



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



Memoria de Título

**Estudio sobre la reducción de poros por impresión 3D FDM utilizando
microondas.**

POR

Benjamín Díaz Sarzosa

Profesor Guía:
Carlos Medina

Agosto-2023
Concepción (Chile)

Agradecimientos

Ha sido un largo viaje hasta llegar hasta este momento, donde podre finalmente culminar mi etapa como estudiante universitario. Para comenzar quiero agradecerme, por ser bondadoso con mi persona, por darme tiempos libres, por no rendirme cuando sólo quería hacerlo, por perseverar, porque a pesar de los altos y bajos esta transición me ha enseñado cosas maravillosas de la vida y me ha ayudado en mi crecimiento personal. Quiero agradecer a mi madre y su típica frase de que me quiere ver sentado con los políticos y a mi padre con su típica frase de que me quería llevar al hipódromo a ver como todos los caballos terminan su “carrera”. Ambos pilares fundamentales en mi vida, que se lo orgullosos que se sienten de verme terminar esta etapa. Quiero agradecer a mi hermano por sus buenos consejos, por su apoyo y por ayudarme con la motivación. Quiero agradecer a Keila mi novia, que ha sido parte de todo este viaje desde sus inicios, viéndome reír, llorar, alegre, frustrado, etc. En donde siempre he podido contar con ella, agradeciendo toda la ayuda que me ha brindado, conocernos fue una coincidencia que me regalo la universidad y ha sido de las más hermosas sin duda.

Agradecer también a mi abuelita Alicia (que en paz descanse) y a mi abuelita Elena por darme plata para los pasajes como si me estuvieran entregando droga, bello gesto de su parte. Y para finalizar, pero no menos importante, agradecer a todas aquellas personas que he conocido a lo largo de esta etapa, profesores, compañeros y amigos que se han formado en el camino, personas que me han regalado bonitas enseñanzas y buenos momentos de la vida. Mis más sinceros agradecimientos.

Esta memoria está dedicada a todos aquellos que recorrieron este camino conmigo.

Resumen

La impresión tridimensional ha adquirido una gran relevancia en los últimos años, y el ácido poliláctico (PLA) se destaca como uno de los filamentos más utilizados en el proceso de impresión 3D, una forma de fabricación aditiva (AM) en la cual la impresora deposita el material semifundido en capas sucesivas, formando la pieza en la dimensión deseada. Sin embargo, las propiedades mecánicas de las piezas impresas en 3D suelen ser bajas debido a la formación deficiente de enlaces entre los filamentos y a las tensiones térmicas residuales generadas por las variaciones de temperatura durante la impresión 3D del filamento. Para mejorar estas propiedades mecánicas y la estructura del PLA impreso, se pueden aplicar tratamientos térmicos después del proceso de impresión 3D.

El objetivo de esta investigación es evaluar el impacto del tratamiento térmico en los parámetros mecánicos y estructurales del PLA impreso en 3D. Para ello, se llevaron a cabo impresiones con PLA estándar utilizando orientaciones de impresión horizontal y vertical. Posteriormente, las probetas impresas fueron sometidas a tratamientos térmicos en un microondas, utilizando potencias de 100 MW durante 210 segundos (T1) y 60 MW durante 510 segundos (T2). El objetivo era alcanzar una temperatura en el rango de 90°C a 95°C con las mínimas deformaciones posibles. Luego, las probetas fueron sometidas a ensayos de tracción y observación microscópica para evaluar las mejoras en las propiedades mecánicas y estructurales del PLA.

Los valores del módulo elástico en las muestras sin tratamiento (ST) y en las muestras tratadas con T1 mostraron una estabilidad notable en ambas orientaciones de impresión: alrededor de 1450 MPa para 0° y 1470 MPa para 90°. Sin embargo, en las muestras tratadas con T2, se observaron fluctuaciones ligeramente mayores: 1350 MPa para 0° y 1440 MPa para 90°. Aunque la orientación de impresión tuvo un impacto algo más significativo en el caso de T2, en general, no pareció influir de manera significativa en el estudio. Esto sugiere que los tratamientos térmicos T1 y T2 afectaron más al módulo elástico que la orientación de impresión en sí. Los resultados obtenidos fueron más favorables para las probetas impresas con una orientación de 90°, como se pudo apreciar en las muestras microscópicas, las deformaciones observadas y los resultados de los ensayos de tracción.

Palabras clave: Acido poliláctico, fabricación aditiva, impresión 3D, tratamiento térmico.

Abstract

Three-dimensional printing has gained significant importance in recent years, with polylactic acid (PLA) standing out as one of the most used filaments in the 3D printing process, a form of additive manufacturing (AM) in which the printer deposits semi-melted material in successive layers, forming the desired object in three dimensions. However, the mechanical properties of 3D-printed parts often remain low due to inadequate bonding between filaments and residual thermal stresses generated by temperature variations during 3D printing of the filament. To enhance these mechanical properties and the structure of printed PLA, post-printing thermal treatments can be applied.

The aim of this research is to evaluate the impact of thermal treatment on the mechanical and structural parameters of 3D-printed PLA. Standard PLA prints were conducted using both horizontal and vertical printing orientations. Subsequently, the printed specimens were subjected to thermal treatments in a microwave, using power levels of 100 MW for 210 seconds (T1) and 60 MW for 510 seconds (T2). The objective was to reach a temperature in the range of 90°C to 95°C with minimal possible deformations. Afterward, the specimens underwent tensile tests and microscopic examination to assess improvements in the mechanical and structural properties of PLA.

The values of the elastic modulus in the untreated samples (ST) and in the samples treated with T1 showed remarkable stability in both printing orientations: around 1450 MPa for 0° and 1470 MPa for 90°. However, in the samples treated with T2, slightly higher fluctuations were observed: 1350 MPa for 0° and 1440 MPa for 90°. Although the printing orientation had a somewhat more significant impact in the case of T2, overall, it did not seem to influence the study significantly. This suggests that the thermal treatments T1 and T2 had a greater effect on the elastic modulus than the printing orientation itself. The results obtained were more favorable for the specimens printed with a 90° orientation, as evidenced by microscopic samples, observed deformations, and the results of the tensile tests

Keywords: Polylactic acid (PLA), additive manufacturing (AM), 3D printing, thermal treatment.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos.....	vii
Lista de Tablas	viii
Lista de Figuras	ix
Glosario	x
CAPÍTULO 1: Introducción.....	1
1.1 Contexto.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Metodología.....	3
1.4 Carta Gantt.....	4
CAPÍTULO 2: Estado del arte	5
CAPÍTULO 3: Métodos y materiales.....	12
3.1 Materiales	12
3.2 Proceso de tratamiento térmico	13
3.2 Ensayo de tracción.....	16
3.3 Microscopía	17
CAPÍTULO 4: Resultados y Discusiones	18
4.1 Deformaciones.....	18
4.2 Ensayos de tracción	20
4.3 Microscopía	22
CAPÍTULO 5: Conclusiones y Perspectivas Futuras.	27
Referencias	28

Lista de Tablas

Tabla 1: Planificación de actividades	4
Tabla 2: Especificaciones del Microondas.....	13
Tabla 3: Variables aplicadas en las muestras impresas.....	14
Tabla 4: Dimensiones de las probetas	19
Tabla 5: Resultados de los ensayos de tracción con las distintas variables.	21
Tabla 6: Valores de referencia para módulo elástico de algunos polímeros.	22
Tabla 7: Anchos de capa de las distintas muestras con sus distintos TT y orientación de impresión	25

Lista de Figuras

Figura 1: Resistencia media a la tracción (Fuente: [6])	6
Figura 2: Espacios visibles entre filamentos antes del tratamiento térmico (Fuente: [6])	6
Figura 3: Espacios entre filamentos después del tratamiento térmico (Fuente: [6])	6
Figura 4: Resultados de la prueba mecánica (Fuente: [7])	7
Figura 5: Imágenes de muestra del tratamiento térmico (Fuente: [7])	8
Figura 6: Probetas deformadas después del tratamiento térmico (Fuente: [8])	9
Figura 7: Curvas de tracción de las muestras de ensayo orientadas verticalmente (Fuente: [8])	9
Figura 8: Curvas de tracción de las muestras de ensayo orientadas horizontalmente (Fuente: [8])	9
Figura 9: Secciones transversales de las muestras de ensayo. (a) Sección transversal perpendicular de una muestra impresa horizontalmente; (b) sección transversal perpendicular de una muestra impresa verticalmente (Fuente: [8])	10
Figura 10: Muestras de prueba en la mesa de trabajo	12
Figura 11: Microondas utilizado de la Universidad de Concepción.	13
Figura 12: Probeta con el T1	14
Figura 13: Probeta con el T2	15
Figura 14: Máquina de ensayos mecánicos	16
Figura 15: Diseño de muestra de prueba estandar ASTM D638 tipo I	17
Figura 16: Probetas con orientación de 0° con los distintos tratamientos	18
Figura 17: Probetas con orientación de 90° con los distintos tratamientos	19
Figura 18: Gráficos de probetas sin tratamiento con distintas orientaciones. (a) Gráfico con orientación 90°; (b) Gráfico con orientación 0°	20
Figura 19: Gráficos de probetas con el T1 con distintas orientaciones. (a) Gráfico con orientación 90°; (b) Gráfico con orientación 0°	20
Figura 20: Gráficos de probetas con el T2 con distintas orientaciones. (a) Gráfico con orientación 90°; (b) Gráfico con orientación 0°	21
Figura 21: Secciones transversales perpendiculares de muestras sin tratamiento térmico. (a) Sección transversal probeta 0°; (b) Sección transversal probeta 90°	23
Figura 22: Secciones transversales perpendiculares de muestras con el T1. (a) Sección transversal probeta 0°; (b) Sección transversal probeta 90°	23
Figura 23: Secciones transversales perpendiculares de muestras con el T2. (a) Sección transversal probeta 0°; (b) Sección transversal probeta 90°	24
Figura 24: Ancho de capa en la sección transversal de la muestra ST con una orientación de 0°	25

Glosario

FDM: Fused Deposition Modeling.

AM: Additive Manufacturing

PLA: Ácido Poliláctico

T1: Tratamiento 1

T2: Tratamiento 2

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Contexto

El modelado por deposición fundida (FDM), más recientemente llamado extrusión de materiales, está ganando popularidad entre las técnicas de fabricación aditiva (AM) y la creación rápida de prototipos debido a su amplia disponibilidad, facilidad de uso y capital relativamente bajo, en comparación con otras técnicas de fabricación. Actualmente hay muchos filamentos disponibles para la impresión FDM, incluidos el ácido poliláctico (PLA), acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), alcohol polivinílico (PVA), glicol de tereftalato de polietileno (PETG), etc. El PLA es un filamento biodegradable obtenido por fermentación bacteriana a partir de productos agrícolas como el maíz, la patata y la yuca [1]. El PLA es ampliamente utilizado en diversas aplicaciones debido a su buen rendimiento y sus propiedades ecológicas siendo una de sus principales ventajas el ser biodegradable convirtiéndolo en la elección de un plástico respetuoso con el medio ambiente [2]. En FDM, la formación de enlaces entre dos filamentos continuos colocados en una cama de impresión ocurre en cuatro pasos distintos: contacto con la superficie, crecimiento de cuello, interfaz de difusión y aleatorización [3]. La unión así formada tiene muchos espacios entre los filamentos que reducen significativamente la resistencia de la pieza fabricada. Además, existe una diferencia significativa de temperatura entre el filamento impreso y el filamento que comienza a enfriarse después de la colocación [4]. Debido a esta distribución de temperatura, durante la impresión se genera parte de la tensión interna que reduce las propiedades mecánicas de la pieza impresa. Varios estudios han demostrado que las propiedades mecánicas de las piezas impresas mediante FDM son siempre inferiores a las de los procesos de fabricación tradicionales.

El tratamiento térmico se ha utilizado durante siglos para mejorar las propiedades mecánicas de los metales en general. Sin embargo, el tratamiento térmico no se limita a los metales. Normalmente, el tratamiento térmico se utiliza para reducir las tensiones internas desarrolladas durante el proceso de fabricación. Durante la impresión FDM, como se mencionó anteriormente, se crean muchas tensiones internas durante el proceso de impresión 3D. Además, el PLA es un polímero semicristalino que también tiene malas propiedades de cristalización. La temperatura de cristalización del PLA es muy importante cuando se trata de tratar térmicamente el material, ya que la temperatura del tratamiento térmico debe mantenerse alrededor de esta temperatura durante un período de tiempo [5].

La forma convencional de ejecutar los tratamientos térmicos es con hornos en los que se pueden establecer temperaturas constantes, pero a los cuales les toma demasiado tiempo calentar el elemento. Una propuesta alternativa para reducir el tiempo de ejecución del tratamiento térmico es utilizar un microondas para el calentamiento del material.

Con el fin de mejorar las propiedades mecánicas y reducir la porosidad del filamento impreso con FDM, se realizará un estudio experimental en el que se emplearan estos tratamientos térmicos para

aliviar las tensiones internas y reducir los vacíos formados durante el proceso de impresión y así lograr lo deseado.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Estudiar el efecto del tratamiento térmico en las propiedades mecánicas y la reducción de poros de un polímero PLA impreso en 3D tratado en microondas.

Objetivos Específicos

- Establecer una metodología de trabajo para efectuar los tratamientos térmicos en las probetas de PLA buscando un rango de temperatura ideal para evitar las deformaciones.
- Realizar los tratamientos térmicos a las distintas potencias del microondas y con sus respectivos tiempos controlados.
- Realizar ensayos mecánicos y observación bajo el microscopio a probetas tratadas y no tratadas térmicamente.
- Analizar los resultados y comparar los resultados obtenidos.

1.3 Metodología

Para la consecución de los objetivos anteriores se ejecutarán los siguientes pasos:

- Definir el tema a trabajar, planteando un breve contexto de éste y sus objetivos.
- Realizar un estudio de la literatura para comprender los resultados obtenidos.
- Establecer una metodología de trabajo para la aplicación del tratamiento térmico.
- Realizar ensayos mecánicos y observaciones bajo el microscopio antes y después del tratamiento térmico.
- Análisis de resultados, discusión y conclusiones

CAPÍTULO 2: Estado del arte

Actualmente la impresión 3D es de mucho interés en la industria manufacturera y se buscan nuevas aplicaciones o mejoras de sus propiedades mecánicas finales. Por lo cual, un método de mejora de propiedades es mediante la realización de un tratamiento térmico para reducir la porosidad del material impreso. La forma convencional de ejecutar los tratamientos térmicos es con hornos en los cuales se pueden establecer temperaturas constantes, pero toman demasiado tiempo en calentar. Una propuesta alternativa para reducir el tiempo de ejecución de los tratamientos térmicos es utilizar un microondas para el calentamiento del material.

Para ello se debe tener claro el apartado que se desea mejorar en el PLA, el cual corresponde a la reducción de poros del material, debido a que la microestructura del plástico se compone de estructuras semicristalinas (parcialmente organizadas) y amorfas (desordenadas). Por desgracia, el rápido calentamiento y enfriamiento del material en el proceso de impresión 3D aumenta el número de estructuras amorfas. Por lo tanto, el tratamiento térmico a las piezas impresas en 3D les permite reorganizar sus cadenas moleculares hacia una estructura más semicristalina, consiguiendo así mejores propiedades generales del material.

Autores como K. Jaswantraj [6] intentaron mejorar las propiedades mecánicas del filamento de ácido poliláctico (PLA) impreso en 3D con la ayuda del proceso de tratamiento térmico en un horno convencional, para lograr esto Jaswantraj seleccionó 3 temperaturas diferentes, 90°C, 100°C y 120°C por tres periodos de tiempo diferente, 60 minutos, 120 minutos y 240 minutos mientras que Harun seleccionó dos temperaturas de 60°C y 80°C, las cuales dejó reposar en el horno durante 10 minutos.

Luego de estos tratamientos ambos autores realizaron ensayos de tracción para verificar el aumento en la resistencia. Jaswantraj concluyó que las mejores propiedades obtenidas luego de aplicados los tratamientos térmicos se consiguieron a la temperatura de 100°C con un periodo de tiempo de 240 minutos aumentando la tracción promedio en un 72,3% con respecto a una probeta a la cual no se le aplicó tratamiento térmico. Como se muestra en la figura 1 donde “1” es la probeta sin tratamiento térmico y “2C” es la probeta calentada a 100°C durante 240 minutos.

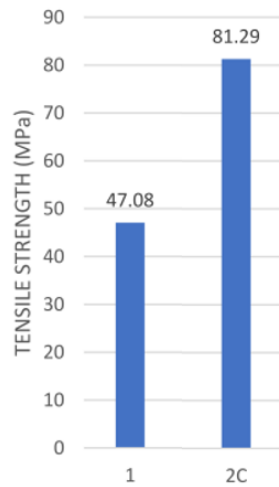


Figura 1: Resistencia media a la tracción (Fuente: [6])

Además, observó los cambios entre los espacios visibles de los filamentos antes y después del tratamiento térmico, concluyendo que hubo un cambio considerable de reducción entre las distintas capas del material, mostrada en la figura 2 y en la figura 3.



Figura 2: Espacios visibles entre filamentos antes del tratamiento térmico (Fuente: [6])



Figura 3: Espacios entre filamentos después del tratamiento térmico (Fuente: [6])

Por su parte, Harun Kocak [7] obtuvo distintos resultados de resistencia a la tracción con el tiempo y las temperaturas que seleccionó, las cuales se observan en la figura 4.

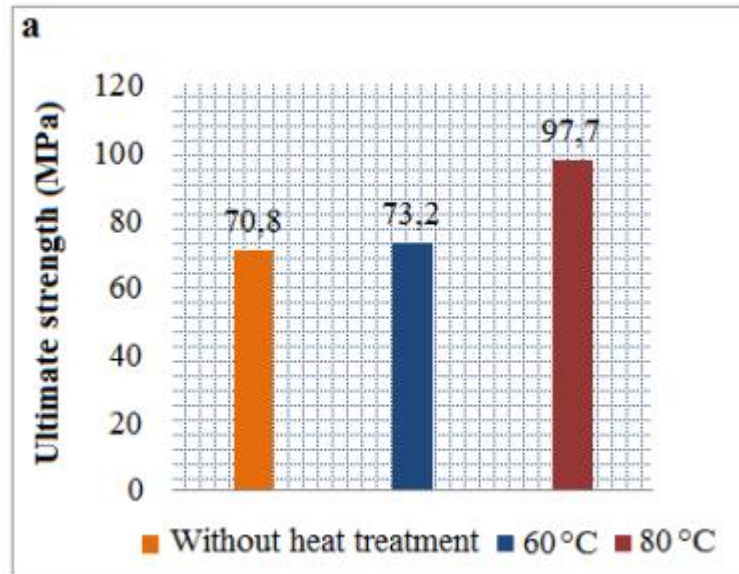


Figura 4: Resultados de la prueba mecánica (Fuente: [7])

Donde se aprecia una mejora del 37,9% de la probeta tratada térmicamente con respecto a la que no fue tratada. Además, observó los cambios en los espacios visibles a las distintas temperaturas, analizando que, al someter las probetas a un tratamiento térmico, dependiendo de la temperatura sufren deformaciones plásticas como se muestra en la figura 5, por lo que es importante mantener controlada la temperatura a la cual se somete la probeta.

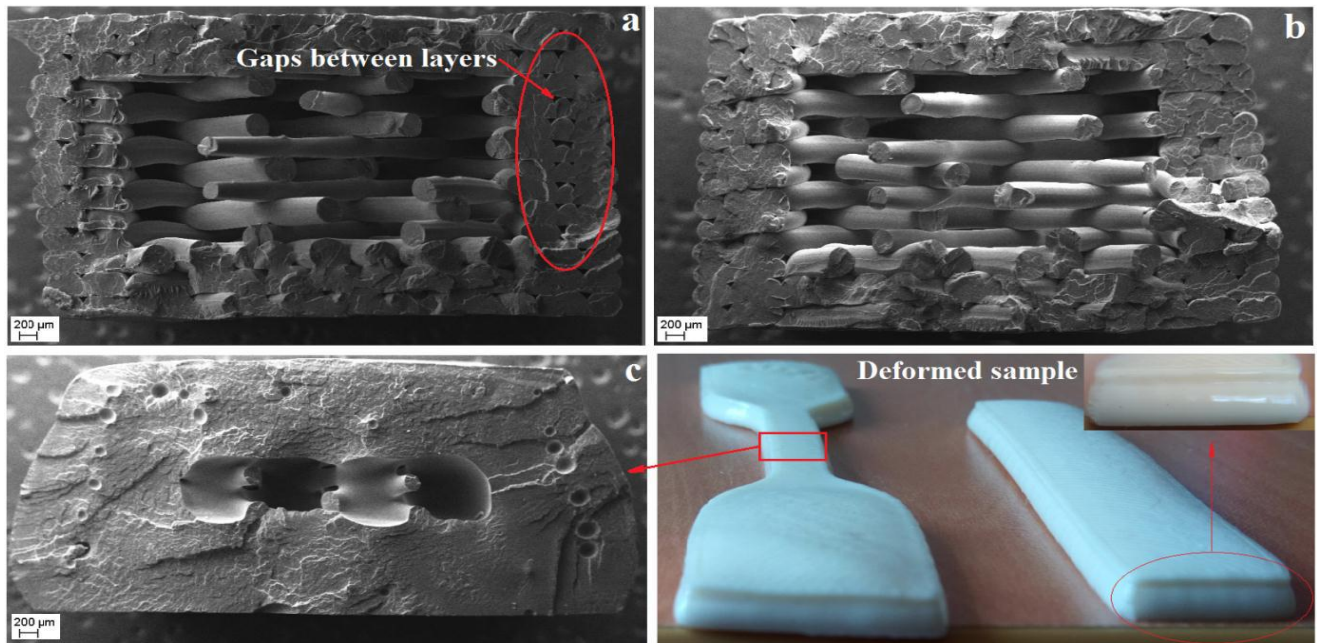


Figura 5: Imágenes de muestra del tratamiento térmico, (a) Muestra sin tratamiento térmico; (b) Muestra después del tratamiento a 60°C; (c) Muestra después del tratamiento térmico a 80°C; (d) Deformación de la muestra producto de los tratamientos térmicos. (Fuente: [7])

En general, ambos autores coinciden en sus estudios en que la temperatura idónea a la que se debe tratar la probeta, para que esta obtenga mejoras en sus propiedades y sufra la menor cantidad de deformaciones plásticas corresponde a un rango entre los 80°C y los 100°C.

Autores como Shabanah [8] que seleccionaron otros parámetros para su investigación con temperaturas de 55°C, 65°C y 80°C durante 5 h en el horno, posteriormente llevando a cabo el proceso de enfriamiento al aire libre a temperatura ambiente (20°C), también investigaron los cambios que se podrían producir al variar las orientaciones de impresión ya sean longitudinales o verticales.

Después del proceso térmico observo que las muestras tratadas térmicamente a 95°C se deformaron significativamente, mostradas en la figura 6.



Figura 6: Probetas deformadas después del tratamiento térmico (Fuente: [8])

Y al obtener los resultados en las pruebas de tracción concluyó que la orientación en las probetas afectó los resultados en las pruebas de tracción, ya que, las probetas impresas con orientación horizontal tuvieron una resistencia a la tracción promedio de 51,25 MPa, mientras que las probetas impresas con orientación vertical tuvieron una resistencia a la tracción promedio de 35,6 MPa. Ambos cambios en la orientación de impresión se realizaron a las mismas condiciones de tratamiento térmico, detallado anteriormente, los resultados de estos ensayos se observan en la figura 7 y figura 8.

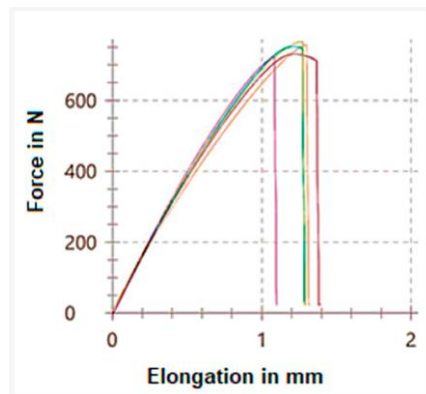


Figura 7: Curvas de tracción de las muestras de ensayo orientadas verticalmente (Fuente: [8])

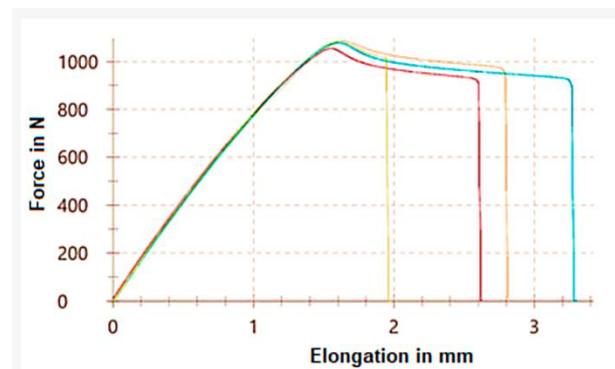


Figura 8: Curvas de tracción de las muestras de ensayo orientadas horizontalmente (Fuente: [8])

El autor no especificó detalladamente cuáles son las curvas que corresponden a cada probeta con su respectivo tratamiento térmico. Además, no analizó probetas en tracción sin tratamiento térmico, por lo que no es posible establecer una comparación entre las probetas con y sin tratamiento térmico.

Finalmente, y luego de los tratamientos térmicos en las probetas preparó las muestras para observación microscópica mediante preparación metalográfica, esmerilado y pulido. En la figura 9 analizó las secciones transversales de las muestras observando los espacios vacíos de éstas, concluyendo que, además de los parámetros de temperatura y tiempo del tratamiento térmico, el factor más relevante que influye en las propiedades finales de la probeta corresponde a la orientación de impresión del PLA según el autor.

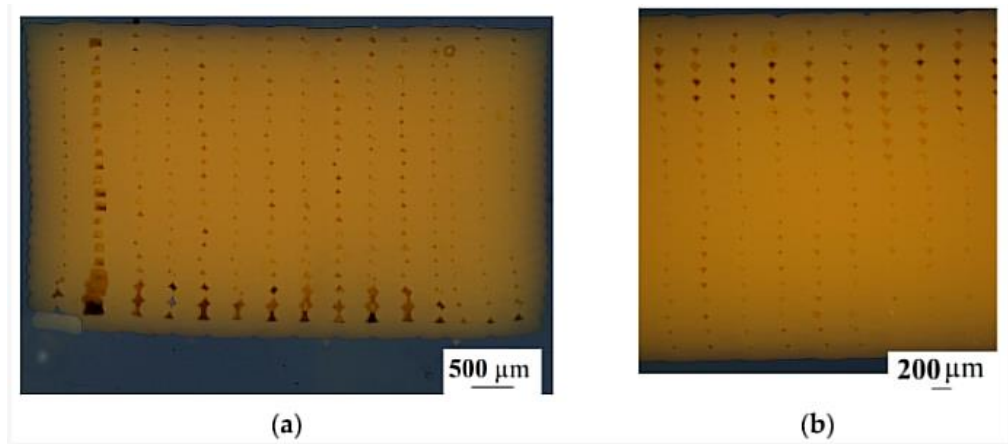


Figura 9: Secciones transversales de las muestras de ensayo. (a) Sección transversal perpendicular de una muestra impresa horizontalmente; (b) sección transversal perpendicular de una muestra impresa verticalmente (Fuente: [8])

Un artículo de Kedafi Belkhir [9] analizó el calentamiento de algunos polímeros mediante microondas, explicando que este proceso implica exponer un material a radiación electromagnética. Las frecuencias de las microondas oscilan entre 300 MHz y 300 GHz, correspondientes a longitudes de onda entre 1 m y 1 mm. Dependiendo de sus propiedades dieléctricas o magnéticas, ciertos materiales pueden interactuar con las microondas, lo que resulta en un aumento de la temperatura.

El calentamiento por microondas se deriva del movimiento de cargas (dipolos/iones) en el material, conocido como calentamiento volumétrico [10]. En muchos casos, las características específicas del calentamiento por microondas ofrecen ventajas notables, como ahorro de tiempo y energía en el procesamiento de polímeros, calentamiento rápido que conlleva a reacciones químicas más eficientes y rápidas, así como una selectividad química y la posibilidad de realizar reacciones sin solventes. No obstante, también existen limitaciones, como la fuga térmica, calentamiento no uniforme y desafíos en la medición precisa de la temperatura.

En su trabajo, el autor realizó una investigación bibliográfica sobre el calentamiento por microondas en diversos polímeros, incluido el PLA. Concluyó que esta técnica se diferencia del calentamiento convencional por su rapidez, capacidad de calentar en volumen y selectividad. Se emplea en campos como el procesamiento de polímeros y la química, demostrando ventajas como el ahorro de energía y tiempo, una mayor velocidad y rendimiento en reacciones químicas, así como la mejora de la pureza y propiedades de los productos. Esta tecnología se basa en la interacción entre ondas electromagnéticas y la materia, especialmente en polímeros polares. Además, puede aplicarse a polímeros no polares mediante la incorporación de absorbentes de microondas. Sin embargo, lograr una regulación precisa de la temperatura constituye un desafío en la implementación exitosa de esta técnica, ya que las propiedades dieléctricas de los polímeros varían con la temperatura, lo que requiere un enfoque de modelado para un mejor control del proceso.

El autor no se enfocó en buscar mejoras en las propiedades mecánicas o estructurales del PLA u otros materiales. Más bien, su enfoque estuvo en estudiar la reacción del PLA al ser calentado mediante microondas, obteniendo resultados positivos, pero identificando áreas de mejora.

En términos generales, varios autores buscan mejorar las propiedades del filamento PLA impreso en 3D tipo FDM a través de tratamientos térmicos en hornos, seguidos de ensayos de tracción o impacto para evaluar las nuevas propiedades del material. Sin embargo, pocos autores han intentado demostrar la eficacia del calentamiento del PLA mediante microondas. El objetivo de este estudio es analizar los beneficios o cambios que sufrirá el PLA evitando deformaciones significativas del material, aplicando las temperaturas adecuadas y reduciendo los tiempos de exposición del filamento. Además, se tomarán en cuenta los parámetros de orientación de impresión para analizar los diversos resultados obtenidos.

CAPÍTULO 3: Métodos y materiales

3.1 Materiales

Las muestras de prueba fueron preparadas utilizando el proceso FDM y se utilizaron la impresora Creality Ender – 3 v2 y el software Ultimaker Cura 5.3.0. El material de filamento utilizado fue Cicla PLA con un diámetro de $1,75 \pm 0,04$ mm. Las muestras se imprimieron a una velocidad de 50 mm/s. Las muestras impresas presentaban una geometría que se ajusta a la norma ASTM D638 tipo I para muestras de ensayos de tracción, con una longitud de 165 mm, ancho de 13 mm y espesor de 3 mm. Las muestras de prueba se imprimieron en orientaciones verticales (muestras posicionadas de manera horizontal en la figura) y horizontales (muestras posicionadas de manera vertical en la figura). Las orientaciones de las probetas de prueba se muestran en la figura 10.

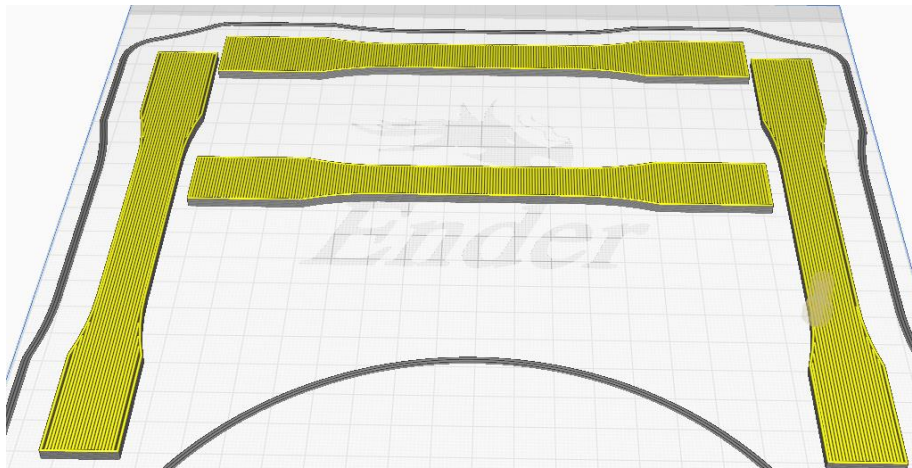


Figura 10: Muestras de prueba en la mesa de trabajo

La mesa de trabajo se precalentó a 50°C y la extrusora fundió el filamento PLA a 200°C . El espesor de la capa preparada fue de 0,2 mm, y los parámetros seleccionados se eligieron en base a las recomendaciones del fabricante del filamento. Todos los especímenes se realizaron con 15 capas, manteniendo una orientación constante. El tiempo promedio de enfriamiento de las probetas fue de 5 horas, y este proceso se llevó a cabo a temperatura ambiente.

3.2 Proceso de tratamiento térmico

El tratamiento térmico se llevó a cabo en el microondas de la universidad de Concepción el cual se aprecia en la figura 11 y sus especificaciones en la tabla 2.



Figura 11: Microondas utilizado de la Universidad de Concepción.

Tabla 2: Especificaciones del Microondas.

Modelo	TH - 20 DM
Potencia	800 W
Tensión	230V ~ 50Hz

En este estudio, se seleccionaron distintos parámetros para tratar las probetas utilizando el microondas. Se realizaron numerosas pruebas variando el tiempo y la potencia del microondas para alcanzar un rango de temperatura estimado de 90 ~ 95°C, considerado el más adecuado para el tratamiento térmico de las probetas sin que sufran una deformación significativa, el cual se concluyó después de realizar las numerosas pruebas en el microondas.

Finalmente, las variables seleccionadas y aplicadas a las probetas impresas con orientación vertical y orientación longitudinal se muestran en la tabla 3

Tabla 3: Variables aplicadas en las muestras impresas

Nombre Tratamiento	Tiempo	Potencia [W]	Rango de temperatura esperada
ST (Sin Tratamiento)	0 minutos	0	0°C
T1 (Tratamiento 1)	3 minutos con 30 segundos	100	90 - 95°C
T2 (Tratamiento 2)	8 minutos con 30 segundos	60	90 - 95°C

Después de cada tratamiento se dejaba reposar el microondas por 10 minutos para que la temperatura interna de este descendiera y así la siguiente probeta a tratar no se viera afectada por el tratamiento anterior. Con la cámara termográfica Fluke Ti32 y gracias a su visión infrarroja fue posible analizar la temperatura a la que llegaron las probetas después de haber sido expuestas a las variables anteriormente mencionadas, se muestran en las figuras 12 y figura 13.

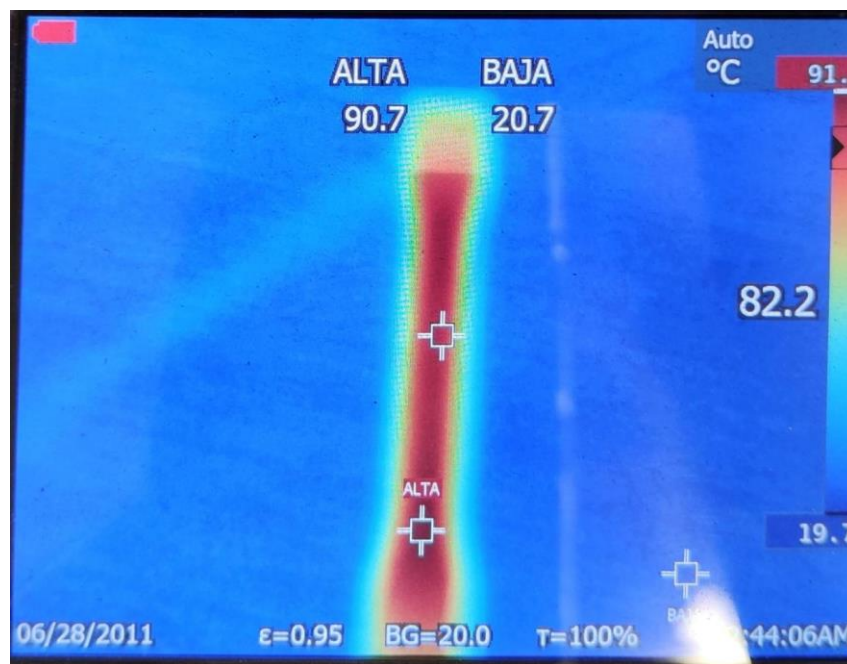


Figura 12: Probeta con el T1



Figura 13: Probeta con el T2

3.2 Ensayo de tracción

El ensayo de tracción se realizó en la máquina de ensayos mecánicos de la Universidad de Concepción modelo Zwick/Roell z005 que se aprecia en la figura 14.



Figura 14: Máquina de ensayos mecánicos

En la figura 15 se muestra el diseño de las muestras de ensayo que fueron tratadas térmicamente y luego traccionadas.

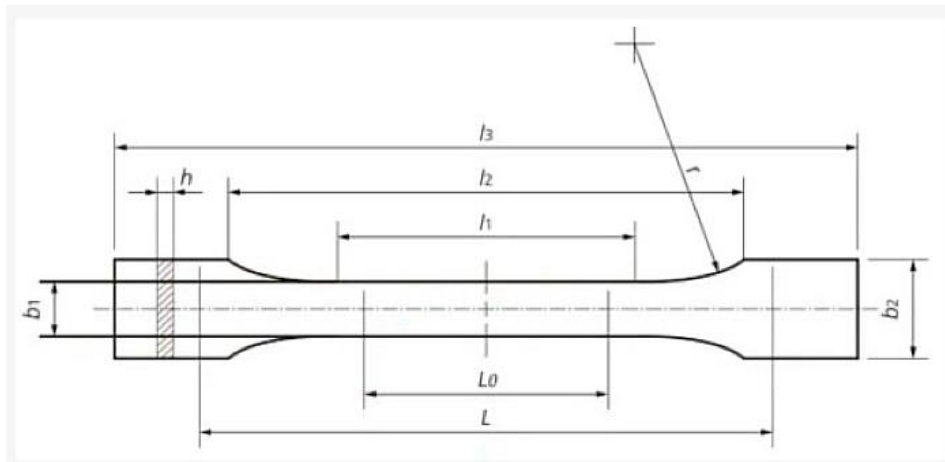


Figura 15: Diseño de muestra de prueba estándar ASTM D638 tipo I

Se llevó a cabo el ensayo de tracción con el fin de determinar la resistencia a la tracción de las muestras en función de su orientación de impresión y los tratamientos térmicos aplicados. En total, se ensayaron 18 muestras, 9 con orientación vertical y 9 con orientación horizontal, dividiéndose en 3 especímenes para cada tratamiento térmico. De estos ensayos, se generaron gráficos para cada orientación de la muestra junto con su respectivo tratamiento térmico. Además, se elaboraron tablas que contienen los datos extraídos de estos ensayos.

3.3 Microscopía

Para corroborar la eficiencia de la impresión se utilizó un microscopio óptico Leica DMi8. Se realizaron ensayos de las secciones transversales de las muestras, las cuales fueron sometidas a tratamiento térmico y orientadas tanto vertical como horizontalmente. Las muestras se prepararon mediante preparación metalográfica, esmerilado y pulido para su posterior observación microscópica.

CAPÍTULO 4: Resultados y Discusiones

El propósito de los experimentos consistía en comprobar el comportamiento estructural de las muestras sometidas a tratamiento térmico y los cambios que experimentaron, considerando las diferentes orientaciones de impresión. El tratamiento térmico se llevó a cabo aplicando las variables que se indican anteriormente en la tabla 3.

4.1 Deformaciones.

Después del proceso de tratamiento térmico, las muestras tratadas a las distintas temperaturas sufrieron algunas deformaciones de tamaño. Las deformaciones de las probetas se muestran en la figura 16 y figura 17.

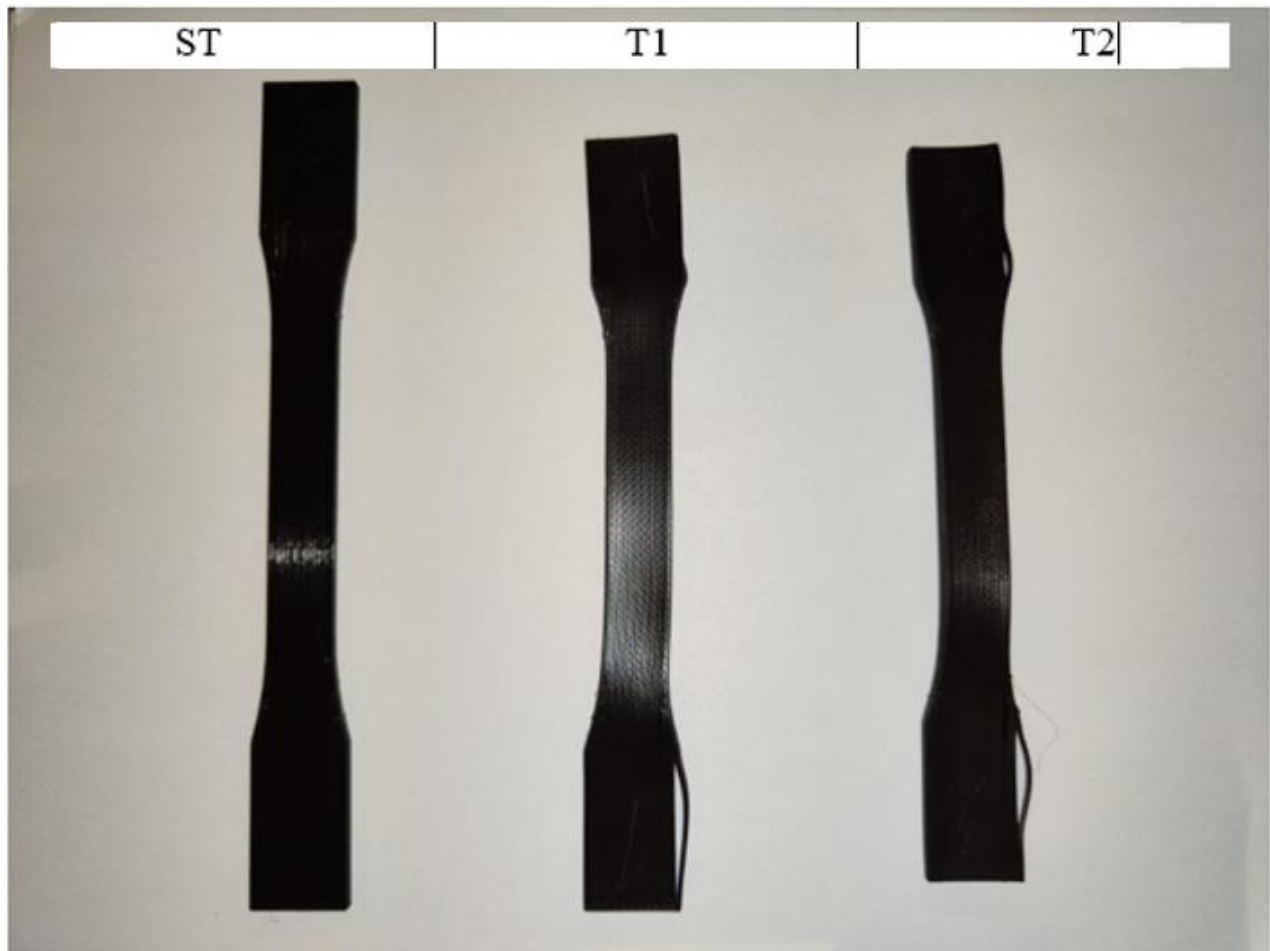


Figura 16: Probetas con orientación de 0° con los distintos tratamientos.



Figura 17: Probetas con orientación de 90° con los distintos tratamientos.

A simple vista, es fácil notar que las probetas con orientación de 0° fueron las que sufrieron las mayores deformaciones, ya sea en tamaño o incluso al doblarse ligeramente. Por otro lado, las probetas con orientación de 90° variaron ligeramente su tamaño. Estos detalles se presentan de mejor manera en la tabla 4, donde se muestra la longitud, ancho y espesor de las distintas probetas con las diferentes orientaciones.

Tabla 4: Dimensiones de las probetas

Orientación	Tratamiento	Largo [mm]	Ancho [mm]	Espesor [mm]
0°	ST	165	13	3
	T1	152	13	2,9
	T2	146	13	3
90°	ST	165	13	3
	T1	162	12,5	3
	T2	161	12,3	3

4.2 Ensayos de tracción

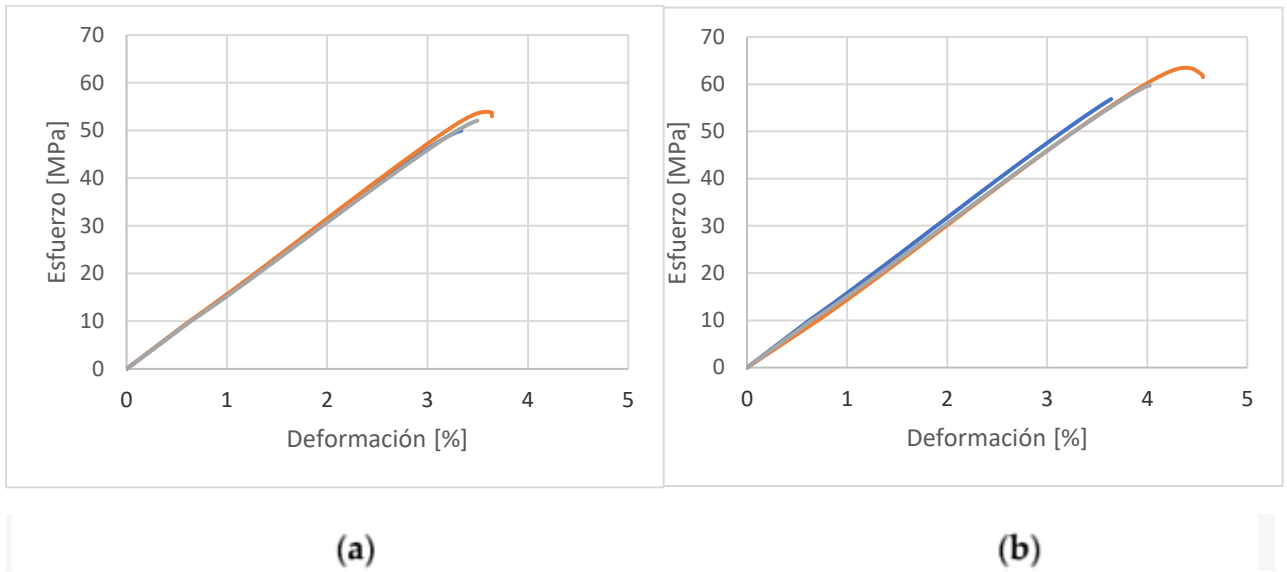


Figura 18: Gráficos de probetas sin tratamiento con distintas orientaciones. (a) Gráfico con orientación 90°; (b) Gráfico con orientación 0°

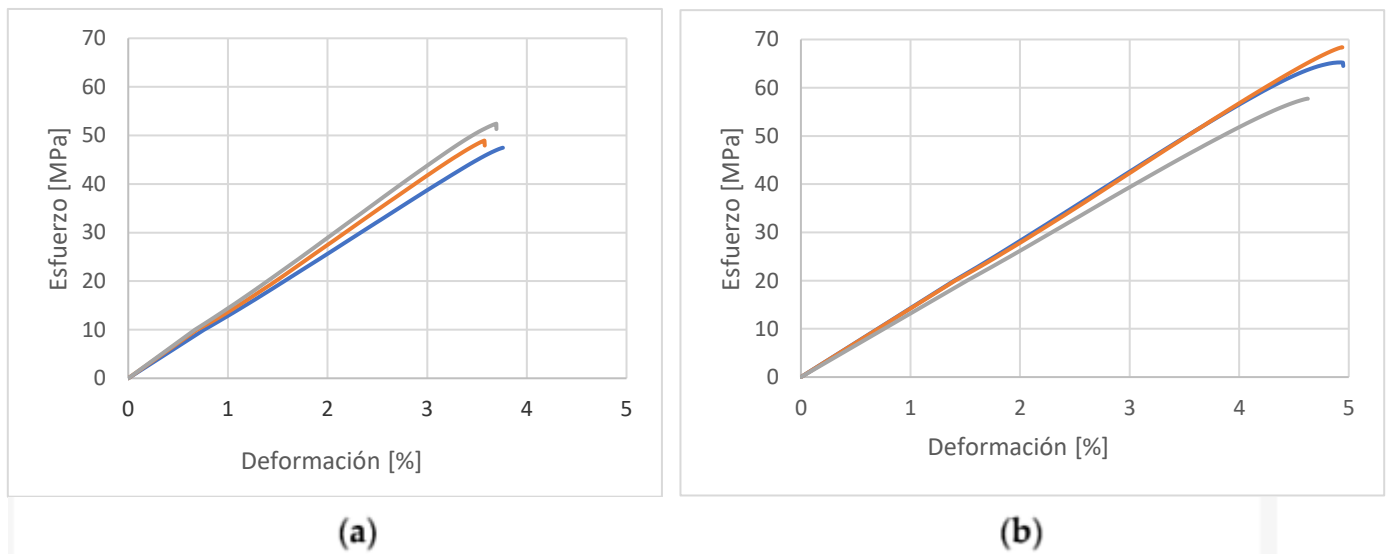


Figura 19: Gráficos de probetas con el T1 con distintas orientaciones. (a) Gráfico con orientación 90°; (b) Gráfico con orientación 0°

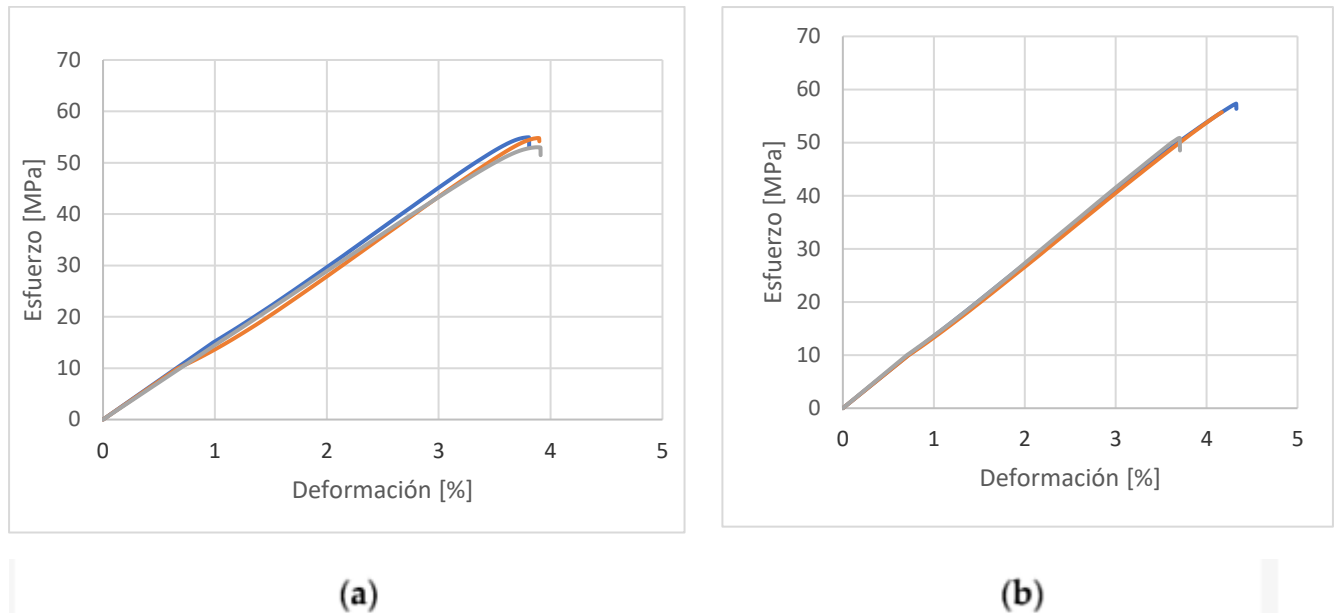


Figura 20: Gráficos de probetas con el T2 con distintas orientaciones. (a) Gráfico con orientación 90°; (b) Gráfico con orientación 0°

Tabla 5: Resultados de los ensayos de tracción con las distintas variables.

Orientación	Tratamiento	Módulo elástico (Promedio) (MPa)	Esfuerzo máximo (Promedio) (MPa)	Deformación máxima (Promedio) (%)	Desviación estándar (Módulo elástico)
0°	ST	1450	59,34	4,07	0,19
	T1	1370	63,52	4,84	0,15
	T2	1350	53,52	4,06	0,12
90°	ST	1470	51,65	3,49	0,12
	T1	1370	48,89	3,67	0,13
	T2	1440	52,87	3,87	0,22

El módulo elástico a tracción no mostró mejoras significativas para la orientación de 0°, ya que las muestras sometidas a los tratamientos 1 y 2 experimentaron una disminución del 5.52% y 6.90%, respectivamente, en comparación con las muestras sin tratamiento (ST). Del mismo modo, para las muestras con orientación de 90°, se observaron reducciones del 6.80% y 2% en los valores de módulo elástico para los tratamientos 1 y 2, respectivamente, en comparación con las muestras sin tratamiento.

Por otro lado, el esfuerzo máximo en las muestras con orientación de 0° aumentó en un 7% en las muestras del T1 en comparación con las muestras ST. Mientras que para la orientación de 90°, el esfuerzo máximo disminuyó un 5.34% en comparación con las muestras ST.

Con respecto a las muestras del T2, el esfuerzo máximo en la orientación de 0° disminuyó un 9.8% en comparación con las muestras ST. Mientras que para la orientación de 90° , el esfuerzo máximo aumentó un 2.36% en comparación con las muestras ST.

En cuanto a la deformación máxima, en las muestras con orientación de 0° , aumentó un 18.9% en las muestras del T1 en comparación con las muestras ST. Mientras que para la orientación de 90° , la deformación máxima disminuyó un 0.24% en comparación con las muestras ST.

Finalmente, en las muestras con orientación de 0° , la deformación máxima aumentó un 5.15% en las muestras del T2 en comparación con las muestras ST. Mientras que para la orientación de 90° , la deformación máxima aumentó un 10.9% en comparación con las muestras ST.

En la tabla 6 se expusieron resultados de módulo elástico de otros polímeros encontrados en la literatura [11], para así poder realizar una comparación de los valores con respecto al módulo elástico del PLA.

Tabla 6: Valores de referencia para módulo elástico de algunos polímeros.

Polímero	Módulo Elástico (MPa)
Policarbonato (PC)	2380
Tereftalato de Polietileno (PET)	3300
Polietileno (PE)	1080
Polipropileno (PP)	1140 - 1550

Es importante tener en cuenta que estos valores corresponden a los polímeros en sus estados base, como filamentos, y no a polímeros transformados en estructuras o probetas, como es el caso del PLA que estamos analizando. Por lo tanto, no es apropiado establecer una comparación directa con los datos de la literatura, ya que no comparten las mismas condiciones de prueba.

4.3 Microscopía

En la figura 21 se observan las muestras ST en donde se aprecian la mayor cantidad de poros, en la figura 22 y figura 23 se pueden observar las secciones transversales de las probetas, en las cuales se visualizan una menor o nula cantidad de espacios vacíos que se forman debido al sistema de impresión capa por capa. Es evidente que los tratamientos térmicos T1 y T2 han reducido la porosidad de las muestras.

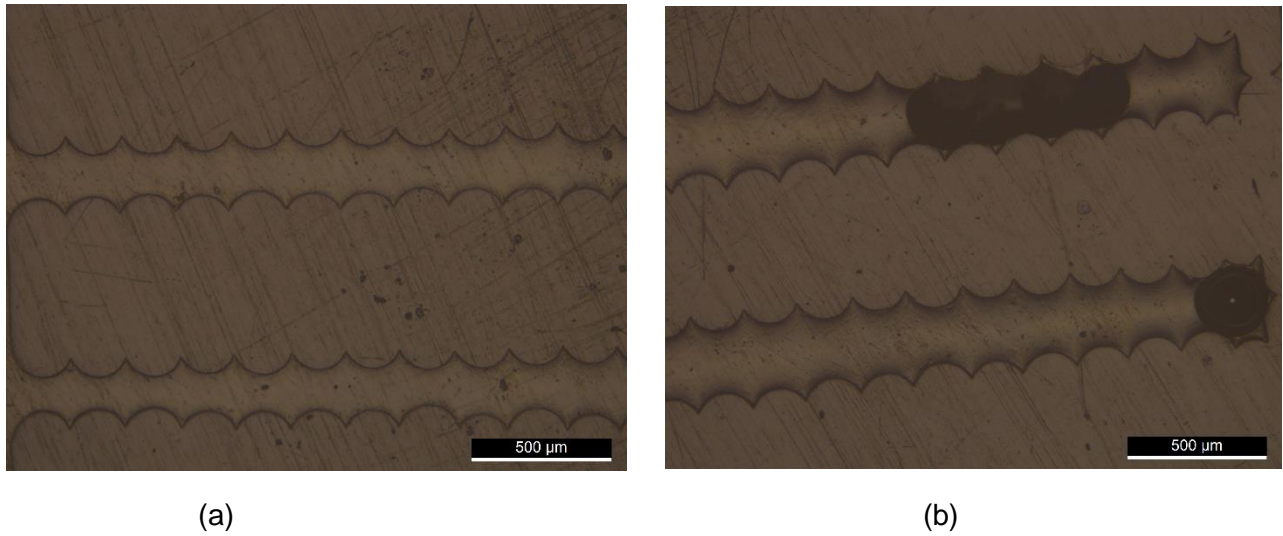


Figura 21: Secciones transversales perpendiculares de muestras sin tratamiento térmico. (a) Sección transversal probeta 0°; (b) Sección transversal probeta 90°.

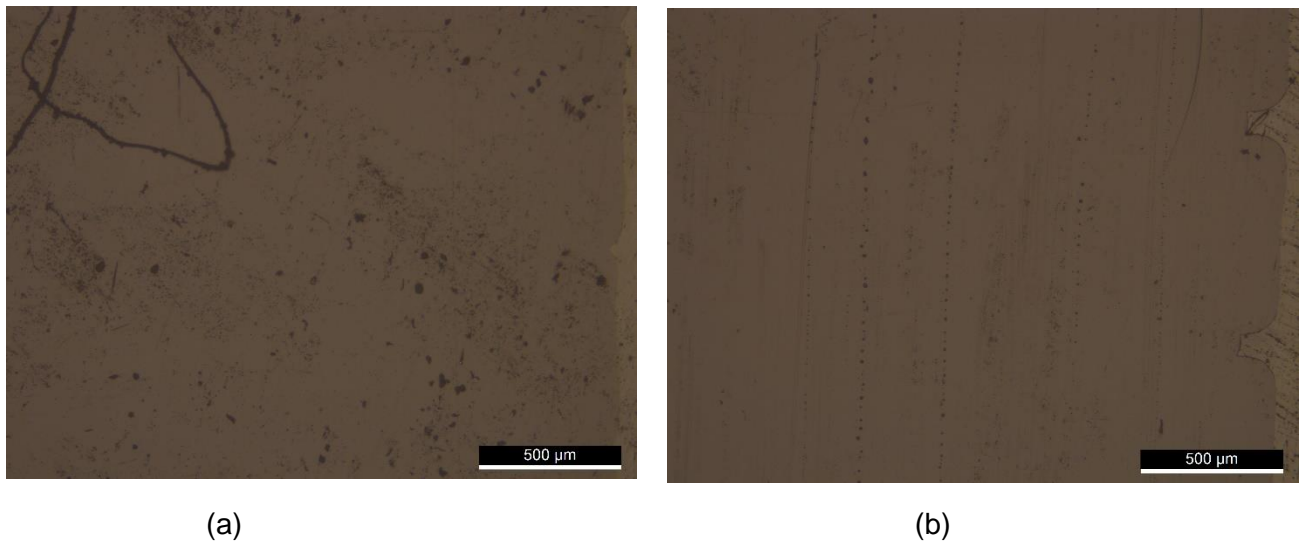


Figura 22: Secciones transversales perpendiculares de muestras con el T1. (a) Sección transversal probeta 0°; (b) Sección transversal probeta 90°.

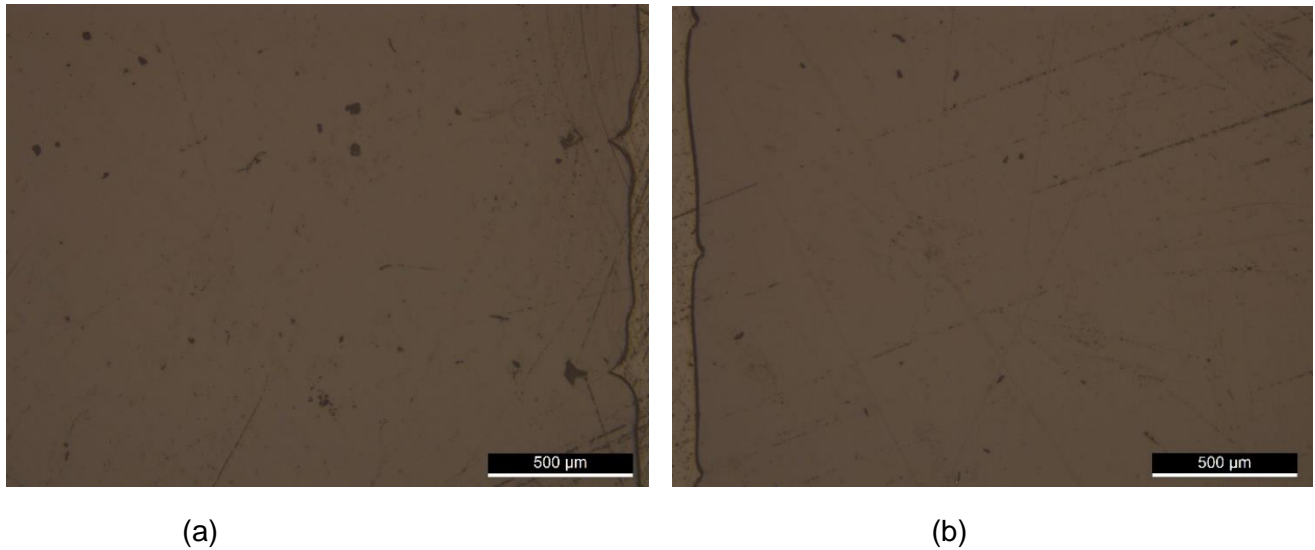


Figura 23: Secciones transversales perpendiculares de muestras con el T2. (a) Sección transversal probeta 0°; (b) Sección transversal probeta 90°.

En las figuras obtenidas a través de microscopía, también se midieron los anchos entre las diferentes capas de las muestras. El ancho de capa corresponde a la distancia entre los espacios/poros visibles en la sección transversal de la muestra, los cuales se forman durante el proceso de impresión 3D, la cual se muestra en la figura 24. Estas mediciones se realizaron utilizando el software ImageJ, el cual calcula la distancia mediante una escala establecida con la distancia en píxeles y la distancia conocida de 500 μm .

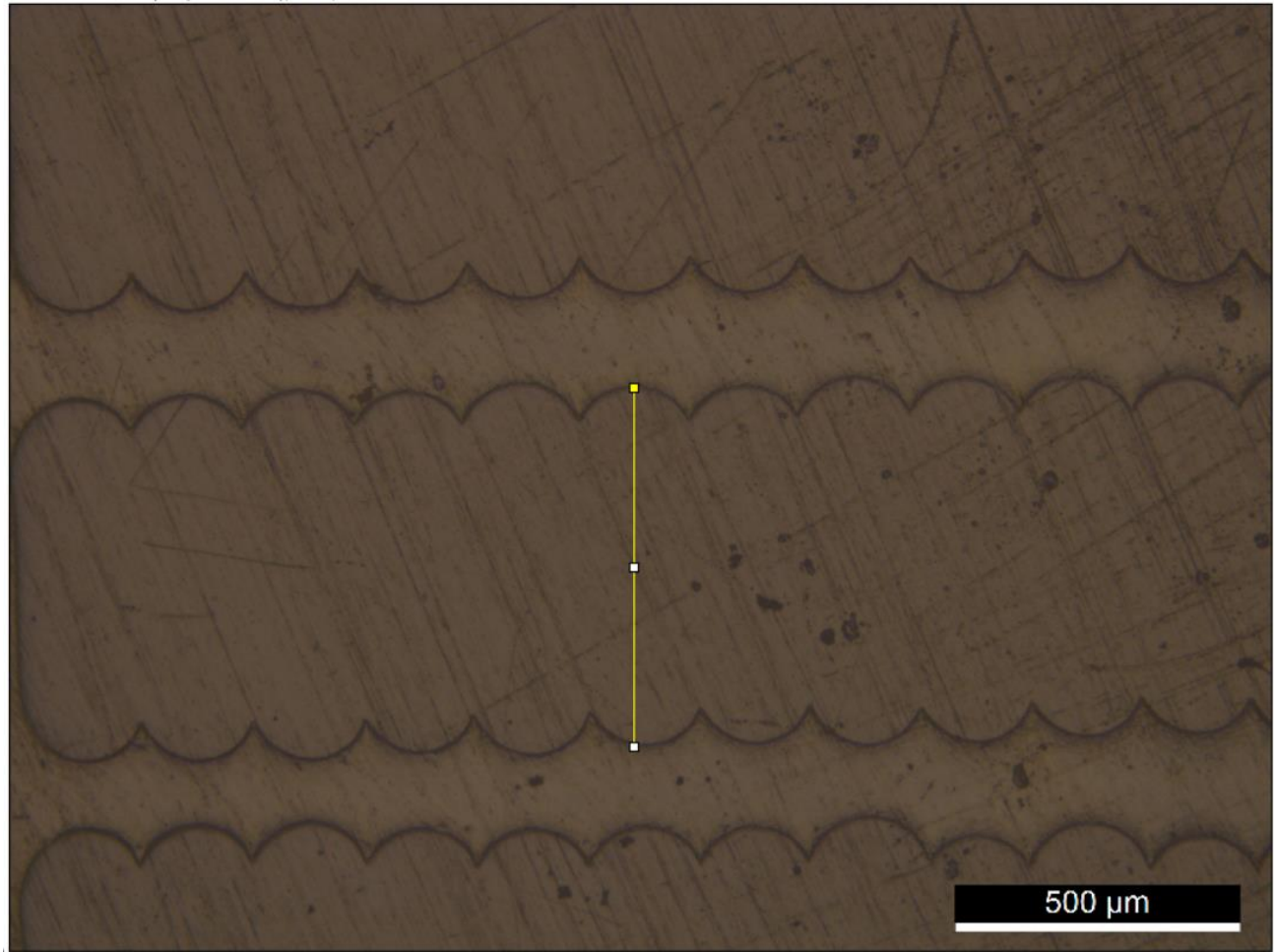


Figura 24: Ancho de capa en la sección transversal de la muestra ST con una orientación de 0°.

Las medidas de los distintos anchos de capa se muestran en la tabla 7

Tabla 7: Anchos de capa de las distintas muestras con sus distintos TT y orientación de impresión

Medida	Ancho (μm)	Tratamiento térmico	Orientación
1	643.98	ST	0°
2	573.3	ST	90°
3	801.05	T1	0°
4	767.02	T1	90°
5	803.66	T2	0°
6	783.34	T2	90°

Estas medidas son determinantes, ya que refuerzan la teoría de que, al aplicar los tratamientos térmicos, esta longitud aumenta, lo que fortalece la unión entre las capas y comprueba la reducción

de los poros. Se observa que el segundo tratamiento térmico conlleva la mayor disminución de los poros, siendo así el más efectivo de los dos en este aspecto.

Las pruebas de microscopía de las muestras impresas y sometidas al primer tratamiento térmico mostraron diferencias relevantes en su estructura. En la figura 22, se observó una disminución de la porosidad después de aplicar el tratamiento térmico, demostrando su efectividad con una pequeña deformación de tamaño en comparación con la muestra original, en el caso de la dirección de impresión de 90° . En contraste, para la dirección de impresión de 0° , se observó una deformación más notoria en el tamaño en comparación con la muestra original, pero igualmente una gran disminución de los poros con respecto a ésta.

En el caso del segundo tratamiento, representado en la figura 23, se observa el mismo comportamiento que para el primer tratamiento, ya que existe un alto porcentaje de efectividad en la disminución de los poros si se comparan las figuras 22 y 23 con respecto a la figura 21 la cual corresponde a la muestra ST. Sin embargo, en contraste, la muestra con una orientación de impresión de 90° no presentó una deformación apreciable con respecto a la muestra original, mientras que para la muestra impresa con una orientación de 0° se apreció una deformación más notoria.

La efectividad del tratamiento térmico se alinea con los resultados de investigaciones previas realizadas por otros autores en términos de la reducción de poros [12]. Si comparamos los resultados obtenidos utilizando un horno para los tratamientos térmicos con el enfoque del microondas en este estudio, podemos observar que ambos métodos logran reducir efectivamente los poros. No obstante, el microondas se destaca por su eficiencia en términos de tiempo y energía.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que el uso del microondas podría haber tenido un ligero impacto en las propiedades mecánicas del PLA y haber causado pequeñas deformaciones en las muestras impresas. Esto podría deberse a la forma en que el microondas calienta la muestra, ya que puede generar puntos más calientes en algunas áreas que en otras, como se evidenció en las figuras 12 y 13. Además, es posible que el PLA no absorba de manera uniforme todas las ondas de microondas, lo que podría dar lugar a una distribución desigual del calor y debilitar el material en ciertas zonas, lo que a su vez afectaría las propiedades mecánicas.

CAPÍTULO 5: Conclusiones y Perspectivas Futuras.

Las direcciones de impresión tienen un impacto en las propiedades mecánicas de los materiales. En el presente estudio, se verificó esta influencia, además de observar la disminución de poros mediante tratamientos térmicos. El propósito de esta investigación fue desarrollar un proceso de tratamiento térmico capaz de reducir los poros en productos PLA impresos en 3D y, al mismo tiempo, buscar mejorar sus propiedades mecánicas.

Al observar las figuras 22 y 23 y compararlas con la figura 21, es evidente que el tratamiento térmico utilizando microondas es un método adecuado para reducir los poros en las muestras impresas en 3D [9]. La orientación de impresión es un factor relevante que afecta la deformación de las muestras. Sin embargo, en lo que respecta a las propiedades mecánicas, este factor no tuvo una influencia significativa en todas ellas. Al analizar los valores del módulo elástico para la orientación de 0° y 90° en las muestras sin tratamiento (ST), se observa que ambos valores fluctúan muy poco, siendo de 1450 MPa y 1470 MPa respectivamente. Esto también se aplica a las muestras con el tratamiento T1, donde en ambas orientaciones de impresión se obtuvieron valores del módulo elástico de 1370 MPa. En cambio, en las muestras con el tratamiento T2, se registraron valores que fluctúan un poco más: 1350 MPa para la orientación de 0° y 1440 MPa para la orientación de 90° . Aunque en este último caso la orientación de impresión parece tener algo más de relevancia, en general, no influyó significativamente en el módulo elástico.

El calentamiento por microondas ya ha demostrado sus beneficios en términos de ahorro de energía y tiempo. Sin embargo, nuevos desafíos surgen en cuanto a la capacidad de los materiales para absorber uniformemente las microondas o en relación con la calibración y regulación de la temperatura en el microondas. En futuros proyectos, se recomienda enfocarse en el uso de dispositivos para controlar la temperatura interna del microondas o en procesos de modelado para una mejor comprensión del comportamiento de los polímeros bajo la irradiación de microondas. Además, sería conveniente considerar la incorporación de absorbentes de microondas según el tipo de polímero a calentar, ya que estos actúan como receptores de microondas y podrían contribuir a un calentamiento más uniforme del polímero [13].

Además, para una perspectiva futura más amplia, se recomienda analizar estos tratamientos con una dirección de impresión de 45° . Esto permitiría realizar comparaciones y comprender mejor las diferencias que puedan surgir. A esta investigación también podría añadirse el análisis de un nuevo polímero sometido al tratamiento por microondas. Incluso, sería interesante considerar la variación de la impresora y los parámetros de impresión para una comprensión más profunda de cómo estos factores pueden afectar la muestra impresa.

Referencias

- [1] Auras, R., 2010. Poli (ácido láctico). En: Enciclopedia de ciencia y tecnología de polímeros. <https://doi.org/10.1002/0471440264.pst275>.
- [2] Farah, S., Anderson, DG, Langer, R., 2016. Propiedades físicas y mecánicas del PLA, y sus funciones en aplicaciones generalizadas: una revisión exhaustiva. *Adv. Entrega de drogas Rev.* 107, 367–392. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012>. Guduru, KK, Srinivasu,
- [3] Bellehumeur, C., Li, L., Sun, Q., Gu, P., 2004. Modelización de la formación de enlaces entre filamentos de polímero en el proceso de modelado por deposición fundida. *J. Manuf. Proceso.* 6 (2), 170–178. [https://doi.org/10.1016/S1526-6125\(04\)70071-7](https://doi.org/10.1016/S1526-6125(04)70071-7).
- [4] Yang, H., Zhang, S., 2018. Simulación numérica del campo de temperatura y el campo de tensión en Modelado por deposición fundida. *J. Mec. ciencia Tecnología* 32, 3337–3344. <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0636-4>.
- [5] Srithep, Y., Nealey, P., Turng, L., 2013. Efectos del tiempo y la temperatura de recocido en el comportamiento de cristalinidad y resistencia al calor del ácido poliláctico (PLA) moldeado por inyección. *polim. Ing. ciencia* 53, 580–588. <https://doi.org/10.1002/pen.23304>.
- [6] N. Jayanth, K. Jaswantraj, S. Sandeep, N. Harish Mallaya, S. Raghul Siddharth, 2021. Efecto del tratamiento térmico en las propiedades mecánicas del PLA impreso en 3D.
- [7] Harun Kocak 2019. Efecto del tratamiento térmico aplicado a muestras de PLA impresas en 3D sobre propiedades mecánicas.
- [8] M. Shabanah, M. Jordanov, Z. Nyikes, L. Tóth, T. Anna Kovacs, 2023. El efecto del tratamiento térmico en las propiedades mecánicas de un polímero PLA impreso en 3D.
- [9] Kedabi Belkhir, Guillermo R; Frederic B, 2022. Procesamiento de polímeros bajo microondas.
- [10] Y. Sun, P. Zhang, J. Hu et al., "Una revisión sobre la irradiación de microondas a las propiedades de los geopolímeros: mecanismos y desafíos" *Construcción y Materiales de Construcción*, Vuelo. 294, pág. 123491, 2021.
- [11] <https://www.sonelastic.com/es/fundamentos/tablas-propiedades-materiales/polimeros.html>
- [12] Liao, Y.; Liu, C.; Coppola, B.; Barra, G.; Di Maio, L.; Encarnado, L.; Lafdi, K. Efecto de la porosidad y la cristalinidad en las propiedades del PLA impreso en 3D. *Polímeros* 2019, 11, 1487.
- [13] M. Green y X. Chen, "Progreso reciente de nanomateriales para la absorción de microondas", *revista de materiómica*, vol. 5, núm. 4, págs. 503–541, 2019.