



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

SECCIÓN DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

**RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE PROBETAS
FABRICADAS EN PLA CON DISTINTO RELLENO**

Titulación

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor

Gonzalo Lugo Velázquez

Tutores

María Hernández Molina

José A. Valido García

Marzo, 2022

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
SECCIÓN DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE PROBETAS
FABRICADAS EN PLA CON DISTINTO RELLENO

ÍNDICE GENERAL

Titulación

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor

Gonzalo Lugo Velázquez

Índice general

MEMORIA	1
ANEXOS	87
Anexo I. Dimensiones de las probetas	87
Anexo II. Datos de impresión	93
Anexo III. Tablas resultados individuales	95
Anexo IV. Gráficas resultados individuales	100
Anexo V. Ficha técnica PLA	125
Anexo VI. Imágenes de roturas	126

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
SECCIÓN DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE PROBETAS
FABRICADAS EN PLA CON DISTINTO RELLENO

MEMORIA

Titulación

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor

Gonzalo Lugo Velázquez

Índice memoria

0. Hoja de identificación	1
1. Resumen	2
2. Abstract.....	3
3. Objeto del proyecto	4
4. Alcance del proyecto	5
5. Antecedentes del proyecto	7
6. Introducción a la fabricación aditiva	9
6.1. Beneficios de la fabricación aditiva	10
6.2. Aplicaciones.....	11
6.3. Técnicas de fabricación aditiva	15
6.3.1. Proyección de aglutinante	15
6.3.2. Deposición de energía focalizada.....	16
6.3.3. Extrusión de material	17
6.3.4. Proyección de material	18
6.3.5. Fusión de lecho de polvo.....	19
6.3.6. Laminado de hojas	20
6.3.7. Fotopolimerización en tanque o cuba.....	21
6.4. Modelado por deposición fundida (FDM).....	22
6.4.1. Introducción	22
6.4.2. Parámetros de impresión	23
6.4.3. Materiales empleados en FDM.....	28
6.4.4. Tipos de impresoras FDM.....	30
7. Equipamiento empleado	34
7.1. Impresora 3D.....	34
7.2. Estación meteorológica inalámbrica	35
7.3. Balanza de análisis	35
7.4. Calibrador digital.....	36

7.5. Envasadora al vacío.....	36
7.6. Máquina universal de ensayos.....	36
8. Impresión de las probetas.....	38
8.1. Selección del filamento	38
8.2. Diseño de las probetas.....	38
8.3. Selección de los parámetros de impresión	39
8.4. Fabricación de las probetas	42
8.5. Contratiempos durante la impresión.....	44
9. Ensayo de resistencia a compresión.....	48
9.1. Puesta a punto de la máquina universal de ensayos	48
9.2. Realización de los ensayos.....	49
10. Análisis de resultados.....	54
10.1. Giroide.....	54
10.2. Octeto	55
10.3. Cúbico	56
10.4. Cúbico bitruncado	57
10.5. Subdivisión cúbica	58
10.6. Estudio de correlación.....	60
10.7. Resumen de resultados	62
11. Conclusiones	67
12. Conclusions	68
13. Líneas futuras de trabajo	69
Bibliografía.....	70
Glosario de términos	80
Índice de figuras	83
Índice de tablas	85

0. Hoja de identificación

Proyecto

- **Título:** “Resistencia a compresión de probetas fabricadas en PLA con distinto 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:** iindustr@ull.es

Autor

- **Nombre:** Gonzalo Lugo Velázquez
- **DNI:** 43836652D
- **Teléfono:** 663026112
- **Email:** alu0100896589@ull.edu.es

1. Resumen

En la actualidad, la impresión 3D es uno de los métodos de fabricación más utilizados a nivel mundial. Esta técnica de fabricación aditiva, también denominada modelado por deposición fundida (FDM), permite fabricar piezas con geometrías complejas a un coste más bajo que las técnicas de fabricación tradicionales, ya que reduce el consumo de material y disminuye la generación de residuos.

A pesar de las ventajas que posee con respecto a otros procesos de fabricación, la impresión 3D no está libre de dificultades. En lo que a propiedades mecánicas se refiere, la correcta selección de los parámetros de impresión es esencial, ya que están directamente relacionados con las características de la pieza resultante. Normalmente, la elección se realiza en base a la experiencia del usuario, pero cuando se requieren propiedades mecánicas específicas, no se conocen los parámetros a elegir.

En el presente trabajo fin de grado, se analiza la influencia de los parámetros patrón y densidad de relleno en la resistencia a compresión de piezas fabricadas en ácido poliláctico (PLA) mediante una impresora 3D FDM. Para ello, se imprimieron probetas cúbicas con distintos patrones de relleno (giroide, octeto, cúbico, cúbico bitruncado, subdivisión cúbica) y densidades (10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %), manteniendo los demás parámetros constantes. Posteriormente, se llevó a cabo el ensayo de compresión, obteniendo su resistencia, así como otras propiedades de interés. Además del patrón y densidad de relleno, se tuvo en cuenta el tiempo de impresión y la cantidad de filamento empleado. Analizando todos los parámetros en su conjunto es posible determinar el binomio, patrón de relleno – densidad, más óptimo para la resistencia a compresión deseada.

2. Abstract

Nowadays, 3D printing is one of the most widely used manufacturing methods in the world. This additive manufacturing technique, also known as fused deposition modelling (FDM), allows to manufacture parts with complex geometries at a lower cost than traditional manufacturing techniques by reducing material consumption and waste generation.

Despite its advantages over other manufacturing processes, 3D printing is not without its difficulties. When it comes to mechanical properties, the correct choice of printing parameters is essential, as they are directly related to the characteristics of the resulting part. Normally, the choice is made based on the user's experience, but when specific mechanical properties are required, the right parameters to choose are not known.

In the present project, the influence of pattern and infill density parameters on the compressive strength of parts manufactured in PLA using an FDM 3D printer is analyzed. To do so, cubic test specimens were printed with different infill patterns (gyroid, octet, cubic, quarter cubic, cubic subdivision) and densities (10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %), keeping the rest of the parameters unchanged. Then, the compression test was performed, obtaining its resistance, as well as other properties of interest. In addition to the filling pattern and density, the printing time and the amount of filament used were also considered. By analysing all the parameters together, it is possible to determine the optimum infill pattern - density binomial for the desired compressive strength.

3. Objeto del proyecto

El presente proyecto tiene como objetivo realizar un estudio en el que se compare la resistencia mecánica a compresión de probetas fabricadas en PLA mediante impresión 3D con distinto patrón y densidad de relleno. De esta manera, se pretende relacionar los distintos rellenos con las propiedades mecánicas de las probetas mediante ensayos de resistencia a compresión. A su vez, se realizará un análisis general de las técnicas de fabricación aditiva, así como una descripción de los distintos procesos y tecnologías que la componen.

Este proyecto se puede dividir en tres grandes bloques: el primero engloba todo lo relacionado con la fabricación, mediante impresión FDM, de las probetas. El segundo corresponde al ensayo de compresión y a las tareas necesarias para su ejecución. El tercer y último bloque recoge el tratamiento de los datos, así como el estudio y análisis de los resultados.

4. Alcance del proyecto

Este proyecto abarca desde una visión global de la fabricación aditiva hasta un nivel más específico en el que se detalla el experimento realizado, que comprende la impresión de las probetas, el ensayo de las mismas y el posterior análisis de resultados.

Para lograr el objetivo de este proyecto se debe conocer el funcionamiento de la técnica de impresión 3D empleada y saber resolver los distintos problemas que puedan surgir durante la impresión. Así como el uso experimental de la máquina universal de ensayos y el tratamiento e interpretación de los datos resultantes.

El desarrollo de este proyecto implica una serie de etapas:

- **Selección del filamento a emplear.** Se elige un filamento de entre los que se encuentran disponibles en el mercado. El tipo de material y las características del filamento se deben seleccionar teniendo en cuenta el equipo de impresión y el fin para el que se van a utilizar las piezas.
- **Selección de las dimensiones de la probeta.** Lo más frecuente es que las dimensiones de las probetas vengan establecidas por la normativa correspondiente, ya sea desarrollada por la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) o por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM). No obstante, según la finalidad que se busque con el ensayo es posible emplear probetas no normalizadas.
- **Diseño de la probeta.** El diseño de la probeta se realiza en el software *SolidWorks*, y se exporta en formato STL.
- **Importación del archivo STL al software de laminado 3D.** Se importa el archivo STL al software de laminado 3D o *slicer 3D*. Este software convierte el modelo en una serie de capas finas y genera un archivo G-Code con las instrucciones para la impresión 3D.
- **Configuración de los parámetros de impresión.** La selección de los parámetros de impresión es un paso esencial para la correcta fabricación de las probetas. Se fijan valores como el espesor de capa, la temperatura de la cama y la boquilla, la velocidad de impresión o la densidad y patrón de relleno para cada una de las probetas a imprimir.

- **Exportación del archivo G-Code.** Este fichero es generado por el software de impresión 3D y contiene las instrucciones que la impresora tiene que seguir para imprimir la pieza correctamente. Luego el fichero se exporta a una tarjeta microSD, la cual se introduce en la ranura de la impresora 3D.
- **Puesta a punto de la impresora 3D.** Antes de imprimir se realiza una puesta a punto de la impresora 3D, que consiste en nivelar la cama de impresión, regular el desfase u *offset* en el eje Z, o limpiar la boquilla por si pudiera estar atascada por restos de filamento de impresiones anteriores que influyan en el flujo de material.
- **Impresión de las probetas.** Tras precalentar la boquilla y la cama a la temperatura configurada en el G-Code y aplicar el adhesivo, se realiza la impresión de las probetas.
- **Medición y pesado de las probetas.** Una vez impresa cada serie de probetas, se miden las dimensiones y se pesa cada una de ellas.
- **Envasado al vacío y etiquetado de las probetas.** Las probetas se envasan al vacío para protegerlas de la humedad y se etiquetan para su almacenaje hasta la realización del ensayo.
- **Puesta a punto de la máquina universal de ensayos.** Antes de realizar los ensayos se deben introducir las dimensiones de las probetas y configurar los parámetros del ensayo en un archivo MAI denominado método. Esto se realiza en el software *Trapezium*, de la empresa *Shimadzu*. La puesta a punto también conlleva la colocación de los cabezales de ensayo correctos en la máquina universal de ensayos.
- **Realización de los ensayos.** Tras configurar la máquina universal de ensayos y el software de la misma se realiza el ensayo de cada una de las probetas.
- **Análisis de los resultados obtenidos.** Después de realizar los ensayos se exportan los datos a una hoja de cálculo y, tras el correspondiente tratamiento estadístico, se realiza una interpretación de los datos resultantes.

5. Antecedentes del proyecto

La popularidad del uso de la fabricación aditiva o impresión 3D ha aumentado para la fabricación de productos personalizados en todo tipo de industrias. La capacidad de fabricar geometrías complejas a costos relativamente bajos y su facilidad de utilización han sido algunas de las características que han propiciado el interés en el uso de esta tecnología.

La calidad y las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas mediante impresión 3D dependen de una selección adecuada de los parámetros que intervienen en el proceso de impresión, entre los cuales se encuentran el patrón y la densidad de relleno. La incidencia de estas variables sobre el acabado y el desempeño mecánico de la pieza final requieren ser estudiados para obtener la configuración óptima según las propiedades específicas necesarias.

En el trabajo fin de máster titulado “Influencia de los parámetros de relleno en el comportamiento mecánico a la flexión de piezas fabricadas en impresoras 3D de bajo coste” [1], realizado en el año 2014 por Wilson Calle Guamantario se llevó a cabo un estudio acerca del comportamiento mecánico a flexión de piezas fabricadas en ABS mediante impresión 3D, tomando como variables los parámetros densidad de relleno y patrón de relleno. Concretamente, se utilizaron tres patrones de relleno (*Rectilinear*, *Honeycomb* y *Line*) y tres densidades de relleno diferentes (20 %, 50 % y 100 %). Como resultado, se obtuvo que el patrón de relleno *Honeycomb* es el que muestra una mayor resistencia a la flexión en cada una de las diferentes densidades de relleno.

En un artículo publicado en agosto de 2016 titulado “Influencia del porcentaje de relleno en la resistencia mecánica en impresión 3D, por medio del método de Modelado por Deposición Fundida (FDM)” de Álvarez et al. [2], se analizó la influencia del porcentaje de relleno en la resistencia a tracción de piezas fabricadas en ABS. Para ello, se imprimieron probetas para ensayos a tracción, variando el porcentaje de relleno, manteniendo los demás parámetros constantes. Posteriormente fueron ensayadas y de esta manera se logró obtener su resistencia a la tracción. Además, se analizó el tiempo efectivo de impresión, logrando establecer un rango recomendado de impresión en función de este parámetro combinado con la resistencia a la tracción. La máxima resistencia a la tracción promedio, se obtuvo con un porcentaje de relleno de 100 % y fue de 34.57 MPa.

En el trabajo fin de grado titulado “Estudio de la isotropía en geometrías de relleno en piezas de impresión 3D” [3] realizado por Víctor González Cantón en 2019, se lleva a cabo un análisis de la isotropía de piezas fabricadas en PET-G mediante impresión 3D con tres geometrías de relleno diferentes (*Honeycomb*, *Gyroid* y *Random Primitives*). El análisis se llevó a cabo mediante dos ensayos de caracterización mecánica: un ensayo dinámico (Ensayo Charpy) y un ensayo estático (Ensayo de tracción). Los resultados indican, por un lado, que los ensayos de impacto muestran baja sensibilidad y, por otro lado, que de las estructuras estudiadas la resistencia se favorece en patrones poligonales, alcanzándose valores hasta un 30 % mayores que en otros patrones de relleno.

Por último, en un artículo publicado en abril de 2021 titulado “*An investigation to study the combined effect of different infill pattern and infill density on the impact strength of 3D printed polylactic acid parts*” de Mishra et al. [4], se sometieron a ensayos de impacto piezas impresas en PLA con distinto patrón y densidad de relleno. Los resultados mostraron que la absorción de energía es máxima para una densidad de relleno del 85% en cada patrón de relleno.

Aunque existen numerosos trabajos en esta línea, bien es cierto que la gran mayoría de la literatura consultada centra sus investigaciones en el estudio de la resistencia a tracción, entre otras propiedades, como la dureza superficial. El análisis de la resistencia a compresión tiene menos representación y, por lo tanto, este proyecto viene a ampliar el conocimiento de esta propiedad para piezas fabricadas mediante impresión 3D con distinto patrón y densidad de relleno.

6. Introducción a la fabricación aditiva

Durante mucho tiempo, uno de los principales objetivos de la industria de fabricación moderna ha sido maximizar la productividad. Con el fin de lograr productos de mayor calidad de fabricación con buenas prestaciones para aplicaciones de mercado, mayor eficiencia y reducción directa de costes, así como capacidad de cumplir con los requisitos ambientales y el subsecuente aumento de la velocidad de desarrollo de nuevos productos, las industrias manufactureras se han esforzado en automatizar los procesos de producción mediante sistemas asistidos por ordenador. Una de las tecnologías convencionales que ha dado un paso importante en las dos últimas décadas son las técnicas de fabricación aditiva (AM, siglas referidas al término en inglés *Additive Manufacturing*) [5].

La fabricación aditiva es una técnica de procesado asistida por ordenador para crear objetos 3D mediante la adición de capas bidimensionales de material, a partir de datos de un modelo sólido virtual (CAD) [6], [7].

Introducida por primera vez durante la década de los ochenta para satisfacer las necesidades altamente especializadas de creación de modelos y prototipado rápido (RP, en inglés *Rapid Manufacturing*), la fabricación aditiva ha surgido como una plataforma de tecnología versátil para el diseño asistido por ordenador y la fabricación rápida.

Esta tecnología permite la producción de piezas con geometrías complejas a partir de metales, cerámicas, y polímeros sin necesidad de moldes o mecanizados típicos de la fabricación convencional [8]. Esto le concede a la FA un gran potencial de ahorro de energía y costes, permitiendo reducir en gran medida el uso y desperdicio de materias primas, así como minimizar la huella de carbono [9].

La fabricación aditiva implica una serie de pasos que van desde el diseño CAD hasta el objeto físico resultante. La mayor parte de procesos de fabricación aditiva suponen, al menos en cierto grado, los siguientes ocho pasos [10]:

1. **CAD.** Todas las piezas deben partir de un modelo sólido virtual que describa completamente su geometría. Esto implica el uso de casi cualquier software de modelado CAD que genere una representación 3D de sólidos o superficies. También es común el uso de ingeniería inversa (p. ej. escáner láser) para crear esta representación.

2. **Conversión a formato STL.** El archivo STL (siglas provenientes del inglés *stereolithography*) describe las superficies externas cerradas del modelo CAD original y supone la base para el cálculo de las capas.
3. **Transferencia a la máquina y manipulación de archivos STL.** El archivo STL debe ser transferido a la máquina de fabricación aditiva. En este paso puede haber alguna manipulación del archivo para que tenga el tamaño, posición y orientación correctas.
4. **Configuración de la máquina.** La máquina debe configurarse correctamente antes del proceso de fabricación. Se modifican ajustes relacionados con los parámetros de fabricación como restricciones de material, fuente de energía, grosor de la capa, tiempos, etc.
5. **Fabricación.** La fabricación de la pieza es principalmente un proceso automatizado y la máquina puede realizar el trabajo en gran medida sin supervisión. En este paso solo es necesario un monitoreo superficial de la máquina para garantizar que no se hayan producido errores como quedarse sin material, fallas de energía o software, etc.
6. **Extracción.** Una vez la máquina ha completado la fabricación, se deben retirar las piezas.
7. **Tratamiento posterior.** Tras extraerlas de la máquina, es posible que las piezas requieran una limpieza adicional o eliminación de estructuras de soporte, lo cual requiere tiempo y una manipulación manual cuidadosa.
8. **Uso.** Las piezas ahora están listas para ser utilizadas. Sin embargo, también podrían requerir algún tratamiento adicional antes de que sean aceptables para su uso.

6.1. Beneficios de la fabricación aditiva

La implementación de técnicas de fabricación aditiva en la industria ofrece nuevas posibilidades a una gran cantidad de sectores, permitiendo mejorar y optimizar los procesos de fabricación, y ayudando a resolver problemas a los que la manufactura tradicional no ha sabido dar respuesta. A continuación, se enumeran las principales ventajas de esta tecnología:

- **Libertad de diseño.** La fabricación aditiva permite la producción de alta precisión de piezas de geometría compleja con pocas herramientas, y posibilita la fabricación de varias piezas de un ensamblaje en una sola pieza integrada.
- **Eficiencia.** Esta tecnología permite lograr una gran eficiencia energética, reducir el consumo y desperdicio de materia prima, y aumentar la rentabilidad económica del proceso de fabricación [11], [12].
- **Time to market.** La fabricación aditiva permite reducir drásticamente el tiempo que tarda el producto desde su ciclo de fabricación hasta llegar al mercado, gracias a los pocos requisitos de diseño y prototipado, cargas de fabricación anticipadas, nula necesidad de herramientas de fabricación y bajo tiempo de preparación [13].
- **Reducción de costes.** La fabricación aditiva permite reducir en gran medida los costes de fabricación, ya sea por el uso mínimo de material y energía, la disminución de costes de logística y almacenamiento, la simplificación del proceso de fabricación o el ahorro en mano de obra.
- **Versatilidad.** La fabricación aditiva permite construir diversos productos según las especificaciones del cliente, utilizando materiales que van desde polímeros a metales o células humanas, y permitiendo la utilización de múltiples materiales simultáneamente en una misma pieza [12], [13].

6.2. Aplicaciones

La fabricación aditiva, habitualmente denominada impresión 3D, ha realizado grandes avances desde que se desarrolló por primera vez en la década de los ochenta. Si bien esta se originó como una herramienta de prototipado rápido, actualmente ha evolucionado para abarcar una gran cantidad tecnologías.

Durante las últimas décadas se ha producido un gran crecimiento en el número de empresas que adoptan esta tecnología. Las aplicaciones varían según el tipo de industria, pero en general incluyen partes de herramientas, prototipos visuales y funcionales, e incluso piezas para su uso final.

A medida que aumentan las potenciales aplicaciones para la fabricación aditiva, las empresas comienzan a encontrar formas de crear nuevos modelos de negocio y oportunidades de esta tecnología [14].

A continuación, se enumeran algunas de las principales industrias que utilizan la fabricación aditiva para impulsar la innovación y el crecimiento empresarial:

- **Aeroespacial y defensa.** La industria aeroespacial y de defensa es una de las primeras en adoptar la impresión 3D [14]. Las ventajas del uso de esta tecnología para componentes aeroespaciales son la reducción significativa de costes y tiempos de entrega, el uso de materiales novedosos y soluciones de diseño innovadoras, la reducción masiva de componentes gracias a diseños livianos y altamente eficientes, y la consolidación de múltiples componentes para mejorar el rendimiento o la gestión de riesgos [15].

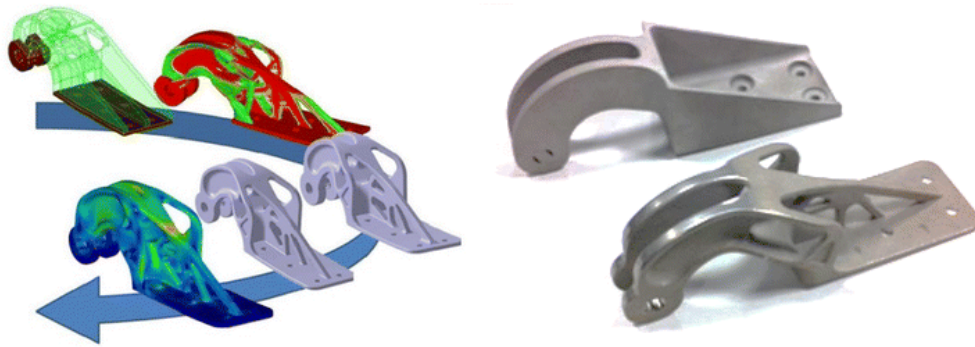


Figura 6.1. Optimización topológica y FA de una pieza de avión [16].

- **Automotriz.** En la industria automotriz, cada vez emergen más ejemplos de uso de la fabricación aditiva. Los equipos de Fórmula 1 han estado utilizando ampliamente las tecnologías de fabricación aditiva en sus monoplazas durante muchos años. Por otro lado, numerosos fabricantes de automóviles usan piezas fabricadas mediante esta tecnología en coches de calle, prototipos y otros usos [10].

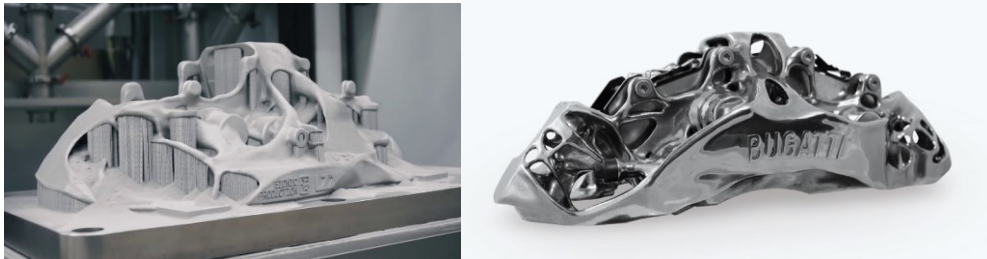


Figura 6.2. Pinza de freno del Bugatti Chiron impresa en titanio [17], [18].

- **Médica y dental.** En la industria de los productos sanitarios, la fabricación aditiva se utiliza para producir dispositivos e implantes médicos y dentales, audífonos, ortopedia y prótesis de forma rentable [19].



Figura 6.3. Implante facial fabricado mediante impresión 3D [20].

- **Bienes de consumo.** Las compañías e industrias orientadas al consumidor deben poder adaptarse a las demandas cambiantes de los consumidores y las tendencias industriales de una manera ágil, para seguir siendo competitivas en un panorama de mercado en constante cambio. La fabricación aditiva satisface estas necesidades y proporciona un enfoque rentable para el desarrollo, las pruebas y la producción de productos tales como aparatos electrónicos, juguetes y ropa deportiva [14].



Figura 6.4. Bienes de consumo fabricados mediante impresión 3D [21], [22].

- **Construcción.** Los procesos de fabricación aditiva han sido utilizados por la industria de la construcción desde 1997. Hasta la fecha, las técnicas de fabricación aditiva se han adoptado para la fabricación de estructuras complejas, estructuras de paredes simples, superficies curvas, vigas de hormigón, modelos arquitectónicos, estructuras de puentes, casas y villas [23].



Figura 6.5. Fabricación aditiva por extrusión de hormigón fresco in situ [24].

- **Bienes industriales.** El sector de los bienes industriales incluye la producción de componentes de maquinaria, herramientas y equipos utilizados en la fabricación de otros bienes. Con el aumento de los costos de producción y la digitalización de la fabricación, los fabricantes de equipos originales industriales (OEM, en inglés *Original Equipment Manufacturer*) [25] deben evolucionar constantemente para mantener la agilidad operativa y mantener los costos bajos. Por lo tanto, los fabricantes recurren cada vez más a la impresión 3D para continuar siendo ágiles, receptivos e innovadores [14].



Figura 6.6. Inyector SIS obtenido mediante fabricación aditiva [26].

6.3. Técnicas de fabricación aditiva

Según la norma *UNE-EN ISO/ASTM 52900:2017* [27] los procesos de fabricación aditiva se dividen en siete categorías:

6.3.1. Proyección de aglutinante

La proyección de aglutinante (BJ, en inglés *Binder Jetting*) es una técnica de fabricación aditiva desarrollada inicialmente en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) y patentada en 1993 por Emanuel Sachs, quien desarrolló el proceso utilizando un polvo de tipo yeso y un aglutinante de glicerina y agua depositado mediante cabezales de impresión de inyección de tinta [28].

En este proceso, se coloca un polvo fino sobre una plataforma de construcción, y luego se aplica cuidadosamente un agente adhesivo líquido a través de cabezales de impresión de inyección de tinta para adherir las partículas entre sí en la forma deseada. La plataforma de construcción desciende una distancia prefijada y la siguiente capa de polvo se coloca encima de ella. Luego se imprime la siguiente capa y se une a la capa anterior mediante el aglutinante inyectado [13]. A medida que avanza la construcción, las capas de la impresión se unen entre sí, lo que da como resultado una caja de polvo con aglutinante dispuesta en la forma 3D de la pieza deseada. Finalmente, la caja se puede calentar para curar o "fijar" el aglutinante si es necesario, y por último las partes impresas se extraen del lecho de polvo en un proceso llamado "despojado". En este punto, las piezas impresas se pueden considerar "verdes" o bien se pueden someter a un proceso posterior como sinterización o infiltración, para lograr las propiedades mecánicas deseadas [28].

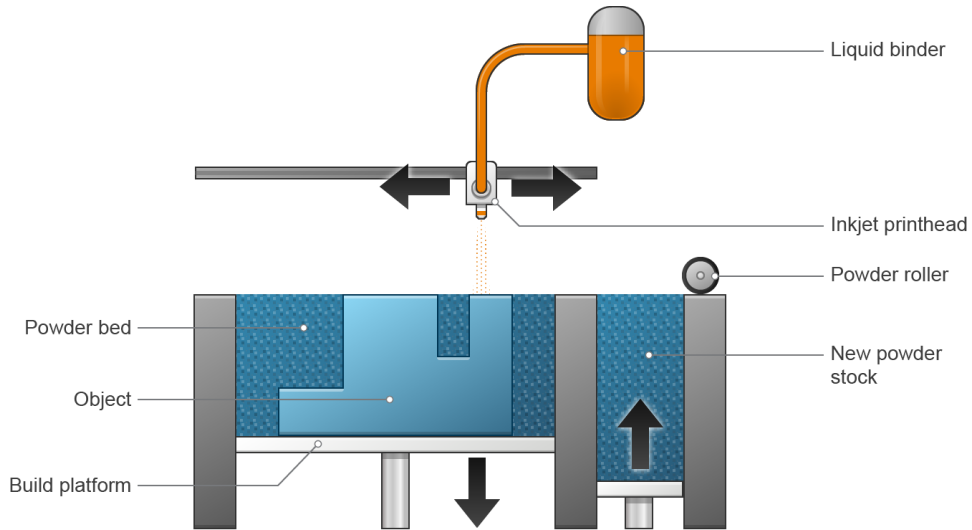


Figura 6.7. Esquema del proceso BJ [29].

6.3.2. Deposición de energía focalizada

La deposición de energía focalizada (DED, en inglés *Directed Energy Deposition*) es un proceso de fabricación aditiva en el cual se utiliza energía térmica focalizada para unir materiales mediante fusión, normalmente polvo metálico o alambre, a medida que se depositan capa por capa [30]. Mientras la fuente de energía se mueve, el material depositado previamente se solidifica. La materia prima se transporta utilizando un gas inerte que también actúa para evitar la oxidación durante el proceso [31].

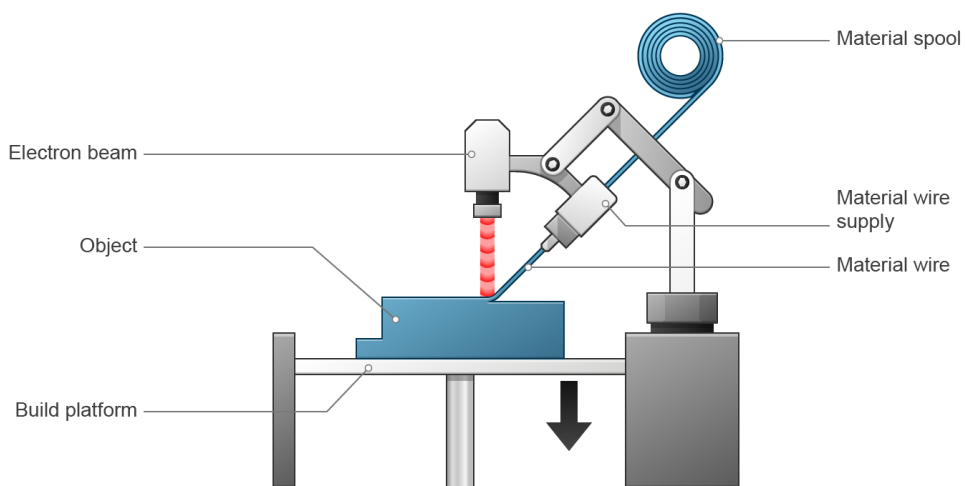


Figura 6.8. Ilustración del proceso DED [29].

Esta tecnología permite fabricar nuevos componentes metálicos, así como reparar y reconstruir piezas dañadas o desgastadas. Este proceso también es adecuado para fabricar material clasificado funcionalmente (FGM, en inglés *Functionally Graded Material*), utilizado en varios campos como el aeroespacial, militar y médico. Con esta técnica se puede depositar una gran cantidad de materiales, incluidos los basados en titanio, níquel y hierro, además del acero inoxidable con una tasa de deposición relativamente alta, en comparación con otros procesos de fabricación aditiva. Además, tiende a producir una zona afectada por el calor más pequeña en comparación con las reparaciones de soldadura [30].

6.3.3. Extrusión de material

La extrusión de material es un proceso de fabricación aditiva que consiste en la deposición capa a capa controlada por ordenador de polímeros, pastas, soluciones y dispersiones poliméricas, en el cual el material se dispensa selectivamente a través de una boquilla u orificio móvil que actúa como cabezal de impresión por extrusión. Esta categoría incluye varias técnicas como el modelado por deposición fundida (FDM, en inglés *Fused Deposition Modeling*) también llamado fabricación por filamento fundido (FFF, en inglés *Fused Filament Fabrication*), dispensado 3D, microextrusión 3D, extrusión de microfibras 3D, deposición de fibras 3D, dosificación y deposición de fluidos, y *plotting* 3D [8].

La tecnología FDM, fue desarrollada en la década de los 80 y comercializada en los 90 [32]. Es uno de los métodos más utilizados entre las otras técnicas, debido al precio relativamente bajo del equipamiento necesario y la extensa variedad de materias primas que se pueden utilizar [33].

Esta tecnología comprende la extrusión 3D de polímeros termoplásticos suministrados mecánicamente en forma de filamento delgado desde una bobina al cabezal de impresión. El cabezal extrusor se calienta a una temperatura apropiada según el polímero utilizado [34]. Desde principios de los 2000, el modelado por deposición fundida (FDM) ha sido la técnica de fabricación aditiva más utilizada en todo el mundo [35].

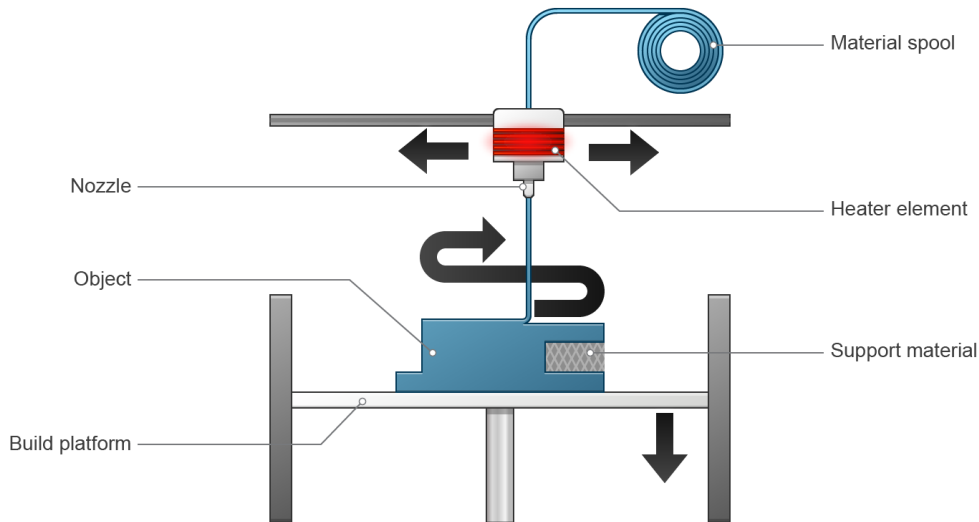


Figura 6.9. Esquema del proceso FDM [29].

6.3.4. Proyección de material

La proyección de material (MJ, en inglés *Material Jetting*) es un proceso de fabricación aditiva en el cual se depositan selectivamente gotas de material de fabricación, tales como fotorpolímeros o termoplásticos, que posteriormente se cura con una fuente de energía de área amplia (por ejemplo, una lámpara UV) [8], [36]. Dado que se utiliza un material líquido o fundido, se necesita una estructura de soporte similar a un gel, especialmente en las regiones en voladizo.

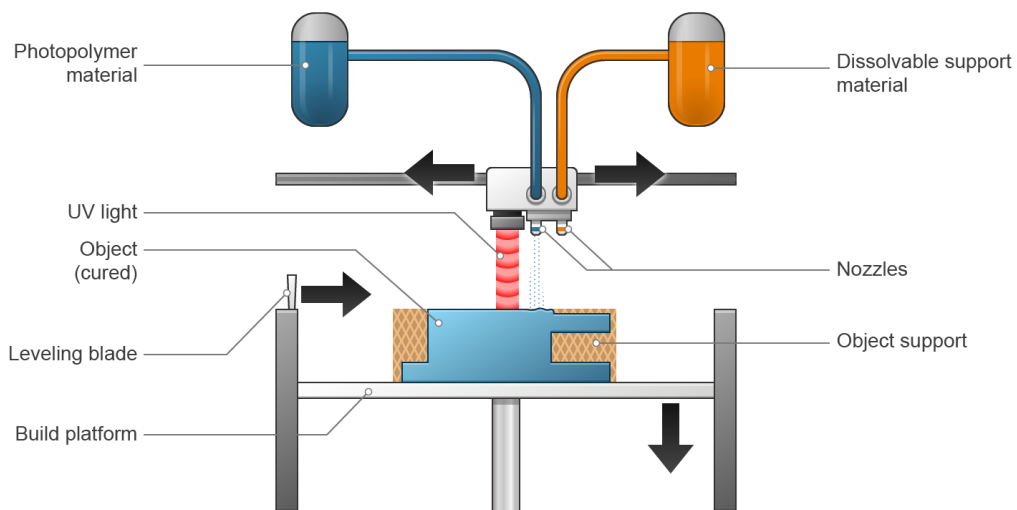


Figura 6.10. Esquema del proceso MJ [29].

Entre las diversas tecnologías de fabricación aditiva, la proyección de material incorpora una amplia variedad de colores y materiales, lo que permite fabricar materiales poliméricos compuestos (duros/blandos) en un solo proceso [37]. Esta tecnología puede ofrecer una alta resolución y se utiliza para fabricar modelos dentales y médicos. [36].

6.3.5. Fusión de lecho de polvo

La fusión de lecho de polvo (PBF, en inglés *Powder Bed Fusion*) es un proceso de fabricación aditiva en el cual la energía térmica funde selectivamente ciertas zonas de un lecho de polvo [27]. Este proceso utiliza un láser o haz de electrones como fuente de energía térmica para la irradiación y fusión de partículas de polvo [38].

La fusión de lecho de polvo se subdivide en las siguientes técnicas: la sinterización selectiva por láser (SLS, en inglés *Selective Laser Sintering*), la fusión selectiva por láser (SLM, en inglés *Selective Laser Melting*), la fusión por haz de electrones (EBM, en inglés *Electron Beam Melting*), la sinterización directa de metales por láser (DMLS, en inglés *Direct Metal Laser Sintering*) y la sinterización selectiva por calor (SHS, en inglés *Selective Heat Sintering*) [38].

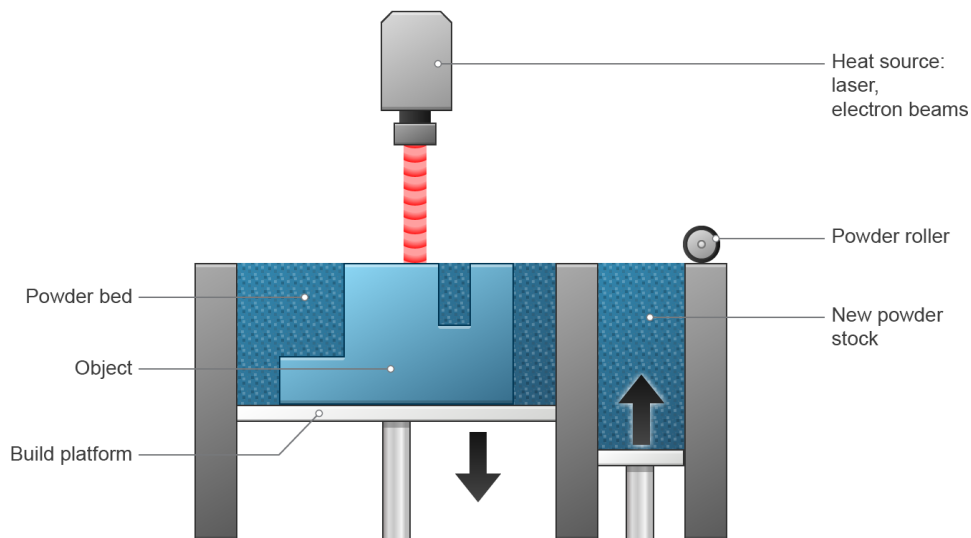


Figura 6.11. Esquema del proceso PBF [29].

En la técnica SLS se aplica una capa de polvo y un rayo láser sinteriza la sección 2D seleccionada (plano XY). A continuación, la plataforma desciende gradualmente (plano Z) según la altura de capa definida y se repite el proceso de sinterizado hasta formar la pieza [39]. El funcionamiento del proceso SLM es similar al del proceso SLS, pero

derrite partículas de polvo en lugar de sinterizar. EBM es otro proceso de fusión de polvos que utiliza un haz de electrones emitido por un filamento de tungsteno como fuente de energía térmica para fundir polvos metálicos [38]. DMLS es una técnica basada en láser en la que un objeto se desarrolla a partir de polvos metálicos. Similar a la técnica SLS, la máquina produce el objeto sobre una plataforma móvil aplicando capas de material a medida que un láser de alta potencia fusiona el metal según el archivo CAD [39]. Por último, en el método SHS partículas de polvo de plástico se fusionan mediante un cabezal caliente que toca el polvo y se mueve según el modelo STL [38].

6.3.6. Laminado de hojas

El laminado en hojas (en inglés *Sheet Lamination*) es un proceso de fabricación aditiva en el cual el material en forma de láminas u hojas se une para formar un objeto [27]. Esta técnica incluye dos tipos de procesos: fabricación aditiva ultrasónica (UAM, en inglés *Ultrasonic Additive Manufacturing*) y fabricación de objetos laminados (LOM, en inglés *Laminated Object Manufacturing*) [39].

La fabricación aditiva ultrasónica (UAM) es una técnica de unión y fabricación en estado sólido que utiliza energía ultrasónica para fusionar láminas metálicas de materiales similares o diferentes, formando piezas por acumulación de capas de forma rápida [40]. Durante el proceso, una hoja de metal delgada se une inicialmente a una placa base, y luego se sueldan capas adicionales de material a la capa anterior. La geometría deseada se logra agregando capas de material. El proceso de soldadura suele ir seguido de un proceso de mecanizado para lograr una estructura geométrica compleja [41]. Esta técnica tiene múltiples ventajas, como el bajo coste, la capacidad de producir estructuras laminares híbridas y la posibilidad de unir materiales diferentes, que de otra manera serían difíciles o imposibles de soldar mediante técnicas convencionales.

En la fabricación de objetos laminados (LOM), hojas delgadas hechas de polímeros sintéticos o papel se laminan, cortan y pegan secuencialmente capa por capa para construir un objeto. Por lo tanto, es un proceso híbrido que combina la fabricación aditiva con un proceso substractivo. En comparación con otros métodos de fabricación aditiva, esta técnica permite la fabricación de piezas más grandes a un menor coste, en conjunto con una velocidad de construcción relativamente más alta [8].

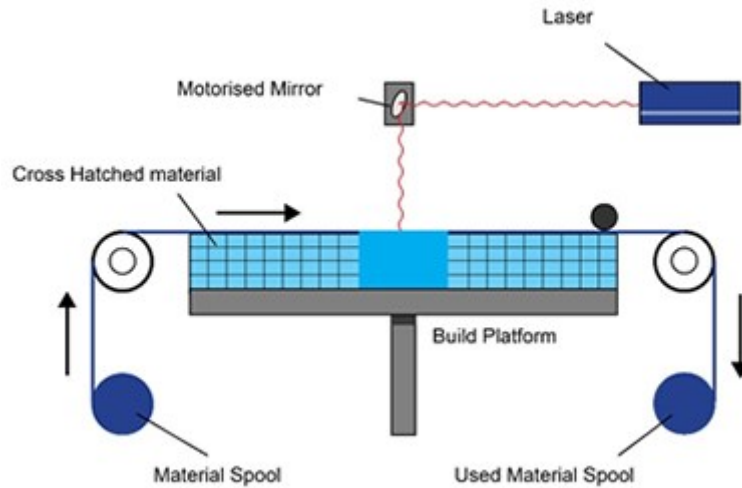


Figura 6.12. Esquema del proceso LOM [42].

6.3.7. Fotopolimerización en tanque o cuba

La fotopolimerización en tanque o cuba (VPP, en inglés *Vat Photopolymerization*) es un proceso de fabricación aditiva en el que un fotopolímero líquido se cura selectivamente en una cuba mediante polimerización activada por luz [27]. Durante el proceso, una cuba de resina líquida, que se compone de monómeros, oligómeros y fotoiniciadores, se somete a una reacción química y se acumula selectivamente en una forma tridimensional definida por el haz de luz ultravioleta [43].

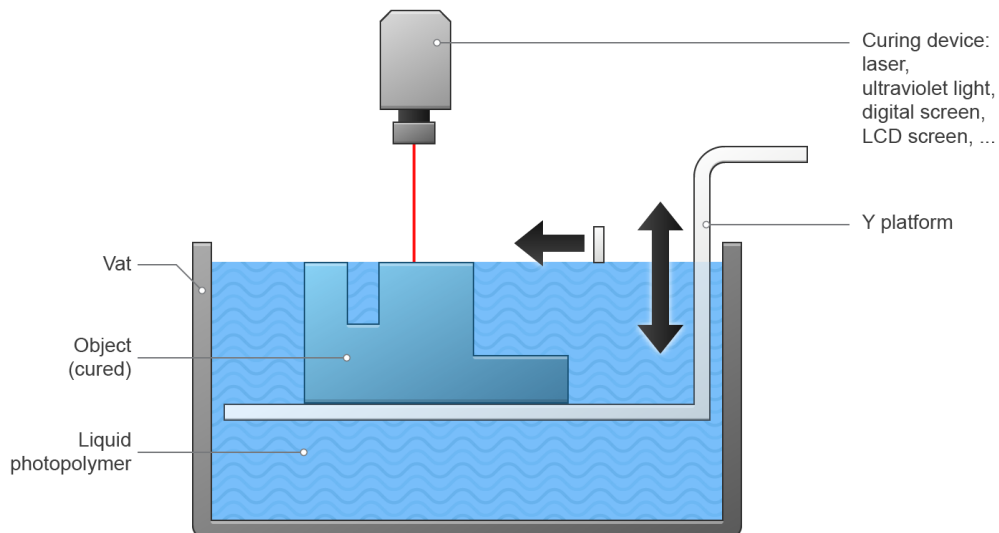


Figura 6.13. Esquema del proceso VPP [29].

Entre las variantes más comunes de esta tecnología se encuentran: la estereolitografía (SLA, en inglés *Stereolithography*), el procesamiento de luz digital (DLP, en inglés *Digital Light Processing*), la producción de interfaz de luz continua (CLIP, en inglés *Continuous Light Interface Production*) y la polimerización de dos fotones (2PP, en inglés *Two-Photon Polymerization*) [44].

A diferencia de otras tecnologías de impresión 3D, la fotopolimerización en cuba ofrece varias ventajas: alta precisión, rapidez, escalabilidad, acabado suave, bajo costo, versatilidad de materiales y mucho menos desperdicio de material [45].

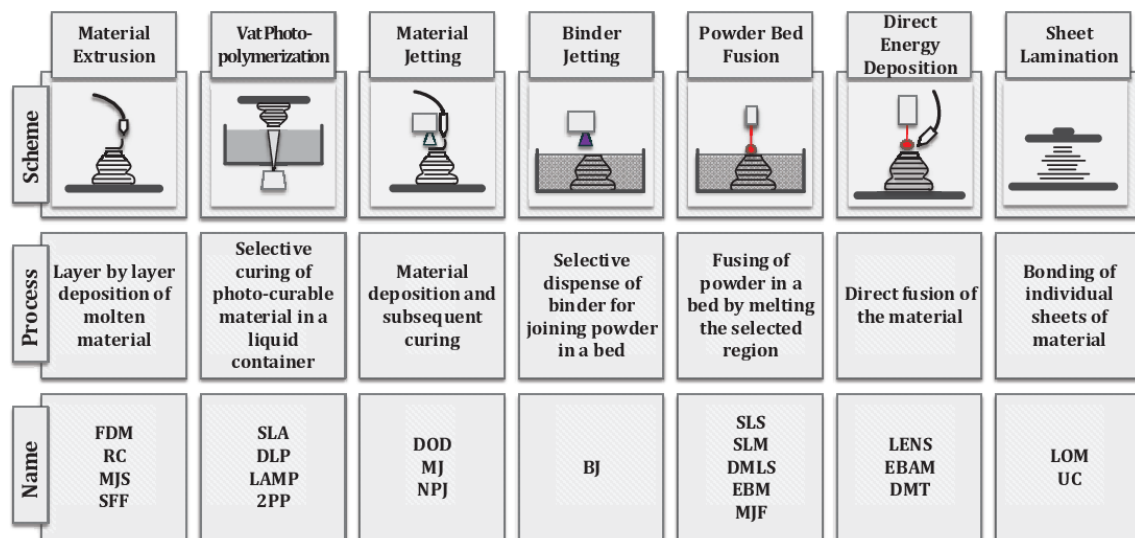


Figura 6.14. Esquema de los procesos de fabricación aditiva [46].

6.4. Modelado por deposición fundida (FDM)

6.4.1. Introducción

El modelado por deposición fundida es la técnica de impresión 3D que se emplea en el desarrollo de este proyecto. La tecnología FDM consiste en utilizar un filamento termoplástico suministrado por un carrete o bobina que se funde al pasar a través de un cabezal a alta temperatura. El material fundido es depositado en la superficie de trabajo (cama caliente) mediante una boquilla extrusora. La calidad final de las piezas depende directamente del espesor de capa [47].

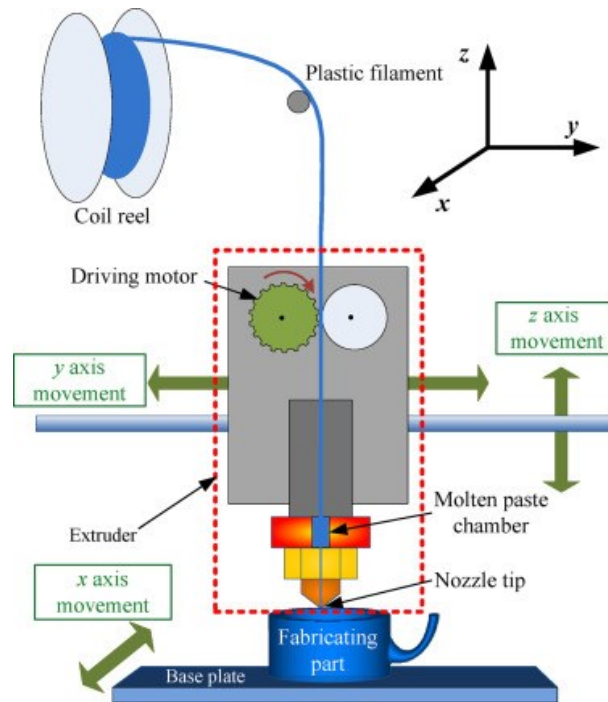


Figura 6.15. Esquema del proceso FDM [48].

En 1989, Scott Crump inventó y patentó el modelado por deposición fundida (FDM). Poco después fundó la compañía *Stratasys*, la cual comercializó las primeras impresoras 3D FDM [49]. Debido a que el término en inglés *Fused Deposition Modeling* y sus siglas FDM son marcas registradas por *Stratasys*, frecuentemente se utiliza el término equivalente *Fused Filament Fabrication* y sus siglas FFF, los cuales fueron acuñados por la comunidad de miembros del proyecto Rep Rap para disponer de una terminología que pudieran utilizar legalmente sin limitaciones [34].

En el año 2009 expiró la patente del FDM, acaparada durante 30 años por las grandes corporaciones, abriendo la puerta de la fabricación digital en tres dimensiones a millones de personas, empresas e instituciones que hasta entonces no podían acceder a ella. El modelado por deposición fundida es hoy en día la tecnología más popular del mundo, esto es gracias a que las impresoras son cada vez más accesibles a nivel económico [50].

6.4.2. Parámetros de impresión

Los parámetros de impresión están fuertemente ligados a las propiedades finales de la pieza impresa y determinarán propiedades como su resistencia mecánica, tolerancia dimensional, acabado superficial, densidad y masa total de la pieza [51]. A continuación,

se definen algunos de los parámetros más importantes que intervienen en el proceso de impresión:

- **Orientación de la pieza (*build orientation*).** Se define como la postura/orientación de la pieza con respecto a los ejes cartesianos durante la impresión [52]. Por lo general, la orientación vertical es el plano ZY, la orientación de borde es el plano YZ y la orientación plana es el plano XY, como se representa en la siguiente figura:

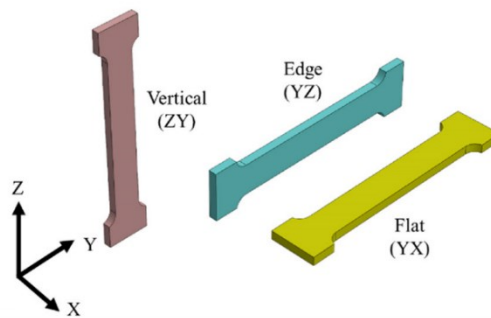


Figura 6.16. Orientación de la pieza [52].

- **Espesor de capa (*layer thickness*).** Se refiere al grosor de cada capa de material depositada por la boquilla de extrusión. En la acumulación capa por capa, cuando aumenta el grosor de la capa, disminuye la precisión de formación de la pieza impresa, aumenta la rugosidad de la superficie y el perfil exterior es propenso al efecto de escalón. Al contrario, cuando se reduce el grosor de la capa, se mejora la precisión de la pieza impresa, disminuye la rugosidad, aumenta el tiempo de impresión y disminuye la eficiencia [53]. La altura de capa siempre será menor que el diámetro de la boquilla de extrusión y depende completamente del mismo [54].



Figura 6.17. Efectos de los distintos espesores de capa en una taza de té [52].

- **Ángulo de deposición (*raster angle*).** Es el ángulo entre la trayectoria de la boquilla y el eje X de la plataforma de impresión. Los ángulos de deposición entre dos capas adyacentes varían en 90° . Este parámetro afecta a la precisión de elaboración y el rendimiento mecánico de la pieza impresa [53].

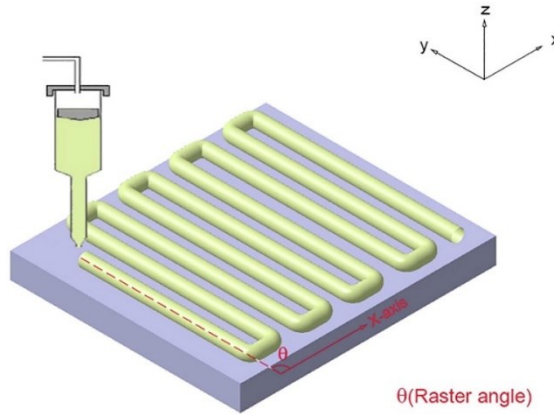


Figura 6.18. Ilustración gráfica del ángulo de deposición [54].

- **Densidad de relleno (*infill density*).** Este parámetro, también denominado porcentaje de relleno, denota el volumen de material impreso en el interior de la pieza [54]. Las propiedades mecánicas mejoran a medida que aumenta el porcentaje de relleno ya que la sección resistente (transversal a la carga) es menor con porcentajes de relleno más bajos [52].

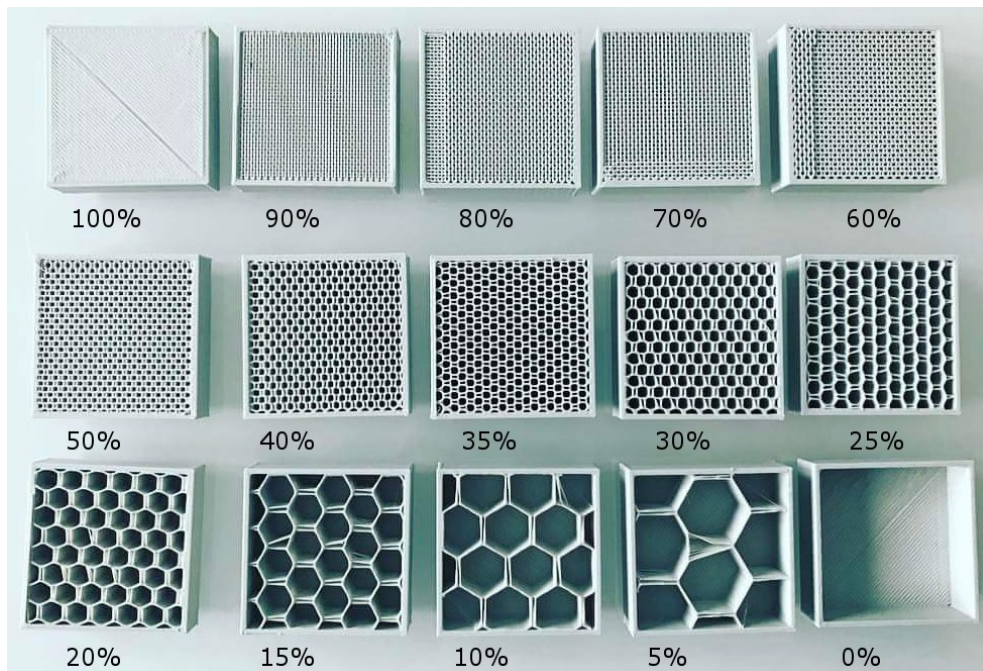


Figura 6.19. Densidades de relleno para el patrón de relleno *honeycomb* [55].

- **Patrón de relleno (*infill pattern*).** Es la metodología utilizada para imprimir la estructura interna del componente que se está imprimiendo [54]. Según Liseli et al. [56], un patrón de relleno puede proporcionar mejores resultados en ensayos de tracción o compresión, pero puede no ser válido para una pieza sometida a otros tipos de carga.

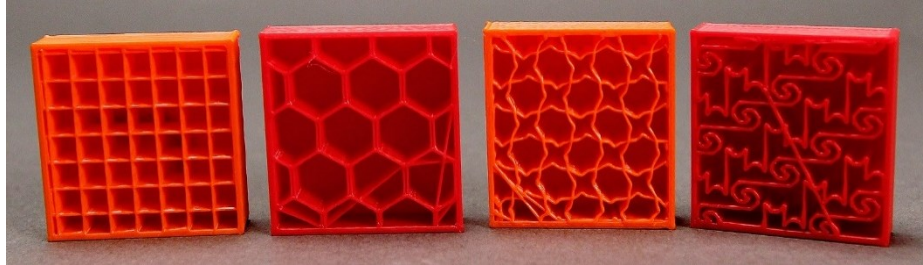


Figura 6.20. Patrones de relleno [57].

- **Diámetro de la boquilla de extrusión (*nozzle diameter*).** Este parámetro tiene un efecto considerable en el ancho del material depositado y el espesor de capa. Para mantener un flujo constante adecuado de material de extrusión, es de vital importancia la elección de un diámetro de boquilla óptimo. También se observa que el diámetro de la boquilla tiene un gran efecto sobre el tiempo de extrusión [54]. Cuanto mayor es el diámetro el tiempo de impresión es menor, pero por contra empeora la calidad de acabado de la pieza.
- **Temperatura de la boquilla de extrusión (*nozzle temperature*).** Es la temperatura de calentamiento de la boquilla durante el proceso de extrusión [54]. Este parámetro varía según el material utilizado y la velocidad de impresión [52]. Afecta a la viscosidad del material utilizado para la impresión, influyendo así en las características de la pieza. Se debe mantener una temperatura óptima, ya que puede aumentar o disminuir la fluidez del material del filamento, lo que a su vez podría perjudicar al componente que se esté fabricando [54].
- **Temperatura de la cama de impresión (*bed temperature*).** Es la temperatura que tiene la plataforma de construcción durante el proceso de impresión. La adhesión entre la primera capa impresa y la cama de impresión es crucial, ya que proporciona la base para las capas posteriores. Una adhesión inadecuada da como resultado objetos impresos de mala calidad, pudiendo producirse errores como *warping deformation*, un ligero alabeo que presenta la superficie impresa al despegarse de la plataforma de impresión. Una solución práctica es aumentar la

temperatura de la cama para mejorar la adhesión del material depositado durante la impresión. Otra opción es aplicar algún tipo de material adhesivo, como *Dimafix*, Laca o una lámina tipo *Buildtak*. Sin embargo, es posible que justo después de la impresión no se puedan retirar las piezas sin dañarlas, por lo que es recomendable esperar hasta que la cama se enfríe [58]. La temperatura de la cama dependerá del material utilizado, su composición o incluso el fabricante. Aunque no es posible establecer una temperatura estándar, los fabricantes de filamento suelen indicar el rango óptimo de temperatura de la plataforma para garantizar una correcta adherencia. [59].

- **Velocidad de impresión (*printing speed*)**. Es la velocidad de desplazamiento de la boquilla de extrusión durante la deposición de material en la plataforma a lo largo del plano XY. La velocidad de impresión es uno de los parámetros de mayor influencia sobre el tiempo de impresión. Este parámetro también tiene un impacto considerable en la deformación de la pieza durante la impresión. Esto se debe a la cantidad de tensión residual que se genera durante la deposición de material, que viene a ser el resultado de un proceso de extrusión más rápido. Sin embargo, el efecto de la velocidad de impresión se considera insignificante cuando se imprimen capas más delgadas [54].
- **Espacio entre filamentos adyacentes (*air gap*)**. Representa el espacio entre deposiciones contiguas. El valor del *air gap* puede ser positivo, cero o negativo. En caso de ser cero, los materiales depositados están en contacto justo entre sí. Cuando es positivo, la deposición de material en pasadas sucesivas se hace con una cierta separación, lo que da como resultado una estructura holgada donde la construcción rápida de la pieza es esencial. Un *air gap* negativo se usa cuando se necesita una estructura más densa y cuando el tiempo no es una limitación. En este caso, las deposiciones se superponen parcialmente, dando como resultado una pieza más densa [54].

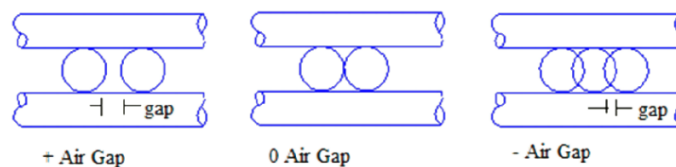


Figura 6.21. Representación gráfica del parámetro *air gap* [60].

- **Ancho de deposición (*raster width*).** Es el ancho de un cordón de filamento depositado y depende del diámetro de la boquilla de extrusión, la velocidad de impresión y la relación entre la velocidad de impresión y la velocidad de extrusión, que se denomina “multiplicador de extrusión” (en inglés, *extrusion multiplier*). La calibración de este parámetro es muy importante para la precisión de la pieza y sus propiedades mecánicas [52].
- **Espesor de pared (*wall thickness*).** Se refiere al espesor de la capa sólida exterior que encierra la estructura de relleno interior de la pieza impresa [52]. Este parámetro afecta directamente a las propiedades de flexión de la pieza fabricada. A medida que aumenta el número de capas de contorno mejora la resistencia a flexión [54].

6.4.3. Materiales empleados en FDM

Una de las mayores limitaciones que impiden que el proceso FDM se emplee en la industria es la disponibilidad limitada de materiales que se pueden usar como filamento [54]. Los polímeros termoplásticos son la principal materia prima de las impresoras 3D FDM debido principalmente a la demanda en producción de piezas de bajo costo y la creciente necesidad de creación de prototipos rápidos [61]. A continuación, se describen algunos de los materiales más comunes:

- **Ácido poliláctico (PLA).** El PLA es el material utilizado en este proyecto, y uno de los termoplásticos ampliamente utilizados en FDM. Es un termoplástico derivado de materias primas de origen natural (maíz, patata o caña de azúcar). Este material requiere baja energía y temperatura para procesar prototipos y piezas funcionales con buena calidad. Actualmente, muchas impresoras 3D de escritorio usan PLA como filamento, ya que no requiere de una plataforma caliente, aunque es propenso a atascar la boquilla de la impresora durante la impresión [62]. El PLA permite fabricar piezas con mayor resistencia a la tracción y menor ductilidad que otros materiales comunes. Se utiliza en envases de alimentos, implantes cardiovasculares y prótesis dentales [52].
- **Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS).** El ABS es un polímero termoplástico y amorfo, es uno de los materiales más utilizados para fabricar piezas en 3D mediante el proceso FDM. El ABS es un copolímero formado por acrilonitrilo, butadieno y estireno, y tiene un punto de fusión más alto que el del PLA. Si bien

el PLA es biodegradable, el ABS no lo es, pero ofrece un menor riesgo de atascar la boquilla [62]. Mientras que el PLA tiene mayor resistencia a la tracción, baja deformación y baja ductilidad, el ABS es conocido por su mayor resistencia al impacto y dureza. Se utiliza en ordenadores, tuberías, barcos y juguetes LEGO [52].

- **Policarbonatos (PC).** Los policarbonatos son un grupo de termoplásticos conocidos por su buena resistencia, durabilidad y dureza, y algunos son transparentes. Son termoplásticos de alta temperatura con buena resistencia al calor, buena unión capa a capa y proporcionan una superficie de buena calidad [62]. Su elevada resistencia al impacto hace que este material sea adecuado para aplicaciones de alta durabilidad, como las de prototipado funcional y herramientas de fabricación [63].
- **Polieteretercetona (PEEK).** Es un biomaterial termoplástico que tiene una resistencia térmica elevada, buena estabilidad dimensional, buena resistencia a la fluencia y excelentes propiedades mecánicas [64]. Sus propiedades mecánicas son superiores en comparación con el PLA y el ABS [62]. Se utiliza en retenes de compresores, componentes aeroespaciales y cojinetes, así como para apoyar la cicatrización ósea en el cuerpo humano [64].
- **Tereftalato de polietileno modificado con glicol (PETG).** El PETG es un polímero derivado de la familia de los tereftalatos de polietileno. Es un material común en los procesos de fabricación tradicionales (p. ej. moldeo por inyección) y se introdujo recientemente en la fabricación aditiva. Sus propiedades y capacidades prometedoras se están investigando. Tiene excelentes propiedades como conformabilidad, variaciones térmicas y baja temperatura de formación. Se utiliza en implantes médicos y muchas aplicaciones comerciales, como materiales de embalaje [65].
- **Polieterimida (PEI).** La polieterimida se usa ampliamente en la industria del transporte por su alta relación resistencia-peso y su baja emisión y toxicidad de humo al quemarse. Requiere una alta temperatura de extrusión y una temperatura de cama constante durante la impresión. Debido a sus propiedades de baja densidad y toxicidad, se puede utilizar para cabinas de aviones [62].
- **Nailon.** Se puede elegir el filamento de nailon en caso de ser necesario imprimir piezas más flexibles y duraderas. Tiene una alta dureza y resistencia al impacto,

pero es muy sensible a la humedad. El nailon puede deformarse tanto como el ABS. Como muchos otros filamentos FDM, el nailon absorbe la humedad del aire ya que es higroscópico. La absorción de humedad deteriora las propiedades del filamento y da como resultado una degradación parcial de las características del material [62].

- **Otros materiales.** Además de los materiales de uso común nombrados anteriormente, existen otros materiales que no son tan comunes como material de filamento, por ejemplo: poliestireno de alto impacto (HIPS), polifenilsulfona (PPSF), poliuretano termoplástico (TPU), alcohol polivinílico (PVA), filamentos biocompuestos, filamentos cerámicos y otros filamentos de materiales compuestos. La mayoría de estos materiales están aún en proceso de desarrollo o no se obtienen fácilmente en el mercado [62].

6.4.4. Tipos de impresoras FDM

Existen 4 tipos diferentes de impresoras 3D FDM:

- **Impresora 3D cartesiana.** Es el tipo de impresora 3D FDM más común, y el que se ha utilizado en este proyecto. Estas fueron las primeras impresoras que surgieron del movimiento de impresoras 3D RepRap hace más de una década, el cual permitió que el precio de las impresoras 3D se redujera de decenas de miles de euros a unos pocos cientos en la actualidad [66]. Reciben este nombre debido a que utilizan el sistema de coordenadas cartesiano. El cabezal de impresión se mueve en los ejes Y (de izquierda a derecha) y Z (de arriba abajo), mientras que el desplazamiento en el eje X lo realiza la cama caliente [67].

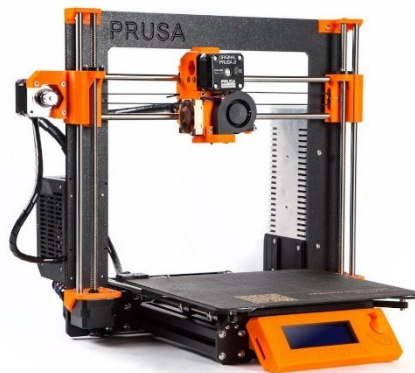


Figura 6.22. Impresora 3D cartesiana [68].

- **Impresora 3D polar.** La diferencia entre este tipo de impresora y las cartesianas es que esta utiliza las coordenadas polares para imprimir en 3D. Los conjuntos de coordenadas describen puntos en un plano circular en vez de un cuadrado, determinados por ángulo y longitud en vez de por los ejes X, Y y Z [69]. En este tipo de impresoras la cama de impresión gira y se mueve de delante a atrás, mientras que el cabezal de extrusión se desplaza de arriba a abajo. Al tener una superficie que da vueltas, estas impresoras son ideales para fabricar objetos que siguen una espiral. Una ventaja de las impresoras 3D polares es que pueden funcionar con solo dos motores, mientras que una impresora cartesiana o delta requiere un motor por cada eje, al menos tres, lo que supone un ahorro a largo plazo. Sin embargo, el principal problema de estas impresoras es que al moverse de forma circular hay mucha más precisión en el centro que en la zona externa [67].

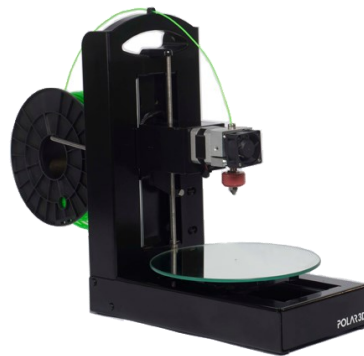


Figura 6.23. Impresora 3D polar [70].

- **Impresora 3D delta.** Este tipo de impresora está ganando cada vez más popularidad [69]. Las impresoras 3D delta están formadas por una cama de impresión y una extrusora de impresora 3D con tres puntos triangulares fijos. Cada uno de estos tres puntos puede moverse tanto hacia arriba como hacia abajo dentro de la estructura de impresión del cilindro, para poder colocar el cabezal de impresión donde debe estar para imprimir [66]. Estas impresoras fueron diseñadas para aumentar la velocidad de impresión, y con una cama de impresión sin movimiento, lo que puede resultar útil para ciertos proyectos. Sin embargo, las impresoras 3D delta no son tan precisas como las cartesianas [69].



Figura 6.24. Impresora 3D delta [71].

- **Impresora 3D de brazo robótico.** El uso de brazos robóticos es común en las líneas de producción de las grandes fábricas de automóviles [72], pero su función principal es el montaje de piezas y no la deposición de filamentos de extrusión. Las impresoras 3D de brazo robótico, también conocidas como impresoras 3D SCARA [66], están todavía en desarrollo, y solo han llegado a implantarse en algunas compañías.



Figura 6.25. Impresora 3D de brazo robótico [73].

La industria de la construcción es principalmente la que utiliza este tipo de impresoras. Sin embargo, este método de fabricación aditiva es cada vez más popular, ya que no necesita una cama de impresión fija y permite una mayor movilidad [67], lo cual facilita la impresión de piezas geoméricamente complejas [66]. Sin embargo, la calidad de las piezas producidas no está a la altura de los sistemas cartesianos [72].

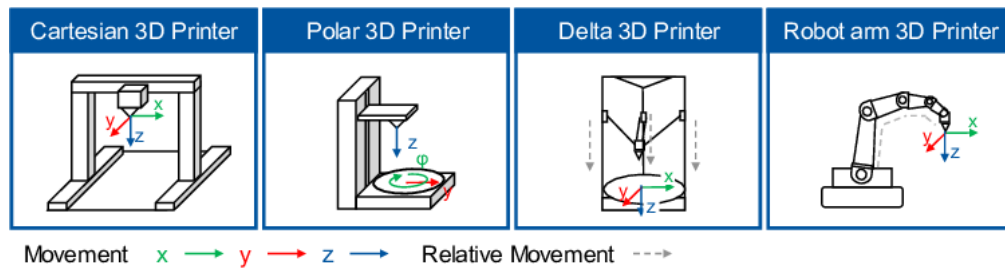


Figura 6.26. Esquema de los distintos tipos de impresoras 3D FDM [72].

7. Equipamiento empleado

7.1. Impresora 3D

La *Creality CR-10 S4* es una impresora 3D con unas dimensiones de 590x700x615 mm y un peso de 18.2 kg. Está compuesta por un marco fabricado en aluminio y equipada con un *nozzle* de 0.4 mm, en el caso concreto de la impresora utilizada. Tiene un tamaño de impresión de 400x400x400 mm, lo cual permite crear modelos de gran tamaño, y su diseño de doble tornillo en el eje Y mejora la estabilidad y la precisión de impresión. La velocidad de impresión puede llegar a 200 mm/s y la cama caliente puede alcanzar hasta 90 °C. Es compatible con distintos materiales, tales como ABS, PLA y TPU. Se pueden usar filamentos de cualquier fabricante, siempre y cuando no necesiten alcanzar una temperatura superior a 240 °C. Tiene conectividad a través de cable USB o tarjeta microSD, y es compatible con *Cura*, *Simplify3D* y *Repetier Host*.

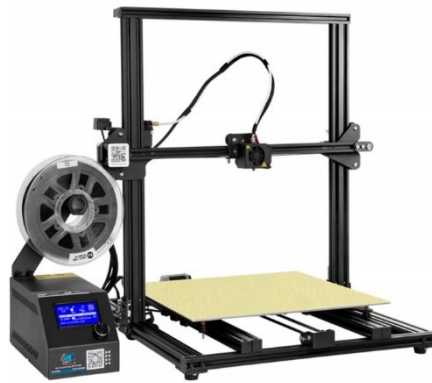


Figura 7.1. Impresora 3D *Creality CR-10 S4* [74].

La impresora utilizada está modificada, contando con un extrusor *BondTech BMG* y un sensor de nivelación automática *3DTouch*.

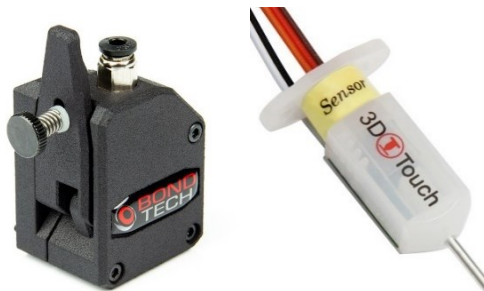


Figura 7.2. *BondTech BMG* y *3DTouch* [75], [76].

7.2. Estación meteorológica inalámbrica

Para medir las condiciones meteorológicas se ha utilizado una estación meteorológica inalámbrica *MISOL HP3001*, la cual cuenta con una pantalla LED a color y puede recibir señal de hasta 5 sensores. Estos sensores miden los valores de temperatura, humedad, punto de rocío y sensación térmica. En este caso se han utilizado dos sensores colocados a ambos lados de la impresora 3D. Los valores se guardan en una tarjeta microSD y se pueden monitorizar en el ordenador con el software *EasyTemp* a través de conexión USB.



Figura 7.3. Estación meteorológica [77].

7.3. Balanza de análisis

Una balanza de análisis es una báscula de laboratorio diseñada para medir pequeñas masas con un alto grado de precisión. La balanza utilizada para medir la masa de las probetas ha sido una *Ohaus Pioneer PA413*, con una capacidad máxima de 410 g y una precisión de 0.001 g o 0.1 %.



Figura 7.4. Balanza de análisis [fuente propia].

7.4. Calibrador digital

El calibrador digital o también denominado pie de rey o vernier, es un instrumento de medición, comúnmente utilizado para la medición de diámetros tanto interiores como exteriores, así como de profundidades. A lo largo de este proyecto el calibrador fue necesario para medir las dimensiones de las probetas impresas.



Figura 7.5. Calibrador digital [78].

7.5. Envasadora al vacío

Se ha utilizado una máquina para envasar al vacío las probetas una vez impresas, y así evitar que se modifiquen sus propiedades al estar expuesta a los cambios de humedad durante su almacenaje.



Figura 7.6. Máquina para envasar al vacío [79].

7.6. Máquina universal de ensayos

Máquina de ensayos mecánicos *Shimadzu Autograph* con capacidad hasta 50 kN y accionamiento electromecánico, del laboratorio del Área de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica del departamento de Ingeniería Industrial de la Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología de la Universidad de La Laguna. Está equipada con célula de carga de 50 kN máximo y controlada por ordenador mediante la aplicación *Trapezium* de *Shimadzu*.

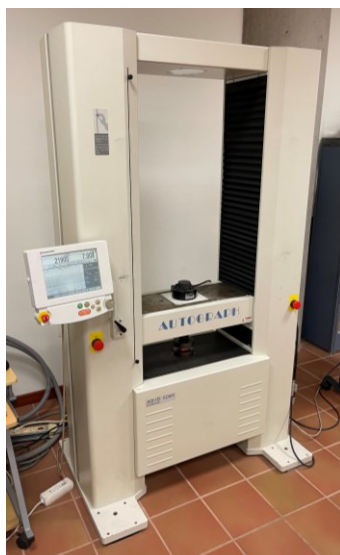


Figura 7.7. Máquina universal de ensayos [fuente propia].

8. Impresión de las probetas

8.1. Selección del filamento

Para la impresión de las probetas se ha elegido el filamento *Smartfil Coral*, del fabricante *Smart Materials 3D*. Un filamento PLA que ofrece excelentes propiedades mecánicas y gran calidad en la impresión 3D. Se ha escogido este color porque según el proveedor es el que menos pigmentos tiene y era el que disponía de stock en el momento de la compra, además contaba con más bobinas por si no fuera suficiente con las 2 bobinas compradas inicialmente. El diámetro del filamento elegido ha sido de 1.75 mm y se han utilizado un total de 3 bobinas de la talla L (1000 g). En el Anexo V se adjunta la ficha técnica del filamento.



Figura 8.1. Filamento PLA Smartfil Coral [80].

8.2. Diseño de las probetas

Para el ensayo de resistencia a compresión las normas *ASTM D695* [81] y *UNE-EN ISO 604:2003* [82] establecen unas dimensiones preferentes para las probetas. Sin embargo, se decide realizar otro diseño, en concreto un cubo (hexaedro regular) de 30 mm de lado. Esta decisión se toma en base a que este diseño, con una mayor sección en todos los planos, permite que el patrón de relleno quede mejor representado, ocupando una mayor superficie y garantizando la correcta impresión del relleno en las probetas con menor relleno. De lo contrario, utilizando un diseño de menor sección el patrón de relleno quedaría incompleto, sobre todo en las probetas con menor densidad de relleno, afectando negativamente a las propiedades mecánicas de la pieza.

	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 8.1. Dimensiones de las probetas.

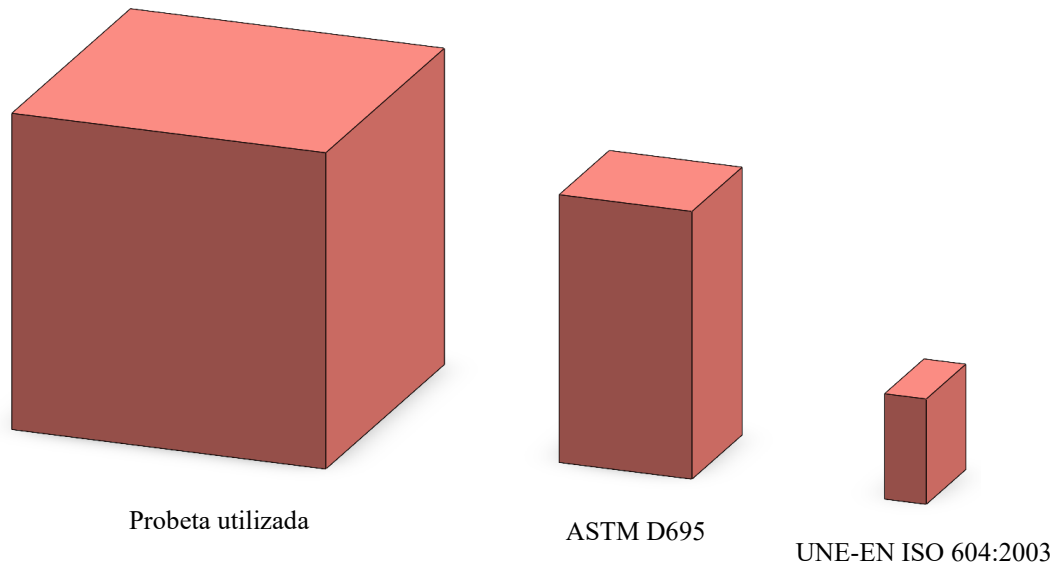


Figura 8.2. Diseño 3D de las probetas [fuente propia].

8.3. Selección de los parámetros de impresión

Una vez elegidas las dimensiones de las probetas, se realiza el modelado 3D mediante el software *SolidWorks 2021*. El diseño se exporta en formato STL y se importa al software de laminado 3D o *slicer 3D*, en este caso el software utilizado es *Ultimaker Cura 4.6*. Este software convierte el modelo en una serie de capas horizontales y genera un archivo G-Code que contiene los comandos que deberá seguir el cabezal de impresión para imprimir las probetas.

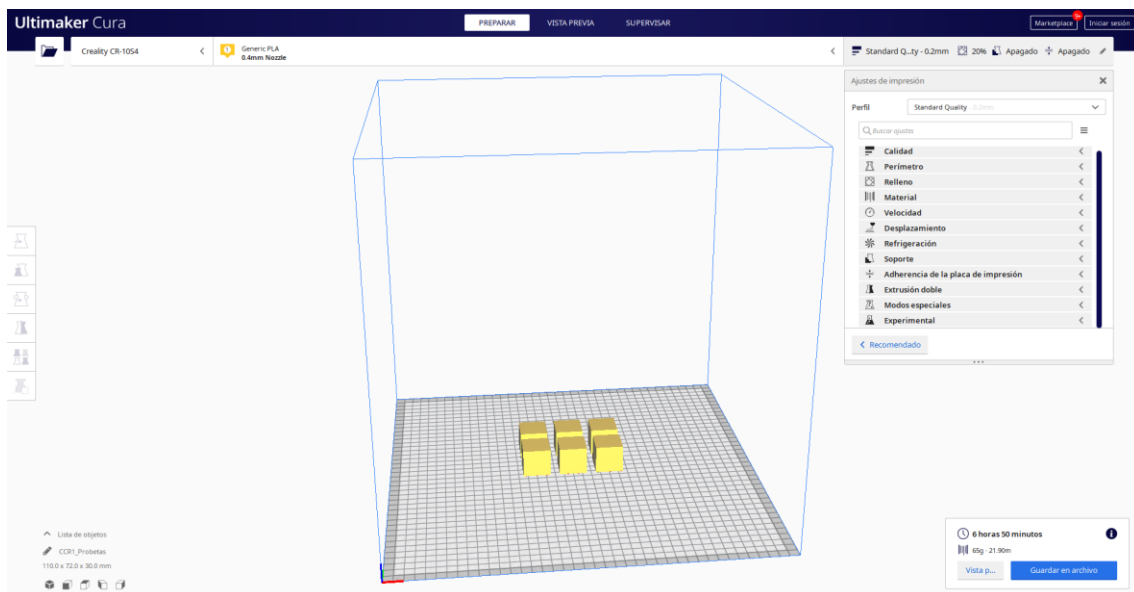


Figura 8.3. Interfaz del software de laminado 3D *Ultimaker Cura 4.6* [fuente propia].

En el software de laminado 3D se establecen los parámetros de impresión. La mayoría de estos parámetros se mantienen constantes para todas las impresiones, solo cambian los parámetros patrón y densidad de relleno, al ser estos el objeto de este proyecto. En la Tabla 8.2. se recogen los valores seleccionados para los principales parámetros de impresión.

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	Giroide, octeto, cúbico, cúbico bitruncado, subdivisión cúbica

Tabla 8.2. Principales parámetros de impresión.

Debido a que el diámetro de la boquilla de la impresora es de 0.4 mm se ha decidido utilizar una altura de capa de 0.2 mm, la cual proporciona una calidad de impresión estándar. Esta altura de capa permite un equilibrio entre el acabado superficial y la duración de la impresión. Además, debido a la sencillez de la pieza a imprimir, sin curvaturas o geometrías complejas, no es necesario utilizar una mayor resolución.

Como el objeto de este proyecto es estudiar la resistencia mecánica de los distintos rellenos de las probetas, se debe utilizar el mínimo número de líneas de pared o contorno, para que el sustento de las piezas en el ensayo de resistencia a compresión sea esencialmente por su morfología de relleno. En este caso, el número de líneas de pared elegido es de 3, puesto que se considera que esta cantidad es suficiente.

El número de capas superiores e inferiores es de 4. Se considera que los platos de compresión de la máquina de ensayos deben apoyar sobre una superficie sólida en vez de sobre el patrón de relleno directamente. De igual forma, al poner menos capas superiores se podrían producir, en las probetas con menos porcentaje de relleno, descuelgues en las últimas capas durante la impresión.

La temperatura de impresión de 215 °C se encuentra dentro del rango de temperaturas sugerido por el fabricante del filamento, y la temperatura de la cama de impresión es la recomendada para imprimir piezas en PLA. La velocidad de impresión seleccionada es de 60 mm/s, ya que proporciona un equilibrio entre calidad y duración de la impresión.

Las densidades de relleno seleccionadas han sido 10 %, 20 %, 30 %, 40 % y 50 %. Se han decidido utilizar densidades de relleno de hasta el 50 % ya que a partir de este porcentaje de relleno la duración de las impresiones incrementa considerablemente, excediendo el alcance de este proyecto. Por último, los patrones de relleno seleccionados son giroide, octeto, cúbico, cúbico bitruncado y subdivisión cúbica, ya que estos son los mejores patrones de relleno para impresiones 3D funcionales [83].

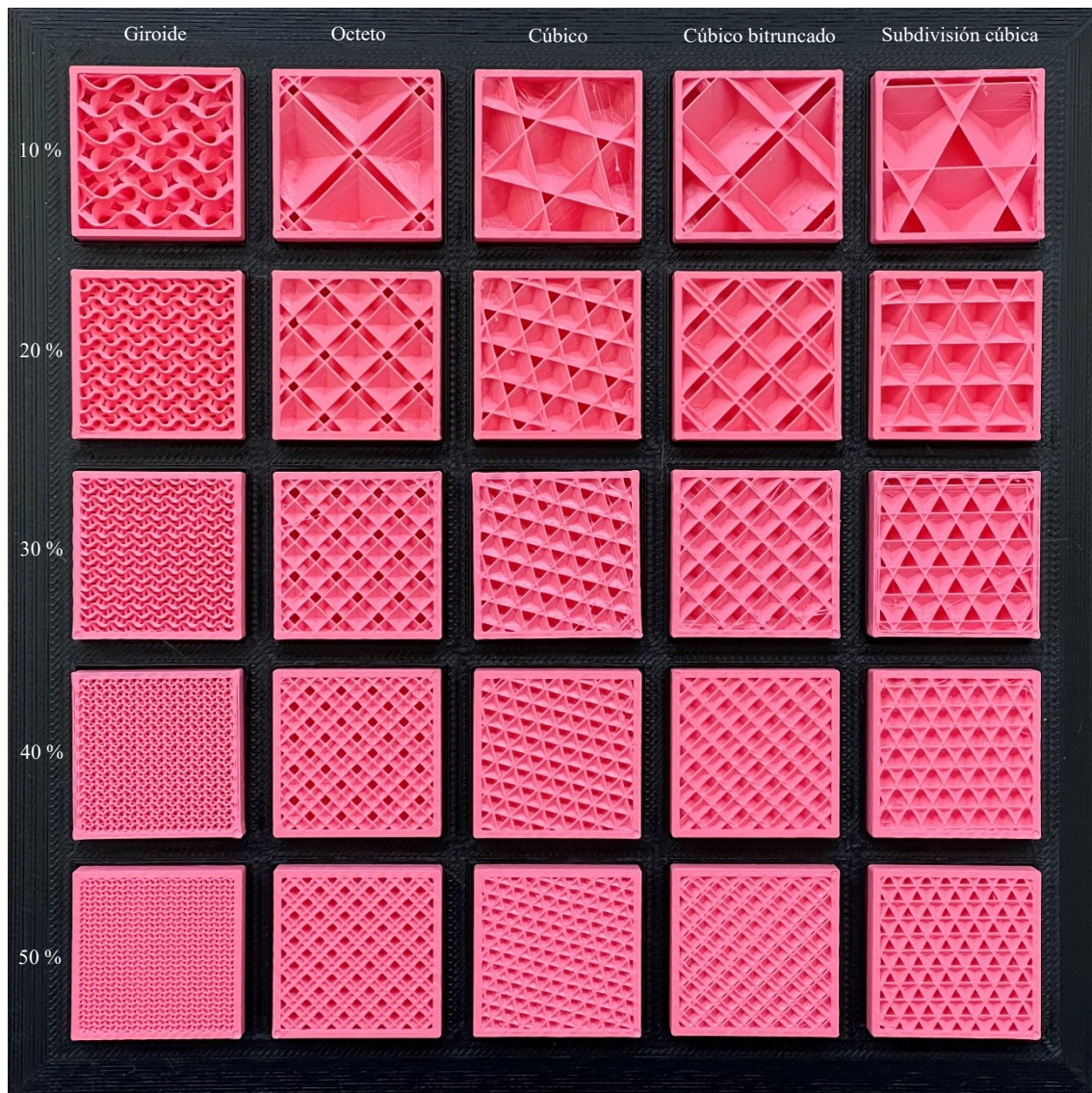


Figura 8.4. Densidades y patrones de relleno utilizados en este proyecto [fuente propia].

8.4. Fabricación de las probetas

Una vez configurados los parámetros de impresión, el archivo G-Code se exporta a una tarjeta microSD, la cual se introduce en la ranura de la impresora 3D. Antes de imprimir se realiza una puesta a punto de la impresora 3D, que consiste en nivelar la cama de impresión, regular el desfase u *offset* en el eje Z, y limpiar la boquilla con un filamento de limpieza, por si pudiera estar obstruida, o contener restos de una impresión anterior.



Figura 8.5. Filamento de limpieza utilizado [84].

En primer lugar, se precalienta la boquilla y la cama a la temperatura configurada en el G-Code y se aplica un adhesivo *antiwarping*, en concreto se ha utilizado el adhesivo Dimafix Pen. Este adhesivo garantiza una fuerte adhesión entre la primera capa y la cama de impresión, eliminando el efecto *warping* y evitando que la pieza se despegue durante la fabricación.



Figura 8.6. Adhesivo *antiwarping* [85].

A continuación, se elige el archivo G-Code que se desea imprimir y comienza la impresión de las probetas. El movimiento del cabezal de impresión comienza con la medición de la altura a la que se encuentra la cama mediante el *3DTouch*, y en función del *offset* establecido la boquilla se coloca a la altura configurada. Seguidamente expulsa

un cordón en la parte izquierda de la cama para purgar el filamento y se dirige al centro de la cama para realizar la falda. La impresión de las probetas comienza con la primera capa y continúa con el relleno sólido inferior. Tras 4 capas de relleno sólido comienza a dibujar el patrón de relleno bordeado por las 3 líneas de pared, y termina con las 4 capas de relleno sólido superior.

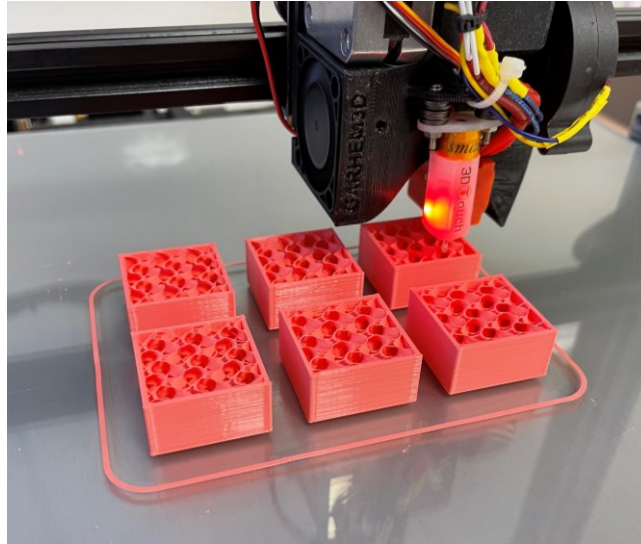


Figura 8.7. Imagen tomada durante la impresión [fuente propia].

Se imprimen probetas con cinco patrones y cinco porcentajes de relleno distintos, sumando un total de 25 series de 6 probetas cada una. Esto da un total de 150 piezas impresas. La duración de las impresiones va desde poco más de 5 horas para las series de menor porcentaje de relleno hasta más de 17 horas en el caso del giroide al 50 %. Durante las impresiones se mide la temperatura y la humedad presente en el ambiente. Los datos de impresión de las probetas se pueden consultar en el Anexo II.

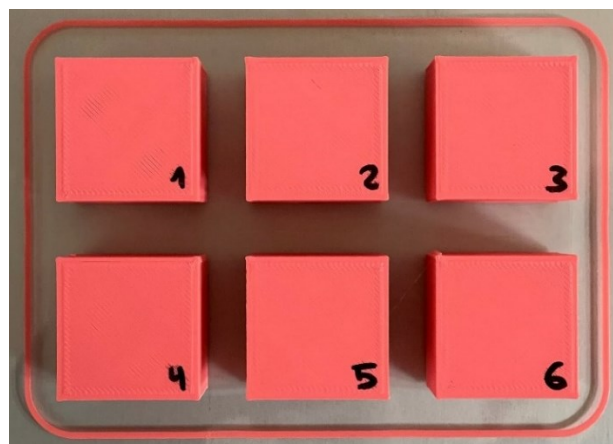


Figura 8.8. Serie de probetas numerada tras finalizar la impresión [fuente propia].

Una vez impresa cada serie, se numeran las probetas, se fotografían y se despegan de la plataforma de impresión. Cada probeta se pesa utilizando la balanza *Ohaus Pioneer PA413* y se miden las dimensiones con un calibrador digital de acuerdo con el esquema en el Anexo I, en el cual se encuentra la información acerca de las dimensiones de las probetas. Posteriormente las probetas se envasan al vacío para protegerlas de la humedad y se etiquetan para su almacenaje hasta la realización del ensayo. Los días que no se va a usar el filamento se envasa al vacío y antes de volver a utilizarlo se pasa el filamento de limpieza.



Figura 8.9. Todas las probetas envasadas al vacío y etiquetadas [fuente propia].

8.5. Contratiempos durante la impresión

Durante la impresión de las probetas surgió una serie de problemas que obligó a repetir algunas de las impresiones. Debido a la larga duración de las impresiones, no siempre era posible estar presente, por lo que durante este periodo de ausencia no era posible detener la impresión en caso de que surgiera algún problema. Este es el caso del primer contratiempo. El filamento tuvo un defecto de fabricación, concretamente en el proceso de bobinado (ver la Figura 8.10.), lo que causó que llegado a cierto punto el

filamento se entrelazara y la impresora terminara la impresión sin filamento, quedando las piezas en mal estado. Esto supuso una gran pérdida de material y de tiempo, ya que las probetas que se estaban imprimiendo eran unas de las de mayor densidad de relleno. Para solucionar este problema en el bobinado se tuvo que pasar el filamento a otra bobina manualmente.

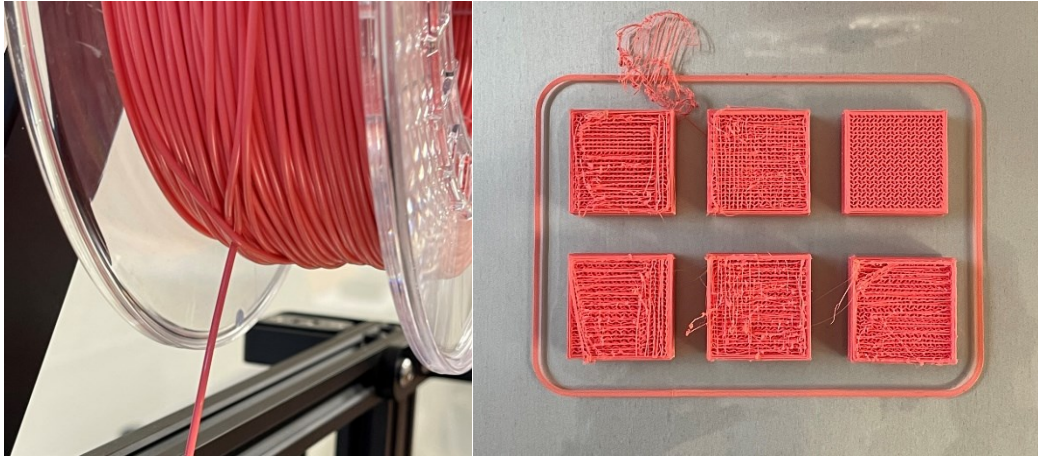


Figura 8.10. Filamento entrelazado y probetas defectuosas [fuente propia].

El siguiente problema del que se tiene constancia es la obstrucción de la boquilla de la impresora, lo cual ocurrió en más de una ocasión. Debido a que la impresora utilizada es de uso compartido, el empleo continuado de distintos filamentos produjo la obstrucción del orificio por el que sale el material fundido.

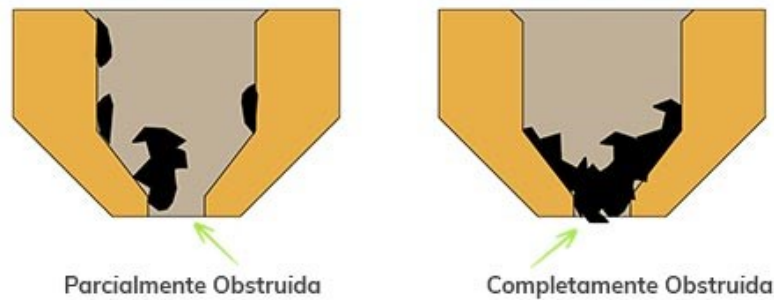


Figura 8.11. Representación gráfica de la obstrucción de la boquilla [86].

Las consecuencias de este problema son visibles a simple vista: una deficiencia en la aportación de material durante la impresión. Esto implica una reducción considerable en las propiedades mecánicas de las probetas, por lo que es necesario repetir la impresión. En la Figura 8.12. se observa que existe un *air gap* positivo entre las deposiciones, debido a la reducción del ancho del material depositado.

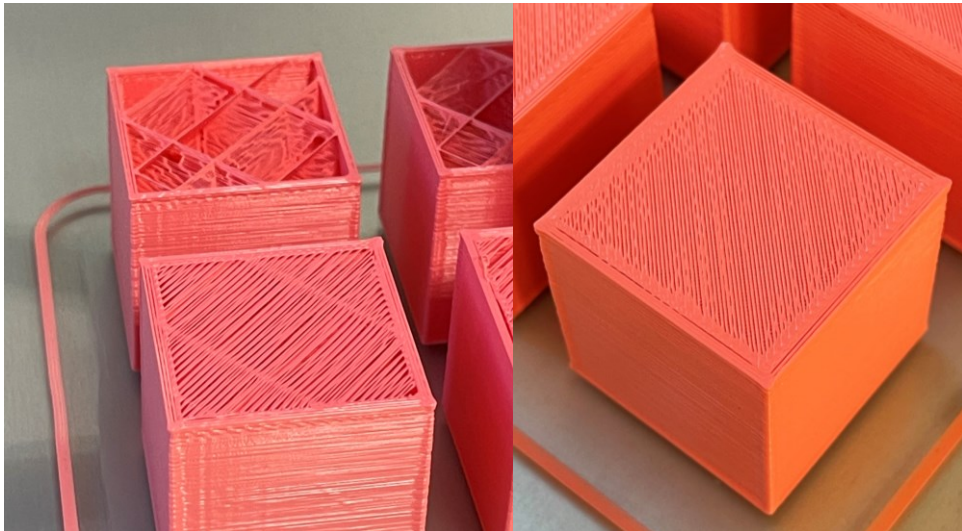


Figura 8.12. Probetas defectuosas por la obstrucción de la boquilla [fuente propia].

Para solucionar este problema en dos de las ocasiones se sustituyó la boquilla por otra nueva, y la última vez se utilizó una aguja de limpieza para desatascar la boquilla.



Figura 8.13. Boquillas y agujas de limpieza [87], [88].

Por último, en otra de las impresiones se partió el filamento a mitad de la impresión y se detuvo la impresión manualmente. De no haberlo hecho la impresora hubiera seguido imprimiendo sin filamento, realizando los movimientos programados en el G-Code hasta “terminar la pieza”. Al detener la impresión la boquilla se quedó pegada a una de las probetas, provocando que esta se fundiera, como se puede observar en la Figura 8.14. Este problema no volvió a ocurrir durante ninguna de las siguientes impresiones.

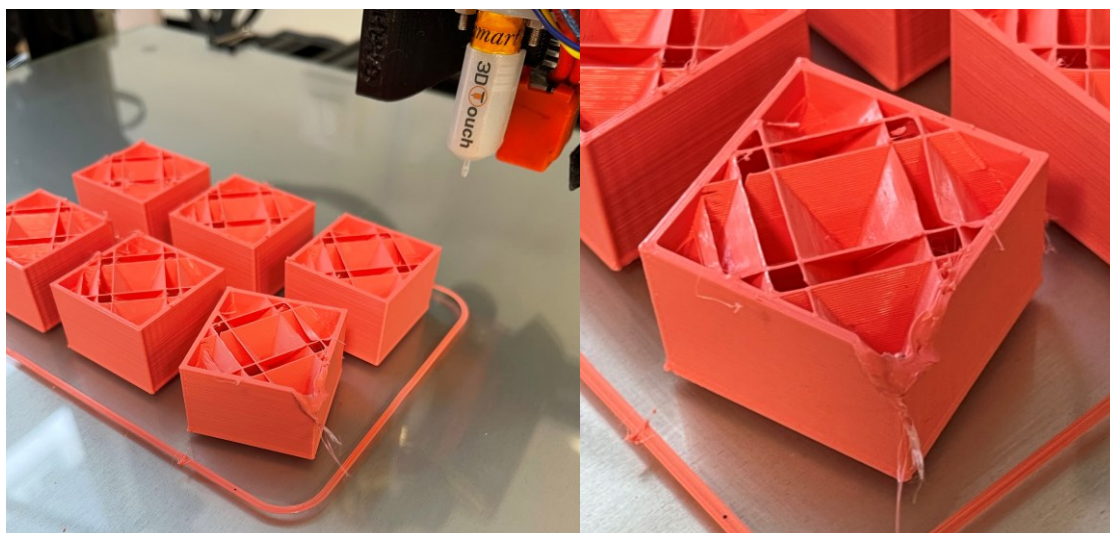


Figura 8.14. Probetas defectuosas tras la rotura del filamento [fuente propia].

9. Ensayo de resistencia a compresión

El ensayo de resistencia a compresión consiste en aplicar una carga constante sobre una probeta a lo largo de su eje vertical, en el cual el puente de carga desciende a una velocidad constante comprimiendo la pieza entre los platos de compresión.

9.1. Puesta a punto de la máquina universal de ensayos

Para la realización de los ensayos se dispone de la máquina universal de ensayos mecánicos *Simadzu Autograph* con una capacidad máxima de carga de 50 kN, controlada por ordenador mediante la aplicación *Trapezium* de *Shimadzu*. Esta máquina permite realizar ensayos de tracción, flexión y compresión, utilizando los cabezales correspondientes para cada ensayo.

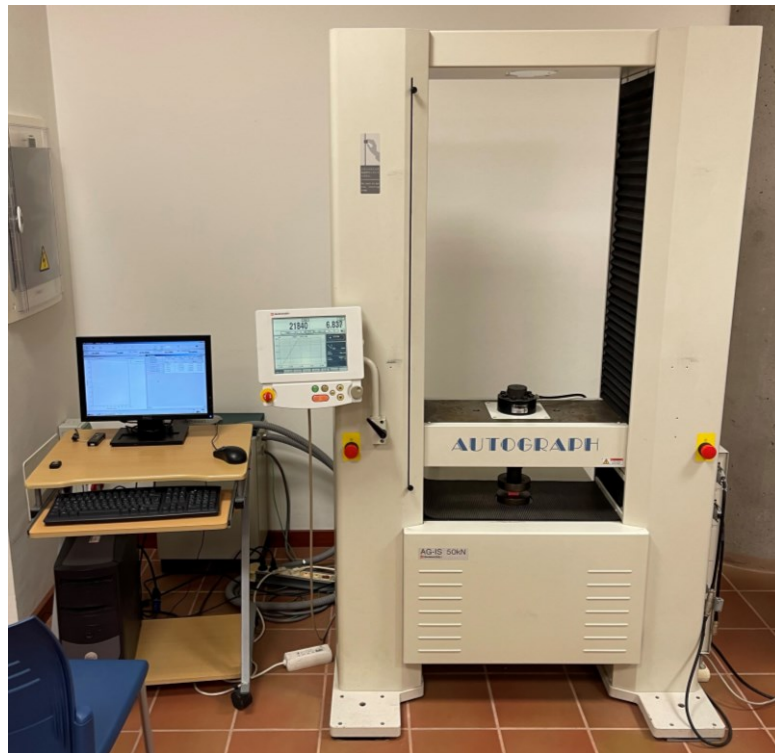


Figura 9.1. Máquina universal de ensayos y ordenador utilizados [fuente propia].

Antes de realizar los ensayos se configuran los parámetros del ensayo manualmente a través del ordenador que se encuentra conectado a la máquina. Se introducen valores como las dimensiones de las probetas, la velocidad de ensayo (en este caso 1 mm/min) y el desplazamiento máximo (en este caso 15 mm). Se ha utilizado la velocidad de ensayo mínima recomendada por la norma *UNE-EN ISO 604:2003* [82]. Estos parámetros se guardan en un archivo MAI denominado método, el cual se utilizará posteriormente para

realizar el ensayo. La puesta a punto también conlleva la colocación de los cabezales de ensayo correspondientes en la máquina universal de ensayos mecánicos, en este caso se colocan los platos de compresión.

9.2. Realización de los ensayos

Antes de comenzar el ensayo se fotografían las 6 probetas juntas, para poder tener una imagen del antes/después del ensayo. Una vez puesta a punto la máquina universal de ensayos se coloca la probeta en el centro de la superficie del plato de compresión inferior y se regula manualmente la altura del puente de carga hasta que el plato de compresión superior y la probeta estén ligeramente en contacto, aplicando una carga mínima. Tras colocar la probeta en su lugar se desactiva la regulación manual de la altura y se pone a cero el valor de carga y desplazamiento.

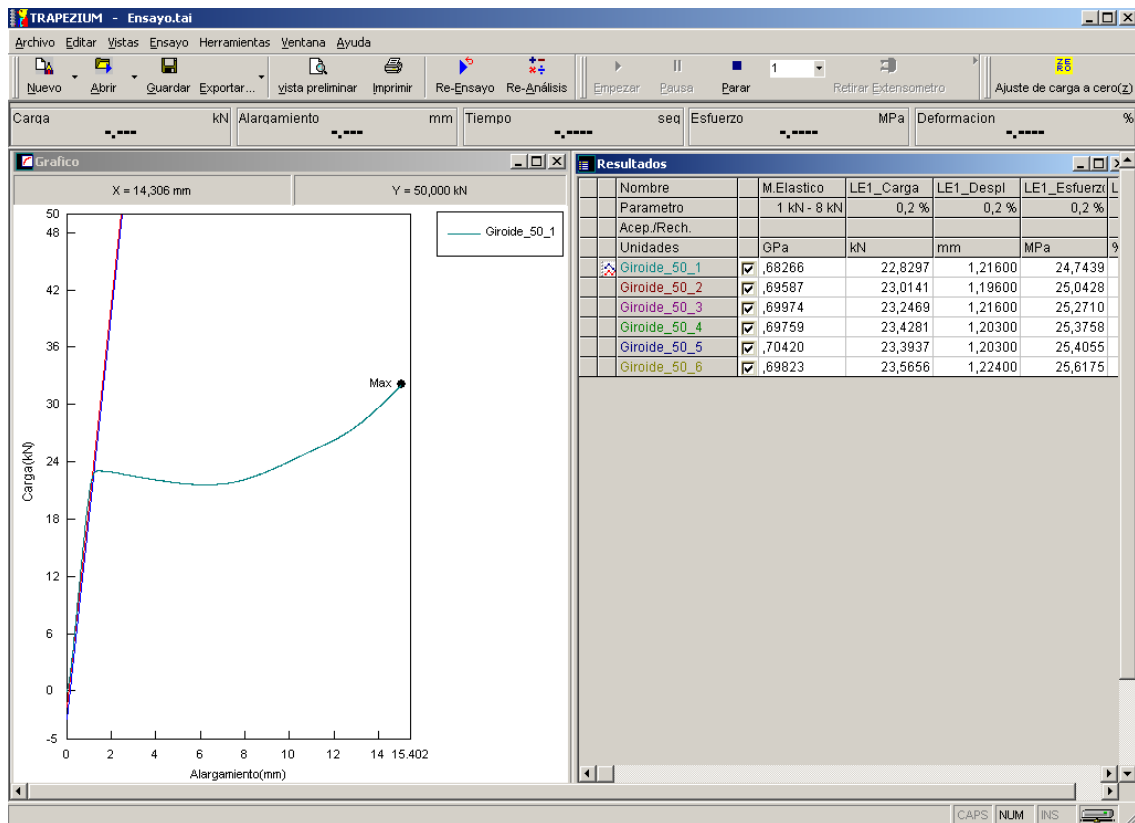


Figura 9.2. Interfaz del software *Trapezium* [fuente propia].

A continuación, se inicia el ensayo, en base al cual se mide la carga que soporta la probeta y el desplazamiento experimentado por el puente de carga. Durante el ensayo de compresión el software de la máquina universal de ensayos genera una curva de carga/alargamiento como la mostrada en la Figura 9.2.

Cada uno de estos ensayos tiene una duración de 15 minutos, y tras ensayar cada serie de seis probetas se obtiene un archivo con los siguientes resultados: tiempo transcurrido, carga aplicada y alargamiento. Este archivo se exporta a un pendrive para posteriormente analizar los datos en una hoja de cálculo.

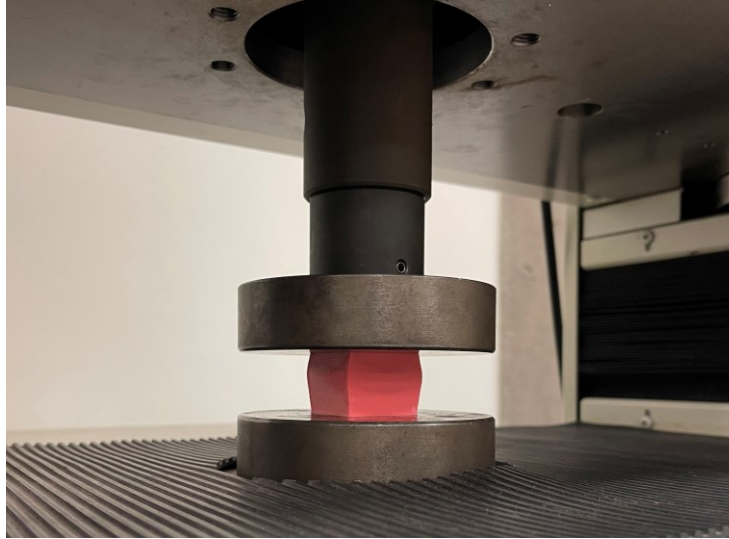


Figura 9.3. Imagen tomada durante el ensayo [fuente propia].

Una vez ensayadas las 6 probetas se vuelven a fotografiar, para así poder compararlas con la imagen de antes del ensayo (ver Figura 9.4.). Las imágenes de cada serie de probetas antes y después del ensayo se encuentran disponibles en el Anexo VI.

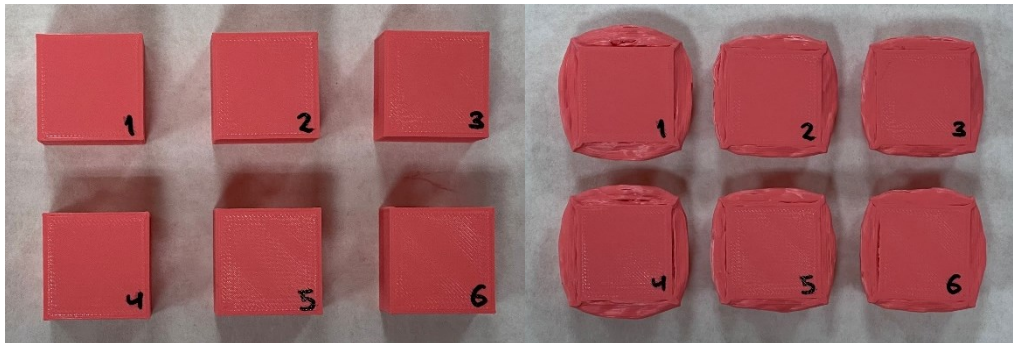


Figura 9.4. Imagen de las probetas antes y después del ensayo [fuente propia].

A partir de los datos del ensayo se obtienen los valores de esfuerzo y deformación para cada una de las probetas. Con estos valores se realiza una representación del esfuerzo frente a la deformación como se observa en la Figura 9.5.

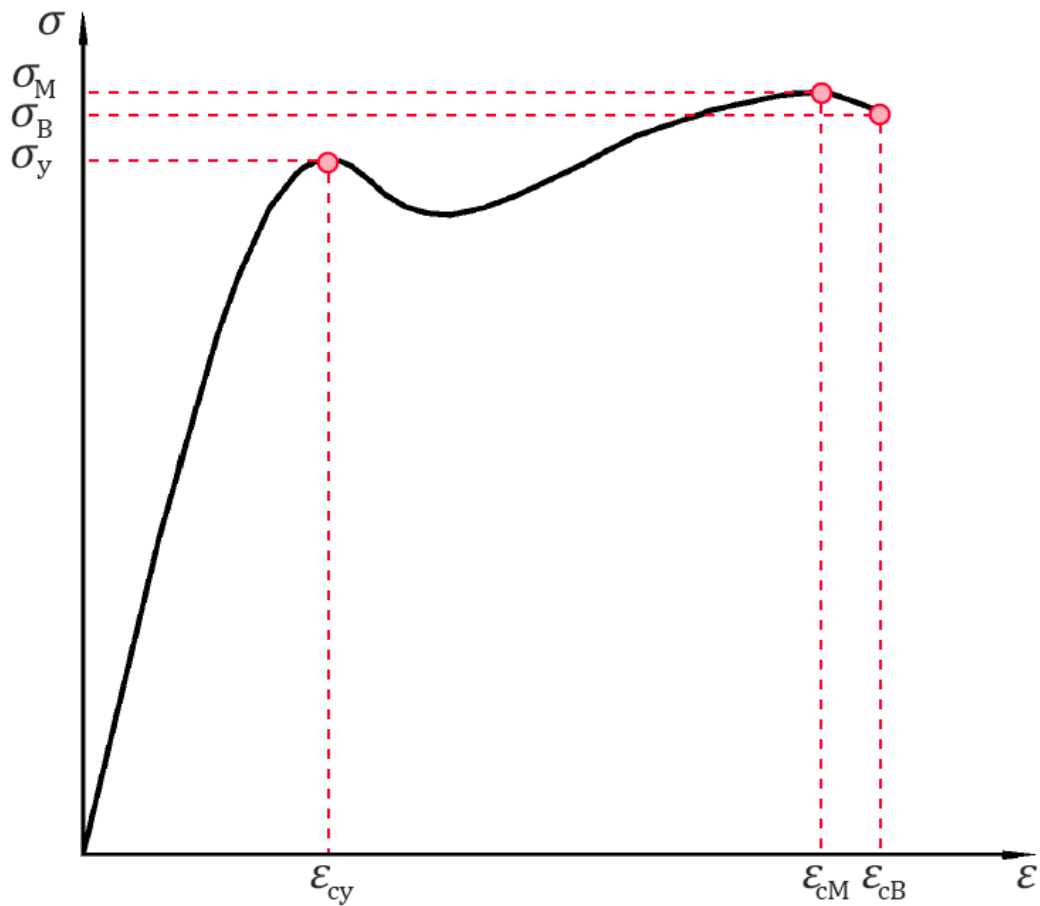


Figura 9.5. Curva característica de esfuerzo/deformación [82].

En la norma *UNE-EN ISO 604:2003* [82] se aplican una serie de términos, los cuales se definen a continuación:

- **Esfuerzo de compresión, σ .** Carga de compresión, por unidad de superficie de la sección transversal original, soportada por la probeta.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

donde

σ es el parámetro del esfuerzo en cuestión, en megapascales (MPa);

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

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

- **Esfuerzo de compresión en el punto de fluencia, σ_y .** Primer esfuerzo para el que tiene lugar un incremento en la deformación sin un incremento del esfuerzo (véase Figura 9.5.). Se expresa en megapascales (MPa). Puede ser menor que el esfuerzo máximo alcanzable.
- **Resistencia a compresión, σ_M .** Esfuerzo máximo en compresión soportado por la probeta durante un ensayo de compresión (véase Figura 9.5.). Se expresa en megapascales (MPa).
- **Esfuerzo de compresión en el punto de rotura, σ_B .** Esfuerzo de compresión en el punto de rotura de la probeta (véase Figura 9.5.). Se expresa en megapascales (MPa).
- **Deformación nominal en compresión, ε_c .** Disminución en longitud por unidad de longitud inicial de la probeta. Se expresa como una relación adimensional o en porcentaje (%).

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

donde

ε_c es la deformación nominal en cuestión, expresada como una relación adimensional;

L es la distancia inicial entre las placas de referencia, expresada en milímetros (mm);

ΔL es la disminución de la distancia entre las placas de compresión.

- **Deformación nominal en compresión en el punto de fluencia, ε_{cy} .** Deformación correspondiente al esfuerzo de compresión en el punto de fluencia σ_y . Se expresa como una relación adimensional o en porcentaje (%).
- **Deformación nominal en compresión en la resistencia a compresión, ε_{cM} .** Deformación correspondiente a la resistencia a la compresión σ_M . Se expresa como una relación adimensional o en porcentaje (%).
- **Deformación nominal en compresión en el punto de rotura, ε_{cB} .** Deformación en el punto de rotura de la probeta. Se expresa como una relación adimensional o en porcentaje (%).
- **Módulo de elasticidad en compresión, E_c :** Relación entre la diferencia de esfuerzos y la diferencia de los valores de deformación correspondientes. Según la norma, coincide con la pendiente de la curva de esfuerzo frente a deformación en el intervalo comprendido entre $\varepsilon_1 = 0.0005$ y $\varepsilon_2 = 0.0025$ utilizando el modelo de la recta de regresión lineal ajustada por el método de mínimos cuadrados.

Antes de pasar al análisis de resultados se deben hacer algunas aclaraciones. En este estudio, como se está evaluando la resistencia a compresión de los distintos tipos de relleno, cuando se habla de resistencia a compresión se está haciendo referencia al esfuerzo de compresión en el punto de fluencia, puesto que este valor será el que nos indique la resistencia máxima de la estructura interna de la pieza. Esto es porque, a partir del punto de fluencia, el esfuerzo disminuye hasta que la tensión necesaria para seguir aumentando la deformación se incrementa, generándose un endurecimiento debido al aplastamiento del relleno interno de la pieza, el cual se vuelve más compacto. En las probetas con menor densidad de relleno el esfuerzo de compresión tras el endurecimiento no llega a superar al esfuerzo de compresión en el punto de fluencia, pero en las probetas con mayor densidad de relleno sí que lo supera, siendo en estos casos el esfuerzo máximo. Por lo tanto, los valores a los que se hace referencia cuando se habla de resistencia a compresión no son los de esfuerzo máximo como tal en todos los casos, sino los de esfuerzo a compresión en el punto de fluencia. Los valores y las gráficas resultantes de los ensayos realizados se encuentran disponibles en los Anexos III y IV, respectivamente.

10. Análisis de resultados

Una vez finalizado el ensayo de resistencia a compresión y obtenidos los datos resultantes de este, se procede a analizar los resultados obtenidos individualmente para cada tipo de relleno. Este análisis consiste en obtener, para cada densidad de relleno, los valores promedio, máximo y mínimo de la resistencia a compresión. Del mismo modo, para estudiar la variabilidad y dispersión de los resultados se calcula la desviación estándar y el coeficiente de variación. Una vez obtenidos los distintos parámetros estadísticos se realiza una representación gráfica mediante diagrama de barras, donde se muestran los valores promedio para cada densidad de relleno.

10.1. Giroide

En la Figura 10.1. se recogen los valores promedio de resistencia a compresión de las probetas ensayadas utilizando el patrón de relleno giroide con cada uno de los porcentajes de relleno. Como se puede observar en el gráfico, la resistencia a compresión es mayor cuanto mayor es la densidad de relleno, por lo tanto, la relación entre estas dos magnitudes es prácticamente lineal. El incremento de la resistencia a compresión del 10 % al 20 % de relleno es de unos 6.5 MPa, sin embargo, a partir del 20 % el incremento es más o menos constante, del orden de 3.7 MPa.

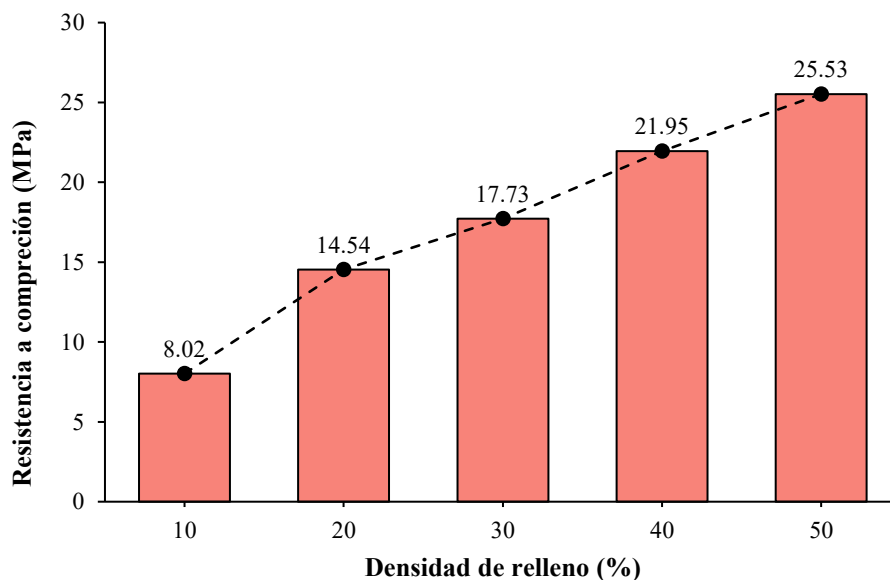


Figura 10.1. Resistencia a compresión – Giroide.

Si se analizan los parámetros estadísticos resultantes mostrados en la Tabla 10.1. se puede observar que para todas las densidades de relleno la desviación estándar está por debajo de 1 MPa, lo cual indica que la mayor parte de los datos están cerca del valor promedio. Solamente la desviación estándar para el relleno del 10 % es ligeramente superior a las demás, lo cual denota una mayor dispersión de los datos. Del mismo modo, el coeficiente de variación está en torno al 1 % en todos los rellenos menos en el de menor densidad. Esto significa que para este relleno el valor promedio es menos representativo del conjunto de datos.

	Resistencia a compresión (MPa)				
	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %
Promedio	8.02	14.54	17.73	21.95	25.53
Máximo	8.71	14.70	17.91	22.29	25.82
Mínimo	7.04	14.31	17.33	21.77	25.11
Des. Estándar	0.59	0.16	0.21	0.19	0.27
Coef. Variación	7.35	1.13	1.19	0.87	1.06

Tabla 10.1. Resultados resistencia a compresión – Giroide.

10.2. Octeto

Para este patrón de relleno el comportamiento de los datos es diferente. En la gráfica que representa los valores promedio de resistencia a compresión para cada densidad de relleno, se observa que el comportamiento no es tan lineal como en el caso del giroide. En este caso la recta tiene una pendiente menor entre los porcentajes de relleno del 10 % y el 30 %, y la pendiente aumenta entre los valores de 30 % y 50 % de relleno. El incremento de la resistencia a compresión del 10 % al 30 % de relleno es de unos 1.8 MPa por cada aumento de relleno, sin embargo, a partir del 30 % el incremento es mayor, del orden de 5.4 MPa.

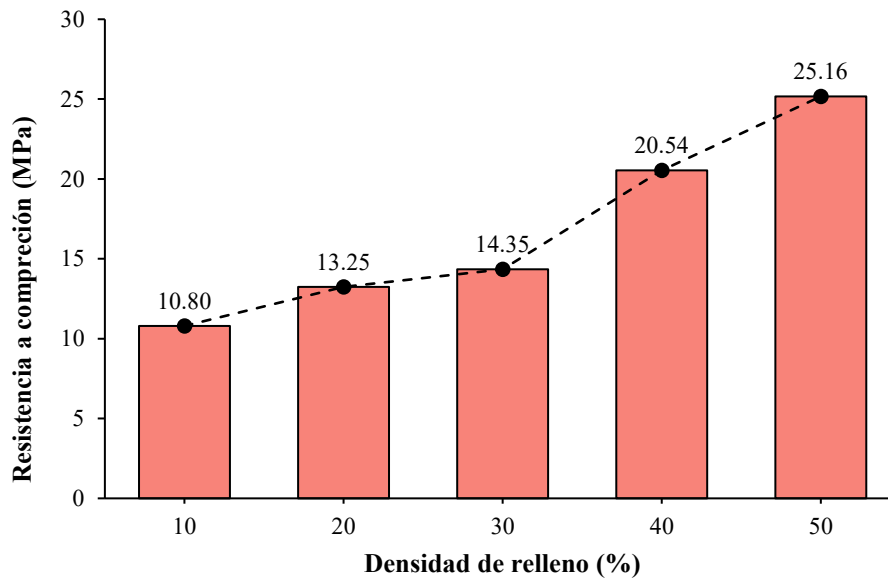


Figura 10.2. Resistencia a compresión – Octeto.

En cuanto a los parámetros estadísticos, se obtienen unos valores de desviación estándar y coeficiente de variación muy bajos, lo cual indica una alta homogeneidad en el conjunto de datos.

	Resistencia a compresión (MPa)				
	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %
Promedio	10.80	13.25	14.35	20.54	25.16
Máximo	10.90	13.35	14.46	20.66	25.31
Mínimo	10.72	13.17	14.20	20.45	25.05
Des. Estándar	0.06	0.07	0.12	0.09	0.09
Coef. Variación	0.60	0.51	0.83	0.42	0.37

Tabla 10.2. Resultados resistencia a compresión – Octeto.

10.3. Cúbico

En el patrón de relleno cúbico los resultados de los ensayos muestran un crecimiento prácticamente lineal de la resistencia a compresión a medida que aumenta la densidad de relleno. Esta linealidad se rompe en la densidad de relleno del 50 %, debido a que el aumento del valor promedio de la resistencia a compresión es mínimo con respecto al relleno del 40 %. Entre los rellenos del 10 % al 40 % el incremento promedio de la resistencia a compresión es de unos 3.7 MPa, mientras que del 40 % al 50 % la resistencia a compresión solo aumenta 0.7 MPa.

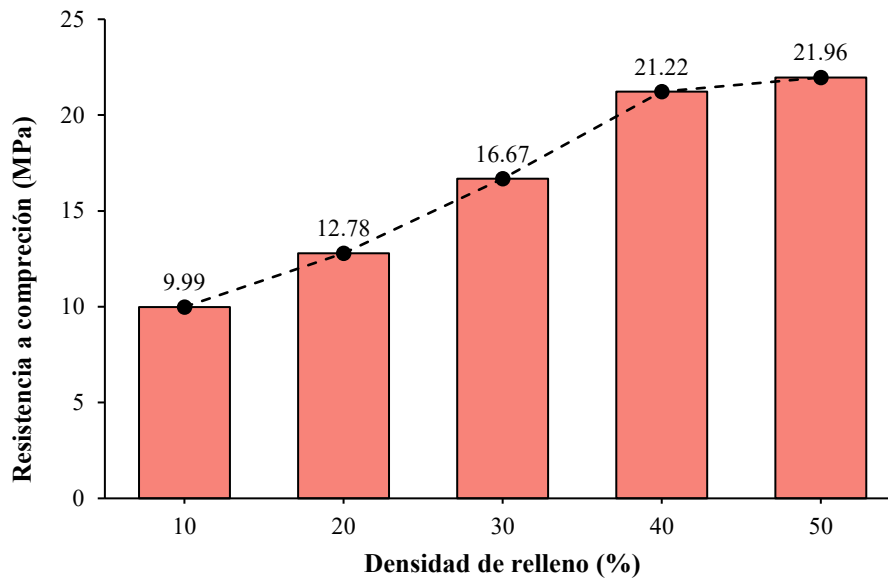


Figura 10.3. Resistencia a compresión – Cúbico.

Al observar los parámetros estadísticos de la Tabla 10.3. vemos que los valores de desviación estándar y coeficiente de variación son relativamente bajos, lo cual indica una baja dispersión en los datos de los ensayos.

	Resistencia a compresión (MPa)				
	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %
Promedio	9.99	12.78	16.67	21.22	21.96
Máximo	10.15	12.84	16.90	21.37	22.14
Mínimo	9.82	12.73	16.54	21.14	21.69
Des. Estándar	0.13	0.04	0.14	0.09	0.17
Coef. Variación	1.34	0.33	0.87	0.41	0.79

Tabla 10.3. Resultados resistencia a compresión – Cúbico.

10.4. Cúbico bitruncado

En el patrón de relleno cúbico bitruncado los valores promedio de la resistencia a compresión siguen un comportamiento similar a los del patrón cúbico, ya que el incremento de resistencia a compresión varía entre los distintos tramos, siendo mayor en los tramos 10 – 20 % y 30 – 40% y menor en los tramos 20 – 30 % y 40 – 50 %. En los tramos 10 – 20 % y 30 – 40%, el incremento de la resistencia a compresión es de 3.8 y 6.3 MPa, respectivamente. En cambio, en los tramos 20 – 30 % y 40 – 50 %, el incremento es de 1.34 MPa en ambos casos.

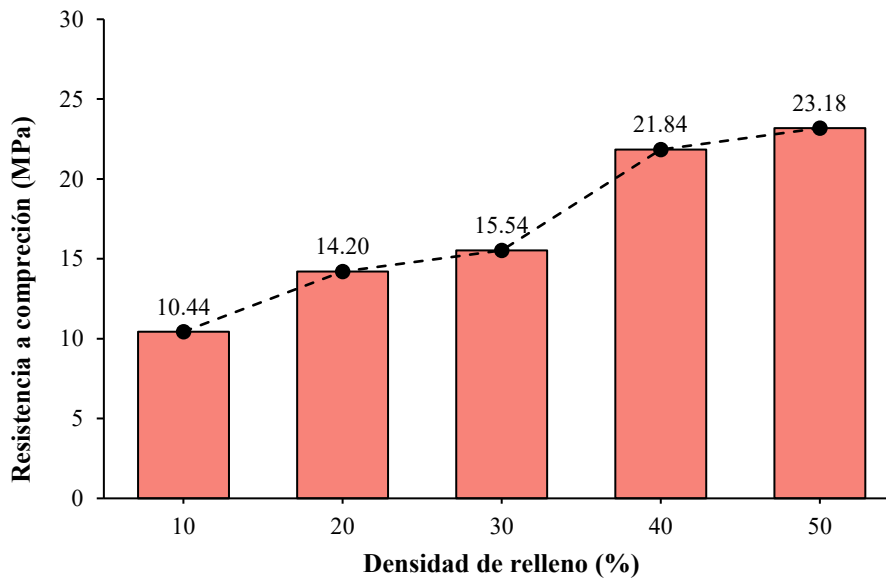


Figura 10.4. Resistencia a compresión – Cúbico bitruncado.

En este patrón de relleno los valores de desviación estándar y coeficiente de variación son muy bajos, de igual manera que en el patrón de relleno octeto. Esto vuelve a indicar que gran parte de los datos están agrupados cerca del valor promedio.

	Resistencia a compresión (MPa)				
	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %
Promedio	10.44	14.20	15.54	21.84	23.18
Máximo	10.55	14.27	15.63	21.97	23.35
Mínimo	10.39	14.04	15.45	21.78	23.00
Des. Estándar	0.06	0.08	0.06	0.07	0.14
Coef. Variación	0.55	0.59	0.40	0.31	0.59

Tabla 10.4. Resultados resistencia a compresión – Cúbico bitruncado.

10.5. Subdivisión cúbica

En el patrón de relleno subdivisión cúbica también se observa un comportamiento similar al de los otros patrones de relleno, pero con alguna variación. En este caso, por primera vez la resistencia a compresión disminuye al aumentar la densidad de relleno. Esto ocurre entre las densidades de relleno del 30 % y 40 %, entre las cuales el valor promedio de la resistencia a compresión pasa de 13.73 MPa a 13.68 MPa. Este comportamiento se puede deber a una obstrucción parcial de la boquilla durante la impresión, que impide la correcta deposición de filamento, lo cual disminuye las propiedades mecánicas de las probetas impresas. Por lo demás, la resistencia a

compresión aumenta 0.5 MPa entre los rellenos 10 % y 20 %, y unos 2.5 MPa en los tramos 20 – 30 % y 40 – 50 %.

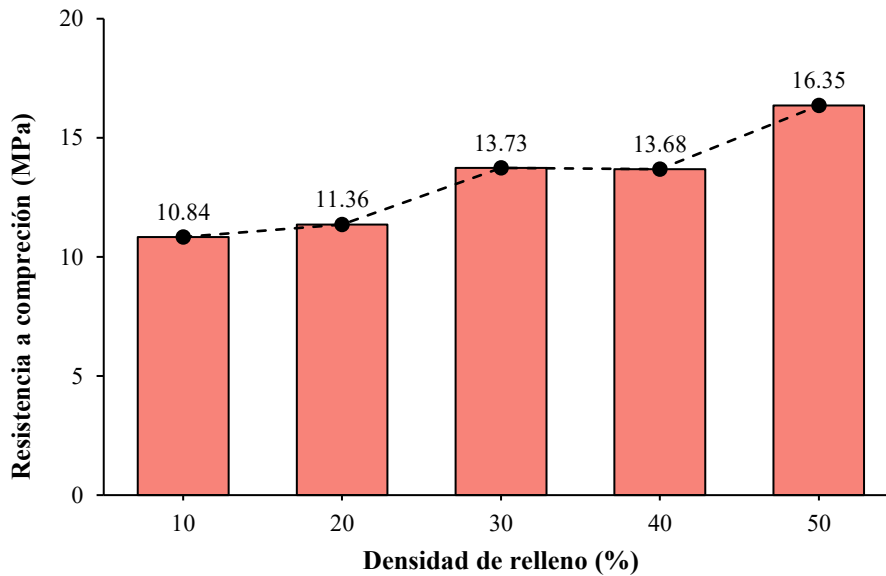


Figura 10.5. Resistencia a compresión – Subdivisión cúbica.

En la Tabla 10.5. se observa que la desviación estándar es menor que 1 MPa en todos los casos, lo cual indica que la dispersión de los datos es baja con respecto a la media. El coeficiente de variación también es relativamente bajo para todos los porcentajes de relleno, sólo es un poco superior en el 50 % de relleno.

	Resistencia a compresión (MPa)				
	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %
Promedio	10.84	11.36	13.73	13.68	16.35
Máximo	10.96	11.52	13.98	13.97	16.98
Mínimo	10.65	11.16	13.49	13.35	15.67
Des. Estándar	0.11	0.14	0.21	0.21	0.48
Coef. Variación	1.02	1.23	1.49	1.52	2.96

Tabla 10.5. Resultados resistencia a compresión – Subdivisión cúbica.

10.6. Estudio de correlación

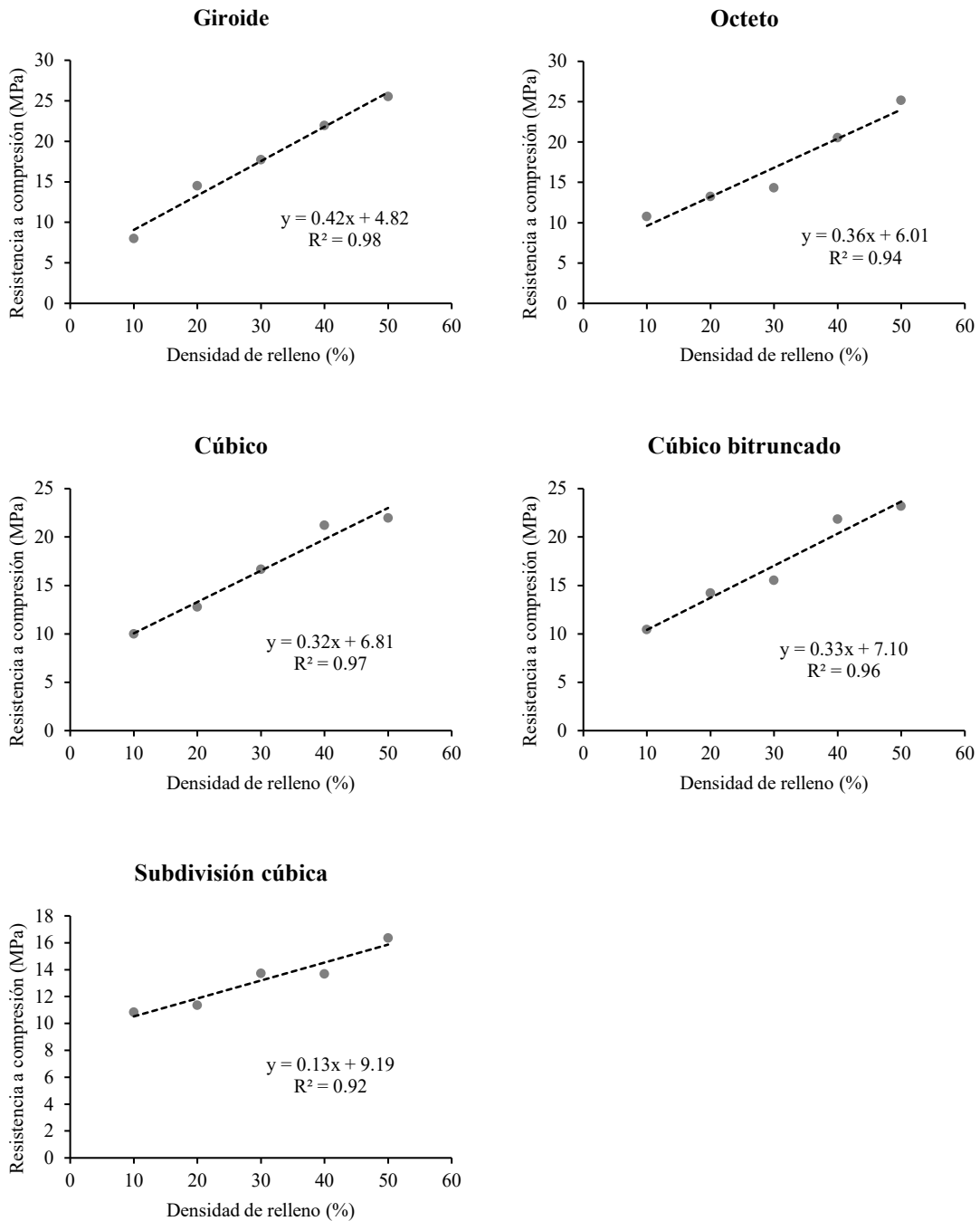


Figura 10.6. Estudio de correlación.

Como se puede observar en la figura 10.6. para todos los patrones de relleno el valor del coeficiente de determinación R^2 es cercano a la unidad, lo que indica un ajuste lineal casi perfecto. Por ello, el modelo de regresión lineal se considera viable para realizar un análisis general de los resultados en el siguiente apartado.

	Ecuación	R ²
Giroide	$y = 0.42x + 4.82$	0.98
Octeto	$y = 0.36x + 6.01$	0.94
Cúbico	$y = 0.32x + 6.81$	0.97
Cúbico bitruncado	$y = 0.33x + 7.10$	0.96
Subdivisión cúbica	$y = 0.13x + 9.19$	0.92

Tabla 10.6. Ecuaciones de ajuste y valores de R².

Para verificar los resultados de este estudio se decide imprimir y ensayar una serie de probetas empleando uno de los cinco patrones de relleno y una densidad, aunque entre 10 % y 50 %, no utilizada con anterioridad. Se decide, de forma aleatoria, imprimir probetas con el patrón de relleno giroide y una densidad de relleno del 35 %.



Figura 10.7. Probetas tras la impresión [fuente propia].

Del ensayo se obtiene que el valor de la resistencia a compresión para el relleno giroide al 35 % es de 18.73 MPa. Este valor se encuentra dentro de lo esperado, ya que se sitúa entre los valores de resistencia a compresión del giroide al 30 % (17.73 MPa) y el giroide al 40 % (21.95 MPa). Si se utiliza la ecuación de ajuste lineal ($y = 0.42x + 4.82$), se obtiene que para una resistencia a compresión de 18.73 MPa la densidad de relleno equivale a un 33 %, lo cual está bastante cerca del 35 %. Visto de forma opuesta, para una densidad del 35 %, según la ecuación de ajuste lineal la resistencia a compresión debe ser de 19.52 MPa, valor que dista menos de 1 MPa de los 18.73 MPa obtenidos en el ensayo. Este resultado confirma la existencia de una correlación lineal entre la resistencia a compresión y la densidad de relleno, ya que el valor de resistencia a compresión resultante del ensayo muestra un error relativo de tan solo un 5 % con respecto al valor estimado mediante la ecuación de ajuste lineal.

10.7. Resumen de resultados

En la Tabla 10.7. se recopilan los valores de resistencia a compresión para cada patrón y densidad de relleno, resaltando en negrita el valor máximo para cada densidad de relleno.

Resistencia a compresión (MPa)					
Relleno [%]	Giroide	Octeto	Cúbico	Cúbico bitruncado	Subdivisión cúbica
10	8.02	10.80	9.99	10.44	10.84
20	14.54	13.25	12.78	14.20	11.36
30	17.73	14.35	16.67	15.54	13.73
40	21.95	20.54	21.22	21.84	13.68
50	25.53	25.16	21.96	23.18	16.35

Tabla 10.7. Resistencia a compresión de cada patrón y densidad de relleno.

Con una densidad de relleno del 10 %, el patrón de relleno subdivisión cúbica es el que muestra una mayor resistencia a compresión (10.84 MPa), seguido de los patrones octeto (10.80 MPa), cúbico bitruncado (10.44 MPa), cúbico (9.99 MPa) y giroide (8.02 MPa).

Si se utiliza un relleno del 20 %, el patrón giroide pasa a ser el de mayor resistencia a compresión (14.54 MPa), seguido de los rellenos cúbico bitruncado (14.20 MPa), octeto (13.25 MPa), cúbico (12.78 MPa) y subdivisión cúbica (11.36 MPa)

Para la densidad del 30 %, el patrón de relleno giroide vuelve a ser el de mayor resistencia a compresión (17.73 MPa), seguido de los patrones cúbico (16.67 MPa), cúbico bitruncado (15.54 MPa), octeto (14.35 MPa) y subdivisión cúbica (13.73 MPa).

Con un relleno del 40 %, el patrón giroide sigue teniendo la mayor resistencia a compresión (21.95 MPa), seguido de los rellenos cúbico bitruncado (21.84 MPa), cúbico (21.22 MPa), octeto (20.54 MPa) y subdivisión cúbica (13.69 MPa), en este caso muy por debajo de los demás.

Con un 50 % de relleno, el patrón de relleno giroide cuenta con la mayor de las resistencias a compresión (25.53 MPa), seguido de los patrones octeto (25.16 MPa), cúbico bitruncado (23.18 MPa), cúbico (21.96 MPa) y subdivisión cúbica (16.35 MPa).

En la Figura 10.8. se realiza un ajuste lineal de los resultados de la resistencia a compresión para cada uno de los patrones y densidades de relleno. Esta aproximación lineal permite ver de forma más clara el comportamiento de cada uno de los patrones de relleno en lo que respecta a la resistencia a compresión a medida que aumenta su porcentaje de relleno.

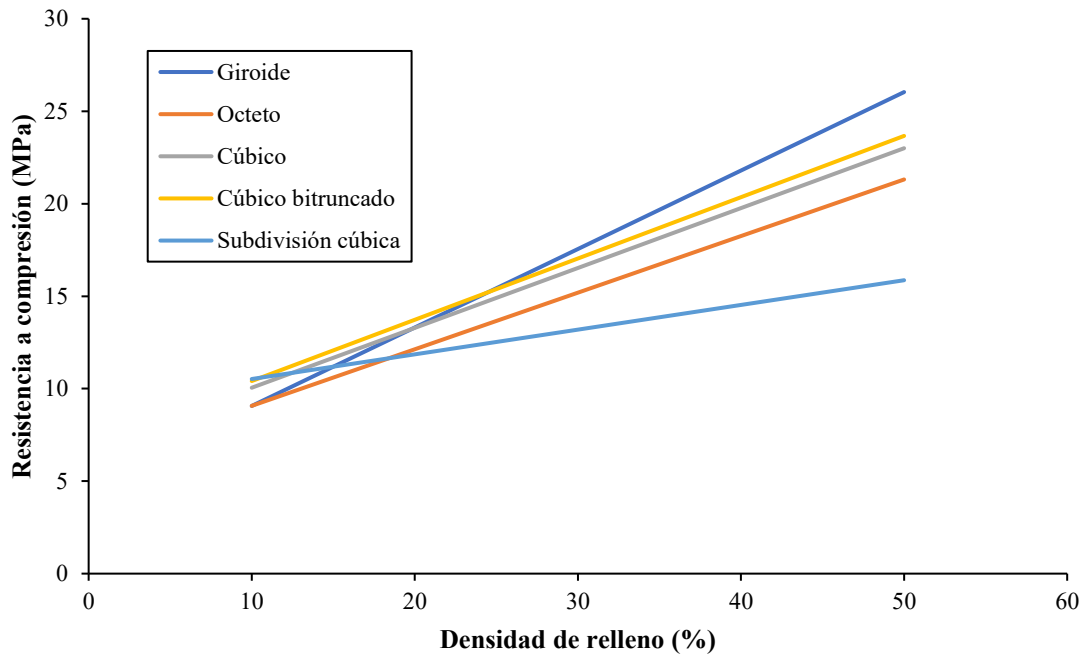


Figura 10.8. Ajuste lineal de la resistencia a compresión.

Como se puede ver en el gráfico, los patrones octeto, cúbico y cúbico bitruncado tienen un comportamiento relativamente similar en lo que se refiere al incremento de resistencia según su densidad de relleno. Del estudio de correlación se obtiene que la pendiente de la recta de ajuste para cada uno de ellos es de 0.36, 0.32, y 0.33, respectivamente. Entre estos tres, el de mayor resistencia a compresión es el cúbico bitruncado, seguido por el cúbico y el octeto.

Por otro lado, en este gráfico se puede observar más claramente que los patrones de relleno giroide y subdivisión cúbica tienen comportamientos distintos entre sí. Con una densidad de relleno del 10 % el patrón de relleno subdivisión cúbica tiene la mayor resistencia a compresión de entre todas las probetas, mientras que con esta misma densidad el patrón de relleno giroide cuenta con la menor de las resistencias a compresión. En cambio, con una densidad de relleno del 50 % el comportamiento de ambos es totalmente opuesto. Al 50 % el patrón de relleno subdivisión cúbica posee la menor de

las resistencias a compresión y el patrón de relleno giroide cuenta con la mayor de estas. Esto se explica observando la diferencia en las pendientes obtenidas del estudio de correlación, la pendiente de la recta de ajuste para el patrón de relleno giroide es de 0.42, y para el patrón subdivisión cúbica es de 0.13, mucho menor.

En resumen, aunque para todos los patrones de relleno la resistencia a compresión aumenta con la densidad de relleno, la tasa de incremento es mayor en el patrón giroide que en el patrón subdivisión cúbica, y similar en los patrones octeto, cúbico y cúbico bitruncado.

En la Figura 10.9. se compara gráficamente el tiempo de impresión y la densidad de relleno para cada patrón de relleno, utilizando el modelo de la recta de regresión lineal.

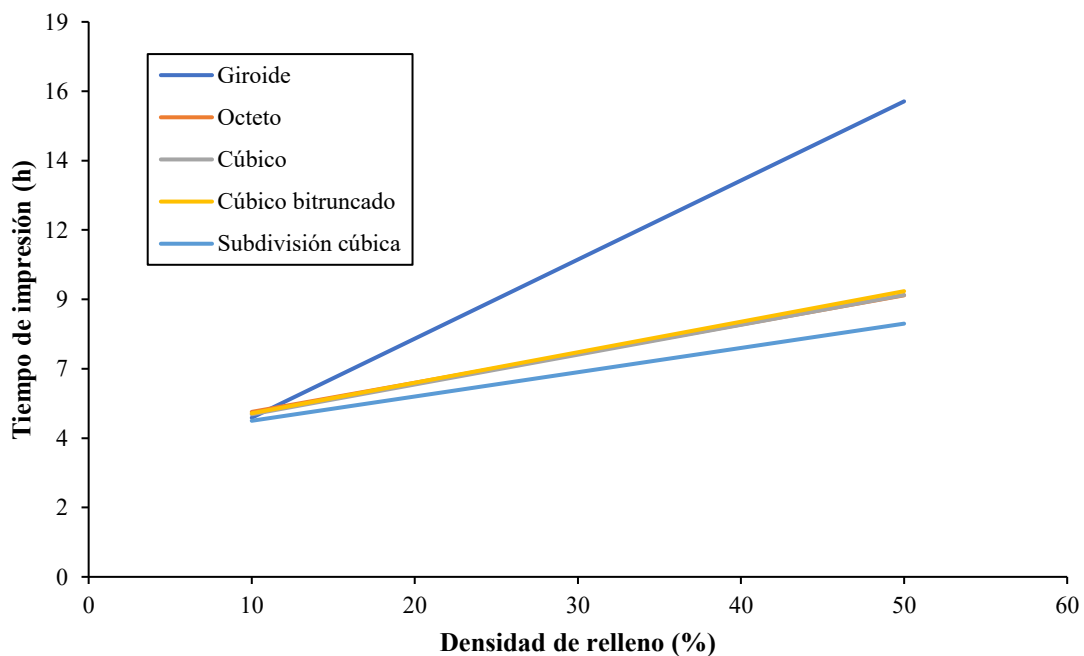


Figura 10.9. Tiempo de impresión de las probetas.

De entre los patrones de relleno ensayados, el giroide es el que tiene una mayor resistencia a compresión con un relleno del 50 %, pero esto tiene un alto coste en tiempo. La duración de las impresiones de este patrón de relleno aumenta considerablemente a medida que se incrementa la densidad, y en una proporción mayor a la de los demás patrones de relleno. Como se puede observar en la Figura 10.9. para los patrones de relleno octeto, cúbico, cúbico bitruncado y subdivisión cúbica la duración de las impresiones para cada densidad de relleno es muy similar entre ellas, siendo ligeramente

menor en el patrón subdivisión cúbica. Sin embargo, para el patrón de relleno giroide la pendiente es mucho mayor. Los tiempos de impresión se pueden consultar en el Anexo II.

En la Figura 10.10. se representa gráficamente la relación entre la masa de la probeta y la densidad de relleno para cada patrón de relleno, utilizando el modelo de la recta de regresión lineal.

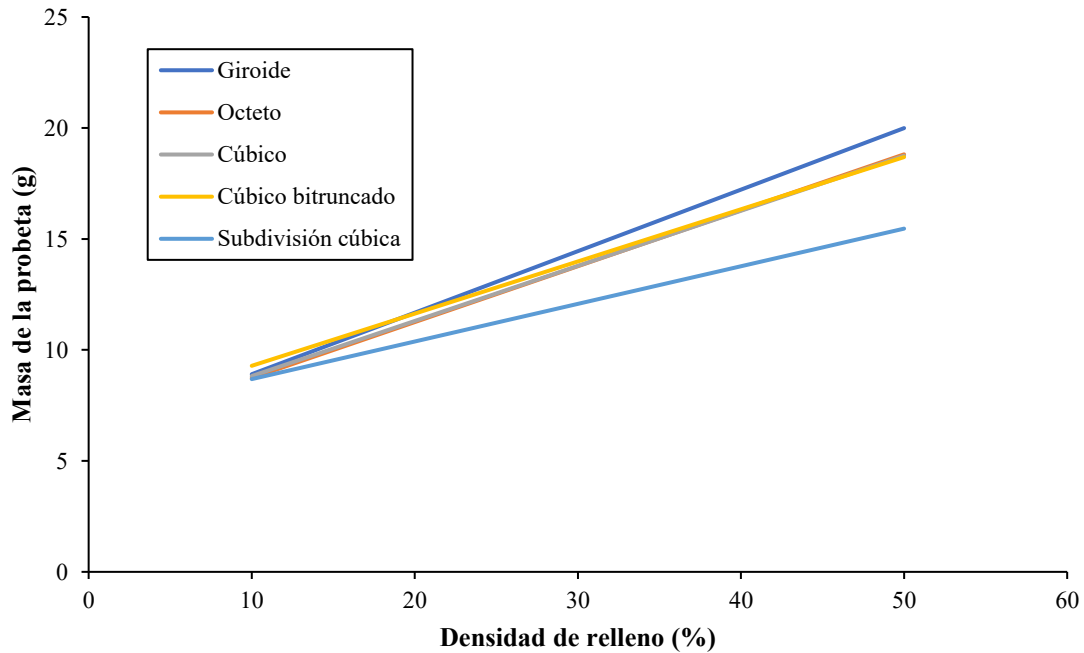


Figura 10.10. Masa de las probetas.

Como indica el gráfico, los patrones de relleno octeto, cúbico y cúbico bitruncado tienen una masa semejante en cada uno de los porcentajes de relleno. Sin embargo, la masa de las probetas con el patrón de relleno giroide aumenta en mayor proporción a medida que incrementa la densidad de relleno. Por otro lado, las probetas con el patrón de relleno subdivisión cúbica cuentan con una menor masa en todas las densidades de relleno excepto en la del 10 %, donde la masa de todos los patrones es relativamente similar. Como se observa en la figura 10.10., la recta que relaciona la masa de las probetas con su densidad de relleno tiene menos pendiente que las demás, por lo tanto, su masa aumenta en menor proporción a medida que incrementa la densidad.

En la Figura 10.11. se analiza la relación entre la resistencia a compresión y la masa para cada patrón y densidad de relleno, utilizando el modelo de la recta de regresión lineal.

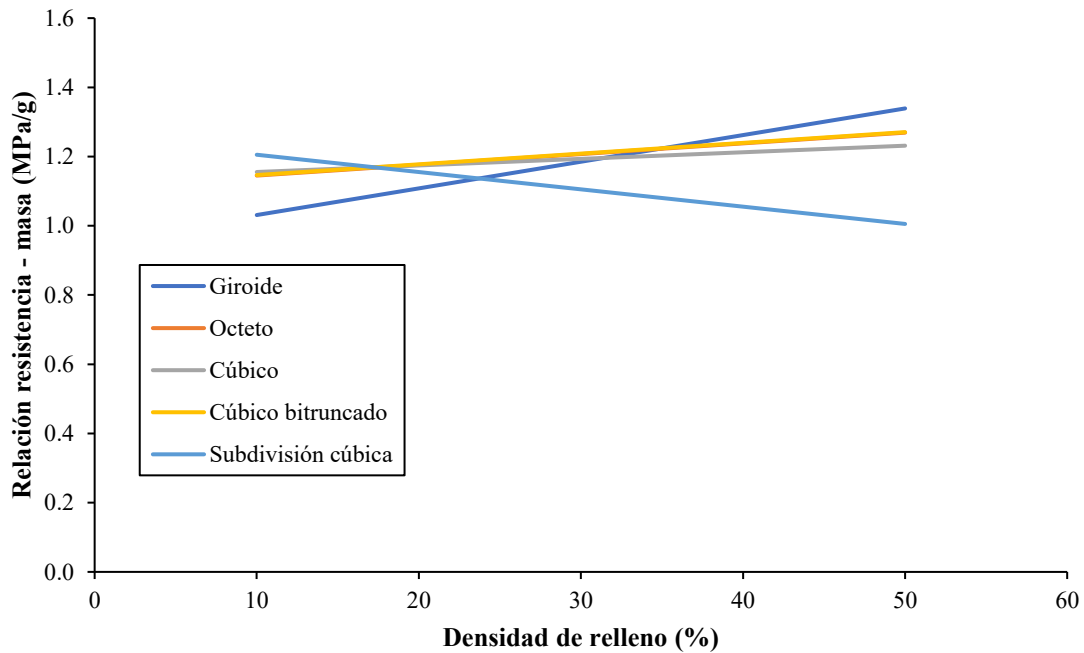


Figura 10.11. Relación resistencia – masa.

Como se observa en la gráfica, en todos los patrones la relación resistencia – masa crece a medida que aumenta la densidad de relleno, excepto en el patrón subdivisión cúbica. Lo cual indica que, a medida que aumenta su densidad, este patrón ofrece menos resistencia a compresión por cada gramo de filamento utilizado. En cuanto a los patrones octeto, cúbico y cúbico bitruncado, de nuevo tienen un comportamiento bastante similar, siendo la pendiente de la recta ligeramente inferior en el cúbico. Por último, el patrón de relleno giroide cuenta con la mayor tasa de aumento de la relación resistencia – masa.

11. Conclusiones

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

- Tras la realización de los ensayos de resistencia a compresión de cada serie de probetas, se obtiene una gran cantidad de información acerca de la capacidad mecánica de cada patrón y densidad de relleno, que contribuye al avance del conocimiento de las propiedades mecánicas del PLA como material para la fabricación aditiva.
- Los tiempos de impresión varían entre los distintos patrones de relleno para una misma densidad de relleno, siendo el patrón de relleno giroide el que requiere mayor tiempo de impresión en todos los casos y el patrón de relleno subdivisión cúbica el que menos tiempo requiere en todas las densidades de relleno. Los tiempos de impresión en los patrones de relleno octeto, cúbico y cúbico bitruncado son prácticamente idénticos para todos los porcentajes de relleno.
- El patrón de relleno subdivisión cúbica posee la mayor resistencia a compresión con una densidad del 10 % y el patrón de relleno giroide la menor.
- El patrón de relleno giroide posee la mayor resistencia a compresión con las densidades del 20 %, 30 %, 40 % y 50 %, y el patrón subdivisión cúbica la menor.
- La resistencia a compresión del patrón de relleno giroide es de media un 10 % superior a la del resto de patrones de relleno.
- La duración de la impresión del patrón de relleno giroide es de media un 46 % superior a la del resto de patrones de relleno.
- Aunque el patrón de relleno giroide es el que más resiste los esfuerzos a compresión, habría que valorar si el incremento de su resistencia compensa el notable incremento en los tiempos de impresión. En su lugar se recomienda utilizar los patrones de relleno octeto, cúbico y cúbico bitruncado, ya que, aunque proporcionan una resistencia a compresión ligeramente inferior los tiempos de impresión son considerablemente menores. El patrón de relleno subdivisión cúbica sólo es viable con una densidad del 10 %, en el resto de las densidades su resistencia a compresión es inferior.

12. Conclusions

The main conclusions obtained from the study are listed below:

- After performing compressive strength tests on each series of samples, a large amount of information about the mechanical capacity of each infill pattern and density is obtained, which contributes to the advancement of the knowledge about the mechanical properties of PLA as a material for additive manufacturing.
- Printing times differ between the different infill patterns for the same infill density, with gyroid infill pattern requiring the longest printing time in all the cases and cubic subdivision infill pattern requiring the least amount of time in all the infill densities. The printing times for octet, cubic and cubic bitruncated infill patterns are almost identical for all infill percentages.
- Cubic subdivision infill pattern has the highest compressive strength at 10 % density and gyroid infill pattern the lowest.
- Gyroid infill pattern has the highest compressive strength at the densities 20 %, 30 %, 40 % and 50 %, and cubic subdivision pattern the lowest.
- The compressive strength of gyroid infill pattern is on average 10 % higher than the rest of infill patterns.
- The printing time for gyroid infill pattern is on average 46 % longer than for all other infill patterns.
- Although the gyroid infill pattern is the most resistant to compressive loads, it should be evaluated whether the increase in its resistance compensates for the significant increment in printing times. Octet, cubic and cubic bitruncated infill patterns are recommended instead, as they provide a slightly lower compressive strength but considerably shorter printing times. Cubic subdivision infill pattern is only viable at a density of 10 %, at all other densities its compressive strength is lower.

13. Líneas futuras de trabajo

La impresión 3D brinda infinitas posibilidades, por ello se considera que este proyecto se podría ampliar de muchas formas. A continuación, se proponen algunas ideas a partir de las cuales se puede seguir trabajando en la misma línea que el estudio realizado:

- Se puede completar el estudio añadiendo probetas con las densidades de relleno del 60 %, 70 %, 80 % y 90 %, y así conocer las propiedades mecánicas para el rango de densidades completo. Incluso se pueden añadir probetas con las densidades de relleno intermedias.
- Se pueden añadir otros patrones de relleno a los ya utilizados en este proyecto.
- En relación con el diseño de la probeta, se podrían variar las dimensiones de esta, o bien utilizar los diseños que recomiendan las normas *ASTM* o *UNE-EN*.
- Se puede completar la caracterización mecánica, realizando ensayos de tracción, flexión, dureza e impacto.
- Se puede realizar un estudio similar a este, pero utilizando distintos materiales. Sería interesante probar materiales como el PETG, ABS o PLA con aditivos. Para ver si el tipo de relleno y la densidad interviene en la resistencia de la misma manera que lo hace con el PLA.
- También se pueden variar los parámetros de impresión para ver cómo afectan a las características mecánicas de las probetas, como el número de líneas de contorno o el número de capas superiores e inferiores.
- Por último, se puede realizar un estudio de la isotropía en las diferentes geometrías de relleno, para ver cómo varían las propiedades mecánicas en distintas direcciones.

Bibliografía

- [1] W. P. Calle Guamantario, “Influencia de los parámetros de relleno en el comportamiento mecánico a la flexión de piezas fabricadas en impresoras 3D de bajo coste,” May 2016, Accessed: Nov. 16, 2021. [Online]. Available: <https://riunet.upv.es/handle/10251/64445>
- [2] K. L. C. Alvarez, R. F. C. Lagos, and M. Aizpun, “Influencia del porcentaje de relleno en la resistencia mecánica en impresión 3D, por medio del método de Modelado por Deposición Fundida (FDM),” *Ingeniare*, vol. 24, pp. 17–24, 2016, doi: 10.4067/S0718-33052016000500003.
- [3] V. González Cantón, “Estudio de la isotropía en geometrías de relleno en piezas de impresión 3D,” Jul. 2019, Accessed: Nov. 16, 2021. [Online]. Available: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/30138>
- [4] P. K. Mishra, P. Senthil, S. Adarsh, and M. S. Anoop, “An investigation to study the combined effect of different infill pattern and infill density on the impact strength of 3D printed polylactic acid parts,” *Composites Communications*, vol. 24, p. 100605, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.COCO.2020.100605.
- [5] M. S. Alsoufi *et al.*, “Experimental Characterization of the Influence of Nozzle Temperature in FDM 3D Printed Pure PLA and Advanced PLA+,” *American Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 7, 2019, Pages 45-60, vol. 7, no. 2, pp. 45–60, Apr. 2019, doi: 10.12691/AJME-7-2-1.
- [6] O. Basurto-Vázquez, E. P. Sánchez-Rodríguez, G. J. McShane, and D. I. Medina, “Load Distribution on PET-G 3D Prints of Honeycomb Cellular Structures under Compression Load,” *Polymers 2021*, Vol. 13, Page 1983, vol. 13, no. 12, p. 1983, Jun. 2021, doi: 10.3390/POLYM13121983.
- [7] M. José *et al.*, “Influencia de la posición de impresión y la densidad de relleno en las propiedades mecánicas de probetas fabricadas en ABS,” *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 19, no. 37, pp. 179–193, Mar. 2020, doi: 10.22395/RIUM.V19N37A9.

-
- [8] S. C. Ligon, R. Liska, J. Stampfl, M. Gurr, and R. Mülhaupt, “Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing,” *Chemical Reviews*, vol. 117, no. 15, pp. 10212–10290, Aug. 2017, doi: 10.1021/ACS.CHEMREV.7B00074.
- [9] N. GUO, M. C. LEU, N. GUO, and M. C. LEU, “Additive manufacturing: technology, applications and research needs,” *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 8, no. 3, pp. 215–243, Sep. 2013, doi: 10.1007/S11465-013-0248-8.
- [10] I. Gibson, D. W. Rosen, and B. Stucker, *Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing*. Springer US, 2010. doi: 10.1007/978-1-4419-1120-9.
- [11] D. I. Wimpenny, P. M. Pandey, and L. Jyothish Kumar, *Advances in 3D Printing & additive manufacturing technologies*. Springer Singapore, 2016. doi: 10.1007/978-981-10-0812-2.
- [12] Y. Zhai, D. A. Lados, and J. L. Lagoy, “Additive Manufacturing: Making imagination the major Limitation,” *JOM*, vol. 66, no. 5, pp. 808–816, Mar. 2014, doi: 10.1007/S11837-014-0886-2/TABLES/2.
- [13] M. Sireesha, J. Lee, A. S. Kranthi Kiran, V. J. Babu, B. B. T. Kee, and S. Ramakrishna, “A review on additive manufacturing and its way into the oil and gas industry,” *RSC Advances*, vol. 8, no. 40, pp. 22460–22468, Jun. 2018, doi: 10.1039/C8RA03194K.
- [14] “Industrial Applications of 3D Printing: The Ultimate Guide - AMFG.” <https://amfg.ai/industrial-applications-of-3d-printing-the-ultimate-guide/> (accessed Jan. 11, 2022).
- [15] B. Blakey-Milner *et al.*, “Metal additive manufacturing in aerospace: A review,” *Materials & Design*, vol. 209, p. 110008, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.MATDES.2021.110008.
- [16] J. H. Zhu, W. H. Zhang, and L. Xia, “Topology Optimization in Aircraft and Aerospace Structures Design,” *Archives of Computational Methods in Engineering* 2015 23:4, vol. 23, no. 4, pp. 595–622, Apr. 2015, doi: 10.1007/S11831-015-9151-2.

-
- [17] “Bugatti Chiron Titanium brake caliper 3D printed on SLM Solutions - YouTube.”
<https://www.youtube.com/watch?v=SRA5CFLYkUQ> (accessed Feb. 07, 2022).
- [18] “Testing the world’s first 3D printed Bugatti brake caliper - Bionic Production.”
<https://bionicproduction.com/en/2018/12/20/testing-the-worlds-first-3d-printed-bugatti-brake-caliper/> (accessed Feb. 07, 2022).
- [19] B. Durakovic, “Design for additive manufacturing: Benefits, trends and challenges,” *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, vol. 6, no. 2, pp. 179–191, 2018, doi: 10.21533/PEN.V6I2.224.
- [20] “3D printed medical implants for half the world | TRUMPF.”
https://www.trumpf.com/es_MX/newsroom/historias/3d-printed-medical-implants-for-half-the-world/ (accessed Feb. 07, 2022).
- [21] “How 3D Printing Is Disrupting the Footwear Industry «Fabbaloo.”
<https://www.fabbaloo.com/2019/07/how-3d-printing-is-disrupting-the-footwear-industry> (accessed Feb. 07, 2022).
- [22] “Interview with Freshfiber about using 3D printing to design personalised goods - 3Dnatives.”
<https://www.3dnatives.com/en/freshfiber-interview-070820195/> (accessed Feb. 07, 2022).
- [23] A. al Rashid, S. A. Khan, S. G. Al-Ghamdi, and M. Koç, “Additive manufacturing: Technology, applications, markets, and opportunities for the built environment,” *Automation in Construction*, vol. 118, p. 103268, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.AUTCON.2020.103268.
- [24] “Multifunctional Concrete -Additive Manufacturing by the Use of Lightweight Concrete.”
https://www.researchgate.net/publication/334318777_Multifunctional_Concrete_-_Additive_Manufacturing_by_the_Use_of_Lightweight_Concrete (accessed Feb. 07, 2022).
- [25] “¿Qué es OEM? – Definiciones de TI empresarial | HPE España.”
<https://www.hpe.com/es/es/what-is/oem.html> (accessed Jan. 11, 2022).

-
- [26] “SMS group GmbH: SIS Injector.” <https://www.sms-group.com/know-how/additive-manufacturing/additive-manufacturing-design/sis-injector> (accessed Feb. 07, 2022).
- [27] “Fabricación aditiva. Principios generales. Terminología.” *ISO/ASTM 52900:2017*.
- [28] A. Mostafaei *et al.*, “Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges,” *Progress in Materials Science*, vol. 119. Elsevier Ltd, Jun. 01, 2021. doi: 10.1016/j.pmatsci.2020.100707.
- [29] “3D printing - Additive | Make.” <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/3D-printing> (accessed Feb. 07, 2022).
- [30] K. S. B. Ribeiro, F. E. Mariani, and R. T. Coelho, “A Study of Different Deposition Strategies in Direct Energy Deposition (DED) Processes,” *Procedia Manufacturing*, vol. 48, pp. 663–670, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.PROMFG.2020.05.158.
- [31] M. Soshi, C. Yau, and R. Kusama, “Development and evaluation of a dynamic powder splitting system for the directed energy deposition (DED) process,” *CIRP Annals*, vol. 69, no. 1, pp. 341–344, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.CIRP.2020.04.048.
- [32] M. S. Alsoufi *et al.*, “Experimental Characterization of the Influence of Nozzle Temperature in FDM 3D Printed Pure PLA and Advanced PLA+,” *American Journal of Mechanical Engineering*, vol. 7, no. 2, pp. 45–60, 2019, doi: 10.12691/ajme-7-2-1.
- [33] A. A. Yousefi, “Effects of 3D printer nozzle head temperature on the physical and mechanical properties of PLA based product,” 2016, Accessed: Jan. 12, 2022. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/309721923>
- [34] “RepRap Wiki.” <https://reprap.org/wiki/RepRap> (accessed Dec. 29, 2021).
- [35] “Popularity of FDM.” <https://wohlersassociates.com/blog/2016/01/popularity-of-fdm/> (accessed Dec. 29, 2021).

-
- [36] L. D. Sturm, M. I. Albakri, P. A. Tarazaga, and C. B. Williams, “In situ monitoring of material jetting additive manufacturing process via impedance based measurements,” 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.05.022.
- [37] Y. L. Tee, P. Tran, M. Leary, P. Pille, and M. Brandt, “3D Printing of polymer composites with material jetting: Mechanical and fractographic analysis,” 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101558.
- [38] D. D. Singh, T. Mahender, and R. Reddy, “Powder bed fusion process: A brief review”, doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.415.
- [39] R. Singh *et al.*, “Powder bed fusion process in additive manufacturing: An overview,” 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.635.
- [40] P. Li *et al.*, “Dynamic Recrystallization and Recovery in Very High-Power Ultrasonic Additive Manufacturing,” *Advanced Engineering Materials*, vol. 23, no. 3, p. 2000958, Mar. 2021, doi: 10.1002/ADEM.202000958.
- [41] S. James and C. Dang, “Investigation of shear failure load in ultrasonic additive manufacturing of 3D CFRP/Ti structures,” 2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2020.04.026.
- [42] “Sheet Lamination | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University.”
<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sheetlamination/> (accessed Feb. 07, 2022).
- [43] X. Li and Y. Chen, “Vat-Photopolymerization-Based Ceramic Manufacturing,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 30, no. 7, pp. 4819–4836, Jul. 2021, doi: 10.1007/S11665-021-05920-Z/FIGURES/15.
- [44] X. Xu, A. Awad, P. Robles-Martinez, S. Gaisford, A. Goyanes, and A. W. Basit, “Vat photopolymerization 3D printing for advanced drug delivery and medical device applications,” *Journal of Controlled Release*, vol. 329, pp. 168–3659, 2021, doi: 10.1016/j.jconrel.2020.10.008.
- [45] F. Zhang *et al.*, “The recent development of vat photopolymerization: A review,” *Additive Manufacturing*, vol. 48. Elsevier B.V., Dec. 01, 2021. doi: 10.1016/j.addma.2021.102423.
-

- [46] U. M. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman, and M. Dolen, “The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0,” *Procedia Manufacturing*, vol. 11, pp. 545–554, 2017, doi: 10.1016/J.PROMFG.2017.07.148/THE_ROLE_OF_ADDITIVE_MANUFACTURING_IN_THE_ERA_OF_INDUSTRY_4_0.PDF.
- [47] S. Giner Grau, “Funcionalización y caracterización de Ácido Poliláctico (PLA) aditivado con Graphene Nanoplatelets (GNP s) y Carbon Black para el desarrollo de filamentos utilizados en la impresión 3D,” Oct. 2019, Accessed: Jan. 12, 2022. [Online]. Available: <https://riunet.upv.es/handle/10251/130002>
- [48] Y. A. Jin, H. Li, Y. He, and J. Z. Fu, “Quantitative analysis of surface profile in fused deposition modelling,” *Additive Manufacturing*, vol. 8, pp. 142–148, Oct. 2015, doi: 10.1016/J.ADDMA.2015.10.001.
- [49] S. Crump, “Apparatus and method for creating three-dimensional objects,” Oct. 30, 1989
- [50] O. A. Jorquera, *Fabricación Digital: Introducción al modelado e impresión 3D*. 2017.
- [51] A. J. García Albuquerque, “Optimización y caracterización de piezas de PLA fabricadas mediante técnicas aditivas,” Oct. 2014, Accessed: Nov. 16, 2021. [Online]. Available: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/19958>
- [52] M. Algarni and S. Ghazali, “Comparative Study of the Sensitivity of PLA, ABS, PEEK, and PETG’s Mechanical Properties to FDM Printing Process Parameters,” *Crystals 2021, Vol. 11, Page 995*, vol. 11, no. 8, p. 995, Aug. 2021, doi: 10.3390/CRYST11080995.
- [53] W. Wu, W. Ye, Z. Wu, P. Geng, Y. Wang, and J. Zhao, “Influence of Layer Thickness, Raster Angle, Deformation Temperature and Recovery Temperature on the Shape-Memory Effect of 3D-Printed Polylactic Acid Samples,” *Materials 2017, Vol. 10, Page 970*, vol. 10, no. 8, p. 970, Aug. 2017, doi: 10.3390/MA10080970.
- [54] I. J. Solomon, P. Sevvell, and J. Gunasekaran, “A review on the various processing parameters in FDM,” 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.484.

- [55] “3D Print Infill Settings - MY 3D PRINT PRO.” <http://www.my3dprintpro.com/infill.html> (accessed Feb. 18, 2022).
- [56] L. Baich, G. Manogharan, and H. Marie, “Study of infill print design on production cost-time of 3D printed ABS parts,” *International Journal of Rapid Manufacturing*, vol. 5, no. 3/4, p. 308, 2015, doi: 10.1504/IJRAPIDM.2015.074809.
- [57] “¿Qué es el ‘Infill’ en la impresión 3D? - 330ohms.” <https://blog.330ohms.com/2021/05/20/que-es-el-infill-en-la-impresion-3d/> (accessed Feb. 18, 2022).
- [58] M. Spoerk, J. Gonzalez-Gutierrez, J. Sapkota, S. Schuschnigg, and C. Holzer, “Effect of the printing bed temperature on the adhesion of parts produced by fused filament fabrication,” <https://doi.org/10.1080/14658011.2017.1399531>, vol. 47, no. 1, pp. 17–24, Jan. 2017, doi: 10.1080/14658011.2017.1399531.
- [59] “Cómo mejorar la sujeción de las piezas a la cama - Impresoras 3D.” <https://enthings.com/tutorial/como-mejorar-la-sujecion-de-las-piezas-la-cama/> (accessed Jan. 12, 2022).
- [60] F. Rayegani and G. C. Onwubolu, “Fused deposition modelling (fdm) process parameter prediction and optimization using group method for data handling (gmdh) and differential evolution (de),” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 73, no. 1–4, pp. 509–519, 2014, doi: 10.1007/S00170-014-5835-2.
- [61] M. Lucero, Q. Villagómez, L. Alejandro, A. Caracheo, G. R. Mondragón, and R. R. Castro, “Revisión del estado del arte de la fabricación de multimateriales por medio de impresión 3D,” *Pistas Educativas*, Oct. 2017, Accessed: Jan. 14, 2022. [Online]. Available: <http://www.itc.mx/ojs/index.php/pistas/article/view/885>
- [62] A. Dey and N. Yodo, “A Systematic Survey of FDM Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics,” *Journal of Manufacturing and Materials Processing 2019, Vol. 3, Page 64*, vol. 3, no. 3, p. 64, Jul. 2019, doi: 10.3390/JMMP3030064.

-
- [63] “Filamento Policarbonato para impresoras 3D | Stratasys.” <https://www.stratasys.com/es/materials/search/pc> (accessed Jan. 14, 2022).
- [64] M. Rinaldi, F. Cecchini, L. Pigliaru, T. Ghidini, F. Lumaca, and F. Nanni, “Additive Manufacturing of Polyether Ether Ketone (PEEK) for Space Applications: A Nanosat Polymeric Structure,” *Polymers 2021, Vol. 13, Page 11*, vol. 13, no. 1, p. 11, Dec. 2020, doi: 10.3390/POLYM13010011.
- [65] J. M. Mercado-Colmenero, M. Dolores La Rubia, E. Mata-Garcia, M. Rodriguez-Santiago, and C. Martin-Doñate, “Experimental and Numerical Analysis for the Mechanical Characterization of PETG Polymers Manufactured with FDM Technology under Pure Uniaxial Compression Stress States for Architectural Applications,” *Polymers 2020, Vol. 12, Page 2202*, vol. 12, no. 10, p. 2202, Sep. 2020, doi: 10.3390/POLYM12102202.
- [66] “Explicación de los 4 tipos de impresoras 3D FDM.” <https://3dbuilders.pro/explicacion-de-los-4-tipos-de-impresoras-3d-fdm-cartesiano-delta-polar-y-escara/> (accessed Jan. 19, 2022).
- [67] “Tipos de impresoras 3D FDM: Delta, Cartesiana, Polar y Brazo robótico.” <https://www.3dnatives.com/es/tipos-impresoras-3d-fdm-190620172/#!> (accessed Jan. 19, 2022).
- [68] “Prusa 3D.” <https://www.prusa3d.com/es/> (accessed Feb. 07, 2022).
- [69] “Los 4 tipos de impresoras 3D por tecnología FDM.” <http://imprimalia3d.com/noticias/2020/07/20/0011551/4-tipos-impresoras-3d-tecnolog-fdm> (accessed Jan. 19, 2022).
- [70] “Polar 3D’s Polar Coordinate Based 3D Printer.” <https://3dprintboard.com/showthread.php?9660-Polar-3D-s-Polar-Coordinate-Based-3D-Printer> (accessed Feb. 07, 2022).
- [71] “Monoprice MP Delta Pro.” <https://3druck.com/produkt/monoprice-mp-delta-pro/> (accessed Feb. 07, 2022).
- [72] A. Kampker, J. Triebs, S. Kawollek, P. Ayvaz, and S. Hohenstein, “Review on machine designs of material extrusion based additive manufacturing (AM) systems

- Status-Quo and potential analysis for future AM systems,” *Procedia CIRP*, vol. 81, pp. 815–819, 2019, doi: 10.1016/J.PROCIR.2019.03.205.
- [73] “DOBOT Magician - Lightweight Intelligent Training Robotic Arm.” <https://www.dobot.cc/dobot-magician/product-overview.html> (accessed Feb. 07, 2022).
- [74] “Creality3D CR-10 S4.” <https://creality3d.shop/products/creality-cr-10-s4-3d-printer-with-filament-monitor-dual-z-axis-large-printing-size-400x400x400mm?lang=es> (accessed Jan. 19, 2022).
- [75] “Extrusor Bondtech - BMG Extruder.” <https://meikinit.com/producto/extrusor-bondtech-bmg-extruder/> (accessed Jan. 19, 2022).
- [76] “3DTouch Auto Leveling Sensor - Geeetech Wiki.” https://www.geeetech.com/wiki/index.php/3DTouch_Auto_Leveling_Sensor (accessed Jan. 19, 2022).
- [77] “MISOL Wireless Weather Station.” <https://www.amazon.es/MISOL-Wireless-meteorol%C3%B3gica-inal%C3%A1mbrica-registrador/dp/B071H9JSQT> (accessed Jan. 19, 2022).
- [78] “Powerfix(R) Calibre.” <https://offers.kd2.org/es/es/lidl/pdLjQ/> (accessed Jan. 19, 2022).
- [79] “Máquina para envasar al vacío QILIVE.” <https://www.alcampo.es/compra-online/electrodomesticos/cocinado/conservacion-de-alimentos/qilive-maquina-para-ensavar-al-vacio/p/681251> (accessed Jan. 19, 2022).
- [80] “Comprar PLA - Filamentos SmartMaterials3D.” https://www.smartmaterials3d.com/pla-filamento#/2-tamano-m_750g/26-diametro-175_mm/93-color-coral (accessed Feb. 08, 2022).
- [81] “Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics.” <https://www.astm.org/d0695-15.html> (accessed Feb. 20, 2022).
- [82] “UNE-EN ISO 604:2003 Plásticos. Determinación de las propiedades en compresión.”

-
- [83] “Infill en Cura: los mejores patrones de relleno | All3DP.” <https://all3dp.com/es/2/infill-cura-relleno-impresion-3d/> (accessed Jan. 12, 2022).
- [84] “CLEAN - Filamentos SmartMaterials3D.” https://www.smartmaterials3d.com/clean-filamento#/1-tamano-s_330g/25-color-natural/26-diametro-175_mm (accessed Feb. 13, 2022).
- [85] “DIMAFIX Pen.” <https://servitec3d.com/adhesivos-impresion-3d/dimafix-pen/> (accessed Feb. 13, 2022).
- [86] “Cómo solucionar atasco en la boquilla o nozzle - impresoras3d.com.” <https://www.impresoras3d.com/como-solucionar-atasco-en-la-boquilla-o-nozzle/> (accessed Feb. 16, 2022).
- [87] “E3d-v6 volcano boquilla laton para extrusora 0.4mm para filamento de 1.75mm.” <https://sensakey.com/boquillas/e3d-v6-volcano-boquilla-laton-para-extrusora-0-4mm-para-filamento-de-1-75mm/gmx-niv416-con9373.htm> (accessed Feb. 16, 2022).
- [88] “Agujas de limpieza boquilla impresora 3D.” <https://www.amazon.es/limpieza-boquilla-impresora-inoxidable-piezas/dp/B0759YKY1S> (accessed Feb. 16, 2022).

Glosario de términos

Aglutinante	Sustancia que permite unir varios elementos distintos entre sí.
Biomaterial	Es cualquier sustancia que ha sido diseñada para interactuar con los sistemas biológicos con un propósito médico, ya sea terapéutico o de diagnóstico.
Boquilla (Nozzle)	Es el orificio de la impresora 3D por el que sale el filamento y el que marca el diámetro de la extrusión.
CAD	El diseño asistido por ordenador consiste en el uso de programas de ordenador para crear, modificar, analizar y documentar representaciones gráficas 2D o 3D.
Coefficiente de variación	Es la relación entre la desviación estándar de una muestra y su media.
Desviación estándar	Es una medida que se utiliza para cuantificar la variación o la dispersión de un conjunto de datos numéricos.
Extrusor	Es la parte de la impresora 3D encargada de fundir y expulsar el filamento a través de la boquilla.
Fabricación aditiva (AM)	Es una técnica de fabricación que permite producir objetos tridimensionales a partir de un modelo digital mediante la superposición de capas sucesivas de material.
Fotoiniciador	Elemento que tiene la capacidad de absorber energía luminosa y transformarla en química, llevando a cabo una reacción.
Fotopolimerización	Es una reacción de polimerización inducida por la luz.
Fotopolímero	Es un polímero que cambia sus propiedades al ser expuesto a cierto espectro de luz.

G-Code	Es el lenguaje de programación más utilizado en control numérico.
Higroscopia	Es la capacidad de una sustancia o material de absorber humedad del medio circundante.
Ingeniería inversa	Es una metodología que se utiliza para obtener modelos o duplicados a partir de un objeto de referencia.
Material clasificado funcionalmente (FGM)	Material caracterizado por la variación de la composición y la estructura gradualmente a lo largo del volumen.
Monómero	Es una molécula de pequeña masa molecular que está unida a otros monómeros por medio de enlaces químicos, formando macromoléculas llamadas polímeros.
OEM	Se denomina fabricante de equipo original a la empresa que confecciona piezas o componentes que se utilizan en los productos de otras empresas.
Offset	Es la distancia existente entre la punta de la boquilla y la base cuando el sensor de nivelación detecta la misma.
Oligómero	Molécula compleja que se compone de unas pocas unidades monoméricas.
Optimización topológica	Es una técnica que consiste en el aligeramiento estructural de un componente o estructura manteniendo sus funcionalidades mecánicas.
Polimerización	Es un proceso químico por el que los reactivos (monómeros) se agrupan químicamente entre sí dando lugar a una molécula de gran peso (polímero).
Polímero	Macromolécula formada por una gran cantidad de monómeros.

Polímero amorfo	Es un sólido cuyas moléculas no están dispuestas en una red cristalina, sino de forma desordenada.
Prototipado rápido (RP)	Es el grupo de técnicas que permiten la fabricación, de forma rápida, de un modelo a escala utilizando información suministrada por un sistema CAD.
Radiación ultravioleta (UV)	Radiación electromagnética de longitud de onda más corta que la luz visible, pero más larga que los rayos X.
Sinterización	Es el tratamiento térmico de un polvo o compactado metálico a una temperatura inferior a la de fusión de la mezcla, para aumentar sus propiedades mecánicas.
STL	Es un formato de archivo informático de diseño asistido por computadora que define geometría de objetos 3D.
Termoplástico	Es un material que se ablanda por la acción de calor y se endurece al enfriarse, de forma reversible.
Time to market	Es el tiempo que transcurre desde que se concibe un producto hasta que está disponible para la venta.
Warping	Fenómeno producido cuando la primera capa de una pieza se deforma y se despega de la superficie de impresión.

Índice de figuras

Figura 6.1. Optimización topológica y FA de una pieza de avión [16].....	12
Figura 6.2. Pinza de freno del Bugatti Chiron impresa en titanio [17], [18].....	12
Figura 6.3. Implante facial fabricado mediante impresión 3D [20].	13
Figura 6.4. Bienes de consumo fabricados mediante impresión 3D [21], [22].	13
Figura 6.5. Fabricación aditiva por extrusión de hormigón fresco in situ [24].	14
Figura 6.6. Inyector SIS obtenido mediante fabricación aditiva [26].	14
Figura 6.7. Esquema del proceso BJ [29].	16
Figura 6.8. Ilustración del proceso DED [29].	16
Figura 6.9. Esquema del proceso FDM [29].	18
Figura 6.10. Esquema del proceso MJ [29].	18
Figura 6.11. Esquema del proceso PBF [29].	19
Figura 6.12. Esquema del proceso LOM [42].	21
Figura 6.13. Esquema del proceso VPP [29].	21
Figura 6.14. Esquema de los procesos de fabricación aditiva [46].	22
Figura 6.15. Esquema del proceso FDM [48].	23
Figura 6.16. Orientación de la pieza [52].	24
Figura 6.17. Efectos de los distintos espesores de capa en una taza de té [52].	24
Figura 6.18. Ilustración gráfica del ángulo de deposición [54].	25
Figura 6.19. Densidades de relleno para el patrón de relleno <i>honeycomb</i> [55].	25
Figura 6.20. Patrones de relleno [57].	26
Figura 6.21. Representación gráfica del parámetro <i>air gap</i> [60].	27
Figura 6.22. Impresora 3D cartesiana [68].	30
Figura 6.23. Impresora 3D polar [70].	31
Figura 6.24. Impresora 3D delta [71].	32
Figura 6.25. Impresora 3D de brazo robótico [73].	32
Figura 6.26. Esquema de los distintos tipos de impresoras 3D FDM [72].	33
Figura 7.1. Impresora 3D <i>Creality CR-10 S4</i> [74].	34
Figura 7.2. <i>BondTech BMG</i> y <i>3DTouch</i> [75], [76].	34
Figura 7.3. Estación meteorológica [77].	35
Figura 7.4. Balanza de análisis [fuente propia].	35
Figura 7.5. Calibrador digital [78].	36

Figura 7.6. Máquina para envasar al vacío [79].	36
Figura 7.7. Máquina universal de ensayos [fuente propia].	37
Figura 8.1. Filamento PLA Smarfil Coral [80].	38
Figura 8.2. Diseño 3D de las probetas [fuente propia].	39
Figura 8.3. Interfaz del software de laminado 3D <i>Ultimaker Cura 4.6</i> .	39
Figura 8.4. Densidades y patrones de relleno utilizados en este proyecto.	41
Figura 8.5. Filamento de limpieza utilizado [84].	42
Figura 8.6. Adhesivo <i>antiwarping</i> [85].	42
Figura 8.7. Imagen tomada durante la impresión.	43
Figura 8.8. Serie de probetas numerada tras finalizar la impresión.	43
Figura 8.9. Todas las probetas envasadas al vacío y etiquetadas.	44
Figura 8.10. Filamento entrelazado y probetas defectuosas.	45
Figura 8.11. Representación gráfica de la obstrucción de la boquilla [86].	45
Figura 8.12. Probetas defectuosas por la obstrucción de la boquilla.	46
Figura 8.13. Boquillas y agujas de limpieza [87], [88].	46
Figura 8.14. Probetas defectuosas tras la rotura del filamento.	47
Figura 9.1. Máquina universal de ensayos y ordenador utilizados.	48
Figura 9.2. Interfaz del software <i>Trapezium</i> .	49
Figura 9.3. Imagen tomada durante el ensayo.	50
Figura 9.4. Imagen de las probetas antes y después del ensayo.	50
Figura 9.5. Curva característica de esfuerzo/deformación [82].	51
Figura 10.1. Resistencia a compresión – Giroide.	54
Figura 10.2. Resistencia a compresión – Octeto.	56
Figura 10.3. Resistencia a compresión – Cúbico.	57
Figura 10.4. Resistencia a compresión – Cúbico bitruncado.	58
Figura 10.5. Resistencia a compresión – Subdivisión cúbica.	59
Figura 10.6. Estudio de correlación.	60
Figura 10.7. Probetas tras la impresión.	61
Figura 10.8. Ajuste lineal de la resistencia a compresión.	63
Figura 10.9. Tiempo de impresión de las probetas.	64
Figura 10.10. Masa de las probetas.	65
Figura 10.11. Relación resistencia – masa.	66

Índice de tablas

Tabla 8.1. Dimensiones de las probetas.	38
Tabla 8.2. Principales parámetros de impresión.....	40
Tabla 10.1. Resultados resistencia a compresión – Giroide.....	55
Tabla 10.2. Resultados resistencia a compresión – Octeto.....	56
Tabla 10.3. Resultados resistencia a compresión – Cúbico.....	57
Tabla 10.4. Resultados resistencia a compresión – Cúbico bitruncado.....	58
Tabla 10.5. Resultados resistencia a compresión – Subdivisión cúbica.....	59
Tabla 10.6. Ecuaciones de ajuste y valores de R^2	61
Tabla 10.7. Resistencia a compresión de cada patrón y densidad de relleno.....	62

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

SECCIÓN DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE PROBETAS

FABRICADAS EN PLA CON DISTINTO RELLENO

ANEXOS

Titulación

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor

Gonzalo Lugo Velázquez

Índice anexos

Anexo I. Dimensiones de las probetas.....	87
Anexo II. Datos de impresión.....	93
Anexo III. Tablas resultados individuales	95
Anexo IV. Gráficas resultados individuales	100
Anexo V. Ficha técnica PLA	125
Anexo VI. Imágenes de roturas	126

Anexo I. Dimensiones de las probetas

La Figura I.1. muestra un esquema con las dimensiones medidas en cada una de las probetas. Las caras superior e inferior, sombreadas en rojo, son las superficies donde apoyan los discos de compresión de la máquina de ensayos durante la realización del ensayo de resistencia a compresión.

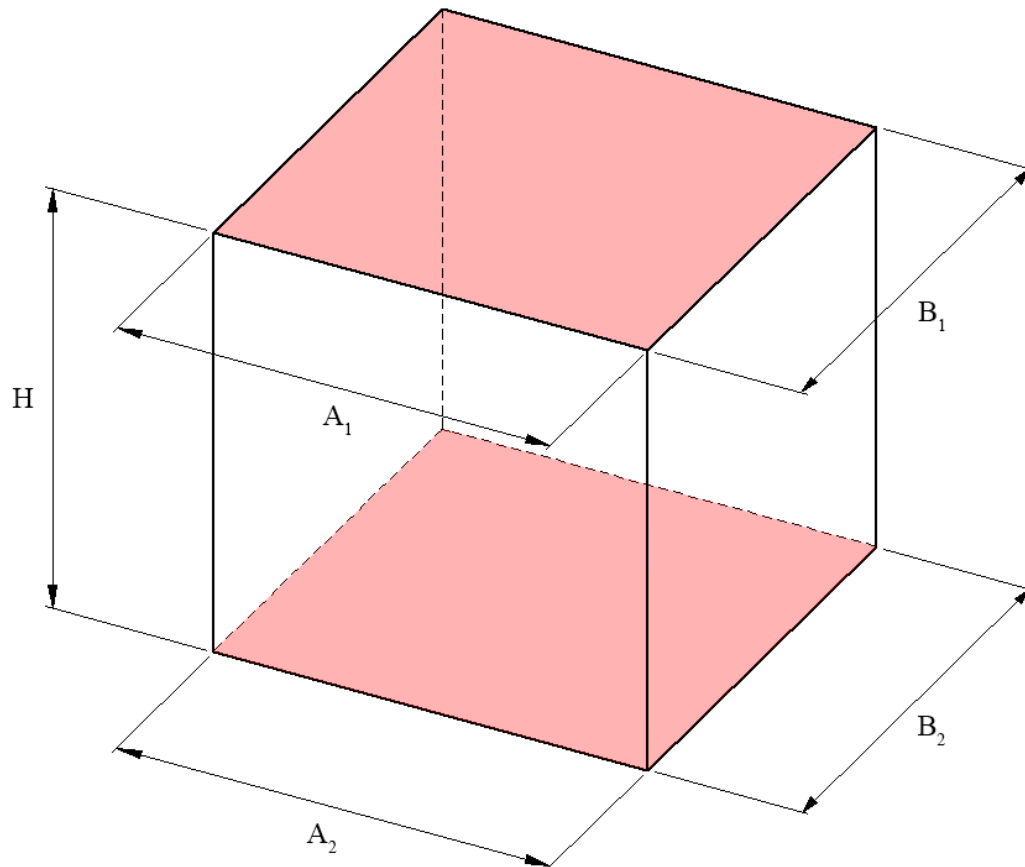


Figura I.1. Esquema de medición de las probetas.

I.1. Giroide

Relleno [%]	Nº Probeta	Dimensiones							Peso [g]
		A ₁ [mm]	A ₂ [mm]	B ₁ [mm]	B ₂ [mm]	A _m [mm]	B _m [mm]	H [mm]	
10	1	30.29	30.26	30.41	30.28	30.28	30.35	29.97	8.578
	2	30.22	30.18	30.41	30.38	30.20	30.40	29.88	8.578
	3	30.20	30.14	30.46	30.41	30.17	30.44	29.87	8.573
	4	30.32	30.35	30.39	30.41	30.34	30.40	29.83	8.617
	5	30.19	30.30	30.41	30.29	30.25	30.35	29.88	8.637
	6	30.21	30.14	30.41	30.40	30.18	30.41	29.86	8.622
20	1	30.27	30.21	30.38	30.35	30.24	30.37	29.80	11.926
	2	30.20	30.22	30.41	30.35	30.21	30.38	29.80	11.912
	3	30.22	30.12	30.42	30.39	30.17	30.41	29.80	11.959
	4	30.30	30.29	30.38	30.34	30.30	30.36	29.76	11.974
	5	30.18	30.15	30.40	30.37	30.17	30.39	29.81	11.967
	6	30.18	30.09	30.41	30.38	30.14	30.40	29.81	11.952
30	1	30.45	30.42	30.40	30.41	30.44	30.41	29.83	14.582
	2	30.21	30.25	30.43	30.46	30.23	30.45	29.94	14.591
	3	30.31	30.17	30.43	30.40	30.24	30.42	29.94	14.607
	4	30.42	30.31	30.38	30.38	30.37	30.38	29.78	14.567
	5	30.21	30.37	30.40	30.38	30.29	30.39	29.87	14.555
	6	30.27	30.18	30.45	30.38	30.23	30.42	29.90	14.586
40	1	30.31	30.32	30.39	30.36	30.32	30.38	29.66	17.330
	2	30.23	30.20	30.40	30.40	30.22	30.40	29.76	17.338
	3	30.17	30.25	30.45	30.39	30.21	30.42	29.77	17.383
	4	30.34	30.35	30.41	30.37	30.35	30.39	29.65	17.345
	5	30.22	30.18	30.44	30.42	30.20	30.43	29.73	17.353
	6	30.19	30.23	30.43	30.39	30.21	30.41	29.75	17.395
50	1	30.42	30.27	30.41	30.39	30.35	30.40	29.77	19.739
	2	30.20	30.22	30.46	30.38	30.21	30.42	29.83	19.729
	3	30.31	30.19	30.45	30.37	30.25	30.41	29.84	19.764
	4	30.41	30.30	30.42	30.40	30.36	30.41	29.82	19.771
	5	30.38	30.17	30.42	30.40	30.28	30.41	29.83	19.748
	6	30.32	30.17	30.46	30.36	30.25	30.41	29.83	19.774

Tabla I.1. Dimensiones de las probetas – Giroide.

I.2. Octeto

Relleno [%]	Nº Probeta	Dimensiones							Peso [g]
		A ₁ [mm]	A ₂ [mm]	B ₁ [mm]	B ₂ [mm]	A _m [mm]	B _m [mm]	H [mm]	
10	1	30.30	30.33	30.43	30.38	30.32	30.41	29.87	8.885
	2	30.28	30.36	30.41	30.45	30.32	30.43	29.91	8.899
	3	30.34	30.19	30.42	30.42	30.27	30.42	29.90	8.911
	4	30.36	30.31	30.43	30.39	30.34	30.41	29.82	8.900
	5	30.30	30.18	30.43	30.51	30.24	30.47	29.88	8.902
	6	30.23	30.17	30.42	30.43	30.20	30.43	29.90	8.904
20	1	30.25	30.28	30.40	30.45	30.27	30.43	29.86	11.404
	2	30.20	30.18	30.42	30.44	30.19	30.43	29.90	11.401
	3	30.16	30.19	30.43	30.46	30.18	30.45	29.90	11.427
	4	30.28	30.32	30.37	30.40	30.30	30.39	29.88	11.428
	5	30.16	30.19	30.43	30.47	30.18	30.45	29.90	11.411
	6	30.15	30.22	30.42	30.43	30.19	30.43	29.90	11.424
30	1	30.24	30.29	30.37	30.39	30.27	30.38	29.83	13.151
	2	30.16	30.17	30.30	30.37	30.17	30.34	29.84	13.112
	3	30.16	30.17	30.43	30.51	30.17	30.47	29.82	13.137
	4	30.30	30.30	30.39	30.41	30.30	30.40	29.80	13.154
	5	30.12	30.16	30.36	30.37	30.14	30.37	29.84	13.128
	6	30.16	30.15	30.37	30.34	30.16	30.36	29.80	13.139
40	1	30.20	30.25	30.34	30.41	30.23	30.38	29.94	16.408
	2	30.20	30.21	30.38	30.36	30.21	30.37	29.96	16.410
	3	30.28	30.19	30.41	30.35	30.24	30.38	29.93	16.415
	4	30.31	30.25	30.38	30.32	30.28	30.35	29.91	16.420
	5	30.17	30.31	30.38	30.35	30.24	30.37	29.95	16.417
	6	30.20	30.16	30.37	30.36	30.18	30.37	29.94	16.428
50	1	30.27	30.29	30.46	30.49	30.28	30.48	29.92	19.002
	2	30.24	30.26	30.47	30.43	30.25	30.45	29.91	18.992
	3	30.25	30.14	30.46	30.47	30.20	30.47	29.93	18.999
	4	30.30	30.31	30.40	30.42	30.31	30.41	29.90	18.994
	5	30.21	30.26	30.46	30.47	30.24	30.47	29.90	18.978
	6	30.33	30.19	30.47	30.46	30.26	30.47	29.92	19.008

Tabla I.2. Dimensiones de las probetas – Octeto.

I.3. Cúbico

Relleno [%]	Nº Probeta	Dimensiones							Peso [g]
		A ₁ [mm]	A ₂ [mm]	B ₁ [mm]	B ₂ [mm]	A _m [mm]	B _m [mm]	H [mm]	
10	1	30.35	30.37	30.41	30.40	30.36	30.41	29.74	8.439
	2	30.29	30.30	30.41	30.44	30.30	30.43	29.73	8.432
	3	30.23	30.28	30.42	30.40	30.26	30.41	29.72	8.417
	4	30.39	30.46	30.40	30.39	30.43	30.40	29.69	8.453
	5	30.27	30.28	30.39	30.40	30.28	30.40	29.72	8.417
	6	30.26	30.22	30.41	30.40	30.24	30.41	29.70	8.412
20	1	30.27	30.19	30.34	30.35	30.23	30.35	29.90	11.236
	2	30.20	30.18	30.37	30.33	30.19	30.35	29.90	11.233
	3	30.21	30.10	30.36	30.41	30.16	30.39	29.90	11.243
	4	30.25	30.24	30.36	30.37	30.25	30.37	29.84	11.254
	5	30.25	30.10	30.37	30.38	30.18	30.38	29.91	11.252
	6	30.25	30.06	30.38	30.37	30.16	30.38	29.92	11.252
30	1	30.28	30.25	30.37	30.36	30.27	30.37	29.90	14.173
	2	30.19	30.26	30.36	30.39	30.23	30.38	29.89	14.161
	3	30.16	30.20	30.44	30.35	30.18	30.40	29.86	14.153
	4	30.26	30.30	30.32	30.43	30.28	30.38	29.82	14.178
	5	30.27	30.12	30.35	30.39	30.20	30.37	29.87	14.171
	6	30.18	30.28	30.37	30.38	30.23	30.38	29.90	14.155
40	1	30.21	30.21	30.29	30.35	30.21	30.32	29.80	17.268
	2	30.13	30.24	30.31	30.27	30.19	30.29	29.86	17.254
	3	30.16	30.18	30.33	30.37	30.17	30.35	29.84	17.257
	4	30.15	30.19	30.30	30.26	30.17	30.28	29.82	17.261
	5	30.12	30.24	30.36	30.31	30.18	30.34	29.90	17.252
	6	30.26	30.16	30.36	30.32	30.21	30.34	29.83	17.258
50	1	30.24	30.38	30.45	30.46	30.31	30.46	29.96	17.866
	2	30.19	30.20	30.43	30.45	30.20	30.44	29.88	17.825
	3	30.17	30.19	30.19	30.44	30.18	30.32	29.91	17.790
	4	30.30	30.37	30.37	30.42	30.34	30.40	29.83	17.852
	5	30.17	30.15	30.15	30.43	30.16	30.29	29.94	17.817
	6	30.21	30.16	30.16	30.43	30.19	30.30	29.84	17.832

Tabla I.3. Dimensiones de las probetas – Cúbico.

I.4. Cúbico bitruncado

Relleno [%]	N° Probeta	Dimensiones							Peso [g]
		A ₁ [mm]	A ₂ [mm]	B ₁ [mm]	B ₂ [mm]	A _m [mm]	B _m [mm]	H [mm]	
10	1	30.23	30.26	30.34	30.37	30.25	30.36	29.87	8.884
	2	30.18	30.16	30.30	30.31	30.17	30.31	29.88	8.876
	3	30.16	30.09	30.41	30.37	30.13	30.39	29.87	8.887
	4	30.27	30.16	30.30	30.32	30.22	30.31	29.85	8.895
	5	30.22	30.18	30.35	30.30	30.20	30.33	29.89	8.884
	6	30.15	30.10	30.35	30.31	30.13	30.33	29.87	8.884
20	1	30.17	30.32	30.30	30.24	30.25	30.27	29.86	11.963
	2	30.16	30.18	30.36	30.38	30.17	30.37	29.93	11.958
	3	30.12	30.14	30.37	30.30	30.13	30.34	29.87	11.954
	4	30.17	30.27	30.28	30.37	30.22	30.33	29.81	11.968
	5	30.19	30.13	30.35	30.38	30.16	30.37	29.92	11.953
	6	30.12	30.11	30.34	30.38	30.12	30.36	29.92	11.955
30	1	30.22	30.16	30.35	30.33	30.19	30.34	29.93	13.996
	2	30.16	30.18	30.35	30.36	30.17	30.36	29.95	13.978
	3	30.19	30.08	30.39	30.35	30.14	30.37	29.92	13.987
	4	30.22	30.28	30.38	30.35	30.25	30.37	29.94	14.013
	5	30.15	30.16	30.39	30.35	30.16	30.37	29.91	13.984
	6	30.14	30.12	30.39	30.38	30.13	30.39	29.90	14.004
40	1	30.23	30.32	30.34	30.35	30.28	30.35	29.96	16.951
	2	30.19	30.24	30.35	30.38	30.22	30.37	29.91	16.934
	3	30.25	30.18	30.39	30.37	30.22	30.38	29.90	16.936
	4	30.30	30.33	30.36	30.36	30.32	30.36	29.86	16.965
	5	30.22	30.18	30.36	30.43	30.20	30.40	29.90	16.948
	6	30.13	30.16	30.36	30.43	30.15	30.40	29.87	16.949
50	1	30.34	30.34	30.18	30.52	30.34	30.35	29.92	18.142
	2	30.22	30.26	30.44	30.43	30.24	30.44	29.91	18.113
	3	30.23	30.19	30.47	30.45	30.21	30.46	29.96	18.136
	4	30.35	30.31	30.43	30.43	30.33	30.43	29.80	18.154
	5	30.21	30.20	30.48	30.45	30.21	30.47	29.93	18.175
	6	30.23	30.20	30.46	30.42	30.22	30.44	29.92	18.159

Tabla I.4. Dimensiones de las probetas – Cúbico bitruncado.

I.5. Subdivisión cúbica

Relleno [%]	Nº Probeta	Dimensiones							Peso [g]
		A ₁ [mm]	A ₂ [mm]	B ₁ [mm]	B ₂ [mm]	A _m [mm]	B _m [mm]	H [mm]	
10	1	30.34	30.38	30.46	30.41	30.36	30.44	29.87	8.590
	2	30.36	30.20	30.40	30.42	30.28	30.41	29.83	8.595
	3	30.30	30.27	30.45	30.40	30.29	30.43	29.88	8.615
	4	30.36	30.44	30.44	30.41	30.40	30.43	29.77	8.603
	5	30.31	30.29	30.45	30.43	30.30	30.44	29.88	8.597
	6	30.32	30.29	30.53	30.51	30.31	30.52	29.88	8.574
20	1	30.16	30.30	30.40	30.38	30.23	30.39	29.81	10.290
	2	30.14	30.13	30.42	30.40	30.14	30.41	29.80	10.284
	3	30.16	30.17	30.44	30.41	30.17	30.43	29.82	10.319
	4	30.26	30.26	30.38	30.36	30.26	30.37	29.80	10.314
	5	30.13	30.26	30.41	30.40	30.20	30.41	29.84	10.298
	6	30.16	30.18	30.42	30.41	30.17	30.42	29.85	10.305
30	1	30.20	30.15	30.43	30.32	30.18	30.38	29.87	12.596
	2	30.16	30.12	30.32	30.33	30.14	30.33	29.87	12.470
	3	30.18	30.17	30.40	30.37	30.18	30.39	29.85	12.577
	4	30.20	30.13	30.28	30.30	30.17	30.29	29.86	12.590
	5	30.18	30.12	30.35	30.37	30.15	30.36	29.88	12.521
	6	30.13	30.10	30.36	30.36	30.12	30.36	29.87	12.456
40	1	30.26	30.24	30.43	30.41	30.25	30.42	29.92	13.441
	2	30.19	30.26	30.38	30.37	30.23	30.38	29.96	13.490
	3	30.20	30.14	30.40	30.36	30.17	30.38	29.93	13.492
	4	30.34	30.32	30.37	30.35	30.33	30.36	29.90	13.396
	5	30.27	30.22	30.40	30.37	30.25	30.39	29.92	13.301
	6	30.17	30.11	30.38	30.36	30.14	30.37	29.92	13.503
50	1	30.25	30.19	30.33	30.36	30.22	30.35	29.96	15.276
	2	30.23	30.21	30.32	30.42	30.22	30.37	29.96	15.450
	3	30.12	30.22	30.41	30.33	30.17	30.37	29.98	15.743
	4	30.20	30.17	30.40	30.35	30.19	30.38	29.93	15.451
	5	30.15	30.17	30.34	30.34	30.16	30.34	29.92	15.730
	6	30.18	30.14	30.38	30.43	30.16	30.41	29.89	15.369

Tabla I.5. Dimensiones de las probetas – Subdivisión cúbica.

Anexo II. Datos de impresión

II.1. Giroide

Relleno [%]	Fecha de impresión	Tiempo de impresión			Temperatura [°C]	Humedad [%]
		[h]	[m]	[s]		
10	21/10/2021	5	59	48	23.5	55
20	04/11/2021	7	52	58	21.9	59
30	21/10/2021	10	48	18	23.9	55
40	20/10/2021	13	12	29	23.3	40
50	08/10/2021	17	1	25	22.9	62

Tabla II.1. Datos de impresión – Giroide.

II.2. Octeto

Relleno [%]	Fecha de impresión	Tiempo de impresión			Temperatura [°C]	Humedad [%]
		[h]	[m]	[s]		
10	21/10/2021	5	38	55	23.9	56
20	04/11/2021	6	43	21	21.8	66
30	18/11/2021	7	47	48	20.6	56
40	17/11/2021	8	34	25	20.0	59
50	05/11/2021	9	42	25	21.6	67

Tabla II.2. Datos de impresión – Octeto.

II.3. Cúbico

Relleno [%]	Fecha de impresión	Tiempo de impresión			Temperatura [°C]	Humedad [%]
		[h]	[m]	[s]		
10	14/10/2021	5	34	48	23.2	58
20	19/11/2021	6	41	28	21.1	56
30	16/11/2021	7	39	13	20.0	62
40	11/11/2021	8	42	47	21.2	59
50	09/11/2021	9	41	33	20.6	56

Tabla II.3. Datos de impresión – Cúbico.

II.5. Cúbico bitruncado

Relleno [%]	Fecha de impresión	Tiempo de impresión			Temperatura [°C]	Humedad [%]
		[h]	[m]	[s]		
10	22/11/2021	5	37	21	21.2	62
20	11/11/2021	6	44	29	20.7	64
30	19/11/2021	7	48	6	20.9	56
40	16/11/2021	8	49	22	19.9	60
50	22/10/2021	9	51	27	24.0	57

Tabla II.4. Datos de impresión – Cúbico bitruncado.

II.6. Subdivisión cúbica

Relleno [%]	Fecha de impresión	Tiempo de impresión			Temperatura [°C]	Humedad [%]
		[h]	[m]	[s]		
10	08/10/2021	5	21	46	22.9	62
20	11/11/2021	6	44	29	20.7	64
30	12/11/2021	7	7	10	20.8	61
40	18/11/2021	7	55	6	19.6	60
50	12/11/2021	8	40	49	20.7	64

Tabla II.5. Datos de impresión – Subdivisión cúbica.

Anexo III. Tablas resultados individuales

III.1. Giroide

Relleno	Magnitud	Unidad	1	2	3	4	5	6
10 %	Módulo de elasticidad	[MPa]	377.26	373.86	388.56	378.00	390.83	393.28
	R. a compresión (R_C)	[MPa]	8.71	7.04	8.00	8.26	7.71	8.41
	Límite elástico (σ_y)	[MPa]	8.30	6.50	7.50	7.90	7.20	7.80
	Deformación	[%]	3.20	2.59	2.86	2.86	2.69	2.98
20 %	Módulo de elasticidad	[MPa]	504.47	517.75	527.90	516.92	523.41	530.37
	R. a compresión (R_C)	[MPa]	14.35	14.31	14.62	14.70	14.64	14.60
	Límite elástico (σ_y)	[MPa]	13.10	13.10	13.30	13.10	13.50	13.40
	Deformación	[%]	4.08	4.09	4.01	5.93	3.91	4.09
30 %	Módulo de elasticidad	[MPa]	569.52	576.34	579.27	567.85	563.57	575.74
	R. a compresión (R_C)	[MPa]	17.76	17.82	17.91	17.66	17.33	17.87
	Límite elástico (σ_y)	[MPa]	16.00	16.40	16.60	16.40	16.10	16.40
	Deformación	[%]	4.94	5.70	5.02	4.81	6.78	4.93
40 %	Módulo de elasticidad	[MPa]	689.54	708.59	714.59	697.26	709.69	712.76
	R. a compresión (R_C)	[MPa]	21.77	21.79	22.29	22.02	21.95	21.88
	Límite elástico (σ_y)	[MPa]	19.50	19.20	19.60	19.40	19.60	19.60
	Deformación	[%]	5.18	4.76	4.74	4.63	4.67	4.69
50 %	Módulo de elasticidad	[MPa]	778.97	781.86	794.73	781.51	801.25	787.44
	R. a compresión (R_C)	[MPa]	25.11	25.30	25.55	25.72	25.65	25.82
	Límite elástico (σ_y)	[MPa]	22.00	22.10	22.30	22.40	23.10	23.70
	Deformación	[%]	4.91	4.56	4.66	4.64	4.61	4.58

Tabla III.1. Resultados individuales – Giroide.

III.2. Octeto

Relleno	Magnitud	Unidad	1	2	3	4	5	6
10 %	Módulo de elasticidad	[MPa]	408.99	423.04	425.74	412.76	423.92	421.49
	R. a compresión (R_C)	[MPa]	10.78	10.84	10.90	10.72	10.75	10.80
	Límite elástico (σ_y)	[MPa]	10.20	10.20	10.20	10.10	10.20	10.10
	Deformación	[%]	3.49	3.38	3.44	3.50	3.39	3.38
20 %	Módulo de elasticidad	[MPa]	478.63	492.60	485.96	491.97	500.54	499.46
	R. a compresión (R_C)	[MPa]	13.19	13.35	13.17	13.27	13.23	13.27
	Límite elástico (σ_y)	[MPa]	12.00	12.20	12.20	12.20	12.20	12.30
	Deformación	[%]	3.85	3.78	3.79	3.99	3.96	3.73
30 %	Módulo de elasticidad	[MPa]	516.28	523.98	523.62	507.67	522.82	533.03
	R. a compresión (R_C)	[MPa]	14.21	14.43	14.33	14.20	14.46	14.45
	Límite elástico (σ_y)	[MPa]	12.60	12.20	12.50	12.20	12.60	12.60
	Deformación	[%]	4.68	5.18	5.78	4.99	5.00	4.75
40 %	Módulo de elasticidad	[MPa]	650.94	644.16	662.54	659.47	655.87	664.64
	R. a compresión (R_C)	[MPa]	20.45	20.52	20.45	20.61	20.54	20.66
	Límite elástico (σ_y)	[MPa]	18.30	18.40	18.40	18.70	18.70	18.30
	Deformación	[%]	5.01	5.52	5.34	4.90	5.26	5.30
50 %	Módulo de elasticidad	[MPa]	775.41	786.88	799.50	779.45	775.70	798.08
	R. a compresión (R_C)	[MPa]	25.05	25.31	25.15	25.08	25.19	25.20
	Límite elástico (σ_y)	[MPa]	21.70	22.00	21.80	21.60	22.00	22.00
	Deformación	[%]	5.37	5.18	5.30	5.82	5.21	5.18

Tabla III.2. Resultados individuales – Octeto.

III.3. Cúbico

Relleno	Magnitud	Unidad	1	2	3	4	5	6
10 %	Módulo de elasticidad	[MPa]	392.00	396.01	392.07	385.78	398.29	390.54
	R. a compresión (R_C)	[MPa]	9.82	10.02	9.99	9.84	10.15	10.11
	Límite elástico (σ_y)	[MPa]	9.30	9.40	9.40	9.30	9.40	9.60
	Deformación	[%]	3.44	3.46	3.38	3.60	3.46	3.45
20 %	Módulo de elasticidad	[MPa]	470.29	477.25	487.04	483.53	487.85	489.00
	R. a compresión (R_C)	[MPa]	12.73	12.84	12.80	12.81	12.78	12.74
	Límite elástico (σ_y)	[MPa]	11.60	11.60	11.60	11.60	11.50	11.50
	Deformación	[%]	4.18	4.12	3.93	4.06	4.03	3.84
30 %	Módulo de elasticidad	[MPa]	549.28	572.37	569.84	551.98	580.32	579.43
	R. a compresión (R_C)	[MPa]	16.81	16.58	16.59	16.90	16.62	16.54
	Límite elástico (σ_y)	[MPa]	15.10	14.80	14.50	15.10	14.30	14.30
	Deformación	[%]	5.21	5.27	5.13	5.13	5.01	5.15
40 %	Módulo de elasticidad	[MPa]	684.08	673.31	672.14	681.50	675.77	678.65
	R. a compresión (R_C)	[MPa]	21.24	21.24	21.14	21.37	21.20	21.14
	Límite elástico (σ_y)	[MPa]	18.30	18.30	18.20	18.40	18.30	18.20
	Deformación	[%]	5.31	5.55	5.35	5.46	5.47	5.54
50 %	Módulo de elasticidad	[MPa]	674.71	696.31	705.99	678.87	707.65	703.49
	R. a compresión (R_C)	[MPa]	21.69	22.10	22.14	21.82	21.99	22.01
	Límite elástico (σ_y)	[MPa]	18.90	18.90	18.60	18.90	18.70	19.00
	Deformación	[%]	5.73	5.44	5.72	5.60	5.34	5.50

Tabla III.3. Resultados individuales – Cúbico.

III.4. Cúbico bitruncado

Relleno	Magnitud	Unidad	1	2	3	4	5	6
10 %	Módulo de elasticidad	[MPa]	401.24	404.14	409.70	405.63	405.69	412.25
	R. a compresión (R_C)	[MPa]	10.43	10.44	10.39	10.39	10.43	10.55
	Límite elástico (σ_y)	[MPa]	10.10	10.00	9.90	10.00	10.00	10.10
	Deformación	[%]	3.64	3.66	3.61	3.53	3.42	3.52
20 %	Módulo de elasticidad	[MPa]	507.83	527.31	532.65	518.69	530.27	534.95
	R. a compresión (R_C)	[MPa]	14.04	14.21	14.20	14.24	14.24	14.27
	Límite elástico (σ_y)	[MPa]	12.90	13.30	13.10	13.40	13.20	13.30
	Deformación	[%]	4.28	4.04	3.95	3.94	3.88	3.95
30 %	Módulo de elasticidad	[MPa]	564.68	571.68	571.54	565.62	567.56	575.83
	R. a compresión (R_C)	[MPa]	15.63	15.53	15.45	15.58	15.52	15.52
	Límite elástico (σ_y)	[MPa]	14.20	13.80	14.00	14.10	13.90	13.60
	Deformación	[%]	3.97	4.12	4.16	4.20	4.08	4.27
40 %	Módulo de elasticidad	[MPa]	696.66	704.80	697.40	697.12	691.40	699.11
	R. a compresión (R_C)	[MPa]	21.80	21.97	21.78	21.84	21.84	21.83
	Límite elástico (σ_y)	[MPa]	19.00	19.20	19.20	18.90	19.10	19.30
	Deformación	[%]	5.24	5.06	5.14	5.27	5.11	4.91
50 %	Módulo de elasticidad	[MPa]	723.53	735.84	748.07	725.13	734.79	746.94
	R. a compresión (R_C)	[MPa]	23.35	23.10	23.00	23.31	23.23	23.10
	Límite elástico (σ_y)	[MPa]	19.80	19.50	19.40	19.70	19.60	19.60
	Deformación	[%]	5.37	5.01	5.17	5.30	4.94	4.98

Tabla III.4. Resultados individuales – Cúbico bitruncado.

III.5. Subdivisión cúbica

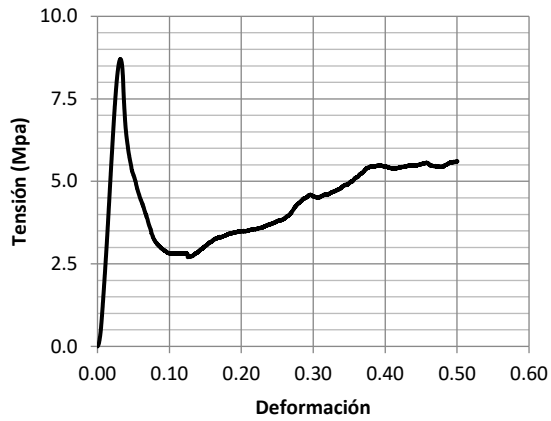
Relleno	Magnitud	Unidad	1	2	3	4	5	6
10 %	Módulo de elasticidad	[MPa]	402.40	412.41	412.96	407.80	419.84	411.27
	R. a compresión (R_C)	[MPa]	10.65	10.93	10.86	10.83	10.96	10.79
	Límite elástico (σ_y)	[MPa]	10.20	10.60	10.20	10.10	10.10	10.20
	Deformación	[%]	3.88	3.71	3.90	3.82	4.00	3.81
20 %	Módulo de elasticidad	[MPa]	433.68	435.80	435.15	434.11	446.05	452.55
	R. a compresión (R_C)	[MPa]	11.44	11.22	11.16	11.44	11.37	11.52
	Límite elástico (σ_y)	[MPa]	10.10	10.10	10.10	10.20	10.40	10.50
	Deformación	[%]	4.26	4.11	4.18	4.42	4.02	3.92
30 %	Módulo de elasticidad	[MPa]	505.82	512.21	513.69	513.55	518.51	508.56
	R. a compresión (R_C)	[MPa]	13.73	13.58	13.98	13.97	13.64	13.49
	Límite elástico (σ_y)	[MPa]	12.70	12.70	12.80	12.80	12.80	12.60
	Deformación	[%]	3.90	4.00	4.12	4.07	3.96	4.01
40 %	Módulo de elasticidad	[MPa]	486.38	506.89	497.45	486.99	506.52	509.41
	R. a compresión (R_C)	[MPa]	13.74	13.97	13.75	13.56	13.35	13.73
	Límite elástico (σ_y)	[MPa]	12.60	12.30	12.50	12.20	12.10	12.30
	Deformación	[%]	4.84	5.06	4.95	4.72	4.39	4.47
50 %	Módulo de elasticidad	[MPa]	570.17	589.53	604.77	583.38	603.66	588.35
	R. a compresión (R_C)	[MPa]	15.67	16.25	16.84	16.15	16.98	16.23
	Límite elástico (σ_y)	[MPa]	14.50	14.70	14.90	14.80	14.90	14.70
	Deformación	[%]	4.16	4.10	4.40	4.15	4.39	4.08

Tabla III.5. Resultados individuales – Subdivisión cúbica.

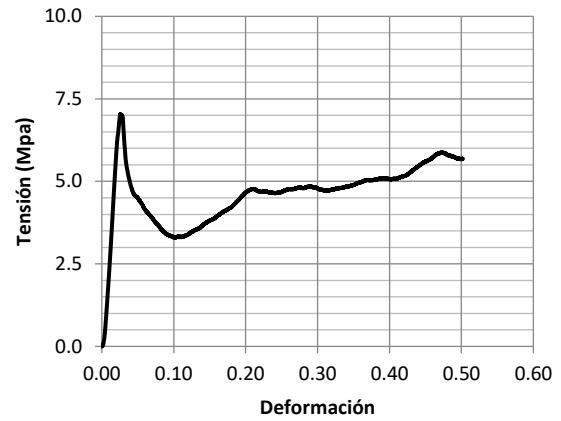
Anexo IV. Gráficas resultados individuales

IV.1. Giroide

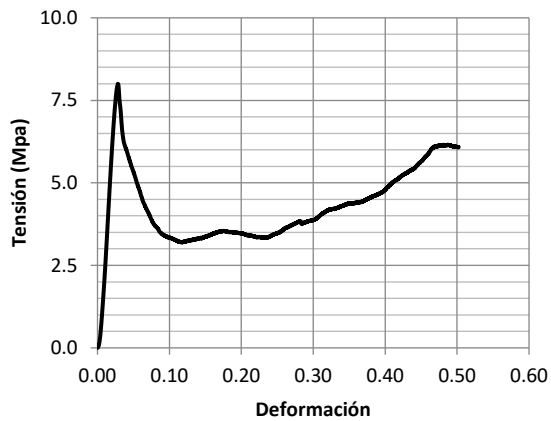
Giroide - 10% (1)



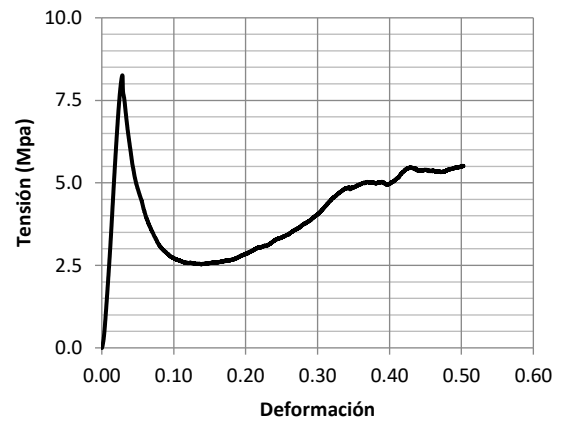
Giroide - 10% (2)



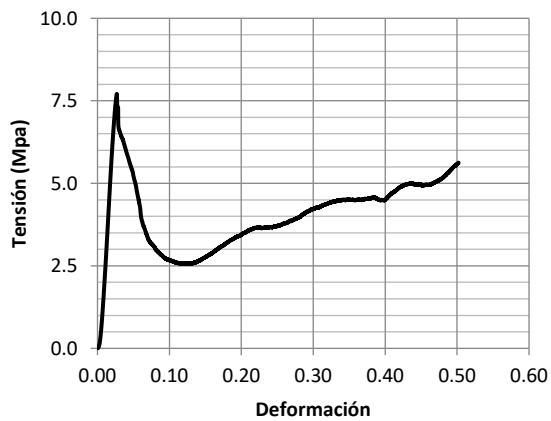
Giroide - 10% (3)



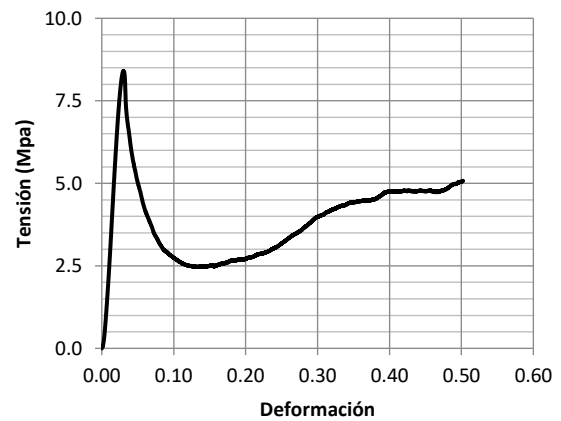
Giroide - 10% (4)



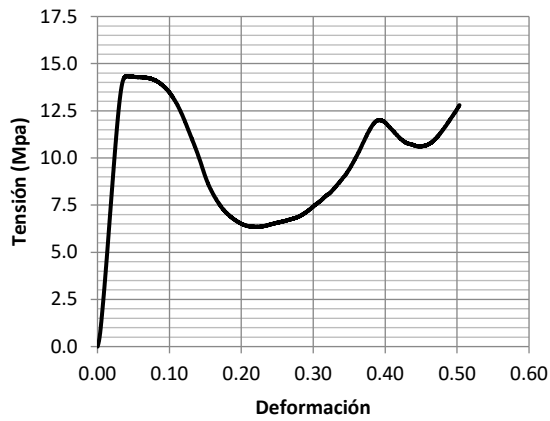
Giroide - 10% (5)



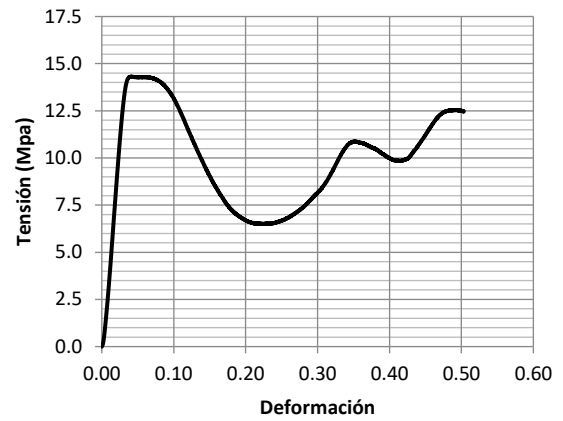
Giroide - 10% (6)



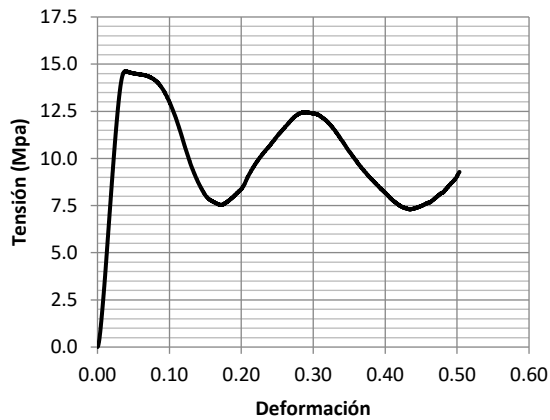
Giroide - 20% (1)



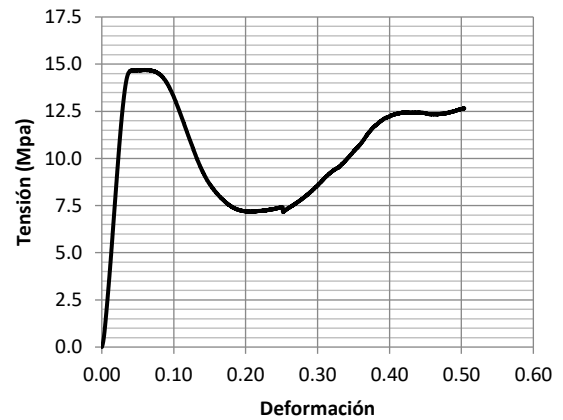
Giroide - 20% (2)



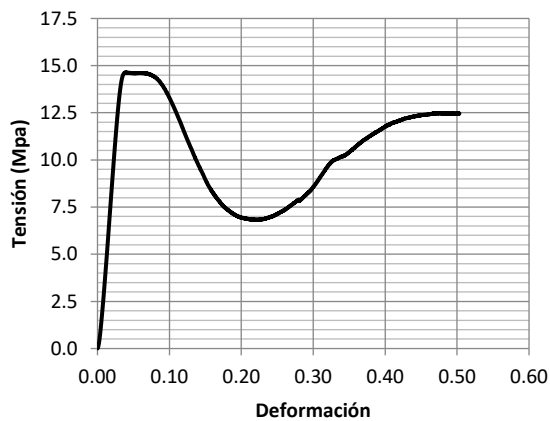
Giroide - 20% (3)



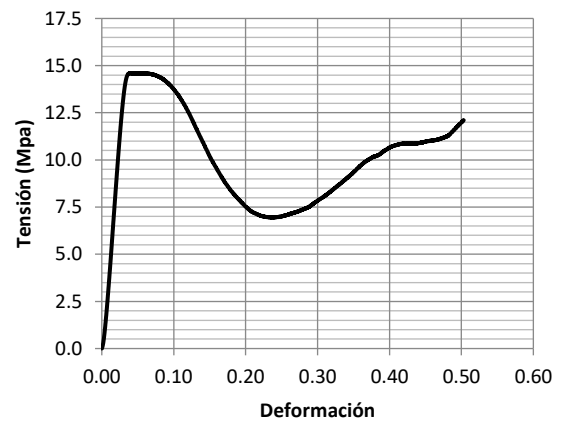
Giroide - 20% (4)

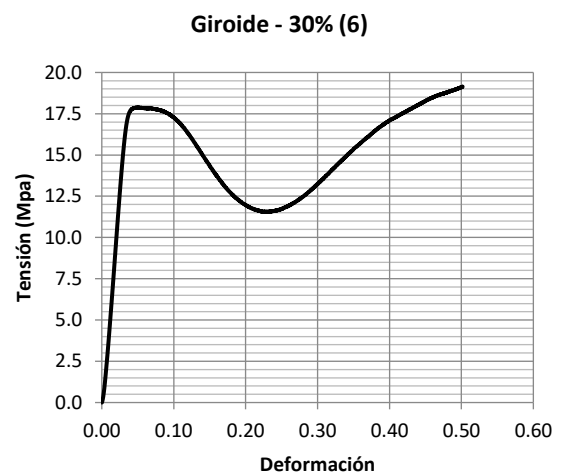
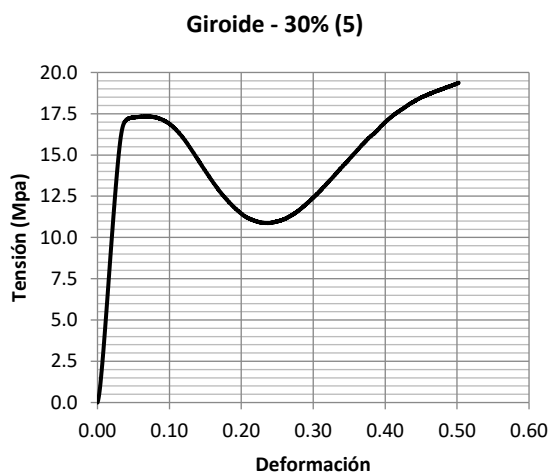
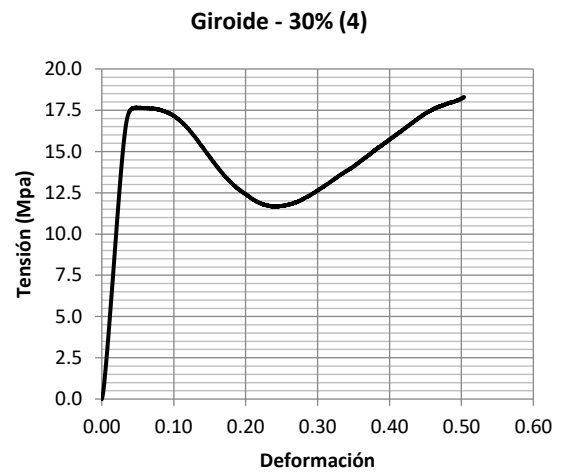
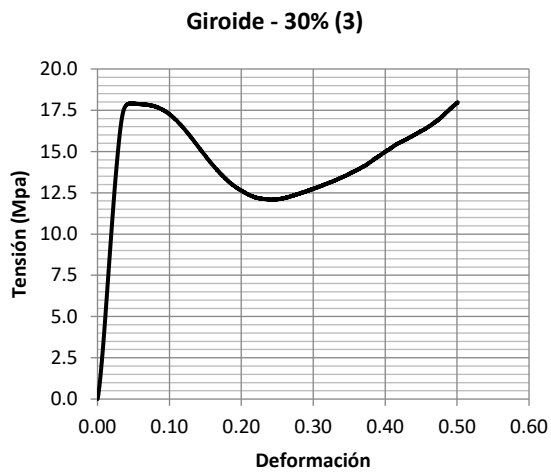
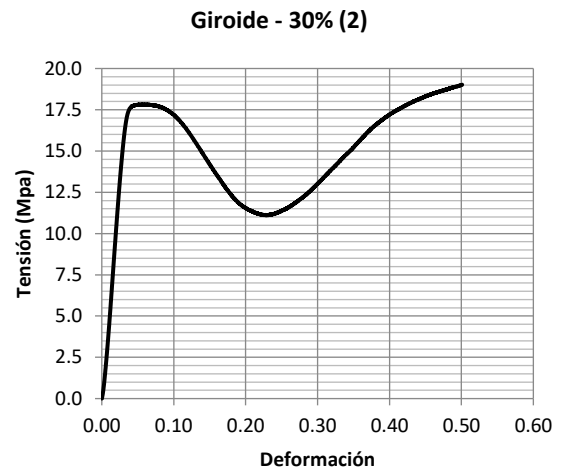
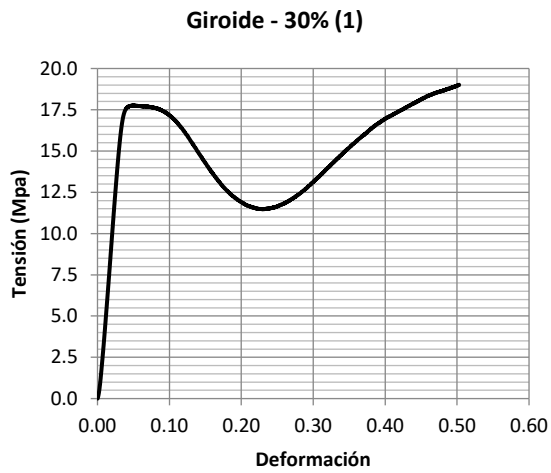


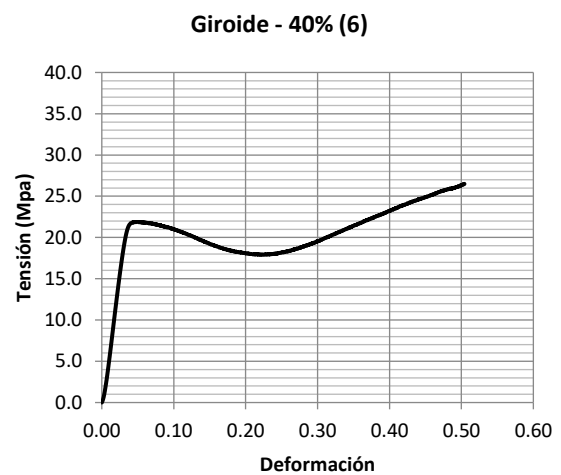
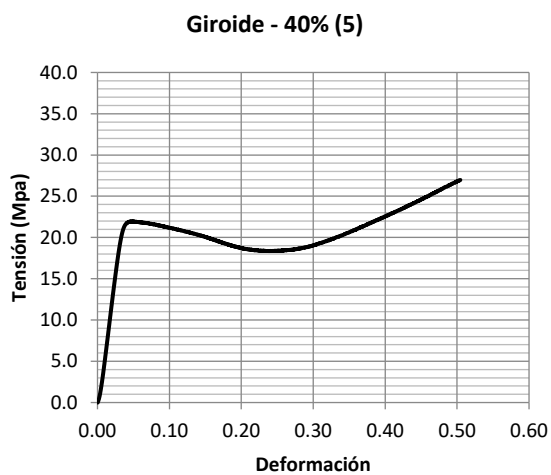
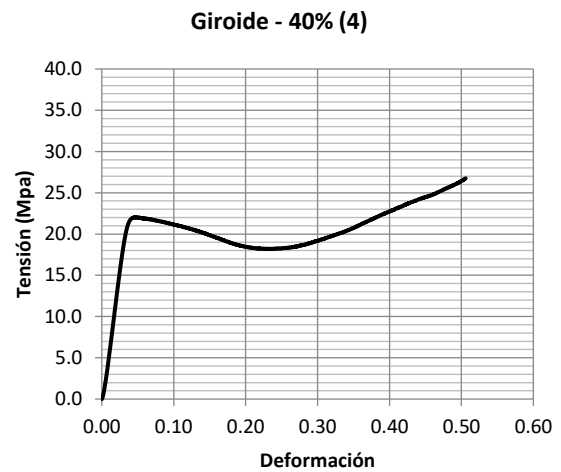
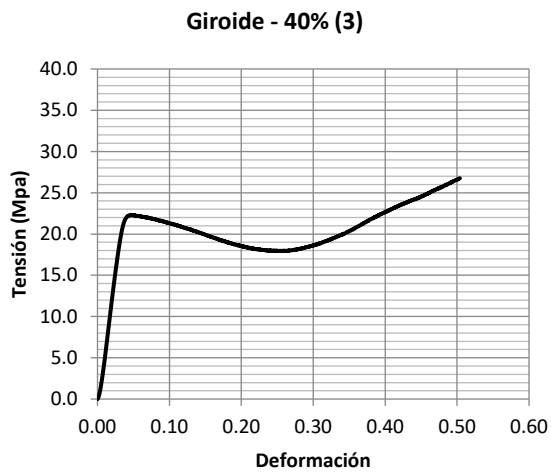
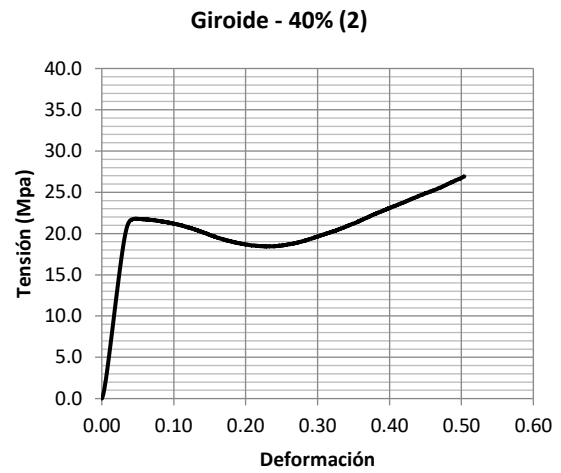
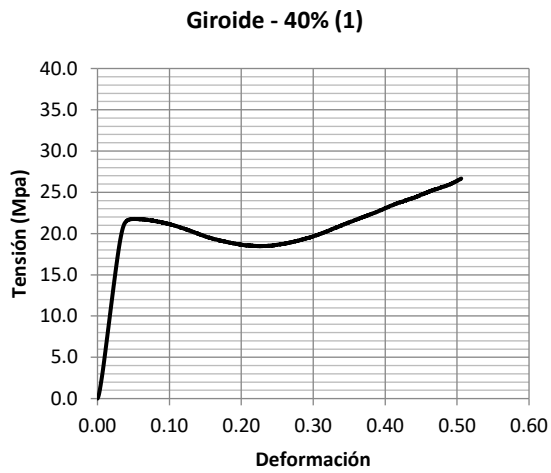
Giroide - 20% (5)

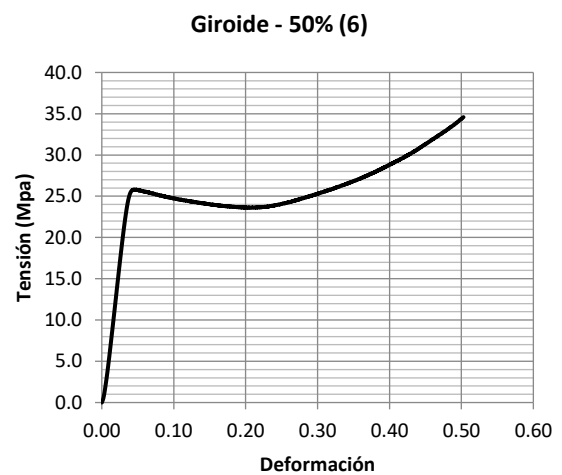
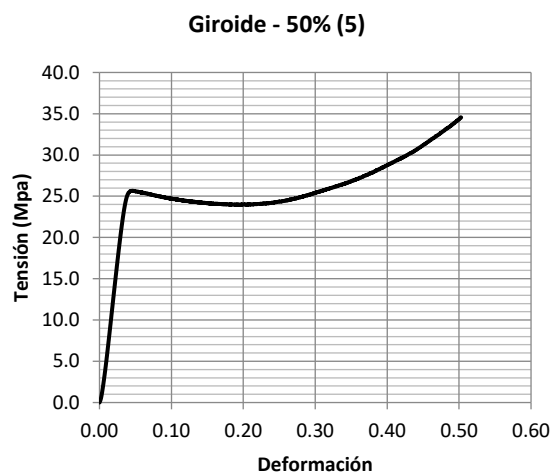
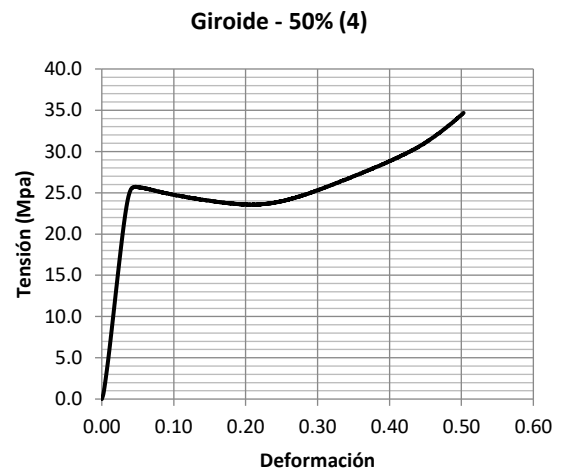
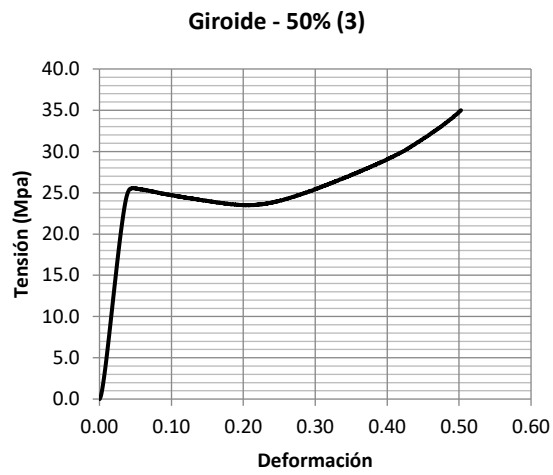
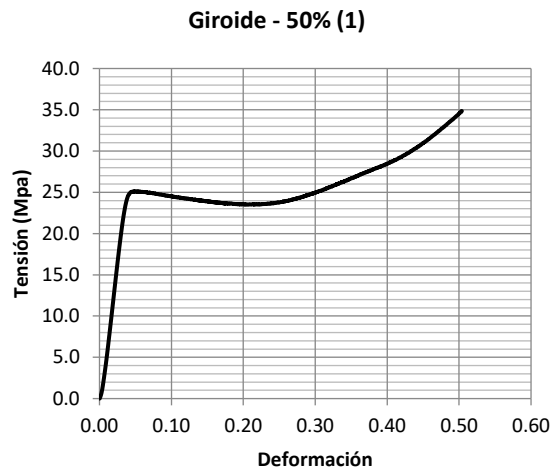


Giroide - 20% (6)



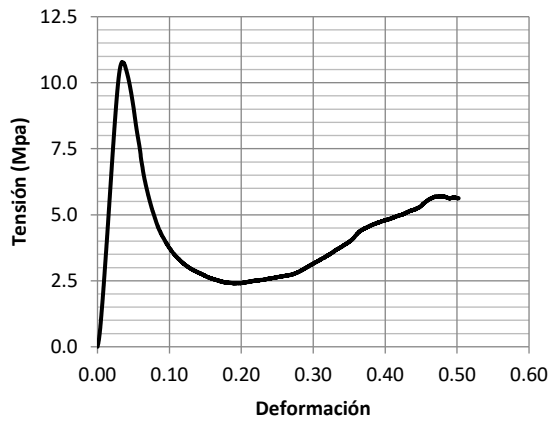




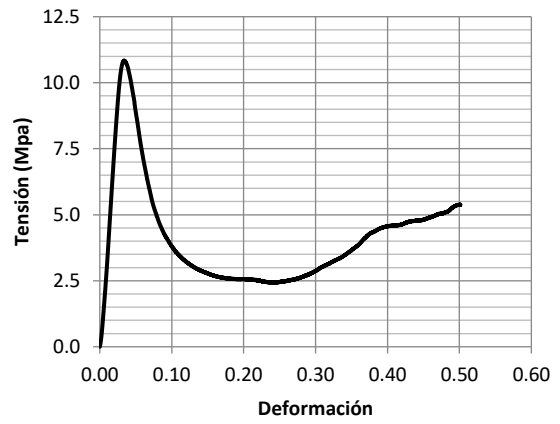


IV.2. Octeto

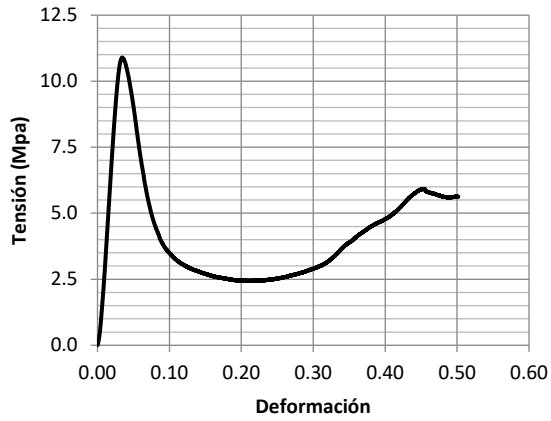
Octeto - 10% (1)



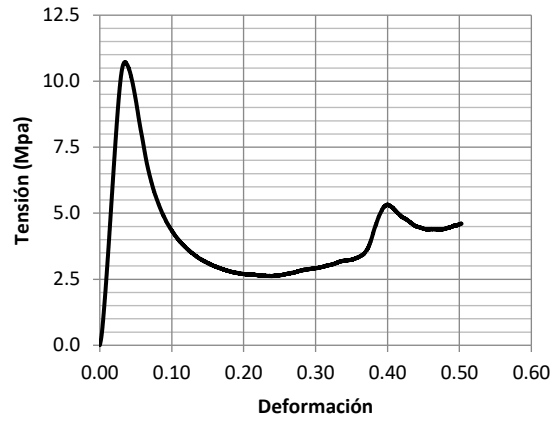
Octeto - 10% (2)



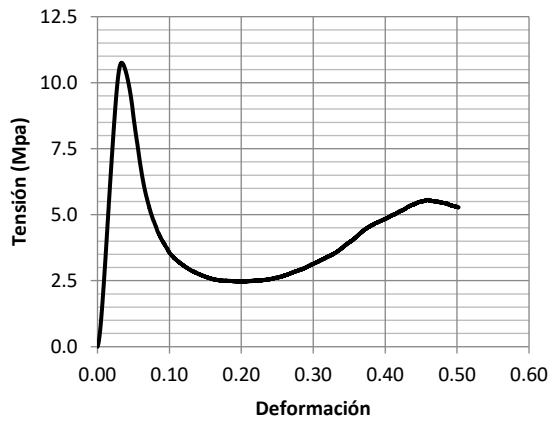
Octeto - 10% (3)



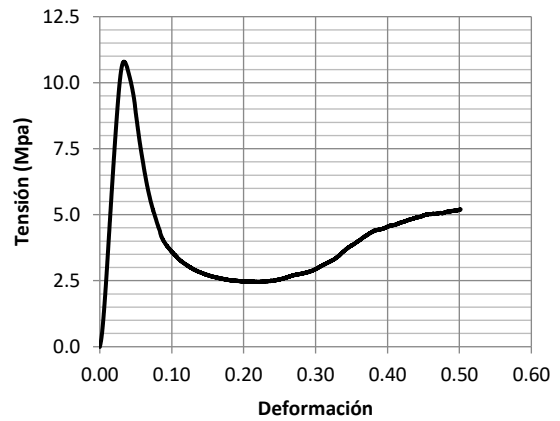
Octeto - 10% (4)

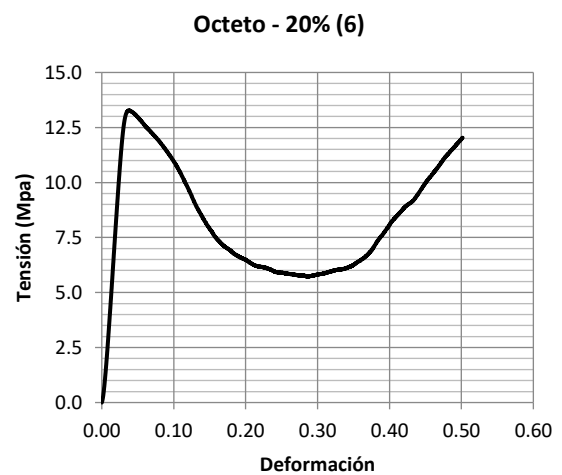
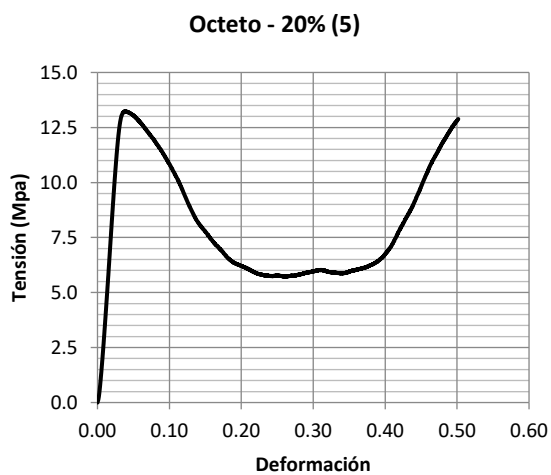
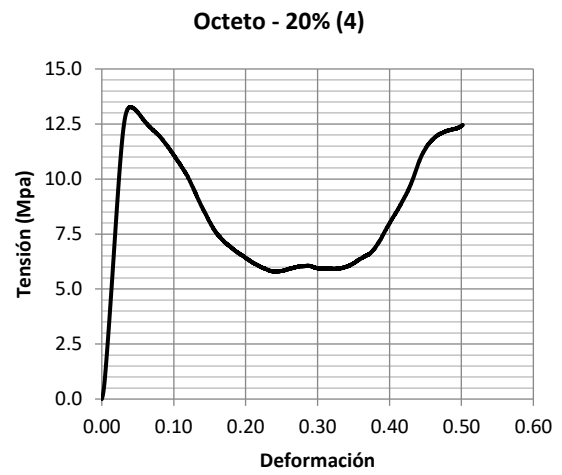
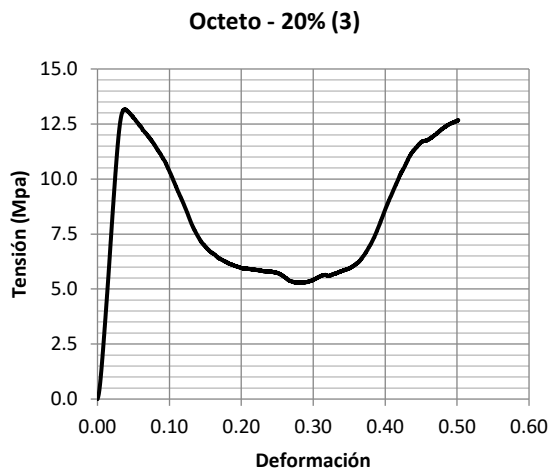
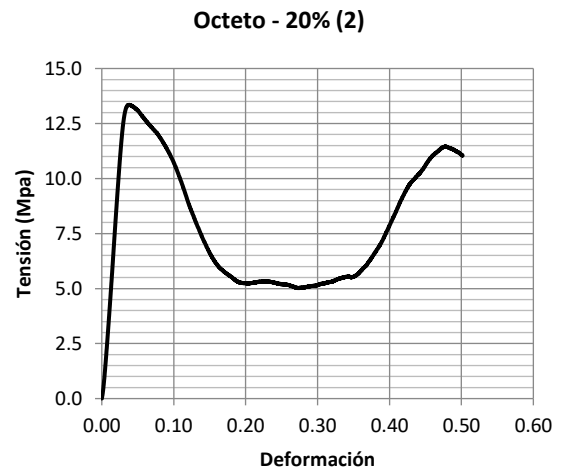
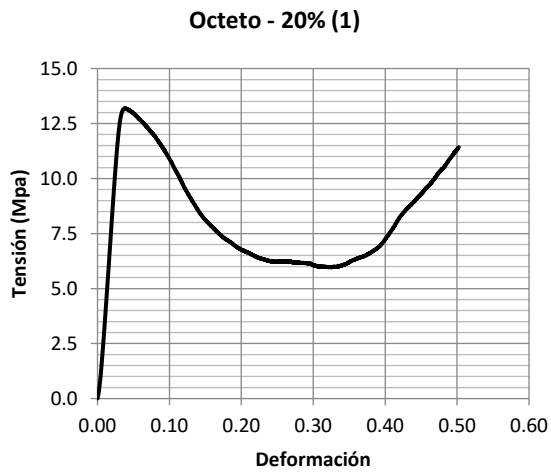


Octeto - 10% (5)

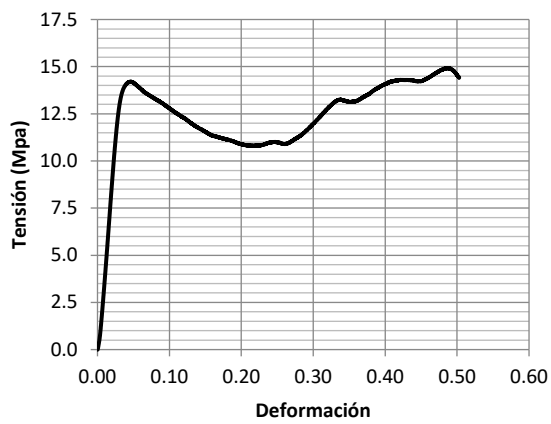


Octeto - 10% (6)

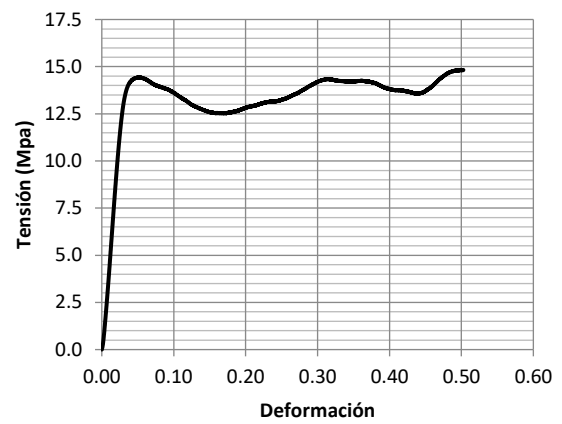




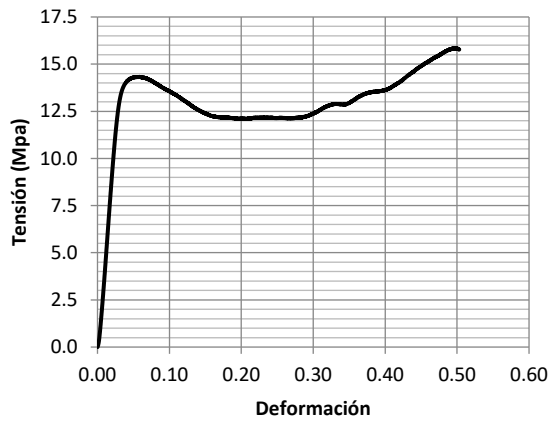
Octeto - 30% (1)



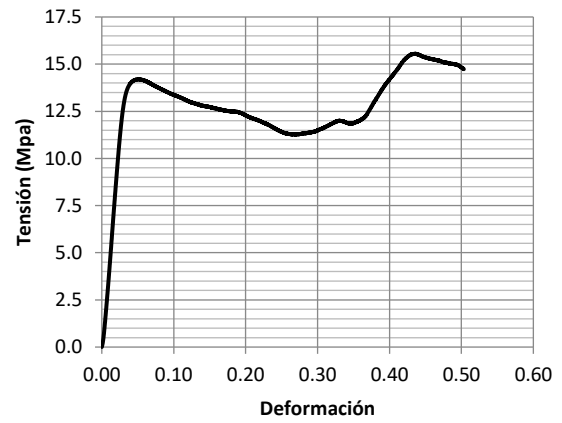
Octeto - 30% (2)



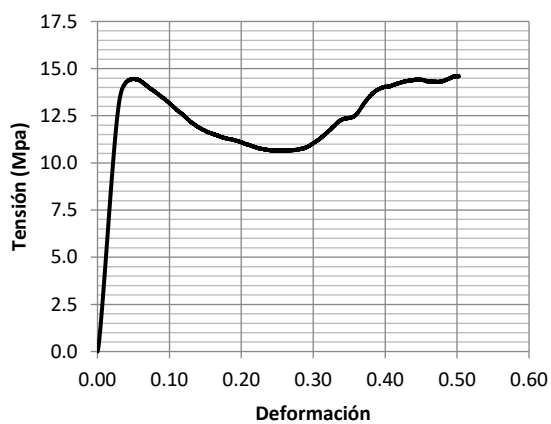
Octeto - 30% (3)



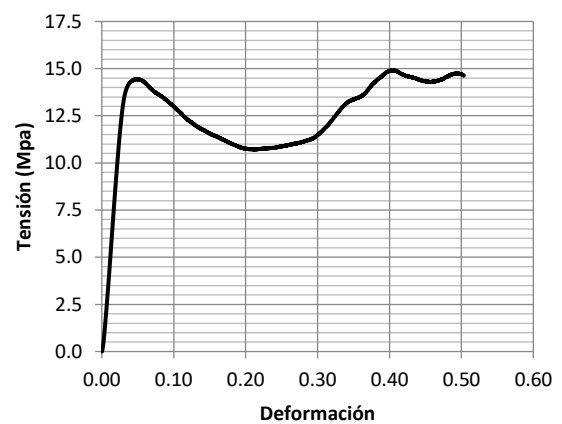
Octeto - 30% (4)

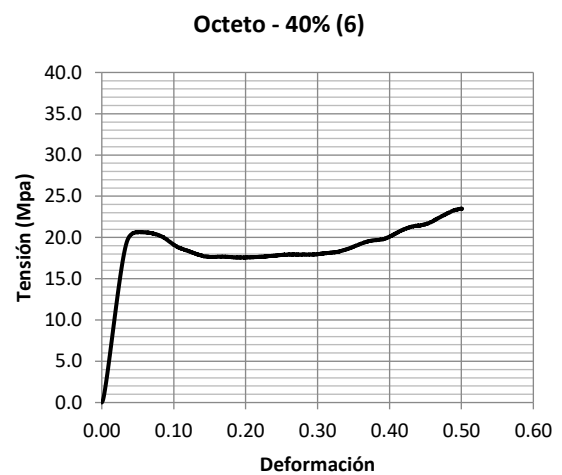
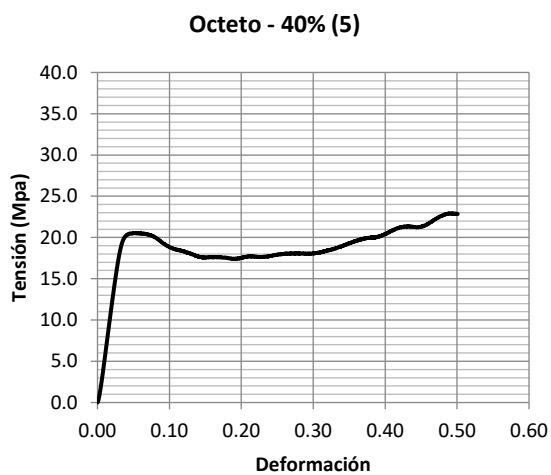
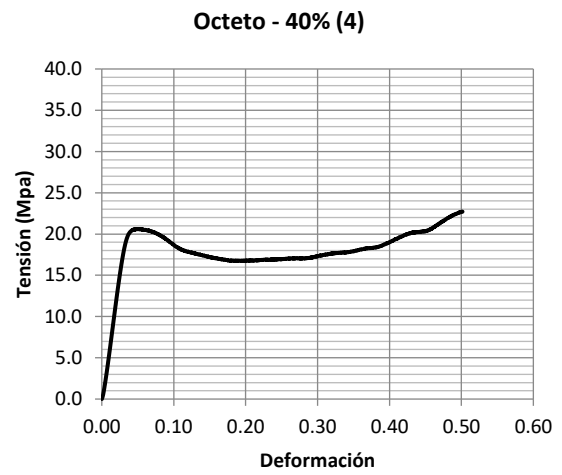
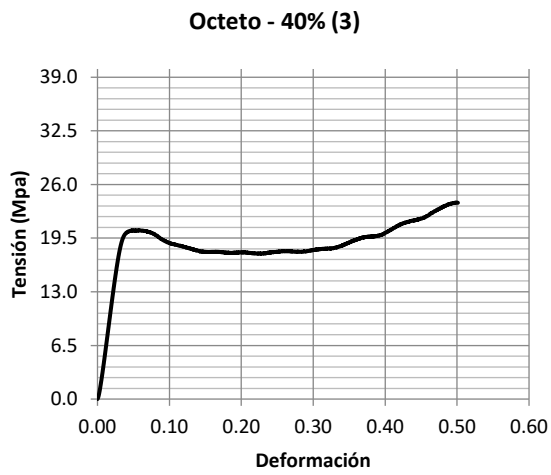
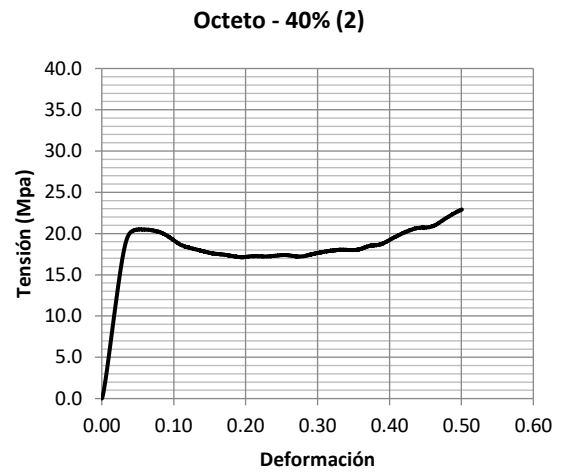
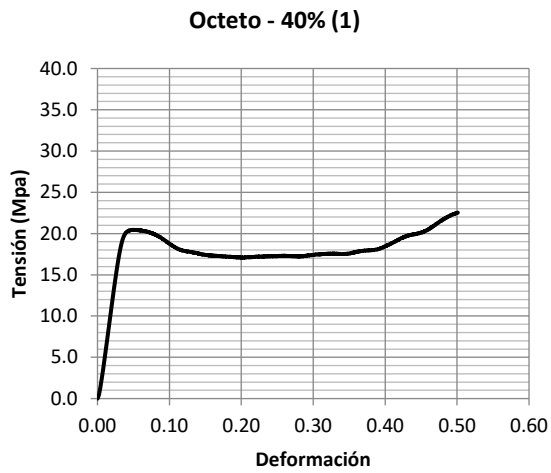


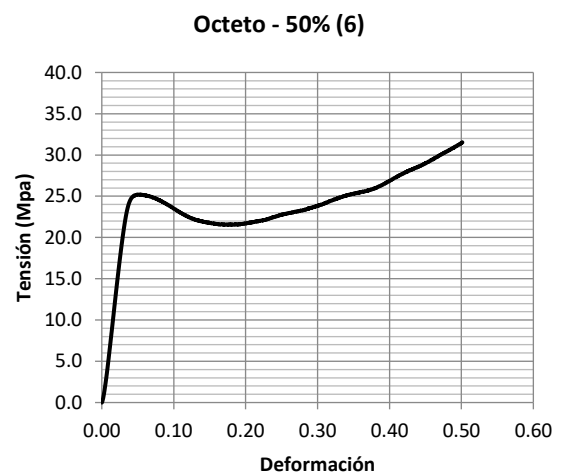
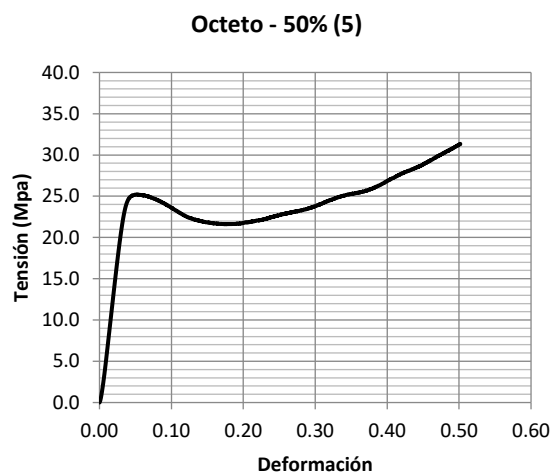
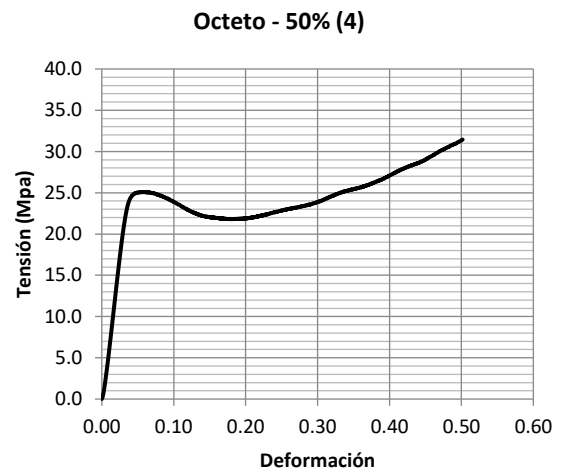
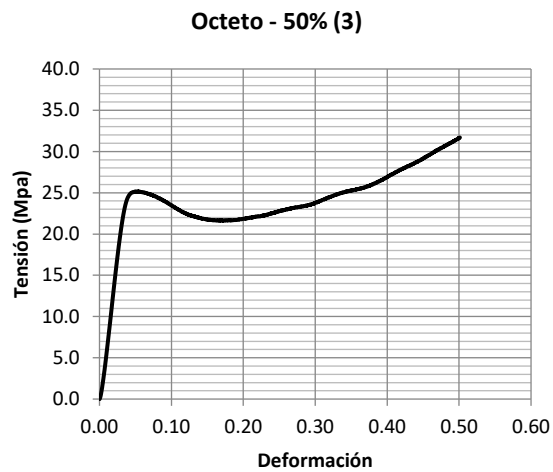
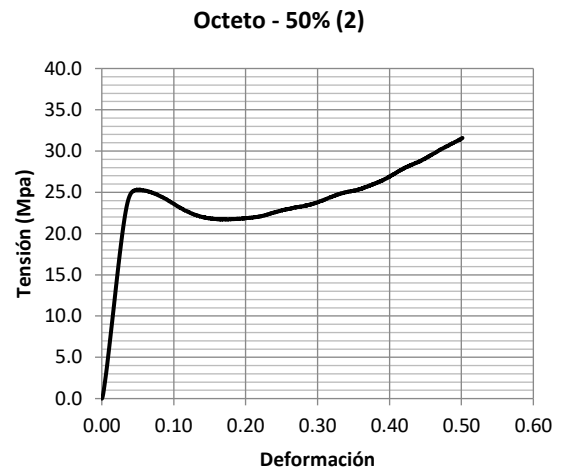
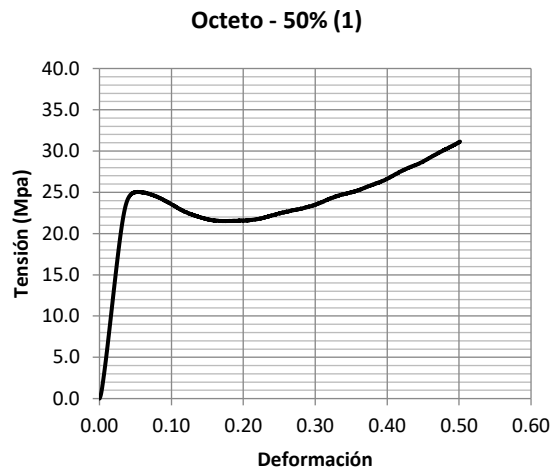
Octeto - 30% (5)



Octeto - 30% (6)

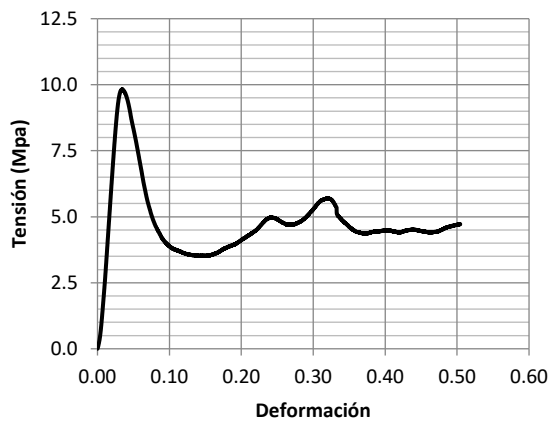




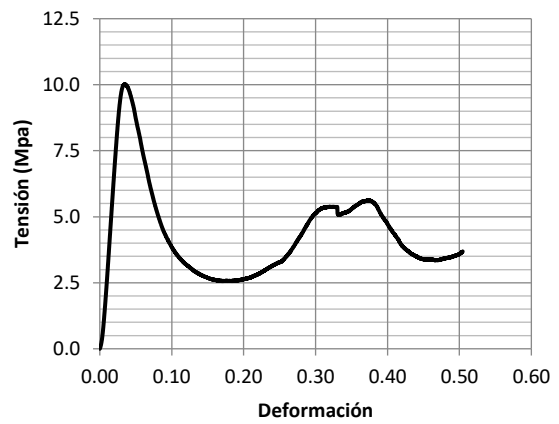


IV.3. Cúbico

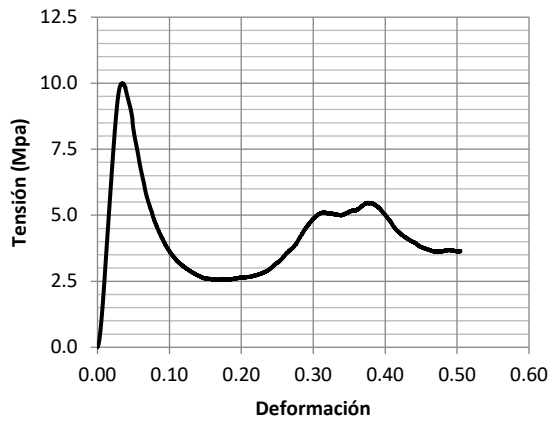
Cúbico - 10% (1)



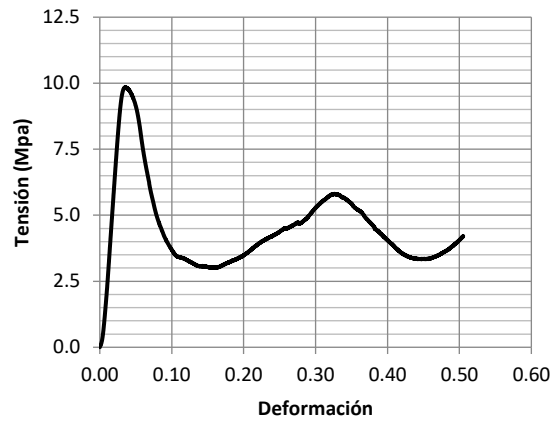
Cúbico - 10% (2)



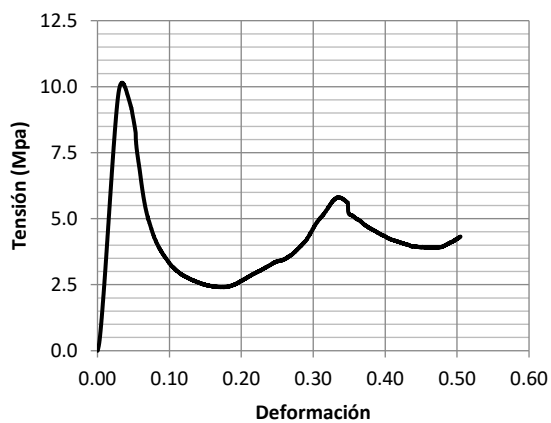
Cúbico - 10% (3)



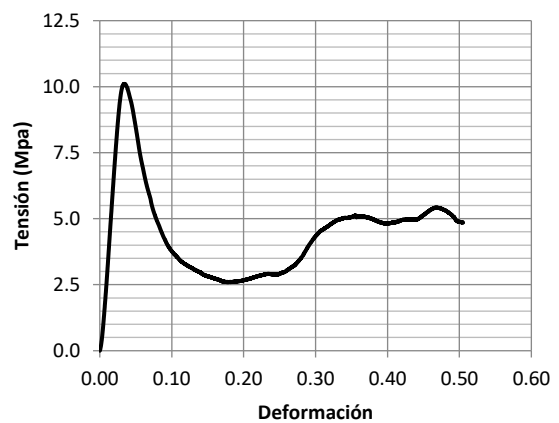
Cúbico - 10% (4)

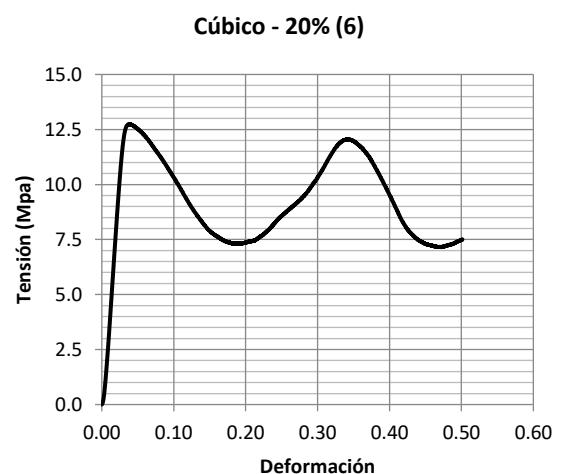
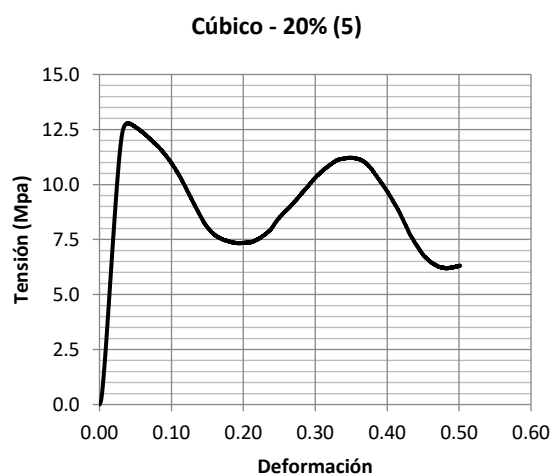
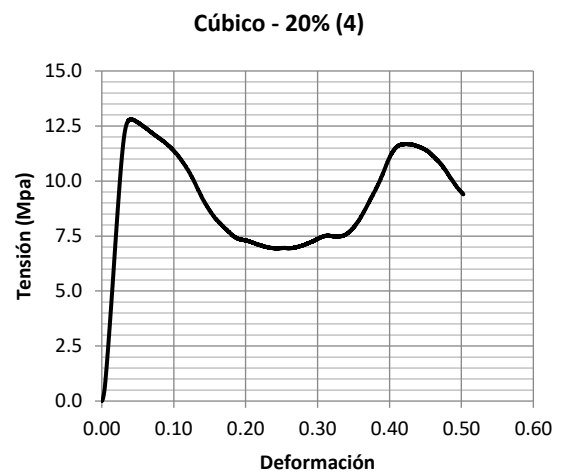
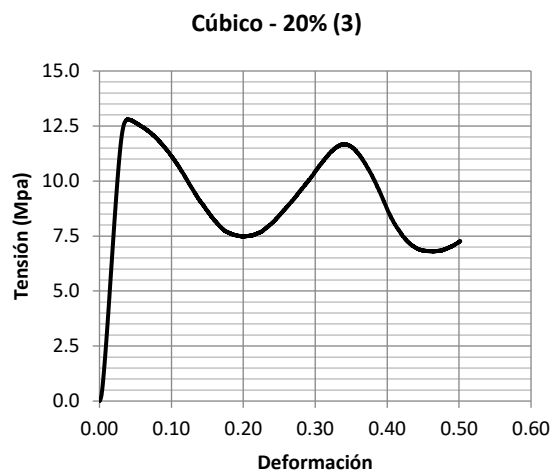
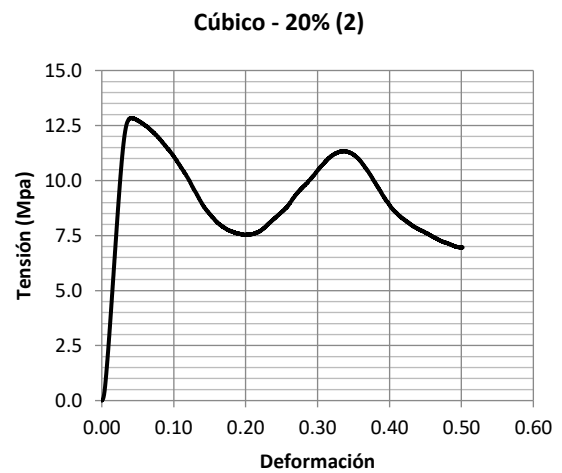
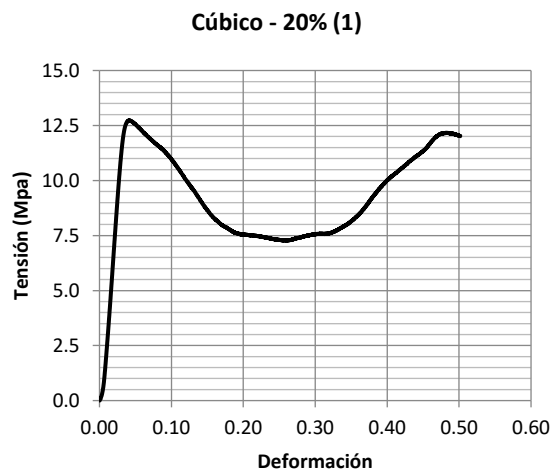


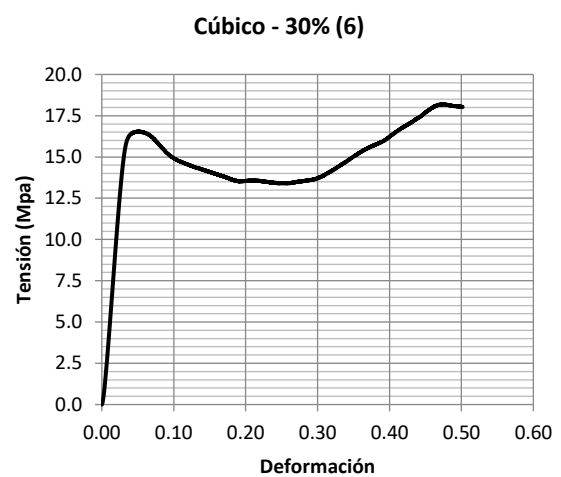
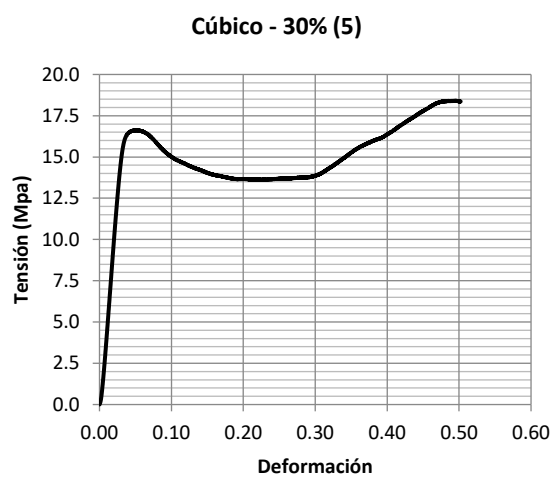
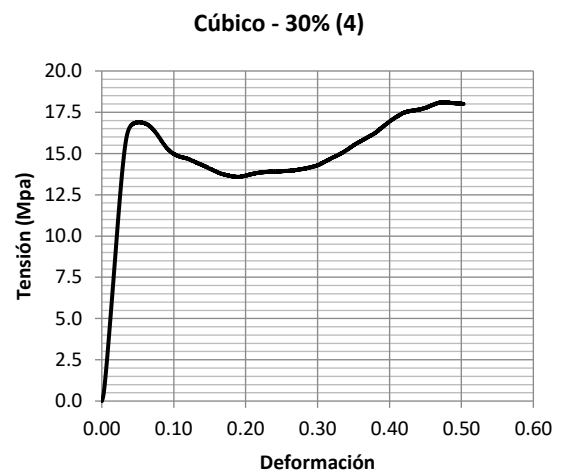
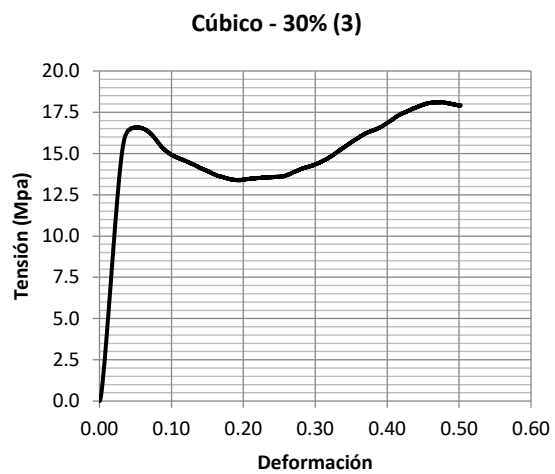
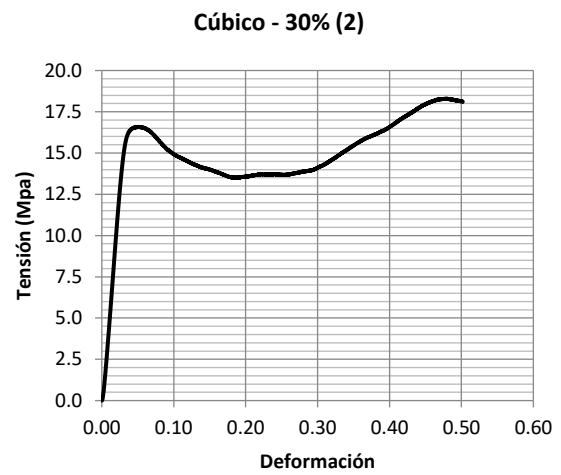
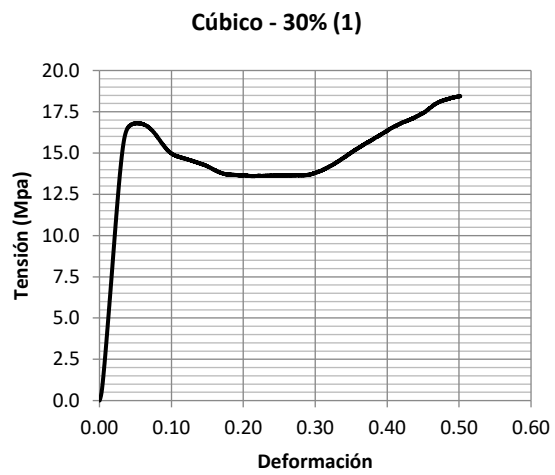
Cúbico - 10% (5)

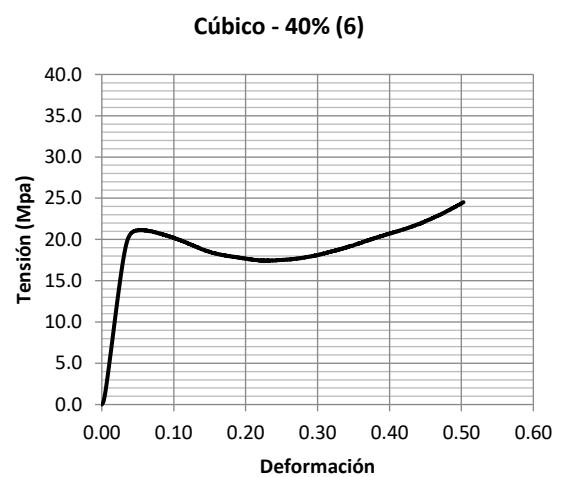
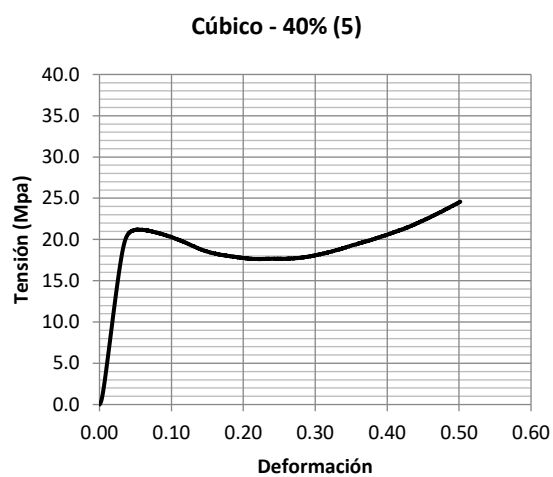
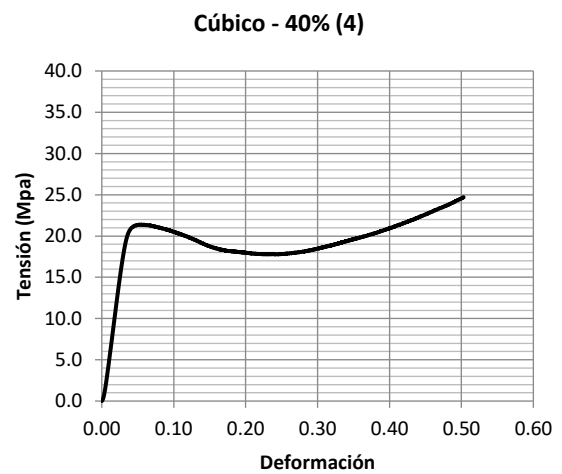
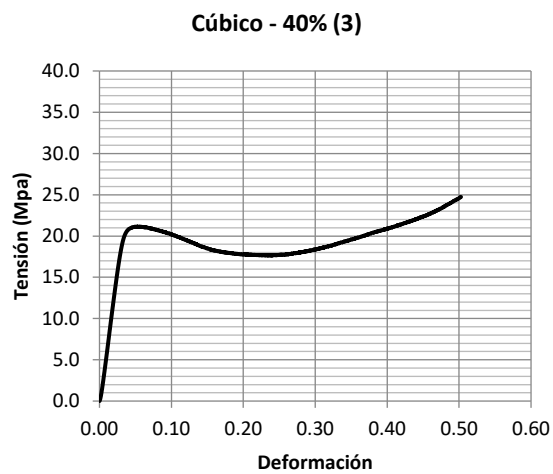
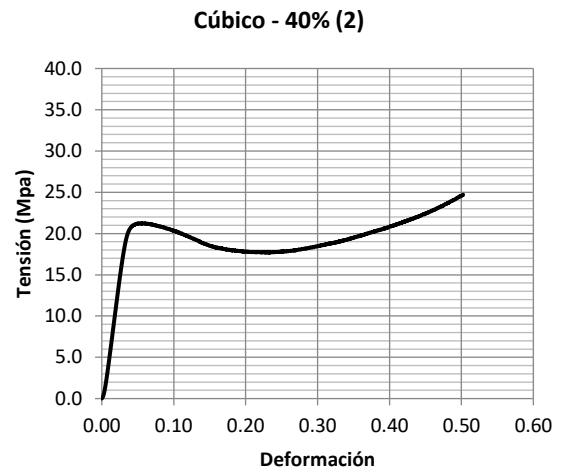
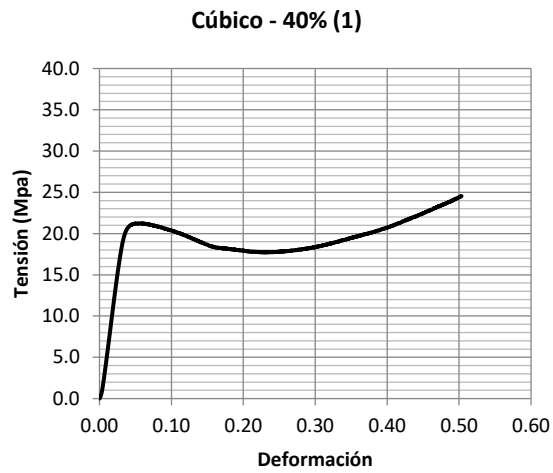


Cúbico - 10% (6)

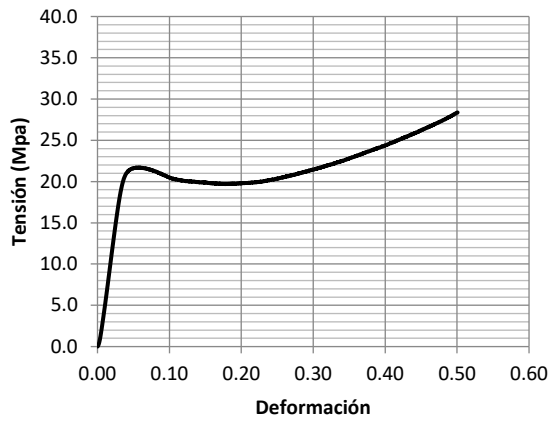




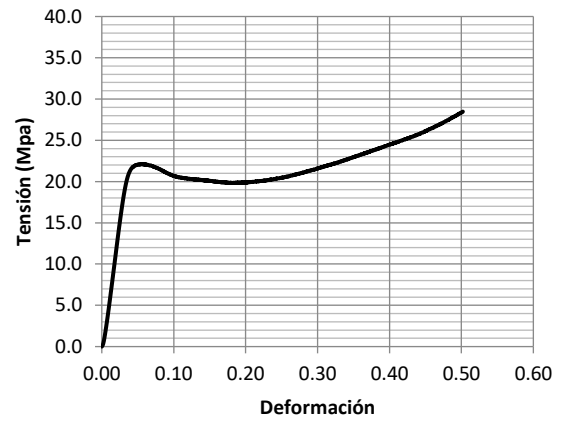




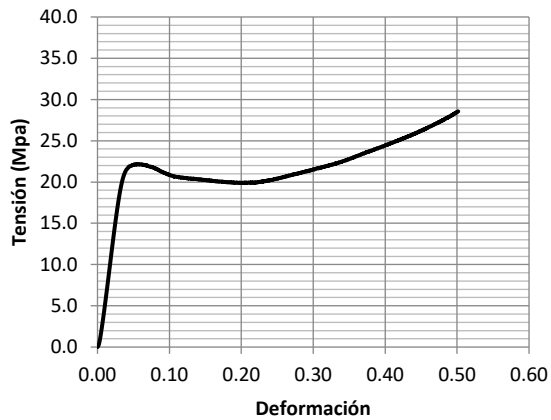
Cúbico - 50% (1)



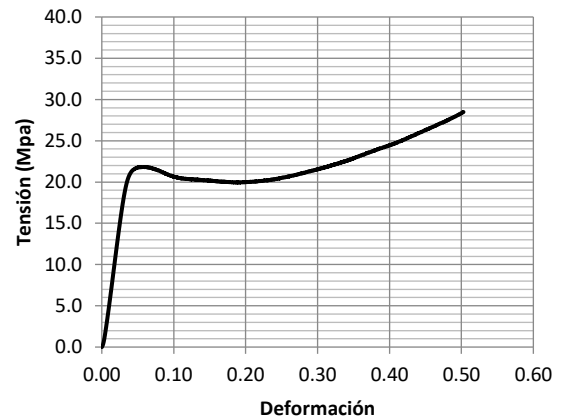
Cúbico - 50% (2)



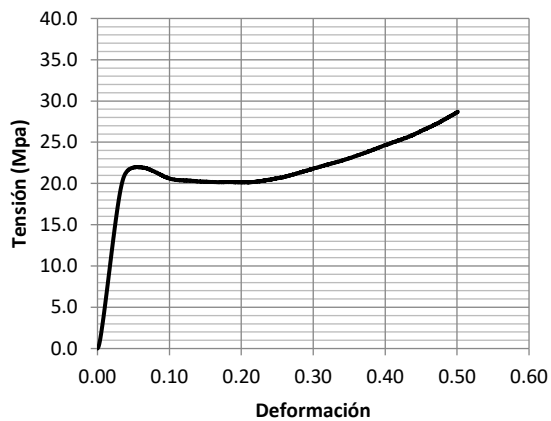
Cúbico - 50% (3)



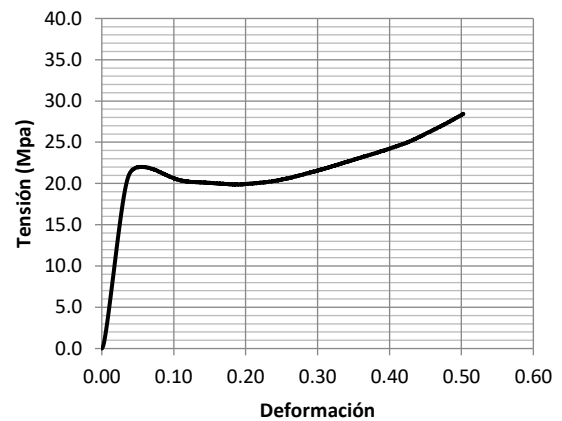
Cúbico - 50% (4)



Cúbico - 50% (5)

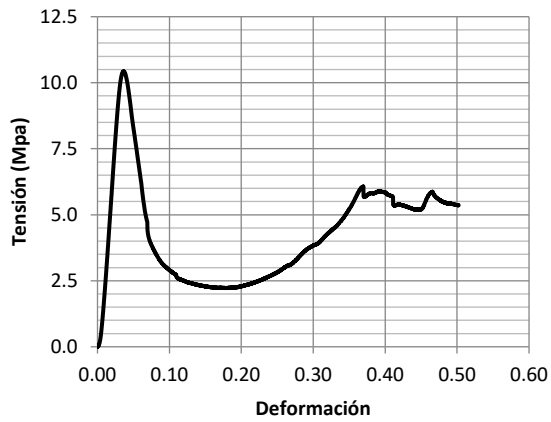


Cúbico - 50% (6)

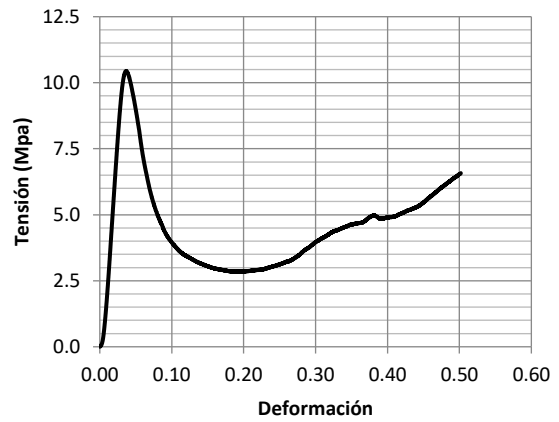


IV.4. Cúbico bitruncado

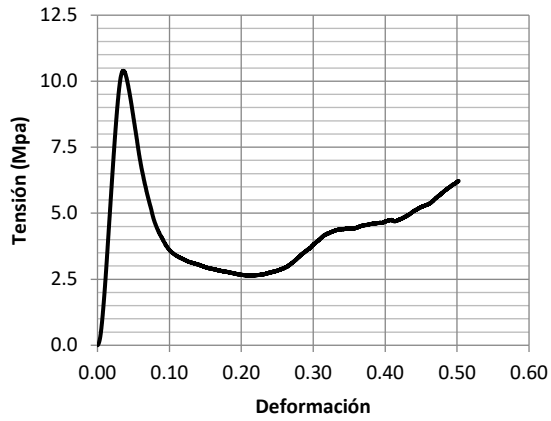
Cúbico bitruncado - 10% (1)



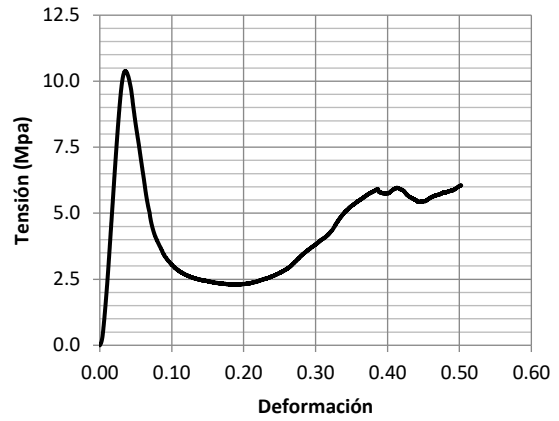
Cúbico bitruncado - 10% (2)



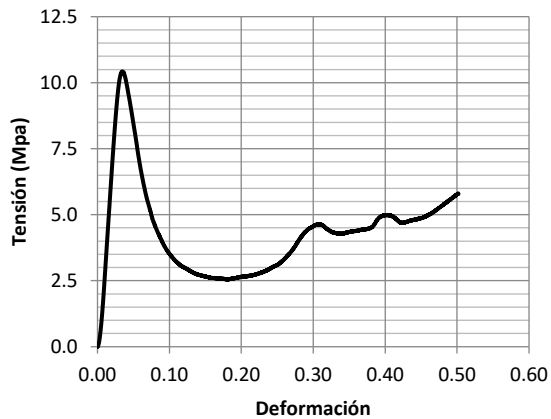
Cúbico bitruncado - 10% (3)



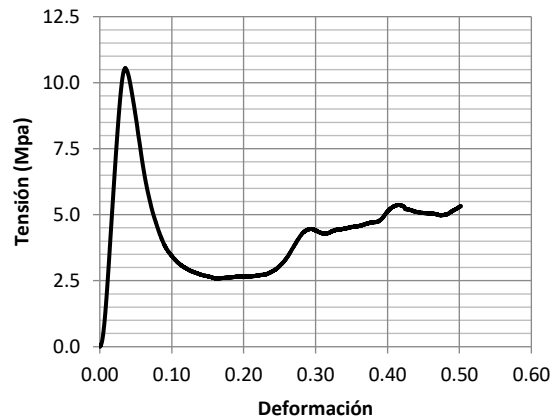
Cúbico bitruncado - 10% (4)

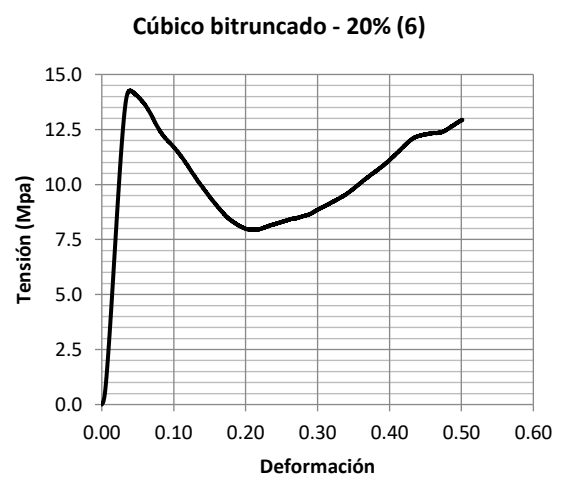
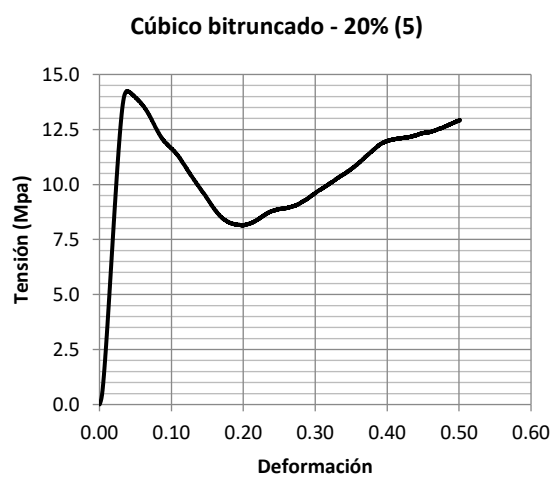
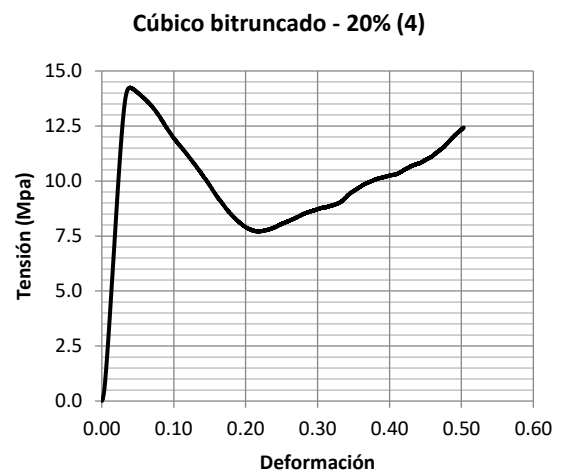
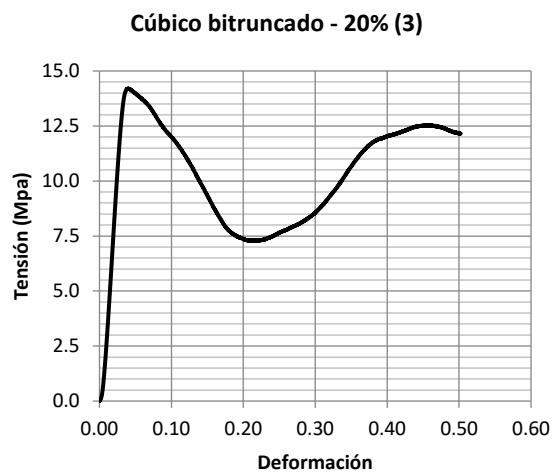
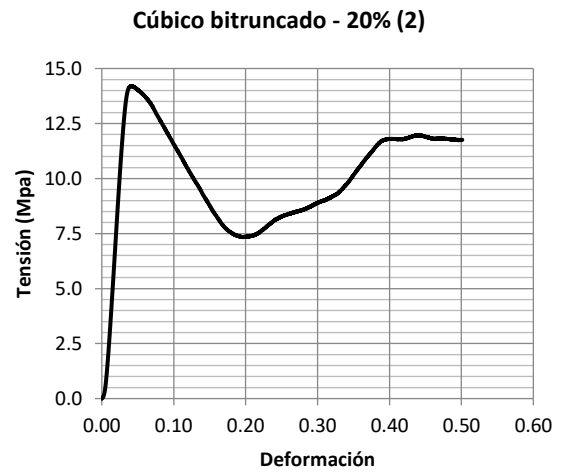
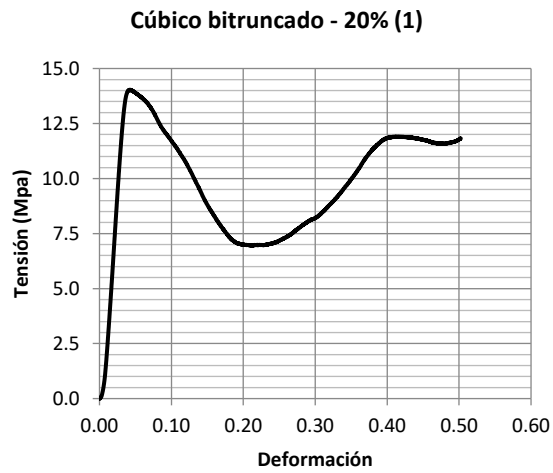


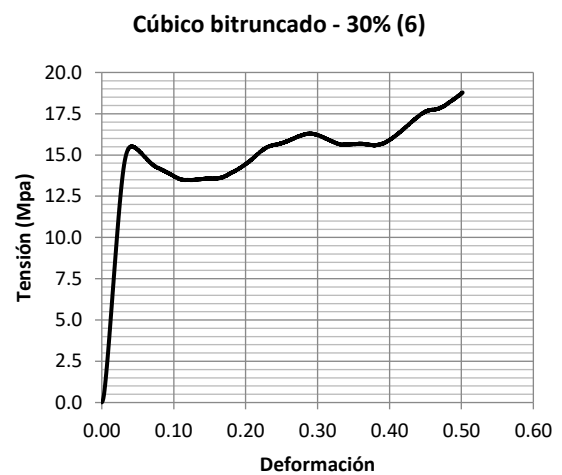
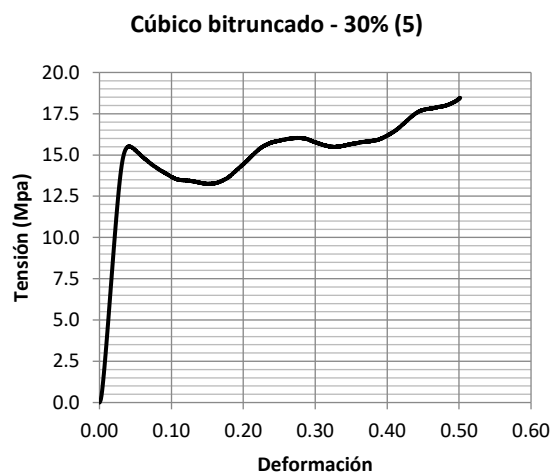
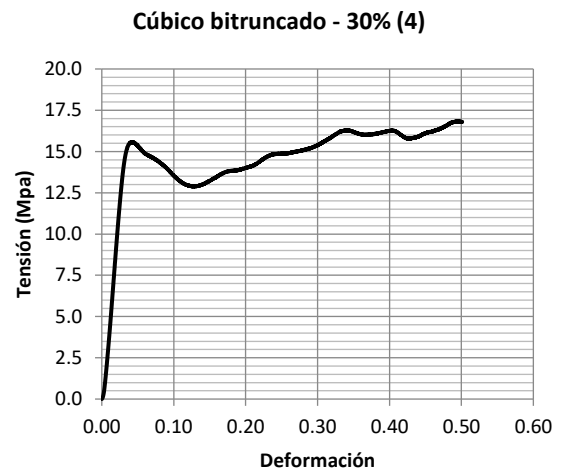
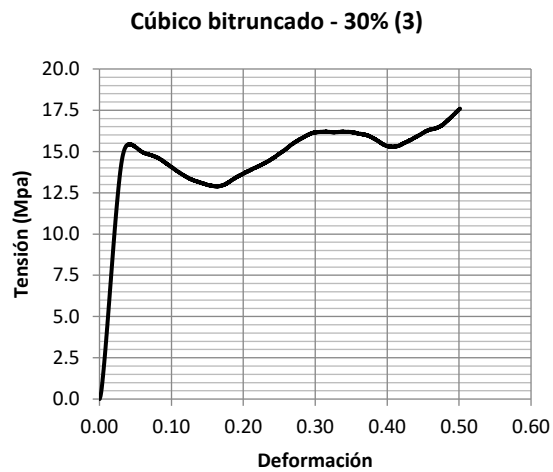
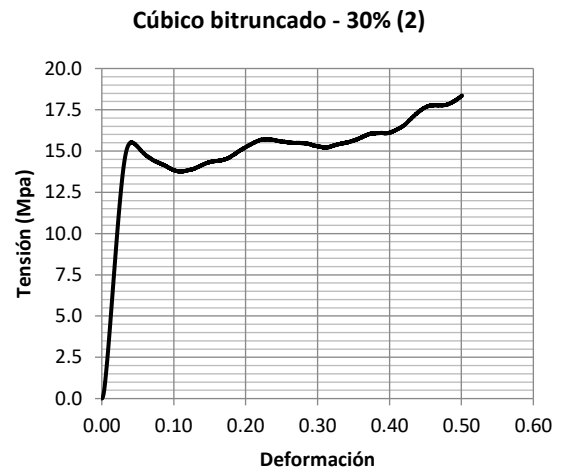
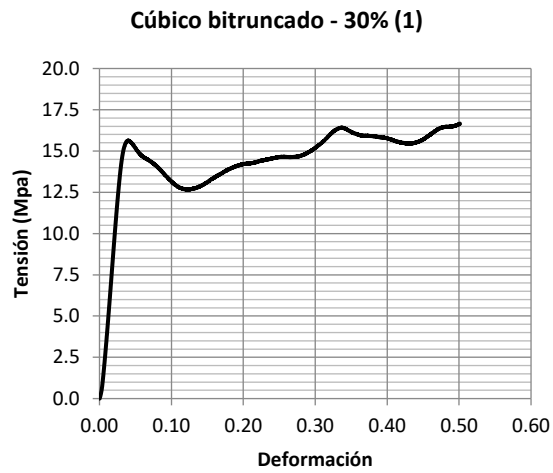
Cúbico bitruncado - 10% (5)

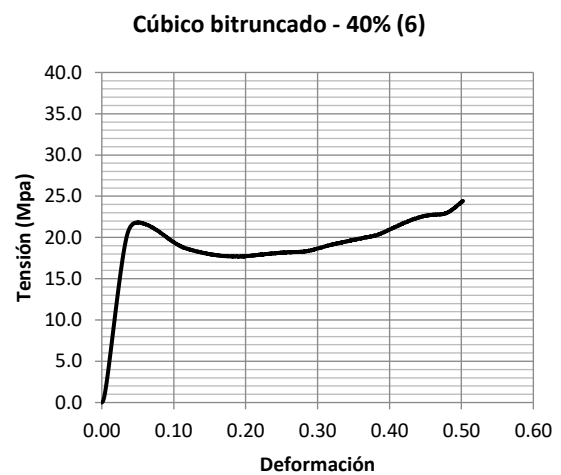
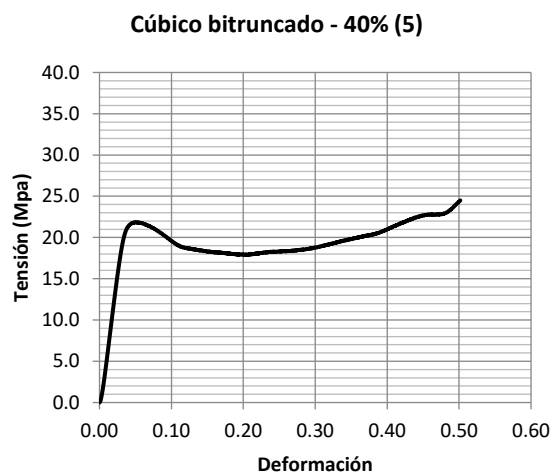
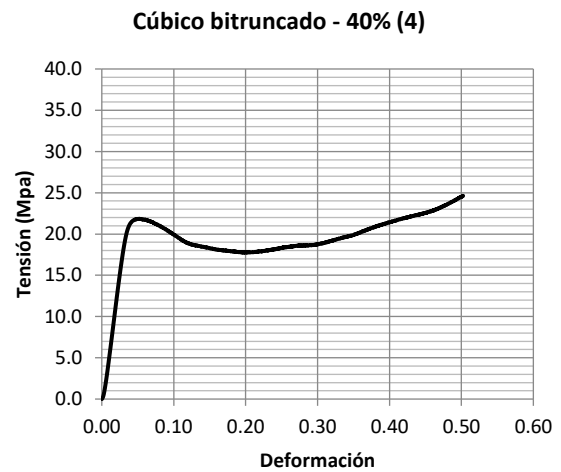
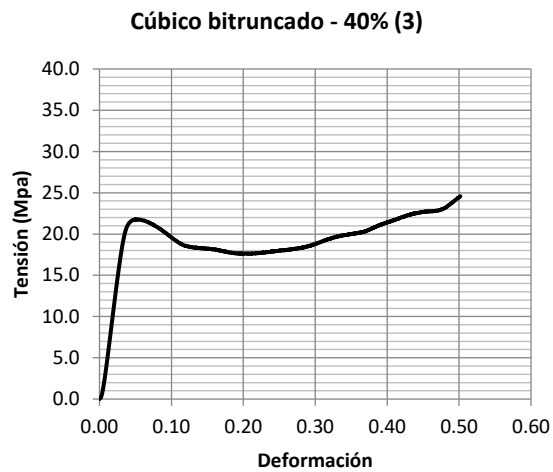
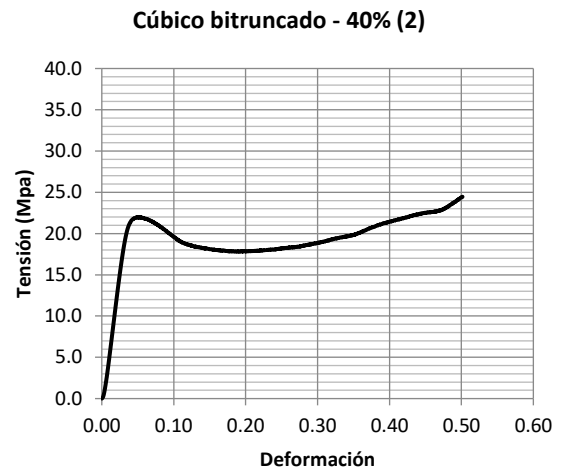
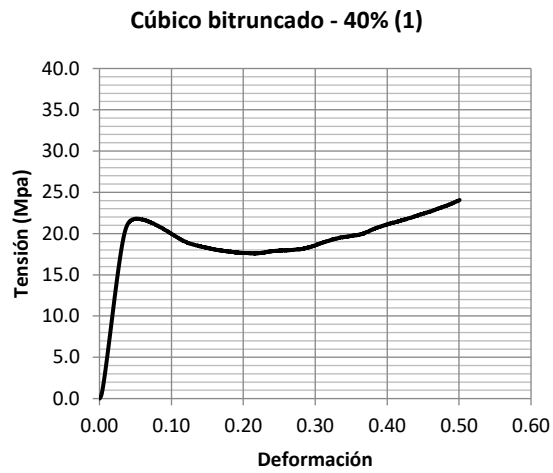


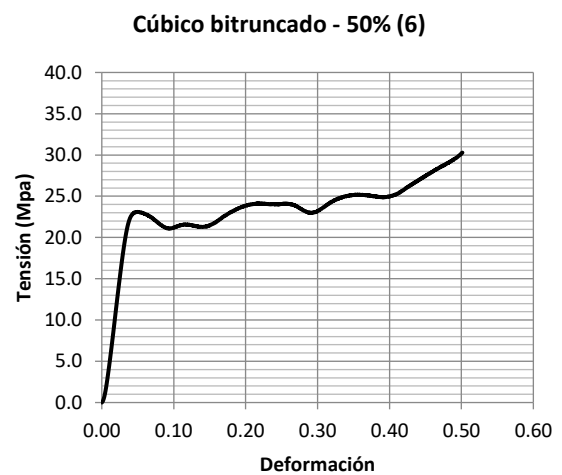
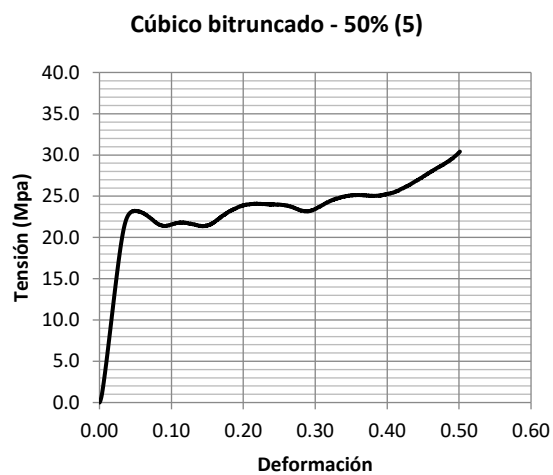
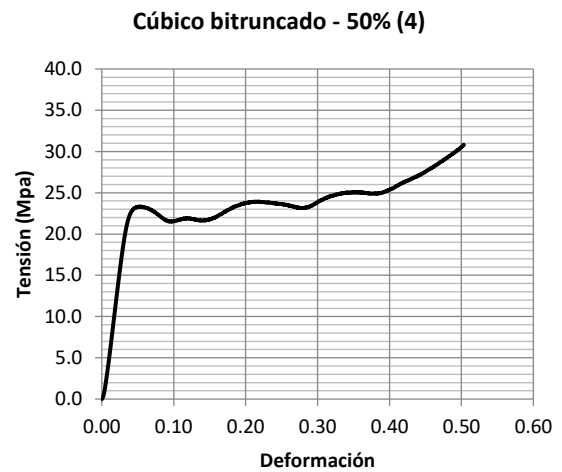
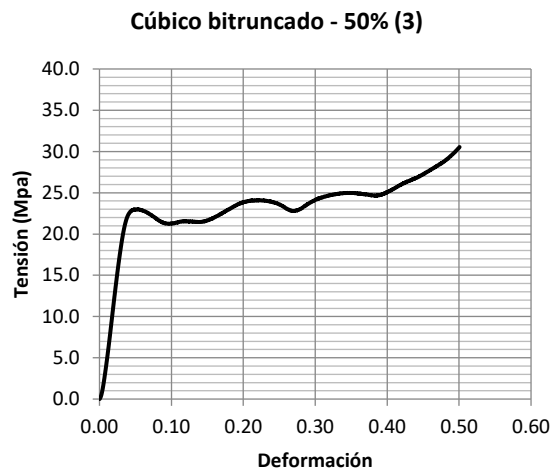
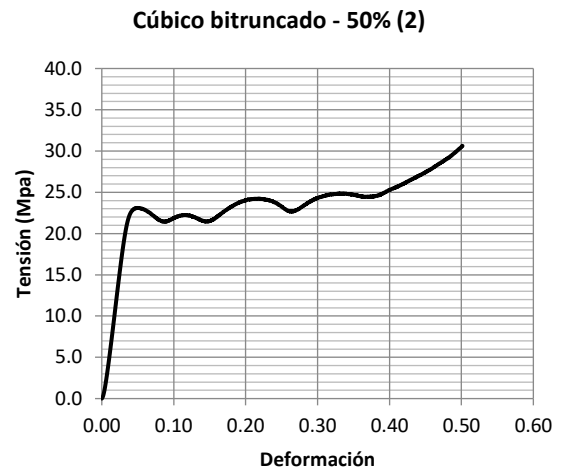
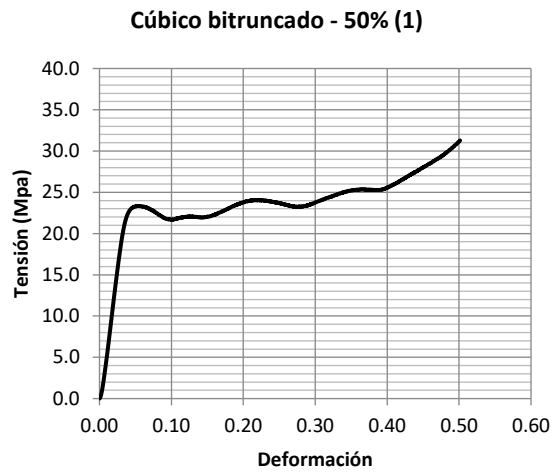
Cúbico bitruncado - 10% (6)





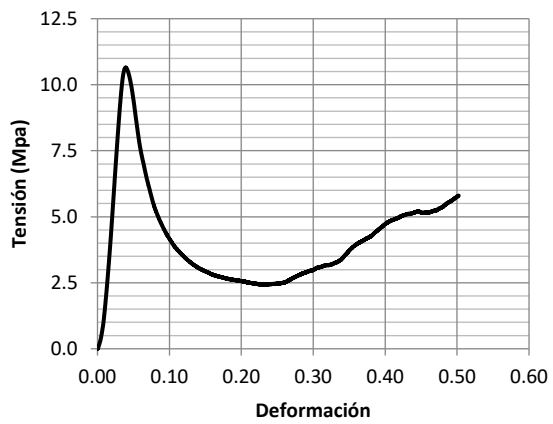




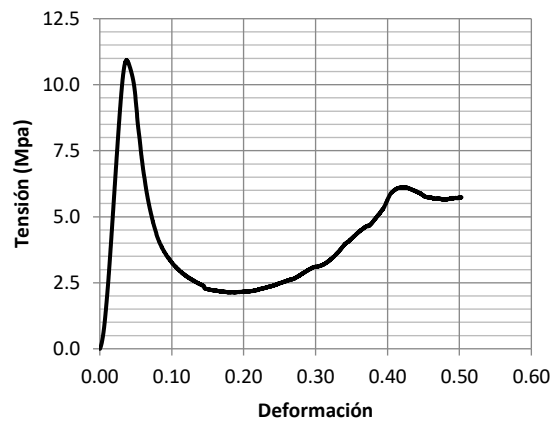


IV.5. Subdivisión cúbica

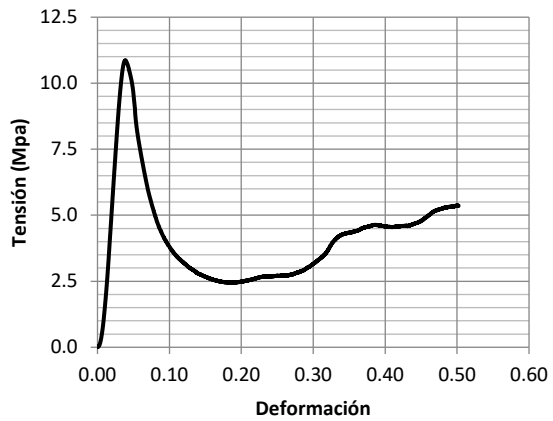
Subdivisión cúbica - 10% (1)



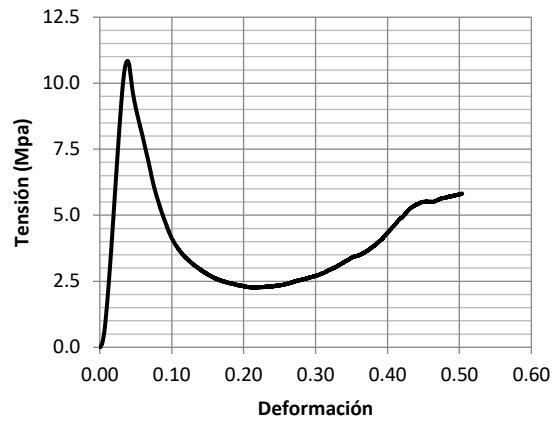
Subdivisión cúbica - 10% (2)



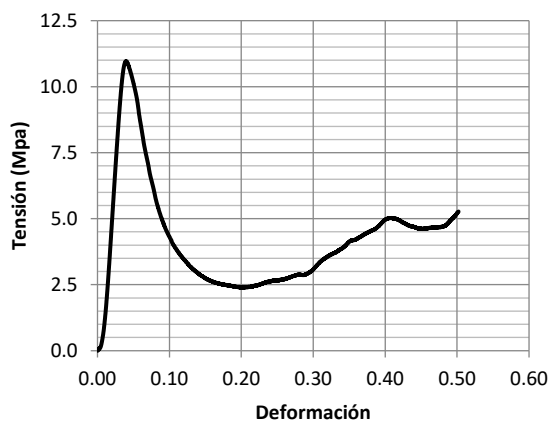
Subdivisión cúbica - 10% (3)



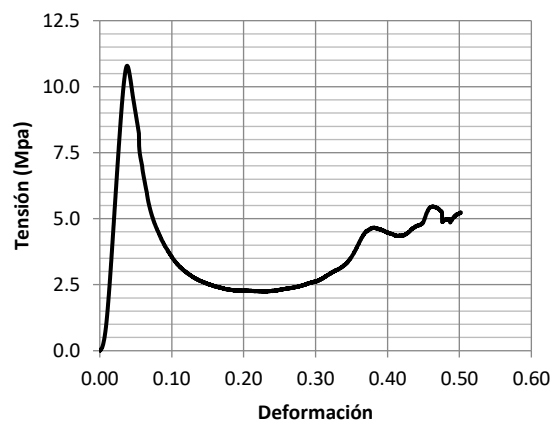
Subdivisión cúbica - 10% (4)

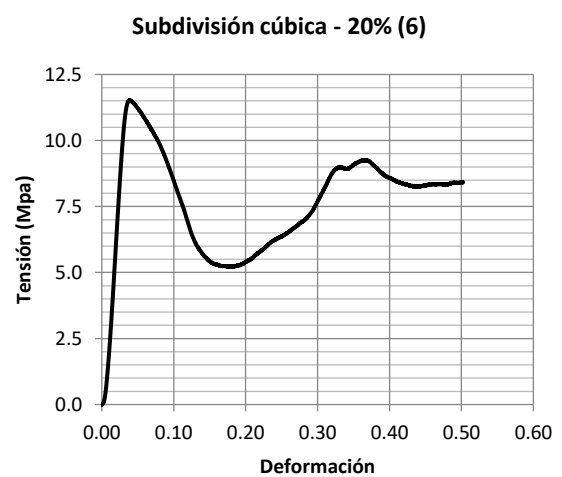
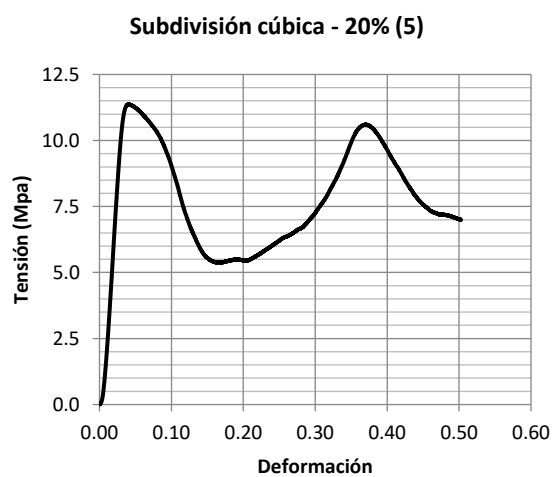
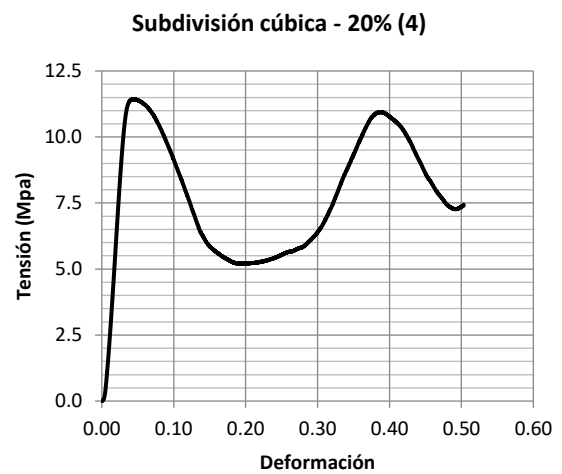
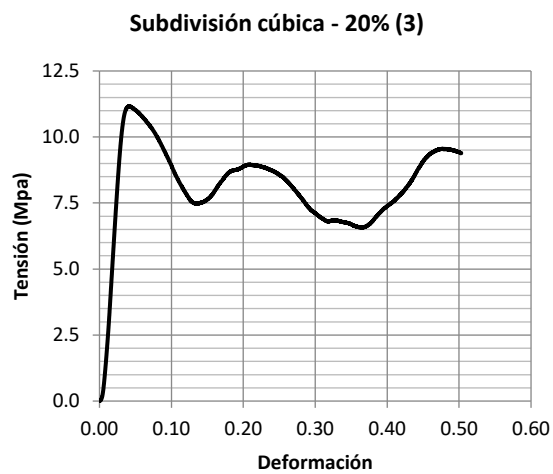
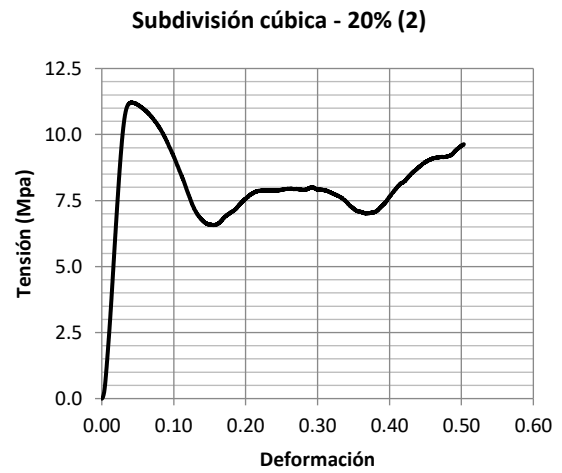
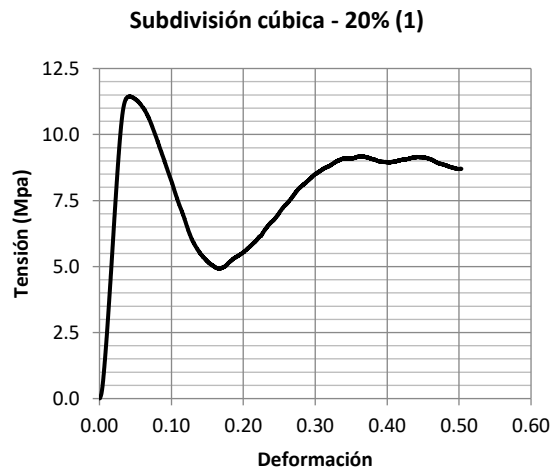


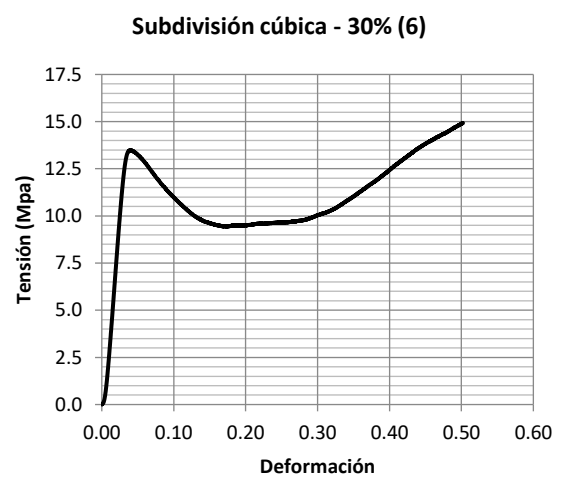
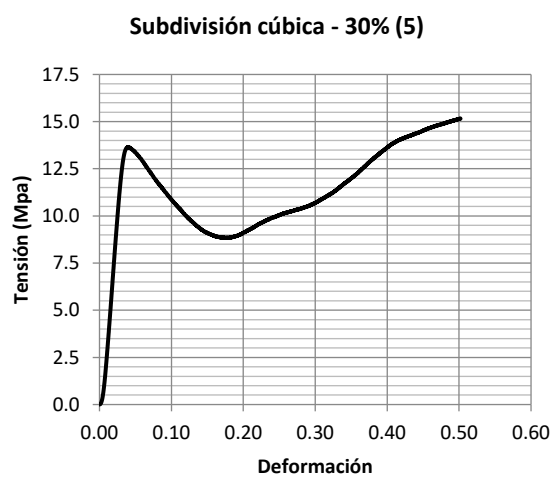
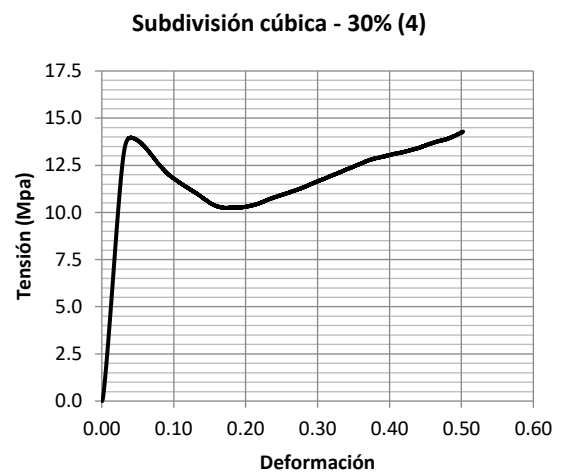
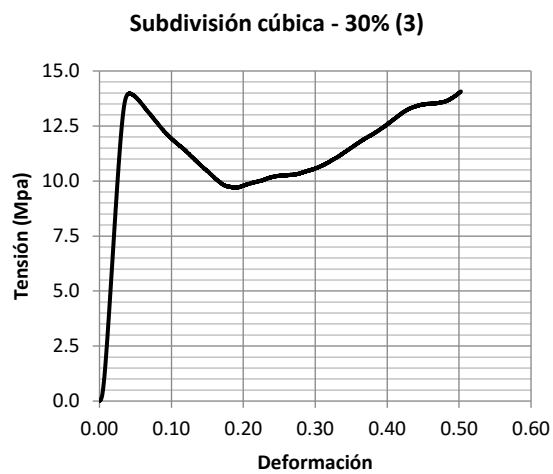
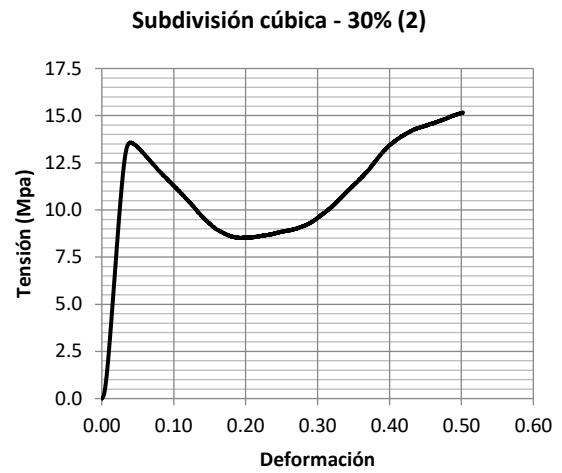
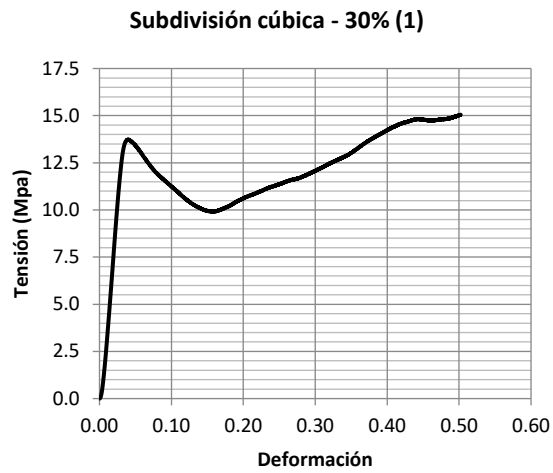
Subdivisión cúbica - 10% (5)

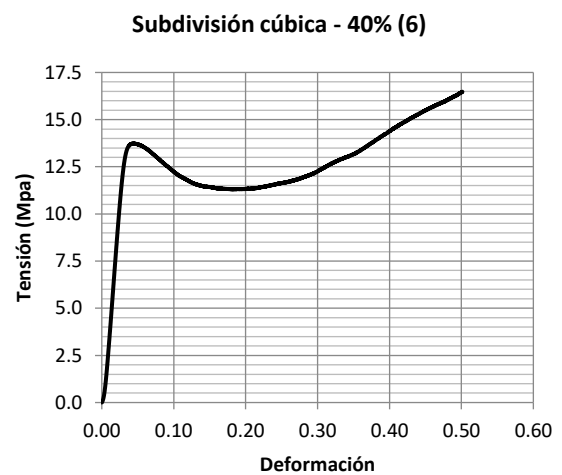
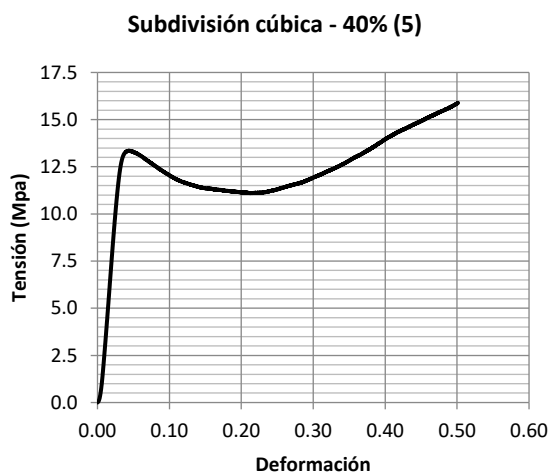
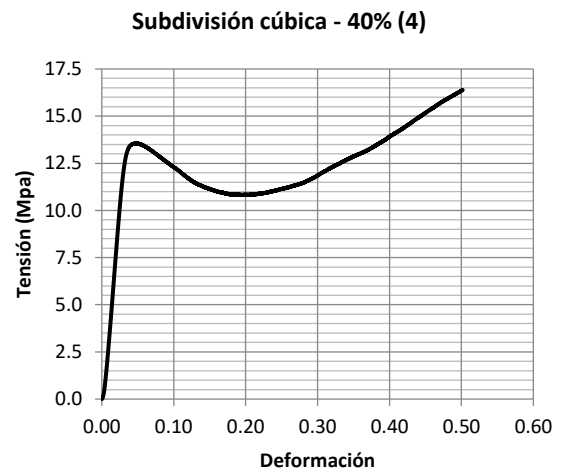
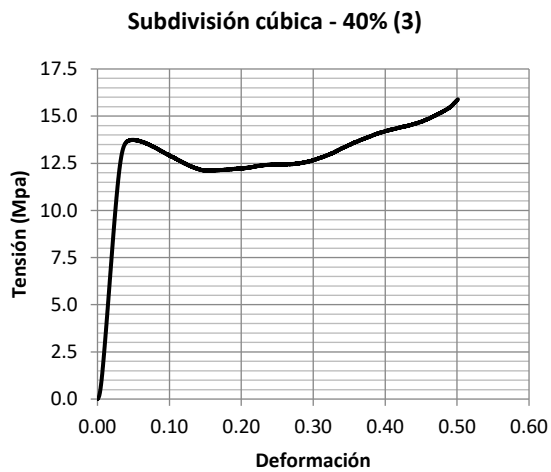
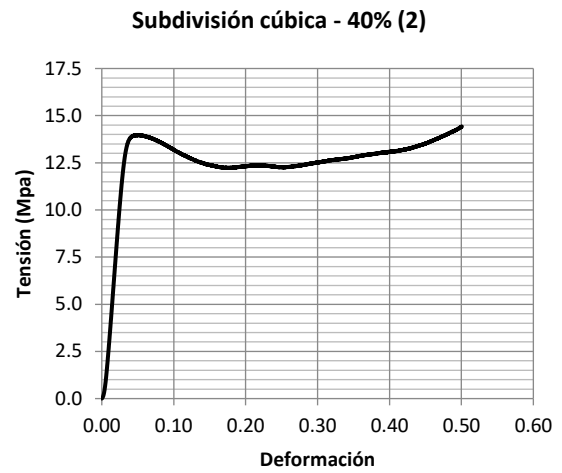
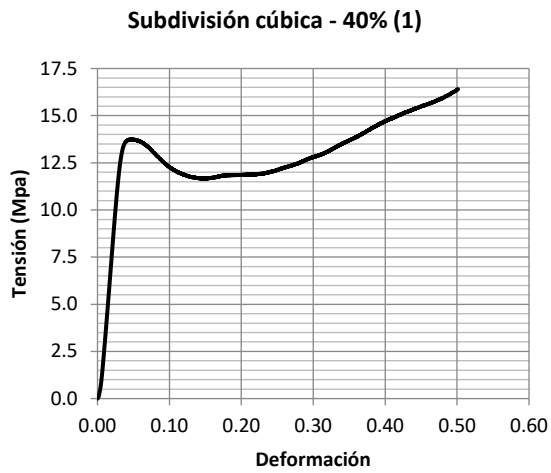


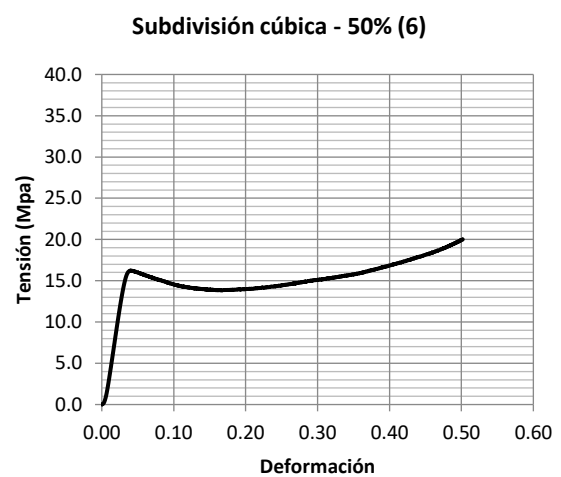
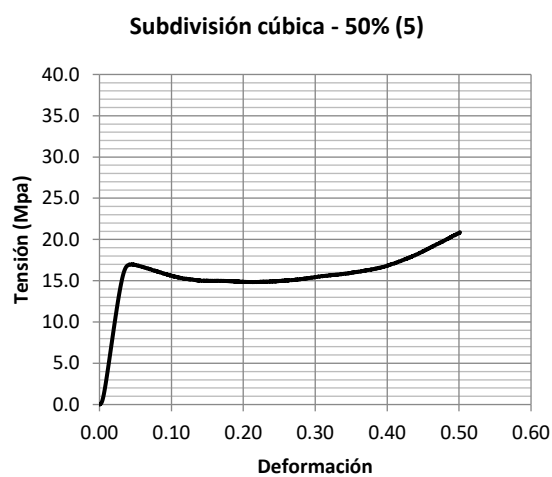
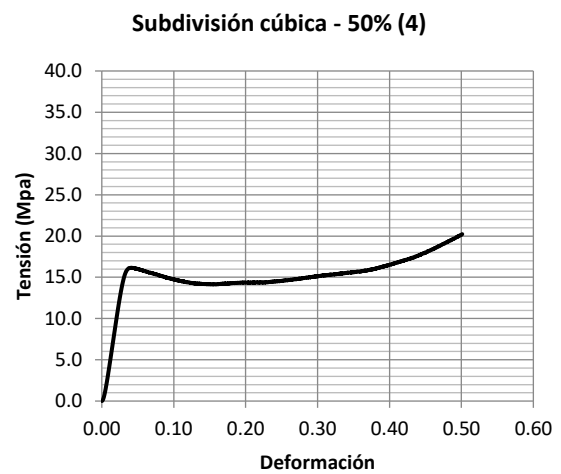
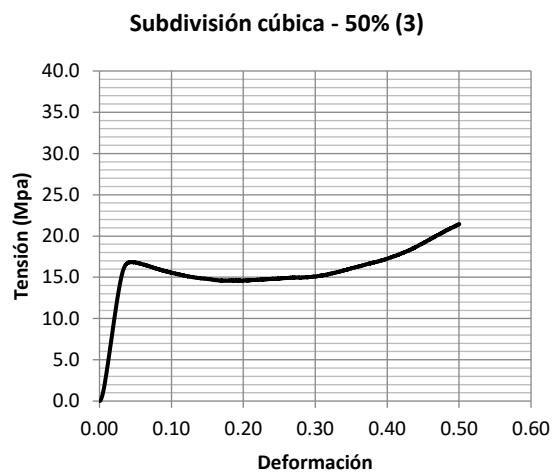
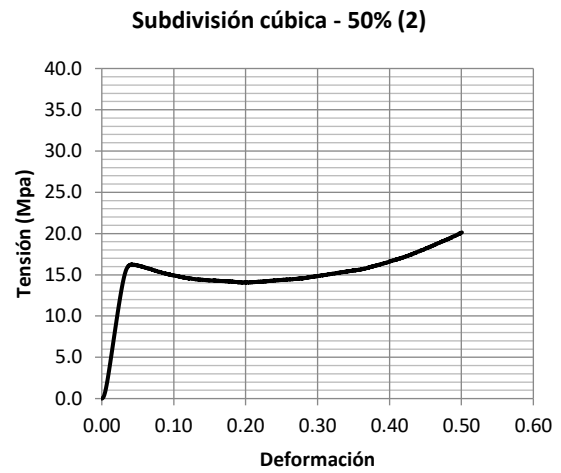
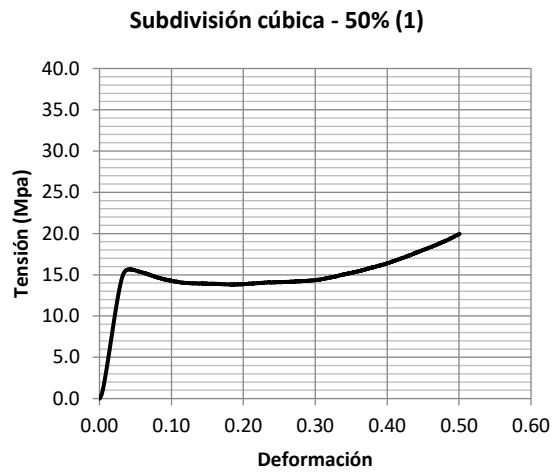
Subdivisión cúbica - 10% (6)











Anexo V. Ficha técnica PLA

PLA

TECHNICAL DATA SHEET VERSION 1.1



PLA

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



Recyclable
Recyclable



Apto para contacto
con alimentos
Food Approved
Alimentos approved



Biocompostable
Biocompostable
Biocompostables

	TIPICAL VALUE	UNITS	TEST METHOD		
PHYSICAL PROPERTIES					
Chemical Name	Polylactic Acid				
Material Density	1.24	g/cm ³	ISO 1183		
Glass Transition Temperature	60	°C	D3418		
MECHANICAL PROPERTIES					
Tensile Strength at Break	50	MPa	D882		
Tensile Yield Strength	60	MPa	D882		
Tensile Modulus	3.5	GPa	D882		
Tensile Elongation	6	%	D882		
Notched Charpy Impact	5	KJ/m ²	ISO-179-1eA		
Flexural Strength	83	MPa	D790		
Flexural Modulus	3.8	GPa	D790		
THERMAL PROPERTIES					
Heat Distorsion Temperature (0.45 MPa)	55	°C	E2092		
PRINTING PROPERTIES					
Print Temperature	200-240	°C			
Hot Pad	0-60	°C			
Fan Layer	ON (100)	%			
SIZE	NET W.	GROSS W.	DIAMETERS	COLOR	PACKAGING
S	330 g	475 g	1.75 mm	Various colors	SmartBag, security seal, desiccant bag
M	750 g	975 g	1.75 mm/2.85 mm	Various colors	
L	1000 g	1256 g	1.75 mm/2.85 mm	Various colors	

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

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

smart materials 3D

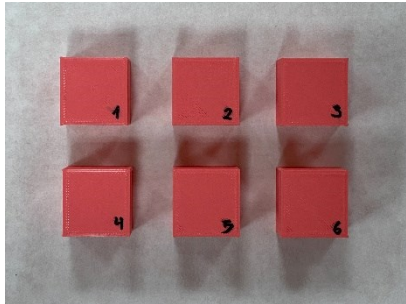

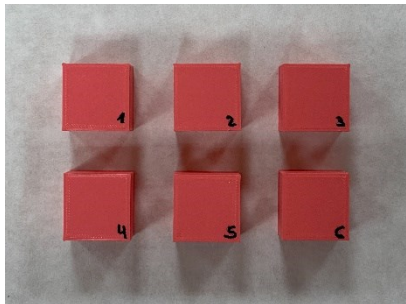
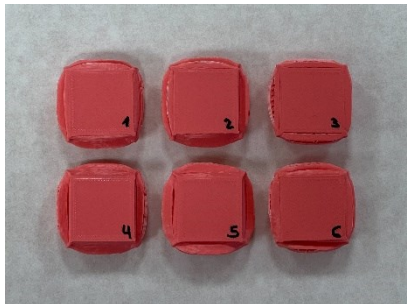
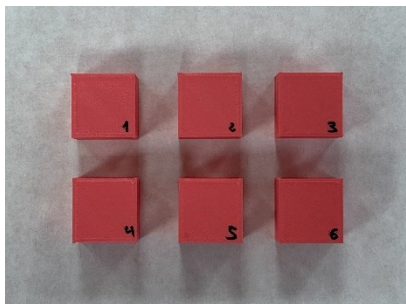
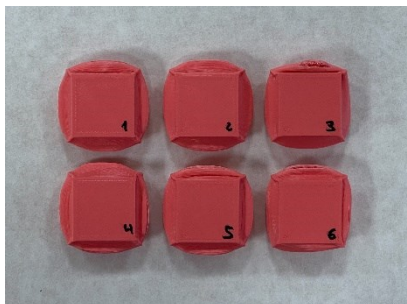
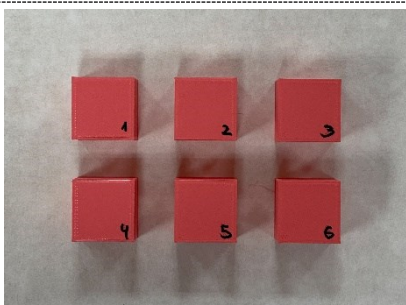
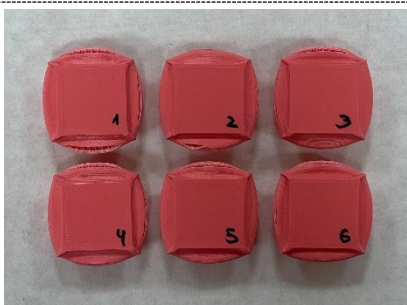
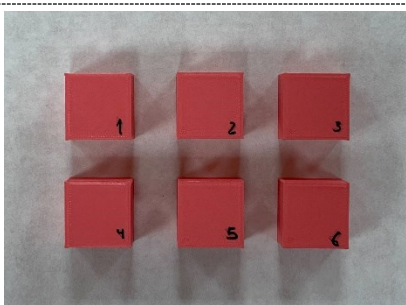
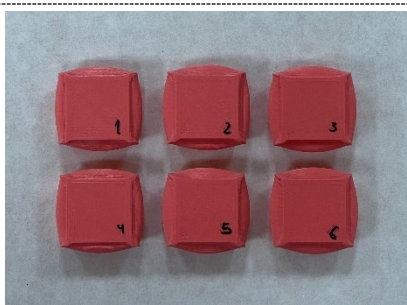
@ www.smartmaterials3d.com

✉ info@smartmaterials3d.com

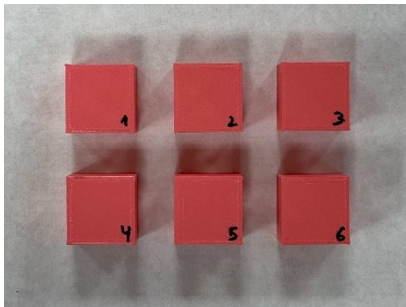

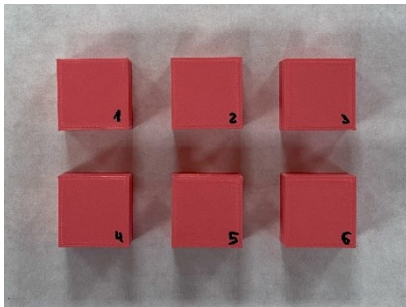
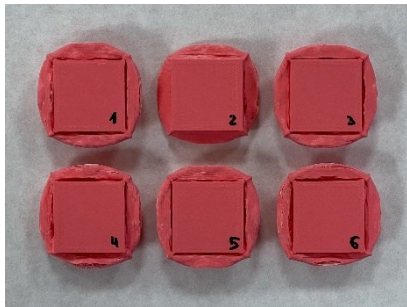
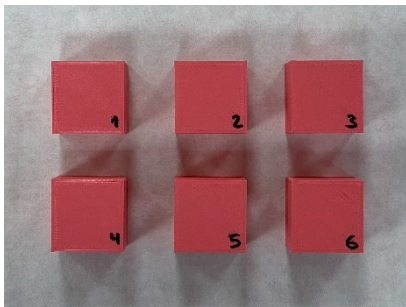
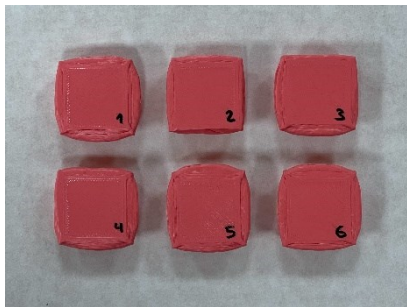
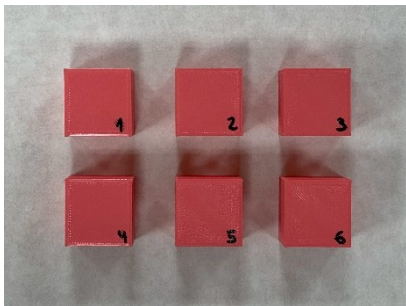
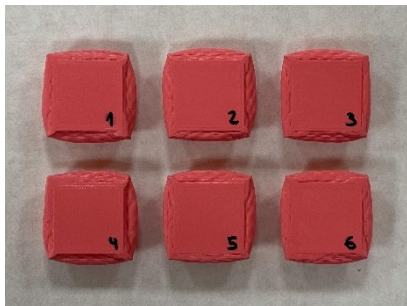
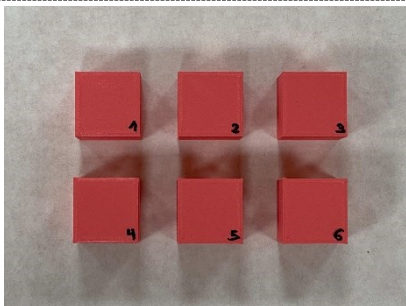
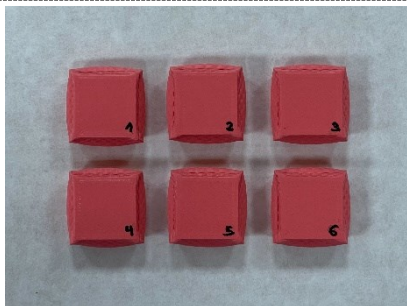
☎ +34 953 041 993

Anexo VI. Imágenes de roturas

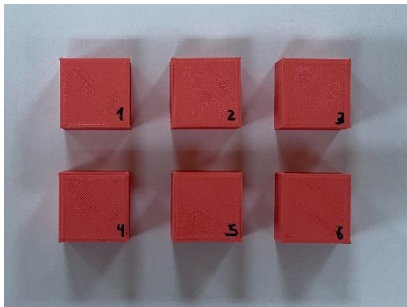

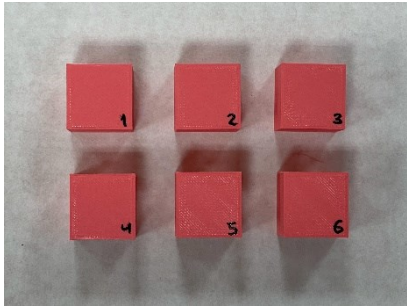
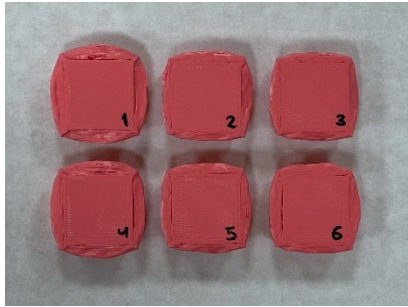
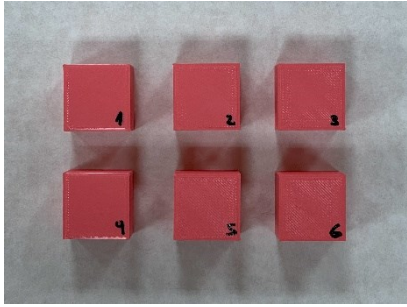

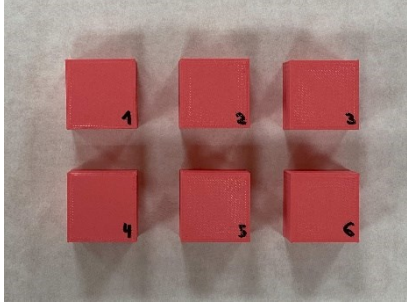
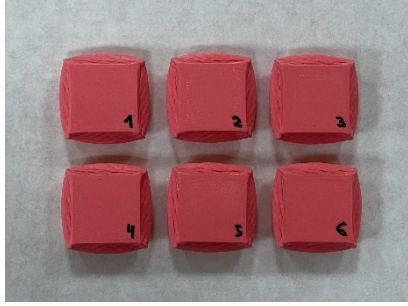
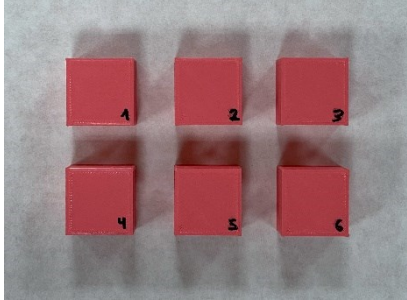
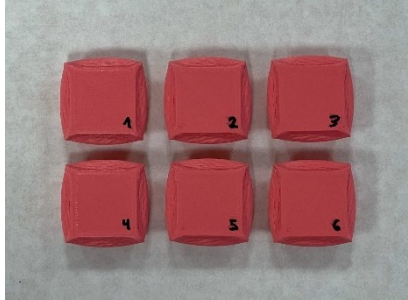
VI.1. Giroide

Relleno	Antes	Después
10 %		
20 %		
30 %		
40 %		
50 %		

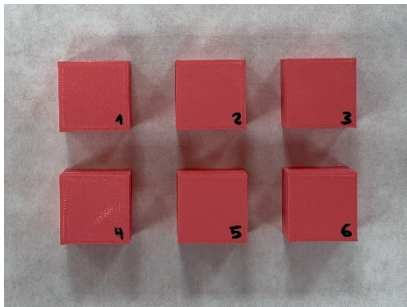

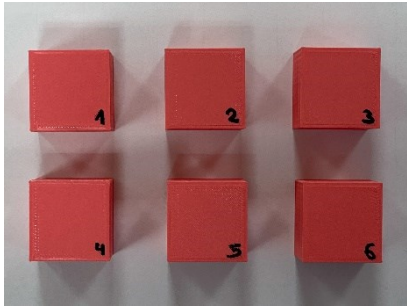
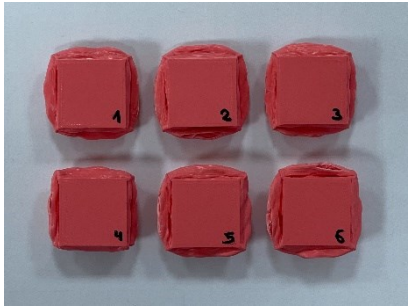
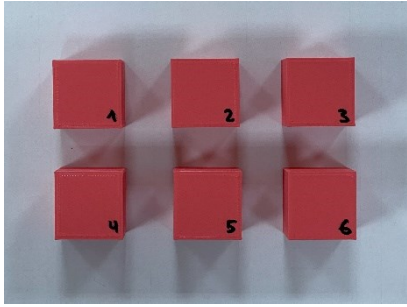
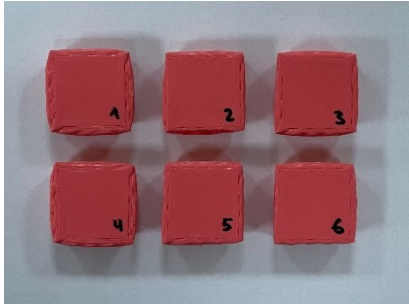
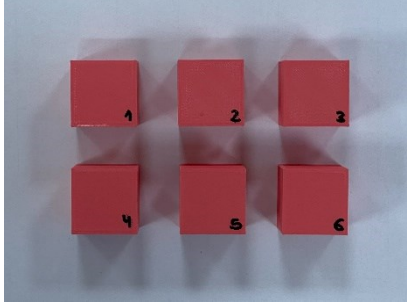

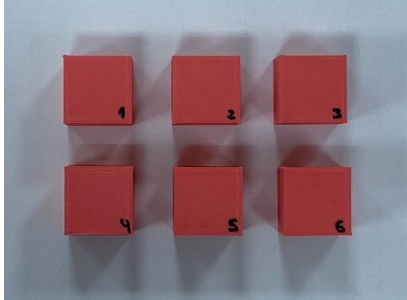

VI.2. Octeto

Relleno	Antes	Después
10 %		
20 %		
30 %		
40 %		
50 %		

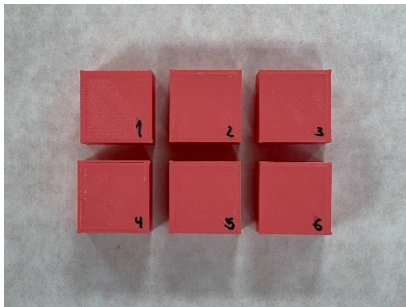

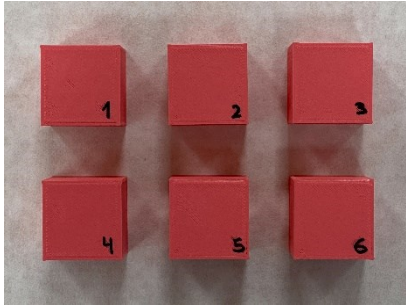
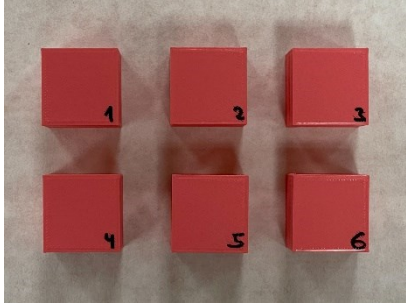

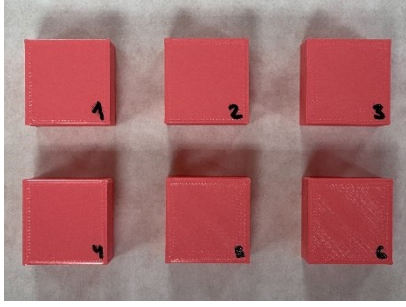
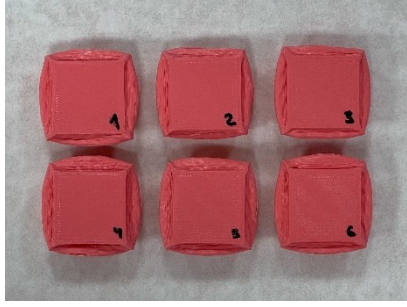
VI.3. Cúbico

Relleno	Antes	Después
10 %		
20 %		
30 %		
40 %		
50 %		

VI.4. Cúbico bitruncado

Relleno	Antes	Después
10 %		
20 %		
30 %		
40 %		
50 %		

VI.5. Subdivisión cúbica

Relleno	Antes	Después
10 %		
20 %		
30 %		
40 %		
50 %	