

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



UNIVERSITAS
Miguel Hernández

"CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL
DE LA ADHESIÓN TÉRMICA DE PIEZAS
IMPRESAS EN PLA"

TRABAJO FIN DE GRADO

Febrero 2026

AUTOR: Salvatore Miguel Palermo Pastor

DIRECTORES: Miguel Fabra Rodríguez

Francisco Javier Simón Portillo

Gracias a mis padres, amigos y profesores por su apoyo constante, paciencia y confianza durante estos cuatro años de mi vida.



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1 IMPRESIÓN 3D.....	6
1.2 MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA (FDM)	7
1.3 ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA)	9
1.4 ESTADO DEL ARTE	11
1.4.1 MÉTODOS DE UNIÓN.....	12
1.4.2 UNIONES MEDIANTE TRATAMIENTOS TÉRMICOS	14
2. OBJETIVOS.....	19
3. RECURSOS	21
3.1 MATERIAL DE IMPRESIÓN.....	21
3.2 EQUIPO Y SOFTWARE.....	22
3.2.1 IMPRESORA 3D	22
3.2.2 HORNO	27
3.2.3 MÁQUINA DE ENSAYOS UNIVERSAL	27
4. DESARROLLO EXPERIMENTAL	31
4.1 SELECCIÓN DEL ELEMENTO DE SUJECIÓN.....	31
4.1.1 METODOLOGÍA.....	33
4.1.2 RESULTADOS	36
4.1.3 DISCUSIÓN.....	37
4.2 ENSAYO DE TRACCIÓN CON CINTA ADHESIVA	40
4.2.1 METODOLOGÍA.....	40
4.2.2 RESULTADOS	42
4.2.3 DISCUSIÓN.....	42
4.3 ENSAYOS DE IMPACTO POR CAÍDA.....	46
4.3.1 METODOLOGÍA.....	47

4.3.2 RESULTADOS	50
4.3.3 DISCUSIÓN	51
4.4 ARENA COMO SUSTENTO PARA PIEZAS CON VOLADIZO.....	52
4.4.1 METODOLOGÍA.....	52
4.4.2 RESULTADOS	53
4.4.3 DISCUSIÓN	54
5. CONCLUSIONES.....	55
6. REFERENCIAS	58



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gráfico que muestra las previsiones de crecimiento de la impresión 3D en diversas industrias tecnológicas [4].	6
Figura 2. Esquema del proceso de impresión 3D por deposición fundida (FDM) [5].	8
Figura 3. Asa del techo del coche, hecha con PLA y materiales metálicos [9].	10
Figura 4. Probetas antes de ensayarse unidas mediante resina epoxi [14].	12
Figura 5. Probetas diseñadas con dientes en la zona de unión [19].	12
Figura 6. Probetas cilíndricas previas al proceso de soldadura por fricción [21].	13
Figura 7. A la izquierda, superficie tras ensayo de tracción de una muestra no tratada térmicamente. A la derecha, la misma tratada térmicamente [22].	15
Figura 8. Comparación de diversas probetas con distintas configuraciones de impresión [24].	16
Figura 9. Tratamiento térmico de dos probetas unidas mediante pinzas en el horno [25].	17
Figura 10. Imagen de las probetas fracturadas tras el ensayo de impacto Charpy [26].	18
Figura 11. Impresora UltiMaker S3, utilizada para imprimir los aviones.	22
Figura 12. Visualización previa del proceso de impresión de los aviones.	23
Figura 13. Impresora 3D utilizada para las probetas y semiesferas.	23
Figura 14. Vista previa de las probetas con un 100 % de relleno.	24
Figura 15. Visualización previa del proceso de impresión de las probetas.	25
Figura 16. Vista previa de las esferas con un 15 % de relleno.	26
Figura 17. Visualización previa del proceso de impresión.	26
Figura 18. Horno convencional de cocina usado para el tratamiento térmico.	27
Figura 19. Máquina de ensayos universal utilizada en este trabajo.	28
Figura 20. Pantalla principal del programa testXpert III.	28
Figura 21. Probeta lista para ensayar.	29
Figura 22. Dimensiones de la probeta de Tracción en T en mm.	32
Figura 23. Machihembrados probados.	33
Figura 24. Preparación para el tratamiento térmico con las pinzas.	33
Figura 25. Imanes empleados comparados con una moneda de 50 céntimos.	34
Figura 26. Preparación para el tratamiento térmico con los imanes.	34
Figura 27. Cintas adhesivas probadas.	35
Figura 28. Preparación para el tratamiento térmico con la cinta.	36

Figura 29. Diagrama fuerza-deformación de los diferentes métodos de sujeción.	37
Figura 30. Antes y después del tratamiento térmico con los imanes.	38
Figura 31. Antes y después del tratamiento térmico con las pinzas.	39
Figura 32. Antes y después del tratamiento térmico con la cinta adhesiva.	39
Figura 33. Probetas preparadas para el tratamiento térmico.	41
Figura 34. Diagrama fuerza-deformación para cada tiempo de exposición a 120 °C. ...	43
Figura 35. Diagrama fuerza-deformación para cada tiempo de exposición a 140 °C. ...	43
Figura 36. Diagrama fuerza-deformación para cada tiempo de exposición a 160 °C. ...	44
Figura 37. Probeta que ha sufrido una rotura.	45
Figura 38. Comparación entre probeta con rotura y la probeta que más resistencia ha soportado sin rotura.	45
Figura 39. Dimensiones de la esfera en mm.	46
Figura 40. Notas adhesivas para el ensayo de las esferas de PLA.	47
Figura 41. Esfera sometida a 180 °C dentro del horno.	47
Figura 42. Cinta adhesiva colocada alrededor de la esfera antes de ser sometida al tratamiento térmico.	48
Figura 43. Esfera sobre la bandeja del horno antes de ser sometida al tratamiento térmico.	48
Figura 44. Esfera enterrada totalmente en la arena.	49
Figura 45. Esfera sobre la arena en el horno para realizar el tratamiento térmico.	50
Figura 46. dos esferas sometidas al mismo tratamiento térmico.	51
Figura 47. Esferas colocadas sobre arena tras el tratamiento térmico.	52
Figura 48. El avión en el horno sobre el metal y sobre la arena.	53
Figura 49. Aviones tras ser sometidos al tratamiento térmico con diferentes sustentos.	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de los ensayos del estudio [25].....	17
Tabla 2. Propiedades del filamento de PLA.....	21
Tabla 3. Resultados de los ensayos de determinación del método de sujeción.....	37
Tabla 4. Resultados del ensayo a diferentes temperaturas y tiempos con la cinta adhesiva.....	42
Tabla 5. Altura de rotura media de las esferas.....	50



1. INTRODUCCIÓN

1.1 IMPRESIÓN 3D

La fabricación aditiva, comúnmente conocida como impresión 3D, constituye hoy en día uno de los pilares tecnológicos más importantes dentro de la industria. A diferencia de procesos más tradicionales como pueden ser el mecanizado o conformado, la fabricación aditiva se basa en la creación de objetos tridimensionales a partir de la adición sucesiva de material capa por capa mediante tecnologías de diseño asistido por computador (CAD). Esta característica le da a la impresión 3D unas capacidades difícilmente alcanzables mediante técnicas tradicionales, como puede ser la creación de geometrías complejas o una elevada personalización [1].

La impresión 3D se originó a principios de la década de 1980 como una técnica de prototipado rápido destinada a acelerar el desarrollo de productos en industrias muy concretas como la aeroespacial o automotriz. En sus inicios se utilizaban tecnologías como la estereolitografía (SLA). Hoy en día gracias al desarrollo tecnológico han surgido nuevas técnicas como la fusión de polvo o la fotopolimerización [2]. A lo largo de los años, la mejora de equipos, materiales y software ha propiciado que la impresión 3D pase de ser una tecnología con un uso exclusivo de prototipado a ser usada en aplicaciones productivas y funcionales, incluyendo el uso de piezas finales en sectores como el de la automoción, medicina o ingeniería industrial [3]. Hay previsiones estadísticas que indican que para el año 2026, la tasa de crecimiento anual compuesta para las industrias médica, automotriz, aeroespacial y alimentaria será del 18,2 %, 29,07 %, 22,17 % y 32,05 % [4].

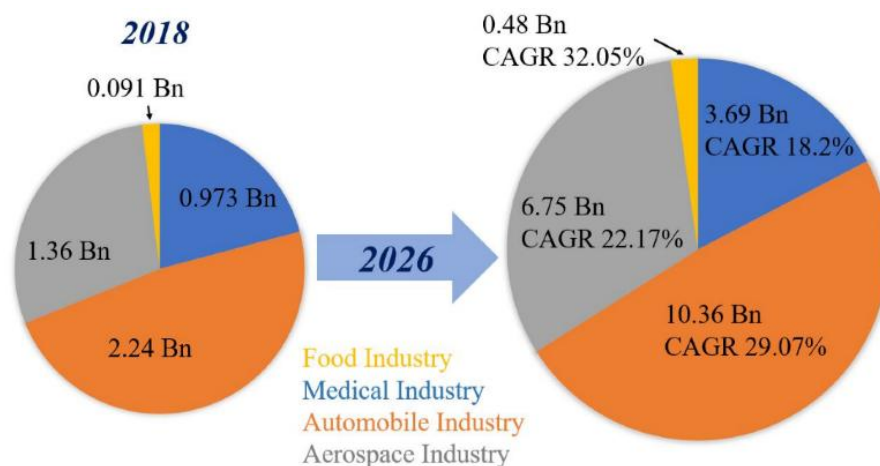


Figura 1. Gráfico que muestra las previsiones de crecimiento de la impresión 3D en diversas industrias tecnológicas [4].

Uno de los principales factores que ha propiciado la expansión de la fabricación aditiva han sido la diversificación de materiales y tecnologías. Mientras que en sus inicios solo se usaban plásticos simples, actualmente se imprimen todo tipo de materiales avanzados gracias a nuevos procesos como la fusión por láser de polvo o la deposición fundida. También el abaratamiento de costes de las impresoras 3D ha facilitado el uso en la educación, laboratorios de investigación y pequeñas empresas, ampliando así su utilización más allá del ámbito industrial [2].

Hoy en día, la impresión 3D se considera una tecnología clave dentro del concepto de industria 4.0, debido a su integración en sistemas digitales de diseño, simulación y producción conectada, así como a la inteligencia artificial. La capacidad de fabricar piezas bajo demanda, personalizadas y con geometrías complejas hace que la fabricación aditiva sea una herramienta estratégica para cadenas de suministro flexibles y eficientes. Además de todo ello, el creciente interés por materiales sostenibles y la optimización de procesos refuerzan el uso de esta tecnología en sistemas productivos modernos debido a su potencial para reducir residuos y tiempos de producción.

1.2 MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA (FDM)

El modelado por deposición fundida (FDM), también conocido como fabricación por filamento fundido (FFF), es uno de los métodos de fabricación aditiva más ampliamente utilizados en la actualidad. Se basa en el principio de extrusión de material termoplástico fundido, donde un filamento sólido se calienta hasta su punto de fusión y se deposita capa por capa para construir la pieza final según un modelo digital [5]. El FDM fue desarrollado por Scott Crump a finales de la década de 1980 y comercializado a principios de los años 90, lo que supuso un avance significativo en la democratización de la impresión 3D debido a su simplicidad y bajo coste relativo frente a otras tecnologías de fabricación aditiva más complejas [4][5].

El proceso FDM emplea un filamento termoplástico continuo que se alimenta desde una bobina hacia una cámara de calentamiento. Allí, el material se funde parcialmente y es forzado a través de una boquilla caliente, depositándose sobre una plataforma en movimiento controlada por coordenadas. La acumulación progresiva de este material fundido da lugar a la pieza tridimensional capa por capa [4][5]. El control del movimiento de la boquilla o de la cama de impresión se realiza mediante el software de control que

interpreta el archivo STL generado durante el proceso de *slicing*. La velocidad de desplazamiento, el patrón de deposición y la interacción térmica material/entorno determinan en gran medida la calidad final de la pieza [5]. En la Figura 2 se observa de una forma más clara cada una de las partes más relevantes que tienen las impresoras 3D.

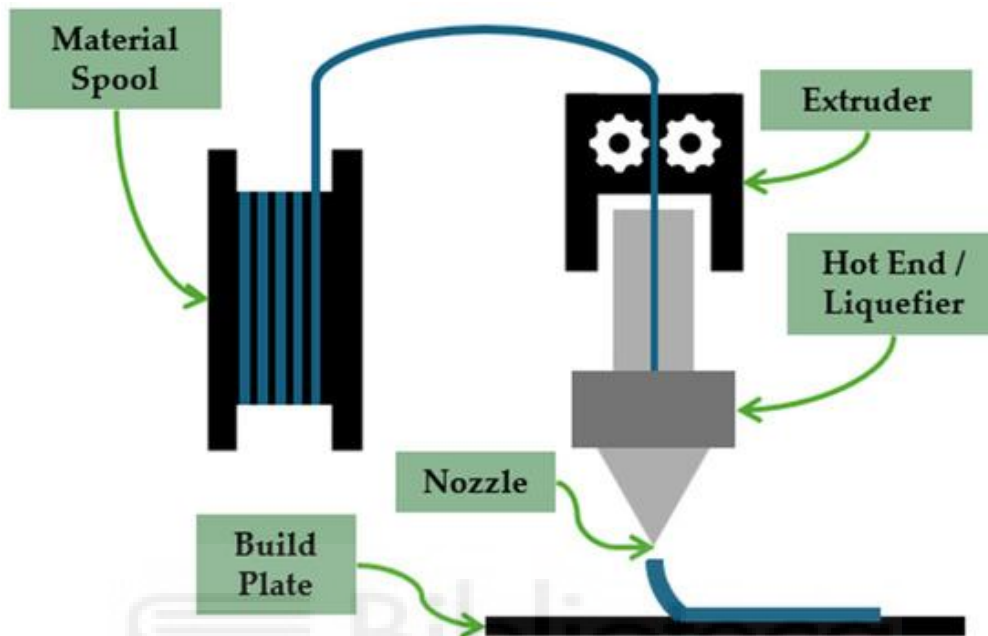


Figura 2. Esquema del proceso de impresión 3D por deposición fundida (FDM) [5].

Para esta tecnología se requiere tener en cuenta varios parámetros que van a tener un impacto directo en la calidad y las propiedades mecánicas de la pieza final. Existen estudios con recomendaciones acerca de cómo elegir estos parámetros según lo que se busque:

- La orientación de impresión es clave para buscar obtener el mejor rendimiento mecánico. Para una mayor resistencia, rigidez y ductilidad se recomienda imprimir de canto.
- Si se busca minimizar el tiempo de impresión se recomiendan espesores de capa altos y velocidades de alimentación elevadas. Esto, no obstante, reduce la resistencia, rigidez y ductilidad.
- Si se busca comportamiento dúctil con un óptimo tiempo de impresión, resistencia y rigidez, se recomiendan espesores de capa altos y velocidades de alimentación bajas para orientaciones vertical y de canto. Sin embargo, para orientaciones de canto y planas se recomiendan espesores de capa bajos y velocidades de alimentación altas.

Es por ello por lo que es importante que todos estos parámetros estén bien medidos y seleccionados cuidadosamente para lo que se busca, ya que pequeñas variaciones en estos pueden generar efectos significativos en el acabado final de la pieza y en su resistencia mecánica [6].

Entre las ventajas del modelado por deposición fundida se encuentra su accesibilidad a todo tipo de personas ya que hoy en día hay modelos muy variados de precio que hacen que personas puedan tener una impresora 3D y no solo las industrias y centros de investigación. Otras ventajas son su gran versatilidad a la hora de generar piezas con geometrías y materiales muy variados, así como la capacidad que tienen para integrarse en sistemas CAD/CAM. Estas ventajas han favorecido su difusión en ámbitos como la educación, la investigación, la fabricación rápida de prototipos y la producción personalizada de componentes, desde automoción a biomédica, con un coste competitivo y tiempos de desarrollo reducidos [5].

A pesar de estos avances, también hay alguna que otra limitación, entre las que se encuentra su calidad superficial menor en comparación con otras tecnologías como SLA o SLS, sus propiedades mecánicas anisotrópicas que requieren análisis específicos para aplicaciones estructurales o la sensibilidad a la hora de establecer los parámetros clave, lo que puede llevar a resultados variables.

A pesar de ello, esta tecnología continúa consolidándose como una alternativa industrial viable debido a su buena relación coste-eficacia, la disponibilidad de materiales económicos, su alta fiabilidad y el bajo coste de mantenimiento e inversión inicial [4].

1.3 ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA)

Dentro de todos los materiales que se utilizan en el modelado por deposición fundida, uno de los que más destaca es el ácido poliláctico (PLA). Este es un polímero termoplástico alifático perteneciente a la familia de los poliésteres, obtenido a partir de recursos renovables como el almidón de maíz, la caña de azúcar o la remolacha. Debido a su origen biobasado y a su carácter biodegradable bajo determinadas condiciones, el PLA ha despertado un notable interés tanto en aplicaciones industriales como en el ámbito de la investigación, especialmente en el contexto de la fabricación aditiva mediante tecnologías de extrusión de material [7]. En impresión 3D, el PLA se ha consolidado como uno de los materiales más utilizados en tecnología FDM, principalmente por su facilidad de

procesado, baja contracción térmica y buena estabilidad dimensional durante la fabricación. Estas características lo convierten en un material especialmente adecuado para estudios experimentales, prototipado funcional y fabricación de piezas con requisitos geométricos exigentes [8].

Debido a todas las propiedades mencionadas anteriormente, el PLA ha sido estudiado en diversas industrias. En el ámbito automotriz, Albu *et al.* [9] diseñó un conjunto formado por piezas de PLA combinadas con materiales metálicos, para posteriormente utilizarlo durante un año en el habitáculo de un automóvil con el objetivo de estudiar su estabilidad dimensional. En la industria aeroespacial, Yagnik *et al.* [10] estudió el uso de PLA para aplicaciones aeroespaciales, presentando un estudio de caso en ingeniería aeronáutica que mostró el FDM como un medio principal para reducir de forma rentable el tiempo del ciclo de desarrollo del producto (ahorro de costes). Otros campos afectados por esta revolución de la fabricación aditiva son el de la robótica donde se han llegado a diseñar e imprimir una rueda omnidireccional compacta, optimizada para fabricar una pequeña serie de robots móviles omnidireccionales de tres ruedas [11], o el de la salud donde se realizó un andamiaje de PLA para usarlo como estructura soporte en ensayos de cultivo celular *in vitro* [12].

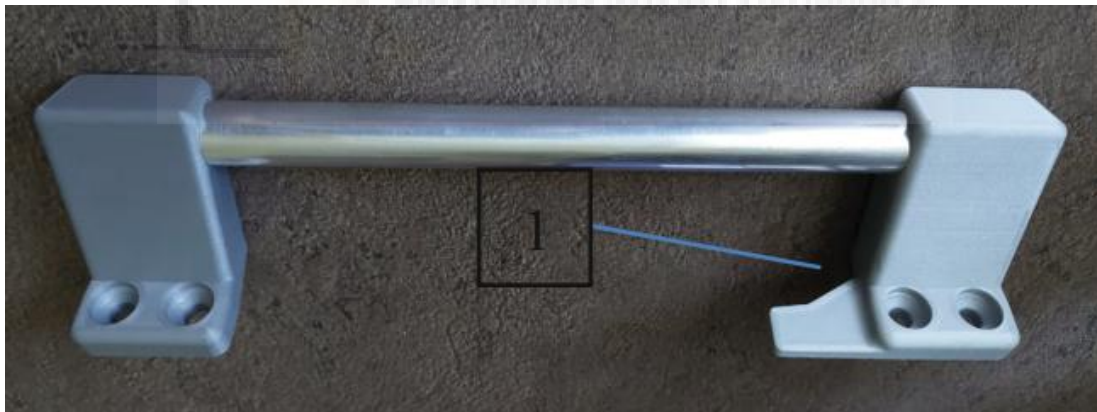


Figura 3. Asa del techo del coche, hecha con PLA y materiales metálicos [9].

Desde el punto de vista térmico, el PLA presenta una temperatura de transición vítrea (T_g) típicamente comprendida entre 55 y 65 °C, así como una temperatura de fusión en el rango aproximado de 150 a 180 °C, dependiendo de su grado de cristalinidad y de la formulación específica del filamento [7]. Estas temperaturas resultan especialmente relevantes en procesos de impresión FDM, donde el control térmico influye directamente en la adhesión entre capas y en la estabilidad dimensional de las piezas fabricadas. La proximidad de la temperatura de servicio a la temperatura de transición vítrea del PLA

implica que pequeñas variaciones térmicas pueden producir cambios significativos en su comportamiento mecánico. Por este motivo, el PLA es especialmente sensible a tratamientos térmicos posteriores a la impresión, como el recocido, que pueden modificar su microestructura interna y su grado de cristalinidad, afectando de forma directa a sus propiedades finales.

Una cosa para tener muy en cuenta y que será importante para el desarrollo de este trabajo será la influencia de los parámetros de impresión a la hora de realizar tratamientos térmicos con PLA. El comportamiento mecánico de este material fabricado mediante FDM está fuertemente condicionado por la naturaleza del proceso capa a capa. Diversos estudios han demostrado que las propiedades mecánicas del PLA impreso presentan una marcada anisotropía, con valores de resistencia y rigidez superiores en el plano de deposición respecto a la dirección perpendicular a las capas [6][13]. Parámetros de impresión como la temperatura de extrusión, el porcentaje de relleno, la orientación de fabricación y la altura de capa influyen de manera significativa en la resistencia a tracción y en el módulo elástico del material. En particular, una correcta selección de la temperatura de extrusión favorece la difusión molecular entre capas consecutivas, mejorando la cohesión intercapas y reduciendo la probabilidad de fallo por delaminación [6][13].

En el contexto del presente Trabajo Fin de Grado, el PLA se selecciona como material de estudio debido a su amplio uso en impresión 3D, su facilidad de procesado mediante FDM y su sensibilidad a tratamientos térmicos, lo que lo convierte en un candidato idóneo para analizar procesos de unión y recocido de piezas impresas. También el hecho de partir con literatura sobre el tema hace que se pueda realizar el trabajo con resultados previos que facilitan las interpretaciones y conclusiones de este.

1.4 ESTADO DEL ARTE

A pesar de sus ventajas, el modelado por deposición fundida presenta ciertas limitaciones, como la restricción del tamaño del volumen a fabricar o la dificultad para imprimir piezas con voladizos muy pronunciados. Una estrategia para superar estos desafíos consiste en dividir la geometría a fabricar en diferentes piezas que luego pueden unirse mediante adhesivos. En este trabajo se busca la unión de piezas y por eso se van a repasar los diversos métodos de unión que existen.

1.4.1 MÉTODOS DE UNIÓN

Diversos estudios han analizado la opción de estudiar la resistencia de estas uniones mediante ensayos a solape con probetas SLJ donde se utilizaron adhesivos y se valoraron diferentes orientaciones de impresión en ensayos a tracción. Entre ellos destacan uno en el que se usó resina epoxi [14], otro en el que se utilizó adhesivo acrílico [15] y finalmente uno con un reforzado con partículas [16].



Figura 4. Probetas antes de ensayarse unidas mediante resina epoxi [14].

Otra forma para mejorar la adhesión es el uso de diferentes diseños en las zonas de unión. Existen estudios que se han realizado usando diseño de uniones en ángulo [17], uniones con superficies onduladas [18] o dentadas [19].

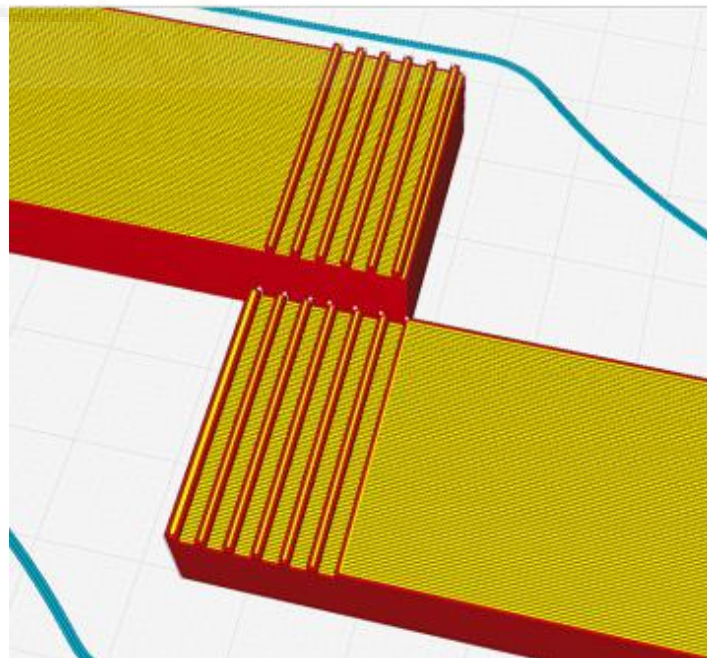


Figura 5. Probetas diseñadas con dientes en la zona de unión [19].

Otro método de unión que se ha estado estudiando en los últimos años es el proceso de soldadura por fricción. Şahin *et al.* [20] investigaron la aplicabilidad de la *friction stir welding* para unir piezas impresas en 3D de PLA, mostrando que la combinación de calor generado por la fricción y la presión mecánica al pasar la herramienta permite integrar las superficies de contacto de las piezas y obtener uniones con resistencia mecánica significativa. Este proceso, aunque distinto de los tratamientos térmicos convencionales en fase sólida, ilustra cómo la energía térmico-mecánica puede facilitar la consolidación de materiales poliméricos impresos sin llegar a fundirlos de manera clásica. En este caso, el calor se genera por fricción, pero el mecanismo físico responsable de la unión es la difusión térmica del polímero. De forma similar, Kuo *et al.* [21] analizaron la soldadura por fricción rotacional de componentes impresos en PLA, observando una fusión efectiva de la interfaz y una resistencia mecánica elevada de la zona unida.

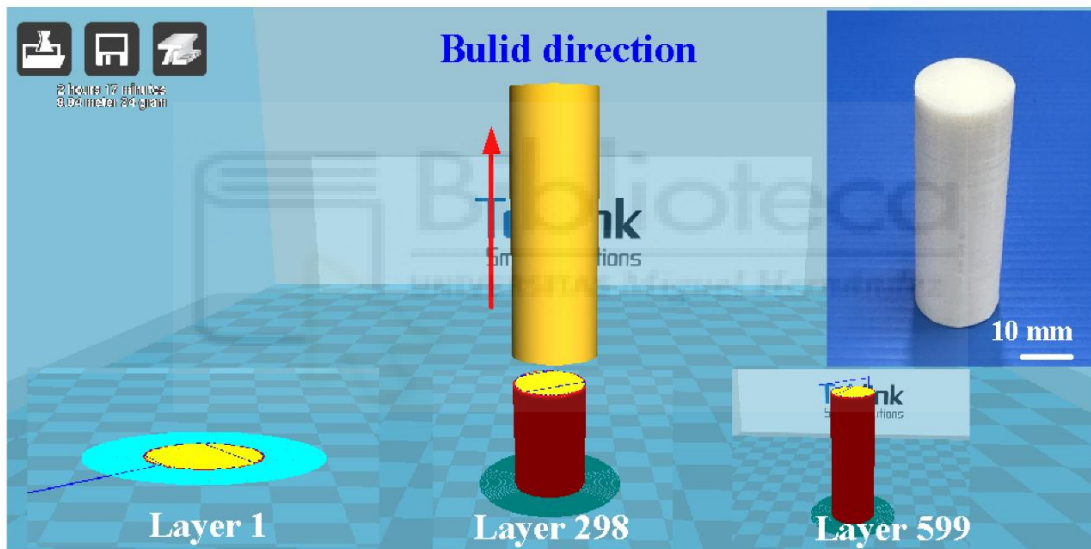


Figura 6. Probetas cilíndricas previas al proceso de soldadura por fricción [21].

Estos trabajos confirman que el PLA es un material con potencial para procesos de unión térmica, siempre que se controlen adecuadamente las condiciones de temperatura y contacto. Es importante señalar que en gran parte de la literatura existente sobre soldadura térmica en FDM se utiliza ABS como material de estudio, debido a su uso histórico en impresión 3D. Aunque el ABS presenta una temperatura de transición vítrea superior a la del PLA, ambos materiales comparten un comportamiento termoplástico similar, basado en la difusión molecular cuando se supera la Temperatura de transición vítrea. Por este motivo, los estudios realizados sobre ABS se emplean en este trabajo únicamente como referencia conceptual, mientras que los ensayos experimentales desarrollados en el

presente trabajo fin de grado se centran exclusivamente en PLA. Como se ha visto, el uso del calor puede ayudar a la hora de mejorar las propiedades mecánicas y la unión de piezas, lo que lleva al uso de tratamientos térmicos.

1.4.2 UNIONES MEDIANTE TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Otra manera de unir piezas y mejorar sus propiedades mecánicas son los tratamientos térmicos. La fabricación aditiva mediante modelado por deposición fundida (FDM) permite la obtención de piezas poliméricas con gran libertad geométrica, si bien presenta limitaciones mecánicas asociadas a la naturaleza capa a capa del proceso. Estas limitaciones se manifiestan principalmente en forma de anisotropía mecánica, presencia de interfaces débiles entre capas y tensiones residuales generadas durante el enfriamiento del material tras la deposición [4]. Con el objetivo de mitigar estas deficiencias, numerosos trabajos han estudiado la aplicación de tratamientos térmicos posteriores a la impresión, especialmente en materiales termoplásticos como el PLA y el ABS. Dichos tratamientos permiten reactivar térmicamente el polímero, favoreciendo la difusión molecular y mejorando la continuidad estructural del material [4]. Desde un punto de vista general, los tratamientos térmicos aplicados a piezas impresas por FDM buscan por un lado mejorar las propiedades mecánicas del material y por otro conseguir la unión de dos partes separadas independientes.

El recocido de piezas impresas por FDM consiste en someter la pieza a una temperatura controlada, generalmente próxima a la temperatura de transición vítrea del polímero, durante un tiempo determinado. En el caso del PLA, esta temperatura se sitúa típicamente en el rango de 55–65 °C, lo que permite aplicar tratamientos térmicos moderados sin alcanzar la fusión completa del material. Diversos estudios han demostrado que el recocido puede producir mejoras significativas en las propiedades mecánicas del PLA impreso. Shbanah *et al.* [22] observaron incrementos en la resistencia a tracción y en el módulo elástico de probetas impresas en PLA tras la aplicación de tratamientos térmicos controlados, atribuyendo estas mejoras a una mayor difusión molecular y a la reducción de defectos internos generados durante la impresión [22]. Como se puede ver en la Figura 7, después de aplicar tratamiento térmico a 65°C durante 5 horas se observa una significativa reducción de la porosidad y una mayor resistencia a la tracción.

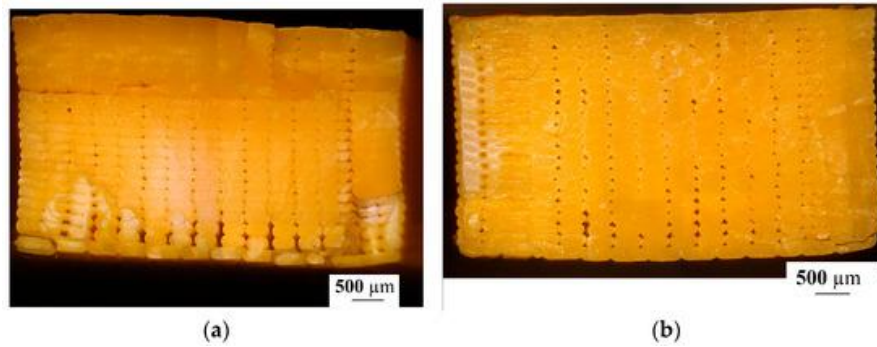


Figura 7. A la izquierda, superficie tras ensayo de tracción de una muestra no tratada térmicamente. A la derecha, la misma tratada térmicamente [22].

Además de la temperatura y el tiempo de tratamiento, otros trabajos han analizado la influencia de factores adicionales sobre el comportamiento mecánico del PLA. Por ejemplo, Hedayati *et al.* [23] estudiaron el efecto de la degradación del material bajo condiciones ambientales, como la exposición prolongada a la humedad y al envejecimiento natural, observando una degradación progresiva de propiedades mecánicas como la resistencia y la deformación a fallo [23]. Estos resultados ponen de manifiesto que el comportamiento mecánico del PLA impreso está condicionado por múltiples variables térmicas y ambientales, lo que justifica la necesidad de estudios experimentales que analicen de forma conjunta los efectos del tratamiento térmico y las condiciones de uso o exposición del material.

Más allá del recocido de una sola pieza para mejorar sus propiedades mecánicas, en los últimos años ha surgido un creciente interés por la unión térmica de piezas impresas de forma independiente, evitando el uso de adhesivos químicos. En este enfoque, dos piezas ya solidificadas se mantienen en contacto y se someten a un tratamiento térmico que permite la difusión de las cadenas poliméricas a través de la interfaz, dando lugar a una unión permanente tras el enfriamiento.

Un aspecto clave en la aplicación de tratamientos térmicos, tanto para recocido como para unión de piezas, es el control geométrico durante el calentamiento. Al superar la temperatura de transición vítrea, el material pierde rigidez y puede deformarse si no se encuentra adecuadamente restringido. Lluch-Cerezo *et al.* [24] estudiaron el efecto del empaquetamiento de piezas impresas durante un tratamiento térmico de recocido mediante el uso de un molde de polvo cerámico. El estudio demostró que, frente a piezas tratadas sin confinamiento, las muestras alojadas en el polvo sufrieron deformaciones significativamente menores tras el tratamiento térmico, lo cual indica que el control

geométrico mediante confinamiento externo puede minimizar los cambios dimensionales que se producen al calentar piezas FDM por encima de su temperatura de transición vítrea. Aunque este trabajo se realizó con ABS, el principio físico subyacente —que un soporte externo reduce las deformaciones durante la relajación térmica de un termoplástico— es aplicable a otros polímeros termoplásticos utilizados en impresión 3D. En la Figura 8 se puede observar la deformación con y sin el molde, donde las probetas marcadas con el número 1 no han sido sometidas a tratamiento térmico, las probetas marcadas con el 2 son después de realizar el tratamiento térmico con molde y las marcadas con el número 3 han sido sometidas al tratamiento sin el molde. Dependiendo de la configuración de impresión hay más o menos deformación, pero siempre las probetas que no tienen el molde sufren una mayor deformación.

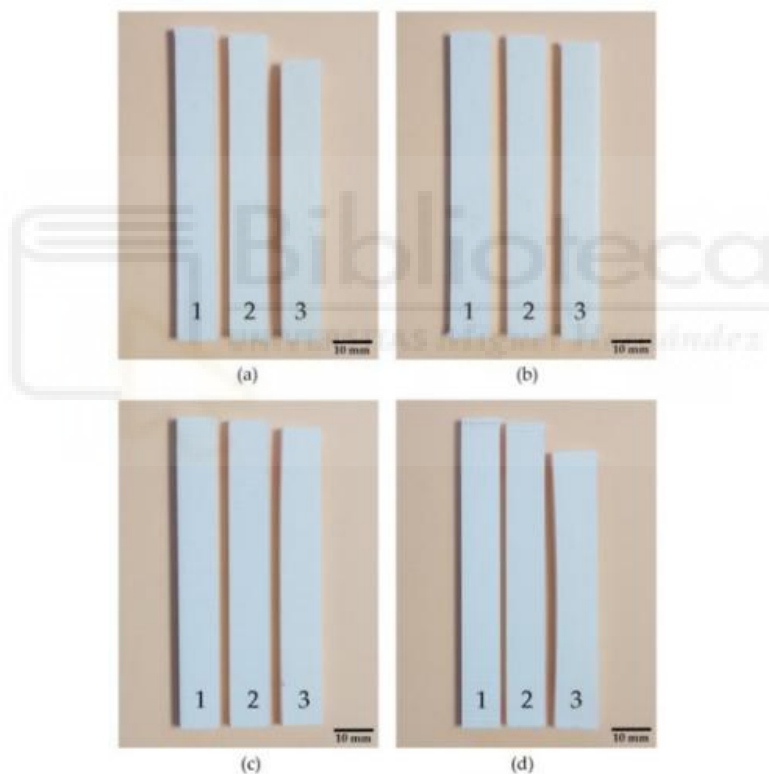


Figura 8. Comparación de diversas probetas con distintas configuraciones de impresión [24].

La validación de los tratamientos térmicos y de las uniones obtenidas requiere la aplicación de ensayos mecánicos que permitan cuantificar la resistencia alcanzada. En el caso de piezas monolíticas recocidas, los ensayos de tracción se emplean para evaluar la mejora global del comportamiento mecánico del material [22][23]. Cuando se trata de uniones térmicas entre piezas independientes, los ensayos mecánicos se centran en

evaluar la resistencia de la interfaz creada. En el estudio presentado en el XVI Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica por miembros del Instituto de Investigación en Ingeniería de Elche, se analizó la resistencia máxima y deformación de probetas de solape simple (SLJ) impresas en PLA y unidas mediante tratamiento térmico en un horno sin empleo de adhesivos, sometidas a diferentes combinaciones de temperatura y tiempo. Únicamente se utilizaron pinzas para asegurar el contacto en la zona de unión [25]. Este estudio servirá de referencia para la realización de este trabajo ya que una parte de la experimentación hecha estará centrada a la búsqueda de conseguir la unión de dos piezas de PLA únicamente con un elemento de sujeción, como en el estudio mostrado.

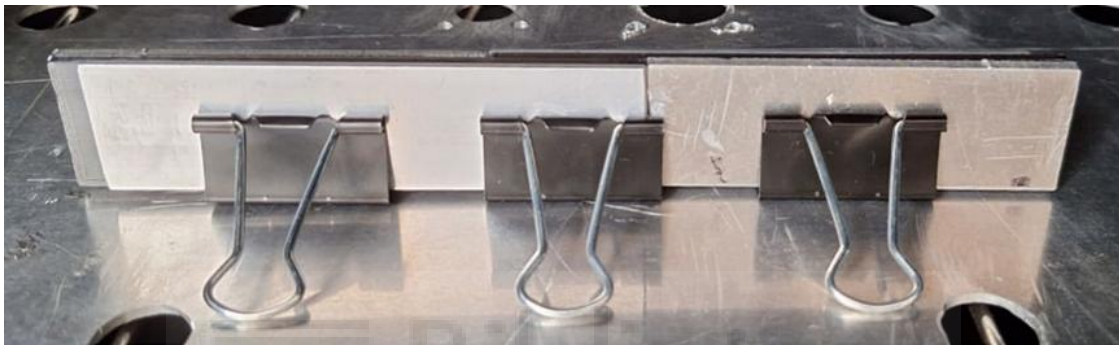


Figura 9. Tratamiento térmico de dos probetas unidas mediante pinzas en el horno [25].

En los resultados del estudio mostrados en la Tabla 1, se observó una clara transición desde fallos adhesivos hacia fallos del sustrato al aumentar la temperatura y el tiempo de tratamiento, lo que indica que la unión térmica puede alcanzar resistencias comparables a las del propio material impreso. La máxima unión se consiguió a los 90 °C con un tiempo de apenas 10'. Estos tiempos y temperaturas se tomarán en cuenta para la realización de los tratamientos térmicos del presente trabajo.

Promedio del valor máximo de fuerza soportado por la unión.				
	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
10 min	/	/	1,19 kN	2,53 kN
20 min	/	1,52 kN	2,41 kN	
30 min	/	1,45 kN		
40 min	/	1,75 kN		

Leyenda

No se produce unión
Unión → Fallo Adhesión
Unión → Fallo Sustrato

Tabla 1. Resultados de los ensayos del estudio [25].

Además de los ensayos de tracción y cizalladura, la literatura recoge el uso de ensayos de impacto como herramienta para evaluar la respuesta dinámica de piezas impresas mediante FDM. Por ejemplo, Tunçel *et al.* [26] empleó ensayos de impacto tipo Charpy para analizar cómo diferentes parámetros de impresión afectan la resistencia al impacto

de probetas fabricadas con PLA, encontrando que características como la densidad de relleno y la altura de capa tienen un efecto significativo sobre la energía absorbida durante el impacto. Aunque este estudio se centra en optimizar parámetros de proceso más que en caracterizar la cohesión intercapas, su aplicación demuestra cómo los ensayos de impacto son útiles para capturar variaciones en la integridad mecánica de piezas impresas bajo sollicitaciones dinámicas.

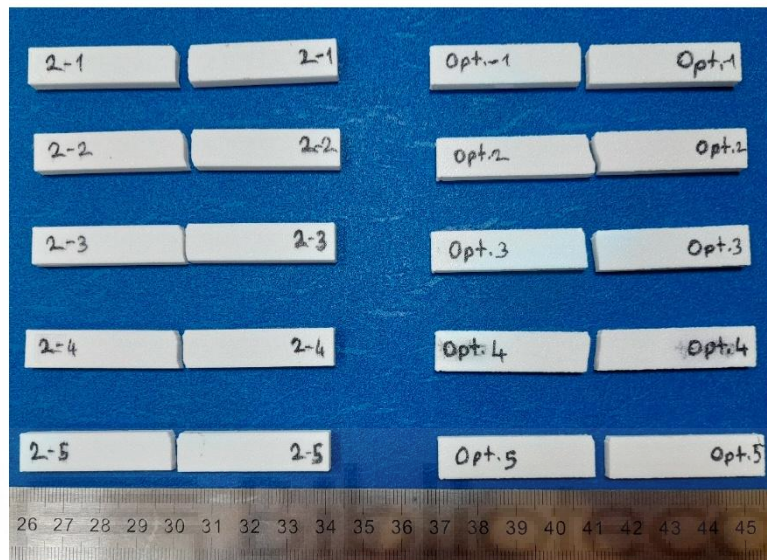


Figura 10. Imagen de las probetas fracturadas tras el ensayo de impacto Charpy [26].

2. OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es que usuarios particulares sean capaces de crear piezas que por sus dimensiones o características no pueden ser impresas directamente, pero que se pueden dividir en diferentes secciones para ser unidas al introducirlas ensambladas en un horno convencional. Para ello se evaluará la viabilidad de la unión de piezas de PLA impresas mediante tecnología FDM a través de la aplicación de un tratamiento térmico controlado analizando su influencia sobre la integridad geométrica y el comportamiento mecánico del conjunto. Asimismo, se pretende estudiar la respuesta de dichas uniones frente a diferentes tipos de ensayo, así como la eficacia de la arena como soporte durante el calentamiento para minimizar deformaciones indeseadas en piezas con voladizos.

Para ello, se van a definir los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar y fabricar, mediante la tecnología de modelado por deposición fundida, probetas y geometrías específicas con PLA destinadas a ensayos a tracción y pruebas de impacto, garantizando la repetibilidad del proceso y la coherencia geométrica de las muestras.
- Analizar distintos métodos de unión externa para las piezas impresas, seleccionando aquel que permita mantener el contacto entre superficies durante el tratamiento térmico sin interferir negativamente en el proceso de unión y distorsión térmica.
- Estudiar la influencia de la temperatura y el tiempo de exposición durante el tratamiento térmico sobre la calidad de la unión entre piezas de PLA, identificando combinaciones de parámetros que permitan mejorar la cohesión sin provocar alteraciones geométricas excesivas.
- Evaluar el comportamiento a tracción de las probetas tratadas térmicamente, comparando los resultados obtenidos para distintas condiciones de tratamiento y analizando los modos de fallo observados.
- Analizar la resistencia al impacto por caída de piezas unidas mediante tratamiento térmico, empleando ensayos de caída con el fin de evaluar de manera cualitativa la integridad estructural de las uniones frente a sollicitaciones dinámicas.

- Analizar la utilización de arena como sustento durante el calentamiento de piezas con voladizos, con el objetivo de restringir el movimiento del material al llegar a temperaturas cercanas de fusión y reducir las deformaciones geométricas.
- Comparar los resultados obtenidos en las distintas fases experimentales, identificando tendencias, limitaciones del proceso y posibles líneas de mejora para aplicaciones futuras.



3. RECURSOS

3.1 MATERIAL DE IMPRESIÓN

Para la realización de este trabajo se ha usado PLA, como se ha reiterado en varias ocasiones. A fin de que los resultados sean más precisos y no haya problemas con las mediciones, se ha usado el mismo tipo de filamento para todas las impresiones salvo en la última prueba. Existen trabajos que muestran que, manteniendo constantes las condiciones de impresión, existen variaciones apreciables en la resistencia a tracción y en el comportamiento mecánico general del PLA en función del color del material, atribuibles a la presencia de distintos pigmentos y aditivos que afectan a la microestructura y cristalización del polímero [27]. Con ello, se pretende evitar la distorsión a la hora de interpretar los resultados finales. La marca usada es *Smartfil* y sus propiedades se recogen en la Tabla 2.

Color	<i>Snow</i>
Diámetro	1,75 mm
Tamaño	L (1 Kg)
Temperatura de extrusión	200 °C–220 °C
Densidad	1,24 g/cm ³
Variación de diámetro	±0,03 mm
Temperatura de Transición vítrea	60 °C
Resistencia a la tracción	43,8–55,5 MPa
Resistencia a la flexión	18–107 MPa
Módulo elástico	3,3–3,8 GPa

Tabla 2. Propiedades del filamento de PLA.

A pesar de que para las pruebas con las probetas y esferas sí que se ha contado con el mismo tipo de PLA, para la última prueba en la que se verá como la arena ayuda a reducir o eliminar los derretimientos de voladizos, se ha usado PLA gris de la misma marca cuya única diferencia es el color, ya que no se ha estudiado como si fuese un ensayo.

3.2 EQUIPO Y SOFTWARE

3.2.1 IMPRESORA 3D

Durante la realización de este trabajo se han usado dos impresoras con dos softwares diferentes que se van a exponer a continuación.

3.2.1.1 *ULTIMAKER S3*

Al principio de este trabajo, en la universidad se contaba con una impresora *UltiMaker S3* que estaba asociada al Software de impresión 3D *UltiMaker Cura*. En esta se realizaron las primeras impresiones con PLA gris. Para probar la arena como sustento térmico para piezas con voladizos, se obtuvo un diseño de un avión de la página *Thingiverse*. Este es el único diseño que no ha sido de elaboración propia.

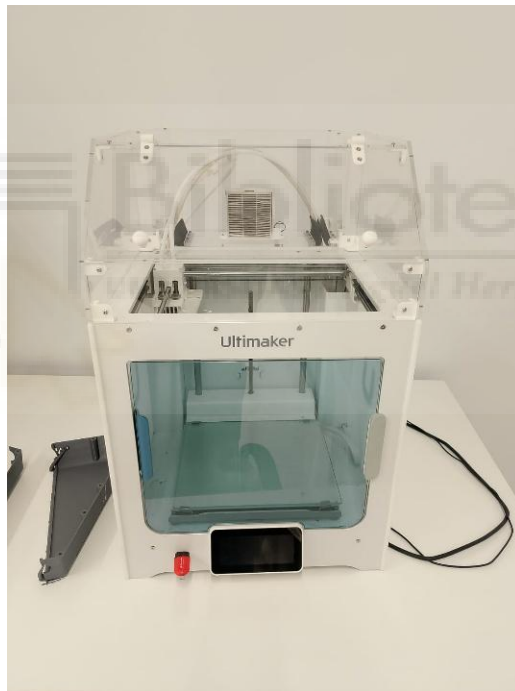


Figura 11. Impresora *UltiMaker S3*, utilizada para imprimir los aviones.

Más adelante, la universidad adquirió una nueva impresora. Al no ser el apartado destinado a los aviones cuantitativo sino más bien cualitativo, se optó por no hacer más aviones en la nueva impresora con el fin de ahorrar recursos. Entre los parámetros de impresión elegidos están la altura de capa de $0,2\text{ mm}$, un patrón de relleno rectilíneo y un porcentaje de relleno escogido de 100% . Este último valor tendrá más relevancia en las probetas. También se hizo un soporte debido al voladizo (alas) con una estructura normal,

tocando la placa de impresión, un ángulo de 55° y una expansión horizontal de $0,8\text{ mm}$. En la Figura 12 se puede ver la visualización previa con el soporte correspondiente.

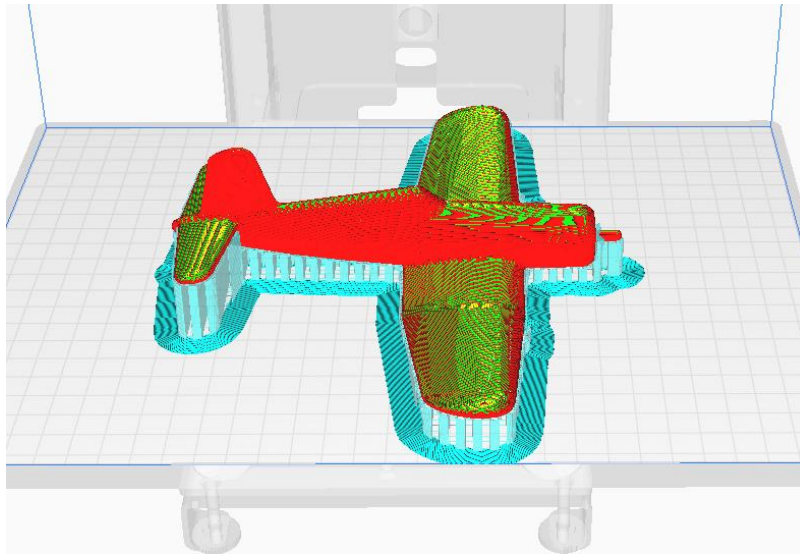


Figura 12. Visualización previa del proceso de impresión de los aviones.

3.2.1.2 *BAMBU LAB H2D*

Como se ha dicho antes, llegó una nueva impresora. Esta fue una *Bambu Lab H2D*. Tiene la característica de que es capaz de imprimir a 300 mm/s , unas 6 veces más rápida que la *UltiMaker* lo que conllevaba un aumento exponencial en la productividad para la realización de los ensayos. La impresora tiene asociado el software *Bambu Studio* con el que se imprimieron los otros dos diseños para los ensayos.



Figura 13. Impresora 3D utilizada para las probetas y semiesferas.

La nueva impresora tiene unos parámetros específicos a la hora de imprimir. La temperatura de la plataforma de impresión es de unos 55 °C mientras que la ambiente dentro de esta es de 25 °C. En cambio, la temperatura de extrusión es significativamente mayor, ya que debe fundir el PLA, siendo esta de 220 °C que es el límite máximo al que se debe someter el material según el fabricante (ver Tabla 2).

El primer diseño que se va a imprimir con esta impresora son las probetas, cuyo diseño y función se detallará en el punto 4.1.1. Para estas se eligió una altura de capa de 0,2 mm y unos patrones de relleno rectilíneos. El porcentaje de relleno escogido fue del 100 %. Diversos estudios recientes han evidenciado la influencia significativa del porcentaje de relleno en las propiedades mecánicas del PLA fabricado mediante deposición fundida (FDM). En particular, Ekşi *et al.* [28] mostraron que el porcentaje de relleno constituye uno de los parámetros más determinantes en la resistencia a tracción, observándose los valores máximos de resistencia en probetas fabricadas con un 100 % de relleno, debido a la reducción de la porosidad interna y a una mayor continuidad estructural del material. En consecuencia, en el presente trabajo se ha optado por emplear probetas con este porcentaje con el objetivo de minimizar la influencia de la geometría interna y obtener propiedades mecánicas representativas del material impreso, evitando que la respuesta mecánica esté condicionada por vacíos internos o configuraciones específicas de relleno.

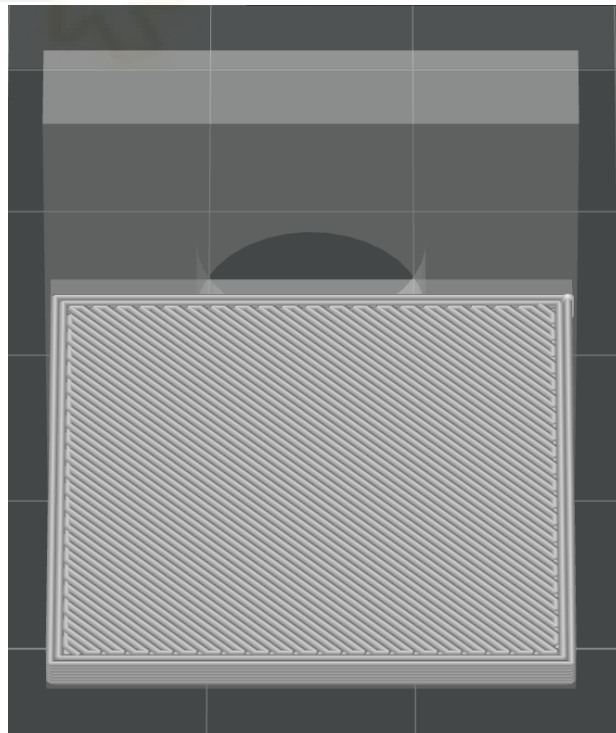


Figura 14. Vista previa de las probetas con un 100 % de relleno.

Otro parámetro importante pero que se ha acabado obviando es la orientación de impresión. En el caso las probetas en T, al presentar el agujero (En la Figura 21 se observa la funcionalidad de estos y en el punto 4.1 se explica por qué se ha optado por diseñar así la pieza), cuando fallaban por el sustrato rompían por la parte superior del agujero y no por la zona de unión, lo que permite concluir que no se producirá el fallo real. Es por esta razón por la que se ha decidido imprimir de la manera más cómoda, como puede verse en la Figura 15.

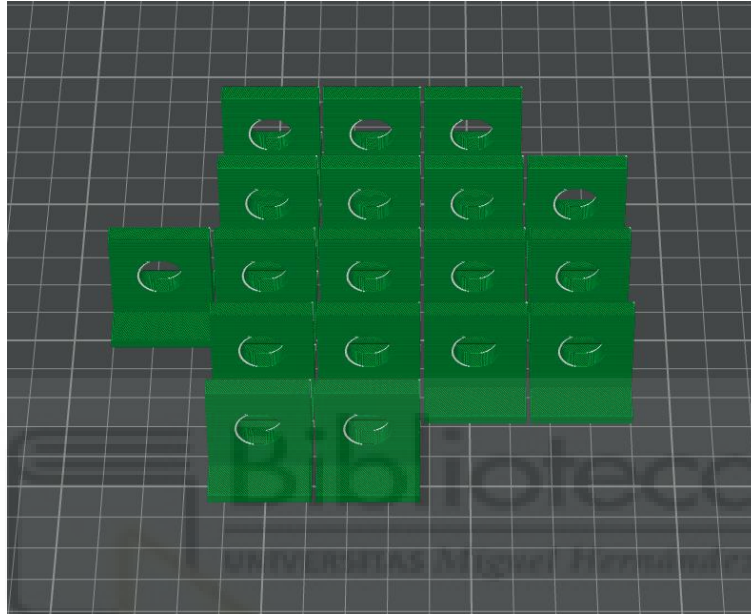


Figura 15. Visualización previa del proceso de impresión de las probetas.

El segundo diseño que se va a imprimir con esta impresora son las semiesferas, cuyo diseño y función se detallará en el punto 4.3.1. La configuración de impresión de estas es algo diferente que el de las probetas. El principal cambio ha sido el porcentaje de relleno. En el ensayo de impacto por caída no se busca tanto caracterizar las propiedades mecánicas del PLA como en el ensayo a tracción, si no que se busca una aplicabilidad y funcionalidad real. El objetivo es evaluar el comportamiento práctico de estructuras impresas en condiciones más representativas de aplicaciones reales, donde el uso de rellenos reducidos es habitual para optimizar peso, tiempo de fabricación y consumo de material. Por este motivo, las piezas sometidas a impacto se fabricaron con un 15 % de relleno, priorizando la funcionalidad estructural y la viabilidad práctica frente a la caracterización estricta del material.

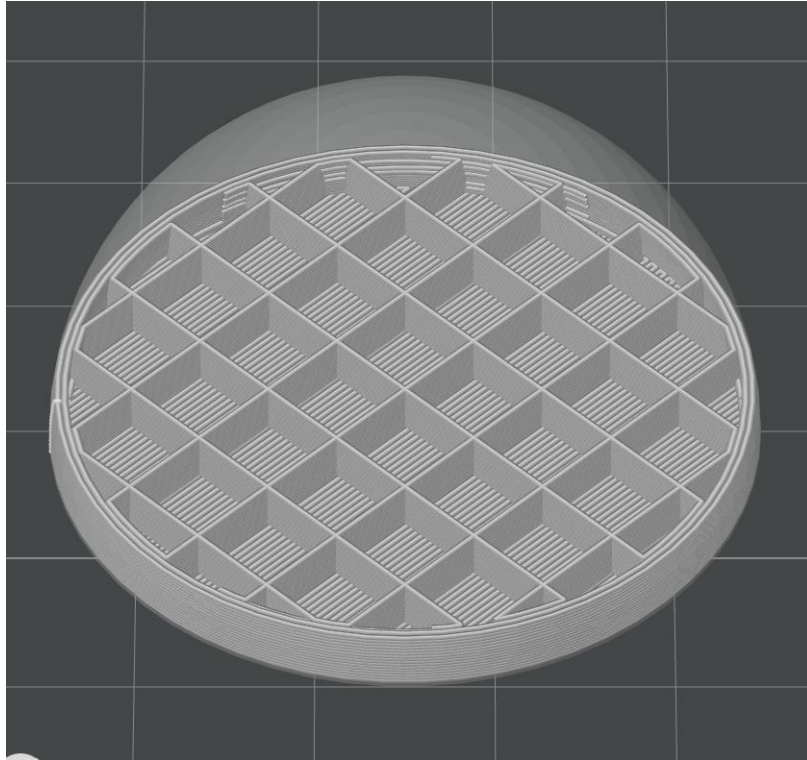


Figura 16. Vista previa de las esferas con un 15 % de relleno.

Otros parámetros como la altura de capa y la orientación de impresión se mantuvieron igual, con el fin de priorizar una mayor comodidad a la hora de imprimir. Lo único que sí que cambió fue el patrón de relleno disperso que pasó a ser de rejilla.

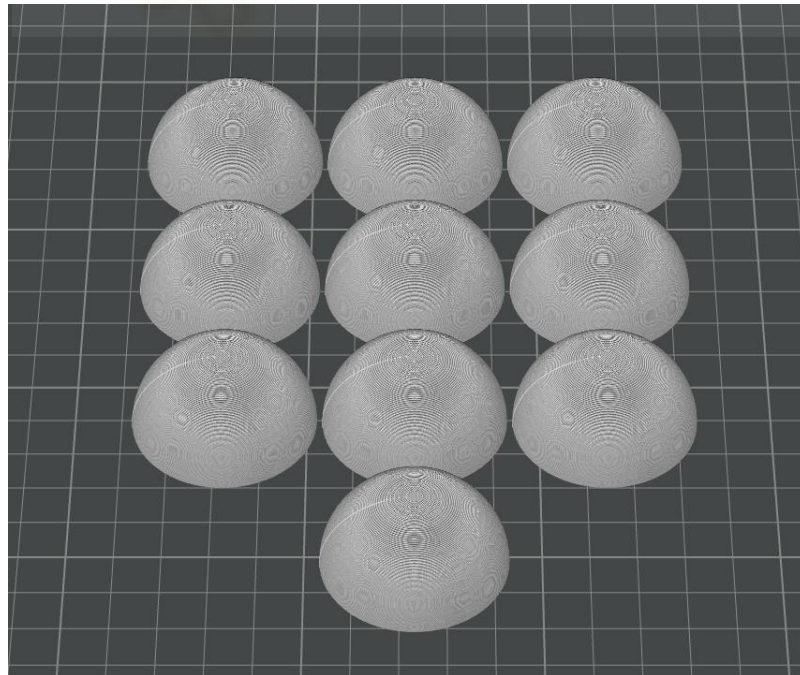


Figura 17. Visualización previa del proceso de impresión.

3.2.2 HORNO

Para realizar los tratamientos térmicos, se contó con un horno de cocina convencional el cual permitía seleccionar la temperatura mediante un *display* digital. El termostato del horno consta de un control PID, una sonda tipo K y un relé que gobierna la resistencia térmica. Para contabilizar el tiempo que las piezas pasaban dentro del horno, se contó con un cronómetro común independiente a este.



Figura 18. Horno convencional de cocina usado para el tratamiento térmico.

3.2.3 MÁQUINA DE ENSAYOS UNIVERSAL

Los ensayos mecánicos se realizaron mediante una máquina universal de ensayos *Zwick/Roell* serie *RetroLine* como la que se ve en la Figura 19, equipada con sistema de control digital y software *testXpert III* para la adquisición y procesamiento de datos. Este tipo de máquina permite la aplicación controlada de cargas mecánicas en ensayos estáticos de tracción, compresión y flexión, registrando simultáneamente fuerza, desplazamiento y deformación de la probeta. En el caso de este trabajo, la máquina se usará en ensayos a tracción.

El equipo dispone de un bastidor electromecánico de doble columna con travesaño móvil accionado mediante husillos de precisión y motor eléctrico, lo que permite un control exacto de la velocidad de ensayo y una elevada rigidez estructural. La fuerza aplicada se mide mediante una célula de carga calibrada, mientras que el desplazamiento del

travesaño y, en su caso, la deformación de la probeta, se registran mediante los sensores integrados en el sistema de ensayo.



Figura 19. Máquina de ensayos universal utilizada en este trabajo.

Como se ha mencionado anteriormente, La máquina está gestionada mediante el software *testXpert III* (ZwickRoell), el cual permite configurar parámetros de ensayo (velocidad, precarga, longitud de sujeción, criterios de parada), registrar curvas esfuerzo-deformación y exportar resultados conforme a normas de ensayo internacionales. Este software proporciona además control automatizado del equipo, almacenamiento de datos experimentales y generación de informes técnicos.

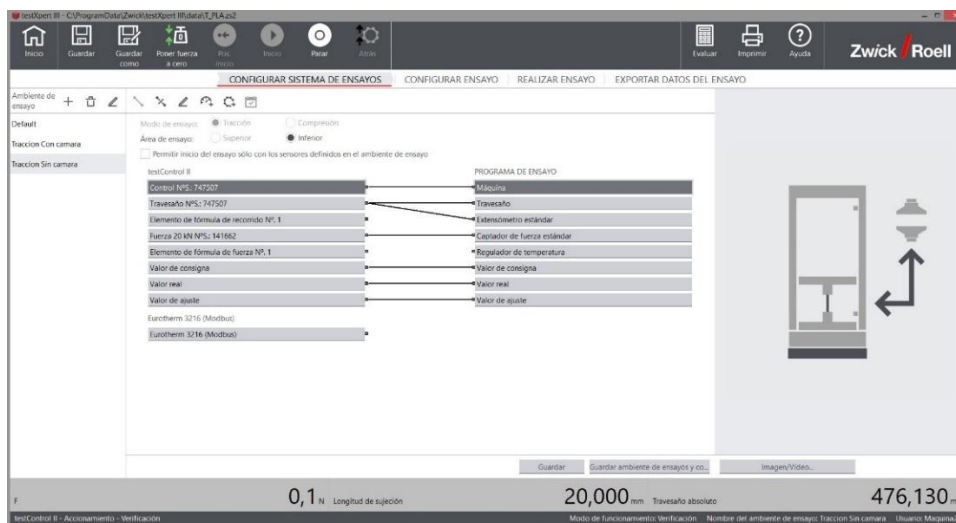


Figura 20. Pantalla principal del programa *testXpert III*.

En cuanto a la configuración para el ensayo, la velocidad de desplazamiento del travesaño se fijó en 5 mm/min . Diversos estudios utilizan este valor habitualmente empleado en la caracterización mecánica de materiales poliméricos y particularmente en materiales fabricados mediante impresión 3D acorde a la norma *ASTM D638* [29].

Las probetas se colocaron con una separación inicial entre útiles de aproximadamente 20 mm , estableciéndose dicha distancia como longitud inicial de referencia para el ensayo. En la Figura 21 se puede ver cómo queda la probeta lista para ensayar en la máquina con la separación mencionada. La velocidad de posicionamiento previa al ensayo se fijó en 100 mm/min , con el objetivo de reducir el tiempo de preparación sin afectar a la medición mecánica, dado que esta fase no forma parte del ensayo propiamente dicho.



Figura 21. Probeta lista para ensayar.

Se configuraron además límites software de recorrido del travesaño para garantizar la seguridad del equipo y evitar sobrecarreras durante la rotura de la probeta. El sistema

registró continuamente fuerza y desplazamiento, con un tiempo de integración de 10 *ms*, permitiendo una adquisición suficientemente precisa de la curva fuerza-desplazamiento.

Por último, también se introdujeron las dimensiones geométricas de la zona de unión que en este caso es de 25,4 *mm* por lado para que el programa calculase otros parámetros como el esfuerzo máximo.



4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este apartado se explicará cómo se ha llevado a cabo el procedimiento experimental de cada una de las pruebas realizadas, así como los resultados de cada una de ellas y las discusiones pertinentes relacionadas a estas. Se seguirá una estructura en la que se darán los resultados y las discusiones tras cada prueba para así poder dar respuesta a por qué se han realizado estas de la manera en la que se han hecho, ya que los resultados de una justifican el desarrollo experimental de la siguiente.

Se han realizado varios ensayos por cada combinación de temperatura, tiempo y método de sujeción con el fin de tener una visión más amplia a la hora de dar las conclusiones y reducir así las distorsiones por factores que no se pueden controlar. La Ecuación 1 muestra como se ha calculado la media.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

Donde n es el número de ensayos realizados, \bar{x} es la media de los ensayos y x_i son cada uno de los valores obtenidos tras ensayar las piezas.

4.1 SELECCIÓN DEL ELEMENTO DE SUJECIÓN

La primera parte de la experimentación consistió en elegir un elemento de sujeción que permitiera mantener las piezas de PLA unidas para el tratamiento térmico sin que estas sufriesen muchas alteraciones en su geometría. Con este fin, se hicieron varias pruebas preliminares para ir descartando elementos.

Para este punto y el próximo (4.2) se usarán las probetas vistas en el apartado 3.2.1.2. Estas son probetas en T que se hicieron con el objetivo de realizar pruebas a tracción. En la Figura 22 se pueden observar sus dimensiones.

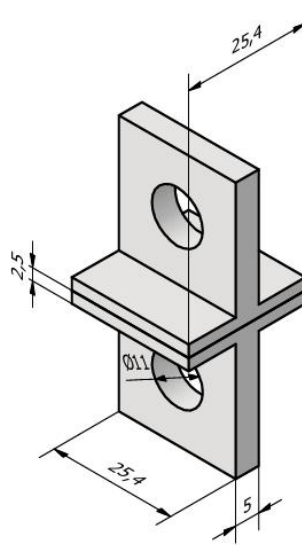


Figura 22. Dimensiones de la probeta de Tracción en T en *mm*.

Como se ve, estas tienen un agujero en la parte donde se sujetan. En la Figura 21 se puede observar como por estos pasan los pasadores de la máquina de ensayos universal. Cuando se estaban realizando las pruebas iniciales, no se contaba con una técnica definida que produjese la suficiente unión como para que se mantuvieran unidas a la hora de colocarlas en las mordazas de sujeción, lo que provocaba que no se pudiesen sacar conclusiones cuantitativas. Es por ello por lo que se decidió hacerle un agujero para que pasase el pasador de la máquina de ensayos y ensayar con el objetivo de tener resultados numéricos. Mientras que el pasador de la máquina de ensayos tiene un diámetro de 8 *mm*, el de la probeta se decidió hacer de 11 *mm*. Las razones de esta decisión se explicarán en el punto 4.2.3. La probeta tiene 25,4 *mm* por lado en la zona de unión debido a que el diseño se basa en parte en el artículo del XVI congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica [25]. En él se utiliza una probeta del mismo ancho y con un largo de 101,6 *mm*. Para adaptarlo a un ensayo de tracción se decidió coger el mismo ancho y hacerla cuadrada, ya que la del congreso era demasiado larga para un ensayo de estas características.

Además de este diseño, se pensó en utilizar unos machihembrados con forma de peine, pero se acabaron descartando debido a la simpleza en el diseño de las probetas en T y a que la impresión de estos tenía que ser muy perfecta, ya que una pequeña imperfección podía provocar que estos no fueran del todo compatibles y no encajen entre sí correctamente.



Figura 23. Machihembrados probados.

4.1.1 METODOLOGÍA

El primer elemento que se usó fueron pinzas tipo clip de papelería de acero de 32 *mm* de longitud. Estas pinzas fueron usadas con anterioridad en la bibliografía consultada [25]. En el caso del presente trabajo, se usaron dos pinzas por lado, pegando exitosamente. A pesar de ello, estas causaron una alteración geométrica bastante notable en el material debido a que infligían mucha presión en un punto concreto de la probeta. Para intentar aminorar esto, se optó por cortar probetas finas de metal con una superficie de 25,4 *mm* por 10,2 *mm* para colocarlas sobre las zonas donde las pinzas aplicaban presión para así distribuir los esfuerzos por toda la superficie.



Figura 24. Preparación para el tratamiento térmico con las pinzas.

El segundo elemento que se utilizó fueron imanes permanentes de neodimio-hierro-boro (NdFeB) en formato disco, con dimensiones aproximadas de 6 mm de diámetro y 3 mm de espesor. Este tipo de imanes se caracteriza por una elevada densidad de energía magnética y una alta fuerza de sujeción en relación con su tamaño, siendo los imanes comerciales más potentes dentro de los denominados imanes de tierras raras. Habitualmente presentan un recubrimiento metálico, generalmente níquel o aleación Ni-Cu-Ni, que mejora su resistencia a la corrosión y al desgaste superficial, ya que el material base es susceptible a oxidación. Debido a estas propiedades, se emplean frecuentemente en aplicaciones de fijación, posicionamiento, prototipado y sistemas de cierre magnético.



Figura 25. Imanes empleados comparados con una moneda de 50 céntimos.

Para la colocación de los imanes en la probeta, se colocaron un total de ocho, dos a cada lado de las superficies de contacto. Al ser estos bastante potentes, solo se pudieron colocar esos, ya que si se colocaban más se daban interacciones magnéticas no deseadas. Concretamente, el incremento de imanes favorecía su atracción mutua lateral, lo que dificultaba su correcta colocación y evitaba un contacto homogéneo entre las superficies a unir. Por ello, la disposición de ocho imanes se consideró la más adecuada para garantizar una presión uniforme sin interferencias magnéticas significativas.



Figura 26. Preparación para el tratamiento térmico con los imanes.

Por último, se escogió cinta adhesiva como último elemento de sujeción. Al principio se pensó en utilizar cinta *Kapton*. Este es un material ampliamente utilizado en aplicaciones industriales y electrónicas por su elevada resistencia térmica, estabilidad dimensional y capacidad de aislamiento eléctrico. Este tipo de cinta está formada por una película de poliimida con adhesivo generalmente siliconado, lo que le permite mantener sus propiedades mecánicas y adhesivas en rangos térmicos elevados (habitualmente hasta ~250-260 °C en uso continuo y superiores en exposiciones breves). Además, presenta buena resistencia química y baja deformación térmica, características que la hacen adecuada para procesos donde se requiere fijación temporal en condiciones de calentamiento controlado, como tratamientos térmicos o ensayos con materiales poliméricos. Las primeras pruebas preliminares para establecer la temperatura a la que se iban a realizar los ensayos fueron más altas de las normalmente utilizadas en tratamientos térmicos en estudios previos (120 °C–160 °C), lo que hizo considerar la opción de utilizar una cinta que aguantase más temperatura a la que normalmente está acostumbrada una cinta adhesiva convencional. Tras pruebas preliminares, se vio que la cinta de papelería normal aguantaba perfectamente las temperaturas del horno, con lo que se decidió usarla para darle un toque más funcional y aplicable al ensayo.



Figura 27. Cintas adhesivas probadas.

Se probaron distintas configuraciones para colocar la cinta entre las dos piezas, más específicamente tres. La primera fue colocar dos tiras de cinta en las dos áreas de unión no atravesadas por elemento de sujeción, es decir, lateralmente. La segunda fue colocarla alrededor de los elementos de sujeción intrínsecos de las piezas, es decir, la cinta centrada. Por último, se combinaron las dos anteriores siendo la cinta colocada tanto lateralmente como centrada. Al final se decidió por la configuración centrada ya que fue la que mejores resultados dio (ver Figura 28).

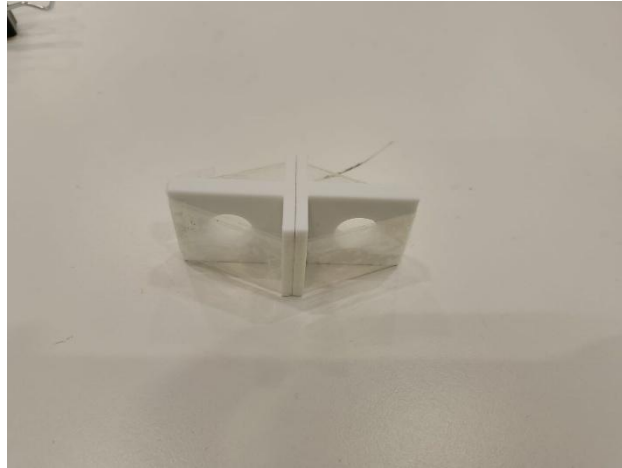


Figura 28. Preparación para el tratamiento térmico con la cinta.

Estos tres métodos de sujeción para mantener las probetas unidas fueron los elegidos para comprobar cual daba mejores resultados. Se acabaron descartando otros como sargentos de apriete por su dificultad para colocarlos óptimamente en las probetas.

Con ello, se hicieron los ensayos en los que se seleccionó una temperatura y un tiempo determinados que se sabían que iban a funcionar correctamente. Así pues se introdujeron las probetas en el horno a 140 °C durante 30'. Para ello se esperó a que el horno llegase a la temperatura deseada para posteriormente dejar 45' de precalentamiento antes de la introducción de las probetas. Como se puede llegar a apreciar, la temperatura seleccionada supera con creces la temperatura de transición vítrea del PLA (alrededor de 60 °C). En el punto 4.2.1 se detallará el motivo de esta decisión. Posteriormente, se ensayaron las probetas en la máquina de ensayos universal tras un día de espera para tener un resultado cuantitativo, sumado al cualitativo de la alteración geométrica observada. Cabe resaltar que las probetas se taparon con una bandeja de aluminio de cocina para eliminar la transmisión de calor por radiación producida por las resistencias del horno.

4.1.2 RESULTADOS

A continuación, se mostrará la tabla con los valores de resistencia a tracción máxima que han llegado a alcanzar las probetas con los diferentes métodos de sujeción. Como se puede observar en la Tabla 3, se han ensayado tres probetas de cada tipo para así tener resultados y conclusiones más precisas. Cabe recordar que el tratamiento térmico se ha hecho a 140 °C durante 30'.

Método de sujeción	Fuerza máxima (N)	Media (N)
Imanes	293	166
	143	
	62	
Pinzas	320	602
	820	
	666	
Cinta adhesiva	505	483
	643	
	300	

Tabla 3. Resultados de los ensayos de determinación del método de sujeción.

4.1.3 DISCUSIÓN

Como puede observarse en la Tabla 3, las probetas que mejores resultados han dado en cuanto a resistencia máxima a tracción han sido aquellas cuyo elemento de sujeción fueron las pinzas. Esto a priori no es sorprendente, ya que las pinzas aplican una mayor presión sobre la superficie de contacto de la probeta, lo que conlleva a que haya una mejor unión de las piezas. En la Figura 29 se ve el diagrama con las curvas más cercanas a la media de cada método de sujeción, escogiendo la más representativa de las tres.

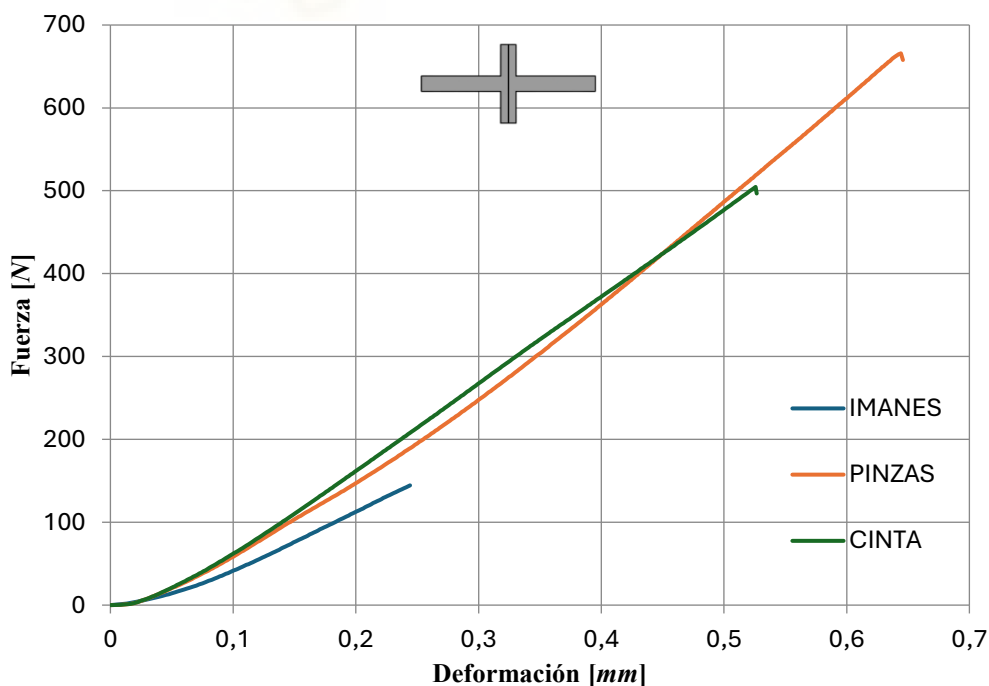


Figura 29. Diagrama fuerza-deformación de los diferentes métodos de sujeción.

En él se observa la relación entre fuerza aplicada y la deformación para tres sistemas de sujeción distintos. Como puede apreciarse, la diferencia entre el uso de pinzas y cinta radica principalmente en el punto de fallo, ya que las pinzas llegan a un mayor valor de resistencia máxima pese a presentar una rigidez muy similar. Por su parte, los imanes muestran un comportamiento claramente inferior, tanto en fuerza máxima como en rigidez, en comparación con las probetas ensayadas mediante los otros sistemas de sujeción.

Sin embargo, en este ensayo no solo se ha valorado la fuerza máxima que es capaz de soportar la probeta, sino también como ha quedado esta tras el tratamiento térmico y si ha sufrido variaciones en su estructura debido al calor y la presión a la que han sido expuestas en el horno. En las Figuras 30, 31 y 32 se muestra el antes y después de cada una de ellas. Cada método de sujeción tiene cuatro fotos, dos para el antes y dos para el después con las vistas más representativas que dejan observar las piezas unidas desde los puntos más críticos, que son la parte de los agujeros donde se pasarán los pasadores para el ensayo y la parte de la unión.

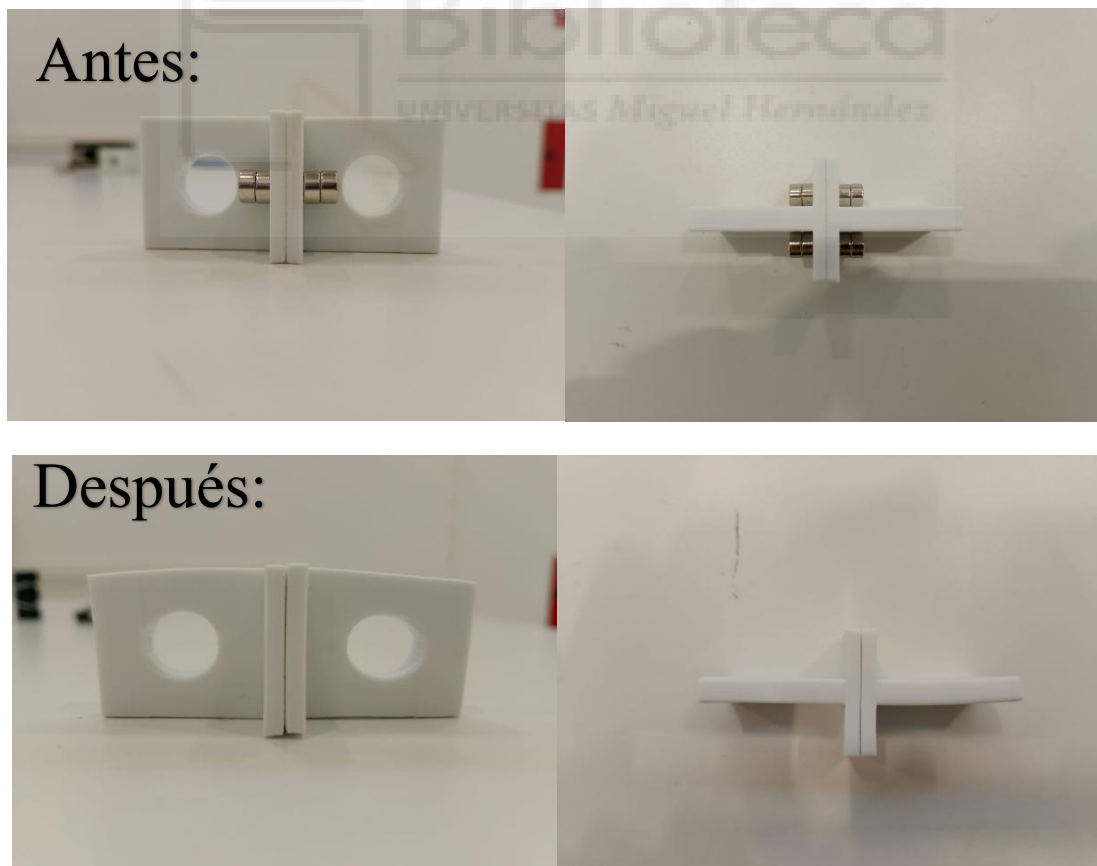


Figura 30. Antes y después del tratamiento térmico con los imanes.

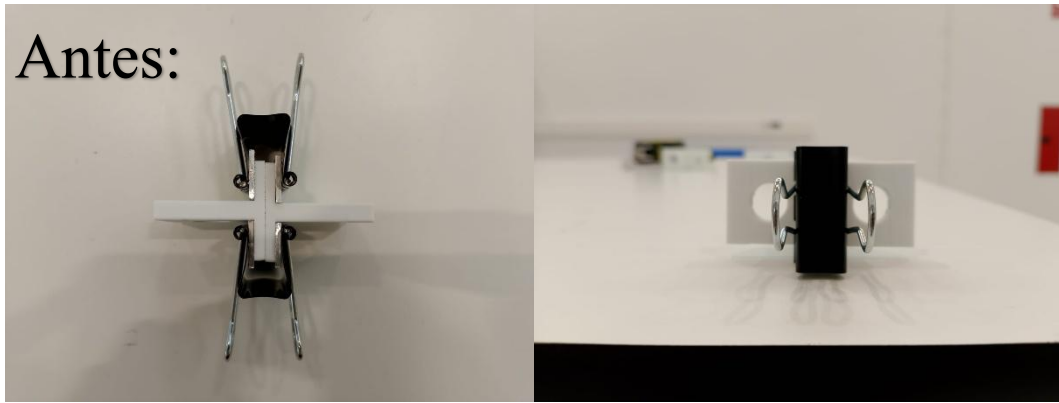


Figura 31. Antes y después del tratamiento térmico con las pinzas.

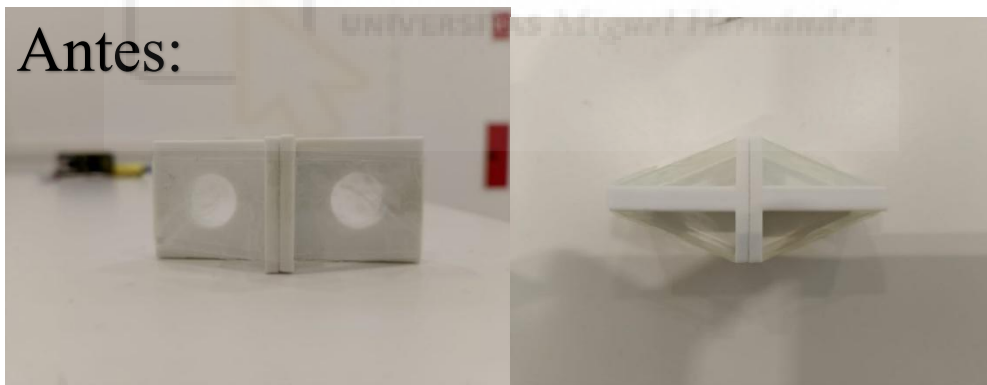


Figura 32. Antes y después del tratamiento térmico con la cinta adhesiva.

Este ensayo es determinante para conocer el método de sujeción que se va a usar a lo largo de este Trabajo y sobre todo del próximo ensayo. Los imanes quedan descartados debido a su poca resistencia, a pesar de que no se ven grandes variaciones en la estructura de la probeta. Entonces los elementos que quedan son la cinta y las pinzas. A pesar de que estas últimas consiguen una mayor resistencia y menor alteración en la parte de sujeción de la probeta, en la zona interés que es la parte de la unión hay una gran distorsión térmica debido a la fuerte presión que estas aplican sobre la probeta. En cambio, la cinta mantiene la estructura de la probeta en la zona de unión de una forma bastante uniforme siendo las únicas zonas de distorsión térmica aquellas donde se sujeta la probeta en la máquina universal de ensayos. Al ser esto tan significativo y la diferencia de resistencia algo menor, se optó por usar la cinta como método de unión debido a estos factores y a que es un elemento muy casero que cualquier persona puede tener en su casa.

4.2 ENSAYO DE TRACCIÓN CON CINTA ADHESIVA

4.2.1 METODOLOGÍA

Para este apartado, se estudiará como afectan diferentes temperaturas y tiempos a la unión de las probetas de PLA. Como se ha explicado con anterioridad, se acabó seleccionando la cinta adhesiva como elemento de sujeción.

Este ensayo contó con tres temperaturas y tres tiempos distintos, siendo los primeros 120 °C, 140 °C y 160 °C y los segundos 10', 20' y 30'.

Las temperaturas como se puede observar son mucho más altas que la temperatura de transición vítrea del PLA. Esto no es un error, se probaron tanto valores inferiores a los seleccionados como superiores. Primero se probó a usar temperaturas como las usadas en la bibliografía [25], comprendidas entre 60 °C y 90 °C. Los resultados no fueron satisfactorios así que se fue subiendo la temperatura paulatinamente hasta alcanzar los valores usados en este trabajo. Por arriba a las temperaturas utilizadas también se probó, pero se descartaron debido a que la alteración geométrica en la estructura de la probeta a los 170 °C era lo suficientemente alta como para provocar que los pasadores de la máquina de ensayos (8 mm de diámetro) no pasaran por los agujeros de la pieza, originalmente de 11 mm de diámetro. Debido a ello, se seleccionaron las temperaturas mencionadas anteriormente.

En cuanto a los tiempos, en el punto 4.2.3 se dará respuesta al porqué de estos.

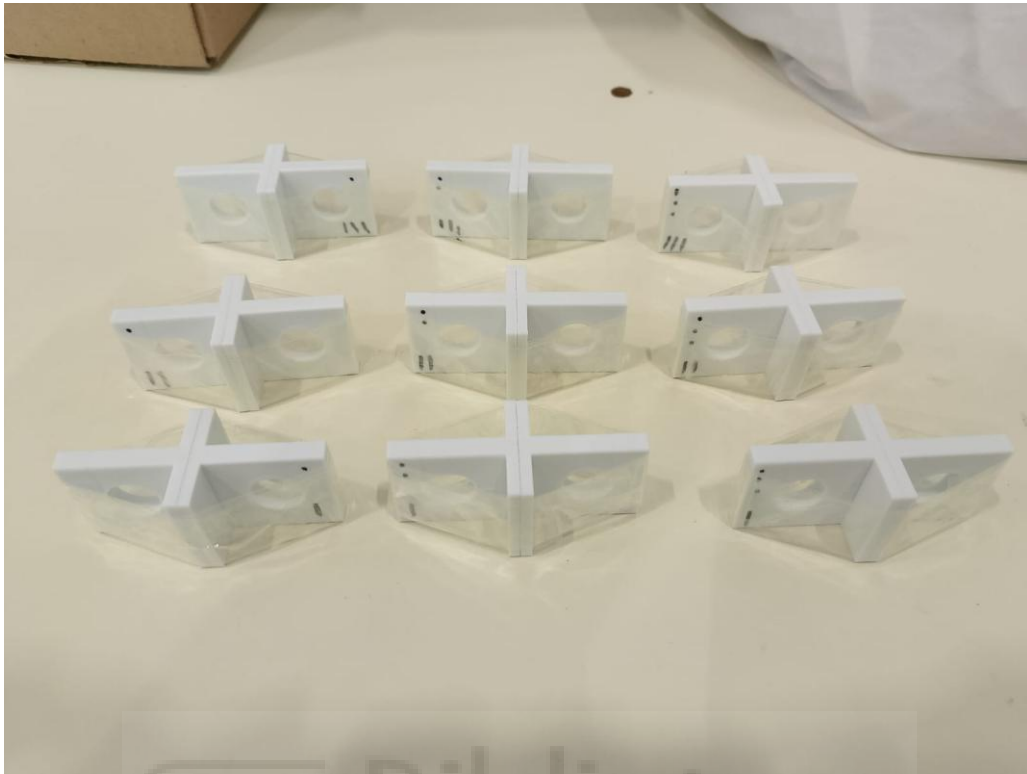


Figura 33. Probetas preparadas para el tratamiento térmico.

En la Figura 33 se puede apreciar las probetas previas al tratamiento térmico. Estas llevan puntos y rayas para poder diferenciarlas a la hora de introducirlas en la máquina de ensayos. Las rayas indican la temperatura, siendo una raya 120 °C, dos 140 °C y tres 160 °C. Los puntos en cambio se refieren al tiempo, siendo uno 10', dos 20' y tres 30'.

El procedimiento seguido es muy parecido al de la primera prueba de ensayos. Se dejaba calentar el horno hasta la temperatura deseada y cuando la alcanzaba, se dejaban 45' de precalentamiento antes de ir introduciendo las probetas, así con todas las temperaturas deseadas. Para las piezas con misma temperatura, pero tiempos diferentes, se introducían al horno primero las de 30', 10' más tarde las de 20' y otras 10' más tarde las de 10'. Se hicieron varias probetas de cada temperatura y tiempo para así poder conocer los resultados de una forma más exacta y no tan aleatoria como si solo se probase una de cada temperatura y tiempo, cinco para cada combinación. Igual que en el procedimiento anterior, se dejó un día completo tras el tratamiento térmico para proceder con los ensayos a tracción con la máquina y las probetas se taparon con una bandeja de aluminio de cocina para eliminar la transmisión de calor por radiación producida por las resistencias del horno.

4.2.2 RESULTADOS

Siguiendo la estructura planteada, se mostrarán los resultados del ensayo. En la Tabla 4 se observa la media de cada tiempo y temperatura, siendo para cada una de estas cinco las probetas ensayadas de las cuales se ha sacado la media con la Ecuación 1.

	120 °C	140 °C	160 °C
10'	273 N	586 N	633 N
20'	423 N	662 N	785 N
30'	308 N	591 N	702 N

Tabla 4. Resultados del ensayo a diferentes temperaturas y tiempos con la cinta adhesiva.

4.2.3 DISCUSIÓN

Los resultados de este ensayo muestran dos tendencias que podemos resaltar claramente. Para ello, se usarán diagramas con las curvas más representativas de tiempo para cada temperatura que servirán como apoyo visual. Estos diagramas muestran resultados distintos que se pueden analizar dependiendo de cómo se enfoque ya que, si se comparan entre ellos, se puede deducir el comportamiento de la probeta según la temperatura a la que ha sido expuesta, mientras que si se comparan individualmente se puede observar cómo se comporta esta según el tiempo que ha estado dentro del horno.

Las Figuras 34, 35 y 36 muestran los diagramas fuerza–deformación para cada temperatura de ensayo e incluyen las curvas que representan los diferentes tiempos de exposición de las probetas en el horno.

Se ha escogido la curva con el valor de fuerza más cercano a la media para cada combinación de temperatura y tiempo que respetara la forma que tenían la mayoría de las curvas de los cinco valores ensayados. Hacer la curva media resulta demasiado complejo debido a que la máquina de ensayos universal con el programa *testXpert III* tomaba valores de tiempo variables en función de cuando se producían cambios considerables en la fuerza que estaba usando la máquina. Con lo que, si de una curva tomaron 300 valores de fuerza distintos, para otra de la misma temperatura y tiempo se tomaron 400. Es por ello por lo que se ha seguido la metodología expuesta anteriormente.

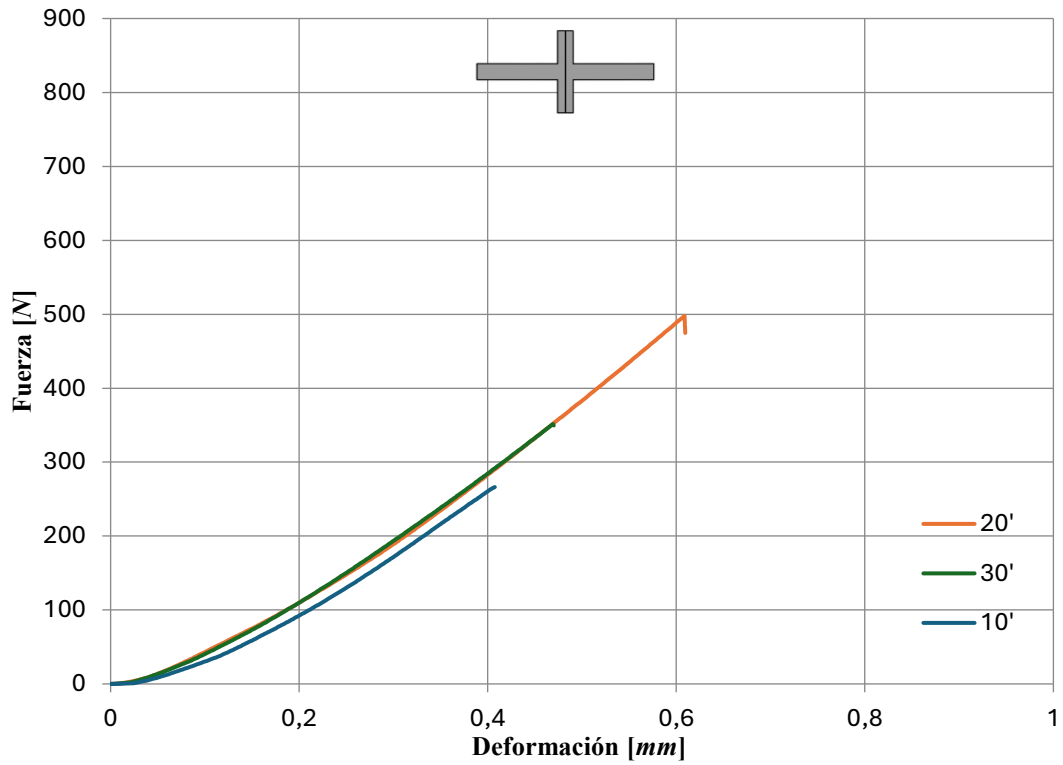


Figura 34. Diagrama fuerza-deformación para cada tiempo de exposición a 120 °C.

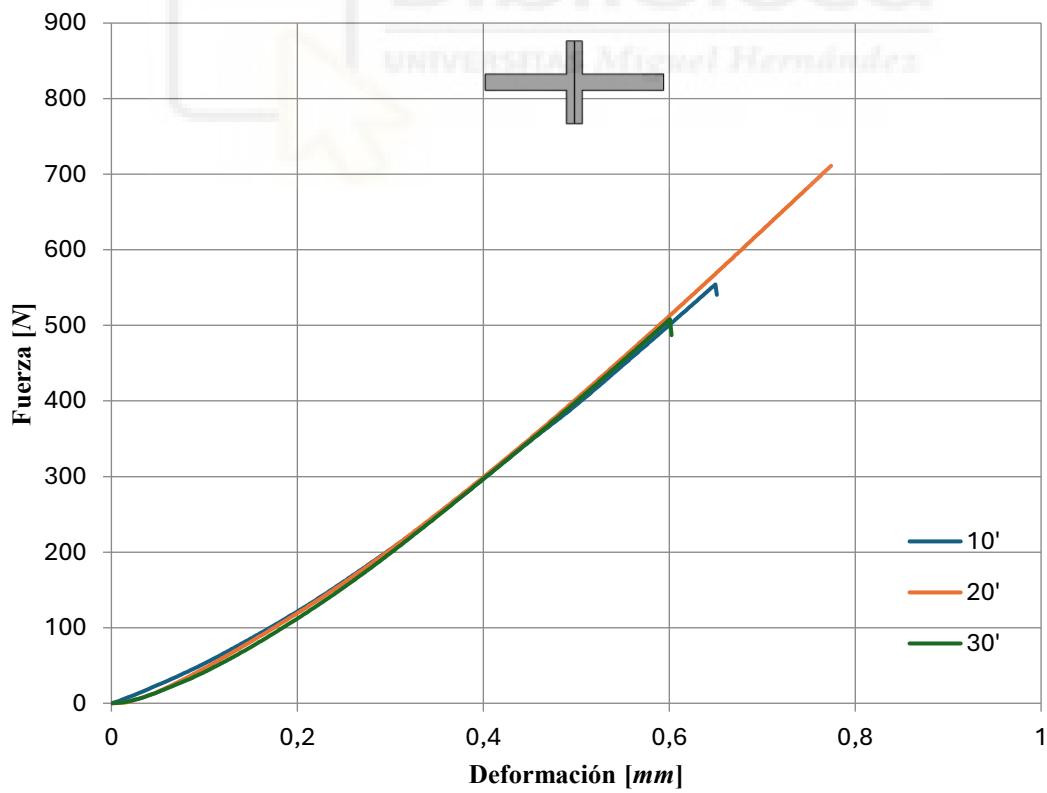


Figura 35. Diagrama fuerza-deformación para cada tiempo de exposición a 140 °C.

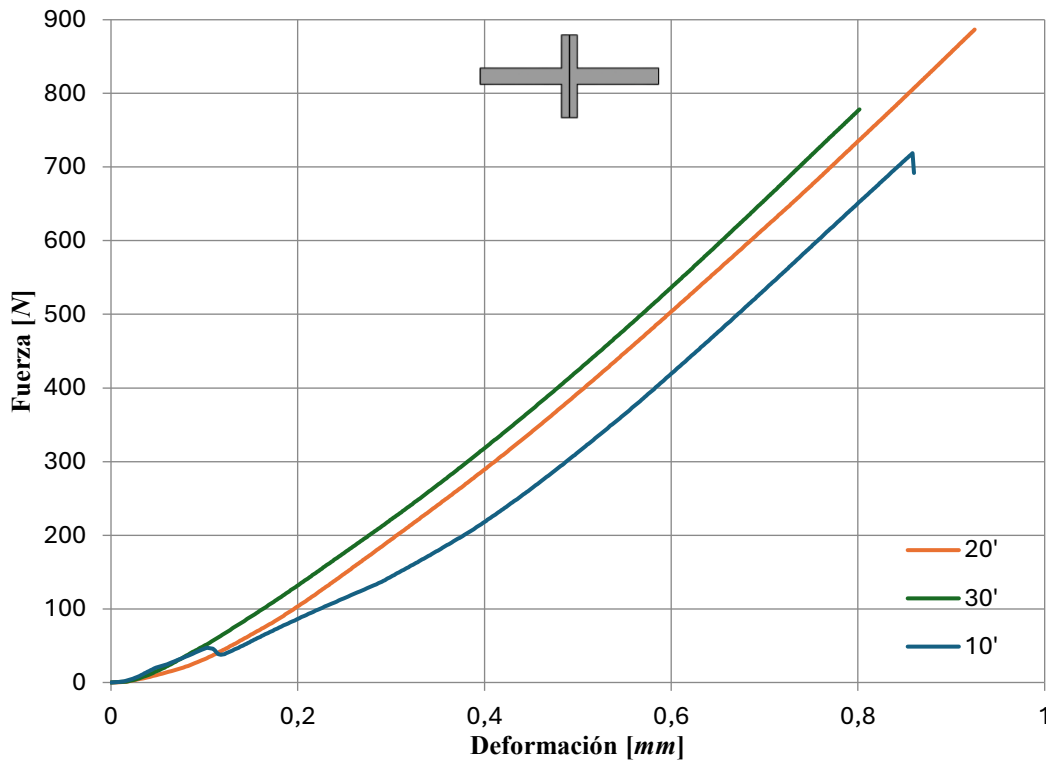


Figura 36. Diagrama fuerza-deformación para cada tiempo de exposición a 160 °C.

Como se ven en los diagramas y en la Tabla 4, a más temperatura hay una mayor resistencia y deformación. Si se comparan los diagramas entre sí, se observa claramente como a medida que la temperatura aumenta hay un aumento creciente de altura y amplitud, lo que evidencia que a más temperatura se someta el PLA mayor será su resistencia y deformación.

Si se ven los diagramas individualmente analizando las curvas de cada una de ellas, se observa que se las que han estado 20' son las que más resistencia son capaces de soportar, seguidas por las de 30' y por último las de 10'. En la Figura 35 se ve la única excepción, ya que al ser los resultados de las curvas 10' y 30' muy parejos, hay una pequeña superioridad de la primera en cuanto a resistencia y deformación que se debe simplemente a que la curva que más se parecía de los cinco ensayos realizados para cada tiempo y temperatura era mayor en 10' que en 30'. Por lo general, Las Figuras muestran una rigidez muy similar entre tiempos y casi idéntica, siendo a 160 °C donde se presenta una mayor diferencia de rigidez entre los tiempos a este valor de temperatura.

Otra cuestión que se debe mencionar es el hecho de las roturas. Como se ha mencionado previamente en este trabajo, las piezas que rompen lo hacen por el agujero diseñado para

hacer de soporte dentro de la máquina de ensayos universal, como se puede ver en la Figura 37.



Figura 37. Probeta que ha sufrido una rotura.

Este hecho hace que no se pueda saber con certeza cual es la resistencia máxima real que es capaz de soportar la unión. De entre todas las probetas que han sido ensayadas (un total de 45), solo cuatro han sufrido una rotura y localizadas en la zona de sujeción. Además, ninguna de ellas ha sido la probeta que mayor resistencia máxima ha tenido ya que el valor de la fuerza en estas probetas que han roto está comprendido entre los 690 N y los 750 N . Se ha hecho una comparación entre la probeta rota que mayor fuerza a resistido antes de romper (750 N a 160 $^{\circ}C$ y 20') con la que más resistencia a soportado (887 N a la misma temperatura y tiempo) que puede verse mejor en la Figura 38.

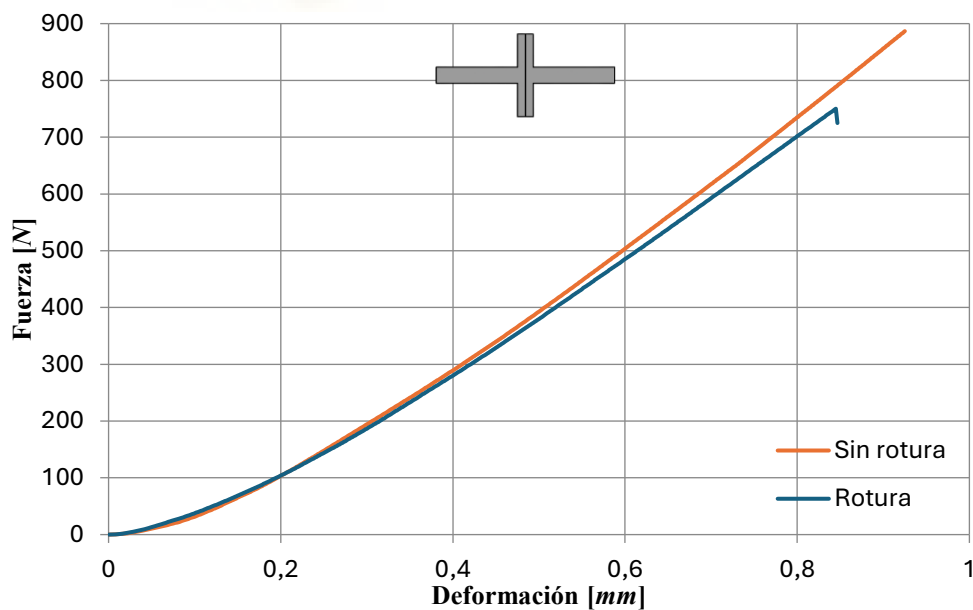


Figura 38. Comparación entre probeta con rotura y la probeta que más resistencia ha soportado sin rotura, ambas con la misma temperatura y tiempo.

Como se observa, no existen grandes diferencias aparentes. Ambas probetas tienen una rigidez similar, la diferencia radica en la resistencia máxima soportada por cada una de ellas. Mientras que la probeta que no ha sufrido la rotura ha alcanzado los 887 *N* fallando por la unión, la otra se quedó en 750 *N* para posteriormente caer bruscamente 25 *N* y romper por la zona de sujeción. Esto puede indicar que esta última pueda haber sufrido un defecto que haya ocasionado esa rotura por diferentes motivos, como puede ser una colocación algo distinta en la máquina o que el contacto con la bandeja de horno haya sido lo suficientemente diferente entre ambas como para poder haber producido el defecto en cuestión.

4.3 ENSAYOS DE IMPACTO POR CAÍDA.

La tercera parte de la experimentación consistió en la adhesión de dos semiesferas con cinta adhesiva para posteriormente ensayarlas mediante impacto por caída y ver a que altura rompían. Para ello, en una pared se colocaron notas adhesivas cada 25 *cm* hasta llegar a los 2 *m*, como se puede observar en la Figura 40.

En la Figura 39 se puede observar el diseño de las esferas. Estas tienen un diámetro de 4 *cm* y se han impreso de acuerdo con la Figura 16, siendo originalmente semiesferas.

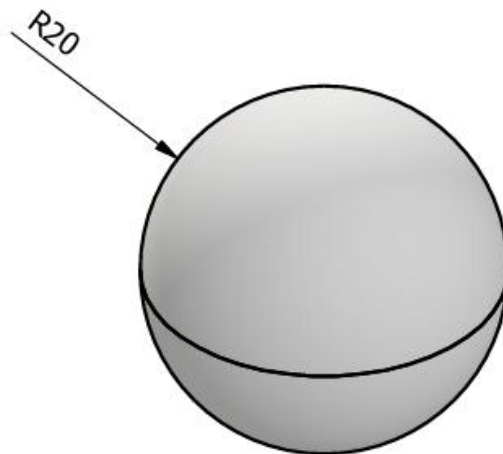


Figura 39. Dimensiones de la esfera en *mm*.

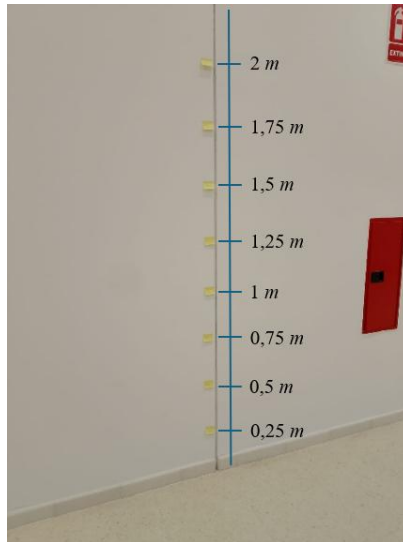


Figura 40. Notas adhesivas para el ensayo de las esferas de PLA.

4.3.1 METODOLOGÍA

Para ello la experimentación se dividió en dos partes. La primera consistió en poner las esferas en contacto con la bandeja del horno a las tres temperaturas del ensayo anterior añadiendo otra más (120 °C, 140 °C, 160 °C y 170 °C) y sumando otro tiempo más que el anterior (10', 20', 30' y 40'). El límite se ha marcado en 170 °C porque la diferencia en cuanto a la estructura geométrica de las piezas a esa temperatura no es muy diferente que a 160 °C. A más no se ha llegado debido a que a partir de esa temperatura hay una deformación muy visible como se puede ver en la Figura 41. Las esferas llevarían dos bandas de cinta perpendiculares entre sí y perpendicular a la línea de unión entre las dos piezas (Ver Figura 42).



Figura 41. Esfera sometida a 180 °C dentro del horno.



Figura 42. Cinta adhesiva colocada alrededor de la esfera antes de ser sometida al tratamiento térmico.

En cuanto al procedimiento del tratamiento térmico, este fue exactamente igual que el de las probetas, pero añadiendo las esferas de 40'. También se dejó un día entre el tratamiento y el ensayo. Como en todos los procesos de recocido, las esferas se cubrieron con una bandeja de cocina de aluminio para eliminar la transmisión de calor por radiación producida por las resistencias del horno.



Figura 43. Esfera sobre la bandeja del horno antes de ser sometida al tratamiento térmico.

La segunda parte de este ensayo consistió en colocar la esfera sobre arena. Esta fue depositada sobre una bandeja de aluminio de cocina similar a las que se han usado para tapar las piezas. Para ello, se encendió el horno a 170 °C y se sometió a un precalentamiento de 2 horas. El objetivo era comprobar si la arena puede ser capaz de redistribuir mejor el calor que la bandeja de metal del horno, ya que en esta se produce calor en la esfera en un punto concreto, lo que puede ocasionar abolladuras innecesarias y derretimientos tempranos, por eso se utilizó una temperatura mayor que los ensayos sobre la bandeja de metal. Esta vez la esfera se cubrió con una banda de cinta perpendicular a la zona de unión y otra paralela, para posteriormente someterla a un enterramiento parcial como se ve en la Figura 45. Al principio se enterró completamente, pero esta metodología se descartó debido a que la arena aplastaba la esfera dejando marcas claras que comprometían la integridad de la geometría inicial. La Figura 44 muestra como quedó una esfera tras este enterramiento. En cuanto al uso de banda paralela, se hizo para que no pudiese entrar arena por la zona de unión. Con ello se sometió a 170 °C durante 5', 10' y 15'. El resto de las condiciones se mantuvieron iguales que en los otros (bandeja de aluminio sobre las piezas, un día entre tratamiento térmico y ensayo, ...).



Figura 44. Esfera enterrada totalmente en la arena.



Figura 45. Esfera sobre la arena en el horno para realizar el tratamiento térmico.

4.3.2 RESULTADOS

A continuación, se muestra la Tabla 5 con la altura de rotura media de las esferas para cada temperatura y tiempo apoyadas sobre la bandeja de metal del horno.

Metal	10'	20'	30'	40'
120 °C	0,60 m	0,75 m	0,70 m	0,85 m
140 °C	1,35 m	1,85 m	1,50 m	1,70 m
160 °C	1,50 m	1,50 m	1,90 m	1,85 m
170 °C	0,50 m	1,70 m	2 m	2 m

Tabla 5. Altura de rotura media de las esferas.

Para ello se ha contado con tres esferas para cada combinación de tiempo y temperatura.

La tabla con los ensayos en la arena no se va a mostrar, ya que todas las esferas han soportado la altura límite marcada en 2 metros.

4.3.3 DISCUSIÓN

Acerca de la primera parte del ensayo, las esferas siguen un patrón más o menos marcado. Por lo general a más tiempo y más temperatura mejor resistencia al impacto salvo en algunos casos extremos como en 170 °C y 10' que no aguantaron lo suficiente. Esto se puede deber a varios factores, pero el más común es por la aleatoriedad del lanzamiento. Cuando se sostiene la esfera para dejarla caer, no se deja en una posición concreta, lo que puede generar que por una casualidad todas las uniones de ese tipo de tratamiento térmico hayan golpeado con la parte más frágil de la unión. Esto no es común, pero puede suceder. Por el lado geométrico, las esferas no sufren cambios significativos en cuanto a su estructura dependiendo el tiempo y la temperatura. El factor que más influye en este caso es la colocación de estas encima de la bandeja del horno. Esto se puede visualizar mejor en la Figura 46, donde se ven dos esferas sometidas al mismo proceso de tratamiento térmico, pero con diferentes distorsiones geométricas. El mayor problema de usar la bandeja del horno como soporte es que las esferas se pueden abollar u ovalar, cosa que les quita practicidad. Es por ello por lo que se decidió usar la arena para ver cómo se comportaban.



Figura 46. dos esferas sometidas al mismo tratamiento térmico.

Por otro lado, usando la arena se han encontrado mejores resultados. En todos los tiempos la esfera ha aguantado más de 2 metros, lo que indica que puede ser una buena opción para crear la unión.

En cuanto a las deformaciones en su estructura, se observa que la arena reparte mejor el calor y no se ven puntos con más distorsiones que otros como sucedía usando como apoyo la bandeja del horno. En la Figura 47 se puede ver cómo queda una de las esferas estando 10' en el horno. Como se ve, no hay abolladuras, pero si pequeñas discontinuidades fruto

del calor. También la zona de la unión se ve más compacta y no tanto como si estuviese en contacto con el metal, como se puede ver en la Figura 46 donde la zona de unión es mucho más visible. Esto convierte a la arena en una buena opción para mejorar la unión, minimizar tiempos y reducir deformaciones innecesarias. En el próximo ensayo se volverá a usar la arena para ver si se pueden aprovechar estas ventajas en piezas con voladizo.



Figura 47. Esferas colocadas sobre arena tras el tratamiento térmico.

4.4 ARENA COMO SUSTENTO PARA PIEZAS CON VOLADIZO

El último ensayo realizado consistió en ver si con la arena como sustento de piezas con voladizo (el avión) se evitaba la deformación de estas partes a temperaturas muy altas.

4.4.1 METODOLOGÍA

Siguiendo la línea del último ensayo, se introdujeron al horno durante 30' y a 170 °C dos aviones, uno colocado sobre la bandeja de metal del horno y uno semienterrado en la arena, como se puede ver en la Figura 48. Para ello se precalentó el horno durante 2 horas para que la arena pudiese conseguir la temperatura óptima para así poder sacar unas conclusiones lo más precisas posible.



Figura 48. El avión en el horno sobre el metal y sobre la arena.

4.4.2 RESULTADOS

Tras el tratamiento térmico se sacaron los aviones y quedaron como se puede ver en la Figura 49, siendo el de la izquierda el apoyado sobre el metal y el de la derecha sobre la arena.

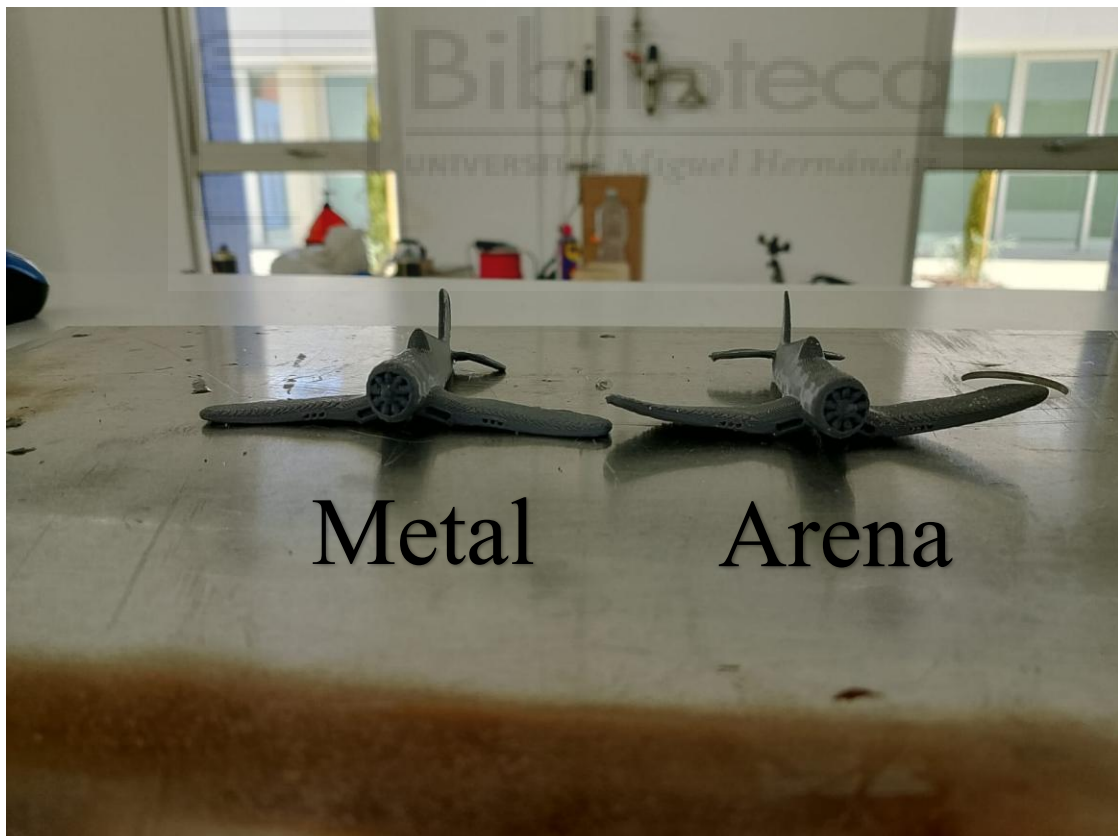


Figura 49. Aviones tras ser sometidos al tratamiento térmico con diferentes sustentos.

4.4.3 DISCUSIÓN

Tal y como se ha mostrado en la Figura 49, la arena ha evitado la caída de las alas en voladizo, que conservaron su característica forma en V. Las alas traseras también aguantaron bien el calor. No se puede decir lo mismo del avión apoyado sobre el metal cuyas alas cayeron y se pegaron a la bandeja.

A falta de más validación, se puede afirmar que la arena puede servir como sustento para piezas en voladizo ya que mantiene la forma de la pieza sin mucha distorsión geométrica.



5. CONCLUSIONES

Este trabajo ha demostrado que es posible lograr la unión de piezas fabricadas en PLA mediante un tratamiento térmico, similar a un recocido, pero con menores tiempos de exposición, empleando para ello un horno convencional y utilizando un material de soporte casero como es la cinta adhesiva tradicional. El tratamiento térmico aplicado a probetas en T consiguió uniones sólidas con una temperatura muy superior a la de transición vítrea del PLA (60 °C) y entorno a la temperatura de fusión de este material (150–180 °C). A su vez, se consiguieron crear esferas más o menos funcionales a partir de dos semiesferas utilizando también la cinta adhesiva como método para asegurar el contacto de las piezas y arena para distribuir las deformaciones térmicas producidas por el calor. El uso de la arena no se limitó a esto, sino que también se usó y comprobó su efectividad para utilizarla como sustento en piezas con voladizo y así evitar el derretimiento de estas zonas.

Los ensayos de tracción sobre las probetas tras el tratamiento térmico han permitido cuantificar la viabilidad de la unión, llegando inclusive en algunas a la rotura de las propias probetas de PLA en lugar de su separación. Se han llegado a un valor máximo de resistencia de 887 N a 160 °C con un tiempo de 20', siendo esta también la combinación de tiempo y temperatura a la que se ha llegado al valor medio máximo de fuerza (785 N). Por otro lado, queda patente que incrementando la temperatura se reduce el tiempo de tratamiento térmico necesario para lograr la adhesión. Lo que se ha visto también es que a partir de 20' la fuerza decae, siendo este rango de tiempo en el que se producen los mayores valores de resistencia para cada una de las temperaturas probadas.

Los ensayos de las esferas han dejado patente dos cosas, una es que cuando se realiza el tratamiento térmico sobre el metal no se observa demasiada variación en cuanto a la geometría de la pieza cuando se aumentan las temperaturas progresivamente, pero sí en cuanto a su resistencia. La segunda es que el uso de arena reduce los tiempos a misma temperatura para llegar a resistencias similares a las de las esferas apoyadas en el metal, así como también reparte las protuberancias ocasionadas por el calor por todo el conjunto, lo que evita abolladuras. El mejor resultado lo ha dado la esfera que se ha colocado sobre la arena a 170 °C durante 10' ya que se ha obtenido un acabado superficial más uniforme que usando como sustento el metal y también ha aguantado el golpe a más de 2 metros.

La investigación actual de este trabajo se centra en el desarrollo de una metodología de unión que permita ensamblar piezas reales fabricadas por FDM en PLA. El objetivo final es que usuarios particulares sean capaces de crear piezas que por sus dimensiones o características no pueden ser impresas directamente, pero que se pueden dividir en diferentes secciones para ser unidas al introducirlas ensambladas en un horno convencional. Además, las piezas ensambladas de esta forma pueden usarse en ámbitos donde el uso de adhesivos químicos se encuentre restringido, como en prótesis quirúrgicas donde el PLA está siendo actualmente empleado debido a su biocompatibilidad. Es por eso por lo que se han usado materiales como la cinta adhesiva, que cualquier usuario común tiene en casa.

Aún con estos resultados, han existido varias limitaciones que hay que tener en cuenta para futuras investigaciones. En cuanto a las probetas, el haberlas sometido a un tratamiento térmico con una temperatura tan elevada y tener esos agujeros para poder ensayarlas ha hecho que existan distorsiones térmicas que limiten la temperatura y la fuerza máxima de unión, lo que podría haberse traducido en una unión mucho más sólida. En cuanto a las esferas, a pesar de crear conjuntos sólidos, el acabado superficial no deja de tener rugosidades que provocan que estas no sean totalmente esféricas, cosa que reduce el objetivo práctico del trabajo.

A pesar de esto, los resultados son satisfactorios y dan pie a que en un futuro se puedan hacer variaciones en la metodología que permitan abordar los problemas que se han encontrado.

Una opción es realizar el mismo estudio, pero variando los parámetros como por ejemplo el porcentaje de relleno o la altura de capas. Inclusive se podrían variar otras cosas como el material o el color del PLA, lo que serviría para tener una idea de la diferencia que hay a la hora de usar unos u otros y cual sería mejor para según qué situación.

Otra cosa que se podría hacer para mejorar el diseño es realizar uno en el que no haya que usar pasadores para colocar las piezas en la máquina universal de ensayos. Los agujeros han ayudado a que las piezas con una unión débil puedan ser ensayadas, ya que de otra forma se iban a romper al colocarlas entre las mordazas. Un diseño que no necesitase de estos ayudaría a observar hasta que fuerza podrían llegar las probetas que han roto por la zona de soporte y ver si serían capaces de llegar a una rotura real. Seguir la idea de los machihembrados también podría ser una opción, los vistos en la Figura 23 podrían ser

rediseñados para darles una forma más simple que no diese tantos problemas a la hora juntarlos.

Por último, se debería realizar un estudio más profundo del uso de la arena como sustento. En este trabajo se ha tocado de una forma superficial para estudiar su viabilidad, pero no se ha profundizado en los tiempos y temperaturas óptimos con los que poder usarla de la mejor forma en uniones de PLA. Todas estas propuestas quedan en el aire para futuros estudios.



6. REFERENCIAS

- [1] L. Zhou, J. Miller, J. Vezza, M. Mayster, M. Raffay, Q. Justice, Z. Al Tamimi, G. Hansotte, L.D. Sunkara, J. Bernat. “Additive Manufacturing: A Comprehensive Review”. *Sensors*, vol. 24, n° 9, art. 2668, 2024.
- [2] L. Ben Said, B. Ayadi, S. Alharbi, F. Dammak. “Recent Advances in Additive Manufacturing: A Review of Current Developments and Future Directions”. *Machines*, vol. 13, n° 9, art. 813, 2025.
- [3] T.Q. Tran. “Recent Advances in 3D Printing and Additive Manufacturing Technology”. *Appl. Sci.*, vol. 15, n° 17, art. 9599, 2025.
- [4] S. Wickramasinghe, T. Do, P. Tran. “FDM-Based 3D Printing of Polymer and Associated Composite: A Review on Mechanical Properties, Defects and Treatments”. *Polymers*, vol. 12, n° 7, art. 1529, 2020.
- [5] M. Enriconi, R. Rodriguez, M. Araújo, J. Rocha, R. García-Martín, J. Ribeiro, J. Pisonero, M. Rodríguez-Martín. “A Comprehensive Review of Fused Filament Fabrication: Numerical Modeling Approaches and Emerging Trends”. *Appl. Sci.*, vol. 15, n° 12, art. 6696, 2025.
- [6] J.M. Chacón, M.A. Caminero, E. García-Plaza, P.J. Núñez. “Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection”. *Materials & Design*, vol. 124, pp. 143-157, 2017.
- [7] E.H. Tümer, H.Y. Erbil. “Extrusion-Based 3D Printing Applications of PLA Composites: A Review”. *Coatings*, vol. 11, n.º 4, 390, 2021.
- [8] M. Li, W. Lei, W. Yu. “FDM 3D Printing and Properties of WF/PBAT/PLA Composites”. *Molecules*, vol. 29, n° 21, art. 5087, 2024.
- [9] S.C. Albu. “Contribution Regarding the Production of PLA Products Through 3D Printing, FDM Technology, Used in the Automotive Industry”. *Conference paper: The 16th International Conference Interdisciplinarity in Engineering. Inter-Eng 2022. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 605, pp. 197-209, 2022.

- [10] D. Yagnik. "Fused deposition modeling—a rapid prototyping technique for product cycle time reduction cost effectively in aerospace applications". IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, vol. 5, pp. 62-68, 2014.
- [11] E. Rubies, J. Palacín. "Design and FDM/FFF Implementation of a Compact Omnidirectional Wheel for a Mobile Robot and Assessment of ABS and PLA Printing Materials". Robotics, vol. 9, n.º 2, 43, 2020.
- [12] W.J. Choi, K.S. Hwang, H.J. Kwon, C. Lee, C.H. Kim, T.H. Kim, S.W. Heo, J.H. Kim, J.Y. Lee. "Rapid development of dual porous poly(lactic acid) foam using fused deposition modeling (FDM) 3D printing for medical scaffold application". Materials Science and Engineering: C, vol. 110, 110693, 2020.
- [13] D.-I. Catana, D.-I. Brus, M.-A. Pop, M.-A. Luca. "Influence of 3D Printing Parameters on the Mechanical Properties for Numerical Simulation of the Poly (Lactic Acid)". Polymers, vol. 17, nº 17, art. 2271, 2025.
- [14] V.S. Hiremath, T. Dhilipkumar, D.M. Reddy, S. Bagewadi. "Effect of print orientation on tensile and shear properties of 3D printed lap joints". Materials Today: Proceedings, 2023.
- [15] Ö. Öz, & F.H. Öztürk. "An investigation on failure behaviour of bonded polylactic acid adherends produced by 3D printing process: experimental and numerical approach". J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng, vol. 45, 399, 2023.
- [16] V.S. Hiremath, M.D. Reddy, R.M. Reddy, J. Naveen, R.P. Chand. "Enhancing shear strength in 3D printed single lap composite joints: A multi-faceted exploration of GNP integration, print orientation, utilizing artificial neural networks, and Dynamic analysis". J Appl Polym Sci, vol. 141, 2024.
- [17] B. Paygozar, R.M. Görgülüarslan. "Bonding Additively Manufactured PLA Materials: Effects of Joint Scarf Angle and Substrate Raster Orientation". MATİM, vol. 21, pp. 33-42, 2023.
- [18] M. Rajesh, R. Venkatesan, S. Kesavan et al. "Influence of 3D printed adherend design on structural performance and vibrational behaviour of adhesively bonded joints". J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng, vol. 46, 402, 2024.

- [19] I. Manoj, A.K. Shah, A. Jain. "Strength and failure assessments of 3D printed PLA single lap joints: Experimental and numerical analysis". *Engineering Failure Analysis*, vol. 161, pp. 108257, 2024.
- [20] G. Şahin, N. Anaç, O. Koçar. "Investigation of the Weldability of 3D-Printed Multi-Material Materials (PLA and PLA Wood) Using Friction Stir Welding". *Polymers*, vol. 16, n° 23, art. 3249, 2024.
- [21] C.-C. Kuo, H.-X. Liang, S.-H. Huang, S.-F. Tseng. "Enhancing the Weld Quality of Polylactic Acid Biomedical Materials Using Rotary Friction Welding". *Polymers*, vol. 16, n° 7, art. 991, 2024.
- [22] M. Shbanah, M. Jordanov, Z. Nyikes, L. Tóth, T.A. Kovács. "The Effect of Heat Treatment on a 3D Printed PLA Polymer's Mechanical Properties". *Polymers*, vol. 15, n.º 6, 1587, 2023.
- [23] R. Hedayati, M. Alavi, M. Sadighi. "Effect of Degradation of Polylactic Acid (PLA) on Dynamic Mechanical Response of 3D Printed Lattice Structures". *Materials*, vol. 17, n° 15, art. 3674, 2024.
- [24] J. Lluch-Cerezo, R. Benavente, M.D. Meseguer, J.A. García-Manrique. "Effect of a Powder Mould in the Post-Process Thermal Treatment of ABS Parts Manufactured with FDM Technology". *Polymers*, vol. 13, n° 15, art. 2422, 2021.
- [25] M. Fabra-Rodríguez, F.J. Simón-Portillo, D. Abellán-López, O. Cuadrado-Sempere, E. Velasco-Sánchez, M. Sánchez-Lozano. "Estudio de la unión por temperatura de piezas impresas en PLA". XVI Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica (CIBIM), Concepción, Chile, 2024.
- [26] O. Tunçel. "Optimization of Charpy Impact Strength of Tough PLA Samples Produced by 3D Printing Using the Taguchi Method". *Polymers*, vol. 16, n° 4, art. 459, 2024.
- [27] D.D. Ardeljan, D. Frunzaverde, V. Cojocar, R.R. Turiac, N. Băcescu, C.R. Ciubotariu, G. Mărginean. "The Impact of Elevated Printing Speeds and Filament Color on the Dimensional Precision and Tensile Properties of FDM-Printed PLA Specimens". *Polymers*, vol. 17, n° 15, art. 2090, 2025.

[28] S. Ekşi, C. Karakaya. “Effects of Process Parameters on Tensile Properties of 3D-Printed PLA Parts Fabricated with the FDM Method”. *Polymers*, vol. 17, n° 14, art. 1934, 2025.

[29] Y.Z. Turgut, S. Akıncıoğlu, G. Akıncıoğlu. “Tensile Testing of Polylactic Acid (PLA) Samples Produced with a 3D Printer and Finite Element Analysis”. *J. Adv. Manuf. Eng.*, vol. 6, n° 2, pp. 111–120, 2025.

