



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA**



**Uso de microondas para el post tratamiento de piezas 3D impresas con FDM**

POR

**Paz Carolina Ortiz Contreras**

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniera Civil Mecánica.

Profesor Guía:  
Doctor Carlos Medina Muñoz

Enero 2025  
Concepción (Chile)

© 2025 Paz Carolina Ortiz Contreras

© 2025 Paz Carolina Ortiz Contreras

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

## Agradecimientos

Quiero comenzar agradeciendo a mis padres, quienes han sido mi mayor motivación para convertirme en una persona disciplinada y estudiosa. Gracias por confiar en mí y en las decisiones que tomé para construir mi futuro. Sin su apoyo y respaldo, no habría podido ser parte de esta hermosa universidad, que tanto significa para mí.

Agradezco también a mis amigos y compañeros, quienes hicieron de este camino una experiencia inolvidable. En especial, quiero mencionar a mis compañeros del Centro de Alumnos 2024, con quienes logramos formar un equipo inigualable. Gracias por las risas, los aprendizajes compartidos y las experiencias que enriquecieron profundamente mi paso por la universidad. Estoy segura de que serán los ingenieros más íntegros que cualquier proyecto pueda tener.

A mi querida amiga Ángela, mi máxima compañera en esta carrera. Gracias por estar siempre, por acompañarme en todo momento, y por la conexión tan especial que logramos, al punto de mimetizarnos básicamente e incluso sacar exactamente las mismas notas. Conocerla ha sido uno de los mayores regalos que esta etapa me ha dado.

Por último, pero no menos importante, agradezco a Dios por su guía constante, por darme las herramientas necesarias para construir el futuro que estoy formando y por llenar mi vida de bendiciones a lo largo de este camino.

## Resumen

En este trabajo se estudia cómo los tratamientos térmicos, aplicados mediante horno y microondas, afectan las propiedades mecánicas y estructurales de probetas de PLA impresas en 3D. En particular, se consideran probetas fabricadas siguiendo orientaciones específicas de impresión ( $0^\circ$  y  $90^\circ$ ) para evaluar el impacto de la anisotropía generada por el proceso de manufactura aditiva.

Uno de los aspectos clave es la comparación de probetas sin tratamiento térmico con las tratadas en horno ( $90^\circ\text{C}$  por 4 horas) y microondas (a 800 W hasta alcanzar aproximadamente  $90^\circ\text{C}$ ). Estas condiciones reflejan procesos de calentamiento uniformes y rápidos, respectivamente, mostrando diferencias en la cristalización, contracción y redistribución de fibras del PLA.

El estudio incluye ensayos de tracción para medir el desempeño mecánico, acompañado de análisis microscópicos que permiten observar los cambios en la morfología y las fracturas posteriores a la carga. Asimismo, se analiza cómo los tratamientos térmicos modifican las dimensiones y la forma de las probetas debido a la relajación de tensiones internas y a la reorganización molecular del material.

Los resultados muestran que en las probetas orientadas a  $90^\circ$ , el tratamiento térmico en horno incrementó el esfuerzo máximo en un 14,68% respecto a las sin tratamiento, mientras que el tratamiento con microondas produjo un aumento del 8,16%. Para las probetas con orientación a  $0^\circ$  el tratamiento en horno aumentó el esfuerzo máximo en un 9,75%, y el tratamiento con microondas un 6,39%. Además, ambos tratamientos térmicos incrementaron la deformación máxima, mejorando la capacidad del material para deformarse antes de la fractura.

Las microscopías obtenidas evidencian una disminución significativa en la porosidad de las muestras tratadas térmicamente. Las probetas sin tratamiento presentaron un porcentaje de porosidad promedio del 7,40%, asociado a las condiciones iniciales del material debido a la impresión 3D. En contraste, el tratamiento térmico en horno reduce la porosidad a un 4,94%, mientras que el tratamiento con microondas logra una reducción aún mayor, alcanzando un promedio de 3,93%.

Estos resultados confirman que los tratamientos térmicos, además de redistribuir tensiones internas y mejorar la compactación del material, contribuyen significativamente a optimizar sus propiedades mecánicas y estructurales.

## Abstract

This research aims to understand how thermal treatments, applied through an oven and microwave, affect the mechanical and structural properties of 3D-printed PLA specimens. These specimens were manufactured following specific printing orientations ( $0^\circ$  and  $90^\circ$ ) to evaluate the impact of anisotropy generated by the additive manufacturing process.

One of the key aspects is the comparison of untreated specimens with those treated in an oven ( $90^\circ\text{C}$  for 4 hours) and microwave (at 800 W until approximately  $90^\circ\text{C}$ ). These conditions reflect uniform and fast heating processes, respectively, showing differences in crystallization, contraction, and fiber redistribution in the PLA.

The study includes tensile tests to measure mechanical performance, accompanied by microscopic analysis to observe changes in morphology and fractures after load. Additionally, the research examines how thermal treatments modify the dimensions and shape of the specimens due to the relaxation of internal stresses and molecular rearrangement of the material.

The results show that, in specimens oriented at  $90^\circ$ , thermal treatment in an oven increased the maximum stress by 14,68% compared to untreated specimens, while microwave treatment resulted in an 8,16% increase. For specimens with  $0^\circ$  orientation, oven treatment increased the maximum stress by 9,75%, and microwave treatment achieved a 6,39% increase. Additionally, both thermal treatments increased the maximum strain, enhancing the material's ability to deform before fracture.

The obtained micrographs demonstrate a significant reduction in porosity for thermally treated samples. Untreated specimens exhibited an average porosity of 7,40%, associated with the material's initial conditions resulting from the 3D printing process. In contrast, oven treatment reduced porosity to 4,94%, while microwave treatment achieved an even greater reduction, reaching an average of 3,93%.

These results confirm that thermal treatments, in addition to redistributing internal stresses and improving material compaction, significantly contribute to optimizing its mechanical and structural properties.

## Contenido

|                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| Resumen .....                                                             | iii |
| Abstract .....                                                            | iv  |
| Lista de Figuras .....                                                    | vii |
| Lista de Tablas .....                                                     | vii |
| 1 Capítulo 1: Introducción.....                                           | 1   |
| 1.1 Contexto.....                                                         | 1   |
| 1.2 Objetivos generales y específicos.....                                | 1   |
| 1.3 Hipótesis .....                                                       | 1   |
| 1.4 Metodología.....                                                      | 1   |
| 2 Capítulo 2: Estado el arte .....                                        | 3   |
| 3 Capítulo 3: Materiales y métodos.....                                   | 7   |
| 3.1 Materiales .....                                                      | 7   |
| 3.1.1 PLA.....                                                            | 7   |
| 3.1.2 Impresora Creality K1 Max .....                                     | 7   |
| 3.1.3 Microondas TH-20DM .....                                            | 7   |
| 3.1.4 Cámara termográfica Flir One .....                                  | 8   |
| 3.1.5 Fabricación de probetas .....                                       | 8   |
| 3.1.6 Máquina de ensayo de materiales ProLine Z005 de Zwick Roell .....   | 10  |
| 3.1.7 Microscopio .....                                                   | 10  |
| 3.2 Métodos .....                                                         | 10  |
| 3.2.1 Pruebas de influencia del color en la absorción de microondas ..... | 10  |
| 3.2.2 Tratamiento Térmico en Microondas.....                              | 11  |
| 3.2.3 Tratamiento Térmico en Horno .....                                  | 11  |
| 3.2.4 Ensayos de tracción.....                                            | 11  |
| 3.2.5 Microscopía.....                                                    | 12  |
| 4 Capítulo 4: Resultados y discusiones .....                              | 13  |
| 4.1 Pruebas de influencia del color en la absorción de microondas .....   | 13  |
| 4.2 Proceso de tratamiento térmico .....                                  | 14  |
| 4.3 Pruebas de tracción.....                                              | 15  |
| 4.4 Microscopía .....                                                     | 17  |
| 4.4.1 Microscopía zona de fractura.....                                   | 17  |
| 4.4.2 Microscopía porosidades .....                                       | 18  |

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5 Conclusiones .....                                                                 | 22 |
| 6 Referencias .....                                                                  | 23 |
| 7 Anexo A: Carta Gantt.....                                                          | 25 |
| 8 Anexo B: Dimensiones de las probetas posterior a los tratamientos realizados. .... | 25 |
| 9 Anexo C: Resultados de ensayos de tracción.....                                    | 27 |
| 10 Anexo D: Tabla de porosidades. ....                                               | 29 |
| 11 Anexo E: Medidas porosidades.....                                                 | 30 |

## Lista de Figuras

|                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1: Resistencia media a la tracción de cada lote.....                                                                                                                                                                                                               | 4  |
| Figura 2.2: Influencia del postprocesamiento de microondas en (a) el módulo elástico, (b) la deformación en la rotura, (c) la tenacidad y (d) la resistencia máxima a la tracción en función de la orientación de la impresión y las condiciones de postprocesamiento. .... | 6  |
| Figura 3.1: Impresora Creality K1 Max. ....                                                                                                                                                                                                                                 | 7  |
| Figura 3.2: Microondas TH-20DM. ....                                                                                                                                                                                                                                        | 8  |
| Figura 3.3: Cámara termográfica Flir One. ....                                                                                                                                                                                                                              | 8  |
| Figura 3.4: Geometría de la probeta según norma ASTM D638. ....                                                                                                                                                                                                             | 9  |
| Figura 3.5: Orientación de la fibra, a) 0°, b) 90°.....                                                                                                                                                                                                                     | 9  |
| Figura 3.6: Máquina de ensayos ProLine Z005. ....                                                                                                                                                                                                                           | 10 |
| Figura 4.1: Muestras pruebas influencia de color. ....                                                                                                                                                                                                                      | 13 |
| Figura 4.2: Diferencia de largo de las probetas tratadas. ....                                                                                                                                                                                                              | 14 |
| Figura 4.3: Curva esfuerzo deformación a) Tratamiento horno. b) Tratamiento microondas. c) Sin tratamiento.....                                                                                                                                                             | 16 |
| Figura 4.4: Curva esfuerzo deformación a) Tratamiento horno. b) Tratamiento microondas. c) Sin tratamiento.....                                                                                                                                                             | 17 |
| Figura 4.5: Microscopía en zona de fractura de probetas a 90° con a) Tratamiento en horno, b) Tratamiento en microondas, c) Sin tratamiento. ....                                                                                                                           | 18 |
| Figura 4.6: Microscopía en zona de fractura de probetas a 0° con a) Tratamiento en horno, b) Tratamiento en microondas, c) Sin tratamiento. ....                                                                                                                            | 18 |
| Figura 4.7: Microscopías de porosidades a) Tratamiento con horno, b) Tratamiento con microondas, c) Sin tratamiento. ....                                                                                                                                                   | 19 |
| Figura 4.8: Medición filamentos post tratamientos.....                                                                                                                                                                                                                      | 20 |

## Lista de Tablas

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1: Lotes de recocido, sus correspondientes temperaturas y tiempos.....                                            | 3  |
| Tabla 2: Tratamiento químico y térmico con el tiempo y la temperatura resultantes en la resistencia a la tracción. .... | 4  |
| Tabla 3: Dimensiones para muestras Tipo I.....                                                                          | 9  |
| Tabla 4: Resultados observados para cada color y orientación de impresión. ....                                         | 13 |
| Tabla 5: Promedio de dimensiones de las probetas post tratamientos. ....                                                | 14 |
| Tabla 6: Promedio de resultados de esfuerzo y deformación para los distintos tratamientos en probetas a 90° y 0°. ....  | 15 |
| Tabla 7: Porcentajes de porosidad promedio para cada grupo de tratamiento. ....                                         | 19 |
| Tabla 8: Dimensiones promedio de los filamentos después de los tratamientos térmicos. ....                              | 21 |

## **Capítulo 1: Introducción**

### **1.1 Contexto**

El uso de materiales impresos en 3D, ha revolucionado diversos campos, desde la fabricación de prototipos hasta la creación de productos finales en sectores como la medicina, la ingeniería y el diseño industrial. Sin embargo, la calidad y durabilidad de estos materiales aún presentan desafíos, especialmente en lo que respecta a sus propiedades mecánicas y estructurales. Estos desafíos limitan su aplicación en entornos donde se requieren materiales con un alto rendimiento bajo diferentes condiciones de carga y temperatura.

Con el fin de mejorar las propiedades mecánicas y la resistencia térmica del filamento impreso mediante FDM, se lleva a cabo un estudio experimental en el que se emplean microondas como medio para aliviar las tensiones internas y reducir los vacíos generados durante la impresión. Este enfoque tiene como objetivo optimizar el proceso de post-tratamiento, disminuyendo tanto el tiempo necesario como el consumo de energía, en contraste con el método tradicional de recocido.

El proceso consiste en imprimir el filamento PLA en distintos colores con una impresora FDM, con el fin de evaluar cual es el color que mejor absorbe temperatura en microondas para trabajar con este y luego determinar el período de tiempo óptimo para someterlo a este tratamiento. Además, realizar tratamiento térmico utilizando un horno de convección. Posteriormente, se llevan a cabo pruebas de tracción para evaluar la mejora en las propiedades mecánicas obtenidas y compararlas entre sí.

### **1.2 Objetivos generales y específicos**

Objetivo General: Evaluar el impacto del tratamiento utilizando un microondas convencional en las propiedades mecánicas y estructurales del PLA impreso en 3D

Objetivos específicos:

- Analizar la influencia del color en la absorción de microondas.
- Comparar las propiedades mecánicas de las probetas con tratamiento térmico y sin este.
- Analizar la microestructura de probetas tratadas y no tratadas térmicamente.

### **1.3 Hipótesis**

Se prevé que el color de PLA tenga un impacto en la absorción de microondas, lo cual influirá en la distribución y la magnitud del calor generado. Esto, a su vez, provocará cambios significativos en la resistencia mecánica y la microestructura del material. Al someter las probetas a un microondas convencional, con la potencia, el tiempo de exposición y el color controlados, se espera que sus propiedades mecánicas y estructurales se vean alteradas considerablemente.

### **1.4 Metodología**

En primer lugar, se estudiará la influencia de los colores en la absorción de microondas, junto con las potencias y los tiempos necesarios para realizar los tratamientos térmicos en probetas de PLA. Se prepararán probetas de PLA en diferentes colores y se someterán a diversos niveles de potencia y

tiempos de exposición en un microondas convencional. Este análisis permitirá identificar las combinaciones óptimas de color, potencia y tiempo que maximicen la eficiencia del tratamiento térmico.

Luego, se llevarán a cabo ensayos mecánicos en las probetas tratadas tanto con horno como con microondas para evaluar las propiedades resultantes, tales como la resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad y la dureza. Estos resultados se compararán con los de probetas sin tratamiento, con el fin de cuantificar los efectos de los tratamientos sobre las propiedades mecánicas del PLA.

Finalmente, se observará la microestructura de las probetas mediante microscopía, analizando posibles cambios en la morfología y la estructura interna del material tras el tratamiento.

## Capítulo 2: Estado el arte

La impresión 3D, también conocida como manufactura aditiva, ha abierto un mundo de posibilidades dentro del diseño debido a que este tipo de procesos permite la fabricación de piezas complejas a un bajo costo, lo que ha facilitado el prototipado de piezas y la producción de productos funcionales [1].

En modelado por deposición fundida (FDM), la unión formada tiene muchos huecos entre los filamentos, y estos huecos reducen significativamente la resistencia de la pieza fabricada. Además, entre el filamento que se está imprimiendo y el filamento que ha comenzado a enfriarse después de su colocación, habrá una diferencia significativa en la temperatura [2]. Debido a esta distribución de temperatura, durante la impresión, habrá tensiones internas inducidas en la pieza, y por lo tanto hay una reducción en las propiedades mecánicas de las piezas impresas [3].

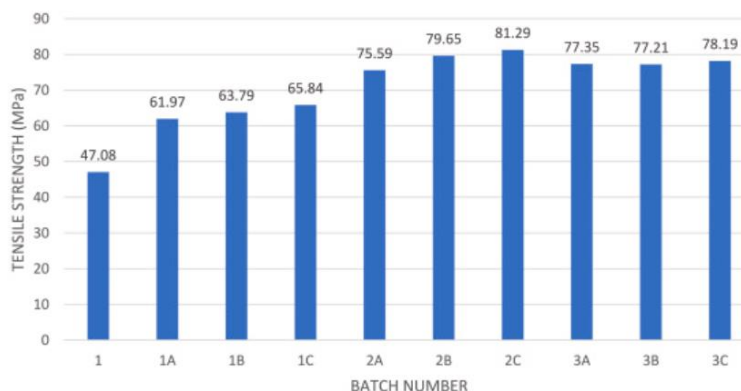
El tratamiento térmico ha sido empleado durante siglos para mejorar las propiedades mecánicas de los metales. No obstante, su aplicación no se restringe únicamente a estos materiales. Generalmente, el tratamiento térmico se utiliza para aliviar las tensiones internas que se generan durante el proceso de fabricación. En investigaciones previas [3] que realizan tratamiento térmico, seleccionan tres temperaturas para el recocido de piezas impresas en 3D: 90 °C, 100 °C y 120 °C, aplicadas durante tres periodos de tiempo diferentes: 60 min, 120 min y 240 min, nombrándolas como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1: Lotes de recocido, sus correspondientes temperaturas y tiempos.**

| Temperatura de recocido (°C) | Tiempo (min) | Nombre de la pieza |
|------------------------------|--------------|--------------------|
| 90                           | 60           | 1A                 |
|                              | 120          | 1B                 |
|                              | 240          | 1C                 |
| 100                          | 60           | 2A                 |
|                              | 120          | 2B                 |
|                              | 240          | 2C                 |
| 120                          | 60           | 3A                 |
|                              | 120          | 3B                 |
|                              | 240          | 3C                 |
| 0                            | -            | 1                  |

Se llevaron a cabo pruebas de tracción y de temperatura de distorsión térmica (HDT) para evaluar las propiedades de las muestras. Los resultados, que se presentan en la Figura 2.1, indicaron una mejora notable en las propiedades mecánicas y térmicas de las piezas recocidas en comparación con las no recocidas. Esta mejora en la resistencia a la tracción se atribuye a la reducción de huecos formados durante la impresión 3D y a la disminución de la tensión inducida por las diferencias de temperatura

durante el proceso. Además, se observó una mejora significativa en la temperatura de distorsión térmica en las muestras recocidas.



**Figura 2.1: Resistencia media a la tracción de cada lote.**

Las pruebas sugieren que el recocido a aproximadamente 100 °C durante 4 horas es la condición óptima para mejorar las propiedades mecánicas de las piezas impresas en 3D. Aunque el recocido a 120 °C también aumentó las propiedades, la mejora porcentual fue menor en comparación con las muestras recocidas a 100 °C.

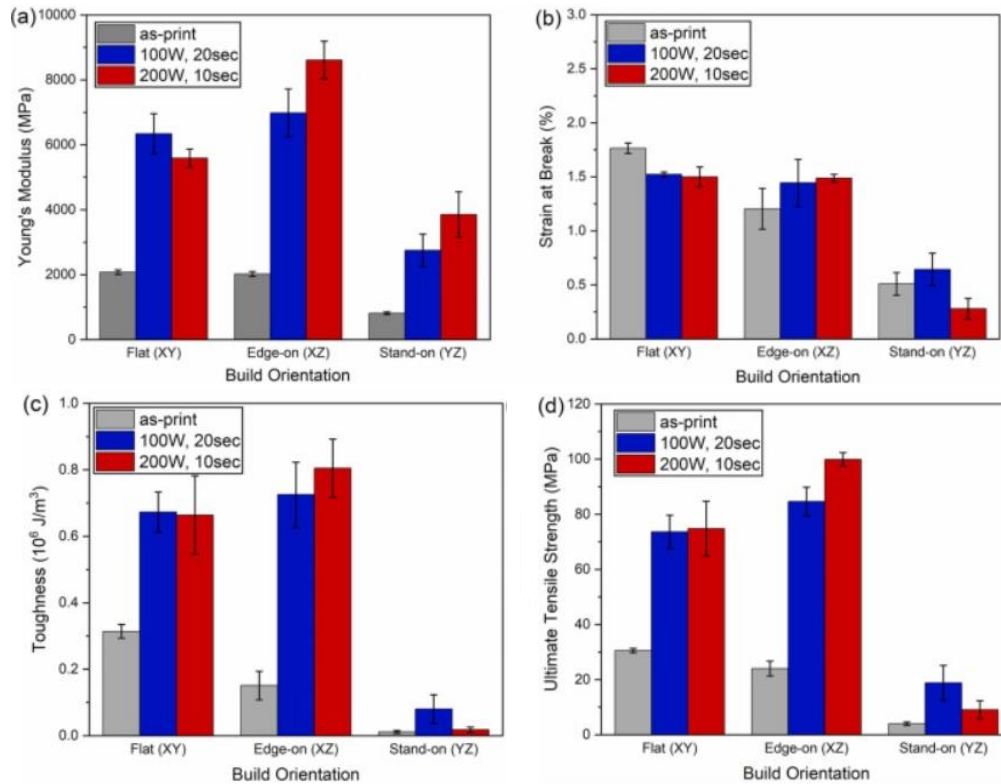
El estudio realizado por Sabio y Srinivasa (2020) propone un tratamiento químico con acetona al 100% de concentración como método para mejorar las propiedades mecánicas de materiales impresos en 3D. En este procedimiento, las muestras se sumergen en acetona durante distintos intervalos de tiempo, que van desde 60 hasta 220 segundos. La acetona, al ser absorbida por las capas superficiales e internas del material, induce una reorganización de las moléculas que cierra los huecos y mejora la unión entre ellas, fortaleciendo así el material. Sin embargo, se observó que, tras 220 segundos de inmersión, la superficie del material comenzaba a derretirse, lo cual no era deseado. Las propiedades mecánicas de las muestras fueron evaluadas en función del tiempo de inmersión. Lo anterior se compara con un tratamiento térmico convencional para analizar las propiedades mecánicas como se aprecia en la Tabla 2. [4]

**Tabla 2: Tratamiento químico y térmico con el tiempo y la temperatura resultantes en la resistencia a la tracción.**

| Tratamiento Químico |                                 | Tratamiento térmico |                  |                                 |
|---------------------|---------------------------------|---------------------|------------------|---------------------------------|
| Tiempo [s]          | Resistencia a la tracción [MPa] | Tiempo [s]          | Temperatura [°C] | Resistencia a la tracción [MPa] |
| 60                  | 70                              | 60                  | 80               | 70                              |
| 100                 | 75                              | 100                 | 100              | 72                              |
| 120                 | 80                              | 120                 | 120              | 74                              |
| 140                 | 76                              | 140                 | 140              | 65                              |
| 180                 | 64                              | 180                 | 160              | 60                              |

De esto se puede concluir que el método de tratamiento químico produce mejores resultados que el método de tratamiento térmico ya que la propiedad de tracción aumenta en un 12% y es de 80 MPa mediante el proceso de tratamiento químico, mientras que la mejora en la propiedad que se observa mediante el proceso de tratamiento térmico es muy menor, siendo 74 MPa, lo que supone tan solo un 6%.

En el estudio [5] se ha demostrado el potencial de la energía de microondas para calentar y enfriar rápidamente estructuras impresas en 3D utilizando un filamento compuesto de carbono-PEEK, que contiene un 10% en peso de fibra de carbono, con el fin de mejorar las propiedades mecánicas de la pieza. A diferencia del recocido en horno, las microondas eliminan las limitaciones iniciales de la transferencia de calor y mejoran la resolución temporal para recocidos cortos a alta temperatura, permitiendo un procesamiento más eficiente. Los ensayos de tracción del PEEK de carbono impreso revelaron que, independientemente de la orientación de impresión, el procesamiento por microondas, tanto a baja potencia (100 W, 20 s) como a alta potencia (200 W, 10 s), calentó rápidamente la muestra impresa, fundiendo localmente los cristales de PEEK y permitiendo un enfriamiento rápido tras cesar la radiación. Aunque el enfriamiento rápido tiende a inhibir la cristalización del PEEK, reduciendo su cristalinidad, el corto tiempo de calentamiento minimiza la deformación del objeto impreso. Además, como se aprecia en la Figura 2.2, el procesamiento con microondas aumentó el módulo elástico en un factor de 2 a 3 en todas las direcciones de impresión, demostrando así su potencial para mejorar el rendimiento mecánico de compuestos impresos en 3D, lo que podría aplicarse también a otros filamentos con matrices de polímeros de ingeniería de alto rendimiento.



**Figura 2.2: Influencia del postprocesamiento de microondas en (a) el módulo elástico, (b) la deformación en la rotura, (c) la tenacidad y (d) la resistencia máxima a la tracción en función de la orientación de la impresión y las condiciones de postprocesamiento.**

Diversos estudios se han enfocado en mejorar las propiedades del filamento PLA impreso en 3D mediante FDM, empleando tratamientos térmicos en hornos seguidos de pruebas mecánicas, como ensayos de tracción o impacto, para evaluar las mejoras en las propiedades del material. Aunque este enfoque ha demostrado ser efectivo, aún son escasas las investigaciones que exploran el uso de microondas como una alternativa para el tratamiento térmico del PLA. La literatura indica que el recocido en horno puede reducir las tensiones internas y mejorar la resistencia térmica y mecánica del PLA, pero este método es lento y consume una cantidad considerable de energía. Por otro lado, se ha observado que los parámetros de impresión, como la densidad de relleno, la altura de capa y los perímetros, también influyen en las propiedades finales del material, lo que sugiere la necesidad de optimización. Sin embargo, el potencial de las microondas para realizar un calentamiento más rápido y eficiente del PLA, minimizando las deformaciones y controlando mejor las propiedades finales del material, aún requiere una exploración más profunda.

## Capítulo 3: Materiales y métodos

### 3.1 Materiales

#### 3.1.1 PLA

Se utiliza ácido poliláctico (PLA) suministrado por Creality, un polímero termoplástico biodegradable derivado de recursos naturales como el maíz [6]. El PLA fue seleccionado por su alta disponibilidad y facilidad de impresión en 3D, así como por sus propiedades mecánicas adecuadas para aplicaciones estructurales y de investigación.

Con el fin de evaluar la influencia del color en la absorción de microondas, se seleccionan tres colores diferentes de PLA: azul, negro y naranja. Estos colores fueron elegidos por su contraste, lo que permite estudiar cómo las diferencias en la absorción de la radiación de microondas afectan las propiedades mecánicas y estructurales de las muestras tratadas y no tratadas térmicamente.

#### 3.1.2 Impresora Creality K1 Max

Para la impresión de las muestras en PLA, se utiliza una impresora 3D Creality K1 Max, presentada en la Figura 3.1. Esta impresora utiliza tecnología de formación de FDM y se destaca por su gran volumen de impresión, capaz de generar objetos de hasta 300 x 300 x 300 mm, lo que permite la creación de piezas con alta precisión y resolución. La Creality K1 Max ofrece una velocidad de impresión elevada y un control de temperatura preciso, características importantes para asegurar la consistencia en la calidad de las muestras.[7]



Figura 3.1: Impresora Creality K1 Max.

#### 3.1.3 Microondas TH-20DM

Para el tratamiento térmico de las muestras, se empleó un microondas modelo TH-20DM, presentada en la Figura 3.2, con una potencia máxima de 800 watts. Este dispositivo permite realizar exposiciones controladas a las muestras de PLA, a fin de evaluar la influencia del calor generado por las microondas en sus propiedades mecánicas y estructurales. Las dimensiones del microondas son 26 x 45,5 x 33 cm [8], lo que proporciona un espacio adecuado para la colocación de las probetas durante los ensayos.



**Figura 3.2: Microondas TH-20DM.**

### **3.1.4 Cámara termográfica Flir One**

Para el análisis de la distribución térmica en las muestras tratadas, se utiliza una cámara termográfica FLIR One, la cual se muestra en la Figura 3.3. Este dispositivo permite capturar imágenes térmicas con alta precisión, midiendo la temperatura con un margen de error de  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  o  $\pm 5\%$ , siempre que la unidad esté operando en un rango de temperatura ambiente de  $15^{\circ}\text{C}$  a  $35^{\circ}\text{C}$  y la escena se encuentre entre  $5^{\circ}\text{C}$  y  $120^{\circ}\text{C}$ . La FLIR One genera imágenes infrarrojas (IR) de alta resolución, combinando una resolución visual de  $640 \times 480$  píxeles y una resolución térmica de  $80 \times 60$  píxeles, lo que facilita la identificación de variaciones térmicas detalladas en las probetas durante y después del tratamiento con microondas. [9]

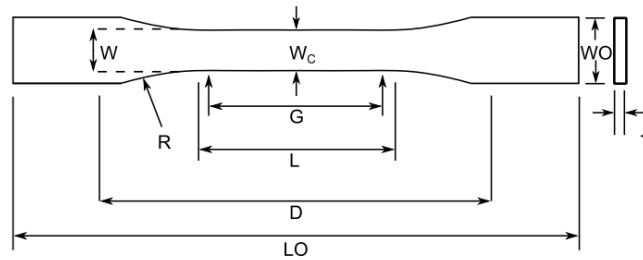


**Figura 3.3: Cámara termográfica Flir One.**

### **3.1.5 Fabricación de probetas**

Las probetas son fabricadas según la geometría típica de forma de “hueso de perro” de la norma ASTM D638 [10] para realizar pruebas de tracción. La geometría de la probeta se muestra en la Figura 3.4 y las dimensiones en la Tabla 3. Debido a que las muestras están fabricadas de PLA, el cual entra en la

categoría de plásticos rígidos y semirrígidos, la probeta sigue las dimensiones del Tipo I establecida en la norma.



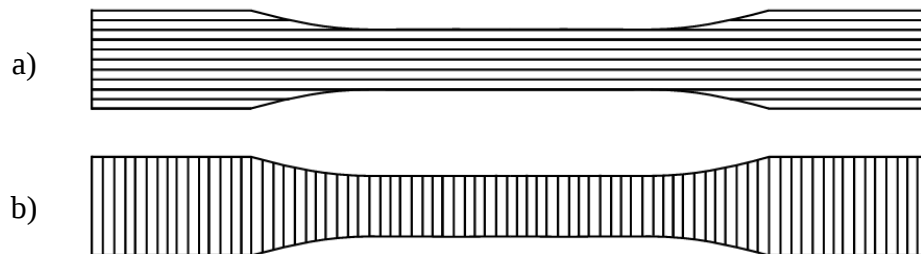
**Figura 3.4: Geometría de la probeta según norma ASTM D638.**

**Tabla 3: Dimensiones para muestras Tipo I**

| Sección |                                 | Dimensiones [mm] |
|---------|---------------------------------|------------------|
| W       | Ancho de la sección estrecha    | 13               |
| L       | Longitud de la sección estrecha | 57               |
| WO      | Ancho total                     | 19               |
| LO      | Longitud total                  | 165              |
| G       | Longitud de calibración         | 50               |
| D       | Distancia entre agarres         | 115              |
| R       | Radio de filete                 | 76               |
| T       | Espesor                         | 3                |

Para estudiar el comportamiento del PLA, se imprimen probetas en boquilla de 0.75mm, con una densidad de relleno del 100% y línea de relleno en 0° y 90° según la dirección de tracción, como se presenta en la Figura 3.5.

El modelo CAD 3D de las probetas se diseña en el software Autodesk Inventor y se convierte en un archivo STL. Posteriormente son importadas en el software UltiMaker Cura para crear el código G.



**Figura 3.5: Orientación de la fibra, a) 0°, b) 90°.**

### 3.1.6 Máquina de ensayo de materiales ProLine Z005 de Zwick Roell

Para los ensayos realizados se utiliza la máquina de ensayos universales ProLine Z005 de Zwick Roell, Figura 3.6, la cual permite una carga máxima de 5 kN. Esta máquina se controla por medio del software de ensayos testXpert II. [11]



Figura 3.6: Máquina de ensayos ProLine Z005.

### 3.1.7 Microscopio

En primer lugar, se utiliza un microscopio portátil Ersa Mobile Scope para examinar las zonas de fractura de las probetas posterior a los ensayos de tracción. Este equipo permite realizar una observación inicial de las superficies fracturadas, identificando los patrones de fractura y los posibles mecanismos asociados, como fractura frágil o dúctil.

Posteriormente, para un análisis más detallado y profundo, se emplea un microscopio óptico de alta precisión Leica. Este equipo se utiliza principalmente para estudiar las secciones transversales de las probetas, con el objetivo de identificar y cuantificar las porosidades internas generadas durante los tratamientos térmicos y compararlas con las de las muestras sin tratamiento. La alta capacidad de resolución del microscopio Leica permite observar con claridad la distribución y el tamaño de los poros, así como posibles defectos estructurales.

## 3.2 Métodos

### 3.2.1 Pruebas de influencia del color en la absorción de microondas

Para evaluar la influencia del color en la absorción de microondas, se imprimen muestras de PLA de 50x50x3mm. Con el fin de evaluar la influencia del color en la absorción de microondas, se seleccionan tres colores diferentes de PLA: azul, negro y naranja. Estos colores son elegidos por su contraste, lo que permite estudiar cómo las diferencias en la absorción de la radiación de microondas afectan las propiedades mecánicas y estructurales de las muestras tratadas y no tratadas térmicamente.

Las muestras son diseñadas en dos orientaciones de impresión diferentes: con ángulos de  $\pm 45^\circ$  y de  $0-90^\circ$ , lo que permite explorar cómo las distintas direcciones de las capas afectan la distribución del calor durante el tratamiento térmico. Esta variedad de colores y direcciones de impresión es seleccionada con el objetivo de estudiar posibles variaciones en la absorción de energía de microondas.

Las muestras se someten a un tratamiento térmico en un microondas con una potencia de 800 W durante 3 minutos 30 segundos. Durante este tiempo, se observa cómo cada muestra reacciona al calor generado por las microondas, con especial atención a cualquier cambio visible en la estructura o apariencia del material, como deformaciones o variaciones de color.

El tiempo de exposición y la potencia del microondas son seleccionados para asegurar un calentamiento significativo, pero sin llegar a la fusión o daño irreversible del material, lo que permite analizar de manera precisa las diferencias en el comportamiento térmico entre las muestras de diferentes colores.

### **3.2.2 Tratamiento Térmico en Microondas**

Inicialmente, se realiza una serie de pruebas preliminares para determinar el tiempo necesario para que las probetas alcancen una temperatura de  $90^\circ\text{C}$  en un microondas a 800W de potencia. Se utilizan diferentes tiempos de exposición, y mediante el uso de una cámara termográfica, se registra el momento en que la superficie de las probetas alcanza la temperatura objetivo.

Con el tiempo óptimo establecido, se selecciona un lote de cinco probetas impresas a  $0^\circ$  y cinco probetas impresas a  $90^\circ$  con respecto a la dirección de tracción, para ser tratadas bajo las mismas condiciones controladas. Estas probetas se someten al tratamiento térmico en el microondas durante el tiempo previamente determinado, asegurando una temperatura de  $90^\circ\text{C}$  en todas las muestras. Tras el tratamiento, las probetas son retiradas para su posterior análisis mecánico y estructural, a fin de evaluar los efectos del tratamiento térmico en sus propiedades.

### **3.2.3 Tratamiento Térmico en Horno**

A diferencia del tratamiento en microondas, el tiempo y la temperatura óptimos para el tratamiento térmico se obtienen de la literatura. [3]

Se trabaja con un lote de cinco probetas impresas a  $0^\circ$  y cinco probetas impresas a  $90^\circ$  con respecto a la dirección de tracción, que son sometidas al tratamiento en el horno bajo las condiciones previamente establecidas. Las probetas son tratadas térmicamente en el horno de convección Cole-Parmer ubicado en el laboratorio de técnicas aeroespaciales de la Universidad de Concepción. Posteriormente, las probetas son retiradas del horno y se dejan enfriar de manera controlada antes de ser sometidas a los ensayos mecánicos correspondientes.

### **3.2.4 Ensayos de tracción**

Después de los tratamientos térmicos en horno y microondas, se realizan ensayos de tracción para evaluar las propiedades mecánicas de las probetas tratadas y compararlas con aquellas que no reciben tratamiento. Estos ensayos se realizan de acuerdo con la norma ASTM D638 que establece los métodos de prueba estándar para propiedades de tracción de plásticos.

Debido a que la velocidad del ensayo está especificada para el tipo de material, se utiliza la velocidad mínima presentada en la Tabla 1 de la norma ASTM D638, la cual establece que, para clasificación de materiales rígidos y semirrígidos, para muestras de tipo I, II, III barras y tubos, la velocidad del ensayo es de  $5 \pm 25\%$  mm/min, velocidad que produce la ruptura de la muestra entre 0,5 y 5 min.

Los resultados obtenidos de las probetas tratadas térmicamente se comparan con los ensayos realizados sobre probetas que no fueron sometidas a ningún tratamiento térmico. El objetivo de estos ensayos es determinar cómo influyen los tratamientos térmicos y la orientación de impresión en la resistencia máxima a la tracción y la elongación en el punto de rotura.

### **3.2.5 Microscopía**

Se lleva a cabo un análisis microestructural para evaluar los efectos de los distintos métodos de tratamiento. Para ello, se seleccionan segmentos específicos con el fin de obtener información detallada sobre sus características mecánicas y estructurales. Uno de los enfoques es el análisis de la zona de fractura, observando cómo varían los patrones de rotura dependiendo de la orientación de impresión ( $0^\circ$  y  $90^\circ$ ) y del tipo de tratamiento térmico aplicado (en horno, en microondas o sin tratamiento). Este análisis permite identificar diferencias en los mecanismos de fractura y correlacionarlos con las condiciones de impresión y los tratamientos realizados.

Por otro lado, se obtienen secciones de las probetas para analizar las porosidades internas generadas tras los tratamientos térmicos. Estas porosidades son comparadas con las presentes en las muestras sin tratamiento, con el propósito de comprender cómo las condiciones térmicas afectan la integridad estructural del material. Para llevar a cabo este análisis, se requiere un proceso de pulido meticuloso de las muestras, garantizando superficies adecuadas para la observación bajo el microscopio. Se decide centrar este estudio principalmente en las probetas impresas a  $0^\circ$ , ya que su orientación proporciona mayor cantidad de información relevante para los objetivos del análisis.

## Capítulo 4: Resultados y discusiones

### 4.1 Pruebas de influencia del color en la absorción de microondas

Los resultados mostraron que el color de las muestras influyó significativamente en la absorción del calor generado por las microondas. Las muestras de color negro experimentaron un aumento de temperatura mucho mayor en comparación con las de color azul y naranja. En detalle, las muestras negras mostraron una absorción más eficiente de la radiación, lo que resultó en una diferencia de temperatura más alto. Por el contrario, las muestras azules y naranjas presentaron un comportamiento térmico muy similar, con diferencias mínimas en sus aumentos de temperatura. Las muestras se presentan en la

Figura 4.1.



Figura 4.1: Muestras pruebas influencia de color.

A continuación, en la Tabla 4 con los resultados de los incrementos de temperatura observados para cada color y orientación de impresión:

Tabla 4: Resultados observados para cada color y orientación de impresión.

| Color   | Orientación de impresión | Diferencia de temperatura (°C) |
|---------|--------------------------|--------------------------------|
| Azul    | $\pm 45^\circ$           | 39,9                           |
|         | 0-90°                    | 38,5                           |
| Negro   | $\pm 45^\circ$           | 65,2                           |
|         | 0-90°                    | 67,1                           |
| Naranja | $\pm 45^\circ$           | 37,8                           |
|         | 0-90°                    | 38,6                           |

Este comportamiento térmico diferencial se explica por la mayor capacidad del color negro para absorber energía electromagnética en comparación con colores más claros como el azul y el naranja. Según la teoría del cuerpo negro, un cuerpo negro ideal es un objeto que absorbe toda la radiación incidente sobre él, independientemente de la longitud de onda. Aunque ningún material real es un cuerpo negro perfecto, los objetos de color negro tienden a aproximarse a este comportamiento porque absorben toda la radiación electromagnética que reciben, sin importar la frecuencia o el ángulo de incidencia. [12]

No se detectaron deformaciones ni daños visibles en las muestras, lo que confirma que el tiempo y la potencia seleccionados fueron adecuados para evitar la fusión o el daño estructural del material.

Adicionalmente, las orientaciones de impresión ( $\pm 45^\circ$  y  $0-90^\circ$ ) no parecieron tener un impacto en la distribución del calor dentro de las muestras, ya que el comportamiento térmico entre ambas orientaciones fue consistente para cada color.

#### 4.2 Proceso de tratamiento térmico

El tratamiento térmico en horno se llevó a cabo durante 4 horas en un horno de convección precalentado a  $90^\circ\text{C}$ . El enfriamiento se llevó a cabo al aire libre a temperatura ambiente durante 12 horas. Después del período de enfriamiento, todas las muestras se probaron mediante inspección visual y control de tamaño utilizando un pie de metro.

Para el tratamiento con microondas, se realizó en un microondas doméstico configurado al 100% de potencia (800W). Las muestras impresas a  $90^\circ$  fueron expuestas durante 2 minutos y 20 segundos, mientras que las a  $0^\circ$  por 2 minutos 30 segundos, alcanzando temperaturas cercanas a los  $90^\circ\text{C}$ , monitoreadas con una cámara termográfica. Tras el calentamiento, las probetas se enfriaron a temperatura ambiente por un periodo breve antes de proceder con su evaluación. Este procedimiento permitió analizar el efecto del calentamiento rápido y localizado característico de las microondas.

En la Figura 4.2 se aprecia la diferencia de longitudes de las probetas a  $90^\circ$  tratadas, los resultados de las mediciones dimensionales se detallan en el Anexo B y los valores promedios se pueden observar en la Tabla 5.



**Figura 4.2: Diferencia de largo de las probetas tratadas.**

**Tabla 5: Promedio de dimensiones de las probetas post tratamientos.**

|     |                            | L0     | W0    | T    | W     |
|-----|----------------------------|--------|-------|------|-------|
| 90° | Tratamiento con horno      | 167,16 | 18,73 | 3,22 | 13,81 |
|     | Tratamiento con microondas | 166,45 | 18,59 | 3,24 | 13,56 |
|     | Sin tratamiento            | 165,00 | 19,00 | 3,00 | 13,00 |
| 0°  | Tratamiento con horno      | 161,92 | 19,66 | 3,20 | 14,09 |
|     | Tratamiento con microondas | 163,45 | 19,68 | 3,29 | 14,37 |
|     | Sin tratamiento            | 165,00 | 19,00 | 3,00 | 13,00 |

El análisis de las dimensiones de las probetas posteriores a los tratamientos térmicos revela un comportamiento interesante relacionado con la orientación de contracción y la dirección de impresión de las probetas. Las probetas impresas a 90° muestran una tendencia a acortarse en la dirección de las fibras, acompañado por una reducción en el ancho. Por otro lado, las probetas impresas a 0° experimentan un acortamiento en la dirección de las fibras y un ensanchamiento en el ancho de las probetas.

El comportamiento de contracción de las probetas tratadas térmicamente se explica por la naturaleza del PLA y el proceso de impresión 3D, que genera estructuras anisotrópicas. Durante la impresión, las fibras de material se depositan capa por capa siguiendo una dirección específica, lo que genera tensiones internas debido al enfriamiento rápido y la solidificación desigual del material. Estas tensiones quedan "congeladas" en el material hasta que son liberadas bajo un estímulo, como el calor. [13]

Cuando las probetas se someten a un tratamiento térmico, como en horno o microondas, el calor permite que las cadenas moleculares del PLA se relajen y reorganicen, reduciendo las tensiones internas. Este fenómeno provoca una contracción más evidente en la dirección de impresión, ya que en esta dirección las tensiones acumuladas tienden a ser mayores debido al enfriamiento y solidificación más rápido que ocurre durante el proceso de fabricación. Además, el calor puede inducir una cristalización parcial en el PLA, especialmente en tratamientos térmicos prolongados o más uniformes como en el horno, lo que también contribuye a la contracción. [13]

#### 4.3 Pruebas de tracción

Se realizaron ensayos de tracción en las muestras de prueba impresas para determinar su resistencia a la tracción en función de la orientación. Se probaron muestras en ambas orientaciones. El promedio de los resultados de los ensayos para las probetas a 90° y 0° se muestra en la Tabla 6. Además, los valores máximos de los ensayos realizados se encuentran en el Anexo C.

**Tabla 6: Promedio de resultados de esfuerzo y deformación para los distintos tratamientos en probetas a 90° y 0°.**

|     |                            | <b>Esfuerzo [MPa]</b> | <b>Deformación [%]</b> |
|-----|----------------------------|-----------------------|------------------------|
| 90° | Tratamiento con horno      | 25,30                 | 3,31                   |
|     | Tratamiento con microondas | 23,86                 | 3,33                   |
|     | Sin tratamiento            | 22,06                 | 3,06                   |
| 0°  | Tratamiento con horno      | 42,60                 | 4,02                   |
|     | Tratamiento con microondas | 41,29                 | 4,19                   |
|     | Sin tratamiento            | 38,81                 | 3,48                   |

En las probetas orientadas a 90°, el tratamiento térmico en horno resultó en un incremento del esfuerzo máximo en un 14,68% respecto a las probetas sin tratamiento, alcanzando un valor de 25,30 MPa.

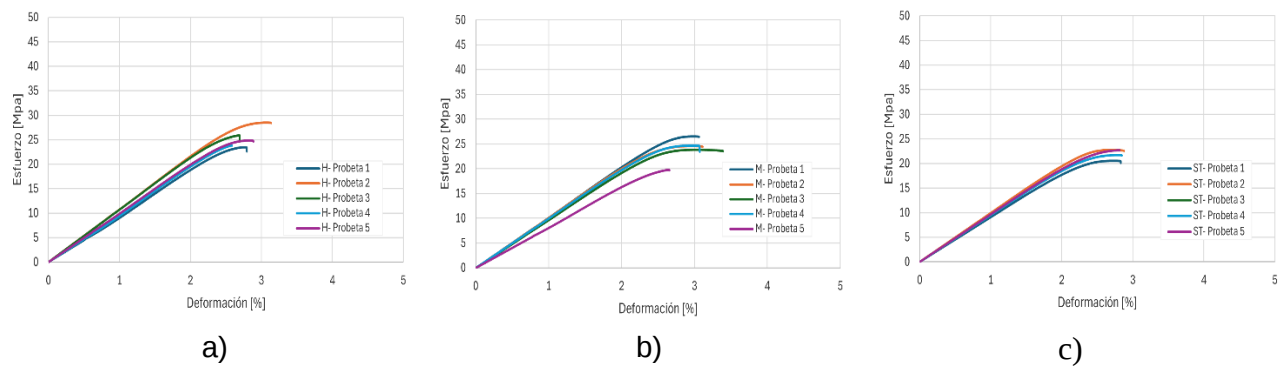
Este aumento puede contribuir a una mejora en la adherencia entre las capas y la relajación de tensiones residuales durante el proceso térmico.

El tratamiento con microondas también mejoró el esfuerzo máximo en un 8,16%, llegando a 23,86 MPa. Aunque este incremento es menor que el logrado con el horno, su rápido tiempo de procesamiento lo convierte en una alternativa eficiente. Es importante destacar que, a pesar de la mejora en la resistencia, no se observa un cambio significativo en la deformación máxima, lo que sugiere que la orientación perpendicular limita la capacidad del material para deformarse antes de fracturarse. Además, esta dirección está más representada por la unión entre las fibras de filamento de impresión.

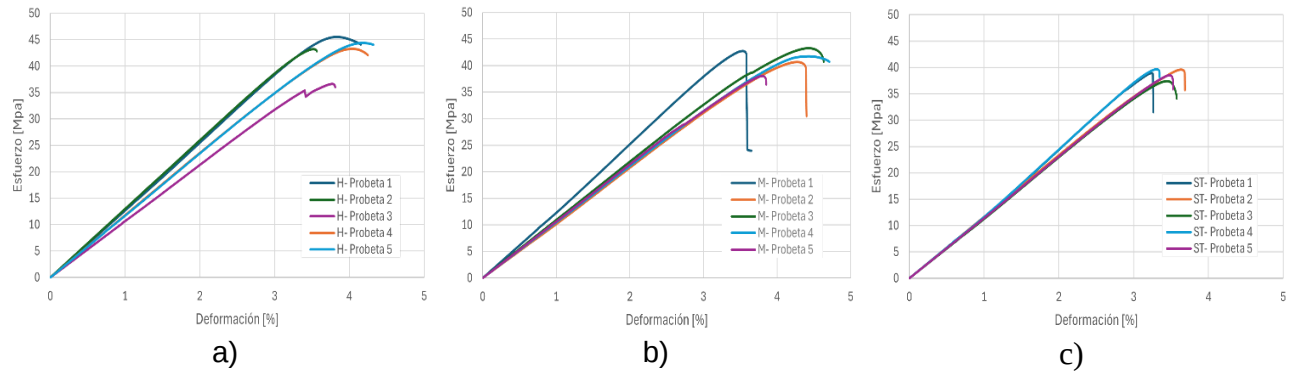
En las probetas con orientación a  $0^\circ$ , el tratamiento en horno incrementó el esfuerzo máximo en un 9,75%, alcanzando 42,60 MPa, mientras que el tratamiento con microondas logró un aumento del 6,39%, con un valor de 41,29 MPa. La orientación paralela a la dirección de tracción permite que estas probetas aprovechen de manera más efectiva las mejoras en la cohesión interlaminar y en la estructura interna del material. [14]

En cuanto a la deformación máxima, ambas modalidades de aumentaron la capacidad del material para deformarse antes de la fractura. Las probetas sin tratamiento presentaron un valor de deformación del 3,48%, mientras que las tratadas en horno y microondas alcanzaron deformaciones del 4,02% y 4,19%, respectivamente. Esto evidencia una mayor ductilidad, asociada a una redistribución de tensiones internas y una mayor homogeneidad estructural posterior a los tratamientos.

En los gráficos presentados a continuación, se detallan las curvas esfuerzo-deformación correspondientes, las cuales muestran de manera visual las diferencias en el comportamiento mecánico de las muestras según su tratamiento y orientación. Estas curvas permiten identificar cómo los tratamientos térmicos modifican la respuesta del material bajo carga y complementan la información cuantitativa presentada en la tabla. Las curvas de tracción determinadas en el caso de las probetas orientadas a  $90^\circ$  se muestran en la Figura 4.3 y las probetas orientadas a  $0^\circ$  en la Figura 4.4.



**Figura 4.3: Curva esfuerzo deformación a) Tratamiento horno. b) Tratamiento microondas. c) Sin tratamiento.**



**Figura 4.4: Curva esfuerzo deformación a) Tratamiento horno. b) Tratamiento microondas. c) Sin tratamiento.**

En general, el tratamiento térmico en horno demostró ser el más efectivo en mejorar tanto la resistencia como la ductilidad del material en ambas orientaciones. Esto se debe al tiempo prolongado de exposición, que favorece la relajación completa de tensiones residuales y el reordenamiento de las cadenas poliméricas. Sin embargo, el tratamiento con microondas ofrece ventajas en términos de eficiencia, logrando mejoras significativas en menor tiempo y con un proceso más sencillo. La razón principal de la mejora de las propiedades mecánicas del PLA durante el recocido es la mejora de la cristalinidad del PLA a temperaturas altas, como 90 °C cuando se recosen. [15]

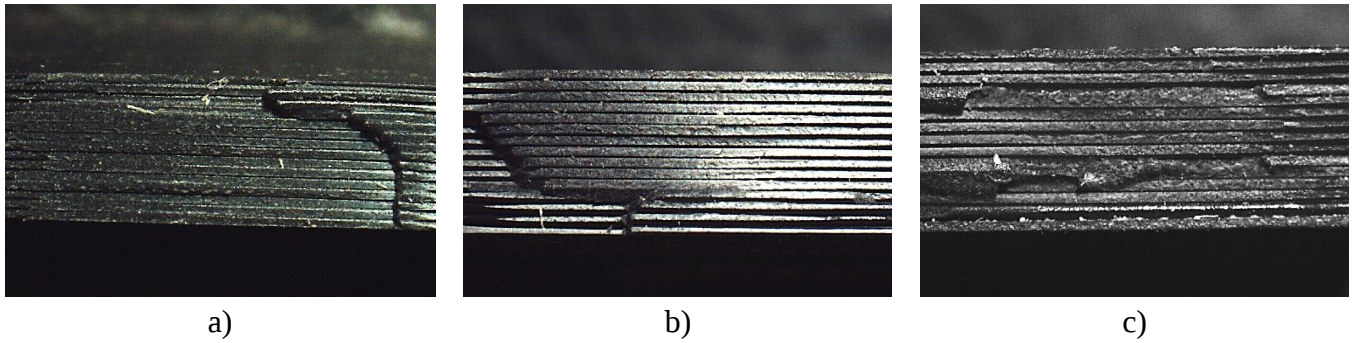
Las probetas sin tratamiento térmico presentaron valores inferiores tanto en esfuerzo como en deformación, lo que confirma que los tratamientos térmicos son fundamentales para optimizar las propiedades mecánicas del material.

## 4.4 Microscopía

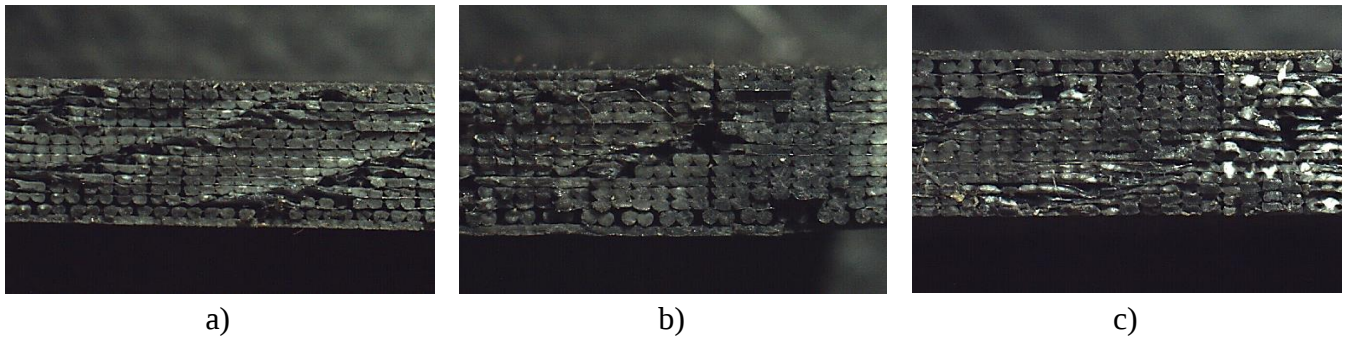
### 4.4.1 Microscopía zona de fractura

El análisis de las zonas de fractura de las probetas se realizó con el objetivo de estudiar los patrones de ruptura y su relación con los tratamientos térmicos aplicados, así como con las orientaciones de impresión. Para ello, se empleó un microscopio portátil ERSa Mobile Scope, el cual permitió capturar imágenes detalladas de las superficies de fractura. Este análisis es crucial para comprender los mecanismos de falla y evaluar cómo los tratamientos térmicos afectan la cohesión entre capas y la resistencia global del material.

Las secciones transversales de las muestras de prueba se presentan a continuación, donde la Figura 4.5 corresponde a las probetas impresas a 90° y en la Figura 4.6 las probetas impresas a 0°.



**Figura 4.5: Microscopía en zona de fractura de probetas a 90° con a) Tratamiento en horno, b) Tratamiento en microondas, c) Sin tratamiento.**



**Figura 4.6: Microscopía en zona de fractura de probetas a 0° con a) Tratamiento en horno, b) Tratamiento en microondas, c) Sin tratamiento.**

Las imágenes obtenidas por microscopía muestran las fracturas en probetas orientadas a 90° después de los ensayos de tracción, donde se distinguen claramente las láminas de filamento de PLA, características del proceso de impresión 3D. Las fracturas de probetas con tratamiento en horno y en microondas se muestran bastante similares, evidenciando una mayor cohesión entre las capas y un comportamiento más uniforme. Por otro lado, la fractura de la probeta sin tratamiento térmico se presenta diferente, con mayor separación y desalineación entre las láminas, lo que refleja una menor adhesión interlaminar y un comportamiento más frágil frente al esfuerzo aplicado.

Para el caso de las imágenes de las probetas orientadas a 0° muestran diferencias en el comportamiento mecánico según el tratamiento térmico aplicado. Las probetas sin tratamiento térmico exhiben un comportamiento más frágil, con una fractura uniforme donde prácticamente todas las fibras fallaron al mismo nivel durante los ensayos de tracción. En contraste, las probetas con tratamientos térmicos (horno y microondas) presentan fracturas más irregulares, caracterizadas por una rotura progresiva en la que algunos filamentos se cortaron antes que otros. Esto sugiere una mayor capacidad de deformación local y una redistribución más efectiva de las tensiones en las probetas tratadas, evidenciando un comportamiento más dúctil en comparación con las probetas sin tratamiento.

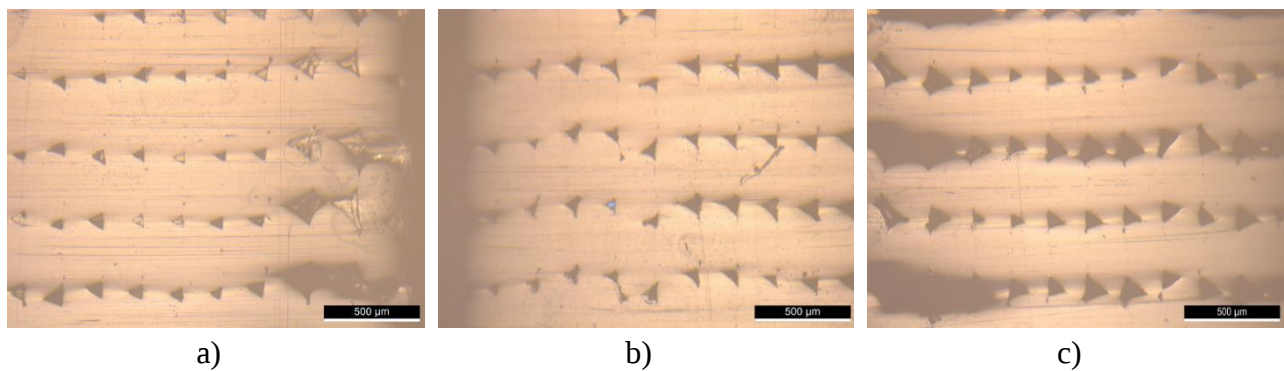
#### **4.4.2 Microscopía porosidades**

Para analizar las porosidades internas de las muestras y evaluar la influencia de los tratamientos térmicos en la estructura interna del material, se realizó un trabajo de preparación minucioso. Las probetas fueron cortadas transversalmente y sometidas a un proceso de pulido con alúmina fina en

una máquina de precisión Mecatech 264. Este procedimiento permitió alcanzar un acabado superficial de 0,05 [ $\mu\text{m}$ ], lo cual es esencial para garantizar una observación clara y detallada bajo el microscopio.

El pulido adecuado eliminó imperfecciones superficiales y resaltó las características internas del material, como la presencia de porosidades y otros defectos generados durante el proceso de impresión 3D.

A continuación, en la Figura 4.7, se presentan las imágenes obtenidas de las secciones transversales de las probetas, como se explicó anteriormente de las probetas impresas a  $0^\circ$  ya que entregan información relevante, comparando las estructuras internas de las nuestras sin tratamiento térmico y aquellas tratadas en horno o con microondas.



**Figura 4.7: Microscopías de porosidades a) Tratamiento con horno, b) Tratamiento con microondas, c) Sin tratamiento.**

Para cuantificar el porcentaje de porosidades internas en las muestras, se utilizó el programa ImageJ, una herramienta especializada en el análisis de imágenes científicas. De cada tratamiento, se analizaron cinco imágenes representativas obtenidas de las secciones transversales previamente preparadas. Esto permitió un promedio estadístico más significativo para cada grupo de muestras.

El procesamiento de imágenes incluyó la aplicación de filtros específicos para identificar y medir las áreas correspondientes a porosidades internas. Este enfoque garantizó un análisis preciso y uniforme en todas las muestras. Los resultados se muestran en la Tabla 7 con los porcentajes de porosidad promedio para cada grupo de tratamiento, los valores específicos para cada imagen analizada se pueden apreciar en el Anexo D.

**Tabla 7: Porcentajes de porosidad promedio para cada grupo de tratamiento.**

|                           | Porosidad promedio [%] |
|---------------------------|------------------------|
| Tratamiento en horno      | 4,94                   |
| Tratamiento en microondas | 3,93                   |
| Sin tratamiento           | 7,40                   |

Los resultados obtenidos muestran una disminución en el porcentaje de porosidades internas tras la aplicación de tratamientos térmicos. Las muestras sin tratamiento térmico presentan un porcentaje de porosidad promedio del 7,40%, lo que refleja las condiciones iniciales del material derivadas del proceso de impresión 3D, caracterizadas por una estructura interna con vacíos y defectos generados durante la deposición de capas.

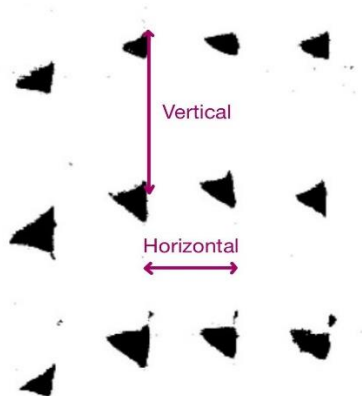
El tratamiento térmico en horno reduce las porosidades un promedio de 4,94%. Este comportamiento se debe probablemente a la acción del calentamiento uniforme, que permite una redistribución de tensiones internas y el cierre parcial de poros, mejorando la compactación del material.

Por otro lado, el tratamiento con microondas muestra un resultado similar, alcanzando un promedio de 3,93% de porosidad. Esto podría explicarse por el efecto localizado y rápido del calentamiento por microondas, que induce una mayor reconfiguración estructural en comparación con el horno, promoviendo una mayor densificación del material.

En general, ambos tratamientos térmicos contribuyen de manera efectiva a reducir los defectos internos del material, con una pequeña ventaja para el tratamiento con microondas. La disminución de las porosidades sugiere mejoras en la cohesión interna del material, lo que potencialmente puede traducirse en mejores propiedades mecánicas, especialmente en términos de resistencia y ductilidad.

Como parte del análisis microscópico, se realizaron mediciones de las dimensiones de los filamentos en las probetas después de los tratamientos térmicos. Estas mediciones permiten evaluar los cambios dimensionales asociados a la contracción del material durante los procesos térmicos.

A continuación, se presenta la Tabla 8 que resume las dimensiones promedio de los filamentos para cada tipo de tratamiento, evidenciando cómo los procesos térmicos afectan la morfología del material. Este promedio se calculó a partir de 10 mediciones realizadas con el software de obtención de imágenes “leica LAS” las cuales se detallan en el Anexo E, donde se midieron los filamentos en su dirección vertical y horizontal como se muestra en la Figura 4.8.



**Figura 4.8: Medición filamentos post tratamientos.**

**Tabla 8: Dimensiones promedio de los filamentos después de los tratamientos térmicos.**

|                           | <b>Vertical [<math>\mu\text{m}</math>]</b> | <b>Horizontal [<math>\mu\text{m}</math>]</b> |
|---------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Tratamiento en horno      | 383,42                                     | 228,08                                       |
| Tratamiento en microondas | 363,34                                     | 219,12                                       |
| Sin tratamiento           | 184,40                                     | 105,19                                       |

Los resultados obtenidos de las mediciones muestran un cambio significativo en la geometría de los filamentos tras los tratamientos térmicos. En general, tanto el tratamiento en horno como el realizado con microondas provocaron un ensanchamiento de los filamentos y un cambio en su forma, pasando de ser predominantemente circulares en las muestras sin tratamiento a una forma más ovalada.

Este comportamiento ya era previsible al observar las probetas después de los tratamientos, donde se evidenció una disminución en su tamaño general debido a la contracción de las fibras del material. Aunque tanto el tratamiento en horno como el realizado con microondas generan cambios significativos en las dimensiones de los filamentos, el efecto fue más marcado en las probetas tratadas en horno.

Estos cambios en la forma y el tamaño de los filamentos resaltan la capacidad de los tratamientos térmicos para alterar la estructura del material impreso, lo cual influye además en sus propiedades mecánicas y en su desempeño general.

## Conclusiones

El estudio evaluó la influencia del color de la muestra en la absorción de microondas, utilizando muestras de PLA naranja, azul y negra. Los resultados demostraron que el color juega un papel importante en la respuesta térmica bajo exposición a microondas. Entre los colores probados, las muestras negras exhibieron la mayor absorción de temperatura cuando se sometieron a la misma potencia y duración que las otras muestras.

Además, se investigó el impacto de los tratamientos térmicos mediante horno y microondas en las propiedades mecánicas y microestructurales de probetas de PLA impresas en 3D, con orientaciones a 0° y 90°. Los resultados confirmaron que ambos tratamientos térmicos mejoran significativamente las propiedades del material, siendo el tratamiento en horno el más efectivo. En las probetas orientadas a 90°, el esfuerzo máximo aumentó en un 14,68% con tratamiento en horno y en un 8,16% con microondas, mientras que en las probetas orientadas a 0°, los incrementos fueron del 9,75% y 6,39%, respectivamente. Asimismo, ambos tratamientos incrementaron la capacidad de deformación máxima antes de la fractura, evidenciando una mayor ductilidad.

Desde el punto de vista microestructural, las imágenes obtenidas por microscopía demostraron una reducción significativa de la porosidad en las muestras tratadas térmicamente. Las probetas sin tratamiento presentaron una porosidad promedio del 7,40%, mientras que el tratamiento en horno la redujo a un 4,94% y el tratamiento con microondas a un 3,93%, lo que refleja una mayor compactación del material debido a la redistribución de tensiones internas. Además, se observó una contracción diferencial en las dimensiones de las probetas, asociada a la orientación de los filamentos durante la impresión.

En general, los tratamientos térmicos demostraron ser una herramienta eficiente para optimizar las propiedades mecánicas y estructurales del PLA impreso en 3D, permitiendo mejorar su resistencia, ductilidad y reducir su porosidad. Estos hallazgos son relevantes para aplicaciones que requieren materiales con mayor desempeño mecánico, especialmente en el ámbito de la manufactura aditiva.

Para continuar avanzando en esta línea de investigación, se recomienda evaluar los efectos de tratamientos térmicos en otros materiales utilizados en impresión 3D, como filamentos compuestos o polímeros reforzados. Además, sería interesante analizar el comportamiento del material bajo condiciones de carga cíclica o en ambientes extremos, así como explorar aplicaciones prácticas en el desarrollo de técnicas de impresión 4D, aprovechando los fenómenos de contracción observados en este estudio.

## Referencias

- [1] «Influencia de la densidad y de los parámetros de relleno en las propiedades mecánicas compresivas de probetas fabricadas en manufactura aditiva de PLA | Revista UIS Ingenierías». Accedido: 20 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias/article/view/12941>
- [2] «Numerical Simulation and Experimental Study of the Stress Formation Mechanism of FDM with Different Printing Paths», *J. Renew. Mater.*, vol. 11, n.º 1, pp. 273-289, ago. 2022, doi: 10.32604/jrm.2022.021167.
- [3] N. Jayanth, K. Jaswanthraj, S. Sandeep, N. H. Mallaya, y S. R. Siddharth, «Effect of heat treatment on mechanical properties of 3D printed PLA», *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 123, p. 104764, nov. 2021, doi: 10.1016/j.jmbbm.2021.104764.
- [4] K. K. Guduru y G. Srinivasu, «Effect of post treatment on tensile properties of carbon reinforced PLA composite by 3D printing», *Mater. Today Proc.*, vol. 33, pp. 5403-5407, ene. 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.128.
- [5] J.-R. Ai, S. Li, y B. D. Vogt, «Increased strength in carbon-poly(ether ether ketone) composites from material extrusion with rapid microwave post processing», *Addit. Manuf.*, vol. 60, p. 103209, dic. 2022, doi: 10.1016/j.addma.2022.103209.
- [6] «Filamento Hyper PLA para impresión 3D Rápida Creality», TuGadget.cl. Accedido: 16 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://tugadget.cl/inicio/447-filamento-hyper-pla-para-impresion-3d-rapida-creality.html?srsId=AfmBOoptKJqUGi2Ews4DKX7Cf1aes17lA628hcv5WTiqJCPlrFOTXQkf>
- [7] «K1 Max Creality | Tamaño Imp 300x300x300mm | Velocidad 600mm/s | Impresora 3D |», Toner Alternativo y Original para Impresora | TodoToner. Accedido: 8 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.todotoner.cl/impresoras/impresoras-3d/impresoras/k1-max?gad\\_source=4&gclid=Cj0KCQjwlvW2BhDyARIsADnIe-IyfURFbe0R60bmKQ1Y2XTKtPUuJGHo4nnfgcKKG0q14yMua9FnrdYaAgYAEALw\\_wcB](https://www.todotoner.cl/impresoras/impresoras-3d/impresoras/k1-max?gad_source=4&gclid=Cj0KCQjwlvW2BhDyARIsADnIe-IyfURFbe0R60bmKQ1Y2XTKtPUuJGHo4nnfgcKKG0q14yMua9FnrdYaAgYAEALw_wcB)
- [8] «Microondas TH-20DM». Accedido: 8 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.thomas.cl/thomas/microondas-th-20dm.html>
- [9] «Amazon.com: FLIR ONE EDGE- Cámara inalámbrica de imágenes térmicas para teléfonos inteligentes: Combatible con todos los dispositivos iOS y Android, incluido el iPhone 15: Herramientas y Mejoras del Hogar». Accedido: 8 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.amazon.com/inal%C3%A1mbrica-im%C3%A1genes-t%C3%A9rmicas-tel%C3%A9fonos-inteligentes/dp/B0BLJ3XJ3Z/ref=asc\\_df\\_B0BLJ3XJ3Z/?tag=cltxtgostdd0e-20&linkCode=df0&hvadid=699882930671&hvpos=&hvnetw=g&hvrnd=779761440187133300&hvpone=&hvptwo=&hvmmt=&hvdev=c&hvdvcmdl=&hvlocint=&hvlocphy=1003304&hvtarid=pla-2209479323640&language=es\\_US&mcid=07c7cf523e0f390ca89da7ad62604f20&th=1](https://www.amazon.com/inal%C3%A1mbrica-im%C3%A1genes-t%C3%A9rmicas-tel%C3%A9fonos-inteligentes/dp/B0BLJ3XJ3Z/ref=asc_df_B0BLJ3XJ3Z/?tag=cltxtgostdd0e-20&linkCode=df0&hvadid=699882930671&hvpos=&hvnetw=g&hvrnd=779761440187133300&hvpone=&hvptwo=&hvmmt=&hvdev=c&hvdvcmdl=&hvlocint=&hvlocphy=1003304&hvtarid=pla-2209479323640&language=es_US&mcid=07c7cf523e0f390ca89da7ad62604f20&th=1)
- [10] «ASTM D638: Características de tracción en materiales plásticos», ASTM D638: Características de tracción en materiales plásticos. Accedido: 8 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.zwickroell.com/es/sectores/plasticos/termoplasticos-y-materiales-termoendurecibles/propiedades-de-traccion-astm-d638/>
- [11] «Máquina de ensayos universal ProLine», Máquina de ensayos universal ProLine. Accedido: 8 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.zwickroell.com/es/productos/maquinas-de-ensayos-de-materiales-estaticas/maquinas-de-ensayos-universales-para-aplicaciones-estaticas/proline/>

- [12] R. Melendez, «Fundamentos de transferencia de calor y de masa, 4ta», Accedido: 16 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.academia.edu/36019670/Fundamentos\\_de\\_transferencia\\_de\\_calor\\_y\\_de\\_masa\\_4ta](https://www.academia.edu/36019670/Fundamentos_de_transferencia_de_calor_y_de_masa_4ta)
- [13] L. B. Ji y T. R. Zhou, «Finite Element Simulation of Temperature Field in Fused Deposition Modeling», *Adv. Mater. Res.*, vol. 97-101, pp. 2585-2588, mar. 2010, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.97-101.2585.
- [14] A. Le Duigou, M. Castro, R. Bevan, y N. Martin, «3D printing of wood fibre biocomposites: From mechanical to actuation functionality», *Mater. Des.*, vol. 96, pp. 106-114, abr. 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2016.02.018.
- [15] H. Simmons, P. Tiwary, J. E. Colwell, y M. Kontopoulou, «Improvements in the crystallinity and mechanical properties of PLA by nucleation and annealing», *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 166, pp. 248-257, ago. 2019, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2019.06.001.



| <b>Microondas</b> |          |           |           |          |          |
|-------------------|----------|-----------|-----------|----------|----------|
|                   |          | <b>L0</b> | <b>W0</b> | <b>T</b> | <b>W</b> |
| 90°               | 1        | 167,27    | 18,34     | 3,17     | 13,53    |
|                   | 2        | 167,43    | 18,65     | 3,24     | 13,43    |
|                   | 3        | 165,17    | 19,1      | 3,2      | 13,6     |
|                   | 4        | 166,4     | 18,43     | 3,2      | 13,6     |
|                   | 5        | 165,98    | 18,47     | 3,4      | 13,67    |
|                   | Promedio | 166,45    | 18,598    | 3,242    | 13,566   |
| 0°                | 1        | 164,16    | 19,89     | 3,24     | 13,86    |
|                   | 2        | 164,22    | 19,26     | 3,28     | 14,9     |
|                   | 3        | 163,13    | 19,66     | 3,3      | 14,16    |
|                   | 4        | 162,31    | 19,87     | 3,35     | 14,54    |
|                   | 5        | 163,45    | 19,74     | 3,32     | 14,4     |
|                   | Promedio | 163,454   | 19,684    | 3,298    | 14,372   |

| <b>Sin tratamiento</b> |          |           |           |          |          |
|------------------------|----------|-----------|-----------|----------|----------|
|                        |          | <b>L0</b> | <b>W0</b> | <b>T</b> | <b>W</b> |
| 90°                    | 1        | 165       | 19        | 3,13     | 14,2     |
|                        | 2        | 165       | 19        | 3,13     | 14,2     |
|                        | 3        | 165       | 19        | 3,13     | 14,2     |
|                        | 4        | 165       | 19        | 3,13     | 14,2     |
|                        | 5        | 165       | 19        | 3,13     | 14,2     |
|                        | Promedio | 165       | 19        | 3,13     | 14,2     |
| 0°                     | 1        | 165       | 19        | 3,14     | 14,06    |
|                        | 2        | 165       | 19        | 3,13     | 14,1     |
|                        | 3        | 165       | 19        | 3,13     | 14,2     |
|                        | 4        | 165       | 19        | 3,15     | 14,1     |
|                        | 5        | 165       | 19        | 3,13     | 14,2     |
|                        | Promedio | 165       | 19        | 3,136    | 14,132   |

### Anexo C: Resultados de ensayos de tracción.

A continuación, se detallan los esfuerzos y deformaciones máximos para cada una de las 5 probetas ensayadas por cada tratamiento y en las distintas direcciones de impresión.

| <b>Horno</b> |          |                  |                  |
|--------------|----------|------------------|------------------|
|              |          | $\sigma_m$ [MPa] | $\epsilon_m$ [%] |
| 90°          | 1        | 23,474           | 3,252            |
|              | 2        | 28,512           | 3,725            |
|              | 3        | 25,847           | 3,306            |
|              | 4        | 23,825           | 3,073            |
|              | 5        | 24,866           | 3,201            |
|              | Promedio | 25,305           | 3,312            |
| 0°           | 1        | 45,524           | 5,227            |
|              | 2        | 43,270           | 4,248            |
|              | 3        | 43,225           | 4,287            |
|              | 4        | 44,390           | 4,321            |
|              | 5        | 36,633           | 4,810            |
|              | Promedio | 42,608           | 4,579            |

| <b>Microondas</b> |          |                  |                  |
|-------------------|----------|------------------|------------------|
|                   |          | $\sigma_m$ [MPa] | $\epsilon_m$ [%] |
| 90°               | 1        | 26,526           | 3,346            |
|                   | 2        | 24,592           | 3,328            |
|                   | 3        | 23,804           | 3,337            |
|                   | 4        | 24,673           | 3,286            |
|                   | 5        | 19,722           | 3,368            |
|                   | Promedio | 23,863           | 3,333            |
| 0°                | 1        | 42,752           | 4,399            |
|                   | 2        | 40,671           | 4,644            |
|                   | 3        | 43,275           | 4,952            |
|                   | 4        | 41,737           | 4,428            |
|                   | 5        | 38,037           | 4,405            |
|                   | Promedio | 41,294           | 4,566            |

| Sin tratamiento |          |                  |                     |
|-----------------|----------|------------------|---------------------|
|                 |          | $\sigma_m$ [MPa] | $\varepsilon_m$ [%] |
| 90°             | 1        | 20,553           | 3,035               |
|                 | 2        | 22,754           | 2,967               |
|                 | 3        | 22,604           | 3,210               |
|                 | 4        | 21,718           | 3,032               |
|                 | 5        | 22,678           | 3,059               |
|                 | Promedio | 22,061           | 3,061               |
| 0°              | 1        | 38,909           | 3,704               |
|                 | 2        | 39,590           | 4,047               |
|                 | 3        | 37,397           | 3,778               |
|                 | 4        | 39,657           | 3,723               |
|                 | 5        | 38,521           | 3,743               |
|                 | Promedio | 38,815           | 3,799               |

### Anexo D: Tabla de porosidades.

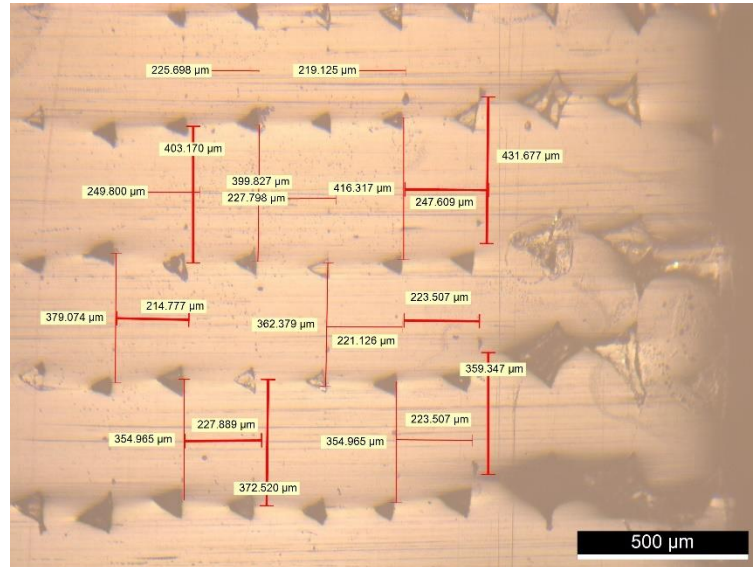
Con la ayuda del programa ImageJ , una herramienta especializada en el análisis de imágenes científicas, se analizaron cinco imágenes representativas obtenidas de las secciones transversales previamente preparadas para cada tratamiento. Posterior a la aplicación de filtros específicos para identificar las áreas correspondientes a porosidades internas, los datos obtenidos son los siguientes:

|                                 |          | <b>Píxeles<br/>blancos</b> | <b>Píxeles<br/>totales</b> | <b>Blanco<br/>[%]</b> | <b>Poros [%]</b> |
|---------------------------------|----------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------|
| Tratamiento<br>en horno         | 1        | 153157                     | 157464                     | 97,26                 | 2,74             |
|                                 | 2        | 1403614                    | 1527626                    | 91,88                 | 8,12             |
|                                 | 3        | 1464447                    | 1527626                    | 95,86                 | 4,14             |
|                                 | 4        | 150121                     | 157464                     | 95,34                 | 4,66             |
|                                 | 5        | 149523                     | 157464                     | 94,96                 | 5,04             |
|                                 | Promedio |                            |                            | 95,06                 | 4,94             |
| Tratamiento<br>en<br>microondas | 1        | 148136                     | 157464                     | 94,08                 | 5,92             |
|                                 | 2        | 1494657                    | 1527626                    | 97,84                 | 2,16             |
|                                 | 3        | 1466858                    | 1527626                    | 96,02                 | 3,98             |
|                                 | 4        | 1448406                    | 1527626                    | 94,81                 | 5,19             |
|                                 | 5        | 1491248                    | 1527626                    | 97,62                 | 2,38             |
|                                 | Promedio |                            |                            | 96,07                 | 3,93             |
| Sin<br>tratamiento              | 1        | 754044                     | 821400                     | 91,80                 | 8,20             |
|                                 | 2        | 747035                     | 821400                     | 90,95                 | 9,05             |
|                                 | 3        | 673445                     | 821400                     | 81,99                 | 18,01            |
|                                 | 4        | 746452                     | 821400                     | 90,88                 | 9,12             |
|                                 | 5        | 145064                     | 156655                     | 92,60                 | 7,40             |
|                                 | Promedio |                            |                            | 92,60                 | 7,40             |

## Anexo E: Medidas porosidades.

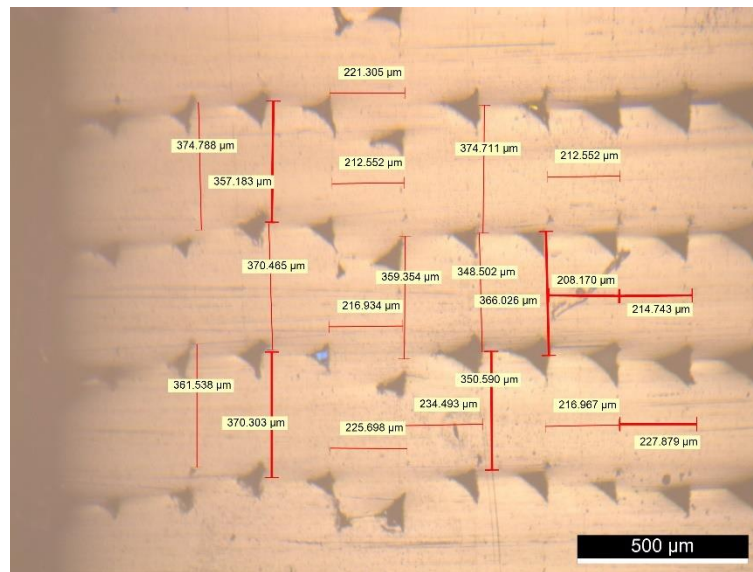
Las 10 medidas en horizontal y vertical para cada muestra fueron tomadas con el software leica LAS y se calculó un promedio entre ellas.

Muestra tratada en horno:



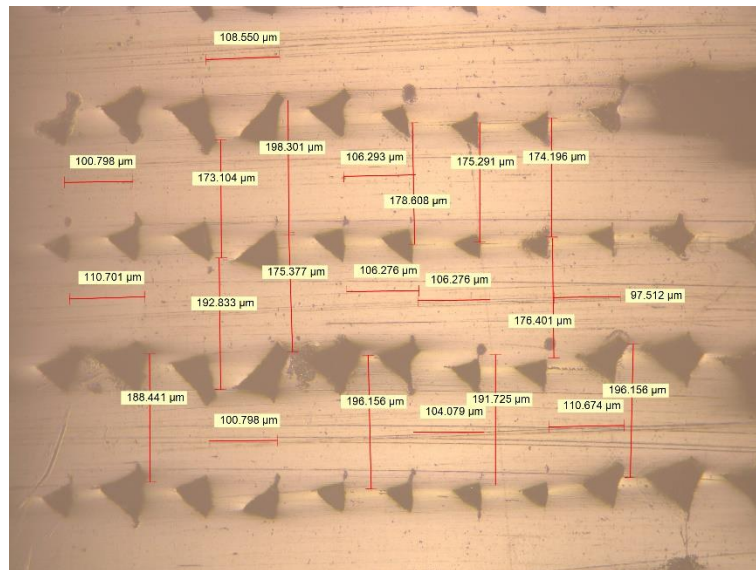
|          | Horno    |            |
|----------|----------|------------|
|          | Vertical | Horizontal |
| 1        | 403,17   | 225,698    |
| 2        | 399,827  | 219,125    |
| 3        | 416,317  | 249,8      |
| 4        | 431,677  | 227,798    |
| 5        | 379,074  | 247,609    |
| 6        | 362,379  | 214,777    |
| 7        | 354,965  | 221,126    |
| 8        | 372,52   | 223,507    |
| 9        | 354,965  | 227,889    |
| 10       | 359,347  | 223,507    |
| Promedio | 383,4241 | 228,0836   |

Muestra tratada en microondas:



|          | Microondas |            |
|----------|------------|------------|
|          | Vertical   | Horizontal |
| 1        | 374,788    | 221,305    |
| 2        | 357,183    | 212,552    |
| 3        | 374,711    | 216,934    |
| 4        | 370,465    | 225,698    |
| 5        | 359,354    | 234,393    |
| 6        | 348,502    | 212,552    |
| 7        | 366,026    | 208,17     |
| 8        | 361,538    | 214,743    |
| 9        | 370,303    | 216,967    |
| 10       | 350,59     | 227,879    |
| Promedio | 363,346    | 219,1193   |

Muestra sin tratamiento:



| Sin tratamiento |          |            |
|-----------------|----------|------------|
|                 | Vertical | Horizontal |
| 1               | 173,104  | 108,55     |
| 2               | 198,301  | 100,798    |
| 3               | 178,608  | 110,701    |
| 4               | 175,291  | 100,798    |
| 5               | 174,196  | 106,293    |
| 6               | 192,833  | 106,276    |
| 7               | 175,377  | 104,079    |
| 8               | 188,441  | 106,276    |
| 9               | 196,156  | 110,674    |
| 10              | 191,725  | 97,512     |
| Promedio        | 184,4032 | 105,1957   |