

Máster Oficial Interuniversitario



UNIVERSIDAD  
DE  
CORDOBA

Representación y Diseño  
en Ingeniería y Arquitectura

ual  
uco  
uma

Trabajo Fin de Máster

# Estudio de la deformación por flexión de piezas impresas en 3D

Esperanza Macarena  
Gázquez Sánchez

Curso | 2019-2020  
Convocatoria | Febrero

Director/es:

José Domingo Álvarez Hervás  
José Luis Torres Moreno



## Índice

1. Introducción .....	1
2. Materiales y métodos .....	7
2.1 Recursos empleados.....	9
2.2 Diseño de piezas.....	10
2.3 Banco de pruebas .....	12
3. Resultados y discusión .....	15
3.1 Resultados para el patrón de relleno de tipo <i>grid</i> .....	15
3.2 Resultados para el patrón de relleno de tipo <i>concentric</i> .....	18
3.3 Resultados para el patrón de relleno de tipo <i>tri-hexagon</i> .....	20
3.4 Comparativa entre los resultados de los tres patrones de relleno.....	23
4. Conclusiones .....	27
5. Referencias .....	29
ANEXO: Código fuente del banco de pruebas .....	30



## Índice de figuras

Figura 1. Impresora 3D con pieza en proceso de impresión.....	1
Figura 2. Esquema de viga biapoyada .....	7
Figura 3. Tensiones en una sección de la viga.....	7
Figura 4. Deformada de una viga biapoyada sometida a flexión.....	8
Figura 5. Captura de pantalla del entorno de trabajo del programa Ultimaker Cura 4.49	
Figura 6. Impresora 3D Anet A6.....	10
Figura 7. Espécimen de ensayo. Cotas en mm .....	10
Figura 8. Patrones de relleno usados en la experimentación. De arriba a abajo: grid, concentric y tri-hexagon .....	11
Figura 9. Recorrido del extrusor en piezas con relleno igual al 100% .....	11
Figura 10. Proceso de impresión de varios especímenes con distintos patrones de relleno .....	12
Figura 11. Estructura del banco de pruebas. Cotas en mm .....	13
Figura 12. Sensor de flexión .....	14
Figura 13. Modelo 3D del banco de pruebas .....	14
Figura 14. Imagen real del banco de pruebas .....	14
Figura 15. Recorrido del extrusor en el patrón de tipo grid .....	15
Figura 16. Deformación de las piezas impresas con patrón de relleno grid.....	16
Figura 17. Gasto de plástico en las piezas impresas con patrón de relleno grid .....	16
Figura 18. Tiempo de impresión para las piezas impresas con patrón de relleno grid....	17
Figura 19. Recorrido del extrusor en el patrón de tipo concentric .....	18
Figura 20. Deformación de las piezas impresas con patrón de relleno concentric.....	18
Figura 21. Gasto de plástico en las piezas impresas con patrón de relleno concentric	19
Figura 22. Tiempo de impresión para las piezas impresas con patrón de relleno concentric .....	20
Figura 23. Recorrido del extrusor en el patrón de tipo tri-hexagon .....	20
Figura 24. Deformación de las piezas impresas con patrón de relleno tri-hexagon.....	21
Figura 25. Gasto de plástico en las piezas impresas con patrón de relleno tri-hexagon	22
Figura 26. Tiempo de impresión para las piezas impresas con patrón de relleno tri-hexagon.....	22
Figura 27. Resultados de deformación para los tres tipos de patrón de relleno .....	24
Figura 28. Resultados de gasto total de plástico para los tres tipos de patrón de relleno .....	25
Figura 29. Resultados de tiempo total de impresión para los tres tipos de patrón de relleno .....	26



## Índice de tablas

Tabla 1. Deformación (en grados) de las piezas con patrón de relleno de tipo grid .....	15
Tabla 2. Gasto de plástico (en metros) de las piezas con patrón de relleno de tipo grid .....	16
Tabla 3. Tiempo de impresión (en minutos) de las piezas con patrón de relleno de tipo grid .....	17
Tabla 4. Deformación (en grados) de las piezas con patrón de relleno de tipo concéntrico .....	18
Tabla 5. Gasto de plástico (en metros) de las piezas con patrón de relleno de tipo concéntrico .....	19
Tabla 6. Tiempo de impresión (en minutos) de las piezas con patrón de relleno de tipo concéntrico .....	19
Tabla 7. Deformación (en grados) de las piezas con patrón de relleno de tipo trihexagonal.....	21
Tabla 8. Gasto de plástico (en metros) en las piezas impresas con patrón de relleno trihexagonal.....	21
Tabla 9. Tiempo de impresión (en minutos) para las piezas con patrón de relleno trihexagonal.....	22



## Tabla de acrónimos

**ABS:** Acrilonitrilo butadieno estireno.

**ASA:** Acrilonitrilo estireno acrilato.

**CAD:** *Computer-Aided Design*. Diseño asistido por ordenador.

**concentric:** patrón de relleno de tipo concéntrico.

**Cura:** *Software de slicing* desarrollado por *Ultimaker*.

**G-Code:** fichero de control numérico generado por el *software de slicing*.

**grid:** patrón de relleno de tipo malla.

**kOhm:** Kilo-Ohmios. Unidad de resistencia eléctrica.

**MPa:** Mega-Pascales. Unidad de medida de esfuerzos y tensiones.

**N:** Newton. Unidad de medida de fuerza.

**OBJ:** *Object File*. Formato de fichero de modelado 3D.

**OLED:** Diodo orgánico de emisión de luz.

**PC:** Policarbonato.

**PET:** Tereftalato de polietileno.

**PETG:** Copolimerización de Tereftalato de Polietileno.

**PLA:** Ácido poliláctico.

**Slicing:** laminado en capas de un modelo 3D.

**STL:** *Standard Triangle Language*. Formato de fichero de modelado 3D.

**tri-hexagon:** patrón de relleno de tipo hexagonal y triangular.



## Resumen

Este Trabajo Fin de Máster analiza el comportamiento de piezas impresas en 3D sometidas a esfuerzos de flexión. Para ello, se diseña y construye un banco de pruebas en el que se ensayan las piezas y que permite medir el ángulo de deformación por flexión que sufren los especímenes. En este banco de pruebas las piezas están colocadas de forma que se comportan como una viga biapoyada en sus dos extremos con una carga puntual aplicada en el centro de la misma. Cada pieza tiene unas características determinadas, con distintos patrones y porcentajes de relleno. Los patrones de relleno utilizados son los de tipo *grid*, *concentric* y *tri-hexagon* con unos porcentajes de 10, 20, 40, 60, 80 y 100%. Además, en cada caso, han sido medidos también el gasto de material y el tiempo de impresión. Las hipótesis de partida se cumplen, obteniendo como patrón de relleno más flexible el de tipo *concentric*, seguido del *grid* que tiene un comportamiento intermedio, hasta llegar al *tri-hexagon*, que es el más rígido. Estos resultados pueden ayudar a un usuario de impresora 3D a elegir qué tipo de patrón y porcentaje de relleno le puede interesar según sus necesidades, conociendo de antemano el grado de flexibilidad.

## Palabras clave

Impresión 3D, PLA, flexión, patrón de relleno.



## Abstract

This work analyzes the behaviour of 3D printed structures under bending efforts. A test bench was designed and built. We tested a set of specimens in order to get the measure of the deformation angle caused by bending. In this test bench, the specimens are placed as a beam mounted on two supports. The force is applied in the middle of the specimen. The set of specimens is composed of pieces with different infill patterns and percentages. The infill patterns used are *grid*, *concentric* and *tri-hexagon* with percentages of 10, 20, 40, 60, 80 and 100 percent. In addition, for each case, the material and printing time cost has also been measured. Our hypotheses are fulfilled. We conclude that *concentric* pattern is the most flexible, followed by *grid*, which has an intermediate behavior, and *tri-hexagon* is the most rigid. The results could help a 3D printer user to choose in advance what the most flexible or rigid infill pattern and percentage is depending on needs.

## Key words

3D-Printing, PLA, bending, infill pattern.





## 1. Introducción

El mundo avanza muy rápido y las nuevas tecnologías están cada vez más presentes en nuestro día a día. Un ejemplo del desarrollo tecnológico en el que nos encontramos inmersos es la utilización de impresoras 3D en muchos campos distintos del conocimiento.

Una impresora 3D [1] es una máquina que permite imprimir objetos en 3D partiendo de un diseño concreto que se genera mediante un programa CAD (Diseño Asistido por Ordenador) en formatos OBJ o STL (véase *figura 1*). Los diseños pueden ser piezas, figuras, etc. que se obtienen de forma gratuita en Internet o son creados y personalizados desde cero. Su uso en la actualidad está cada vez más extendido en muchas ramas distintas del conocimiento (medicina, arquitectura, ingeniería, etc.). Cabe resaltar su utilización en la fabricación de prótesis médicas, ya que la impresión 3D permite adaptar cada pieza fabricada a las características exactas de cada paciente.



Figura 1. Impresora 3D con pieza en proceso de impresión

El origen de este Trabajo Fin de Máster tiene que ver con la necesidad de conocer hasta qué punto una pieza impresa en 3D es lo suficientemente flexible como para ser capaz de soportar esfuerzos de flexión sin romperse ni deformarse excesivamente, dependiendo de la función que pretendamos que realice. Todo esto sin olvidar que deberíamos conseguir nuestro objetivo buscando la optimización tanto en tiempos como en cantidad de material. Es decir, siempre vamos a pretender obtener piezas impresas en 3D lo suficientemente flexibles en el menor tiempo posible de impresión y con el menor gasto de materia prima (en este caso, plástico). Sin embargo, también puede ocurrir lo contrario: que no necesitemos una pieza flexible, sino completamente rígida.



En función de para qué vayamos a utilizar la pieza en cuestión, necesitaremos que esta cumpla unos requisitos u otros en cuanto a flexión. Para ello, hemos de conocer bien los diferentes parámetros que intervienen en el proceso de diseño: tipo de plástico, patrón y porcentaje de relleno, temperatura de impresión, altura de capa y tipo de extrusor. Un proceso de diseño adecuado hará que el producto que obtengamos cumpla con las condiciones impuestas y, además, que lo haga logrando una optimización en cantidad de plástico y de tiempo.

Para la impresión en 3D existen distintos filamentos y a la hora de utilizar uno u otro se debe tener en cuenta que para cada uno de ellos hay una técnica de impresión distinta a aplicar. Todos son materiales termoplásticos, es decir, son maleables cuando están calientes, y una vez dada la forma deseada, se dejan enfriar. Entre los diversos tipos de plásticos utilizados en impresión 3D [2], podemos destacar:

- Ácido poliláctico (PLA): es un termoplástico biodegradable, hecho a base de recursos naturales como el almidón de maíz o la caña de azúcar. Se utiliza principalmente en implantes médicos, envases de alimentos y vajillas desechables. Su gran ventaja radica en que ofrece una gran capacidad de biodegradación bajo condiciones adecuadas, es decir, es un material más sostenible que otros tipos de plástico.
- Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS): es un termoplástico derivado del petróleo, muy utilizado en la fabricación de tuberías, cascos o juguetes. Su proceso de impresión es más complejo que el del PLA, ya que durante la misma genera una serie de humos perjudiciales tanto para el ser humano como para el planeta.
- Acrilonitrilo estireno acrilato (ASA): posee propiedades similares al ABS, aunque es más resistente a los rayos UV.
- Tereftalato de Polietileno (PET): se suele utilizar para piezas que vayan a estar en contacto con productos alimenticios, es semi-rígido y tiene una buena resistencia. Es, por ejemplo, el que vemos usualmente en las botellas de plástico de un solo uso.
- Policarbonato (PC): posee una alta resistencia y es capaz de soportar temperaturas elevadas, pudiendo mantenerse sin deformarse hasta los 150°C. Es muy usado para aplicaciones de ingeniería.

Estos son los tipos de plástico más utilizados comúnmente. Existen muchos más, que se suelen emplear para aplicaciones más específicas y que necesitan impresoras 3D más complejas y potentes que las que un usuario estándar puede adquirir. Para el



desarrollo de este trabajo utilizamos el tipo de plástico PLA, ya que es el más utilizado a nivel usuario con impresoras 3D de bajo coste. Además, es el menos perjudicial para el medio ambiente.

En los últimos años, se ha avanzado mucho en el área de la impresión 3D y son bastantes los autores que investigan en este campo. Es importante conocer muy bien los distintos tipos de plástico, sus características mecánicas, la impresora más idónea para imprimir según el tipo de plástico, así como los parámetros con los que debemos configurar el proceso de impresión.

En [3] analizaron la resistencia a la fractura y la adhesión entre capas de una misma pieza impresa en 3D realizada con distintos tipos de plástico, con un porcentaje de relleno del 100%. Los ensayos los hicieron en laboratorio utilizando una máquina MTS de prueba de tensión de materiales, la cual permite medir los esfuerzos de tracción, compresión y flexión en cualquier pieza. Concluyeron que tanto la resistencia a la fractura como la adhesión entre capas aumentaban con la temperatura de impresión.

Otro ejemplo de estudio de resistencia de piezas impresas en 3D lo vemos en [4]. En este caso, sometieron piezas de plástico de tipo ABS con diferentes geometrías, orientación de capa y patrones de relleno (todas al 100%) a esfuerzos de tracción. Obtuvieron el efecto que tiene el patrón de relleno y su dirección sobre la fractura que se produce al romper las piezas a tracción. Al observar las fracturas a nivel microscópico, vieron que las piezas que estaban impresas con un patrón de relleno paralelo a la longitud mayor del espécimen o perpendicular entre una capa y la siguiente, tenían mayor deformación antes de la rotura que las que estaban impresas en dirección transversal a la longitud principal del espécimen. Es decir, estas últimas tenían una fractura más plana y con menos deformación plástica.

Al igual que en el artículo descrito en el párrafo anterior, en [5] estudian el comportamiento mecánico a tracción de una serie de piezas de plástico ABS con distintos patrones de relleno, pero esta vez cambiando también su densidad. El resultado fue que la influencia de los diferentes patrones de relleno causaba una variación de menos del 5% en la resistencia máxima a tracción en piezas impresas al 100% de relleno. Sin embargo, al cambiar el porcentaje de relleno, observaron que la resistencia a tracción variaba notablemente. La mayor resistencia a tracción la obtuvieron para un patrón rectilíneo de relleno al 100%.

El artículo [6] tiene como objetivo el estudio del efecto de la orientación, el espesor de capa y la tasa de alimentación en el comportamiento mecánico de piezas impresas



con plástico de tipo PLA. Para ello, las sometieron a esfuerzos de tracción y flexión. Las piezas impresas en dirección vertical, pero con las capas en paralelo a la base de la impresora, fueron las que peores características mecánicas mostraron. Las piezas impresas "de canto" y con las capas en paralelo a la base de la impresora, así como las impresas con su longitud más larga sobre la base de la impresora y las capas también paralelas a estas, fueron las que obtuvieron mejores características mecánicas. Por otro lado, observaron que la ductilidad decrecía conforme aumentaba el espesor de capa y la tasa de alimentación. Además, las propiedades mecánicas aumentaban a medida que aumentaba el espesor de la capa y disminuían según aumentaba la tasa de alimentación para la orientación vertical.

Como hemos indicado anteriormente, además de todos los parámetros que necesitamos conocer para diseñar correctamente el proceso de impresión, también hemos de tener en cuenta no excedernos ni en cantidad de plástico ni en tiempo de impresión. Es de sobra conocido el hecho de que uno de los problemas de la impresión 3D es el tiempo. Esto es lo que analizan en el artículo [7], donde establecieron una relación entre distintos patrones de relleno, propiedades mecánicas y tiempo de impresión en piezas impresas con plástico de tipo ABS. Este estudio sirve de guía para seleccionar el diseño óptimo de relleno en función de la resistencia que necesitemos y el coste de impresión asociado.

En [8] encontramos un análisis mecánico de piezas impresas en 3D con plástico de tipo PLA obtenidas con una impresora 3D de bajo coste. Los especímenes utilizados tenían el mismo patrón de relleno (al 100%) e iban cambiando la orientación de las capas ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$ ). Las pruebas realizadas consistieron en someterlos a distintos esfuerzos de tracción, flexión y fatiga del material. La pieza más fuerte a tracción fue la que presentaba una orientación de las capas de  $45^\circ$ , alcanzando un valor de tensión igual a 64 MPa antes de romperse. En cambio, para la fatiga del material, obtuvieron valores similares en las orientaciones de  $0^\circ$  y  $45^\circ$ , siendo la de  $90^\circ$  la que peor se comportaba con bastante diferencia de las anteriores. La parte más interesante de este artículo de cara al desarrollo de nuestro trabajo es en la que estudian la flexión. Utilizaron un dispositivo en el que la pieza a ensayar se colocaba como una viga biapoyada, es decir, simplemente apoyada en sus dos extremos, y aplicaron la fuerza en el centro de la misma. Midieron el esfuerzo de flexión necesario para que se produjese la rotura del espécimen, obteniendo que el más resistente a flexión era el que presentaba una orientación de capa de  $0^\circ$ , con un valor de esfuerzo final de flexión igual a 102 MPa. Los especímenes con orientación de capa de  $45^\circ$  y  $90^\circ$  presentaron valores similares a esfuerzos de flexión, 90 MPa y 86 MPa. Además, hicieron



ensayos del filamento PLA y obtuvieron resultados similares a los de los especímenes, llegando a la conclusión de que el plástico ya utilizado podría ser reciclado para obtener nuevas piezas sin perder sus propiedades mecánicas.

Una de las aplicaciones más importantes de la impresión 3D la encontramos en la actualidad en el campo de la medicina, especialmente en la fabricación de prótesis adaptables y personalizables a la anatomía de cada paciente. Para ello, se necesita que flexibilidad y resistencia estén en consonancia, de forma que las prótesis sean seguras y cómodas. En [9] analizan la influencia del patrón de relleno y su porcentaje con distintos tipos de plástico en las propiedades mecánicas de una plantilla ortoprotésica para pies fabricada mediante impresión 3D. Realizaron ensayos de tracción, flexión y dureza. Concluyeron que tanto el tipo de patrón de relleno como su densidad y el tipo de plástico utilizado influyen en todas las características mecánicas de la plantilla. Si nos centramos en el estudio de la flexión, en ella influye mucho el material utilizado. En este estudio vemos como los dos plásticos analizados se comportan de manera muy diferente frente a este esfuerzo (estando los dos considerados filamentos flexibles en el mercado). De hecho, los autores destacan que el mejor comportamiento tiene lugar con un relleno de densidad 80% y una fuerza de flexión igual a 16,5N, frente al otro material estudiado cuyo mayor valor de flexión máxima es de 2,28N con un relleno del 70%. Por tanto, vemos como hay muchos factores distintos que van a influir en el comportamiento a flexión de piezas impresas en 3D.

Visto el análisis de [10], es complicado en la actualidad conocer con exactitud las características mecánicas de piezas impresas en 3D, ya que estas van a depender de multitud de factores, como son la temperatura (tanto de impresión como la temperatura ambiente), el tipo de plástico, el patrón y porcentaje de relleno, la altura de capa, etc. Según los autores, dados estos problemas, y la cantidad de tecnologías de impresión diferentes que podemos encontrar, no podemos exigir un solo estándar a una prueba mecánica en particular. Habría que tratar de establecer una base con distintas pruebas estándar aplicables a estas piezas para hacer que los productos sean más reproducibles, confiables y seguros.

En este Trabajo Fin de Máster vamos a estudiar la deformación debida a esfuerzos de flexión que se produce justo antes de la rotura de piezas impresas en 3D con plástico de tipo PLA. Esto lo haremos para un diseño de pieza prefijado, variando el tipo y la densidad de relleno. Igualmente se estudiará el gasto de material y tiempo de impresión que supone la obtención de cada espécimen. En el apartado 2,



describiremos los materiales y métodos empleados para el desarrollo de los experimentos. Los resultados asociados a dicha experimentación y su análisis se muestran en el apartado 3. En el apartado 4 se enumeran las conclusiones derivadas de este estudio.



## 2. Materiales y métodos

En esta sección vamos a definir el tipo de piezas objeto de ensayo (espécimen), así como el proceso de ensayo de estas. Vamos a diseñar y construir un banco de pruebas que nos permita medir el grado de deformación de las piezas en el instante anterior a su rotura por flexión. En este banco de pruebas, la pieza, que tiene forma de paralelepípedo rectangular, trabaja como una viga biapoyada (véase figura 2) sometida a esfuerzos de flexión provocados por una carga puntual aplicada en su centro. No se tendrá en cuenta la medida de la flexión máxima soportada, si no el grado de deformación de la pieza en el momento previo a su rotura.

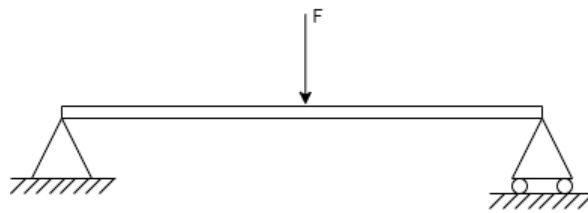


Figura 2. Esquema de viga biapoyada

Si tomamos una "rebanada" o "trozo" (corte transversal - figura 3) de la viga y analizamos sus tensiones internas ( $\sigma$ ), las fibras inferiores de la viga se ven sometidas a esfuerzos de tracción y las fibras superiores, a compresión. A lo largo de toda la viga existe un punto cuyas tensiones son nulas, llamado fibra neutra.

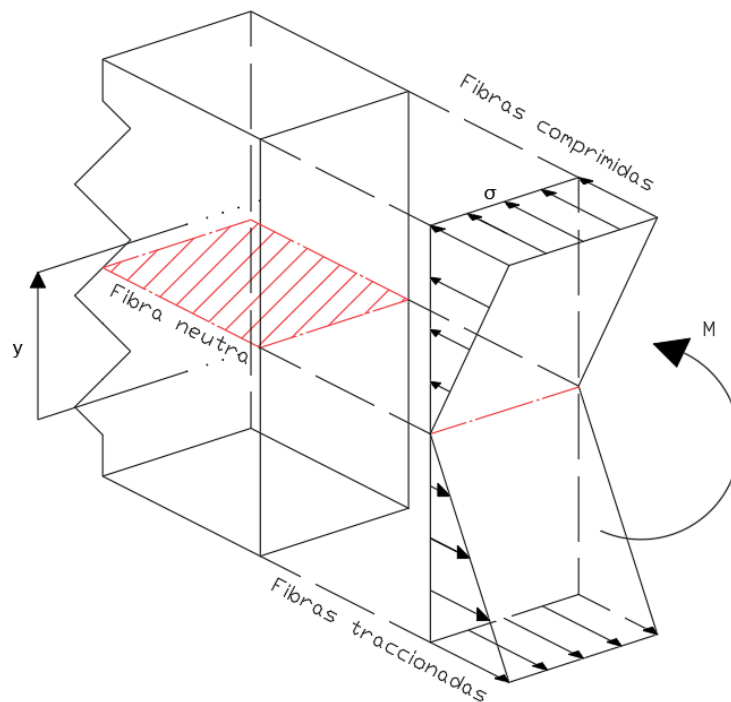


Figura 3. Tensiones en una sección de la viga



Para calcular estas tensiones internas a las que se ve sometida cualquier sección transversal que se tome de la viga, se utiliza la expresión:

$$\sigma = \frac{M * y}{I_x}$$

Donde:

- $M$  es el momento flector provocado por la carga puntual.
- $y$  es la distancia desde el centro de gravedad de la sección hasta la fibra que se pretende estudiar.
- $I_x$  es el momento de inercia.

Según lo estudiado en los artículos [5], [6] y [8], la fuerza que es necesaria aplicar para producir las tensiones internas en la pieza es del orden de Mega Pascales. Dado que estos órdenes de magnitud son imposibles de medir por un usuario estándar, puesto que necesitaría maquinaria muy específica, como la usada en [3] y [8], nos vamos a centrar en construir un banco de pruebas con el que podamos medir la deformación de una pieza impresa en 3D sometida a esfuerzos de flexión. Esto puede ser útil para saber con qué tipo de patrón de relleno y densidad es mejor trabajar dependiendo de la flexibilidad que necesitemos que tenga el objeto a imprimir.

La deformación de los especímenes es obtenida igual que la de una viga biapoyada que se encuentra sometida a esfuerzos de flexión: midiendo el ángulo que forma esta con respecto a la horizontal una vez que se ha deformado, antes de romperse. Ese ángulo es  $\theta$ , el que forma la deformada de la viga respecto a su posición original, tal y como se representa en la *figura 4*. Nuestro trabajo se centra en la obtención del valor de  $\theta$  para cada pieza.

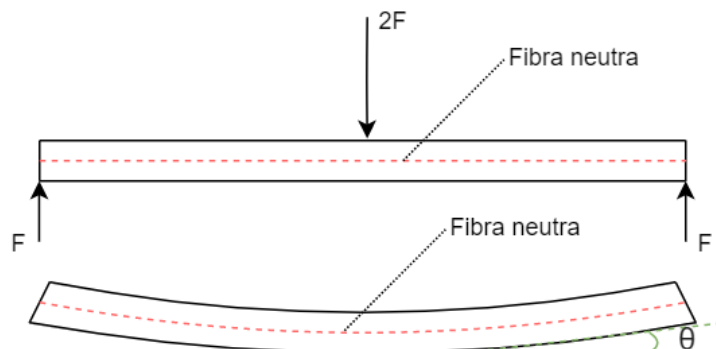


Figura 4. Deformada de una viga biapoyada sometida a flexión

Partiremos de la hipótesis de que en el grado de deformación de la pieza debido a esfuerzos de flexión influirán tanto el tipo de patrón de relleno como su densidad.





## 2.1 Recursos empleados

El software empleado en este trabajo para el diseño de los especímenes es el *AutoCAD 2020*, y el software utilizado para el *slicing* es el *Ultimaker Cura 4.4* (figura 5). El *slicing* consiste en dividir el modelo en capas minúsculas cuidadosamente alineadas y convertirlo en *G-code* [11]. Estas capas generan el camino que sigue el cabezal de impresión para depositar en el lugar correspondiente la cantidad de plástico fundido necesaria para conformar el objeto. Los parámetros a introducir dependen del tipo de pieza, la impresora y el plástico. Tras aplicar las configuraciones que se consideren necesarias al modelo, el programa genera el fichero de control numérico (formato de archivo *G-code*) que incluye las instrucciones para que la impresora pueda dar forma al modelo. Este fichero se almacena en una tarjeta SD que se introduce en la impresora 3D.

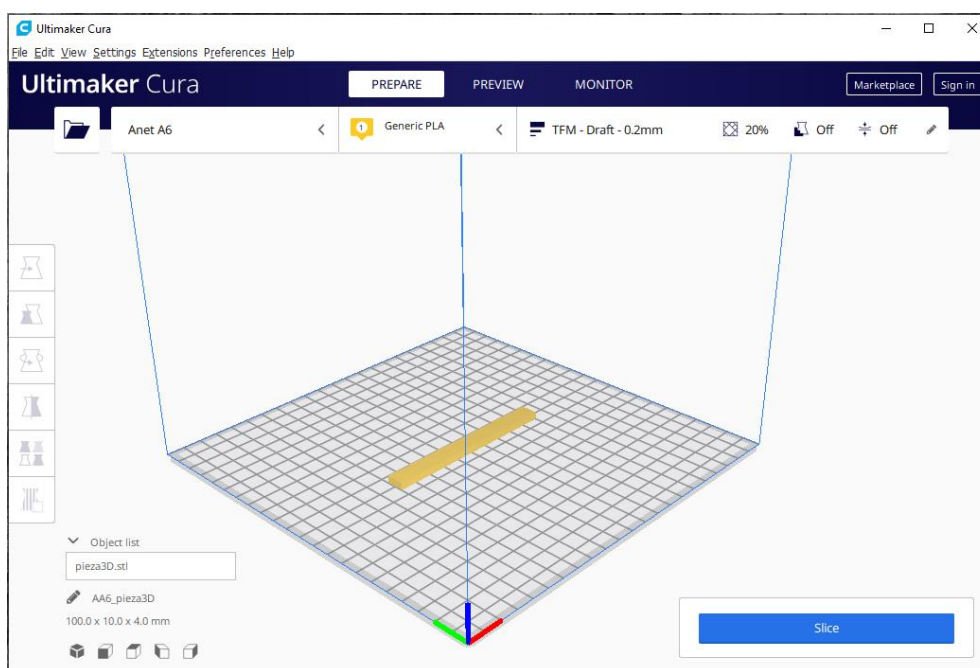


Figura 5. Captura de pantalla del entorno de trabajo del programa Ultimaker Cura 4.4

La impresora 3D utilizada es el modelo Anet A6, una impresora de bajo coste muy empleada por usuarios estándar y que se muestra en la figura 6.



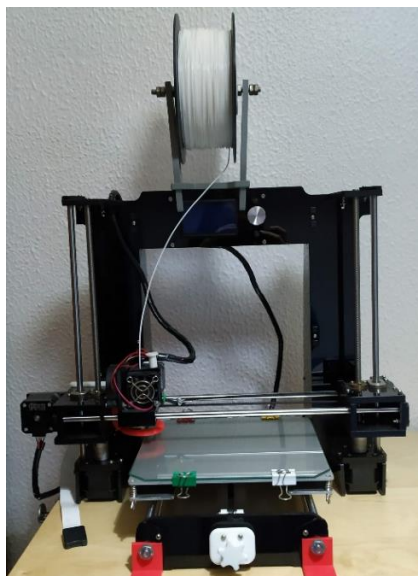


Figura 6. Impresora 3D Anet A6

## 2.2 Diseño de piezas

El diseño de pieza a utilizar en los experimentos que proponemos se basa en los modelos de espécimen propuestos por [6] y [5] para sendos estudios de rendimiento de piezas impresas en 3D con plásticos PLA y ABS ante esfuerzos de tracción. Como nuestro objetivo principal es estudiar la deformación antes de la rotura ante esfuerzos de flexión, vamos a adaptar el espécimen a las necesidades de nuestro estudio, haciendo que este trabaje, como ya se ha indicado anteriormente, como una viga biapoyada.

Los especímenes tienen forma de paralelepípedo rectangular. El diseño final y sus dimensiones se muestran en la figura 7. Las piezas para los diferentes ensayos cuentan con los tipos de relleno *grid*, *concentric* y *tri-hexagon* (véase figura 8), y con porcentajes de relleno: 10%, 20%, 40%, 60%, 80% y 100%. Estos valores se han escogido para poder apreciar con la mayor exactitud posible si realmente el patrón de relleno y su densidad influyen en la deformación que sufre cada pieza.

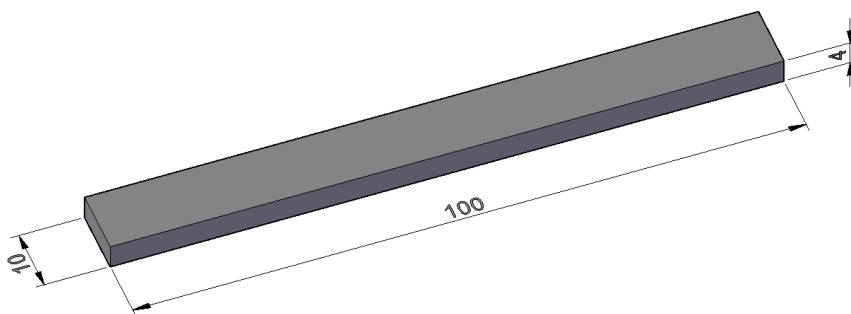


Figura 7. Especimen de ensayo. Cotas en mm



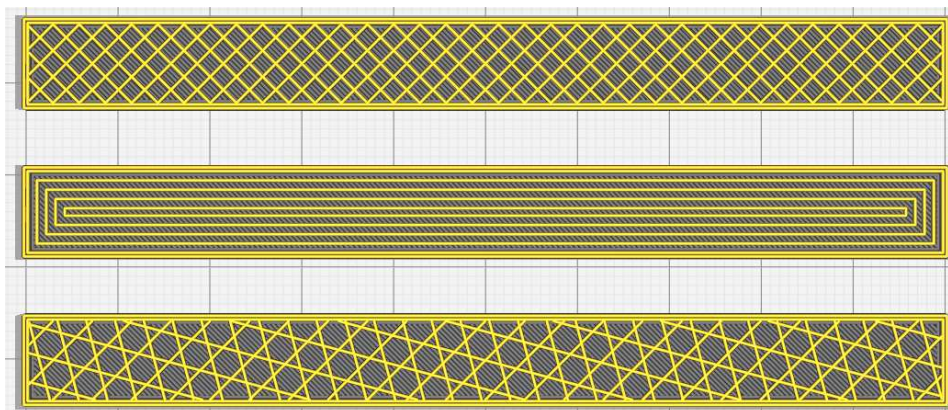


Figura 8. Patrones de relleno usados en la experimentación. De arriba a abajo: grid, concentric y tri-hexagon

Las piezas que cuentan con una densidad igual al 100%, no siguen los patrones de relleno establecidos, sino que, se rellenan por igual y el recorrido del extrusor va formando 45° con la longitud mayor del espécimen, alternándose entre capas. Es por lo que los resultados, los cuales se muestran y analizan en el apartado 3 Resultados y discusión, son los mismos para los tres patrones de relleno con un porcentaje del 100%. En la figura 9 vemos el recorrido que sigue el extrusor en este caso, mostrándose en amarillo la capa que estaría haciendo en ese instante y en gris la capa inferior.

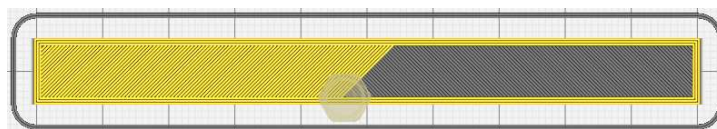


Figura 9. Recorrido del extrusor en piezas con relleno igual al 100%

La elección del patrón de relleno tuvo lugar tras analizar todos los existentes en el programa *Ultimaker Cura 4.4*. Se decidió optar por tres que, a priori, parecían muy diferentes entre sí y que hacían pensar que podrían comportarse de manera distinta ante esfuerzos de flexión:

- El tipo *grid* aparentemente puede ser algo flexible, pero al mismo tiempo bastante fuerte, al trazar las capas formando 45 grados con los laterales de la pieza.
- El tipo *concentric* puede ser el más flexible, ya que sus capas van en dirección paralela a las paredes exteriores de la pieza.
- El tipo *tri-hexagon* puede ser el más fuerte y menos flexible. Al ir trazando triángulos, parece más rígido que los anteriores.

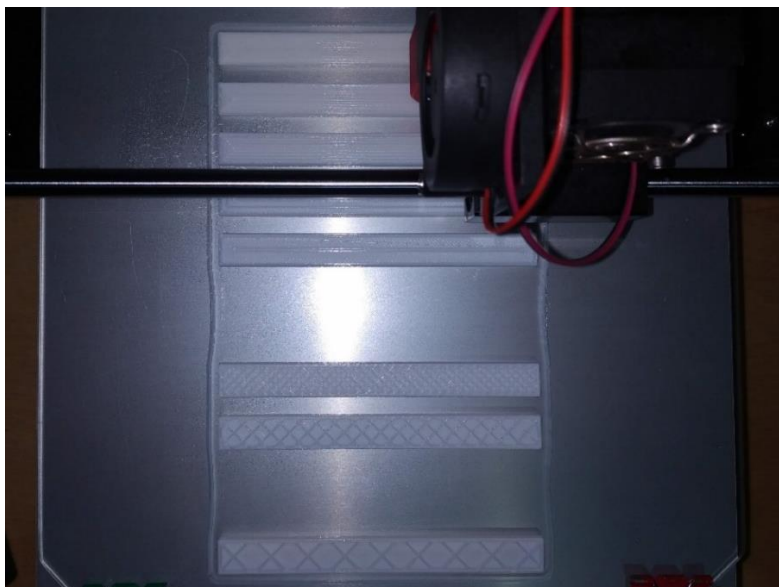
Todas las piezas se imprimen con altura de capa de 0,2 mm a temperatura 210°C para el extrusor y 60°C para la cama caliente. El número total de capas es igual a 19, donde



el relleno tiene lugar entre la capa 5 y la 15. La altura de la capa inicial es de 0,3 mm. El motivo de que la primera capa tenga mayor altura es mejorar la adhesión de la pieza a la cama caliente.

El material usado para la impresión es plástico PLA, un polímero termoplástico biodegradable ampliamente usado en impresión 3D. En concreto, utilizamos el filamento comercializado por BQ con diámetro de 1,75 mm y de color blanco.

En la *figura 10* vemos el proceso de impresión de varias piezas con patrones y rellenos distintos. Las 5 piezas comenzando por arriba, tienen tipo de relleno *concentric* y su porcentaje de relleno va disminuyendo. Las últimas tres piezas de la parte de abajo tienen patrón de relleno *grid*, también con distintas densidades.



*Figura 10. Proceso de impresión de varios especímenes con distintos patrones de relleno*

### **2.3 Banco de pruebas**

Hemos diseñado un banco de pruebas que nos permite aplicar con comodidad la fuerza suficiente hasta romper la pieza objeto de ensayo, aunque, como ya se ha indicado anteriormente, desconocemos el valor de dicha fuerza. Sin embargo, gracias a la incorporación de un sensor de flexión, podemos medir el grado de flexión de la pieza justo en el momento previo a su rotura. Para ello, hemos equipado el sistema con un microcontrolador (*Arduino*) y una pantalla OLED que sirva de interfaz de salida para obtener la información medida.

La estructura que sostiene la pieza está hecha de madera, cuyo diseño y medidas pueden verse en la *figura 11*. Cuenta en su parte superior con un orificio en el que se



sitúa una tuerca, donde enrosca el tornillo encargado de aplicar la fuerza sobre la pieza. Este tornillo cae justo en el centro del espécimen, que se sitúa a 4,5 cm de la base de la estructura. La pieza objeto de ensayo se coloca en posición horizontal, simplemente apoyada sobre los laterales, los cuales tienen una anchura de 2 cm. De esta manera, la pieza se ve sometida a flexión cuando el tornillo comienza a bajar y se ponga en contacto con ella.

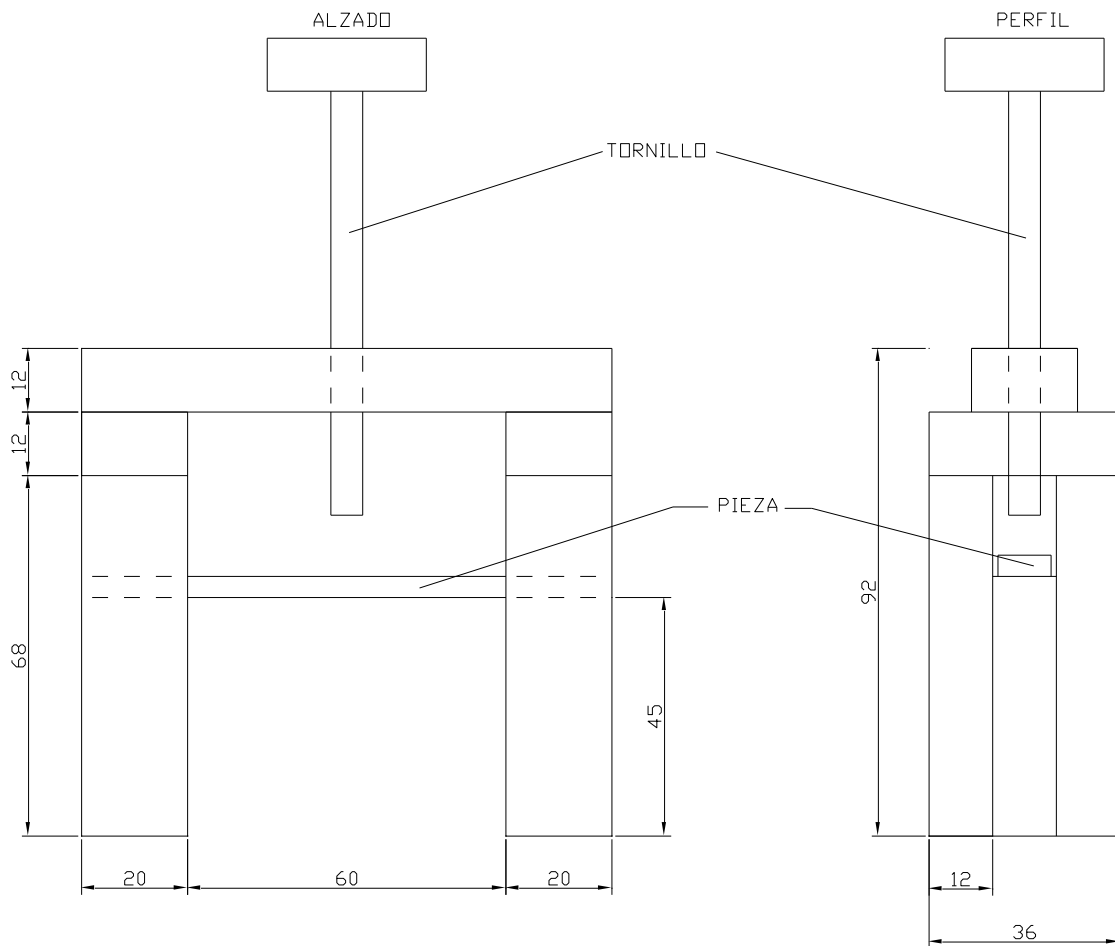


Figura 11. Estructura del banco de pruebas. Cotas en mm

La pieza objeto de ensayo tiene pegada en su parte de abajo un sensor de flexión compatible con *Arduino* (véase figura 12). Este sensor es una resistencia variable que devuelve un valor distinto dependiendo de la flexión que se le aplique. Los valores de resistencia oscilan entre 25 y 100 kOhm. Al conectarlo a la entrada analógica de *Arduino*, se transforma en valores de 0 a 1023. Para calibrarlo y transformar estos datos en grados, hemos tomado la medida del sensor completamente en horizontal, en 20 y 40 grados. Con los resultados obtenidos, se ha realizado un mapeo entre los valores de *Arduino* y los grados. De esta forma, obtenemos en tiempo real el ángulo que va formando la pieza con la horizontal ( $\theta$ ) conforme se le aplica fuerza con el tornillo.





Figura 12. Sensor de flexión

Para ver los resultados en tiempo real sin necesidad de tener conectado en todo momento un ordenador al *Arduino*, colocamos una pantalla OLED en un soporte diseñado para la misma e impreso en 3D. El código fuente completo que hace funcionar el banco de pruebas está disponible en el ANEXO: *Código fuente del banco de pruebas*.

Con todos estos componentes, el diseño final del banco de pruebas queda tal y como se ve en la *figura 13*. El sensor de flexión no se ve en esta vista, ya que se encuentra colocado debajo del espécimen de ensayo. Se han obviado también los cables para que se puedan observar mejor todas las piezas que conforman el banco de pruebas.

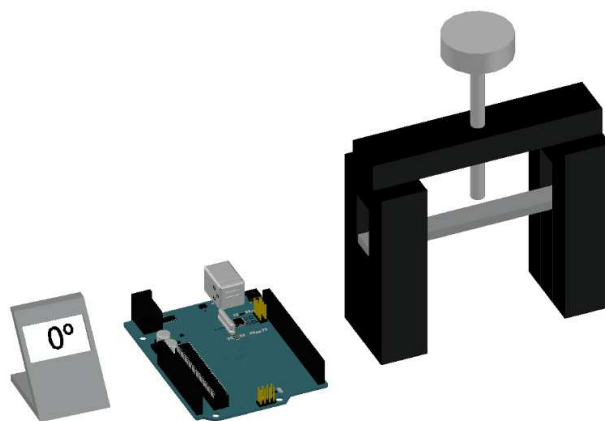


Figura 13. Modelo 3D del banco de pruebas

El resultado final del banco de pruebas real es el que puede verse en la *figura 14*.

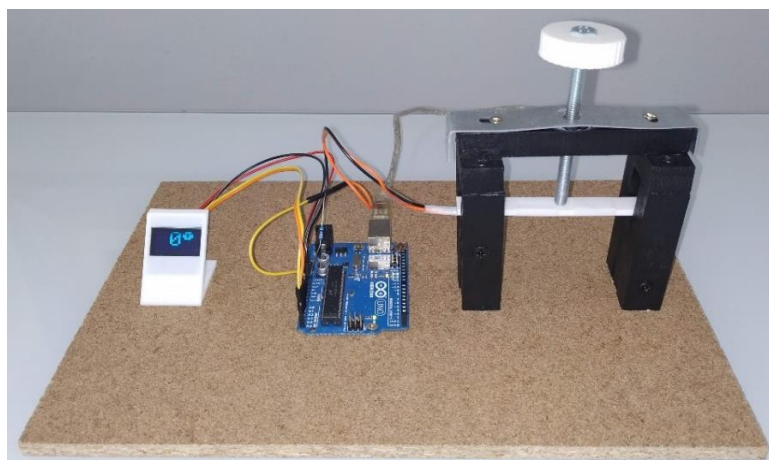


Figura 14. Imagen real del banco de pruebas



### 3. Resultados y discusión

Una vez realizados todos los experimentos obtenemos y analizamos los resultados de estos. Dichos experimentos, como ya se ha indicado en secciones anteriores, consisten en medir la deformación debida a flexión de varias piezas impresas en 3D diseñadas con diferentes rellenos y porcentajes de relleno.

Vamos a analizar primero los resultados obtenidos para cada tipo de relleno y posteriormente compararemos los tres entre sí. Analizaremos estos resultados desde el punto de vista de la deformación por flexión, el gasto de plástico y el tiempo de impresión, con el objetivo de conseguir la mayor optimización posible.

#### 3.1 Resultados para el patrón de relleno de tipo *grid*

El patrón de relleno tipo *grid* tiene forma de cuadrícula con líneas que van recorriendo ambas direcciones diagonales en cada capa. El extrusor va trazando líneas que forman 45 grados con la longitud mayor de la pieza, como muestra la *figura 15*. La parte de arriba corresponde a los primeros trazos de la capa y la de abajo a los finales.

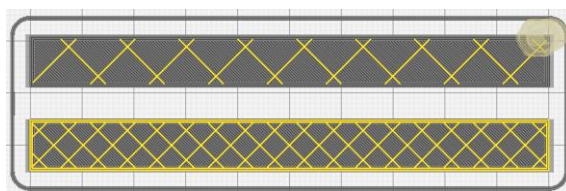


Figura 15. Recorrido del extrusor en el patrón de tipo *grid*

Los resultados de la deformación que sufren las piezas impresas con el tipo de relleno *grid* son los que se muestran en la *tabla 1* y en la *figura 16*. La mayor deformación y por tanto mayor flexibilidad (12 grados) la encontramos con un porcentaje de relleno del 10% y la menor para el porcentaje igual al 100% (3 grados). Es decir, a mayor porcentaje de relleno, menor flexibilidad tiene la pieza con relleno tipo *grid*.

Tabla 1. Deformación (en grados) de las piezas con patrón de relleno de tipo *grid*

Porcentaje de relleno	10%	20%	40%	60%	80%	100%
Deformación ( $\theta$ )	12°	10°	8°	4°	4°	3°

El gasto de plástico (*tabla 2*) se mide en metros y, como era de esperar, cuanto más relleno tiene una pieza, más plástico necesita (*figura 17*). En cada porcentaje de relleno tenemos un gasto distinto, existiendo una diferencia de 0,69 metros entre el 100% y el 10%. En ningún caso el gasto total supera los 1,66 metros.



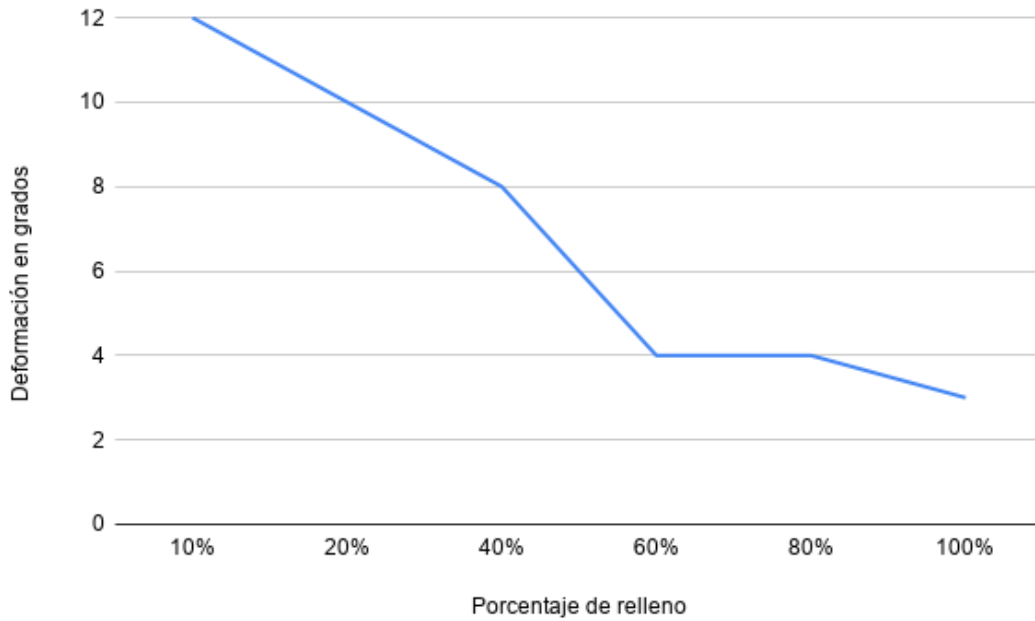


Figura 16. Deformación de las piezas impresas con patrón de relleno grid

Tabla 2. Gasto de plástico (en metros) de las piezas con patrón de relleno de tipo grid

Porcentaje de relleno	10%	20%	40%	60%	80%	100%
Gasto de plástico	0,97 m	1,05 m	1,2 m	1,35 m	1,5 m	1,66 m

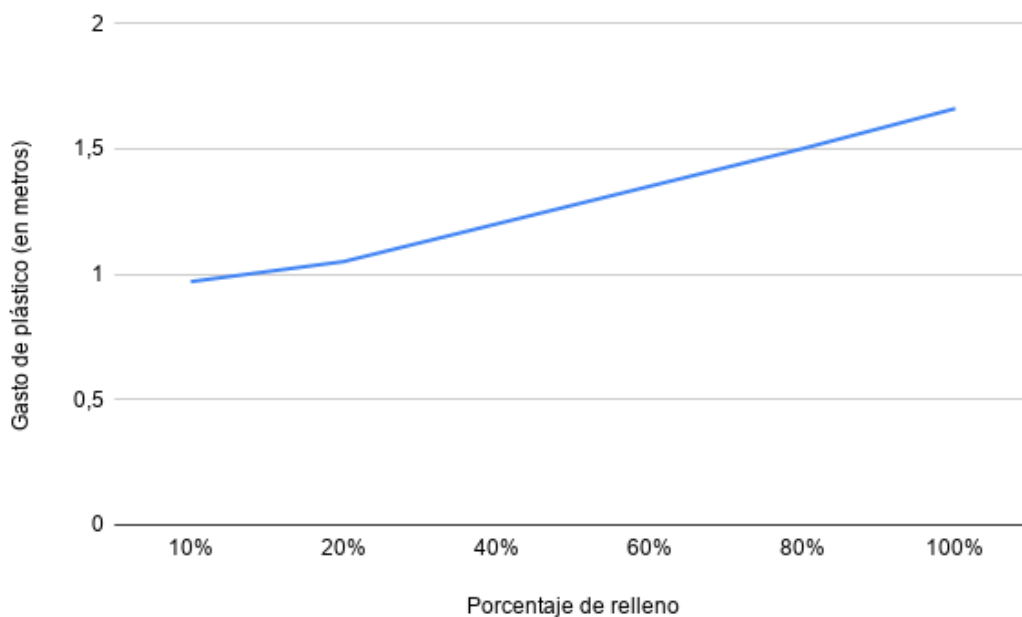


Figura 17. Gasto de plástico en las piezas impresas con patrón de relleno grid

Al igual que ocurre con la cantidad de plástico, el tiempo de impresión aumenta conforme aumenta el porcentaje de relleno. En este caso, según la tabla 3 y la figura 18, el tiempo de impresión llega a casi duplicarse desde el relleno de 10% (14 minutos) hasta el relleno del 100% (27 minutos).





Tabla 3. Tiempo de impresión (en minutos) de las piezas con patrón de relleno de tipo grid

Porcentaje de relleno	10%	20%	40%	60%	80%	100%
Tiempo de impresión	14 min	15 min	16 min	18 min	19 min	27 min

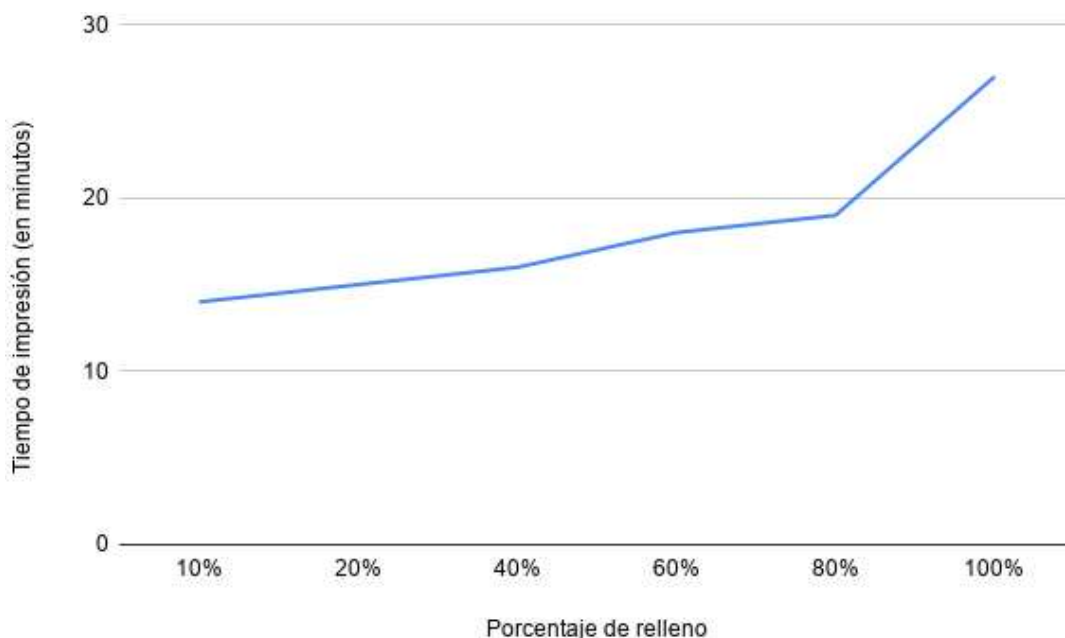


Figura 18. Tiempo de impresión para las piezas impresas con patrón de relleno grid

Según los resultados, cabe destacar que no encontramos demasiadas diferencias a nivel de deformación entre los porcentajes de relleno de 60 y 80%. Puesto que ambos se comportan de forma similar, y sabiendo que el gasto de plástico y el tiempo de impresión son menores en las piezas de relleno de 60%, podríamos ahorrar plástico y tiempo de impresión eligiendo el porcentaje de relleno del 60% frente al 80% con el patrón de relleno tipo *grid*, siempre y cuando pretendamos obtener una pieza poco flexible.

Si lo que se necesita es imprimir una pieza flexible, es decir, que aguante cierta deformación por flexión antes de romperse, deberíamos escoger unos porcentajes de relleno del 10, 20 ó 40%. Puesto que el tiempo de impresión en estos tres casos es bastante parecido y no supone diferencias mayores a 1 ó 2 minutos, atendiendo a la relación entre gasto de plástico y resistencia, para el patrón de relleno tipo *grid* nos interesaría más utilizar un porcentaje del 20%, ya que con un porcentaje menor (del 10% en este caso), probablemente la pieza rompería antes debido a otros esfuerzos como tracción o compresión.



### 3.2 Resultados para el patrón de relleno de tipo *concentric*

El recorrido que sigue el extrusor en este patrón de relleno consiste en la formación de rectángulos que van desde la parte central de la pieza hacia el exterior, unos encima de otros, tal y como se ve en la *figura 19*. El número total de rectángulos depende del porcentaje de relleno elegido.

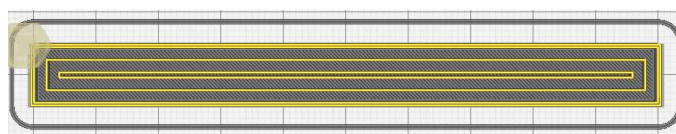


Figura 19. Recorrido del extrusor en el patrón de tipo *concentric*

Tal y como ocurría en el patrón *grid*, para el *concentric* también se cumple que, cuanto mayor es el porcentaje de relleno de la pieza, menor es su flexibilidad (véase *tabla 4*). La mayor deformación antes de la rotura (14 grados) se da para el porcentaje de relleno del 10%. Vemos en la *figura 20* que para porcentajes altos de relleno (60 y 80%) se obtiene una deformación de 8 y 7 grados respectivamente. Esto puede indicar que este patrón de relleno favorece la flexibilidad de las piezas.

Tabla 4. Deformación (en grados) de las piezas con patrón de relleno de tipo *concentric*

Porcentaje de relleno	10%	20%	40%	60%	80%	100%
Deformación ( $\theta$ )	14°	10°	8°	8°	7°	3°

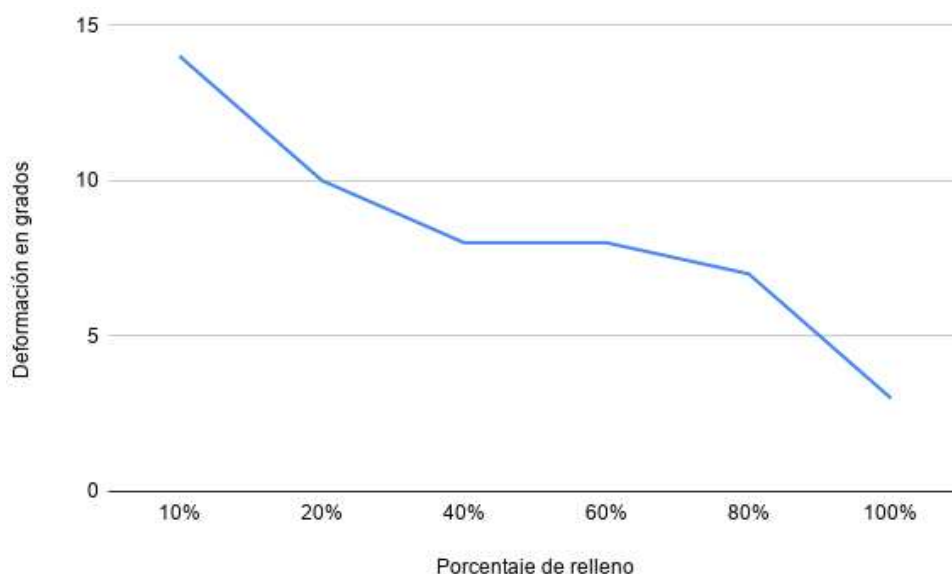


Figura 20. Deformación de las piezas impresas con patrón de relleno *concentric*

El gasto de plástico total (*tabla 5*) sigue siendo inferior a 1,66 metros y aumenta según aumenta el porcentaje de relleno de las piezas (véase *figura 21*). La diferencia entre el



gasto mayor (1,66 metros para un porcentaje de relleno del 100%) y el menor (0,96 metros en un porcentaje de relleno del 10%) es igual a 0,7 metros.

Tabla 5. Gasto de plástico (en metros) de las piezas con patrón de relleno de tipo concentric

Porcentaje de relleno	10%	20%	40%	60%	80%	100%
Gasto de plástico	0,96 m	1,03 m	1,18 m	1,33 m	1,47 m	1,66 m

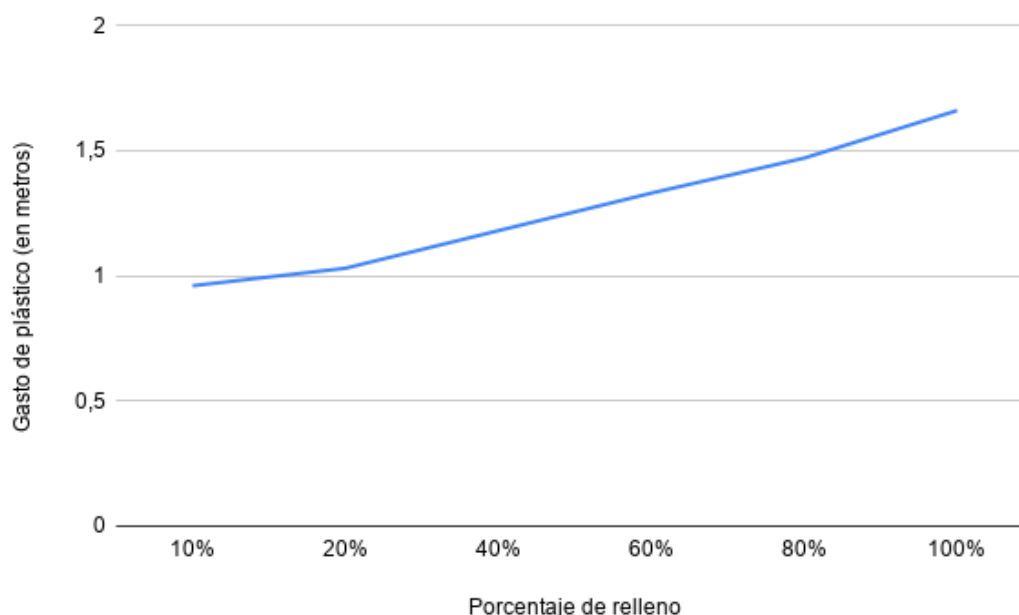


Figura 21. Gasto de plástico en las piezas impresas con patrón de relleno concentric

El tiempo de impresión es mayor según vamos aumentando el porcentaje de relleno de las piezas. Tal y como podemos ver en la tabla 6 y en la figura 22, existe un gran salto (de 9 minutos) cuando elevamos el porcentaje del 80 al 100%, pasando de 18 a 27 minutos. Sin embargo, entre los porcentajes de relleno menores, la diferencia en tiempos es menos acusada, disminuyendo de los 18 minutos al 80% a los 14 minutos al 10%, suponiendo una diferencia en tiempos de sólo 4 minutos con cambios importantes en porcentaje de relleno.

Tabla 6. Tiempo de impresión (en minutos) de las piezas con patrón de relleno de tipo concentric

Porcentaje de relleno	10%	20%	40%	60%	80%	100%
Tiempo de impresión	14 min	15 min	16 min	17 min	18 min	27 min



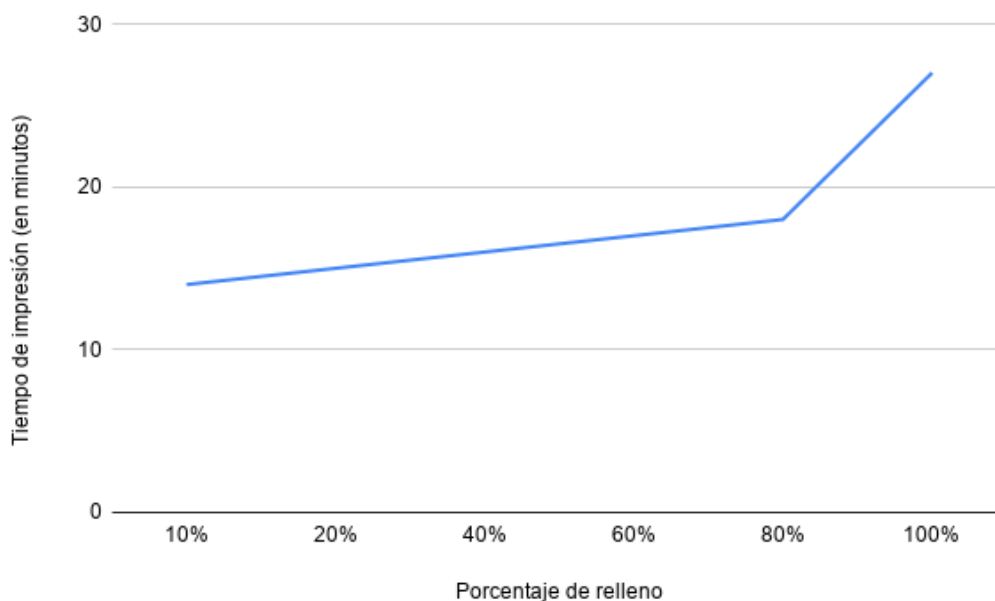


Figura 22. Tiempo de impresión para las piezas impresas con patrón de relleno *concentric*

Debemos resaltar que en el patrón de relleno *concentric* existe una igualdad de deformación de 8 grados cuando utilizamos los porcentajes de relleno del 40 y del 60%. Por tanto, sería de mayor interés elegir el porcentaje de relleno menor, ya que ahorraríamos plástico y tiempo de impresión.

La mayor flexibilidad en este caso se da para los porcentajes de relleno del 10 y del 20%. Puesto que ambos presentan un gasto de plástico y un tiempo de impresión bastante parecidos, a la hora de decidir el porcentaje de relleno con un patrón de tipo *concentric*, nos decantaríamos por el 20%, ya que a priori, una mayor cantidad de relleno en la pieza nos daría una mayor garantía de resistencia ante otros esfuerzos distintos a la flexión.

### 3.3 Resultados para el patrón de relleno de tipo *tri-hexagon*

Para realizar el patrón de relleno de tipo *tri-hexagon*, el extrusor va trazando hexágonos de forma que entre ellos se van formando triángulos, como se muestra en la figura 23.

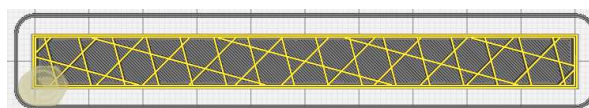


Figura 23. Recorrido del extrusor en el patrón de tipo *tri-hexagon*

Según los resultados obtenidos, los cuales se muestran en la tabla 7 y en la figura 24, nuevamente, se cumple que cuanto mayor es el porcentaje de relleno que presentan las piezas, menor es la deformación por flexión que pueden llegar a soportar. La



máxima deformación que se alcanza es de 5 grados, para un porcentaje de relleno del 10%. Para los porcentajes de 60, 80 y 100%, la deformación alcanzada es la misma e igual a 3 grados. Esto puede indicar que este patrón de relleno favorece la rigidez de las piezas.

Tabla 7. Deformación (en grados) de las piezas con patrón de relleno de tipo tri-hexagon

Porcentaje de relleno	10%	20%	40%	60%	80%	100%
Deformación ( $\theta$ )	5°	4°	4°	3°	3°	3°

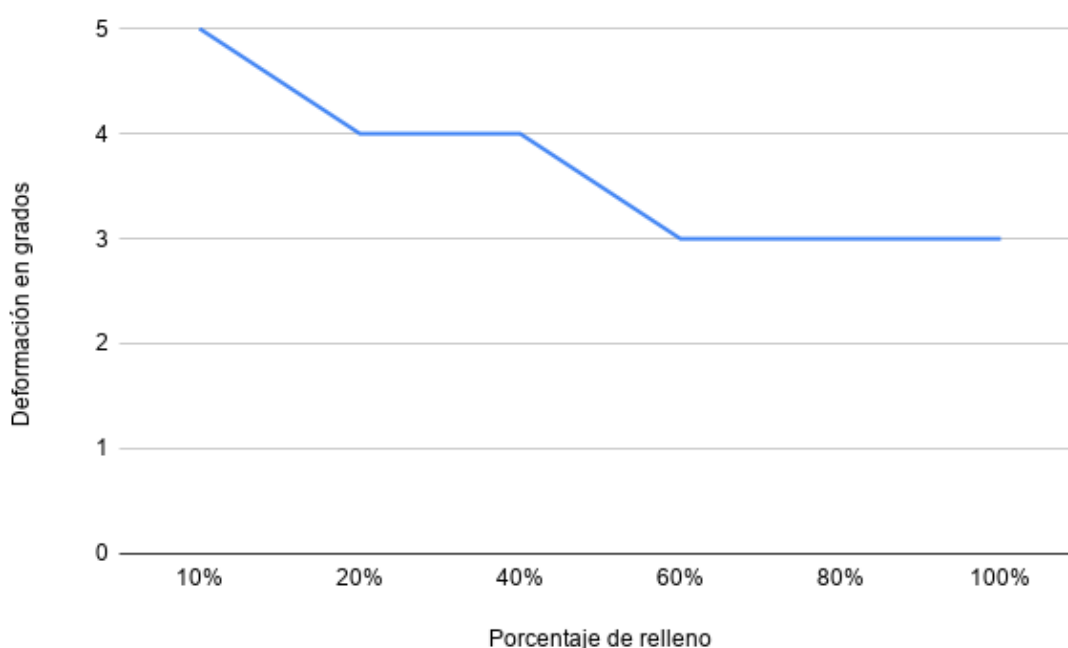


Figura 24. Deformación de las piezas impresas con patrón de relleno tri-hexagon

La cantidad de plástico necesaria para la impresión de las piezas aumenta cuando aumentamos el porcentaje de relleno de estas. La cantidad de filamento total sigue siendo inferior a 1,66 metros (véase tabla 8 y figura 25). La diferencia entre el gasto mayor (1,66 metros para un porcentaje de relleno del 100%) y el menor (0,97 metros en un porcentaje de relleno del 10%) es igual a 0,69 metros.

Tabla 8. Gasto de plástico (en metros) en las piezas impresas con patrón de relleno tri-hexagon

Porcentaje de relleno	10%	20%	40%	60%	80%	100%
Gasto de plástico	0,97 m	1,05 m	1,2 m	1,35 m	1,5 m	1,66 m



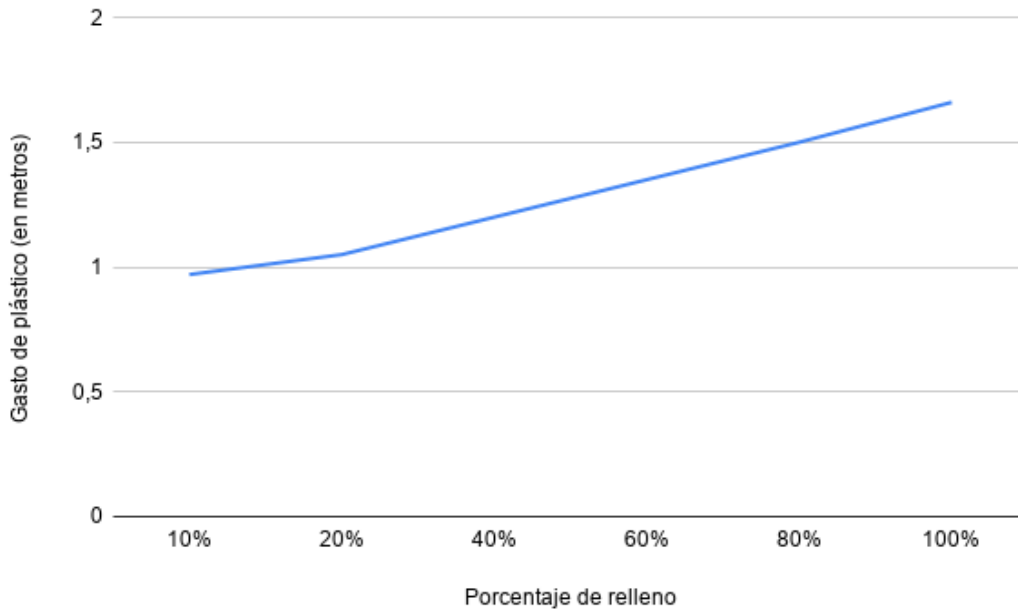


Figura 25. Gasto de plástico en las piezas impresas con patrón de relleno tri-hexagon

El tiempo de impresión, de nuevo, aumenta con el aumento del porcentaje de relleno de las piezas. Como vemos en la *tabla 9* y en la *figura 26*, no se aprecia gran diferencia de tiempo cuando analizamos los resultados de los porcentajes entre el 10 y el 80%, siendo esta de tan sólo 5 minutos. Sin embargo, cuando pasamos del relleno al 80% al 100%, se produce un salto de 8 minutos.

Tabla 9. Tiempo de impresión (en minutos) para las piezas con patrón de relleno tri-hexagon

Porcentaje de relleno	10%	20%	40%	60%	80%	100%
Tiempo de impresión	14 min	15 min	17 min	18 min	19 min	27 min

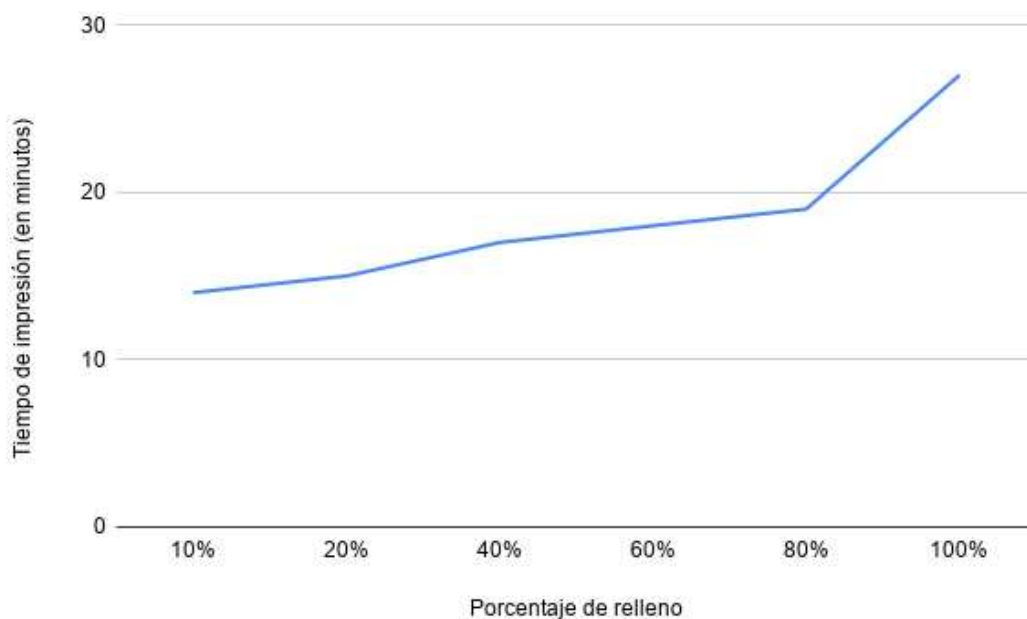


Figura 26. Tiempo de impresión para las piezas impresas con patrón de relleno tri-hexagon



Encontramos varias similitudes en los resultados de deformación por flexión obtenidos para el patrón de relleno *tri-hexagon*. Por un lado, este valor es el mismo (4 grados) para los porcentajes de relleno de 20 y 40%. Por otro lado, esta casuística se repite para los porcentajes de 60 y 80%, siendo la deformación igual a 3 grados. Por tanto, podríamos decantarnos a la hora de imprimir una pieza en ambos casos por el porcentaje menor de relleno (20% ó 60%), ya que con ambos ahorramos filamento y tiempo. Eso sí, debemos tener en cuenta siempre qué tipo de pieza es nuestro objetivo, ya que, cuanto mayor sea el porcentaje de relleno elegido, más rígida a flexión será la pieza.

Según todos estos resultados, probablemente sea más interesante utilizar el patrón de tipo *tri-hexagon* cuando pretendamos obtener piezas que no necesiten admitir elevadas deformaciones debidas a flexión, es decir, cuando necesitemos que prevalezca la rigidez sobre la flexibilidad.

### 3.4 Comparativa entre los resultados de los tres patrones de relleno

Una vez vistos los resultados obtenidos para cada tipo de patrón de relleno (*grid*, *concentric* y *tri-hexagon*), vamos a analizarlos conjuntamente para así poder decidir qué modelo de patrón y porcentaje de relleno necesitaremos elegir durante el diseño de las piezas dependiendo del grado de flexibilidad que necesitemos.

Tal y como mencionamos en el apartado 2.2 *Diseño de piezas*, los resultados correspondientes a las piezas que tienen una densidad igual al 100%, son los mismos en todos los casos, ya que, al ser el mayor porcentaje de relleno posible, la impresora 3D sigue siempre el mismo patrón para su realización.

Atendiendo al grado de deformación por flexión, vemos en la *figura 27*, que este disminuye conforme aumenta la densidad de relleno de las piezas. El tipo de patrón que presenta un comportamiento más rígido es el *tri-hexagon*. Esto lo podemos afirmar porque en este modelo sus valores de deformación solamente cambian 2 grados desde el menor porcentaje de relleno hasta el mayor. Sin embargo, en los otros dos tipos de patrón, esta diferencia es mucho más notable. Por tanto, los otros dos patrones (*concentric* y *grid*) tienen mayor grado de flexibilidad, siendo el modelo *concentric* el más flexible.

Vemos como, ante porcentajes de relleno altos (60 y 80%), los patrones de relleno de tipo *grid* y *tri-hexagon* presentan un comportamiento similar, existiendo una diferencia en su deformación de tan solo un grado. Sin embargo, el de tipo *concentric* sigue



siendo el más flexible, a pesar de que estemos trabajando con porcentajes altos de relleno.

Aunque hayamos afirmado que, según nuestros resultados, el patrón de relleno *concentric* es el más flexible, esto solamente se cumple para los porcentajes de relleno de valores 10, 60 y 80%. Si observamos la deformación obtenida para las densidades iguales a 20 y 40%, vemos que es la misma tanto en el patrón de relleno *grid* como en el *concentric*.

Las piezas más flexibles son en todos los casos las que tienen un porcentaje de relleno del 10%, el menor de todos. Sin embargo, estas piezas corren el riesgo de ser menos resistentes ante otros esfuerzos distintos a flexión a los que puedan ser sometidas (como tracción o compresión). Es decir, aunque aparentemente pueda parecer que soportan más deformación antes de romperse, esto solo lo podemos afirmar para la flexión, pudiendo romper antes por cualquier otro esfuerzo, no sirviendo de nada que aguanten bien a flexión.

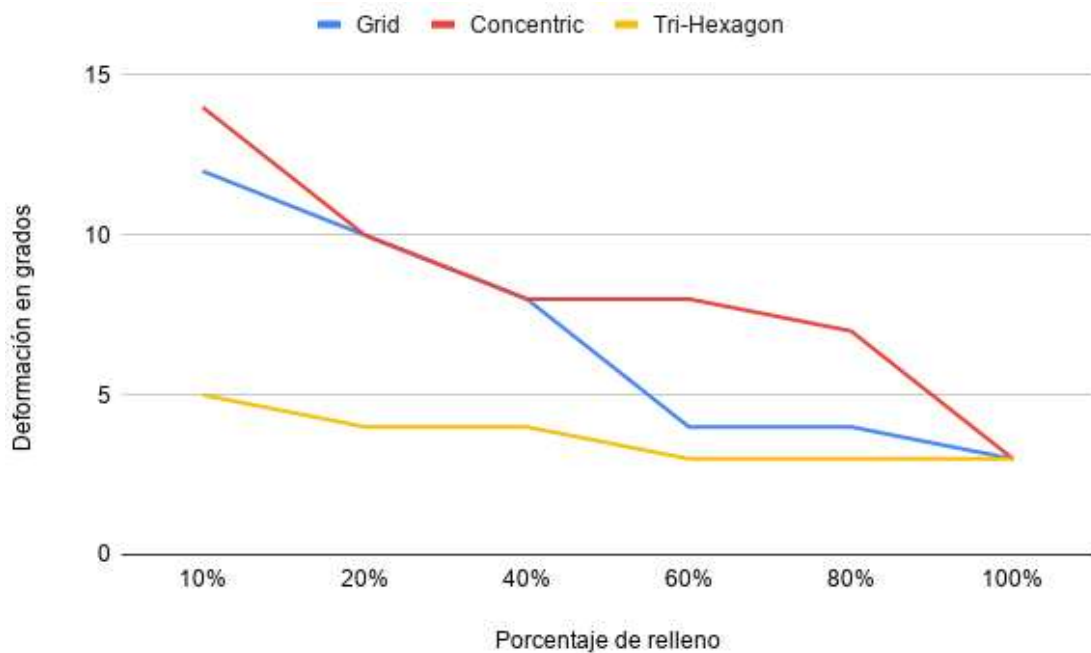


Figura 27. Resultados de deformación para los tres tipos de patrón de relleno

Si nos centramos ahora en el gasto total de plástico (medido en metros de filamento), vemos en la *figura 28* que este siempre aumenta conforme aumenta el porcentaje de relleno de las piezas, siendo bastante similar en los tres tipos de patrón de relleno. El mayor gasto se da en el patrón *grid*. De hecho, se cumple en todos los casos (para cada porcentaje de relleno) que la cantidad total de plástico necesaria va de valores mayores a menores según este orden: *grid*, *tri-hexagon* y *concentric*, coincidiendo con





el patrón en el que más recorrido debe realizar el extrusor para la obtención de la pieza frente al que menos.

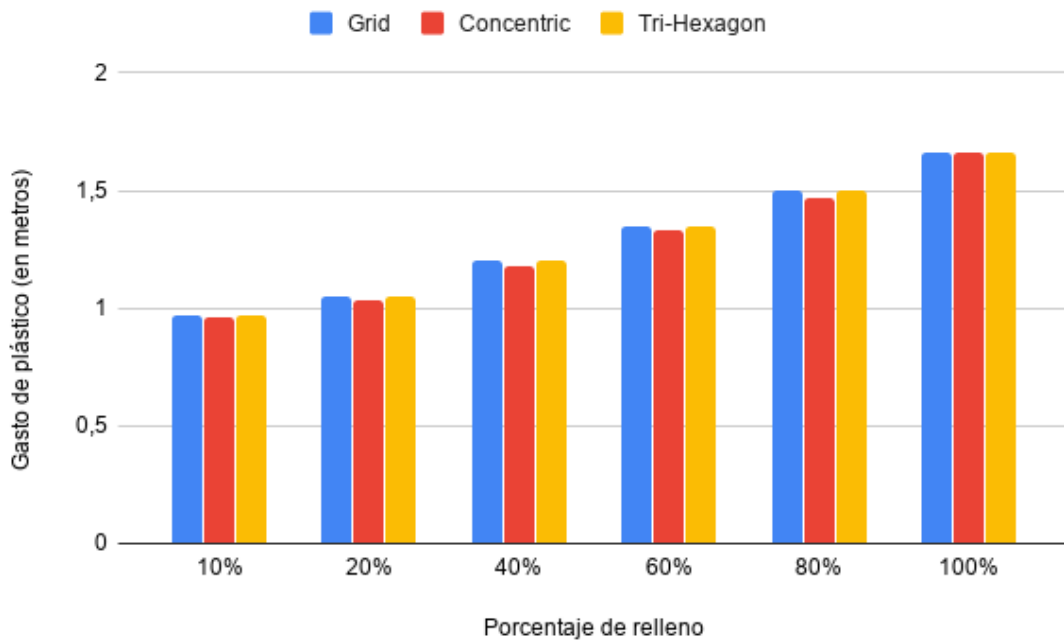


Figura 28. Resultados de gasto total de plástico para los tres tipos de patrón de relleno

Al igual que ocurre con la cantidad de plástico necesaria, el tiempo de impresión también aumenta con el aumento de la densidad de relleno de las piezas (véase figura 29). Estos tiempos son bastante similares en los tres patrones para las densidades bajas de relleno (10 y 20%), empezando a encontrar diferencias a partir del 40%, donde vemos que el más lento es el patrón de relleno *tri-hexagon*, mientras que los otros dos vuelven a tener valores similares. En los porcentajes de relleno de 60 y 80%, se cumple que encontramos mayores tiempos de impresión para los patrones de relleno *grid* y *tri-hexagon* (siendo ambos iguales) y menores en *concentric*. Como ya hemos comentado anteriormente, esto puede deberse a que en los dos primeros el extrusor necesita trazar un recorrido mayor y, por tanto, le llevará más tiempo.

El tiempo de impresión en todos los casos aumenta considerablemente cuando pasamos de un porcentaje de relleno del 80 al 100%. Esta diferencia es de 8 ó 9 minutos dependiendo del patrón de relleno.



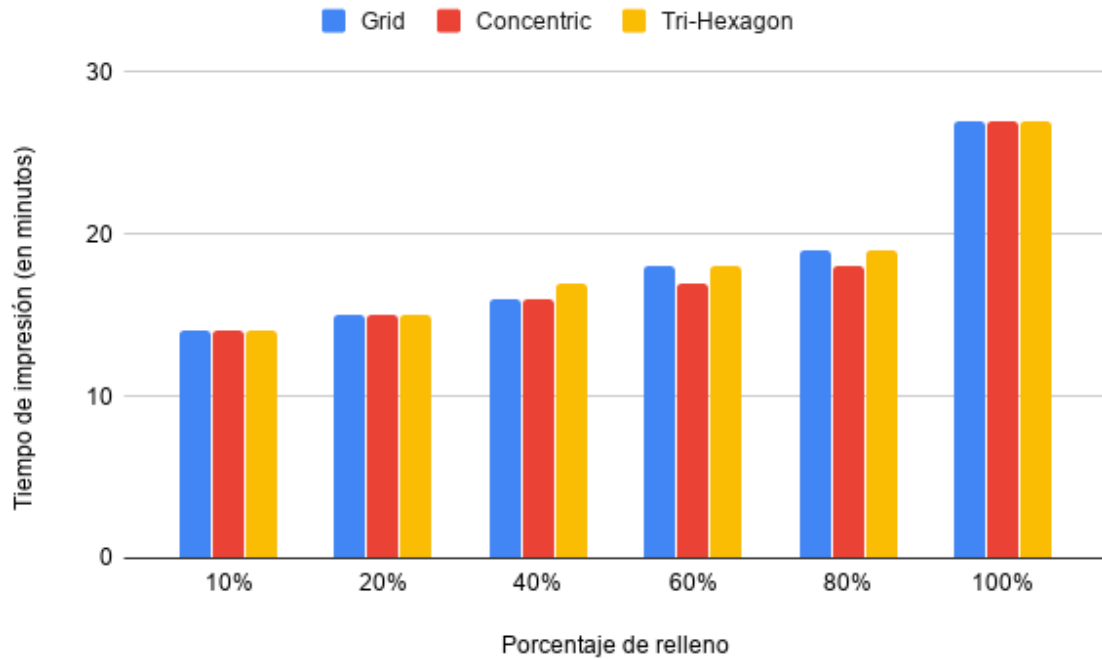


Figura 29. Resultados de tiempo total de impresión para los tres tipos de patrón de relleno

Según hemos estudiado anteriormente, para los porcentajes de relleno igual a 20 y 40%, se obtienen valores similares de deformación para los patrones de relleno de tipo *grid* y *concentric*. Si analizamos su gasto de plástico, vemos que es menor en el patrón de tipo *concentric* y los tiempos de impresión son iguales en ambos patrones y en cada densidad de relleno. Por tanto, interesa más imprimir la pieza que necesitamos con el patrón de tipo *concentric* y con un relleno del 20%, ya que, a igualdad de deformación, es la que más ahorro de plástico conlleva.



## 4. Conclusiones

En este trabajo se ha estudiado el comportamiento a flexión de piezas obtenidas mediante impresión 3D, configuradas con los patrones de relleno *grid*, *concentric* y *tri-hexagon* y distintas densidades de relleno, asemejando su comportamiento al de una viga biapoyada. Para ello, hemos medido la deformación que se produce en cada espécimen cuando eran sometidos a esfuerzos de flexión, y justo antes de que se produjera la rotura. Además, hemos analizado el gasto de material y tiempo que supone la impresión en 3D de cada una de las piezas ensayadas.

Los resultados muestran que las piezas realizadas con patrón de relleno *concentric* permiten un mayor grado de deformación con respecto a los patrones de relleno *grid* y *tri-hexagon*, siendo este último el que menor grado de deformación admite. El gasto de material, en general, es similar en todos los tipos de patrón para el mismo porcentaje de relleno, observando un aumento progresivo. Sin embargo, existe un salto cuantitativo destacable cuando pasamos de un porcentaje de relleno del 80% al 100%. Este aumento es debido al tipo de patrón utilizado al 100% de relleno. Del mismo modo, los tiempos van aumentando gradualmente con el porcentaje de relleno, manteniéndose muy parecidos entre los distintos tipos de patrón. Igualmente, el tipo de patrón utilizado en las piezas con un relleno del 100% afecta considerablemente al aumento del tiempo de impresión.

Tras analizar todos los resultados podemos corroborar nuestras hipótesis de partida con respecto al comportamiento de los patrones de relleno:

- El tipo de patrón *concentric* es el más flexible y el que mayor ahorro de plástico y tiempo supone. Por ejemplo, para un relleno del 10%, se consigue una deformación de la pieza de hasta 14 grados.
- El *tri-hexagon* es el más rígido, presentando por tanto la menor flexibilidad y el mayor gasto en material y tiempo de impresión. Para un porcentaje de relleno del 10%, solamente alcanza una deformación igual a 5 grados.
- El *grid* tiene un comportamiento intermedio con respecto a los anteriores, dando como resultado una deformación igual a 12 grados para el porcentaje de relleno del 10%.

Estos resultados son de gran utilidad para que cualquier usuario de impresoras 3D conozca de antemano el grado de flexibilidad que cada patrón y porcentaje de relleno puede aportarle según sus necesidades. De esta manera, podrá elegir también el que le suponga un mayor ahorro en material y tiempo.



Este estudio se ha centrado en el comportamiento del plástico de tipo PLA, no obstante, existe una gran variedad de plásticos en el mercado y nuestros resultados no son extrapolables. Una línea interesante de trabajo futuro sería analizar nuevos tipos de plásticos que cada vez son más populares. Este es el caso del PETG, un nuevo filamento que algunos ya denominan "el nuevo PLA", aunando las propiedades de impresión y biodegradabilidad similares a las del PLA con las ventajas de otros plásticos más resistentes.

Como ya proponen otros autores, también sería interesante desarrollar métodos y técnicas estándares de ensayo de piezas impresas en 3D que permitan comparar de forma cómoda y fiable resultados entre diferentes estudios, ya que los resultados se ven afectados por una gran variedad de parámetros distintos. El diseño de estas técnicas sería otra buena línea de trabajo futuro.



## 5. Referencias

- [1] N. M. Moreno, J. Leiva y E. López, «Robótica, modelado 3D y realidad aumentada en educación para el desarrollo de las inteligencias múltiples,» *Aula de Encuentro*, vol. 2, nº 18, pp. 158-183, 2016.
- [2] S. Rohringer, «PLA vs ABS: Comparación de filamentos para impresión 3D,» 2019. [En línea]. Disponible: <https://all3dp.com/es/>. [Último acceso: 26 Octubre 2019].
- [3] N. Aliheidari, R. Tripuraneni, A. Ameli y S. Nadimpalli, «Fracture resistance measurement of fused deposition modeling 3D printed polymers,» *Polymer Testing*, vol. 60, pp. 94-101, 2017.
- [4] A. R. Torrado y D. A. Roberson, «Failure Analysis and Anisotropy Evaluation of 3D-Printed Tensile Test Specimens of Different Geometries and Print Raster Patterns,» *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 16, pp. 154-164, 2016.
- [5] M. Fernandez-Vicente, W. Calle, S. Ferrandiz y A. Conejero, «Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing,» *3D Printing and Additive Manufacturing*, vol. 3, nº 3, pp. 183-192, 2016.
- [6] J. Chacón, M. Caminero, E. García-Plaza y P. Núñez, «Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection,» *Materials and Design*, vol. 124, pp. 143-157, 2017.
- [7] L. Baich, G. Manogharan y 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, pp. 308-319, 2015.
- [8] T. Letcher y M. Waytashek, «Material Property Testing of 3D-Printed Specimen in PLA on an Entry-Level 3D Printer,» de *Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, Montreal, 2014.
- [9] M. Yarwindran, N. Azwani Saaban, M. Ibrahim y R. Periyasamy, «Thermoplastic Elastomer Infill Pattern Impact on Mechanical Properties 3D Printed Customized Orthotic Insole,» *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 11, nº 10, pp. 6519-6524, 2016.
- [10] J. R. C. Dizon, A. H. Espera Jr., Q. Chen y R. C. Advincula, «Mechanical characterization of 3D-printed polymers,» *Additive Manufacturing*, vol. 20, pp. 44-67, 2018.
- [11] Á. Romero Pérez, *Actividades de aula en el ámbito de la Tecnología con impresoras 3D*, Valladolid: Universidad de Valladolid, 2018.



## ANEXO: Código fuente del banco de pruebas

```

const int flexPin = A0;
int realValue;
int angle;
char buf [64];
#include <SPI.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>

#define SCREEN_WIDTH 128
#define SCREEN_HEIGHT 64

#define OLED_RESET 4
Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire,
OLED_RESET);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  if (!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C)) {
    Serial.println(F("SSD1306 allocation failed"));
    for (;;);
  }

  display.display();
  delay(2000);

  display.clearDisplay();
}

void loop() {
  realValue = analogRead(flexPin);
  angle = map(realValue, 781, 910, 0, 40);
  sprintf (buf, "Valor medida: %d | Ángulo %d°\r\n", realValue,
angle);
  Serial.println(buf);
  setText((String)angle + (char)247);
  delay(500);
}

void setText(String input) {
  if (input.length() <= 2){
    input = " "+input;
  }
  display.clearDisplay();
  display.setTextSize(6);
  display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
  display.setCursor(10, 0);
  display.println(input);
  display.display();
}

```





## Resumen:

Este Trabajo Fin de Máster analiza el comportamiento de piezas impresas en 3D sometidas a esfuerzos de flexión. Para ello, se diseña y construye un banco de pruebas en el que se ensayan las piezas y que permite medir el ángulo de deformación por flexión que sufren los especímenes. En este banco de pruebas las piezas están colocadas de forma que se comportan como una viga biapoyada en sus dos extremos con una carga puntual aplicada en el centro de la misma. Cada pieza tiene unas características determinadas, con distintos patrones y porcentajes de relleno. Los patrones de relleno utilizados son los de tipo grid, concentric y tri-hexagon con unos porcentajes de 10, 20, 40, 60, 80 y 100%. Además, en cada caso, han sido medidos también el gasto de material y el tiempo de impresión. Las hipótesis de partida se cumplen, obteniendo como patrón de relleno más flexible el de tipo concentric, seguido del grid que tiene un comportamiento intermedio, hasta llegar al tri-hexagon, que es el más rígido. Estos resultados pueden ayudar a un usuario de impresora 3D a elegir qué tipo de patrón y porcentaje de relleno le puede interesar según sus necesidades, conociendo de antemano el grado de flexibilidad.

