MPa	ASTM D882
	TD 3861 MPa	ASTM D882
Elongation at Break	MD 160%	ASTM D882
	TD 100%	ASTM D882
Elmendorf Tear	MD 15 g/ml	ASTM D1922
	TD 13 g/ml	ASTM D1922
Thermal Properties	Typical Value	Test Method
Heat Deflection Temperature B	65 °C	ASTM D1505
Vicat Softening Temperature	85° C	ASTM D1525
Printing Properties	Typical Value	
Print Temperature	220±20 °C	
Hot Pad	0-60 °C	
Fan Layer	On (100%)	

Size	Net W.	Gross W.	Diameters	Packaging Characteristics
S	330 g	348 g	1.75 mm	SmartBag, security seal
M	750 g	975 g	1.75/2.85 mm	SmartBag, security seal
L	1000 g	1256 g	1.75/2.85 mm	SmartBag, security seal
XL <sup>1</sup>	3300 g	3864 g	1.75/2.85 mm	SmartBag, security seal
XXL <sup>1</sup>	5600 g	6346g	1.75/2.85 mm	SmartBag, security seal
XXXL <sup>1</sup>	8000 g	8746 g	1.75/2.85 mm	SmartBag, security seal

<sup>1</sup>(XL, XX and XXL son fabricados bajo demanda. Plazo de entrega entre 1 y 5 semanas.  
<sup>1</sup>XL, XX and XXL spools are made under order. Delivered term between 1 and 5 weeks.

#### Colores Disponibles / Available Colours

Color	Name	Colour
Natural	Natural	Natural
Blanco	Ivory White	White
Negro	True Black	Black
Amarillo	Orinoco	Yellow
Naranja	Sunset	Oranja
Coral	Coral	Coral
Rojos	Ruby	Red
Brilla en la Oscuridad	Smart Glow	Glowes in the Dark
Marrón	Mahogany	Brown
Verde	Chlorophyll	Green 1
Verde 2	Emerald	Green 2
Verde 3	Jade	Green 3
Verde 4	Olive	Green 4
Azul 1	Sapphire	Blue 1
Azul 2	Cobalt	Blue 2
Fluor Yellow	Neo Yellow	Fluor Yellow
Violeta 1	Wisteria	Violet 1
Violeta 2	Aubergine	Violet 2
Rosa	Hillier Lake	Pink
Gris	Antracite	Grey
Dorado	Gold	Gold
Plateado	Silver	Silver
Cambio de Color	Mix	Colour Transition
Rosa Fluor	Neo Pink	Fluor Pink



Reciclable  
Recyclable



Apto para contacto  
con alimentos  
Food Approved  
Aliments approved













Biocompatible  
Biocompatible

**Nota:** Ninguno de nuestro filamentos contiene material reciclado con el fin de ofrecer filamentos de la mejor calidad.











**Note:** None of our filaments is produced with recycled material in order to get the highest quality filaments.

## V. Imágenes de roturas

### V.1 Concentric











Porcentaje (%)	Antes	Después
10		
20		
30		
40		
50		

V.2 Grid

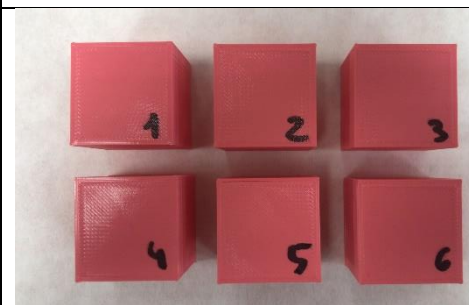









Porcentaje (%)	Antes	Después
10		
20		
30		
40		
50		











V.3 Lines

Porcentaje (%)	Antes	Después
10		
20		
30		
40		
50		

V.4 Triangles

Porcentaje (%)	Antes	Después
10		
20		
30		
40		
50		

V.5 Zigzag

Porcentaje (%)	Antes	Después
10		
20		
30		
40		
50	