

EFFECTO DE LA DENSIDAD DE RELLENO SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE PIEZAS DE PLA 3D850 FABRICADAS POR IMPRESIÓN 3D MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

Laura María Cabrera Martín, Fernando Rivera López

Departamento de Ingeniería Industrial, Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología, Universidad de La Laguna, San Cristóbal de La Laguna, Apdo. 456, Santa Cruz de Tenerife, E-38200, España
lauramcabreramartin@gmail.com; frivera@ull.es

Resumen: El enfoque de este trabajo es indagar sobre el comportamiento de un polímero de Ácido Poliláctico o PLA (siglas referidas al inglés *Polylactic Acid*), en concreto, el PLA 3D850 en la Fabricación Aditiva. El material de este filamento es de especial interés por su capacidad de imprimir piezas de alta resolución y con formas complejas a una velocidad mayor que otros similares. Además, es biodegradable y no sufre contracción térmica. En concreto, se quiere averiguar si utilizando el filamento de PLA 3D850, y distintas densidades de relleno, existen diferencias en las propiedades mecánicas de piezas de la misma geometría. Para ello, se fabricarán piezas normalizadas según las normas UNE-EN ISO 178, UNE-EN ISO 527 y UNE-EN ISO 604, con variaciones en la densidad de relleno, y se someterán a pruebas mecánicas para determinar cómo afecta esta variable a las características mecánicas.

Palabras clave: impresión, 3D, fabricación, aditiva, PLA, ácido, poliláctico, filamento.

1. INTRODUCCIÓN.

La Fabricación Aditiva o AM [1] (siglas referidas al inglés *Additive Manufacturing*), también denominada impresión 3D, es una tecnología en desarrollo que ha revolucionado la forma en que se diseñan y fabrican productos. Este tipo de técnica permite la creación de objetos tridimensionales mediante la adición sucesiva de capas de material, utilizando menos materia prima y generando menos residuos que otras formas tradicionales de fabricación.

Entre las tecnologías de AM disponibles, cabe destacar el Modelado por Deposición Fundida o FDM (siglas referidas al inglés *Fused Deposition Modeling*). En FDM se parte de un objeto o idea, y se diseña un modelo virtual mediante un software de Diseño Asistido por Ordenador o CAD, (siglas referidas al inglés *Computer Assisted Design*); el cual se segmenta digitalmente en múltiples capas en el plano horizontal. A partir de este escaneo, los segmentos y datos de las coordenadas del modelo virtual en 3D son utilizados para controlar los motores responsables de posicionar con precisión la boquilla del sistema de extrusión, que deposita el material capa a capa hasta conseguir el producto deseado.

2. OBJETIVO.

Este trabajo tiene como objetivo estudiar el cambio en las propiedades mecánicas de piezas impresas mediante FDM al variar la densidad de relleno.

3. SMARTFIL®PLA 3D850.

El material empleado para la fabricación de las probetas es el SMARTFIL®PLA 3D850 desarrollado por la empresa NatureWorks. En su ficha técnica se presenta como un PLA mejorado, biodegradable y sin contracción

térmica, con propiedades mecánicas y térmicas más altas que un PLA estándar.

Tabla 1. Parámetros del PLA 3D850 del fabricante.

Densidad (g/cm ³)	1,24
Temperatura de impresión (°C)	205 - 220
Temperatura de la cama (°C)	40 - 60
Altura de la capa (mm)	≥ 0,1
Recomendaciones de boquilla (mm)	≥ 0,2

4. DISEÑO DE LAS PROBETAS.

Con el fin de determinar las propiedades mecánicas del filamento PLA 3D850, se ha de llevar a cabo el mismo ensayo repetidas veces y en las mismas condiciones. Se opta, por lo tanto, por fabricar probetas normalizadas según las normas UNE-EN ISO 178 [2], UNE-EN ISO 527 [3] y UNE-EN ISO 604 [4], que corresponden a los ensayos de flexión, tracción y compresión, respectivamente. Esto, junto con la repetitividad de las condiciones de los experimentos, asegura que las discrepancias obtenidas entre los distintos ensayos sean debido a la única variable que cambia en todo el proceso: la densidad de relleno.

La densidad de relleno es el porcentaje de material del interior de una pieza impresa en 3D con respecto al volumen interior total. Los cambios en la densidad de relleno afectan a la resistencia, peso, rigidez y tiempo de impresión de la pieza. Una menor densidad de relleno supone un menor consumo de materia prima, pero puede afectar de forma negativa a las características mecánicas de las piezas, por lo que debe combinarse adecuadamente con el patrón de relleno para optimizar la relación entre ambos parámetros.

El proceso de diseño comienza creando un modelo 3D de cada tipo de probeta mediante el programa Autodesk Fusion. Esta representación tridimensional se transfiere al laminador de la impresora, en este caso el Bambu Studio, donde se reproduce hasta tener seis probetas. El programa cuenta con una vista previa de la placa de impresión, de tal manera que las probetas pueden distribuirse a lo largo de la superficie de impresión de la forma que se desee (Figura 1).

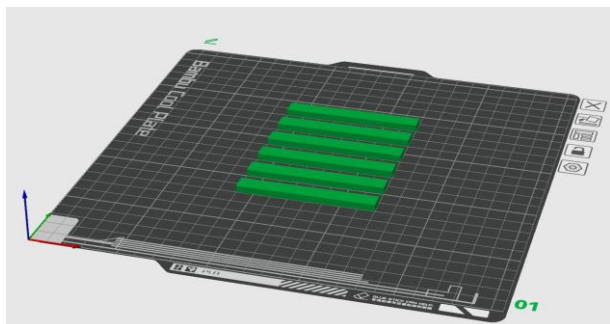


Figura 1. Probetas de flexión en el laminador Bambu Studio.

A fines comparativos, todas las probetas han sido fabricadas con los mismos parámetros de impresión.

- Altura de la capa:
 - Altura de capa (mm): 0,2
- Capas superiores/inferiores:
 - Patrón de la superficie superior: rectilíneo alineado.
 - Capas superiores de la cubierta: 1
 - Espesor de la cubierta (mm): 0
 - Patrón de la superficie inferior: rectilíneo alineado.
 - Capas inferiores de cubierta: 1
 - Patrón interno de relleno sólido: rectilíneo alineado.
- Relleno:
 - Dirección del relleno: 45°
- Velocidad de la capa inicial:
 - Capa inicial (mm/s): 50
 - Relleno de la capa inicial (mm/s): 105
- Velocidad de otras capas:
 - Pared exterior (mm/s): 200
 - Pared interior (mm/s): 300
- Velocidad de desplazamiento:
 - Recorrido (mm/s): 500
- Boquilla de la extrusora:
 - Diámetro (mm): 0,4

Puesto que el objetivo es determinar la influencia de la densidad de relleno sobre las propiedades mecánicas de las piezas, se han impreso cinco series de seis probetas cada una. Estas cinco series, numeradas del 1 al 5, corresponden a densidades de relleno del 99, 80, 60, 40 y 20% respectivamente. Nótese que el patrón de relleno utilizado no permite una densidad del 100%, por eso se ha utilizado el 99% en su lugar. En total se han fabricado 90 probetas.

La elección de la cantidad de probetas en cada serie se ha hecho en base a las normas anteriormente mencionadas, las cuales especifican que se deben testar al menos cinco probetas en cada ensayo. En este caso se han impreso y ensayado seis, por si la integridad de alguna de las piezas se viera afectada. Las normas también sugieren que las probetas se ensayen siempre orientadas en la misma dirección, con el fin de evitar los efectos de cualquier asimetría generada en el proceso de fabricación.

5. FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS.

La impresora utilizada para fabricar las probetas es la Bambu Lab X1-Carbon, diseñada para permitir impresiones de alta velocidad sin sacrificar la calidad de impresión. El proceso de fabricación de las probetas es independiente de la geometría de estas, es decir, el procedimiento es igual independientemente si las probetas son de flexión, tracción o compresión. Tanto la temperatura de extrusión como la de la cama de impresión se han escogido en función de la Ficha Técnica del PLA 3D850. Se ha decidido que las temperaturas sean 200 °C para la extrusora y 55 °C para la cama de impresión.

Para garantizar la adherencia de las piezas a la cama de impresión, la primera capa se realiza a una velocidad menor y se lleva a cabo un control y análisis automático de dicha capa. Comprobado que no se hayan detectado errores en el análisis, se procede a la impresión del resto de capas (Figura 2).

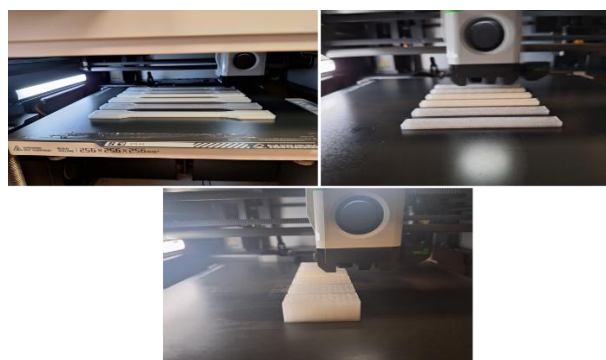


Figura 2. Impresión de las probetas para los ensayos.

6. ENSAYOS MECÁNICOS.

La máquina Universal de Ensayos utilizada para la obtención de las propiedades mecánicas es la Shimadzu Autograph. Posee un sistema que permite cambiar la célula de carga según las necesidades de los ensayos a llevar a cabo, con una capacidad de hasta 50 kN. La máquina es controlada por ordenador mediante el programa del propio distribuidor, Trapezium.

Para los tres tipos de ensayos se ha empleado una velocidad de ensayo de 1 mm/min y se han cambiado las células de cargas y los dispositivos adecuados para cada tipo de prueba. Para los ensayos de flexión se ha empleado una célula de carga de 5 kN, mientras que para los ensayos de tracción y compresión se ha utilizado una célula de 50 kN. En la Figura 3 se muestran imágenes que corresponden a los ensayos realizados.



Figura 3. Ensayos mecánicos de flexión, tracción y compresión respectivamente.

7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE FLEXIÓN.

En la Figura 4 se presentan las curvas de fuerza (F)-desplazamiento (s) obtenidas, mostrando en una misma gráfica un ensayo de cada Serie, pudiendo así obtener una vista global del efecto del porcentaje de relleno sobre las propiedades de flexión de las probetas.

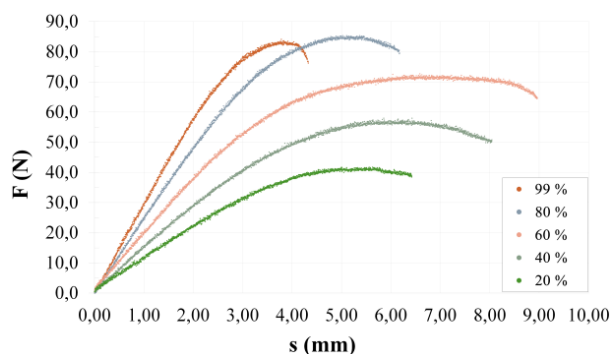


Figura 4. Curvas F-s de cada una de las Series.

A partir de estas curvas es posible determinar el Módulo de Ruptura y el Módulo de Flexión, los cuales se explican a continuación.

El Módulo de Ruptura o MOR, (siglas referidas al inglés *Modulus of Rupture*), es un parámetro que caracteriza la resistencia máxima de un material cuando se somete a una carga de flexión. Se expresa mediante la ecuación:

$$\text{MOR} = \frac{3 \cdot F_{\text{max}} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (1)$$

El Módulo de Flexión o Módulo de Elasticidad en flexión (E_f), mide la rigidez de un material cuando se dobla.

$$E_f = \frac{L^3 \cdot m}{4 \cdot w \cdot h^3} \quad (2)$$

En la Figura 5, se muestran los resultados de ambos parámetros para las 5 series ensayadas. En dicha figura, se aprecia una tendencia lineal de ambos parámetros: a mayor densidad de relleno, mayor MOR y E_f . Sin embargo, en el caso del MOR, la Serie 1 (correspondiente al 99% de relleno) no sigue esta tendencia, lo cual podría deberse a un fallo en la fabricación o en el ensayo de las probetas. Por otra parte, para la Serie 1, el E_f se encuentra dentro del rango esperado para piezas fabricadas con PLA (entre 2392-4930 MPa). Por el contrario, el E_f es

muy inferior a lo especificado en la Ficha Técnica del producto (aproximadamente 2540 MPa frente a unos 3300 MPa, respectivamente).

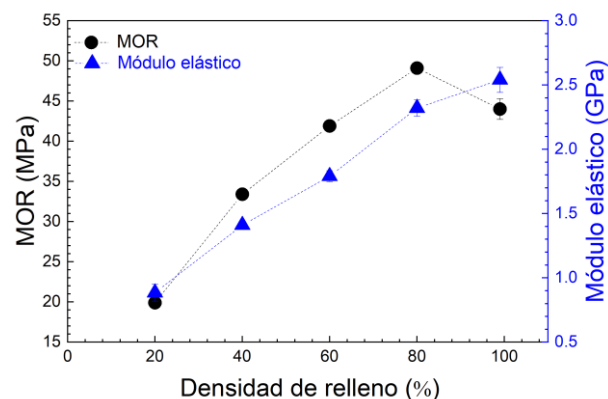


Figura 5. Comparación del MOR y E_f obtenidos para las 5 series.

8. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN.

La Figura 6 muestra una representación de las curvas de tensión (σ_t)-deformación (ϵ_t) para cada Serie de los ensayos de tracción.

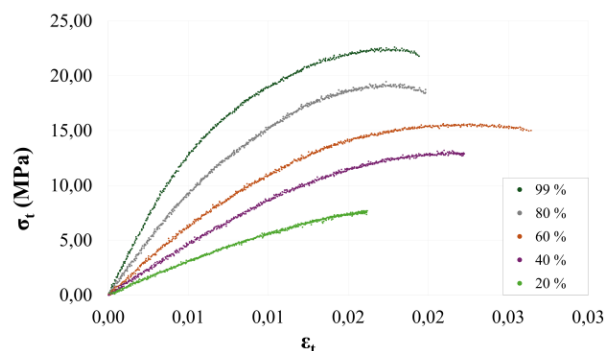


Figura 6. Curvas σ - ϵ de cada una de las Series.

A partir de las gráficas es posible determinar el Esfuerzo del Límite Elástico, la Resistencia a la Tracción y el Módulo de Young, explicados a continuación.

El Esfuerzo del Límite Elástico (σ_y), por definición, es el esfuerzo máximo que puede soportar un material sin sufrir deformaciones permanentes. Es decir, si se aplicase un esfuerzo mayor a este límite, el material alcanzaría un comportamiento plástico con deformaciones irreversibles. Dado que identificar con precisión este punto puede ser complicado, se utiliza un criterio convencional que especifica que el Límite Elástico es la tensión correspondiente a una deformación específica previamente establecida, normalmente, del 0,2 %.

La Resistencia a la Tracción (σ_m) es el esfuerzo máximo recogido durante el ensayo de tracción.

El Módulo de Young o Módulo de Elasticidad en tracción (E_t), es la pendiente de la curva esfuerzo-deformación en

el intervalo de deformación comprendido entre 0,05 y 0,25%.

Los resultados obtenidos (Figura 7) muestran que tanto el σ_y y como la σ_m presentan una tendencia lineal creciente: a mayor densidad de relleno, mayor es el valor de estos parámetros. En el caso del σ_y puede deberse a que un mayor porcentaje de relleno supone una mayor sección a través de la cual distribuir la tensión de manera uniforme, retrasando el punto en el que la deformación se vuelve plástica. Por otro lado, en el caso de la σ_m puede deberse a que una mayor cantidad de huecos conlleva más puntos críticos donde se pueden iniciar fracturas, haciendo que la zona de deformación reversible se vea reducida. Los resultados obtenidos para el E_t se ajustan a una curva exponencial directamente proporcional a la densidad de relleno. Cabe destacar que para la Serie 1, el E_t concuerda con lo especificado con la Ficha Técnica de la materia prima (2760 MPa frente a unos 2636 MPa, respectivamente).

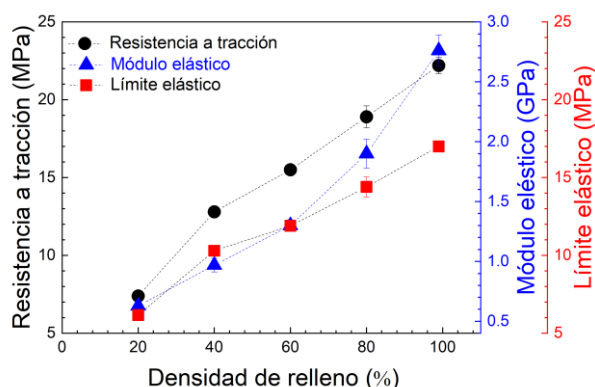


Figura 7. Comparación del σ_y , σ_m , y E_t obtenidos para las 5 series.

8. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN.

La Figura 8 muestra una representación de las curvas de tensión (σ_c)-deformación (ϵ_c) de las 5 Series ensayadas a compresión.

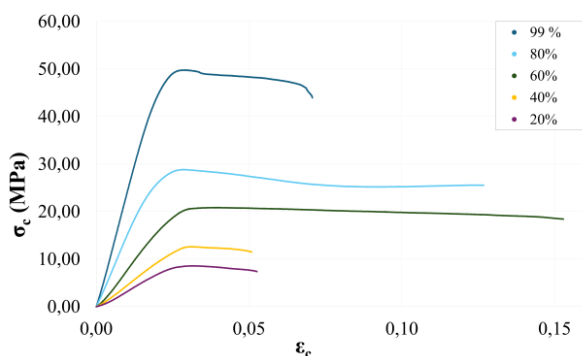


Figura 8. Curvas σ - ϵ de cada una de las Series.

A partir de los datos de tensión-deformación obtenidos durante los ensayos, es posible determinar el Esfuerzo de Elasticidad en compresión y la Resistencia a la Compresión, detallados a continuación.

El Módulo de Elasticidad en compresión (E_c) se calcula de forma análoga al E_t en tracción. Su valor se determina normalmente como el valor de la pendiente en el intervalo de deformación comprendido entre el 0,05 y 0,25%, pero debido a que no hay datos suficientes en ese intervalo, se toma el intervalo entre el 0,15 y el 0,25%.

La Resistencia a la Compresión (σ_m) es el esfuerzo máximo soportado durante el ensayo de compresión.

Atendiendo a la Figura 9, se puede comprobar cómo a medida que aumenta la densidad de relleno ambos parámetros aumentan siguiendo una tendencia exponencial.

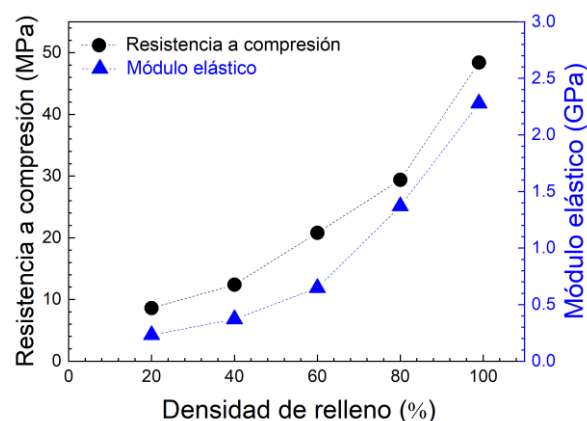


Figura 9. Comparación del E_c y σ_m obtenidos para las 5 series.

9. CONCLUSIONES.

Las propiedades mecánicas de las probetas impresas con PLA 3D850 están íntimamente relacionadas con la densidad de relleno, especialmente en el caso de los módulos elásticos. Por lo general, a mayor módulo elástico, mejor características mecánicas. También, se observa que, respecto a las tensiones de tracción, cuanto menos densidad de relleno menor es el límite elástico y la resistencia a la tracción. Por último, cabe destacar que, en compresión, al aumentar la densidad de relleno se consigue una mayor resistencia a la compresión y un aumento del módulo de elasticidad.

10. AGRADECIMIENTOS.

Parte de este trabajo ha sido financiado por el Proyecto ProID2024010034 de la Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información (ACIISI) y por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional en el marco del programa FEDER Canarias 2021-2027.

11. REFERENCIAS

- [1] Grimm, T. Users Guide to Rapid Processing; SME, 2004.
- [2] UNE-EN ISO 178. 2020. Plásticos. Determinación de Las Propiedades de Flexión.
- [3] UNE-EN ISO 527-1. 2020. Plásticos. Determinación de Las Propiedades de Tracción.
- [4] UNE-EN ISO 604 Plásticos. Determinación de Las Propiedades En Compresión.