



Efecto de la degradación acelerada sobre las dimensiones y la resistencia mecánica en piezas de PLA impresas en 3D aplicando diferentes técnicas de fabricación del filamento

Laura Castañón Jano¹, Mario Lozano Corona¹, Paula Hoyo¹

¹ Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación. E.T.S. de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones. Universidad de Cantabria

La fabricación aditiva mediante impresión 3D de polímeros, ha ganado popularidad en los últimos años debido a su accesibilidad y bajo desperdicio de material. Esta tecnología se aplica en diversas áreas, como prototipado rápido, creación de maquetas, herramientas, utillajes, automoción, ortopedia y odontología. Sin embargo, su potencial para fabricar moldes o encofrados destinados a geometrías complejas en hormigón, como la reproducción de elementos patrimoniales (estatuas, frisos, capiteles), o para estructuras funcionales con formas curvadas y/o con orificios como arrecifes artificiales, ha sido menos explorado. En estas últimas aplicaciones, donde se requiere durabilidad y reutilización, las piezas deben resistir condiciones climáticas adversas (exposición al sol y la lluvia) y el contacto con hormigón de alta alcalinidad (pH ~13), que podría afectar las propiedades del material.

Este estudio analiza el rendimiento de probetas de PLA impresas en 3D, evaluando la estabilidad dimensional y la resistencia mecánica bajo condiciones de degradación acelerada. Se emplean cuatro tipos de filamentos de PLA con distintas composiciones y métodos de fabricación: (1) filamento extruido en laboratorio a partir de pellets de PLA virgen; (2) filamento de PLA comercial producido mediante extrusión industrial, enfriado en agua y probablemente con plastificantes añadidos; (3) filamento de PLA con polvo de metal, extruido en laboratorio mediante mezcla directa de pellets y un 50% en peso de polvo metálico con aceite; y (4) filamento de PLA con un 50% en peso de polvo metálico encapsulado en píldoras de PLA.

Las probetas rectangulares se fabricaron según la norma ISO-167, utilizando una impresora Artillery Sidewinder X1. La mitad de las probetas fueron sometidas a degradación por exposición a rayos UVA y simulación de lluvia, mientras que la otra mitad fue sumergida en una solución de sosa (pH 13). Se realizarán cinco extracciones en intervalos regulares para evaluar la evolución de la degradación, midiendo las dimensiones y la resistencia a flexión tras cada extracción. Este análisis permitirá determinar la viabilidad de estos filamentos en aplicaciones de moldes reutilizables y seleccionará la composición de filamento más adecuada según su resistencia a condiciones de uso exigentes.

1. Introducción

En los últimos años, la fabricación aditiva ha experimentado un notable crecimiento, consolidándose como una tecnología clave en diversas industrias [1–4]. Entre las múltiples técnicas disponibles, la Modelización por Deposición Fundida (Fused Deposition Modeling, FDM) destaca por su accesibilidad y versatilidad. Este método se basa en la extrusión de filamentos termoplásticos capa por capa para la fabricación de objetos tridimensionales, lo que lo convierte en una opción idónea para el prototipado rápido y la producción personalizada.

Uno de los sectores en los que la impresión FDM está adquiriendo una relevancia creciente es el de la construcción ([5,6]). En particular, la fabricación de encofrados mediante impresión 3D ha surgido como una alternativa innovadora a los métodos tradicionales. Hasta la fecha, los encofrados han sido fabricados principalmente en madera o en paneles metálicos de acero o aluminio. Mientras que los primeros son económicos pero de durabilidad limitada, los segundos ofrecen mayor resistencia y flexibilidad en términos de diseño. No obstante, ambos presentan una limitación común: la dificultad para generar formas complejas, como geometrías curvas, diseños orgánicos o elementos con recovecos. En este contexto, la impresión FDM ofrece una solución prometedora al permitir la producción rápida y rentable de encofrados con una reducción significativa de residuos y una mayor libertad en el diseño de formas complejas.

Desde 2016, múltiples estudios han explorado la aplicación de esta tecnología en la fabricación de elementos estructurales y decorativos, como escaleras [5], cúpulas y columnas [6], o piezas ornamentales [6,7]. En algunos casos, se han empleado moldes reutilizables, mientras que, en otros, especialmente en la producción de piezas singulares, se ha optado por encofrados de tipo piel con el fin de minimizar el consumo de material [8].

Si bien los resultados han sido prometedores, la implementación de encofrados impresos en 3D mediante FDM plantea ciertos desafíos, especialmente en lo que respecta a su integridad y durabilidad. En particular, los encofrados reutilizables deben resistir no solo el contacto directo con el hormigón, sino también las condiciones ambientales adversas a las que pueden estar expuestos durante su uso y almacenamiento. Dado que los termoplásticos presentan una sensibilidad variable frente a estos factores, resulta fundamental evaluar su comportamiento en entornos reales de construcción.

En este sentido, los materiales más empleados en la impresión FDM para aplicaciones en construcción han sido el PLA, el PETg y el TPU [9,10]. El PLA, en particular, se ha utilizado ampliamente debido a su facilidad de impresión y bajo coste. No obstante, sus propiedades mecánicas pueden resultar insuficientes para ciertas aplicaciones, lo que ha motivado el desarrollo de filamentos compuestos que incorporan matrices poliméricas con aditivos metálicos en polvo o fibras. La bibliografía recoge numerosos estudios sobre materiales híbridos que incluyen metal, madera o fibras textiles [11–16], aunque hasta el momento ninguno de ellos ha sido evaluado específicamente para su uso en encofrados impresos en 3D. Además, la forma en la que se combinan la matriz polimérica y los aditivos juega un papel crucial en la resistencia mecánica y estabilidad dimensional del material final [17,18]. Asimismo, las impresoras de gran formato empleadas en la fabricación de encofrados suelen utilizar pellets en lugar de filamentos, lo que plantea la necesidad de analizar si existen diferencias significativas en el comportamiento de los materiales según el formato de suministro y el proceso de extrusión empleado.

Otro aspecto relevante es la influencia del pH básico del hormigón en los materiales impresos en 3D. Actualmente, la bibliografía sobre este tema es limitada [19], y los estudios existentes han evaluado exposiciones puntuales a valores de pH superiores a los que pueden presentarse en el hormigón en condiciones reales. Esto impide determinar con precisión la evolución de la degradación a lo largo del tiempo, tanto en términos de propiedades mecánicas como de estabilidad dimensional y pérdida de peso. Aunque algunos autores han estudiado la degradación del PLA [20], pocos han abordado este fenómeno en probetas impresas en 3D, y aquellos que lo han hecho se han centrado mayoritariamente en su caracterización química, sin analizar el impacto en sus propiedades estructurales [21].

Ante esta falta de información, el presente estudio se plantea como una contribución relevante para la comprensión del comportamiento de materiales impresos en 3D sometidos a condiciones reales de exposición. En concreto, se investigará la viabilidad del uso de PLA y PLA aditivado, fabricado mediante cuatro métodos diferentes, para su aplicación en encofrados. Se evaluará su resistencia frente a la alcalinidad del hormigón y las elevadas temperaturas generadas durante el proceso de curado, así como la posible influencia de la radiación solar y la exposición a la lluvia. Para ello, los materiales serán sometidos a distintos niveles de degradación durante periodos de entre 1 día y 10 semanas, permitiendo analizar su evolución en el tiempo.

A partir de esta investigación, se tratarán de responder las siguientes cuestiones:

- ¿Existen diferencias en la degradación entre el PLA suministrado en forma de filamento comercial, con distintas coloraciones, y el PLA en formato pellet extruido por impresoras de gran formato?

- ¿Influye la metodología de fabricación del filamento de PLA aditivado con metal en la velocidad de degradación y en sus propiedades mecánicas?
- ¿Es posible establecer un límite de exposición a agentes degradantes para los materiales estudiados?

Los resultados obtenidos en este estudio permitirán ampliar el conocimiento sobre el comportamiento de estos materiales y su variabilidad en función de su proceso de fabricación en aplicaciones de encofrado, facilitando su optimización para su empleo en entornos de construcción.

2. Materiales

Los materiales utilizados en este trabajo se pueden dividir en aquellos implicados en la fabricación de las probetas que serán sometidas a degradación y evaluación, y otros materiales auxiliares necesarios para el establecimiento de las condiciones de degradación. La fabricación de las diferentes probetas se realiza empleando 3 materiales. El primero de ellos es una bobina de filamento de ácido poliláctico (PLA) comercial, de color gris y diámetro 1,75 mm de la marca EOLAS Prints. En segundo lugar, se emplean pellets de PLA transparente de la misma marca. Además, en algunos casos se empleará polvo de metal como aditivo, mezclándolo con la base polimérica de PLA. Este polvo metálico es suministrado por el grupo Celsa. Se la denomina cascarilla, y es un residuo procedente del proceso de laminación tras el proceso de fundición del acero. Cuando el metal fundido entra en contacto con el aire, se forma una capa de óxido en la superficie. Esta cáscara (de ahí la denominación de cascarilla), se desprende al pasar por los rodillos del proceso de laminación y forma un polvo compuesto principalmente por distintas fases de hierro ($\approx 97\%$) y un 3% de óxidos de manganeso, cobre, zinc y otros componentes. Por otro lado, se utilizan agua destilada y sosa cáustica en formato líquido al 40% en peso para simular la exposición mediante contacto directo del encofrado polimérico con el mortero fresco.

3. Métodos

3.1. Casos de estudio

Los materiales descritos en el apartado 2 se van a utilizar y combinar para generar 4 tipologías de probetas, que diferirán en su composición y método de fabricación del filamento.

Tipo1: PLAcO

Composición: PLA suministrado por el fabricante en forma de filamento, con coloración gris.

Método de fabricación del filamento: este filamento se fabrica en las instalaciones de la empresa empleando para ello una extrusora industrial de simple tornillo con refrigeración por agua y posterior bobinado. La materia prima consiste en pellets de PLA combinados con una pequeña cantidad de pellets que poseen la pigmentación gris que le dará el color definitivo al filamento.

Tipo2: PLApE

Composición: pellets de PLA transparente

Método de fabricación del filamento: el Filamento se fabrica con una extrusora de escritorio disponible en nuestro departamento, que posee ventilación por aire.

Tipo3: PLAmE_trad

Composición: 50% en peso de pellets de PLA transparente, 50% en peso de polvo de metal y aceite de coco

Método de fabricación del filamento: los pellets se impregnan de aceite de coco, y se mezclan con el polvo de metal en un recipiente, que se vuelca en la tolva de la extrusora de escritorio. El aceite ayuda a que el polvo se quede adherido a los pellets y no descienda al fondo de la tolva, evitando en la medida de lo posible una composición irregular del filamento a lo largo de toda su longitud.

Tipo4: PLAmE_caps

Composición: 50% en peso de pellets de PLA transparente y 50% en peso de polvo de metal

Método de fabricación del filamento: con el objetivo de conseguir una homogeneidad total en la composición del filamento, se imprimen pequeñas cápsulas con filamento fabricado a partir de pellets de PLA, que se rellenan del polvo de metal y luego se cierran. Estas cápsulas son las que alimentan la tolva de la extrusora para imprimir filamento de PLA aditivado con polvo de metal con una mayor regularidad en su composición.

Se fabricaron 45 probetas de cada una de las 4 tipologías. Por tanto, se fabricaron un total de 180 probetas.

De las 45 probetas de cada caso, 20 se sometieron a degradación de agentes atmosféricos (UVA+pulverización), 20 a una degradación por PH básico e hidrólisis 5 se dejaron sin degradar, con el fin de poder realizar un análisis comparativo con el material intacto.

Las 20 probetas que se degradaron se dividieron en 5 grupos de 4 probetas, que se sometieron a diferentes tiempos de degradación, con el fin de ver la evolución de esta con el tiempo. Los periodos de degradación también se detallan en los apartados siguientes y dependen del tipo de degradación y de la composición del material.

Tabla 1: Agrupación de probetas de cada tipología.

	AGENTES ATMOSFÉRICOS	PH BÁSICO E HIDRÓLISIS	SIN DEGRADACIÓN
GRUPO 1	Probetas 1 a 4	Probetas 21 a 24	Probetas 41 a 45
GRUPO 2	Probetas 5 a 8	Probetas 25 a 28	
GRUPO 3	Probetas 9 a 12	Probetas 29 a 32	
GRUPO 4	Probetas 13 a 16	Probetas 33 a 36	
GRUPO 5	Probetas 17 a 20	Probetas 37 a 40	

3.2. Etapas de fabricación de las probetas

La fabricación de las probetas se realizó de forma distinta en función de la tipología. A continuación, se muestra una tabla a modo de resumen de las etapas de fabricación en orden cronológico de cada uno de los 4 tipos de probetas.

Tabla 2: Etapas de fabricación.

	1	2	3	4	5	6
1_PLAco	Impresión 3D de probetas					
2_PLApe	Secado de pellets	Extrusión de filamento a partir de pellets	Impresión 3D de probetas			
3_PLAmet_tra	Secado de pellets y metal	Mezclado de materiales	Extrusión de la mezcla	Impresión 3D de probetas		
4_PLAmet_caps	Fabricación de filamento a partir de pellets (igual que 2)	Impresión 3D de cápsulas y tapas	Rellenado de cápsulas con polvo de metal	Extrusión de filamento a partir de cápsulas	Secado de cápsulas	Impresión 3D de probetas

El secado de los pellets, metal y las cápsulas se realiza en una estufa de ventilación forzada de la marca Indelab, a una temperatura de 60°C durante 24 horas, con el objetivo de eliminar la humedad presente en los materiales y facilitar así la estabilización del diámetro de filamento durante el proceso de extrusión.

La extrusión del filamento para la obtención de las probetas PLApe, PLAmet_tra y PLAmet_caps, se realiza empleando la extrusora de escritorio 3DEVO Composer 450, equipada con un tornillo de extrusión y diseñada para crear filamentos de materiales aditivados y mezclas, gracias a su tornillo estriado en su extremo final. El material se alimenta a través de la tolva, pasa por el tornillo de extrusión que dispone de 4 zonas de calentamiento independientes, y posteriormente sale por la boquilla, donde se enfría debido a la acción de dos ventiladores y se bobina. Las temperaturas empleadas en las resistencias se muestran en la tabla 2.

Tabla 3: Temperaturas de extrusión

	T_1 (más cercana a la tolva)	T_2	T_3	T_4 (más cercana a la salida)
1_PLAco	170	185	190	170
2_PLApe	170	185	190	170
3_PLAmet_tra	195	190	200	180
4_PLAmet_caps	195	190	190	175

La impresión de las cápsulas y las probetas se realiza en la impresora 3D Artillery Sidewinder X1. El slicer empleado fue el software libre Ultimaker Cura. La geometría de las cápsulas y probetas normalizadas se realizó en el software CAD. Los archivos se guardaron en formato .stl, y se importaron Cura, donde se configuraron los parámetros de impresión, detallados en la tabla 3.

Tabla 4: Parámetros de impresión

	Probetas	Cápsulas
Diámetro de boquilla	0,8 mm	0,4 mm
Temperatura de impresión	210°C	210°C
Temperatura de la cama	60°C	60°C
Líneas de pared	2	2
Velocidad de impresión	40	40

En el caso de las cápsulas, se rellenó toda la cama de impresión de bases y tapas (Figura 1), con el fin de reducir el tiempo de fabricación final. Para las probetas de PLA, se imprimieron en tandas de 4, mientras que las probetas de PLA con metal en sus dos versiones, dada la mayor complejidad de obtención del filamento y necesidad de no desperdiciarlo en caso de impresiones fallidas, se imprimieron de una en una.

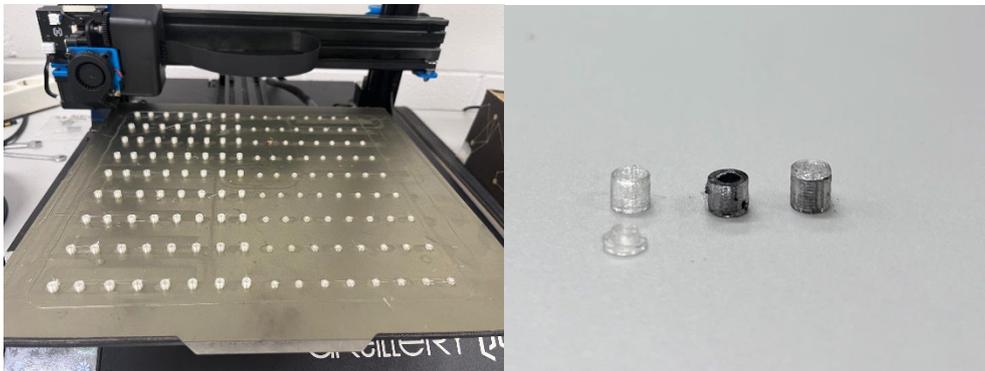


Figura 1: Impresión de las cápsulas en la impresora Artillery Sidewinder X1 (izda) y etapas de encapsulado: vacía, rellena, y con cerrada con tapa.

3.3. Degradación agentes atmosféricos

Con el objetivo de simular las condiciones atmosféricas a las que puede estar expuesto un encofrado durante su uso o almacenamiento a la intemperie, las probetas se colocan en el equipo UVTest® Fluorescent / UV Instrument. La máquina opera en ciclos de 6 horas, con 5 horas de exposición a radiación UVA con una intensidad de 0,77 W/m², (simulando la exposición solar), y 1 hora de pulverización de agua destilada (tratando de reproducir la exposición a la lluvia). Se introducen todas las probetas en una parrilla metálica (Figura 2), y se realizan extracciones de 16 probetas, 4 de cada tipología, cada 14 días. Por lo tanto, la exposición máxima de la última extracción es de 70 días, equivalente 10 semanas.

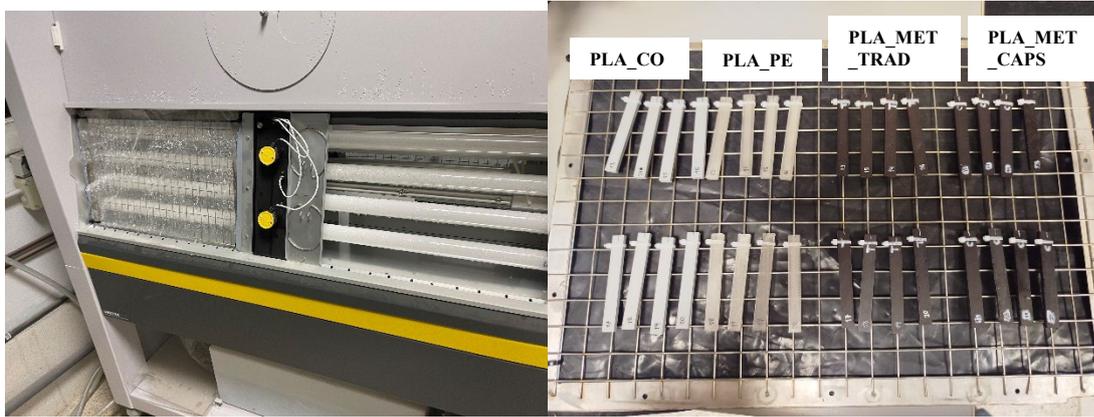


Figura 2: Equipo UVTest, y disposición de las probetas en las parrillas metálicas

3.4. Degradación PH básico

El hormigón fresco tiene dos características que podrían deteriorar el encofrado de PLA de forma progresiva. En primer lugar, se encuentra el agua, que podría infiltrarse entre las capas o entre las pasadas de una misma capa, y por otro lado el hormigón fresco tiene un PH básico aproximado de 13. Además, el curado del hormigón provoca una reacción exotérmica, por lo que se pueden alcanzar temperaturas de hasta 50 °C dependiendo del volumen de hormigón encofrado. Esta temperatura acelera el efecto de la degradación en el PLA. Para tratar de reproducir estas condiciones se sumergen las probetas en una disolución de NaOH (sosa cáustica) en agua, a razón de 50 gramos de sosa en 5 litros de agua. Tras la realización de 3 disoluciones con la misma relación agua/sosa y posterior medida con PHmetro, se observa que el PH obtenido es de 12,7. Tras una serie de pruebas preliminares, se comprueba que las probetas de PLA+metal sufren una degradación mas acelerada que las de PLA puro, y que las fabricadas de forma tradicional son las mas dañadas. Por tanto, se establecen periodos de extracción de las probetas de la disolución diferentes para cada caso, lo que supone diferentes tiempos de exposición, aunque ha sido necesario para que las probetas mas susceptibles de esta exposición no se desintegren completamente. Se realizan 5 extracciones de cada tipología:

- PLAcO: extracciones cada 7 días
- PLA_pe: extracciones cada 7 días
- PLAmet_tra: se extraen tras exposiciones de 1 día, 3 días, 5 días, 7 días y 11 días
- PLAmet_caps: se extraen tras exposiciones de 3 días, 7 días, 11 días, 14 días y 21 días

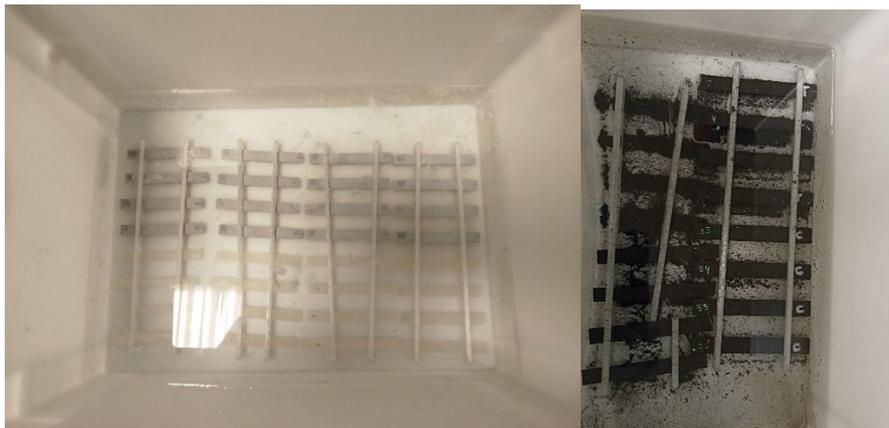


Figura 3: Exposición de probetas de PLA (izda) y PLA+metal (dcha) en PH básico.

3.5. Mediciones

Con el propósito de evaluar las variaciones en las dimensiones y el peso de las probetas tras su exposición a los procesos de degradación, es esencial medir y pesar cada una de ellas tanto antes como después de dicha exposición. Este procedimiento permite analizar los cambios experimentados por las probetas con exactitud. Para registrar el

peso, se emplea una balanza de alta precisión. Por su parte, las mediciones dimensionales (largo x ancho x alto) se realizan utilizando un calibre de precisión.

3.6. Escaneo 3D

Para realizar un análisis más detallado de alguno de los casos, se seleccionó una probeta representativa de cada uno de los procesos de degradación correspondientes a los cuatro materiales analizados. Estas probetas fueron sometidas a un escaneo 3D, lo que permitió obtener un registro detallado de las deformaciones y variaciones dimensionales. Este procedimiento proporciona una evaluación más precisa del impacto de la degradación en cada tipo de material. El escáner utilizado es el Einscan Pro HD, de la compañía Shining 3D (Figura 4). Se trata de un escáner de luz estructurada. Mediante un haz de luz, el escáner es capaz de calcular la distancia desde el punto emisor hasta un punto de un objeto situado al alcance de su trayectoria. La nube de puntos generada en el escaneo define la geometría del objeto tridimensional objeto de estudio. Este escáner tiene una precisión de 0,04 mm si se realiza un escaneo fijo (escáner colocado en un trípode) con plataforma giratoria, tal y como se muestra en la Figura 4.



Figura 4: Escaneo fijo con plataforma giratoria del escáner Einscan Pro HD.

3.7. Ensayos de flexión

Los ensayos de flexión se realizaron siguiendo la norma UNE-EN-ISO 178:2019 ([22]). Estos ensayos se realizaron utilizando la máquina de ensayos universal Zwick Roell Z100. Las probetas tienen forma prismática, con una longitud de 80 mm, una anchura de 10 mm y una altura de 4 mm. En el ensayo, los apoyos se encuentran espaciados 64 mm entre sí. Se aplicó una carga puntual en el centro de la probeta, y se aplicó mediante control de desplazamientos, a razón de 2 mm/min.

4. Resultados y discusión

4.1. Material sin degradar

Para comenzar, se han evaluado las propiedades mecánicas de los materiales sin degradación, es decir, tras una exposición de 0 días. En la parte izquierda de las Figuras 5, 6 y 7 se presentan los resultados de tensión máxima de flexión, módulo elástico de flexión y deformación a rotura. En este estado inicial, el módulo elástico de las probetas de PLA comercial y PLA fabricado a partir de pellets es prácticamente idéntico. La principal diferencia entre ambos materiales radica en la tensión máxima de flexión y la deformación a rotura, siendo estos valores ligeramente inferiores en el PLA a partir de pellets (reducciones de aproximadamente 2 MPa y 0,2%, respectivamente).

Cuando el PLA se combina con polvo metálico, se observa una mayor variabilidad en los resultados en función del método de fabricación empleado. En particular, la mezcla directa de pellets de PLA con polvo metálico da lugar a un material más elástico y deformable, mientras que el compuesto obtenido mediante la técnica de encapsulación presenta una rigidez significativamente mayor (incremento de aproximadamente un 24 %) y una reducción del 41 % en su capacidad de deformación. En cuanto a la tensión máxima, los valores obtenidos en ambos casos con metal son comparables entre sí, pero presentan una disminución del 39,8 % con respecto al PLA comercial suministrado en filamento.

Las diferencias observadas en el módulo elástico y la deformación máxima pueden atribuirse al método de fabricación empleado. En el caso de la mezcla directa de PLA y polvo metálico (PLA+METAL TRAD), se produce una ligera pérdida de polvo durante el proceso, debido a su adhesión a las paredes del recipiente de mezcla o de la tolva de alimentación. Como consecuencia, la fracción de metal incorporada al filamento es ligeramente menor. En cambio, el uso de cápsulas permite retener la totalidad del polvo metálico durante la fabricación, evitando pérdidas y generando un material con mayor contenido de carga, lo que contribuye a un aumento de su rigidez y fragilidad. Además, en la mezcla directa se incorpora una mínima proporción de aceite, lo que podría favorecer la deformabilidad del material al actuar como lubricante entre las partículas de polvo y la matriz de PLA.

4.2. Exposición a UVA y rociado con agua

Las Figuras 5, 6 y 7 muestran la evolución de la tensión máxima, el módulo elástico y la deformación a rotura de las probetas sometidas a condiciones ambientales de exposición combinada a radiación ultravioleta y rociado de agua (UVA+Rociado).

Los resultados indican que ni la tensión máxima ni el módulo elástico presentan variaciones significativas en las probetas de PLA comercial o en aquellas fabricadas a partir de pellets tras la exposición. Sin embargo, se observa una reducción en la deformación a rotura. Además, destaca un aumento en la dispersión de los resultados en los cuatro tipos de probetas cuanto mayor es el tiempo de exposición, tal como reflejan las barras de desviación en las tres gráficas. Esto sugiere que la degradación inducida por la radiación UVA y el rociado genera un comportamiento mecánico menos predecible, lo que se traduce en una mayor variabilidad en los valores de tensión a flexión en el momento de la rotura.

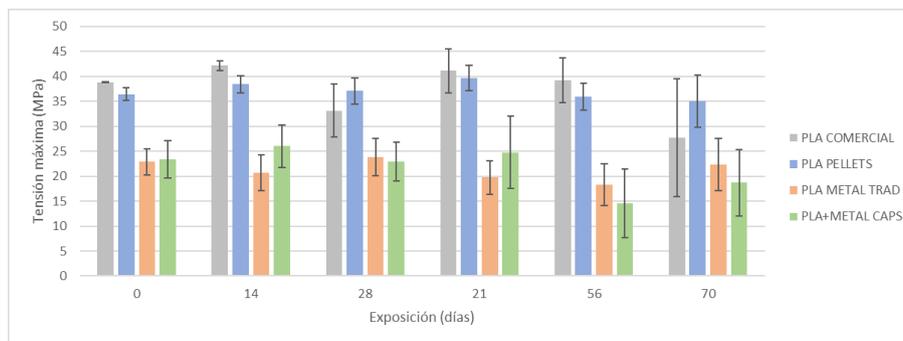


Figura 5: Variación de la tensión máxima con la exposición a UVA+rociado.

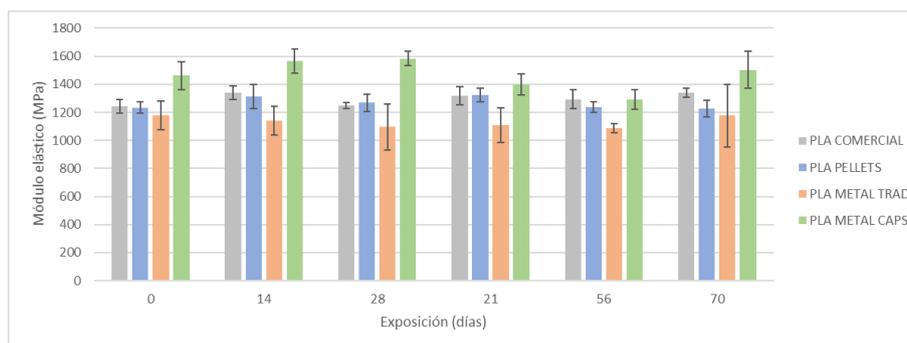


Figura 6: Variación del módulo elástico con la exposición a UVA+rociado.

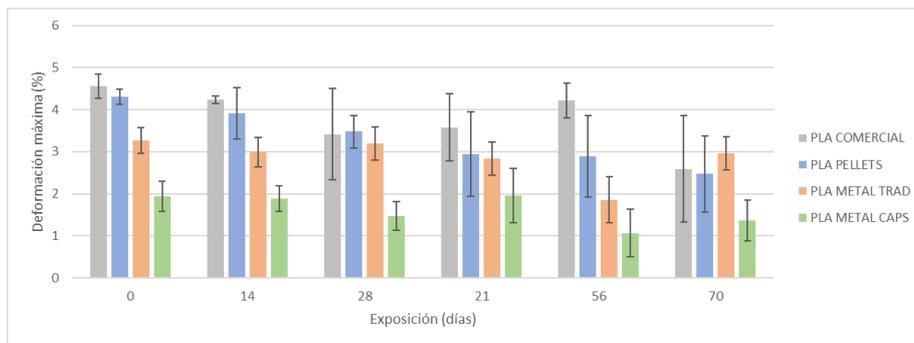


Figura 7: Variación de la deformación de rotura con la exposición a UVA+rociado.

El análisis de la variación de peso (Figura 8) revela que ninguno de los cuatro casos de estudio experimenta cambios significativos tras la exposición a los agentes atmosféricos. Las variaciones registradas no superan el 0,5 % en ningún caso, por lo que pueden considerarse despreciables.

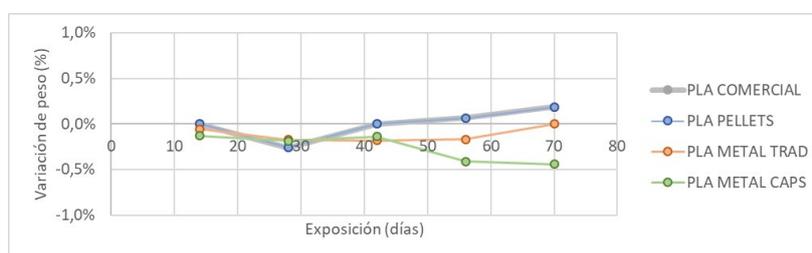


Figura 8: Variación del peso de las probetas con la exposición a UVA+rociado.

Por último, la Figura 9 muestra la variación en la sección transversal de las probetas tras la exposición. En todos los casos, excepto en las probetas de PLA con metal fabricadas mediante encapsulación, la variación del área se mantiene entre el 0 % y el 3,4 %, lo que sugiere cierto grado de hinchamiento durante la exposición.

Sin embargo, en el caso específico del PLA con metal obtenido mediante cápsulas, se observa una reducción de la sección tras todas las exposiciones, con la excepción de la tercera extracción (45 días), donde se registra un aumento del área. Pese a este comportamiento errático, se considera que no es relevante debido a que su variación no supera el 6% en ningún caso. Para comprender mejor las causas de este fenómeno, se propone como trabajo futuro un análisis microscópico de las muestras mediante microscopía electrónica de barrido (SEM).

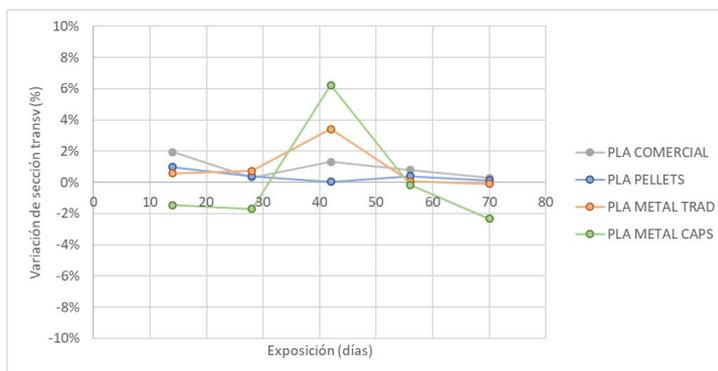


Figura 9: Variación de la sección transversal de las probetas con la exposición a UVA+rociado.

4.3. Exposición a PH básico

Las Figuras 10, 11 y 12 presentan la evolución de la tensión máxima, el módulo elástico y la deformación a rotura en flexión de las probetas expuestas a un pH básico similar al del hormigón fresco.

En primer lugar, se observa que el PLA sin aditivos (PLA comercial y PLA fabricado a partir de pellets) presenta una menor velocidad de degradación en comparación con las formulaciones que contienen polvo metálico. Este comportamiento puede atribuirse a la mayor susceptibilidad del metal (hierro y sus aleaciones) a la oxidación, lo que aceleraría su deterioro en medios alcalinos. Como consecuencia, los tiempos de exposición inicialmente previstos (35 días) tuvieron que reducirse en los materiales con metal, limitándose a 11 días en el caso del PLA+metal fabricado mediante mezcla directa y a 21 días en el PLA+metal obtenido mediante encapsulación. Además, las probetas que alcanzaron estos períodos de exposición no pudieron ser sometidas a ensayo debido a la drástica reducción de sus dimensiones, lo que impidió que la máquina de ensayos aplicara la carga mínima requerida. Por este motivo, en las figuras no se presentan valores de tensión, deformación y módulo elástico para todos los tiempos de exposición.

El análisis de los resultados revela una reducción de hasta un 82 % en la tensión máxima del PLA comercial tras 35 días de exposición, pasando de 37 MPa a 6,87 MPa. Una disminución idéntica (82 %) se registra en el PLA fabricado con pellets, aunque en este caso el material experimenta un ligero aumento de aproximadamente 4 MPa en su resistencia a flexión tras una semana de exposición, antes de iniciar su degradación progresiva. Se observa, además, una cierta estabilidad en la tensión máxima, la deformación y el módulo elástico durante las dos primeras semanas de exposición, seguida de una aceleración del deterioro mecánico.

En el caso del PLA con aditivo metálico, la degradación de las propiedades mecánicas es más pronunciada en las probetas fabricadas mediante mezcla directa con polvo metálico. Además, este método presenta una mayor dispersión de los resultados, especialmente en términos de deformación, lo que indica una menor reproducibilidad y una degradación acelerada del material. Estos hallazgos sugieren que la fabricación por mezcla directa no es el método más adecuado, ya que conduce a una pérdida significativa de uniformidad y fiabilidad en las propiedades mecánicas del material.

Por su parte, las probetas obtenidas mediante encapsulación lograron mantenerse sumergidas 10 días más que las fabricadas por mezcla directa. No obstante, también sufrieron un deterioro severo, con una reducción del 65 % en la tensión máxima tras 14 días de exposición y una degradación completa (100 %) al alcanzar los 21 días.

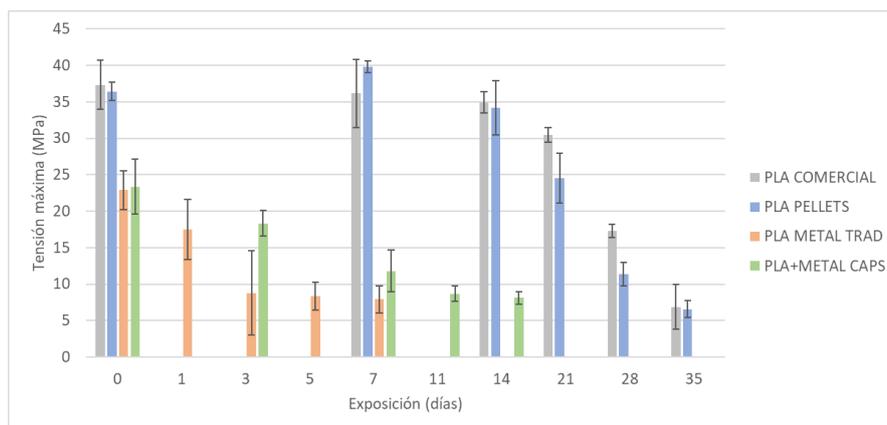


Figura 10: Variación de la tensión máxima con la exposición a PH básico y temperatura.

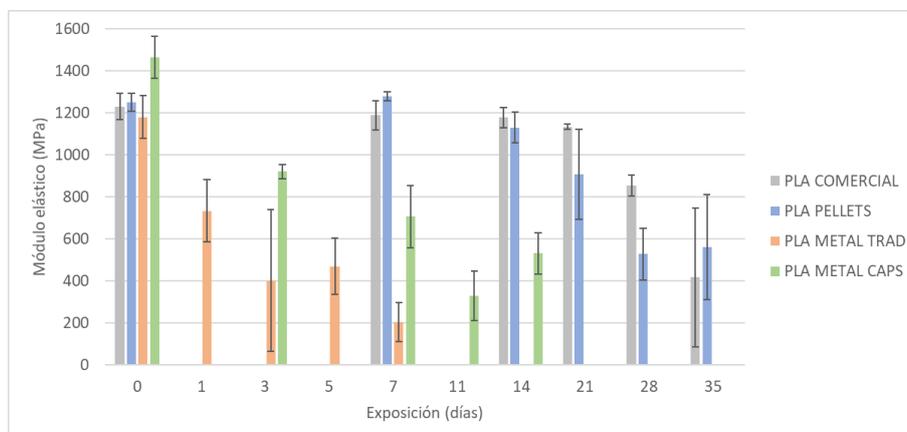


Figura 11: Variación del módulo elástico con la exposición a PH básico y temperatura.

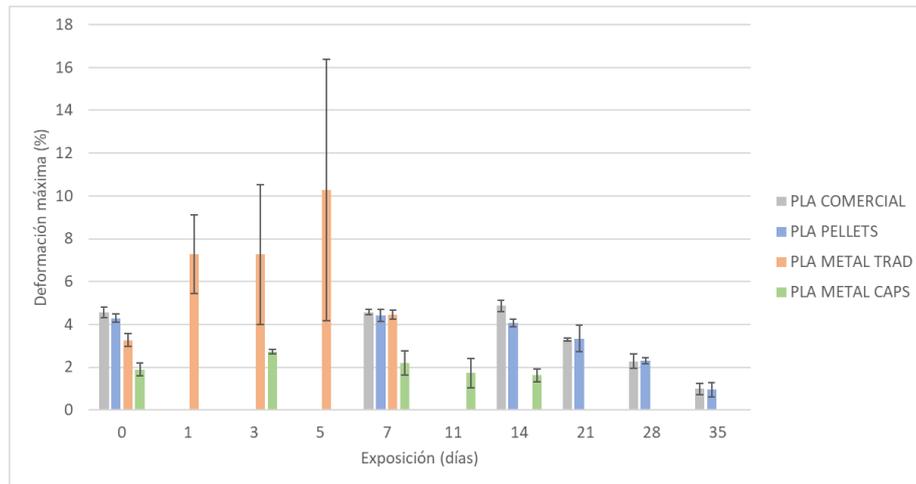


Figura 12: Variación de la deformación de rotura con la exposición a PH básico y temperatura.

El análisis de la reducción de peso y de la sección transversal (Figuras 13 y 14) revela que el PLA puro, tanto en su versión comercial como en la obtenida a partir de pellets, presenta una disminución aproximadamente lineal en ambos parámetros. En el caso del PLA comercial, la reducción de peso alcanza hasta un 62 %, mientras que la sección transversal disminuye en un 40 % tras 70 días de exposición. No obstante, se observa una degradación más acusada en el PLA comercial durante las dos últimas extracciones, en comparación con el PLA fabricado a partir de pellets en los mismos periodos.

Por otro lado, las probetas de PLA con adición de metal exhiben una pérdida de peso considerablemente más rápida que en los casos anteriores. En especímenes fabricados mediante encapsulado, la reducción de peso asciende al 65 % en tan solo 21 días, mientras que en aquellos obtenidos por mezcla directa de pellets con polvo de metal en la tolva (método trad), la pérdida de peso alcanza casi un 95 % en apenas 11 días.

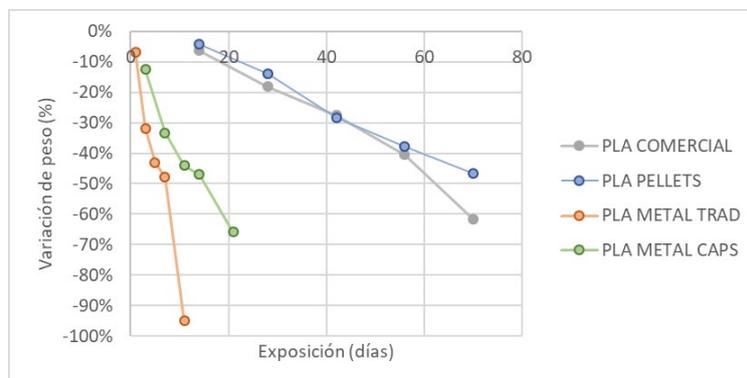


Figura 13: Variación del peso de las probetas con la exposición a PH básico y temperatura.

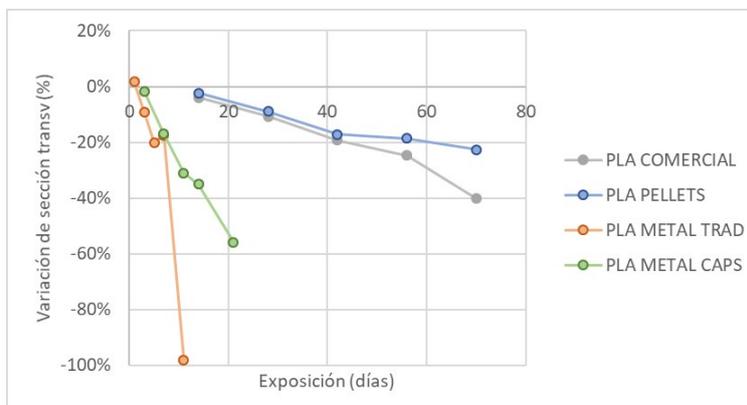


Figura 14: Variación de la sección transversal de las probetas con la exposición a PH básico y temperatura.

4.4. Irregularidades en la degradación

En las gráficas del apartado anterior se ha observado que, en el caso del PLA con metal fabricado mediante mezcla tradicional, la reducción de peso tras siete días de exposición no se acompaña de una disminución en la sección transversal. Para analizar este fenómeno en mayor detalle, se ha empleado un escáner 3D que ha permitido comparar las dimensiones de la probeta antes y después de la exposición. Los resultados (Figura 14) indican la presencia de zonas con ausencia de material en los contornos de algunas capas intermedias de la probeta, lo que sugiere que la disolución con pH básico habría podido penetrar al interior de la estructura, provocando una pérdida de peso sin que esta degradación se manifieste externamente. Como consecuencia, la probeta mantiene unas dimensiones aparentes que no reflejan el grado real de deterioro. En la Figura 14 se representan estos vacíos en las capas intermedias desde dos orientaciones diferentes, utilizando un código de colores que permite visualizar las variaciones dimensionales de la probeta tras la exposición a la disolución alcalina respecto a sus dimensiones iniciales. Los resultados muestran además una degradación no uniforme, con áreas de alta desaparición de material, especialmente en la zona derecha y central, mientras que en la parte izquierda la pérdida es menos pronunciada. Esta heterogeneidad en la degradación dificulta significativamente la determinación precisa de la sección transversal real en el punto de rotura durante el ensayo de flexión.

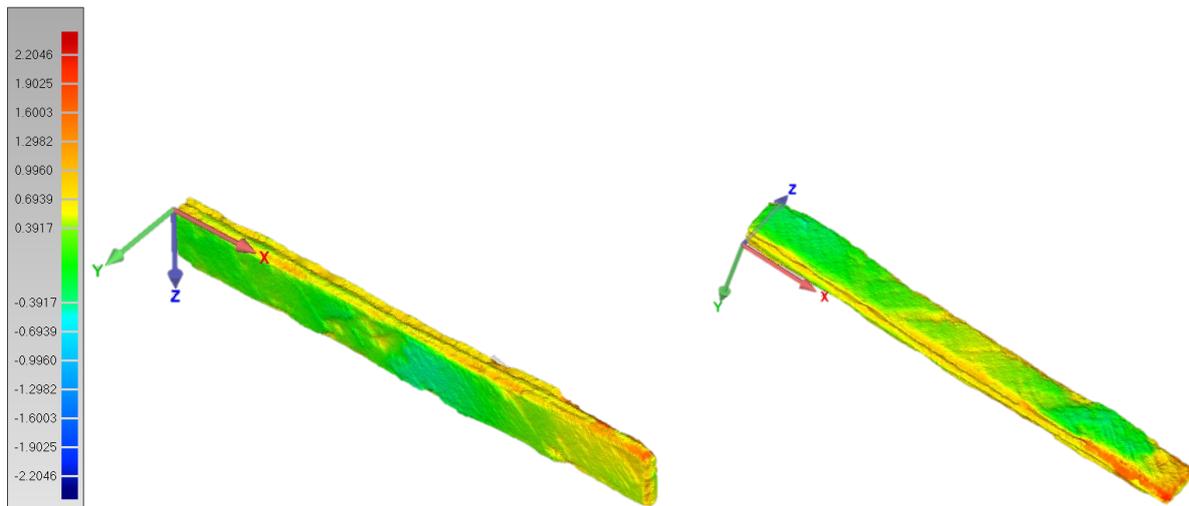


Figura 15: Desviaciones dimensionales de la probeta 34 de PLA+metal trad, correspondiente a la 4ª extracción tras exposición a PH básico.

5. Conclusiones

En este estudio se ha analizado el comportamiento de cuatro tipologías de probetas impresas en 3D, fabricadas mediante diferentes combinaciones de materiales y métodos de producción, con el objetivo de evaluar el efecto de la exposición a condiciones ambientales de sol y lluvia, así como a soluciones alcalinas, en su degradación. Para ello, se han llevado a cabo ensayos de flexión en tres puntos y se han analizado las dimensiones y pesos de las probetas antes y después de la exposición.

A partir de los resultados obtenidos, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La exposición a un medio alcalino a 50 °C resulta significativamente más agresiva que la exposición a radiación UVA y rociado. Este aspecto es crucial en la fabricación de encofrados con PLA o PLA aditivado con metal, ya que estos materiales presentan una vida útil limitada antes de degradarse, lo que conlleva una pérdida tanto de su capacidad resistente como de sus dimensiones.
- La incorporación de un 50 % en peso de polvo metálico al PLA no solo no mejora las propiedades mecánicas a flexión, sino que las deteriora, reduciendo la tensión máxima en aproximadamente un 40 %. En consecuencia, el PLA con aditivo metálico no es adecuado para aplicaciones en encofrados. No obstante, su mayor conductividad térmica y eléctrica podría hacerlo viable para otras aplicaciones.
- La dispersión de los valores de tensión máxima, módulo elástico y deformación aumenta con el tiempo de exposición. Asimismo, la adición de polvo metálico incrementa la variabilidad de los resultados en ambas formulaciones evaluadas. Esto sugiere que el proceso de impresión desempeña un papel fundamental en la degradación del material, ya que la presencia de poros o microdefectos en las probetas facilita la penetración de líquidos (agua destilada del rociado o disoluciones alcalinas), lo que modifica tanto el mecanismo como la velocidad de degradación.

- No se han encontrado diferencias significativas en la tensión máxima a flexión ni en el módulo elástico entre las probetas fabricadas con PLA comercial en bobina y aquellas obtenidas a partir de pellets en laboratorio. En términos de deformación máxima, las probetas de PLA comercial presentan valores ligeramente superiores (entre un 4 % y un 30 %), aunque estas diferencias desaparecen tras 70 días de exposición a radiación UVA y rociado, así como tras 35 días de exposición a solución alcalina.

Financiación

Este trabajo ha sido cofinanciado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España a través de la convocatoria de proyectos de I+D+i de 2020, en el marco del proyecto “Fomento de la economía circular y tecnologías bajas en CO₂ a través de la fabricación aditiva (3DCircle)” (PID2020-112851RA-I00), y de la convocatoria de proyectos de 2023, en el marco del proyecto “Tecnologías 3D aplicadas a la conservación del patrimonio cultural (3DinHerit)” (PID2023-147803OB-I00).

6. Referencias

- [1] Mohanavel V, Ashraff Ali KS, Ranganathan K, Allen Jeffrey J, Ravikumar MM, Rajkumar S. The roles and applications of additive manufacturing in the aerospace and automobile sector. *Mater Today Proc* 2021;47:405–9. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.596>.
- [2] Dunham S, Mosadegh B, Romito EA, Zgaren M. Applications of 3D Printing. *3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine*, Elsevier; 2018, p. 61–78. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803917-5.00004-3>.
- [3] Gomes Correia VM, Pereira N, Perinka N, Costa P, del Campo J, Lanceros-Mendez S. Printed 3D Gesture Recognition Thermoformed Half Sphere Compatible with In-Mold Electronic Applications. *Adv Eng Mater* 2022;24. <https://doi.org/10.1002/adem.202200730>.
- [4] Sivakumar NK, Palaniyappan S, Vishal K, Alibrahim KA, Alodhayb A, A MK. Crushing behavior optimization of octagonal lattice-structured thin-walled 3Dprinted carbon fiber reinforced PETG (CF/PETG) composite tubes under axial loading. *Polym Compos* 2024;45:1228–49. <https://doi.org/10.1002/pc.27848>.
- [5] Jipa A, Giacomarra F, Giesecke R, Chousou G, Pacher M, Dillenburger B, et al. 3D-printed formwork for bespoke concrete stairs. *Proceedings of the ACM Symposium on Computational Fabrication*, New York, NY, USA: ACM; 2019, p. 1–12. <https://doi.org/10.1145/3328939.3329003>.
- [6] Lloret-Fritschi E, Wangler T, Gebhard L, Mata-Falcón J, Mantellato S, Scotto F, et al. From Smart Dynamic Casting to a growing family of Digital Casting Systems. *Cem Concr Res* 2020;134:106071. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106071>
- [7] Jipa A, Dillenburger B. 3D Printed Formwork for Concrete: State-of-the-Art, Opportunities, Challenges, and Applications. *3D Print Addit Manuf* 2022;9:84–107. <https://doi.org/10.1089/3dp.2021.0024>.
- [8] Andrei Jipa, Mathias Bernhard, Benjamin Dillenburger. Submillimetre Formwork: 3D-Printed Plastic Formwork for Concrete Elements. *2017 TxA Emerging Design + Technology Conference Proceedings* 2017:70–7.
- [9] Schweizer K, Bhandari S, Lopez-Anido RA, Korey M, Tekinalp H. Recycling Large-Format 3D Printed Polymer Composite Formworks Used for Casting Precast Concrete – Technical Feasibility and Challenges. *Journal of Composites for Construction* 2024;28. <https://doi.org/10.1061/JCCOF2.CCENG-4758>.
- [10] Emami N. Additive Manufacturing of TPU and Hybrid TPU-PLA Formwork for Custom Repetitive Precast Concrete. *Journal of Architectural Engineering* 2024;30. <https://doi.org/10.1061/JAEIED.AEENG-1764>.
- [11] Castanon-Jano L, Palomera-Obregon P, Blanco-Fernandez E, Indacoechea-Vega I. Analysis of manufacturing and material parameters in 3D-printed polylactic acid (PLA) parts filled with glass powder: mechanical, economic, and environmental assessment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2023;128:1965–79. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12023-7>.
- [12] Castanon-Jano L, Palomera-Obregon P, Lázaro M, Blanco-Fernandez E, Blasón S. Enhancing sustainability in polymer 3D printing via fusion filament fabrication through integration of by-products in powder form: mechanical and thermal characterization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2024;133:1251–69. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13635-3>.
- [13] Darsin M, Sabariman WA, Trifiananto M, Fachri BA. Flexural properties of metal 3D printing products using PLA-stainless steel filament, 2023, p. 110001. <https://doi.org/10.1063/5.0110568>.

- [14] Tao Y, Wang H, Li Z, Li P, Shi SQ. Development and Application of Wood Flour-Filled Polylactic Acid Composite Filament for 3D Printing. *Materials* 2017;10:339. <https://doi.org/10.3390/ma10040339>.
- [15] Razali MS, Khimeche K, Melouki R, Boudjellal A, Vroman I, Alix S, et al. Preparation and properties enhancement of poly(lactic acid)/calcined-seashell biocomposites for 3D printing applications. *J Appl Polym Sci* 2022;139. <https://doi.org/10.1002/app.51591>.
- [16] Kariz M, Sernek M, Kuzman MK. Effect of humidity on 3D-Printed specimens from wood-PLA filaments. *Wood Research* 2018;63:917–22.
- [17] Díaz-García Á, Law JY, Cota A, Bellido-Correa A, Ramírez-Rico J, Schäfer R, et al. Novel procedure for laboratory scale production of composite functional filaments for additive manufacturing. *Mater Today Commun* 2020;24:101049. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101049>.
- [18] Díaz-García Á, Law JY, Felix M, Guerrero A, Franco V. Functional, thermal and rheological properties of polymer-based magnetic composite filaments for additive manufacturing. *Mater Des* 2022;219:110806. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110806>.
- [19] Jipa A, Reiter L, Flatt RJ, Dillenburger B. Environmental stress cracking of 3D-printed polymers exposed to concrete. *Addit Manuf* 2022;58:103026. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103026>.
- [20] Zaaba NF, Jaafar M. A review on degradation mechanisms of polylactic acid: Hydrolytic, photodegradative, microbial, and enzymatic degradation. *Polym Eng Sci* 2020;60:2061–75. <https://doi.org/10.1002/pen.25511>.
- [21] CuiFFo MA, Snyder J, Elliott AM, Romero N, Kannan S, Halada GP. Impact of the Fused Deposition (FDM) Printing Process on Polylactic Acid (PLA) Chemistry and Structure. *Applied Sciences* 2017;7:579. <https://doi.org/10.3390/app7060579>.
- [22] UNE-EN ISO 178:2020 Plásticos. Determinación de las propiedades de flexión. n.d