

Trabajo Fin de Grado

Estudio de propiedades mecánicas en polímeros impresos en 3D

Autor

Gonzalo Martínez de Marcos

Director/es

Juan Pablo Durruty (UNLP)

Mario Juan Mora Alfonso (UNIZAR)

Escuela de ingeniería y Arquitectura
Universidad de Zaragoza
2022-2023

1.RESUMEN

Este proyecto ha consistido en la impresión de probetas impresas en 3D con variaciones en su impresión con el objetivo de después realizar el ensayo de tensión sobre ellas para sacar su tensión máxima, módulo de Young y elongación. El hecho de que haya variaciones nos indicará qué configuración será más óptima para cada aplicación (Si quiere que aguante mucha tensión o que sea elástica)

Además, para muchas probetas se han realizado 8 ensayos por cada variación, habiéndose podido estudiar si su distribución era normal, y así ver cómo de fiable han sido los ensayos en su conjunto.

Al principio se hicieron algunas probetas para ver cuanto tardaba cada ensayo y luego imprimir todas las posibles. Estas primeras se almacenaron unos meses en un armario para luego realizarse el ensayo. En el transcurso de estos meses adquirieron humedad del ambiente y los resultados luego salieron inferiores a lo que deberían, teniéndose estos resultados ser descartados.

Los materiales probados han sido PLA, ABS, PETG, Tenaflex (TPU) y una probeta de sinterizado proporcionada por una empresa. La marca de estos materiales ha sido Winkle, una empresa española muy usada por la comunidad privada debido a su fiabilidad de los polímeros, obteniéndose siempre resultados correctos sin defectos.

En cuanto a las variaciones, se han cambiado los colores del PLA (según el fabricante todos los colores tienen las mismas propiedades) y diferentes características de impresión.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es la culminación de 6 años de carrera de los que hubiese sido imposible terminar sin la colaboración de las siguientes personas:

- **Pablo Collado Soto**, por acompañarme siempre en mi vida académica. Asimismo, es el responsable de redactar el código para organizar los excels de manera automática y de automatizar el cálculo del módulo de Young y de calcular las normales. Su repositorio está disponible en GitHub [1]
- **Marius Baba**, profesor que me enseñó que la ingeniería también es bonita, y me animó a seguir estudiando y aprendiendo.
- **Mario Mora**, por haberme guiado durante todo este proyecto.
- **Mario Luis Álvarez**, por haberme enseñado todo lo que sé de la impresión 3D, y por haberme impreso todas las probetas para esta investigación.

ÍNDICE

1. RESUMEN.....	2
AGRADECIMIENTOS.....	3
2. INTRODUCCION.....	5
2.1 Conceptos básicos de impresión3D.....	5
2.2 Configuración del Slicer.....	7
2.3 Los polímeros.....	
3. MATERIALES	
EMPLEADOS.....	
3.1 ABS.....	
3.2 PLA.....	
3.3 PETG.....	
3.4 TPU.....	
3.5 Nylon 12	
4. EQUIPO EMPLEADO.....	
4.1 Ensayo de tensión	
4.2 Impresora 3D	
5. LAS PROBETAS.....	11
3.1 Variación de las probetas.....	11
6. RESULTADOS OBTENIDOS.....	18
6.1 Almacenaje y humedad.....	18
6.2 Análisis de datos.....	19
6.3 Variación de materiales.....	20
6.4 Variación de parámetros de impresión.....	25
7. ESTUDIO DE NORMALIDAD.....	29
8. CONCLUSIONES.....	31
9. BIBLIOGRAFÍA.....	32
10. ANEXOS	

2. INTRODUCCION

Las impresoras 3D están cada día más de moda entre los particulares y poco a poco se está introduciendo en el ámbito industrial [2][3]. Muchas empresas usan esta tecnología para prototipado o para probar si las piezas encajan correctamente en un sistema sin necesidad de hacer la pieza en CNC ni que pase por plegado y soldeo, reduciendo así los costes y tiempos del proceso de diseño.

Además, las tecnologías de las impresoras son cada vez mejores, y ofrecen mejores prestaciones y características, a la vez que se reducen los problemas generados en las impresiones, como obstrucciones del material, capas irregulares o impresiones abortadas a la mitad [4].

A pesar de todos estos rápidos avances, poca información hay sobre características óptimas de impresión o los mejores colores de cada marca de cara a uso industrial.

2.1 Conceptos básicos de Impresión 3D

Esta técnica de fabricación consiste en fundir un determinado polímero suministrado en bobinas con un diámetro normalizado (Pueden ser 1,75mm o 3mm) y hacerlo pasar a través de una boquilla calentada de diámetro regulado hasta fundirlo. Entonces, es depositado en una cama plana de diferentes materiales, según la necesidad. El movimiento de la boquilla en las 3 direcciones mientras extruye el material conforma la forma final del producto, que cuando se enfría, se solidifica.

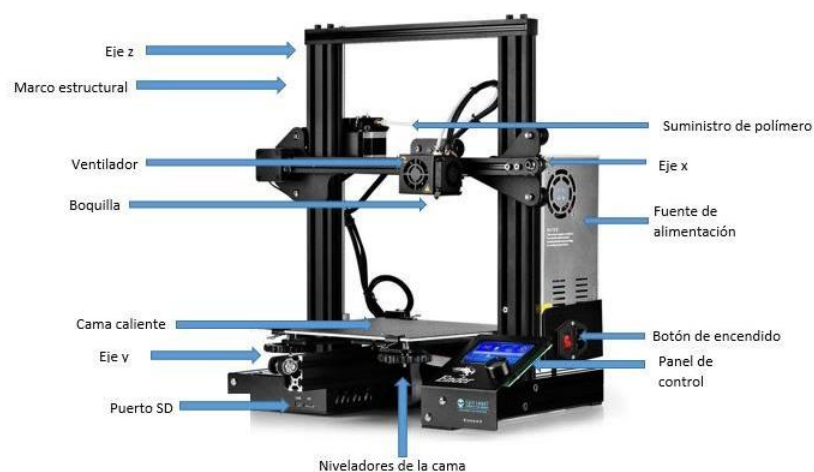


Fig. 2.1 Ejemplo de una impresora Ender 3

El proceso de impresión 3D comienza con un modelo 3D digital, que puede crearse mediante software de modelado 3D o ser descargado de una biblioteca en línea. El slicer es la herramienta que toma ese modelo 3D y lo prepara para su impresión. Esto implica convertir el modelo en una serie de capas 2D, generar las instrucciones de impresión necesarias y configurar los parámetros de impresión.

El slicer permite al usuario ajustar diferentes aspectos de la impresión, como la resolución, el relleno, la velocidad de impresión, la temperatura, el soporte y otros parámetros específicos de la impresora 3D utilizada. También permite visualizar una representación en capas del modelo 3D, lo que ayuda a identificar posibles problemas de impresión y optimizar la configuración antes de iniciar la impresión.

Una vez que el modelo 3D ha sido "rebanado" o "sliceado" por el software, se genera un archivo G-code que contiene las instrucciones de impresión específicas para la impresora 3D. Este archivo se carga en la impresora 3D para iniciar el proceso de impresión capa por capa, siguiendo las instrucciones proporcionadas por el slicer.

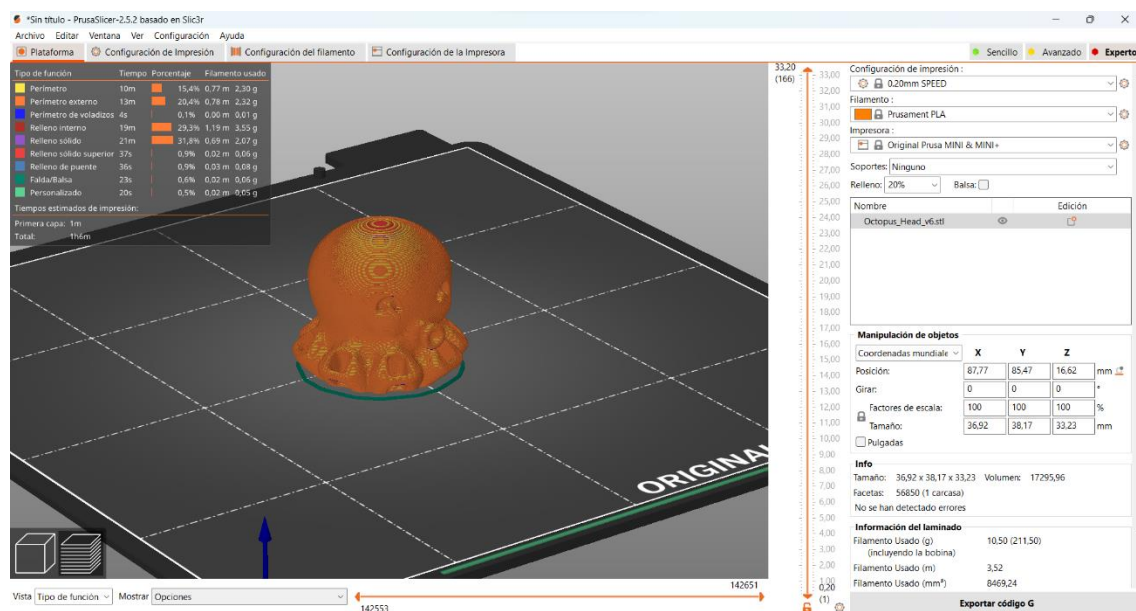


Fig. 2.2 Captura de pantalla de un Slicer

Después, pasamos a la placa base. Es un procesador que recibe las instrucciones del Gcode y las transforma en movimiento de los motores del eje, del extrusor, adapta la temperatura de la cama y del nozzle (Boquilla). Una pieza importante son los drives, que son los que transforman la señal del CPU al motor, y dependiendo de la marca y el modelo pueden ofrecer diferentes prestaciones, como de alta precisión, bajo ruido, o bajo costo. Si los drivers se calientan en exceso durante el funcionamiento es posible que falle alguna instrucción (Comúnmente denominado saltarse pasos) y la pieza a imprimir quede incompleta.

Otro factor a tener en cuenta es la cama donde se deposita la primera capa. Puede ser de diferentes materiales:

- Lámina flexible. Tiene un texturizado que facilita la adhesión de la pieza y, debido a que es flexible, es fácil retirar la pieza final.

-Vidrio de borosilicato: Un rectángulo de vidrio que aguanta altos contrastes térmicos y que es liso. Se suele usar una espátula para despegar la pieza. En caso de baja adhesión, se suele usar laca sobre la cama antes de imprimir la pieza y actúa como pegamento.

-Vidrio con lámina perforada: Algunas marcas ofrecen esta alternativa, que no es más que el vidrio anterior con una fina lámina con microporos adherida, y sirve para que la primera capa impresa se adhiera a los poros y se mantenga fija el resto de la impresión.

Si aun así hay fallos de adherencia, se puede instalar un calefactor a la cama. Esto es una resistencia eléctrica en forma de lámina que calienta la superficie para que las primeras capas de impresión no sufran un contraste térmico, sigan en régimen viscoso, y se adhieran mejor. Esta cama debe estar nivelada horizontalmente, pues si no habrá diferencia de alturas y puede que algunas partes no agarren bien.

2.2 Configuración del slicer

Como ya hemos mencionado el Slicer, o laminador, es el software que, con los datos requeridos por el usuario y teniendo en cuenta las limitaciones de la máquina, lamina capa a capa el objeto 3D, obteniendo las intersecciones entre objeto y cada plano, guardándolo como información junto con el resto de parámetros para que la impresora pueda imprimir correctamente la pieza.

Hay muchos Softwares para laminar nuestras piezas, pero nosotros hemos usado PrusaSlicer.

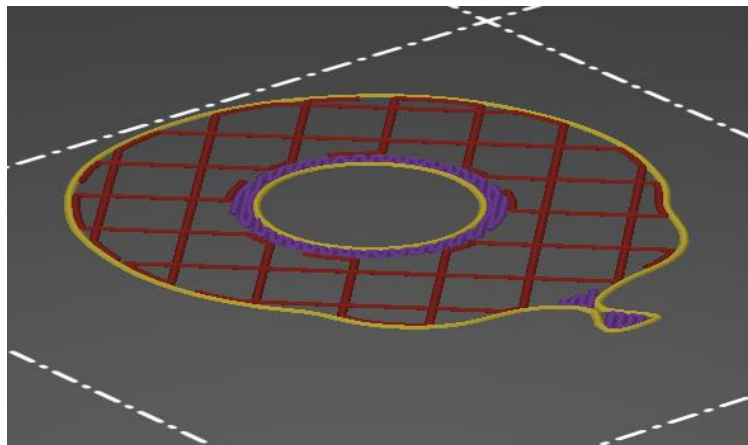


Fig. 2.3 Una capa generada por el Slicer

2.3 Los polímeros

Los polímeros son macromoléculas compuestas por unidades estructurales repetitivas llamadas monómeros o meros. Estos monómeros se unen mediante enlaces químicos para formar una cadena larga y lineal o una estructura ramificada. Los polímeros pueden encontrarse tanto de forma natural como sintética, y desempeñan un papel fundamental en nuestra vida cotidiana.

Se dividen en dos categorías principales: polímeros naturales y polímeros sintéticos. Los polímeros naturales se encuentran en la naturaleza y se obtienen de fuentes como plantas, animales o microorganismos. Algunos ejemplos incluyen la celulosa, el almidón, la seda y el ADN.

Por otro lado, los polímeros sintéticos son fabricados por el ser humano mediante reacciones químicas. Estos polímeros tienen una amplia gama de aplicaciones y se utilizan en industrias como la automotriz, la construcción, la medicina, la electrónica y más. Ejemplos comunes de polímeros sintéticos incluyen el polietileno, el polipropileno, el poliestireno, el nailon y el poliéster. Estos son los que estudiaremos en este trabajo.

Los polímeros se pueden clasificar en termoplásticos, termoestables y elastómeros. Estos tienen propiedades y comportamientos distintos:

-Termoplásticos [5]: Los termoplásticos son polímeros que se vuelven suaves y moldeables cuando se calientan y se solidifican cuando se enfrían. Este proceso se puede repetir varias veces sin que el material se degrade. Los termoplásticos tienen una estructura molecular lineal o ramificada, lo que les confiere una mayor flexibilidad y capacidad de deformación. Algunos ejemplos de termoplásticos pueden ser el polietileno, el polipropileno, el poliestireno o el PVC. Estos materiales se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, como envases, tuberías, juguetes, componentes de automóviles y más.

-Termoestables [5]: Los termoestables son polímeros que, una vez moldeados y curados, se vuelven rígidos y no se pueden volver a fundir ni deformar mediante calor. Esto se debe a que experimentan una reacción química irreversible durante el proceso de curado, lo que crea enlaces cruzados tridimensionales en su estructura molecular. Estos enlaces hacen que los termoestables sean resistentes al calor y a la deformación, lo que los hace ideales para aplicaciones que requieren estabilidad dimensional y resistencia a altas temperaturas, como en componentes eléctricos, aislantes y matrices de compuestos. Algunos ejemplos de termoestables son el epoxy, la resina fenólica y la resina de poliéster.⁰

-Elastómeros [5]: Los elastómeros son polímeros que exhiben una alta capacidad de deformación elástica, lo que significa que pueden estirarse y recuperar su forma original cuando se retira la fuerza aplicada. Tienen una estructura molecular reticulada, similar a los termoestables, pero en menor grado. Esta estructura les confiere una mayor capacidad de estiramiento y flexibilidad. Los elastómeros se utilizan en aplicaciones que requieren sellado,

amortiguación, flexibilidad y resistencia al desgaste, como en neumáticos, sellos, juntas tóricas y productos de caucho en general. Ejemplos conocidos de elastómeros son el caucho natural, el caucho de butilo y el neopreno.

En resumen, los termoplásticos son moldeables cuando se calientan y se enfrían, los termoestables se vuelven rígidos y no se pueden fundir después del curado, y los elastómeros tienen una alta capacidad de deformación elástica y recuperan su forma original después de ser estirados. Cada uno de estos tipos de polímeros tiene propiedades y aplicaciones específicas que los hacen adecuados para diferentes usos en diversos campos industriales.

En cuanto a la fabricación de polímeros, implica diversas técnicas, como la polimerización por adición, donde los monómeros se unen sin la formación de subproductos, y la polimerización por condensación, donde los monómeros se unen con la liberación de un subproducto, como agua. También existen procesos de modificación de polímeros para ajustar sus propiedades, como la copolimerización, la reticulación y el procesamiento termoplástico.

La investigación y el desarrollo de nuevos polímeros continúan siendo áreas activas de estudio, con el objetivo de mejorar las propiedades de los materiales, aumentar su resistencia, flexibilidad, durabilidad y sostenibilidad. Además, la gestión adecuada de los desechos de polímeros y la promoción de la economía circular son temas importantes para abordar los desafíos ambientales asociados con su uso generalizado.

3. MATERIALES EMPLEADOS

Para este trabajo han sido empleados los polímeros ABS, PLA, PETG y Tenaflex (TPU), los cuales describiremos a continuación:

3.1 ABS [5]

El plástico ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) es un tipo de polímero termoplástico que se utiliza en diversas aplicaciones debido a sus propiedades específicas. Está compuesto por una mezcla de tres monómeros: acrilonitrilo, butadieno y estireno.

El ABS es conocido por su resistencia, durabilidad y tenacidad, lo que lo hace adecuado para una amplia gama de usos industriales y de consumo. Algunas de las características destacadas del plástico ABS son las siguientes:

Resistencia mecánica: El ABS es un material rígido y resistente que puede soportar impactos y cargas mecánicas. Tiene una alta resistencia al desgaste y la abrasión, lo que lo hace adecuado para piezas que están sujetas a tensiones o fricción.

Buena tenacidad y resistencia a la rotura: El ABS es un plástico que tiene una excelente capacidad para absorber la energía de impacto, lo que lo hace menos propenso a romperse o agrietarse bajo cargas repentinas.

Estabilidad dimensional: El ABS tiene una buena estabilidad dimensional, lo que significa que conserva su forma y tamaño incluso cuando

está expuesto a cambios de temperatura o humedad. Esto lo hace útil en aplicaciones en las que se requiere precisión y ajuste.

Versatilidad de procesamiento: El ABS es un material termoplástico que se puede moldear fácilmente mediante diferentes técnicas de procesamiento, como la inyección, el moldeo por extrusión o el moldeo por soplado. Esto permite fabricar piezas con formas y tamaños diversos.

Propiedades químicas: El ABS es resistente a muchos productos químicos comunes, como ácidos diluidos, aceites y disolventes. Sin embargo, puede ser atacado por algunos disolventes orgánicos fuertes.

3.2 PLA [5]

El plástico PLA (ácido poliláctico, por sus siglas en inglés) es un tipo de plástico biodegradable y compostable derivado de fuentes renovables, como el almidón de maíz, la caña de azúcar o la remolacha. Es considerado un bioplástico debido a su origen natural y su capacidad de descomponerse de manera más rápida y sostenible en comparación con los plásticos tradicionales derivados del petróleo.

El PLA tiene varias características destacadas:

Biodegradabilidad: El PLA es biodegradable, lo que significa que puede descomponerse de forma natural en condiciones adecuadas, como en instalaciones de compostaje industrial o en el suelo. Esto reduce el impacto ambiental y los residuos plásticos persistentes.

Origen renovable: A diferencia de los plásticos convencionales, que se derivan del petróleo, el PLA se produce a partir de fuentes renovables como plantas cultivadas. Esto reduce la dependencia de los recursos fósiles y ayuda a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la extracción y producción de petróleo.

Versatilidad de aplicaciones: El PLA se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo envases de alimentos, películas transparentes, vajillas desechables, filamentos para impresión 3D, textiles, dispositivos médicos, productos de cuidado personal y más. Su versatilidad y propiedades similares a las del plástico convencional lo hacen atractivo para diversas industrias.

Procesamiento y propiedades físicas: El PLA se puede procesar utilizando técnicas similares a las utilizadas con otros plásticos, como la inyección, el moldeo por extrusión o la termoformación. En términos de propiedades físicas, el PLA es rígido, transparente y resistente al impacto moderado. Sin embargo, es menos resistente al calor que algunos plásticos convencionales, por lo que su uso puede estar limitado en aplicaciones de alta temperatura.

Es importante tener en cuenta que, aunque el PLA es biodegradable, su descomposición depende de las condiciones específicas del entorno. No se descompone fácilmente en el medio ambiente natural y requiere instalaciones de compostaje adecuadas para un proceso más eficiente.

3.3 PETG [5]

El plástico PETG (polietileno tereftalato glicol) es un tipo de polímero termoplástico que se utiliza en diversas aplicaciones debido a sus propiedades únicas. Es una variante del PET (tereftalato de polietileno), pero con la adición de glicol, lo que le confiere características específicas.

Estas son algunas de las características y propiedades destacadas del plástico PETG:

Transparencia y claridad: El PETG es conocido por su alta transparencia y claridad. Permite una excelente visibilidad a través del material, lo que lo hace ideal para aplicaciones donde se requiere transparencia, como envases de alimentos y productos de visualización.

Resistencia al impacto: El PETG tiene una resistencia al impacto superior en comparación con otros plásticos, incluyendo el PET convencional. Es más tenaz y puede soportar golpes y caídas sin romperse fácilmente, lo que lo hace adecuado para aplicaciones donde se requiere resistencia a los impactos.

Facilidad de procesamiento: El PETG es un material fácil de procesar. Se puede moldear mediante técnicas de extrusión, moldeo por inyección y termoformado. También se puede cortar, doblar y soldar fácilmente.

Resistencia química: El PETG ofrece una buena resistencia a los productos químicos comunes, como ácidos, bases y solventes suaves. Esto lo hace adecuado para aplicaciones que requieren resistencia química, como envases farmacéuticos.

Apto para contacto con alimentos: El PETG cumple con las regulaciones de seguridad alimentaria y es apto para contacto con alimentos. Es ampliamente utilizado en envases de alimentos y bebidas debido a su transparencia, resistencia y capacidad para mantener la frescura de los productos.

Reciclable: El PETG es reciclable y se puede procesar para su reutilización. Es importante tener en cuenta que el PETG y el PET no son fácilmente miscibles en la reciclaje, por lo que se deben tener en cuenta las consideraciones de clasificación y separación adecuadas.

El PETG se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, que incluyen envases de alimentos y bebidas, productos de cuidado personal, exhibidores, paneles de protección, componentes electrónicos, dispositivos médicos y más. Su combinación de transparencia, resistencia al impacto y facilidad de procesamiento lo convierte en una opción popular en muchas industrias.

3.4 TPU [5]

El TPU (poliuretano termoplástico) es un tipo de elastómero termoplástico que combina propiedades de los plásticos y las gomas. Es un material versátil y

ampliamente utilizado en diversas aplicaciones debido a su capacidad de ofrecer flexibilidad, resistencia y durabilidad.

Estas son algunas de las características y propiedades destacadas del TPU:

Flexibilidad y elasticidad: El TPU es altamente flexible y elástico, lo que significa que puede deformarse bajo tensión y luego volver a su forma original. Esta propiedad le permite adaptarse y soportar deformaciones repetidas sin perder sus propiedades mecánicas.

Resistencia a la abrasión: El TPU es conocido por su alta resistencia a la abrasión y al desgaste. Es capaz de resistir el roce y la fricción repetida sin desgastarse fácilmente, lo que lo hace adecuado para aplicaciones que requieren resistencia al desgaste, como sellos, juntas y revestimientos.

Resistencia química: El TPU tiene una buena resistencia a los productos químicos y solventes comunes, lo que le permite mantener sus propiedades incluso en entornos químicos agresivos.

Propiedades termoplásticas: El TPU es un material termoplástico, lo que significa que se puede fundir y moldear repetidamente bajo calor. Esto permite su procesamiento mediante técnicas de moldeo por inyección, extrusión y termoformado.

Amortiguación de impactos: El TPU tiene buenas propiedades de amortiguación de impactos, lo que lo hace adecuado para aplicaciones que requieren absorción de impactos, como calzado deportivo, protecciones y componentes para equipos de seguridad.

Transparencia y colorabilidad: Dependiendo de la formulación y el procesamiento, el TPU puede ser transparente o se puede pigmentar en una amplia gama de colores.

El TPU se utiliza en una variedad de aplicaciones, como calzado, ropa deportiva, juguetes, juntas y sellos, recubrimientos de cables, piezas de automóviles, equipos médicos y más. Debido a su combinación de elasticidad, resistencia y procesabilidad, el TPU es ampliamente apreciado en industrias que requieren materiales flexibles y duraderos.

3.5 Nylon 12 [5]

El nylon 12 es una variante específica del nylon, también conocido como poliamida 12. Es un polímero sintético que pertenece a la familia de los polímeros de poliamida. Se caracteriza por ser flexible, resistente y duradero.

El nylon 12 se produce a través de un proceso de polimerización en el cual se combinan moléculas de monómero de ácido láctico y otros compuestos químicos para formar cadenas largas de poliamida 12. Estas cadenas entrelazadas proporcionan al nylon 12 sus propiedades mecánicas favorables.

Entre sus características podemos encontrar:

Alta resistencia al impacto y a la fatiga: es un material flexible y elástico que puede soportar esfuerzos repetidos sin romperse o debilitarse fácilmente. Esto lo hace adecuado para aplicaciones que requieren resistencia a la deformación, como componentes de maquinaria, tuberías flexibles y mangueras.

Buenas propiedades de barrera y resistencia a la corrosión. Es un material que puede proteger contra la penetración de gases, líquidos y vapores, lo que lo hace útil en aplicaciones como revestimientos protectores, envases y productos químicos.

Baja fricción: esto lo que lo convierte en un material adecuado para aplicaciones donde se requiere un deslizamiento suave, como rodamientos y rieles de guía.

4. EQUIPO EMPLEADO

4.1 Ensayo a tracción

El equipo empleado para los ensayos ha sido la máquina de ensayos a tracción Instron facilitada por el departamento de materiales de la Universidad



de Zaragoza. A la derecha observamos una imagen de la máquina mencionada

Fig 4.1 Máquina de ensayos Instron donde se realizaron los ensayos

Un ensayo de tracción es una prueba utilizada para evaluar las propiedades mecánicas de un material. En este ensayo, se aplica una fuerza gradual y controlada a velocidad constante a una muestra del material hasta que se produce su ruptura. Durante el ensayo, se registran y analizan diversas variables, como la carga aplicada y la deformación experimentada por la muestra.

El procedimiento de un ensayo de tracción implica fijar una muestra de forma alargada en forma de una probeta estandarizada en una máquina de

ensayo. En nuestro ensayo se ha seguido la ISO-527. La máquina aplica una fuerza de tracción axial gradualmente a la muestra, mientras se registran los datos de carga y deformación. Los resultados obtenidos se utilizan para generar una curva de tensión-deformación, que muestra cómo el material se comporta bajo tensión y proporciona información valiosa sobre su comportamiento elástico, plástico y ruptura.

Un ensayo de tracción proporciona varias propiedades mecánicas importantes de un material:

-Resistencia a la tracción: Es la máxima carga que un material puede soportar antes de romperse. Se expresa en unidades de fuerza divididas por área (por ejemplo, megapascas, MPa).

Se calcula dividiendo la fuerza aplicada sobre un material entre el área transversal original de la muestra. La fórmula para calcular la tensión de deformación es:

Tensión de deformación=Fuerza aplicada/Área transversal original (MPa)

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

Donde:

La fuerza aplicada se expresa en unidades de fuerza (Newtons)

El área transversal original se expresa en unidades de área (mm²).

-Módulo de elasticidad o módulo de Young: Es una medida de la rigidez del material y su capacidad para resistir la deformación elástica. Indica la relación entre el estrés aplicado (fuerza por unidad de área) y la deformación elástica resultante. Se expresa en unidades de presión (por ejemplo, gigapascas, GPa).

Módulo de Young=(Tensión de deformación / Deformación unitaria)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2)$$

Donde:

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

La tensión se expresa en unidades de presión (MPa)

-Alargamiento o elongación: Mide la cantidad de deformación que experimenta la muestra antes de la ruptura. Se expresa como un porcentaje de la longitud original de la muestra.

La deformación unitaria es adimensional, y se obtiene de la siguiente fórmula:

Deformación unitaria axial= $(\Delta L / L_0)$

$$\%El = \frac{L_f - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (4)$$

Donde:

ΔL es el cambio en longitud de la muestra debido a la carga aplicada.

L_0 es la longitud original de la probeta

-Resistencia a la fluencia o límite elástico: Es la carga máxima que un material puede soportar sin experimentar deformación permanente. Indica el punto en el cual el material comienza a fluir plásticamente. También se expresa en unidades de fuerza por área.

-Reducción de área: Es la disminución porcentual en la sección transversal de la muestra después de la ruptura en comparación con su sección original.

Estas propiedades proporcionan información valiosa sobre el comportamiento mecánico y la resistencia de un material a la tracción. Se utilizan en el diseño y la selección de materiales para garantizar que sean adecuados para aplicaciones específicas, como estructuras, componentes mecánicos, productos de consumo y más.

El ensayo de tracción se realiza en una amplia gama de materiales, como metales, plásticos y materiales compuestos. Los resultados obtenidos se utilizan para evaluar la calidad de los materiales, diseñar estructuras y componentes, y comparar diferentes materiales para aplicaciones específicas.

4.2 Impresora 3D

Para la impresión de las probetas se ha empleado una Prusa MK3. Las configuraciones que le hemos aplicado desde el Slicer se pueden comprobar en el Anexo 2

5. LAS PROBETAS

El ensayo y las dimensiones han seguido las norma ISO 527. Se eligió la velocidad de 5mm/min para estos materiales, y las medidas (en mm) se ven reflejadas en este plano:

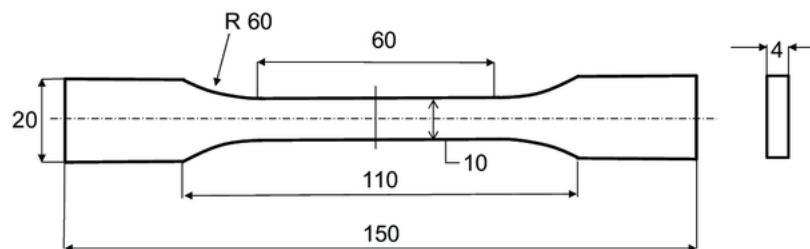


Fig. 5.1 Medidas de la probeta usada

5.1 Nomenclatura de las probetas

Hemos llamado estándar a las probetas con las siguientes configuraciones:

- Relleno tipo rejilla al 20%
- Grosor de capa 0.2mm
- Velocidad de perímetros 50mm/s y relleno 140 mm/s
- Temperatura indicada por el fabricante para cada polímero
- Orientación tumbada

Cuando hemos hecho alguna variación, le hemos cambiado el número, como se puede ver en la tabla a continuación, modificando únicamente el parámetro establecido según lo indicado en la tabla. La configuración completa de la impresora para la probeta estándar se adjunta en el Anexo A2.

TABLA 1: Explicación de nomenclatura de probetas ensayadas

1 Cada Color PLA HD	24 Grosor Capa 0,05
2 Cada Color PETG	25 Grosor Capa 0,1
7 ABS HF	27 Grosor Capa 0,3
9 Sinterizado	
10 Tenaflex	34 Velocidad perimetro 25, relleno 40
	35 Velocidad perimetro 60, relleno 120
11 Infill rejilla	
12 Infill triangular	37 Temperatura -10°C
13 Infill honeycomb	39 Temperatura +10°C
14 Infill honeycomb 3D	
15 Infill giroide	41 Orientacion De pie
16 Infill concentrico	42 Orientacion Tumbada Girada
	43 Orientacion +22,5º
17 5% Infill	44 Orientacion 45º
18 10% Infill	45 Orientacion 75º
20 25% Infill	
21 50% Infill	
22 75% Infill	
23 100% Infill	

Aquí desarrollamos diferentes maneras en las que se han variado las probetas:

Material: Todos los polímeros son de la marca Winkle, menos el sinterizado, que es de marca desconocida realizada por una empresa privada de la que se desconoce el equipo usado.

Relleno o infill: Es el patrón con el que se ha rellenado la pieza. Se muestran los diferentes patrones usados. De izquierda a derecha: rejilla, triangular, honeycomb, honeycomb 3D, giroide, concéntrico En la Fig. A vemos

en rojo el patrón de los diferentes rellenos. En la figura 5.2 (a) vemos las diferencias visuales de cada relleno.

% de relleno: Es el porcentaje que está rellena la pieza siguiendo el patrón indicado. En la Fig. B vemos en rojo cómo el relleno aumenta progresivamente hasta el 100%. Podemos ver en la figura 5.2 (b) cómo afecta el % de relleno a la pieza.

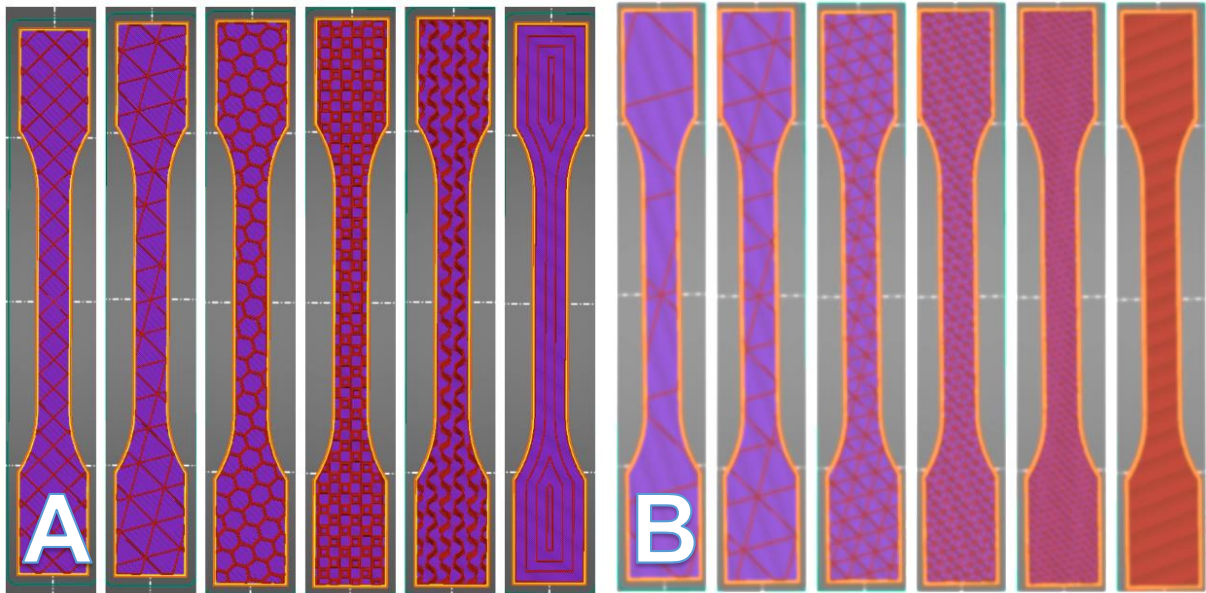


Fig 5.2 (a) Diferentes rellenos (b) Diferentes % de relleno

Grosor de Capa: Como su nombre indica, es el espesor vertical que tiene cada capa horizontal apilada una sobre otra. Cuanto más fina sea, más difícil verlas será, de manera que las superficies serán más suaves, pero se tardará más tiempo en imprimir la pieza. Podemos ver la diferencia visual que esto provoca en la figura 5.3.

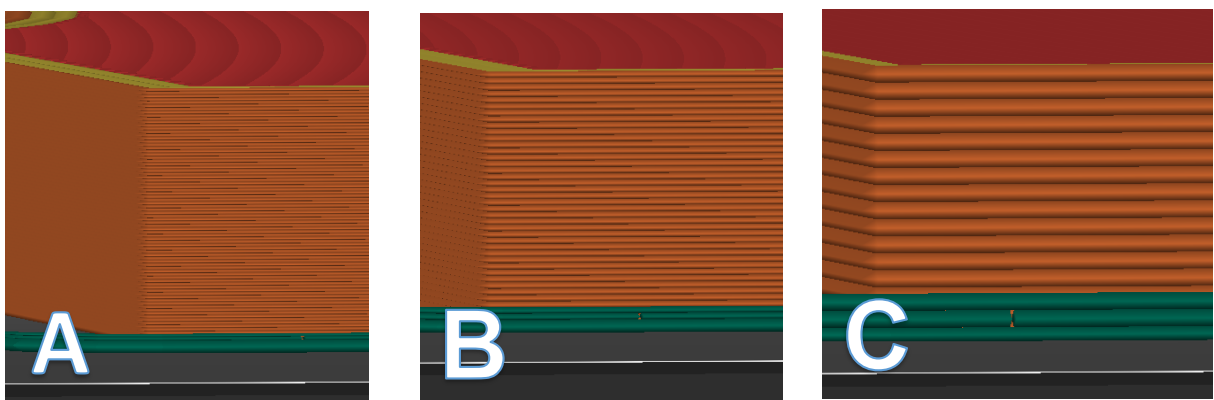


Fig. 5.3 Diferentes grosores de capa (a) 0,05 mm espesor (b) 0,1 mm de espesor (c) 0.3mm de espesor

Temperatura de impresión: Es la temperatura a la que calentamos la boquilla. Suele ser la que recomienda el fabricante, pero ocn marcas

desconocidas o de mala calidad a veces es mejor aumentar esta temperatura para evitar riesgos de atascos del material.

Orientación: Este es un factor de variación muy importante debido a la orientación de las capas. Si el esfuerzo mecánico se realizará de manera perpendicular a estas, las capas pueden separarse entre ellas rompiendo la pieza. Podemos observar las diferentes orientaciones en la figura 5.4.

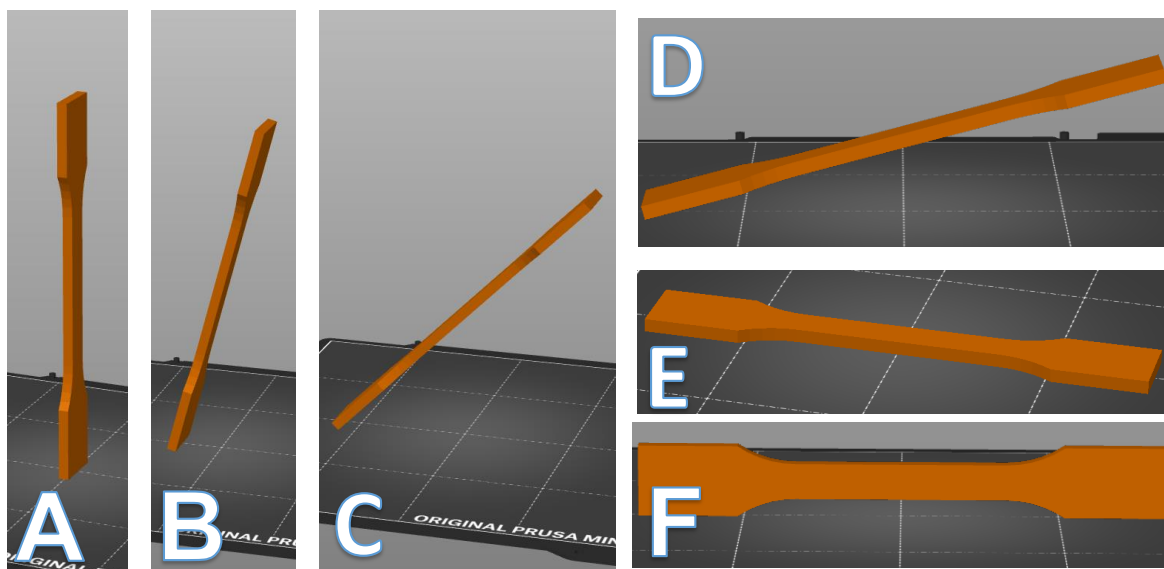


Fig. 5.4 Diferentes orientaciones de la probeta **(a)** De pie, asignada al número 41 **(b)** Orientación 75°, asignada al número 43 **(c)** Orientación 45°, asignada al número 44 **(d)** Orientación 22,5°, asignada al número 45 **(e)** Tumbada girada, asignada al número 42 **(f)** Tumbada, estándar

6. RESULTADOS OBTENIDOS

6.1 Almacenaje y humedad

Por motivos logísticos, se hicieron dos tandas de probetas a ensayar: Unas en verano de 2022 y otras en diciembre del mismo año. La diferencia entre ambas se verá a continuación de manera visual. Esto se deberá a que entre la impresión de las mismas y la realización del ensayo pasaron 4 meses, y las probetas fueron almacenadas en una caja en un armario, sin mayor cuidado. A estas probetas las he denominado 9 y 10. Como podemos observar en la gráfica 6.2, se han graficado las curvas tensión-elongación de la muestra 14 como ejemplo. Se observa que el valor de la elongación máxima baja muy considerablemente con las posteriores muestras, que fueron sometidas al ensayo con presteza y almacenadas al vacío en el periodo de transporte. Todo esto es debido a la humedad absorbida por el polímero, que altera sus propiedades y su estructura.[6][7] Por ende, las denominadas probetas 9 y 10 de los ensayos realizados que aparecen en el Anexo 1 han sido eliminadas de las

gráficas estudiadas a continuación para dar la información más útil posible, ya que estas son descartables. En la figura 4.2 podemos observar que la probeta señalada en color naranja, la numero 9, tiene peores propiedades que el resto de ensayos del mismo material, debido al efecto mencionado de la humedad.

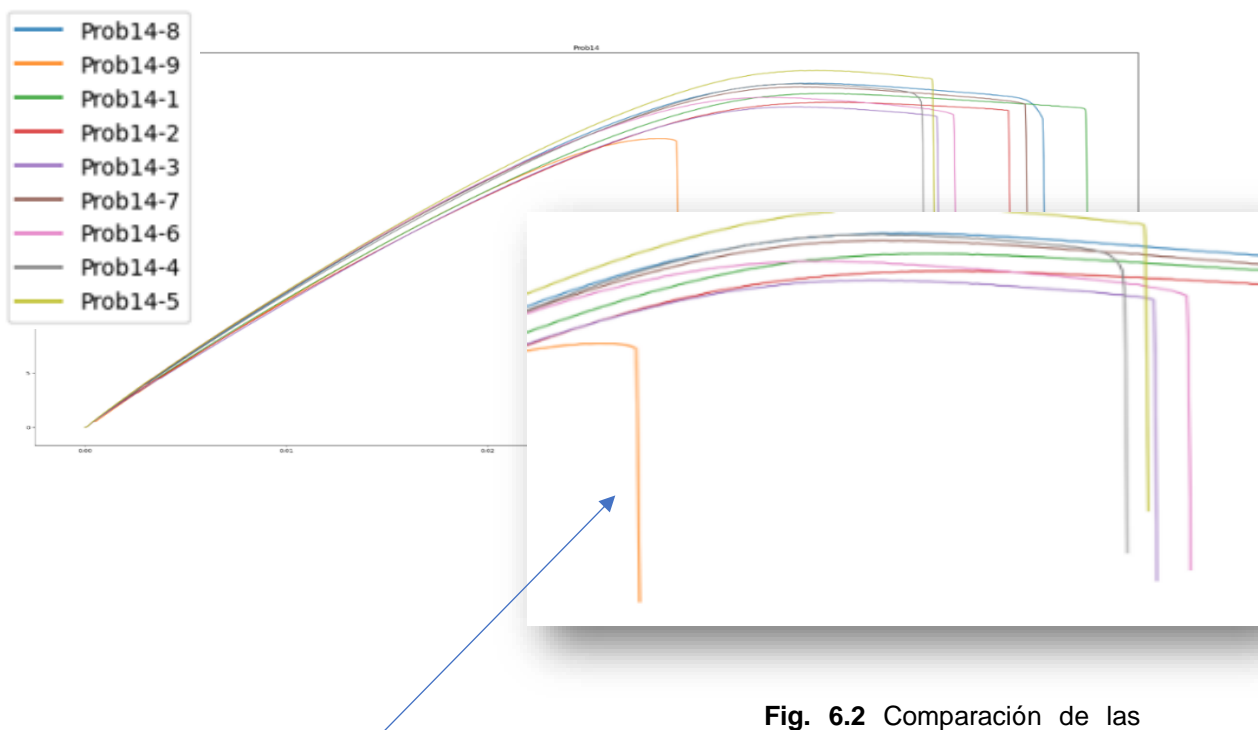


Fig. 6.2 Comparación de las curvas tensión elongación de la muestra 14

Estas variaciones son dadas por la humedad. Debido a un mal almacenaje, el polímero ha absorbido humedad, que ha modificado la estructura de este, alterando sus propiedades de manera negativa. Esto es debido a que la geometría de la porosidad interna varía con el paso del tiempo, degradando el material. Esto fue estudiado por Zaldivar, R. J., y otros. En su artículo [8] analizan el efecto de la húmeda en diferentes configuraciones de polímeros y concluyen que a partir de un 0,16% de humedad los efectos por la degradación del polímero son notables.

6.2 Análisis de Datos

Todo el análisis de datos se ha llevado a cabo a través de una serie de scripts desarrollados en Python3 empleando librerías estándar como son SciPy y NumPy [9][10]

Los datos salían de la máquina Instron en un archivo .RAW, y tenía que importar cada uno a excel, luego filtrar las columnas para seleccionar solo los datos necesarios, y más tarde procesar esas columnas para sacar valores significativos como la tensión máxima, módulo de Young o graficación de las probetas más importantes.

6.3 Variación entre diferentes materiales

Aquí cabe destacar que las probetas 1 y Plata del grupo PLA fueron de la tunda mal almacenadas, por lo que es obvio en las gráficas que han perdido propiedades por la humedad, y no podremos tenerlas en cuenta. En cuanto a la tensión máxima obtenida vemos los siguientes gráficos:

Para sacar los valores de tensión hemos usado la expresión (1), que relacionaba la fuerza obtenida en cada punto y el área de la probeta (A_0), que se usó la del área inicial, debido a que calcular cuánto se ha estrechado para el punto máximo sería casi imposible, y la variación sería mínima, por lo que se ha optado por esta solución. También cabe mencionar que el área de la probeta usada ha sido como si fuese maciza, de manera que en las comparaciones usadas no se compara el material, sino cómo se comporta este bajo diferentes estructuras.

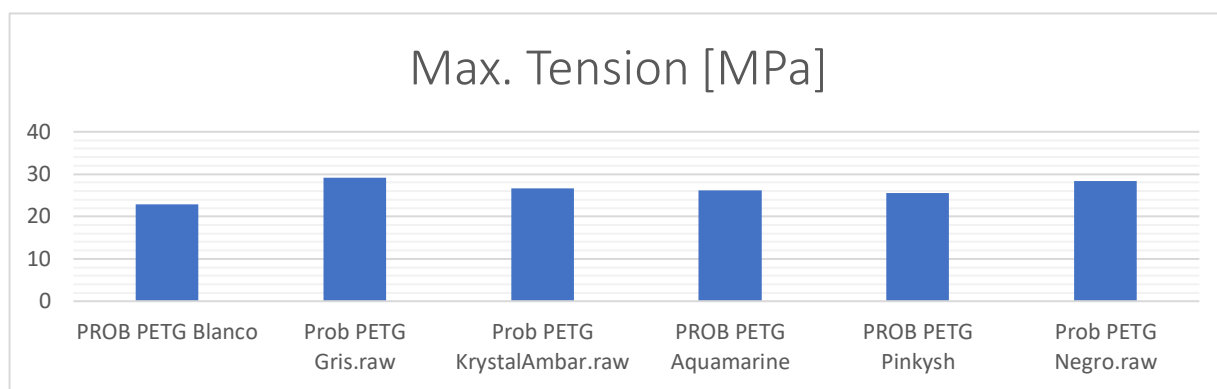


Fig. 6.3 Comparación de tensiones máximas de PETG

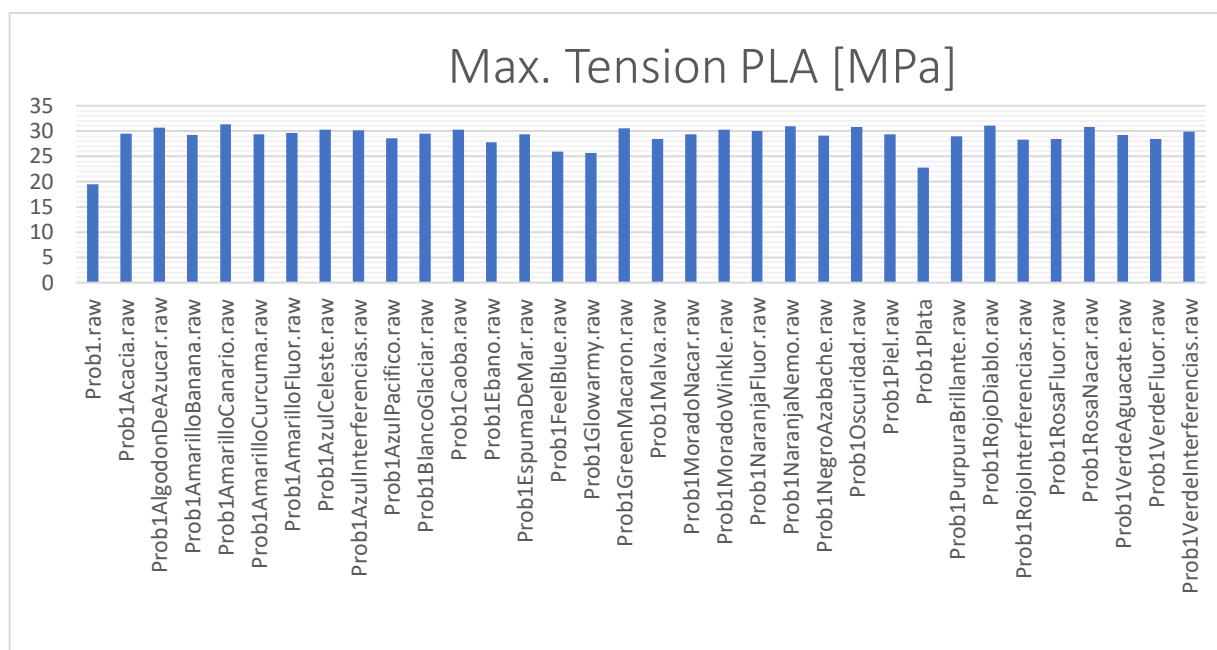


Fig. 6.4 Comparación de tensiones máximas del PLA

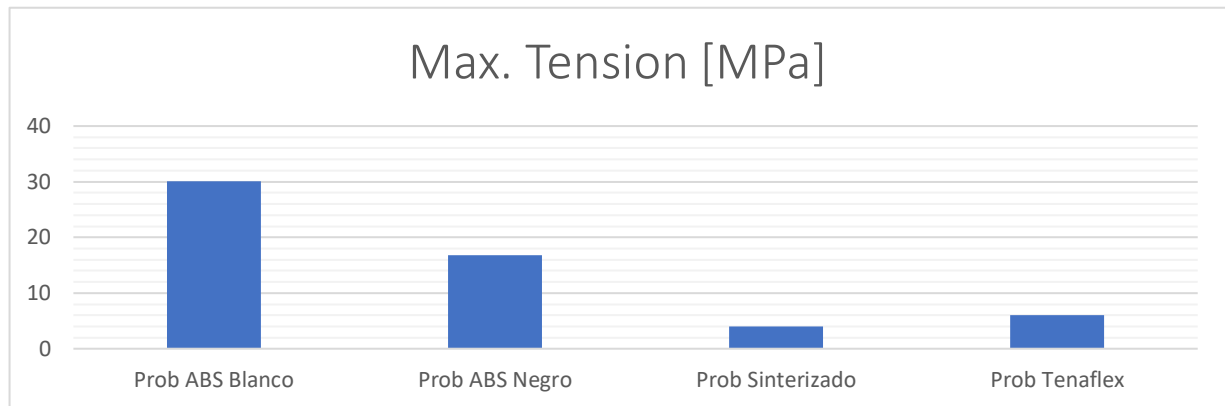


Fig. 6.5 Comparación de las tensiones máximas obtenidas de diferentes materiales

En la gráfica 6.5 podemos apreciar el bajo valor de las tensiones para el sinterizado y el TPU. Esto es debido a su propiedad como elastómeros. La razón por la cual los elastómeros no son capaces de soportar grandes tensiones o cargas es debido a su estructura molecular y a las fuerzas de enlace que mantienen las cadenas de polímeros unidas. A nivel molecular, los elastómeros están formados por largas cadenas de polímeros que se entrelazan y se mantienen unidas por fuerzas de Van der Waals o enlaces débiles.

Cuando se aplica una tensión o fuerza a un elastómero, estas cadenas de polímeros comienzan a estirarse y desenredarse, lo que permite que el material se deforme. Sin embargo, cuando se aplican grandes tensiones, las fuerzas de enlace se rompen más fácilmente que en termoplásticos o termorígidos, y las cadenas de polímeros pueden comenzar a romperse permanentemente, lo que conduce a la falla del material [5]

Siguiendo este argumento de las cadenas, podemos justificar la homogeneidad de los valores en el resto de los polímeros de las gráficas 6.3 y 6.4, ya que sus enlaces serán los mismos, covalentes, y la fuerza necesaria para romper éstos será similar.

Si comparamos las tensiones máximas obtenidas en las figuras 6.3, 6.4 y 6.5, para la configuración estándar escogida para cada material (Seleccionando el mejor color) con el precio del material, obtenemos los valores que se muestran en la Tabla 2

TABLA 2: Comparación de precio y resistencia a tracción de los polímeros

Material	€/kg	Tensión máx. (MPa)	€/MPaKg
ABS gris	18	30,12	0,59
PLA Amarillo Canario	20	31,38	0,63
PETG gris	28	29,16	0,96
TENAFLEX negro	33	5,98	5,51

Podemos observar de la Tabla 2 que el material óptimo desde el punto de vista económico para obtener resistencia a tracción es el ABS color gris. Podemos a su vez observar que el TPU es muy poco óptimo. Esto es debido a que no está pensado para tener un alto grado de resistencia a la flexión, sino ser capaz de elongarse mucho. Vemos, en relación con el siguiente apartado, que el Módulo de Young es mucho mayor en el PLA que en el TPU, mientras que la elongación es a la inversa, el valor será mayor en el TPU. En la representación Tensión-Elongación del TPU, vemos la gran elongación que tiene el material en comparación con otros, como puede ser el PLA a continuación:

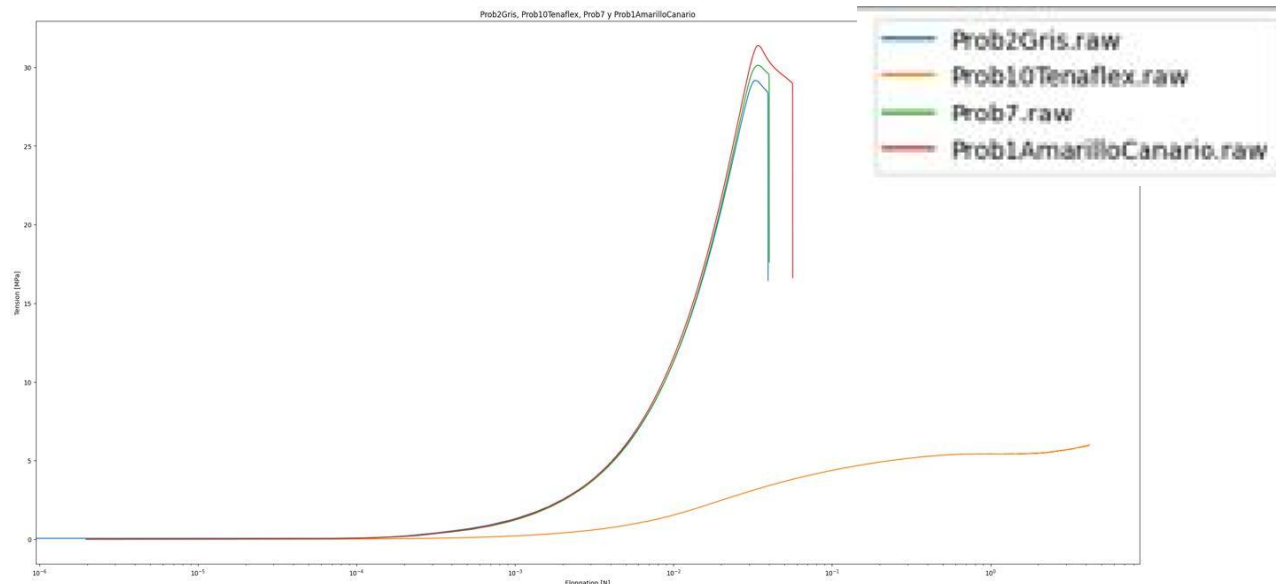


Fig. 6.6 Comparación de los mejores materiales obtenidos para cada material

Si observamos la figura 6.6, podemos apreciar que está en escala logarítmica. Esto es debido a que, si pone de manera lineal, la probeta 10 compuesta de Tenaflex se sale de escala por su gran elongación adquirida durante el ensayo

Asimismo, viendo los polímeros que no son Tenaflex, vemos que tienen un comportamiento similar, destacando el PLA, que tiene mayor resistencia máxima a tracción.

En las gráficas 6.7, 6.8 y 6.9 vemos la compra del módulo de Young. Podemos ver en la figura 6.7 la comparación de diferentes colores del PLA. Vemos aquí el bajo valor de la probeta Plata y de la numero 1, debido a la humedad adquirida. En el resto de las probetas tienen un valor similar con variaciones menores a un 10%, lo cual tiene sentido, pues sólo cambia el color y no el material. En la gráfica 6.8 podemos ver que, a pesar de ser el mismo material, PETG, muestran diferentes valores. Esto se da por los diferentes aditivos añadidos, como explica Marianne Gilbert [5] En algunos materiales, debido a su estructura molecular, los aditivos son mucho más críticos que en otros, como podemos observar comparando los valores del PLA con el PETG en las gráficas 6.7 y 6.8. Por último, en la figura 6.9 vemos el bajísimo valor del

Tenaflex y el sinterizado. Esto se debe a su estructura molecular altamente flexible, el bajo grado de entrecruzamiento entre las cadenas y la facilidad con la que pueden reorganizarse éstas bajo tensión [5]

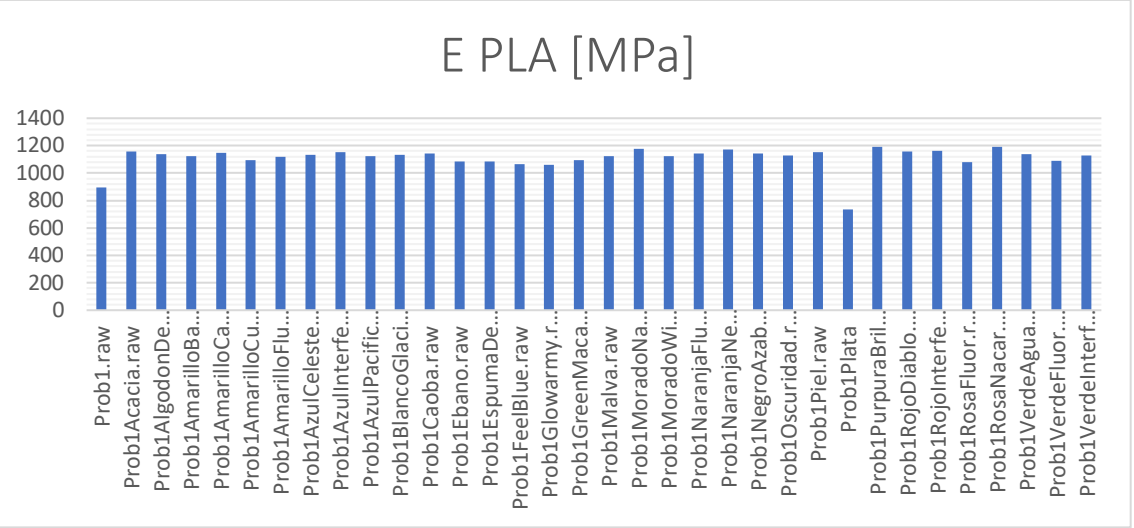


Fig. 6.7 Comparación del módulo de Young del PLA

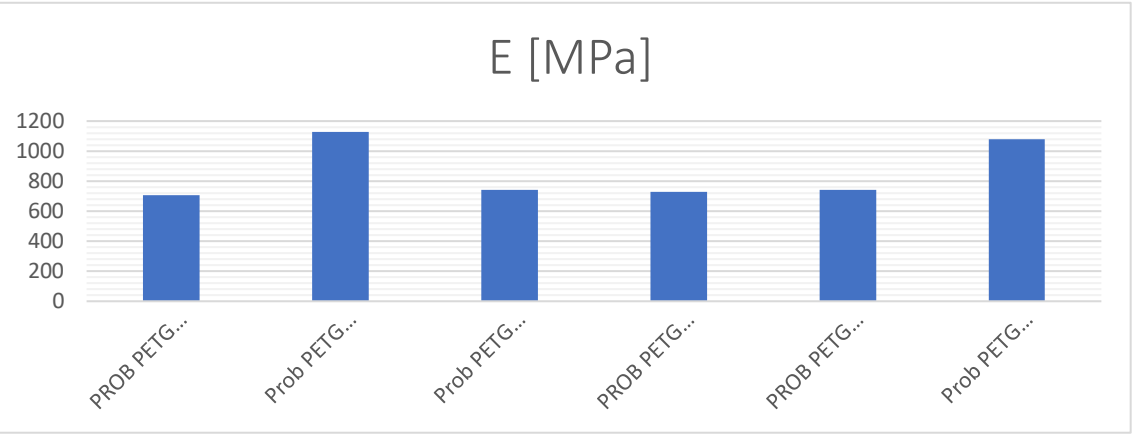


Fig. 6.8 Comparación del módulo de Young del PETG

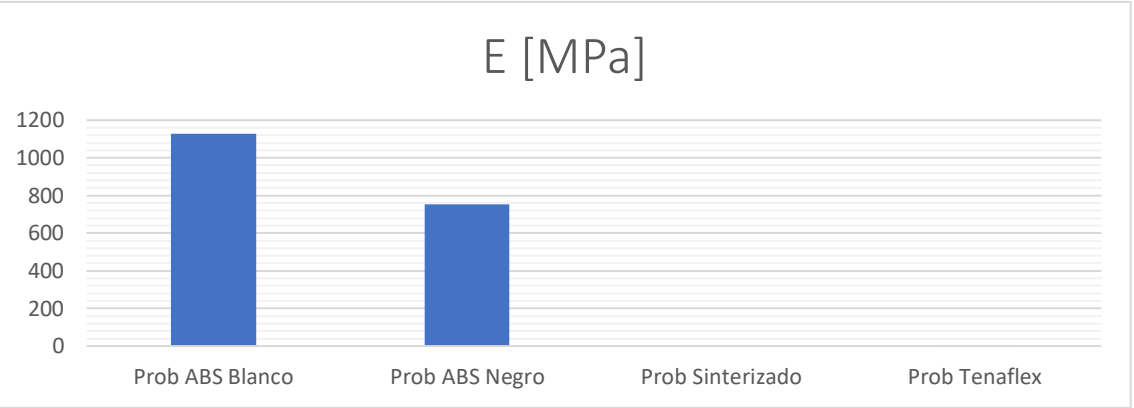


Fig. 6.9 Comparación del módulo de Young de diferentes materiales

Observando la elongación en las gráficas 6.10. 6.11 y 6.12 vemos la nula elongación de un color en el PETG y PLA y en todos los ABS. Esto puede ser dado por los aditivos añadidos a cada color, puesto que además de pigmentos se añaden otros compuestos para ajustar las propiedades, lo cual puede crear que las cadenas de monómero sean más rígidas o tengan menor longitud de

cadena, lo cual genera que no se desenreden y por tanto la longitud apenas varíe [5]

Por otro lado, vemos el alto valor de la probeta del Tenaflex. Esto es debido a que como vimos previamente, es un elastómero, de manera que es lógico que se alargase tanto en el experimento.

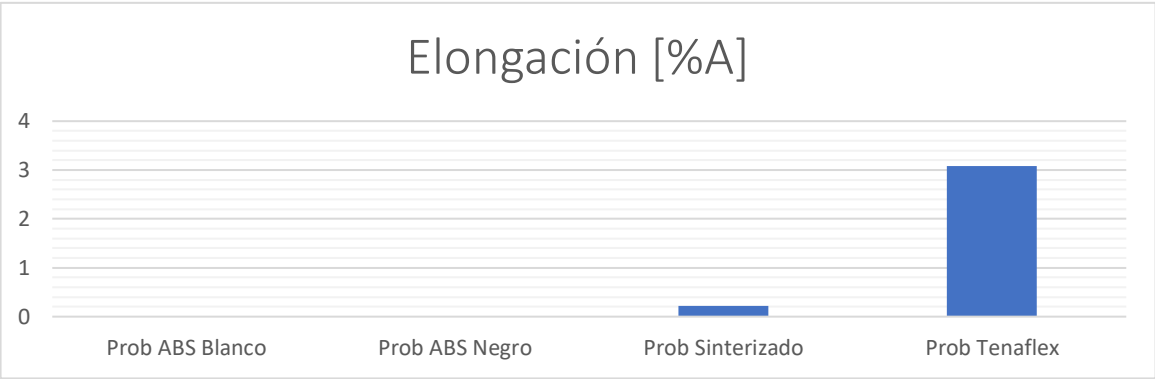


Fig. 6.10 Comparación de la elongación de PETG

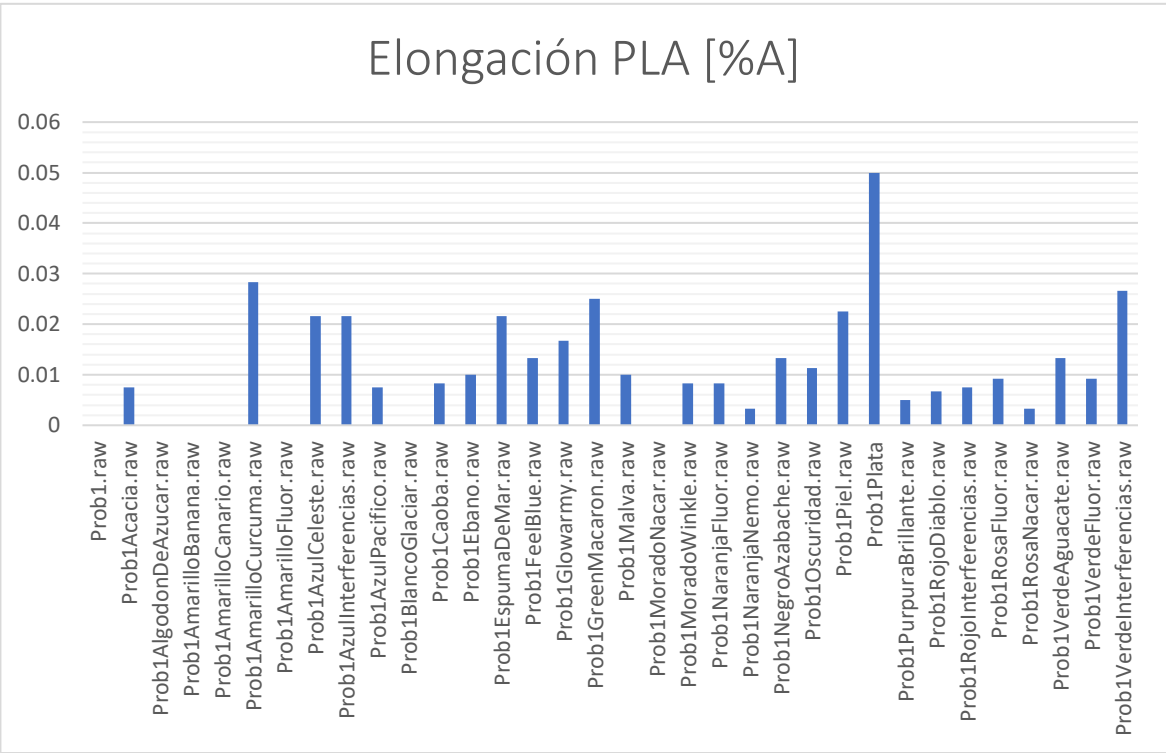


Fig. 6.11 Comparación de la elongación de PLA

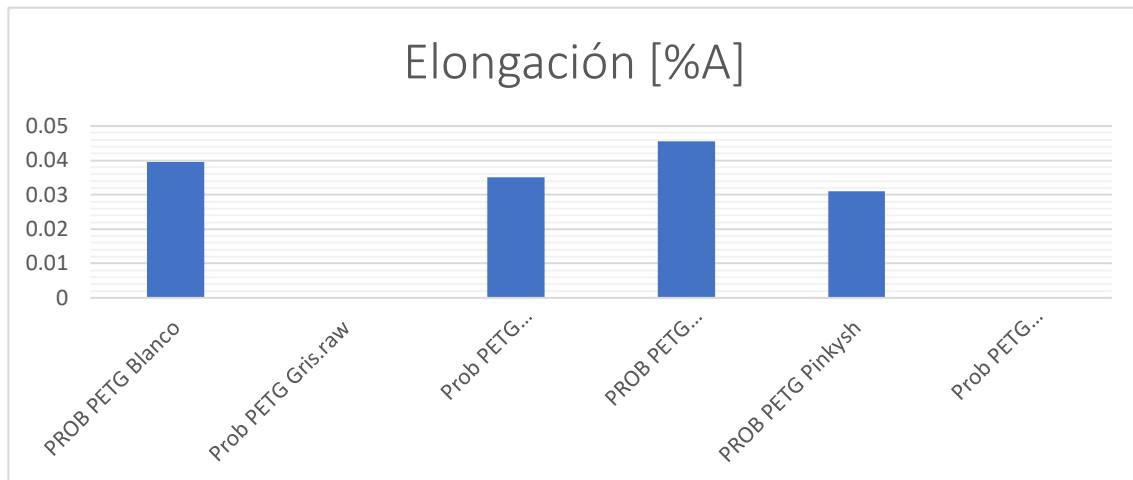


Fig. 6.12 Comparación de la elongación de diferentes materiales

Para obtener el valor de la elongación se midió una longitud de 60mm en el eje longitudinal de la pieza antes de ensayarla, para luego volver a medirla más tarde y ver la diferencia. Este valor, dividido entre la longitud inicial de 60mm, resulta en la elongación (2)

6.4 Variación de parámetros de impresión

En esta parte se ha mantenido como único material el PLA gris, y sólo se han modificado ciertos aspectos de la impresión para compararlos entre ellos para ver cuáles son los parámetros óptimos de cara a la resistencia de estos en aplicaciones técnicas. Observamos en la gráfica 6.12 que la mayor tensión obtenida ha sido en la probeta 23. Esto es debido a que era la que más relleno tenía, y con ello, más área a resistir la tracción, como hemos visto en la fórmula (1)

Asimismo, podemos observar los bajos valores de la probeta 41 en las gráficas 6.12, 6.13 y 6.14. El valor 41 corresponde a la impresión orientada en vertical, lo que provoca que el fallo no es de rotura del material, sino de la separación de las capas impresas. En este punto lo que observamos es la adherencia interlaminar. Es por estos valores la importancia de la orientación de la pieza a la hora de imprimirla.

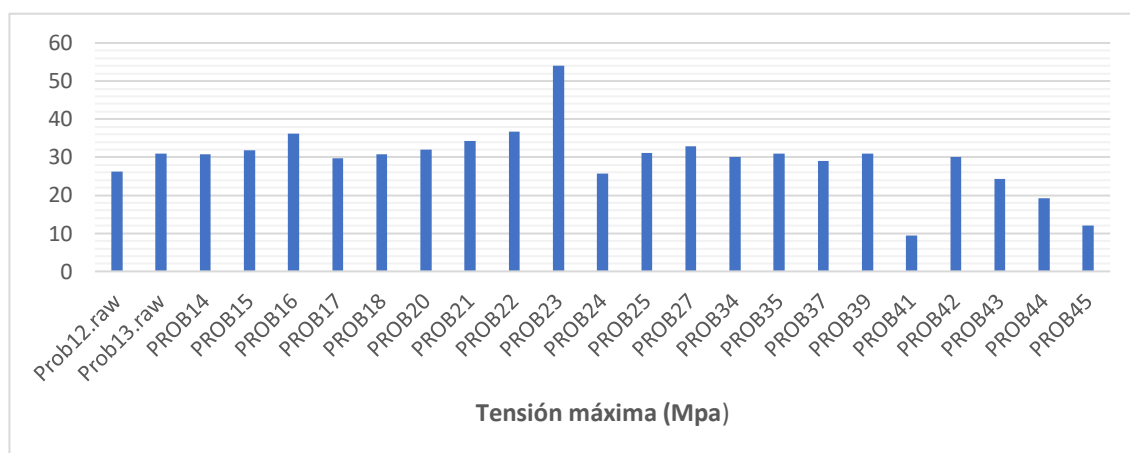


Fig. 6.12 Comparación de las tensiones máximas

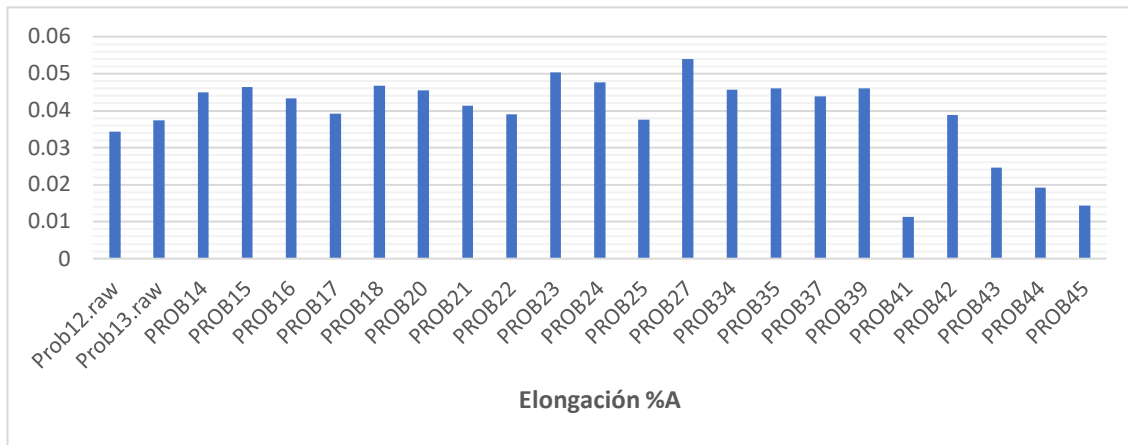


Fig. 6.13 Comparación de la elongación

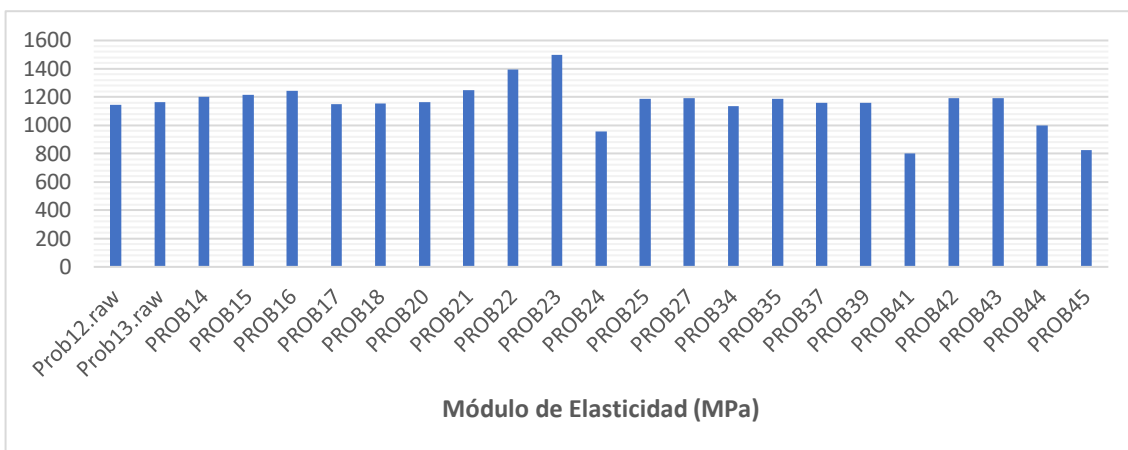


Fig. 6.14 Comparación del módulo de Young

Observando los resultados de las gráficas 6.12, 6.13 y 6.14, seleccionamos los mejores valores:

Forma del relleno: el que más resistencia a la tracción y modulo de young es el relleno concéntrico (16)

% de relleno: El que mejores propiedades ofrece es el 100%

Grosor de capa: Tanto el grosor 0.1 como el 0.3 ofrecen resultados similares

Velocidad de los perímetros: Los resultados son prácticamente similares, de manera que podemos afirmar que este parámetro no afectará a las propiedades de nuestra muestra

Temperatura de impresión: Los resultados son similares, no afectará a las propiedades mecánicas.

Orientación de impresión: De manera clara, la orientación tumbada girada es la que mejores propiedades ofrece. Esto se debe a que el ensayo a tracción “estira” la probeta, y si estas capas están orientadas de manera vertical, será mucho más facil su separación entre ellas, es decir, que el material no desgarrará sino que sus capas solo se separarán.

En vista de estos resultados podríamos concluir que las mejores propiedades mecánicas se obtendrán con un relleno al 100%, con un grosor de capa de 0.3 y una orientación pegada a la cama. El problema de esta configuración es el costo de la probeta. Un 100% conllevará muchas horas de impresión y significativamente más material gastado. Para esta configuración, llevaría 31 minutos imprimirla y 10,61 gramos. En cambio, si escogemos el 50% de relleno llevará 28 minutos y 8,62 gramos.

Cabe destacar que en esta probeta no hay mucho relleno, y como se observa, la diferencia de tiempo y material no es significativa. Si escogemos un objeto más voluminoso, el tiempo y el material escalarán de manera cubica. Hagamos una prueba la columna de la figura 6.15:

- Relleno al 5%: 9h 44min, 159gr
- Relleno al 10%: 10h 52min, 208gr
- Relleno al 25%: 14h 12min, 332gr
- Relleno al 50%: 19h 49min, 536gr
- Relleno al 70%: 24h, 701gr
- Relleno al 100%: 29h 48min, 945gr

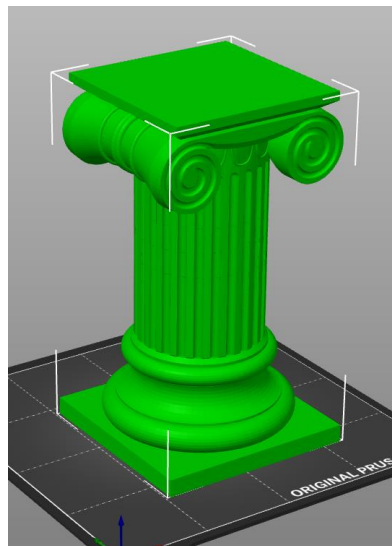


Fig. 6.15 Visualización de la figura de muestra para los cálculos

Ahora, comparemos las horas de impresión con la resistencia que nos ofrece el material en cada punto:

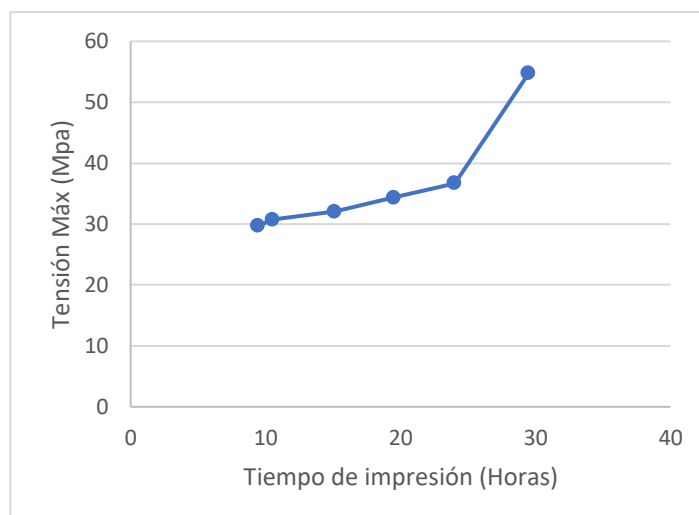


Fig. 6.16 Comparación entre tensión máxima y tiempo en horas de la probeta

Como podemos observar en la gráfica 6.16 sólo hay un salto real de resistencia a tracción al 100%, mientras que en valores inferiores apenas aumenta en comparación con lo rápido que escalan las horas de impresión.

Asignemos un precio ahora para cada pieza propuesta: 1€ por hora de impresión y el polímero a su precio: 20€/kg. Si hacemos la relación con la tensión tendremos el precio por MPa (resistencia a la tracción)

TABLA 3: Relaciones de economía con % de relleno

% Relleno	Horas	Minutos	Peso (Kg)	Precio	Tensión	€/MPa
5	9	44	0,15	12,91	29,71	0,43
10	10	52	0,20	15,02	30,76	0,48
25	14	12	0,33	20,84	32,06	0,64
50	19	49	0,53	30,53	34,33	0,88
75	24	0	0,70	38,02	36,72	1,03
100	29	48	0,91	48,1	54,72	0,87

Vemos en la tabla 3 que lo más óptimo desde el punto de vista económico es imprimir con menos relleno. Si realmente nos hacen falta las mejores propiedades mecánicas posibles, no conviene quedarse en el 75%, sino ir directamente al 100%, pues sale mejor la relación propiedades precio.

7. ESTUDIO DE NORMALIDAD

Se ha realizado la prueba de Shapiro-Wilk a los ensayos los cuales tenían 3 muestras o más. Este test calcula la probabilidad para que las muestras estudiadas entren dentro de la distribución normal. Es por esto que si el valor de

la probabilidad (P-value) es menor a 0.05, podremos afirmar que la distribución de las muestras es normal.

TABLA 4: Estudio de la distribución normal de los ensayos realizados

Nombre Ensayo	Sample Type	Statistic (W)	p-value	0,05	Nombre E	Sample Type	Statistic (W)	p-value	0,05
Prob18	Tension [MPa]	0,94	0,57	NORMAL	Prob20	Tension [MPa]	0,90	0,28	NORMAL
	Elongation [N]	0,94	0,59	NORMAL		Elongation [N]	0,93	0,55	NORMAL
	E	0,94	0,60	NORMAL		E	0,92	0,41	NORMAL
Prob23	Tension [MPa]	0,81	0,04	FALSO	Prob2Kryst	Tension [MPa]	0,93	0,49	NORMAL
	Elongation [N]	0,88	0,19	NORMAL		Elongation [N]	0,78	0,02	FALSO
	E	0,97	0,88	NORMAL		E	0,93	0,48	NORMAL
Prob14	Tension [MPa]	0,97	0,91	NORMAL	Prob41	Tension [MPa]	0,97	0,92	NORMAL
	Elongation [N]	0,91	0,35	NORMAL		Elongation [N]	0,88	0,23	NORMAL
	E	0,90	0,27	NORMAL		E	0,95	0,77	NORMAL
Prob21	Tension [MPa]	0,95	0,75	NORMAL	Prob17	Tension [MPa]	0,96	0,78	NORMAL
	Elongation [N]	0,92	0,42	NORMAL		Elongation [N]	0,93	0,49	NORMAL
	E	0,92	0,39	NORMAL		E	0,91	0,36	NORMAL
Prob42	Tension [MPa]	0,79	0,02	FALSO	Prob22	Tension [MPa]	0,95	0,66	NORMAL
	Elongation [N]	0,96	0,81	NORMAL		Elongation [N]	0,88	0,19	NORMAL
	E	0,85	0,09	NORMAL		E	0,97	0,89	NORMAL
Prob44	Tension [MPa]	0,93	0,53	NORMAL	Prob1Plata	Tension [MPa]	0,92	0,44	NORMAL
	Elongation [N]	0,93	0,49	NORMAL		Elongation [N]	0,96	0,59	NORMAL
	E	0,91	0,36	NORMAL		E	0,99	0,83	NORMAL
Prob27	Tension [MPa]	0,91	0,37	NORMAL	Prob45	Tension [MPa]	0,91	0,46	NORMAL
	Elongation [N]	0,96	0,79	NORMAL		Elongation [N]	0,80	0,06	NORMAL
	E	0,90	0,27	NORMAL		E	0,73	0,01	FALSO
Prob25	Tension [MPa]	0,82	0,05	FALSO	Prob15	Tension [MPa]	0,93	0,54	NORMAL
	Elongation [N]	0,88	0,17	NORMAL		Elongation [N]	0,95	0,76	NORMAL
	E	0,83	0,06	NORMAL		E	0,91	0,38	NORMAL
Prob16	Tension [MPa]	0,95	0,68	NORMAL	Prob35	Tension [MPa]	0,96	0,83	NORMAL
	Elongation [N]	0,91	0,36	NORMAL		Elongation [N]	0,93	0,51	NORMAL
	E	0,95	0,72	NORMAL		E	0,98	0,97	NORMAL
Prob34	Tension [MPa]	0,93	0,48	NORMAL	Prob37	Tension [MPa]	0,90	0,30	NORMAL
	Elongation [N]	0,82	0,04	FALSO		Elongation [N]	0,93	0,53	NORMAL
	E	0,93	0,54	NORMAL		E	0,92	0,45	NORMAL
Prob39	Tension [MPa]	0,92	0,45	NORMAL	Prob2Kryst	Tension [MPa]	0,94	0,65	NORMAL
	Elongation [N]	0,95	0,71	NORMAL		Elongation [N]	0,70	0,00	FALSO
	E	0,92	0,45	NORMAL		E	0,94	0,57	NORMAL
Prob43	Tension [MPa]	0,97	0,88	NORMAL					
	Elongation [N]	0,93	0,47	NORMAL					
	E	0,92	0,43	NORMAL					

Se ha querido realizar esta prueba para ver si los test tienen coherencia, o están tan dispersos que ha podido haber algún error en el proceso. Como observamos, la mayoría de los experimentos han salido dentro de la distribución normal, por lo tanto, podríamos afirmar que los resultados son satisfactorios. Los resultados se ven en la tabla 4. En cuanto a la validez de los datos vemos que ninguna probeta ha fallado en el apartado de normalidad en más de un tipo analizado (Tensión, Elongación, Modulo de Young). Esto quiere decir que ha podido haber ciertas desviaciones a la hora de hacer los ensayos, pero podemos considerar los resultados fiables debido a la alta tasa de normalidad.

8. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos vemos que el mejor material para imprimir en 3D de cara a obtener una alta resistencia a la tensión es el PLA. Esto concuerda con los resultados obtenidos en estudios previos realizados con PLA y ABS [11][12][13]. Esto también lo hemos comprobado con el estudio de normalidad de los resultados obtenidos, siendo unos resultados satisfactorios en los experimentos.

Para este estudio se realizaron muchos experimentos para comprobar la fiabilidad de estos, que ha tenido un resultado satisfactorio, pero lamentable no las pude realizar para todas las probetas por una cuestión de tiempo y recursos (Sólo en realizar los ensayos se han destinado más de 20 horas en el laboratorio) Esto nos puede dar problemas en ciertos ensayos, porque si se ha realizado solo uno para una muestra, y esta se realizó mal, absorbió humedad o se dañó en el transporte, no podremos descubrir que tenemos un fallo, y las comparaciones hechas en esta tesis, pueden ser poco fiables.

Por último, quiero destacar que hay más materiales a ser probados, como los PLA de alta resistencia, materiales flexibles o los destinados a medicina, pero, de vuelta, no me ha sido posible realizarlos por tiempo y recursos. Lo mismo sucede con otras marcas, ya que hay gran variedad de marcas a la venta en el mercado actual, y no hay manera fiable de compararlas, ya que no hay un laboratorio externo a todas que las compare y publique los resultados de manera independiente.

9. REFERENCIAS

- [1] <https://github.com/pcolladosoto/elasticity-processing>.
- [2] Joseph E. Grady and Michael C. Halbig NASA Glenn Research Center Cleveland, OH, USA. A Fully Non-Metallic Gas Turbine Engine Enabled by Additive Manufacturing. ISABE-2015-20168
- [3] Briceño M., B. J. (2018). Evaluación de las tecnologías de impresión 3d, modelado de fusión por deposición (fdm) y tecnología polyjet, aplicada a la fabricación de conductos de aire de la camioneta toyota stout 2200. Trabajo Maestría, UISEK, Fac. Arquitectura e Ingeniería, Quito.
- [4] Credit Suisse. "3D printing market will be much bigger than what industry consultants estimate". September, 2013. <http://www.3ders.org/articles/20130918-credit-suisse-3d-printing-market-will-be-much-bigger-than-what-industry-consultants-estimate.html>
- [5] Brydson's Plastics Materials, Marianne Gilbert ISBN: 9780323370226
- [6] Cassagnol C, Olivier P and Ricard A 1998 Influence of the dopant on the polypyrrole moisture content: effects on conductivity and thermal stability J. Appl. Polym. Sci. 70 1567–77
- [7] I. Merdas, J. Thominet, J. Verdu. Humid aging of polyetherimide. I. Water sorption characteristics. J. Appl. Polym. Sci., 77 (2000), pp. 1439-1444
- [8] Zaldivar, R. J., McLouth, T. D., Ferrelli, G. L., Patel, D., Hopkins, A. R., & Witkin, D. B. (2018). Effect of initial filament moisture content on the microstructure and mechanical performance of ULTEM® 9085 3D printed parts. Additive manufacturing, 24, 457-466. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.022>
- [9] <https://scipy.org/>
- [10] <https://numpy.org/>
- [11] L. Rodríguez, J. Thomas and J. Renaud. "Mechanical Behavior of Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) Fused Deposition Materials". Rapid Prototyping Journal. Vol. 7 N° 3, pp. 148-158. 1995. ISSN: 1355-2546. DOI: 10.1108/13552540310489604.
- [12] Julia, D. H. S. (2017). Evaluación de la resistencia a la tracción y la cristalinidad del ácido poliláctico (pla) procesado mediante impresión 3d tipo fdm. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNIT_237b9e869b9cb8ac998f20d71d29fcbe
- [13] B.M. Tymrak, M. Kreiger and J.M. Pearce. "Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions". Materials and Design. Vol. 58, June, 2014. ISSN: 18734197. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.02.038.

10.ANEXO

A1: Tablas con los valores obtenidos de los ensayos

Experiment Name	Max. Tension [MPa]	Elongación [%A]	E
Prob01.raw	19,50	0,00	895,92
Prob01Acacia.raw	29,46	0,01	1157,20
Prob01AlgodonDeAzucar.raw	30,73	0,00	1139,73
Prob01AmarilloBanana.raw	29,20	0,00	1123,15
Prob01AmarilloCanario.raw	31,38	0,00	1147,42
Prob01AmarilloCurcuma.raw	29,38	0,03	1092,99
Prob01AmarilloFluor.raw	29,61	0,00	1118,25
Prob01AzulCeleste.raw	30,27	0,02	1132,31
Prob01AzulInterferencias.raw	30,15	0,02	1150,84
Prob01AzulPacifico.raw	28,61	0,01	1122,74
Prob01BlancoGlaciar.raw	29,51	0,00	1131,84
Prob01Caoba.raw	30,22	0,01	1144,17
Prob01Ebano.raw	27,76	0,01	1085,32
Prob01EspumaDeMar.raw	29,32	0,02	1086,40
Prob01FeelBlue.raw	25,92	0,01	1066,71
Prob01Glowarmy.raw	25,60	0,02	1060,83
Prob01GreenMacaron.raw	30,54	0,03	1093,06
Prob01Malva.raw	28,49	0,01	1121,66
Prob01MoradoNacar.raw	29,33	0,00	1179,30
Prob01MoradoWinkle.raw	30,29	0,01	1121,89
Prob01NaranjaFluor.raw	29,99	0,01	1141,15
Prob01NaranjaNemo.raw	30,96	0,00	1169,95
Prob01NegroAzabache.raw	29,12	0,01	1142,23
Prob01Oscuridad.raw	30,75	0,01	1129,17
Prob01Piel.raw	29,40	0,02	1153,91
Prob01Plata-1.raw	21,05	0,05	686,79
Prob01Plata-2.raw	21,45	0,06	623,75
Prob01Plata-3.raw	22,72	0,05	732,76
Prob01PurpuraBrillante.raw	28,98	0,00	1192,29
Prob01RojoDiablo.raw	31,01	0,01	1157,43
Prob01RojoInterferencias.raw	28,26	0,01	1163,74
Prob01RosaFluor.raw	28,43	0,01	1079,21
Prob01RosaNacar.raw	30,83	0,00	1189,34
Prob01VerdeAguacate.raw	29,27	0,01	1138,97
Prob01VerdeFluor.raw	28,38	0,01	1088,05
Prob01VerdeInterferencias.raw	29,90	0,03	1128,93
Prob02Blanco.raw	22,77	0,04	700,71
Prob02BlancoBis.raw	22,88	0,04	712,80
Prob02Gris.raw	29,16	0,00	1126,71

Prob02KrystalAmbar.raw	26,58	0,04	742,64
Prob02KrystalAquamarine-1.raw	25,69	0,06	707,12
Prob02KrystalAquamarine-10.raw	23,52	0,04	678,46
Prob02KrystalAquamarine-2.raw	27,25	0,04	788,17
Prob02KrystalAquamarine-3.raw	26,06	0,03	747,90
Prob02KrystalAquamarine-4.raw	26,08	0,02	807,14
Prob02KrystalAquamarine-5.raw	26,57	0,06	706,98
Prob02KrystalAquamarine-6.raw	25,96	0,10	609,08
Prob02KrystalAquamarine-7.raw	26,96	0,08	711,49
Prob02KrystalAquamarine-8.raw	24,36	0,03	760,04
Prob02KrystalAquamarine-9.raw	24,28	0,03	780,00
Prob02KrystalPinkish-1.raw	23,82	0,02	700,98
Prob02KrystalPinkish-2.raw	25,79	0,02	753,87
Prob02KrystalPinkish-3.raw	26,57	0,03	786,17
Prob02KrystalPinkish-4.raw	26,67	0,03	770,18
Prob02KrystalPinkish-5.raw	25,14	0,06	678,75
Prob02KrystalPinkish-6.raw	26,04	0,02	733,95
Prob02KrystalPinkish-7.raw	25,65	0,07	742,73
Prob02KrystalPinkish-8.raw	24,94	0,03	769,36
Prob02KrystalPinkish-9.raw	26,17	0,03	754,02
Prob02Negro.raw	28,39	0,00	1079,89
Prob07.raw	30,13	0,00	1127,27
Prob07Negro.raw	16,77	0,00	753,82
Prob09Sinterizado.raw	4,03	0,22	4,19
Prob10Tenaflex.raw	5,99	3,08	3,99
Prob12.raw	26,23	0,00	1147,59
Prob13.raw	30,90	0,00	1164,53
Prob14-1.raw	30,56	0,00	1171,35
Prob14-2.raw	29,77	0,00	1156,09
Prob14-3.raw	29,36	0,00	1140,12
Prob14-4.raw	31,46	0,00	1211,74
Prob14-5.raw	32,69	0,00	1243,51
Prob14-6.raw	30,22	0,00	1248,30
Prob14-7.raw	31,19	0,00	1233,47
Prob14-8.raw	31,51	0,00	1220,58
Prob14-9.raw	26,45	0,00	1174,20
Prob15-1.raw	32,52	0,00	1201,40
Prob15-2.raw	33,03	0,00	1314,60
Prob15-3.raw	31,46	0,00	1205,90
Prob15-4.raw	32,20	0,00	1192,28
Prob15-5.raw	29,72	0,00	1144,73
Prob15-6.raw	31,90	0,00	1237,60
Prob15-7.raw	29,90	0,00	1192,53
Prob15-8.raw	33,67	0,00	1236,63
Prob15-9.raw	29,34	0,00	1186,54
Prob16-1.raw	36,99	0,00	1241,75

Prob16-2.raw	35,66	0,00	1198,38
Prob16-3.raw	36,91	0,00	1235,99
Prob16-4.raw	37,71	0,00	1243,32
Prob16-5.raw	35,94	0,00	1206,16
Prob16-6.raw	37,98	0,00	1300,69
Prob16-7.raw	34,22	0,00	1254,04
Prob16-8.raw	34,73	0,00	1261,76
Prob16-9.raw	31,22	0,00	1191,53
Prob17-1.raw	30,66	0,00	1156,39
Prob17-2.raw	28,23	0,00	1156,23
Prob17-3.raw	29,13	0,00	1137,17
Prob17-4.raw	29,61	0,00	1170,20
Prob17-5.raw	30,81	0,00	1172,02
Prob17-6.raw	30,11	0,00	1145,43
Prob17-7.raw	29,55	0,00	1131,81
Prob17-8.raw	29,73	0,00	1135,94
Prob17-9.raw	25,89	0,00	1083,96
Prob18-1.raw	32,35	0,00	1143,91
Prob18-10.raw	27,46	0,00	1080,93
Prob18-2.raw	29,47	0,00	1181,60
Prob18-3.raw	31,42	0,00	1158,80
Prob18-4.raw	29,53	0,00	1148,92
Prob18-5.raw	31,00	0,00	1179,16
Prob18-6.raw	29,91	0,00	1151,66
Prob18-7.raw	31,72	0,00	1157,64
Prob18-8.raw	30,84	0,00	1132,05
Prob18-9.raw	22,28	0,00	1080,44
Prob20-1.raw	32,11	0,00	1180,20
Prob20-2.raw	31,63	0,00	1186,96
Prob20-3.raw	32,73	0,00	1153,09
Prob20-4.raw	31,86	0,00	1176,30
Prob20-5.raw	32,03	0,00	1147,74
Prob20-6.raw	32,16	0,00	1168,30
Prob20-7.raw	31,95	0,00	1177,14
Prob20-8.raw	32,07	0,00	1130,79
Prob20-9.raw	28,16	0,00	1069,58
Prob21-1.raw	34,13	0,00	1226,53
Prob21-2.raw	34,39	0,00	1257,98
Prob21-3.raw	35,26	0,00	1275,89
Prob21-4.raw	34,22	0,00	1230,58
Prob21-5.raw	33,10	0,00	1255,56
Prob21-6.raw	35,06	0,00	1229,29
Prob21-7.raw	34,00	0,00	1247,00
Prob21-8.raw	34,55	0,00	1269,43
Prob21-9.raw	32,37	0,00	1229,36
Prob22-1.raw	36,81	0,00	1414,31

Prob22-2.raw	36,74	0,00	1389,76
Prob22-3.raw	36,19	0,00	1350,70
Prob22-4.raw	35,73	0,00	1396,40
Prob22-5.raw	36,10	0,00	1370,49
Prob22-6.raw	38,11	0,00	1395,20
Prob22-7.raw	37,57	0,00	1429,26
Prob22-8.raw	36,60	0,00	1409,48
Prob22-9.raw	32,15	0,00	1220,43
Prob23-1.raw	55,24	0,00	1763,17
Prob23-2.raw	58,82	0,00	1837,81
Prob23-3.raw	54,30	0,00	1688,46
Prob23-4.raw	54,81	0,00	1732,20
Prob23-5.raw	54,22	0,00	1737,71
Prob23-6.raw	54,32	0,00	1751,90
Prob23-7.raw	56,65	0,00	1764,20
Prob23-8.raw	60,21	0,00	1790,07
Prob23-9.raw	40,52	0,00	1613,02
Prob24.raw	26,30	0,00	983,22
Prob24Bis.raw	25,13	0,00	931,49
Prob25-1.raw	32,35	0,00	1181,67
Prob25-2.raw	32,89	0,00	1226,41
Prob25-3.raw	28,85	0,00	1119,06
Prob25-4.raw	30,72	0,00	1222,19
Prob25-5.raw	32,67	0,00	1221,07
Prob25-6.raw	31,78	0,00	1189,71
Prob25-7.raw	32,65	0,00	1220,26
Prob25-8.raw	31,86	0,00	1174,41
Prob25-9.raw	26,53	0,00	1134,24
Prob27-1.raw	33,77	0,00	1217,09
Prob27-2.raw	31,95	0,00	1171,98
Prob27-3.raw	33,61	0,00	1211,87
Prob27-4.raw	31,47	0,00	1176,55
Prob27-5.raw	32,44	0,00	1181,23
Prob27-6.raw	32,83	0,00	1178,93
Prob27-7.raw	33,25	0,00	1188,42
Prob27-8.raw	33,70	0,00	1196,09
Prob27-9.raw	24,03	0,00	994,86
Prob34-1.raw	31,48	0,00	1179,23
Prob34-2.raw	28,64	0,00	1078,43
Prob34-3.raw	27,93	0,00	1113,24
Prob34-4.raw	31,19	0,00	1158,10
Prob34-5.raw	29,61	0,00	1133,43
Prob34-6.raw	31,25	0,00	1133,59
Prob34-7.raw	29,69	0,00	1177,98
Prob34-8.raw	30,32	0,00	1135,39
Prob34-9.raw	27,08	0,00	1028,26

Prob35-1.raw	31,64	0,00	1196,29
Prob35-2.raw	31,70	0,00	1206,24
Prob35-3.raw	30,07	0,00	1186,67
Prob35-4.raw	30,35	0,00	1179,52
Prob35-5.raw	28,70	0,00	1146,00
Prob35-6.raw	31,48	0,00	1169,92
Prob35-7.raw	30,72	0,00	1171,71
Prob35-8.raw	32,61	0,00	1232,13
Prob35-9.raw	23,40	0,00	1007,30
Prob37-1.raw	31,78	0,00	1194,88
Prob37-2.raw	28,80	0,00	1159,28
Prob37-3.raw	28,66	0,00	1132,77
Prob37-4.raw	27,36	0,00	1129,01
Prob37-5.raw	28,93	0,00	1171,39
Prob37-6.raw	28,07	0,00	1144,07
Prob37-7.raw	30,18	0,00	1194,86
Prob37-8.raw	28,93	0,00	1165,46
Prob37-9.raw	16,61	0,00	793,15
Prob39-1.raw	28,76	0,00	1093,67
Prob39-2.raw	30,89	0,00	1185,13
Prob39-3.raw	31,54	0,00	1141,28
Prob39-4.raw	32,82	0,00	1164,74
Prob39-5.raw	30,75	0,00	1207,41
Prob39-6.raw	30,76	0,00	1213,36
Prob39-7.raw	33,33	0,00	1217,34
Prob39-8.raw	30,65	0,00	1144,86
Prob39-9.raw	28,57	0,00	1077,95
Prob41-10.raw	17,00	0,00	916,47
Prob41-2.raw	9,39	0,00	924,37
Prob41-3.raw	9,73	0,00	623,01
Prob41-4.raw	11,66	0,00	657,90
Prob41-5.raw	7,28	0,00	777,28
Prob41-6.raw	9,19	0,00	818,84
Prob41-7.raw	10,09	0,00	990,48
Prob41-8.raw	8,69	0,00	887,16
Prob41-9.raw	15,03	0,00	841,21
Prob42-1.raw	30,78	0,00	1206,73
Prob42-2.raw	30,01	0,00	1201,22
Prob42-3.raw	28,42	0,00	1115,43
Prob42-4.raw	30,31	0,00	1224,39
Prob42-5.raw	30,55	0,00	1177,29
Prob42-6.raw	29,95	0,00	1178,69
Prob42-7.raw	30,02	0,00	1227,27
Prob42-8.raw	30,34	0,00	1215,27
Prob42-9.raw	29,64	0,00	1267,14
Prob43-1.raw	25,79	0,00	1346,97

Prob43-2.raw	24,61	0,00	1197,96
Prob43-3.raw	24,83	0,00	1237,54
Prob43-4.raw	23,39	0,00	1144,36
Prob43-5.raw	24,40	0,00	1165,32
Prob43-6.raw	23,65	0,00	1186,11
Prob43-7.raw	24,60	0,00	1088,62
Prob43-8.raw	22,64	0,00	1176,18
Prob44-1.raw	22,19	0,00	1010,85
Prob44-2.raw	21,12	0,00	942,08
Prob44-3.raw	17,00	0,00	1020,24
Prob44-4.raw	16,59	0,00	1091,53
Prob44-5.raw	19,40	0,00	1024,15
Prob44-6.raw	18,40	0,00	894,09
Prob44-7.raw	21,36	0,00	1007,84
Prob44-8.raw	18,39	0,00	1031,23
Prob45-1.raw	9,01	0,00	832,78
Prob45-2.raw	13,10	0,00	899,28
Prob45-3.raw	12,02	0,00	0,00
Prob45-4.raw	14,20	0,00	823,59
Prob45-5.raw	9,46	0,00	0,00
Prob45-6.raw	12,50	0,00	749,20

A2: Configuración aplicada al Slicer

Altura de la capa

- Altura de la capa: mm
- Altura de la primera capa: mm

Carcasas verticales

- Perímetros: (mínimo)
- Modo vaso: ☐

Espesor de pared delgada del objeto recomendado para una altura de capa 0.20 y 2 líneas: 0.86 mm , 4 líneas: 1.67 mm

Carcasas horizontales

- Capas sólidas: Superior: Inferior:
- Espesor mínimo de pared: Superior: mm Inferior: mm

La carcasa superior es de 1.2 mm de espesor con una altura de capa de 0.2 mm. El espesor mínimo de la carcasa superior es 0.7 mm.
La carcasa inferior es 0.8 mm más grueso para la altura de capa de 0.2 mm. El espesor mínimo de la carcasa inferior es 0.5 mm.

Calidad (laminado más lento)

- Perímetros adicionales si es necesario: ☐
- Asegurar el espesor de la carcasa vertical: ☒
- Evita cruzar perímetros: ☐
- Evitar cruzar perímetros - Longitud máxima del desvío: mm or % (cero para deshabilitar)
- Detecta paredes delgadas: ☐
- Puentes gruesos: ☐
- Detectar perímetros con puentes: ☒

Avanzado

- Posición de la costura:
- Perímetros externos primero: ☐
- Rellenar huecos: ☒
- Generador de perímetros:

Piel difusa (experimental)

- Piel Difusa:
- Espesor de la piel difusa: mm
- Distancia del punto de piel difusa: mm

Altura de la capa

- Altura de la capa: mm
- Altura de la primera capa: mm

Carcasas verticales

- Perímetros: (mínimo)
- Modo vaso: ☐

Espesor de pared delgada del objeto recomendado para una altura de capa 0.20 y 2 líneas: 0.86 mm , 4 líneas: 1.67 mm

Carcasas horizontales

- Capas sólidas: Superior: Inferior:
- Espesor mínimo de pared: Superior: mm Inferior: mm

La carcasa superior es de 1.2 mm de espesor con una altura de capa de 0.2 mm. El espesor mínimo de la carcasa superior es 0.7 mm.
La carcasa inferior es 0.8 mm más grueso para la altura de capa de 0.2 mm. El espesor mínimo de la carcasa inferior es 0.5 mm.

Calidad (laminado más lento)

- Perímetros adicionales si es necesario: ☐
- Asegurar el espesor de la carcasa vertical: ☒
- Evita cruzar perímetros: ☐
- Evitar cruzar perímetros - Longitud máxima del desvío: mm or % (cero para deshabilitar)
- Detecta paredes delgadas: ☐
- Puentes gruesos: ☐
- Detectar perímetros con puentes: ☒

Avanzado

- Posición de la costura:
- Perímetros externos primero: ☐
- Rellenar huecos: ☒
- Generador de perímetros:

Piel difusa (experimental)

- Piel Difusa:
- Espesor de la piel difusa: mm
- Distancia del punto de piel difusa: mm

Falda

- Bucles (mínimo):
- Distancia del borde/objeto: mm
- Altura de la falda: capas
- Escudo de protección:
- Longitud mínima de filamento extruido: mm

Balsa

- Tipo de balsa:
- Ancho de la balsa: mm
- Hueco de separación del borde: mm

Material de soporte

- Generar material de soporte: ☐
- Soportes generados automáticamente: ☒
- Umbral de voladizos: °
- Forzar soportes para la primera: capas
- Densidad de la primera capa: %
- Expansión de la primera capa: mm

Balsa

- Capas de balsa: capas
- Distancia Z de contacto de la balsa: mm
- Expansión de la balsa: mm

Relleno

- Densidad de relleno: %
- Patrón de relleno:
- Longitud del relleno del anclaje: mm o %
- Máxima longitud del relleno del anclaje: mm o %
- Patrón de relleno superior:
- Patrón de relleno inferior:

Alisado

- Activar alisado: ☐
- Tipo de alisado:
- Tasa de flujo: %
- Separación entre pasadas de alisado: mm

Reduciendo el tiempo de impresión

- Combinar el relleno cada: capas
- Solo rellenar cuando sea necesario: ☐

Avanzado

- Relleno sólido cada: capas
- Ángulo de relleno: °
- Área del umbral de relleno sólido: mm²
- Ángulo de puente: °
- Solo retraer al cruzar perímetros: ☐
- Rellenar antes que los perímetros: ☐

Opciones de material de soporte y balsa

- Estilo:
- Distancia Z de contacto superior: mm
- Distancia Z de contacto inferior: mm
- Patrón:
- Con protección alrededor del soporte: ☐
- Separación entre patrones: mm
- Ángulo del patrón: °
- Radio de cierre: mm
- Capas de la interfaz superior: capas
- Capas de la interfaz inferior: capas
- Patrón de interfaz:
- Separación de patrón de interfaz: mm
- Bucles de interfaz: ☐
- Soporte en la base solamente: ☐
- Separación XY entre un objeto y su soporte: mm o %
- No soportar puentes: ☐
- Sincronizar con las capas del objeto: ☐

Velocidad para movimientos de impresión

● Perímetros:	● ●	<input type="text" value="45"/>	mm/s
● Perímetros pequeños:	● ●	<input type="text" value="25"/>	mm/s o %
● Perímetros externos:	● ●	<input type="text" value="25"/>	mm/s o %
● Relleno:	● ●	<input type="text" value="80"/>	mm/s
● Relleno sólido:	● ●	<input type="text" value="80"/>	mm/s o %
● Relleno sólido superior:	● ●	<input type="text" value="40"/>	mm/s o %
● Material de soporte:	● ●	<input type="text" value="50"/>	mm/s
● Interfaz del material de soporte:	● ●	<input type="text" value="80%"/>	mm/s o %
● Puentes:	● ●	<input type="text" value="25"/>	mm/s
● Relleno del hueco:	● ●	<input type="text" value="40"/>	mm/s
● Alisado:	● ●	<input type="text" value="15"/>	mm/s

Velocidad para movimientos sin impresión

● Recorrido:	● ●	<input type="text" value="120"/>	mm/s
● Recorrido en Z:	● ●	<input type="text" value="12"/>	mm/s

Modificadores

● Velocidad de la primera capa:	● ●	<input type="text" value="20"/>	mm/s o %
● Velocidad de la primera capa del objeto sobre la interfaz de la balsa:	● ●	<input type="text" value="30"/>	mm/s o %

Control de aceleración (avanzado)

● Perímetros externos:	● ●	<input type="text" value="0"/>	mm/s ²
● Perímetros:	● ●	<input type="text" value="800"/>	mm/s ²
● Relleno sólido superior:	● ●	<input type="text" value="0"/>	mm/s ²
● Relleno sólido:	● ●	<input type="text" value="0"/>	mm/s ²
● Relleno:	● ●	<input type="text" value="1000"/>	mm/s ²
● Puente:	● ●	<input type="text" value="1000"/>	mm/s ²
● Primera capa:	● ●	<input type="text" value="800"/>	mm/s ²
● Primera capa de objetos sobre la interfaz de la balsa:	● ●	<input type="text" value="0"/>	mm/s ²
● Por defecto:	● ●	<input type="text" value="1000"/>	mm/s ²

Velocidad automática (avanzado)

● Velocidad máxima de impresión:	● ●	<input type="text" value="120"/>	mm/s
● Velocidad volumétrica máxima:	● ●	<input type="text" value="0"/>	mm ³ /s

Ecualizador de presión (experimental)

● Máx. Pendiente volumétrica positiva:	● ●	<input type="text" value="0"/>	mm ³ /s ²
● Máx. Pendiente volumétrica negativa:	● ●	<input type="text" value="0"/>	mm ³ /s ²