

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/397670855>

Tecnologías de impresión 3D y patrimonio cultural. Estudio multianalítico de filamentos para Fused Deposition Modeling

Conference Paper · November 2025

CITATIONS

0

7 authors, including:



[María Higuera](#)

Complutense University of Madrid

8 PUBLICATIONS 112 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Sonia Santos Gómez](#)

Complutense University of Madrid

34 PUBLICATIONS 107 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Ruth Chercoles](#)

Complutense University of Madrid

19 PUBLICATIONS 395 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Ivan Díaz](#)

Cenim - Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas

61 PUBLICATIONS 4,389 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Tecnologías de impresión 3D y patrimonio cultural. Estudio multianalítico de filamentos para *Fused Deposition Modeling*

3D Printing technologies and cultural heritage. Multianalytical approach to the study of fused deposition modeling filaments

María Higuera Muñoz

Universidad Complutense de Madrid
mahigu01@ucm.es

Sonia Santos Gómez

Universidad Complutense de Madrid
soniasantos@ucm.es

Ruth Chércoles Asensio

Universidad Complutense de Madrid
mcherco@ucm.es

Elena Gómez Sánchez

Universidad Complutense de Madrid
Deutsches Bergbau-Museum Bochum
sancheel@ucm.es

Iván Díaz Ocaña

Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas,
Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid
ivan.diaz@csic.es

Emilio Cano Díaz

Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas,
Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid
ecano@cenim.csic.es

Margarita San Andrés Moya

Universidad Complutense de Madrid
msam@ucm.es

Resumen: Entre las tecnologías de prototipado rápido, las impresoras de *Fused Deposition Modeling* (FDM) destacan como las más utilizadas para uso doméstico. Estos equipos son compatibles con muchos filamentos disponibles en el mercado.

Conforme gana importancia la utilización de procesos que implican la impresión 3D en la conservación del patrimonio cultural, la interacción entre estos materiales y los bienes culturales es motivo de preocupación. Así, los principales objetivos de esta investigación son la adquisición de un conocimiento más profundo del estado actual de implantación de estas tecnologías en la conservación de colecciones de museos y el establecimiento de un protocolo de análisis y ensayo que permita la selección del material de impresión más adecuado para su uso en este ámbito.

Para ello, se realizó una encuesta a instituciones culturales españolas. A partir de esta información, se caracterizó una selección de veinticuatro materiales de impresión 3D antes, durante y después de un proceso de envejecimiento acelerado en cámara de Arco-Xenón para evaluar el impacto de las condiciones ambientales en sus propiedades físicas y químicas.

Palabras clave: Conservación-restauración. Ensayo de materiales. Envejecimiento acelerado. Fabricación aditiva. Impresión 3D.

Abstract: Among the rapid prototyping technologies, fused deposition modelling (FDM) 3D printers have emerged as the most prevalent for household use. This equipment is compatible with many 3D printing filaments available on the market.

As the introduction of processes involving 3D printing in the conservation of cultural heritage (CH) is gaining importance, the interaction between these materials and the original cultural assets is a matter of concern. Thus, the main objectives of this research were the acquisition of a deeper understanding of the current state of implementation of these technologies in the conservation of collections of museums and the establishment of a protocol of analysis and testing that will allow the selection of the most suitable printing material for their use in the CH field.

For this, a national survey was carried out among Spanish cultural institutions. Based on this information, a selection of twenty-four 3D printing materials has been characterised before, during and after a Xenon-arc accelerated ageing process to assess the impact of ambient conditions on their physical and chemical properties.

Keywords: 3D Printing. Accelerated aging. Additive manufacturing. Conservation-restoration. Material testing.

Introducción

Las tecnologías de impresión 3D se han convertido en los últimos años en una herramienta de producción de objetos que se está consolidando en numerosos campos de estudio. En la mayoría de casos, no llegan a sustituir a los medios tradicionales de fabricación, sino que proporcionan una alternativa capaz de resolver cuestiones complejas disminuyendo el tiempo y los recursos necesarios (Pelín, Sonmez y Pelín, 2024). En el área de la conservación y restauración, en ocasiones, el propio estado de la obra impide la realización de una gran variedad de actuaciones, lo que limita considerablemente su conservación, estudio y exposición. Así, algunos tratamientos tradicionales de intervención, como por ejemplo la reintegración volumétrica de lagunas, que habitualmente implica la manipulación de las piezas originales, pueden llegar a suponer un alto estrés físico para la obra y, por tanto, riesgo de producir daños asociados. En estos casos, la combinación de las tecnologías

de digitalización con la impresión 3D ofrece una alternativa efectiva e inocua y más aplicable (Ávila Rodríguez, 2018; Kantaros, Ganetsos y Petrescu, 2023).

Las distintas aplicaciones de las tecnologías de impresión 3D en el contexto de la conservación del patrimonio cultural pueden agruparse, según el tipo de intervención, en dos grandes categorías: por una parte, las impresiones que persiguen fabricar modelos que no están en contacto directo con las obras originales, como ocurre con la realización de réplicas y modelos tifológicos y, por otra, las producciones diseñadas para permanecer en contacto con la obra, siendo las reintegraciones volumétricas, la fabricación de sistemas expositivos y el diseño de embalajes los principales ejemplos.

El primer grupo destaca por su uso en investigación, exposiciones temporales o permanentes y talleres educativos; su mayor aportación es el aumento de la accesibilidad a las piezas para todo tipo de público (Byrnes, 2013; Ávila Rodríguez y Santos Gómez, 2023; Pistofidis *et al.*, 2023; Frohwerk *et al.*, 2024; Nigro *et al.*, 2024). Las réplicas realizadas permiten la transferencia del conocimiento y pueden favorecer la integración y el enriquecimiento de la sociedad al constituir un canal de diálogo entre el público y el patrimonio (Moscatelli, 2024). Estos modelos 3D impresos también se emplean como objetos temporales sobre los que realizar moldes para facilitar la reproducción en otros materiales definitivos (Ávila-Rodríguez y Santos, 2022; Saha *et al.*, 2023; Curic *et al.*, 2024; Pelin, Sonmez y Pelin, 2024).

En cuanto al segundo grupo, la funcionalidad de la impresión suele estar ligada al aumento de la estabilidad estructural, a la recuperación de los volúmenes y a la consecución de la percepción completa de la obra original, sin olvidar la adaptación de embalajes y sistemas expositivos a cada caso particular (Acke *et al.*, 2023; Xue *et al.*, 2023). Así, Rizzo *et al.* (2023) emplean polietileno tereftalato glicol (PETG) como material de fabricación aditiva para la reproducción de las columnas de un ciborio del siglo XVII y también Son *et al.* (2023) realizaron la reintegración de una escultura de cerámica mediante la impresión de las piezas faltantes y de la estructura interna.

Respecto a las tecnologías de impresión 3D, existe una amplia variedad de equipos que suelen clasificarse según el proceso de fabricación mediante el cual producen el objeto (Gibson, Rosen y Stucker, 2015; Zhou *et al.*, 2024). Por una parte, las técnicas de fabricación sustractiva, mediante mecanizado por Control Numérico Computarizado (CNC), que implican el desbaste del material, se han empleado con interesantes resultados en la realización de reproducciones, como muestran gran parte de los proyectos llevados a cabo por la empresa FactumArte (FactumArte, s. f.). Por otra parte, también se emplean las tecnologías de fabricación aditiva, especialmente mediante equipos de *Fused Deposition Modeling* (FDM) (Marra, Vespasiano y Brusaporci, 2023) y estereolitografía (SLA) (Frigione y Montagna, 2023). En estos casos, el objeto impreso se genera mediante la superposición de capas de material, pero, mientras que las tecnologías FDM emplean la temperatura para fundir el filamento y depositar el material, las impresoras SLA recurren a la radiación UV como agente desencadenante del endurecimiento selectivo de la resina en estado líquido (Thakar *et al.*, 2022).

Frente a las ventajas que ofrece el uso de las tecnologías de impresión 3D para este contexto, se encuentran algunas limitaciones: económicas, considerando que algunos equipos y materiales suponen una inversión relevante; la resolución de los equipos varía notablemente en función del proceso de fabricación; y el volumen de impresión condiciona el formato (Kantaros, Ganetsos y Petrescu, 2023).

Sin embargo, el principal obstáculo para la introducción de la impresión 3D en el uso habitual de intervenciones de conservación y restauración es el escaso conocimiento del comportamiento a largo plazo de estos nuevos materiales comercializados que se emplean para la fabricación del objeto. Características como la inocuidad, compatibilidad, estabilidad, durabilidad, reversibilidad, baja toxicidad y sostenibilidad son determinantes para el uso de cualquier material en este ámbito. Por este motivo, recientemente se han iniciado líneas de investigación que analizan la evolución

de determinadas propiedades de diferentes materiales de impresión 3D frente al envejecimiento acelerado para comprobar su idoneidad para estas aplicaciones (Aura-Castro *et al.*, 2021; Higuera, Collado-Montero y Medina, 2023; San Andrés *et al.*, 2023; Higuera *et al.*, 2024).

A partir de lo expuesto, se podría deducir que existe un interés creciente por el uso de la impresión 3D entre los responsables de la conservación del patrimonio. Con el fin de confirmar esta hipótesis, valorar su grado de implantación y el futuro de esta tecnología en este ámbito, se ha contactado con distintas instituciones nacionales para recabar información al respecto.

Simultáneamente, resulta necesario estudiar los polímeros de impresión actualmente existentes en el mercado para establecer criterios objetivos, que permitan seleccionar los más adecuados para este ámbito.

En este trabajo se presenta la metodología aplicada, la relación de muestras estudiadas, los tipos de análisis y ensayos realizados, y los procesos de envejecimiento aplicados en la investigación que forma parte del Proyecto con referencia PID2020-114393RB-I00 («Materiales poliméricos para impresión 3D en la creación artística y la conservación del patrimonio. Propiedades fisicoquímicas y comportamiento a largo plazo»), financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación. También, se expone el diseño de la encuesta realizada y los resultados obtenidos sobre el nivel de implementación de esta tecnología.

Objetivos y metodología

El objetivo principal de esta investigación es estudiar y valorar el comportamiento de diferentes materiales de impresión 3D que puedan ser adecuados para su utilización en el ámbito del patrimonio cultural. Para ello se ha diseñado una metodología de estudio que incluye el uso de diversas técnicas de análisis y ensayo, la aplicación de envejecimiento artificial acelerado y el estudio comparativo de los resultados obtenidos.

Como etapa previa, se ha sondeado el grado de implementación de esta tecnología en el contexto de la conservación y restauración del patrimonio cultural, los tipos de tecnologías y materiales de impresión 3D utilizados y la finalidad de su uso.

En los siguientes apartados se describen la metodología aplicada para el diseño de la encuesta realizada, los criterios de selección de las muestras y sus características, el proceso de preparación de las probetas, y el tipo de análisis y los ensayos realizados para su caracterización física, química y térmica, y para la identificación de su potencial de emisión de compuestos orgánicos volátiles.

La metodología de trabajo consta de las siguientes fases:

1. Evaluación del grado de implantación de la impresión 3D mediante encuesta

Con el fin de conocer el uso actual y el grado de implantación de la impresión 3D en museos e instituciones culturales de España, se diseñó un cuestionario a través de la plataforma Google Forms. Este formulario se distribuyó entre museos e instituciones culturales de carácter estatal, provincial y regional, museos universitarios e institutos de conservación y restauración. Todos ellos se consideraron agentes activos en la conservación y restauración del patrimonio cultural y colaboradores constantes en la investigación en este ámbito. El total de instituciones a las que se envió el cuestionario fue de 220 y su distribución territorial se muestra en la Figura 1.

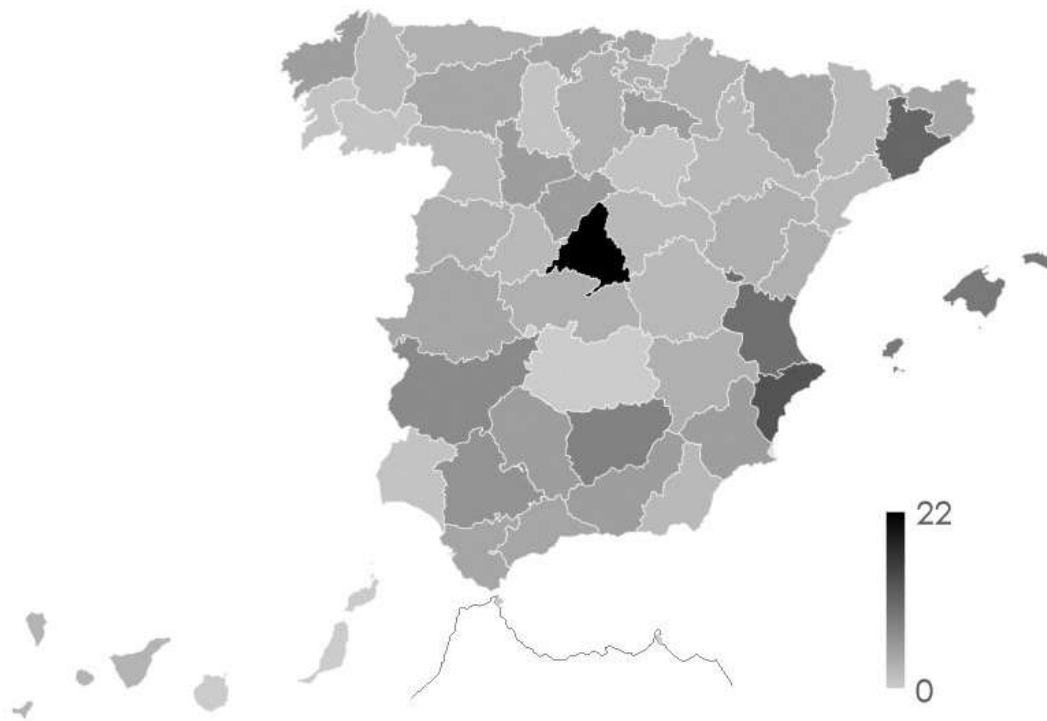


Figura 1. Mapa de distribución de museos e instituciones culturales a los que se envió la encuesta.

Las preguntas planteadas en este cuestionario se estructuraron en tres bloques: un primer conjunto de cuestiones relacionadas directamente con el uso de la impresión 3D en las instituciones, seguido por un grupo de preguntas referidas a la formación del personal del centro y, por último, dos consultas acerca de las expectativas futuras estimadas por el usuario. Los dos primeros bloques se plantearon con una única pregunta inicial con respuesta afirmativa o negativa. En caso afirmativo, se redireccionó a un bloque que incluye otras cuestiones que aportan información complementaria sobre cada uno de los temas (Figura 2).

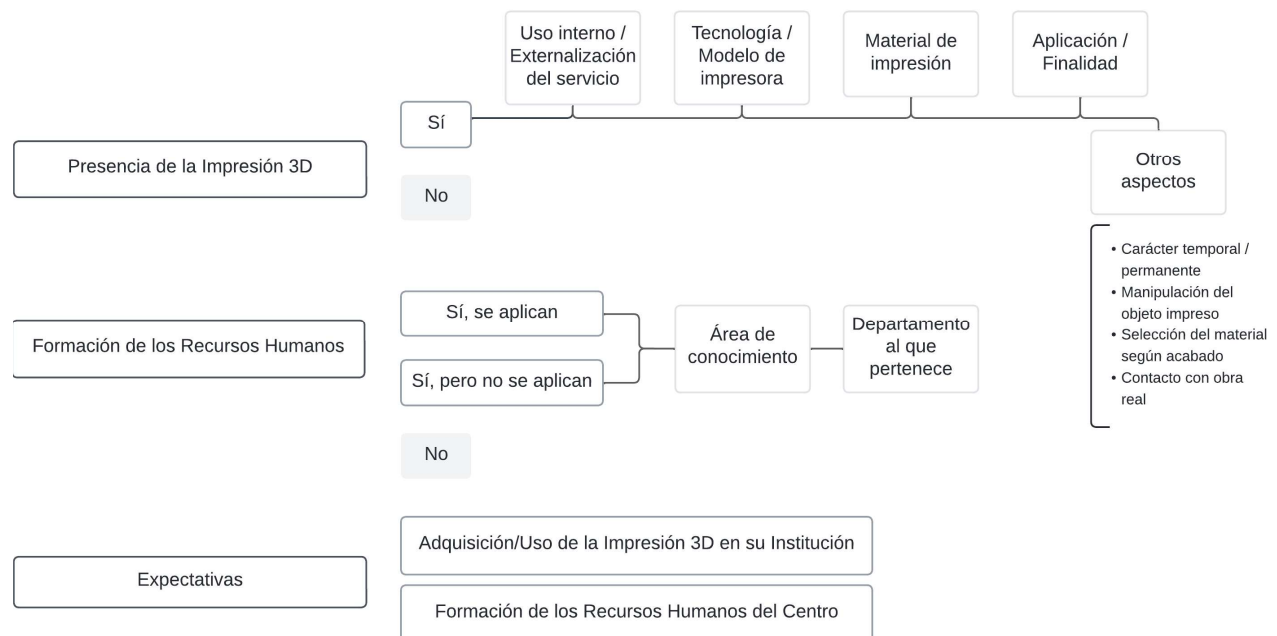


Figura 2. Diagrama de cuestiones planteadas en la encuesta.

De esta forma, el primer bloque trata de dar respuesta a la existencia y el uso de tecnologías de impresión 3D en casos prácticos relacionados con las colecciones de estas instituciones, el origen del servicio (mediante uso interno con equipos propios o su externalización), las aplicaciones en las que se han empleado, los materiales de impresión seleccionados, la tecnología utilizada, así como la valoración de determinadas características relacionadas con la pieza impresa (carácter temporal o permanente del objeto, grado de manipulación del mismo, valoración de aspectos visuales y acabado del material y el contacto del mismo con bienes culturales originales).

El segundo bloque ofrece una visión general de la formación de los profesionales que desempeñan su actividad laboral en estas instituciones, resaltando aquellos que cuentan con formación específica sobre el uso de tecnología de modelado e impresión 3D, incluyendo digitalización, modelado 3D y software para impresión. Además, de forma optativa, los encuestados proporcionaron información sobre los departamentos a los que pertenece el personal con este tipo de formación.

Por último, se solicitó a los participantes una estimación realista sobre el interés que suscita el uso de estas herramientas en su centro de trabajo: la viabilidad de adquirir equipos de impresión 3D para uso interno por parte del personal de la institución y la posibilidad de ser formados en entornos 3D e impresión. A pesar de que esta valoración está estrechamente relacionada con la percepción personal del encuestado, se ha considerado que puede ser representativa de la disponibilidad y distribución de los recursos internos.

Como información complementaria, los encuestados tuvieron la posibilidad de hacer las observaciones que consideraran oportunas relacionadas con el objeto de la encuesta.

2. Selección de los materiales objeto de estudio

La encuesta descrita aportó datos relevantes sobre el uso de la impresión 3D, las tecnologías más comunes introducidas en procesos de conservación y restauración y, fundamentalmente, los materiales seleccionados para estas intervenciones. De esta forma, entre los posibles polímeros, el ácido poliláctico (PLA), el polietileno tereftalato glicol (PETG), las poliamidas (PA) y las resinas fotopoliméricas utilizadas para impresión 3D mediante fabricación aditiva, especialmente para FDM y SLA, resultaron ser los mencionados de forma recurrente.

Para la selección de los materiales ensayados en este estudio, además de los resultados obtenidos en la encuesta, se consideraron ciertos aspectos relativos a otras características de los materiales existentes en el mercado. Concretamente, en aquellos casos en los que se comercializan materiales en diferentes colores, se optó por la opción natural (no coloreada), minimizando así la interferencia de colorantes y pigmentos en lo relativo al estudio comparativo de la caracterización físico-química y del comportamiento. Además, se valoró la sostenibilidad, incluyendo materiales reciclados, biodegradables, de obtención y producción sostenibles y que favorezcan la estabilidad ambiental. Por último, también se priorizó la accesibilidad económica al material y su facilidad de uso.

Según lo expuesto, se seleccionaron un total de 24 materiales, correspondientes a 18 matrices poliméricas con diferentes aditivos y cargas en forma de filamentos para FDM, una resina fotopolimérica para SLA y cinco espumas de poliuretano de diferente densidad para fabricación sustractiva por CNC. Tanto las espumas de poliuretano como la resina para SLA fueron facilitadas por la empresa FactumArte en el contexto de colaboración en el proyecto mencionado en la introducción (PID2020-11439). Respecto a los filamentos de impresión FDM, nueve de ellos pertenecen a matrices poliméricas de diferente composición química que fueron facilitados por la empresa SmartMaterials 3D, mientras que los nueve restantes comparten una composición mayoritaria común basada en PLA, con variedad de aditivos y cargas minerales, metálicas o vegetales, que aportan características particulares en su aspecto visual, acabado y propiedades mecánicas que se consideraron interesantes para su aplicación en conservación y restauración. En la Tabla 1 se relacionan los materiales de impresión 3D estudiados en el marco de esta investigación. Se incluyen los datos referidos a la marca, componentes incluidos en la ficha técnica y las características destacadas por el fabricante.

Tabla 1. Descripción de los materiales de impresión 3D seleccionados

Nombre Comercial	Marca	Composición Ficha Técnica	Características
PLA White	CoLiDo	PLA	Superficie regular
PLA Recycled White	SmartMaterials 3D	PLA	100 % Reciclado a partir de residuos de la misma marca
PLA 850 Granite	Sakata	PLA	Reducida contracción, alta velocidad de cristalización
StoneFil PLA Granite	FormFutura	PLA 20 ≤ 30 % Polvo de piedra 40 ≤ 50 % Otros compuestos 30 ≤ 40 %	Alta densidad, acabado mate y superficie similar al material pétreo
Vibers PLA	ColorFabb	PLA Hierba de Elefante 10 %	Acabado mate. Reducción en 1/3 de huella de carbono
PLA Wood	SmartMaterials 3D	PLA Fibra de madera 40 %	A partir de material orgánico. Sin deformaciones
MetalFil Ancient Bronze	FormFutura	PLA 10 ≤ 20 % Cobre (Encapsulado) 50 ≤ 60% Estaño 10 ≤ 20 % Sulfato de Bario 3 ≤ 5 % Otros compuestos 5 ≤ 10 %	Alto contenido de metal, alta densidad, acabado similar al metal según postprocesado
MetalFil Classic Copper	FormFutura	PLA 10 ≤ 20 % Cobre (Encapsulado) 70 ≤ 80 % Sulfato de Bario 3 ≤ 5 % Otros compuestos 5 ≤ 10 %	Alto contenido de metal, alta densidad, acabado similar al metal según postprocesado
PLA Purifier	Recreus	Talco 1 ≤ 5 % Dióxido de Silicio 1 ≤ 5 % Óxido de Aluminio 1 ≤ 5 % Óxido Ferroso / Férrico 1 ≤ 5 % Óxido de Magnesio 1 ≤ 5 % Óxido de Titanio 1 ≤ 5 %	Purifica el medio ambiente absorbiendo CO ₂ , NO _x y COV's y convirtiéndolos en residuo mineral inocuo mediante la mineralización de gases. Reciclable
ABS	SmartMaterials 3D	ABS > 98 % Estireno < 0.1 % Aditivos y colorantes < 1 %	Resistencia mecánica. Soluble en acetona. Sensibilidad a radiación UV
ASA	SmartMaterials 3D	ASA > 97 % Oxidantes típicos < 1 % Lubricantes típicos < 2 % Aditivos y colorantes < 1 %	Resistencia a la intemperie y resistencia mecánica. Estabilidad dimensional
Boun	SmartMaterials 3D	PLA	Estabilidad dimensional, alta flexibilidad y resistencia al impacto
EP	SmartMaterials 3D	LA > 80 % CaCO ₃ < 20 % Aditivos y colorantes < 1 %	Acabado cerámico y estabilidad dimensional
Glace	SmartMaterials 3D	Polivinil butiral > 97.5 %	Transparencia mediante tratamiento con alcohol
HIPS	SmartMaterials 3D	Poliestireno de alto impacto	Soluble en d-Limoneno. Alta resistencia mecánica
Oyster	SmartMaterials 3D	PLA Concha de ostras	Reutilización de residuos orgánicos (concha de ostra)
PETG	SmartMaterials 3D	PETG	Baja contracción. Resistencia química y térmica. Compatible para uso alimentario y médico
PLA	SmartMaterials 3D	PLA	Biodegradable. Estabilidad dimensional
Grey Resin	FormLabs	Dimetacrilato Uretano 55-75 % Monómeros de Metacrilato 15-25 %	Acabado mate, rigidez y resistencia
PU80	RAMP Raku Tool	Espuma de Poliuretano	Mecanizado mediante CNC
PU140	RAMP Raku Tool	Espuma de Poliuretano	Mecanizado mediante CNC
PU240	RAMP Raku Tool	Espuma de Poliuretano	Mecanizado mediante CNC
PU470	RAMP Raku Tool	Espuma de Poliuretano	Mecanizado mediante CNC
PU670	RAMP Raku Tool	Espuma de Poliuretano	Mecanizado mediante CNC

3. Elaboración de probetas

El comportamiento anisótropo que suelen presentar los objetos impresos requiere la valoración de unos parámetros de impresión generales (altura de capa y relleno interior, principalmente) y la posición y orientación del objeto dentro del volumen de impresión para la fabricación de probetas, puesto que estas variables alteran considerablemente las características y propiedades físicas del objeto impreso (Solomon, Sevvel y Gunasekaran, 2021; Doshi *et al.*, 2022; Khan, Joshi y Deshmukh, 2022). Por tanto, se mantuvieron ciertas condiciones de impresión generales que se aplicaron para todos los materiales, asegurando la comparación de los resultados.

Por otro lado, también se estudiaron la forma, dimensiones del objeto impreso y otros parámetros de impresión específicos para cada material. Además, se valoraron el formato, en función de la propiedad a medir y los requerimientos de las técnicas de ensayo propuestas, así como los parámetros de impresión óptimos recomendados por el fabricante para cada material, tales como la temperatura de extrusión, la calefacción de la cama y la velocidad de impresión.

Finalmente, se determinó un formato rectangular para la elaboración de las probetas con unas medidas de 80 × 40 × 3 mm, relleno macizo, altura de capa de 0,25 mm, orientación paralela a la cama de impresión y posición horizontal respecto a la misma.

4. Caracterización de los materiales

Para la valoración de la evolución de las propiedades del material y su comportamiento a largo plazo, se seleccionaron técnicas de análisis que permitieran conocer la morfología superficial, las características físicas, las propiedades térmicas, la composición química y el grado de emisión de compuestos orgánicos volátiles (VOCs). Todas estas características fueron evaluadas inicialmente y al finalizar un proceso de envejecimiento acelerado en cámara Arco-Xenón Solarbox 3000e RH, que emite irradiación controlada a 60 W/m², a 60 °C y 10 % de humedad relativa, equipada además con filtro de cristal de ventana. Las muestras fueron expuestas un total de 1080 horas distribuidas en cinco ciclos de envejecimiento: dos de 120 h de radiación y 24 de oscuridad, dos de 240 h de iluminación más 48 de oscuridad y un último ciclo de 360 h de exposición y 72 de oscuridad. Determinadas propiedades como son el color, el peso, las dimensiones, la degradación superficial y la caracterización mediante espectroscopía FTIR-ATR también fueron evaluadas en estados intermedios del envejecimiento.

Morfología Superficial: Microscopía Óptica (MO) y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM-EDX)

La observación de la superficie de los materiales estudiados antes, durante y después del envejecimiento acelerado permite correlacionar los cambios que se producen con las variaciones mostradas en otros ensayos. De esta forma, la pérdida de las propiedades iniciales se relaciona con cambios de composición, color y transparencia, aparición de depósitos, deformaciones o disminución de la integridad, entre otras alteraciones (Krieg, Mazzon y Gómez-Sánchez, 2021).

Para el análisis de la superficie se empleó un microscopio Olympus BX51TF con cámara DP21 y lámpara U-RFL-T. Las imágenes se tomaron a 100x y con luz visible. Se utilizó una plantilla para examinar la misma región en cada una de las fases del experimento.

Para el análisis de superficie mediante SEM-EDX se empleó un equipo TESCAN VEGA Generation 4 con el software EDX Oxford ISIS-Link, en una relación de aumentos entre 50x (1 mm) y 3000x (10 μm). Además de las imágenes microscópicas, se analizó la composición elemental de las cargas inorgánicas presentes en algunos materiales mediante EDX.

Características físicas: color mediante Espectrofotocolorimetría, peso y dimensiones

Entre las propiedades físicas del material, se consideró el color como uno de los indicadores de procesos de degradación más relevantes para este estudio. Según el tipo de aplicación, la estabilidad del color constituye un criterio esencial para la recomendación o desestimación del material de impresión 3D en intervenciones de conservación y restauración. A este respecto, cabe señalar que la reintegración volumétrica, la reproducción de una obra o la realización de un sistema expositivo impreso tienen por finalidad ser visualizados, por personal investigador o por parte del público general.

Para la evaluación de los cambios de color, se empleó un espectrofotocolorímetro Konica Minolta CM 2600d, que mide el color en el rango de longitud de onda entre los 400 y 700 nm, en intervalos de 10 nm. Este equipo incluye un iluminante estándar D65 con observador estándar 10, con una geometría óptica de reflexión (d/8) y un diámetro de área de medida de 3 mm. Se realizó una medición en cada esquina superior e inferior y en el centro, considerando la homogeneidad del material para asegurar la representatividad de las mediciones.

Los resultados generados se trasladaron a coordenadas CIELAB que se trataron con el software CM-S100w 1.91.0002 SpectraMagic para su posterior procesamiento según la normalización CIEDE2000 (Sharma, Wu y Dalal, 2005; UNE-EN ISO/CIE 11664-6:2023 Colorimetry-Part 6: CIEDE2000 colour-difference formula, 2023).

La percepción de la variación de color de un observador con plenas capacidades visuales en condiciones óptimas es de 1.0 unidad CIELAB, equivalente a aproximadamente 0.6 unidades de diferencia de color CIEDE2000 (Melgosa *et al.*, 1992; Xu, Yaguchi y Shioiri, 2001; Huang *et al.*, 2012). A partir de estos valores, se pueden estimar tanto la transformación del color en términos absolutos a cada uno de los ciclos de envejecimiento como el cambio producido según el umbral de discriminación cromática de la visión humana.

La estabilidad dimensional y el peso también se consideraron variables indicativas de la existencia de otros procesos relevantes para el estudio del comportamiento a largo plazo de estas muestras. En cuanto a las medidas de peso, se obtuvieron mediante una balanza ER-120A de A&D Company, Limited. Cal-100.0002 con una resolución de cuatro dígitos. Respecto a las dimensiones, se utilizó un calibre digital Qfun mod. BWK007 con una precisión de $\pm 0.001''/0.02$ mm. A partir de los datos obtenidos, se calcularon los porcentajes de variación de peso y de dimensiones para la interpretación de los resultados.

Propiedades térmicas: Termogravimetría (TGA) y Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

Estas técnicas proporcionan información característica de la naturaleza de los materiales poliméricos, como son la temperatura de transición vítrea, la temperatura de fusión, las diferentes matrices poliméricas, en el caso de que existan, y el porcentaje de cristalinidad de la muestra (Wagner, 2018). Estos datos se midieron en un equipo de análisis simultáneo TG-DSC TA Instrument SDT-Q600 V8.3 Build 101 configurado con una rampa de calentamiento de 10 °C/min desde temperatura ambiente hasta 650 °C en atmósfera de N₂. Se emplearon cápsulas de platino como soporte para las muestras, salvo en dos materiales que presentaron un alto contenido en metales, en cuyo caso se optó por las cápsulas de alúmina. Los resultados se analizaron posteriormente mediante el software Universal V4.5A TA Instruments.

Composición química: Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR-ATR), Pirólisis-Cromatografía de Gases-Espectroscopía de Masas (Py-GC-MS)

La composición química de los materiales se ha determinado mediante el uso de varias técnicas. Mediante espectroscopía FTIR-ATR se ha establecido la naturaleza de la matriz polimérica. Mediante Py-GC-MS se analizaron los aditivos y compuestos minoritarios presentes en la formulación del material. La información obtenida fue complementada con los resultados elementales obtenidos en SEM-EDX para determinar la composición elemental de las cargas minerales.

Para el análisis por espectroscopía FTIR-ATR se empleó un equipo Thermo Nicolet 380 con módulo de Reflectancia Total Atenuada (ATR) y detector DTGS/KBr, midiendo en un rango de absorbancia entre 4000 y 400 cm^{-1} con una resolución de 4 cm^{-1} . El experimento se realizó con una configuración de 64 escaneos y tres medidas diferentes de cada muestra.

Para el análisis con Py-GC-MS se utilizó un equipo que integra un espectrómetro de masas modelo Agilent 5975C acoplado a un pirolizador y cromatógrafo de gases Agilent 7890A. La pirólisis se realizó en modo double shot con termodesorción (6 min) de 50 °C a 300 °C a 50 °C/min y pirólisis a 600 °C. A continuación, el flujo de helio se estableció en 1 mL/min con el inyector a 300 °C, una rampa de T desde 40 °C (2 min) hasta 320 °C a 20 °C/min, manteniendo 15 min a 320 °C, estando el espectrómetro de masas durante los 31 min del análisis en modo scan en el rango de masas 29-550 m/z.

Emisión de compuestos orgánicos volátiles: Test de Oddy

Generalmente, los compuestos orgánicos volátiles (COVs) emitidos por los materiales que puedan estar en contacto con los bienes culturales o en el mismo ambiente cerrado, aunque no lleguen a formar parte de la estructura de estos, pueden suponer una amenaza para la integridad y conservación de las obras según su naturaleza. Especialmente, en el caso de plásticos y resinas, se ha demostrado que pueden ser fuentes de emisión de sustancias ácidas y derivados de NOx (Curran y Strlič, 2015). Por tanto, la detección de emisiones potencialmente peligrosas es fundamental en la evaluación de la idoneidad de nuevos materiales empleados en intervenciones de conservación y restauración. En este estudio, se ha empleado el test de Oddy con la finalidad de identificar la emisión de estas sustancias. En concreto, la metodología de preparación del ensayo se ha basado en el protocolo detallado en (Díaz *et al.*, 2024).

Para su realización se han preparado tres placas metálicas de diferente naturaleza (Plata, Cobre y Plomo), que han sido expuestas a las emisiones producidas por 2 g de muestra del material objeto de estudio en un recipiente herméticamente sellado. Cada placa metálica de 3,5 × 1 cm se encuentra suspendida en ganchos de vidrio, evitando el contacto directo con otros elementos de la preparación. Asimismo, se dispone de un vial taponado con algodón que contiene 0,8 ml de agua desionizada para favorecer los procesos de corrosión y proveer de una atmósfera saturada de agua. Adicionalmente, se prepara un blanco patrón introduciendo las placas metálicas en un recipiente preparado de la misma manera, pero sin ninguna muestra. Para la realización del ensayo, las muestras preparadas tal y como se ha descrito se mantienen durante 28 días en una estufa a 60 °C.

Antes de proceder al ensayo, es necesario preparar adecuadamente todos los elementos implicados, con el fin de asegurar la fiabilidad de los resultados. Para ello, tanto los tapones como los componentes de vidrio se limpiaron por inmersión en una solución de detergente Decon 90 al 2 % en agua desionizada y se eliminaron los restos de detergente aplicando sucesivos baños en agua desionizada. Paralelamente, se cortaron y taladraron las placas metálicas y se preparó la superficie con lija P600. Las placas de plata y cobre se limpiaron a continuación por inmersión en etanol de grado técnico en un equipo de ultrasonidos y, seguidamente, en un recipiente con acetona de pureza ultra alta (99,9 %), dejando finalmente secar al aire. Las placas de plomo solamente se limpiaron en acetona.

La evaluación de los resultados de este ensayo se lleva a cabo mediante inspección visual, valorando la alteración de la superficie de las placas metálicas mediante la aparición de productos de corrosión respecto al blanco. De esta forma, se obtuvo una clasificación en términos de recomendación de uso permanente, temporal o inadecuado en cada metal para cada uno de los materiales.

Resultados y discusión

Los resultados de la encuesta permitieron conocer el grado de implantación de las tecnologías de impresión 3D en museos y otras instituciones culturales y, a partir de esta información, orientar la selección de materiales. Asimismo, el estudio de los materiales seleccionados ha puesto de manifiesto una gran variedad de comportamientos durante el envejecimiento. En este artículo únicamente se detallan los resultados del PLA White de la marca Colido. Su descripción, interpretación y discusión ejemplifica la efectividad de la metodología planteada, además de exponer las características y comportamiento a largo plazo de este material.

Evaluación de los resultados obtenidos mediante encuesta

Los resultados obtenidos se describen teniendo en cuenta los contenidos de los tres bloques temáticos en los que se ha estructurado la encuesta.

En relación con el primer bloque de preguntas, se constata que la presencia y el uso de las tecnologías de impresión 3D en las colecciones se confirma en el 46,8 % de las instituciones consultadas; en el resto, (53,2 %), a fecha de realización de la encuesta, la respuesta fue negativa.

Partiendo de aquellas con respuesta afirmativa, se observa que, respecto al origen del servicio, una mayoría (62,2 %) externalizó la actividad a una empresa dedicada a la impresión 3D mientras que el resto se divide entre aquellas que disponen de medios propios (27 %) y aquellas que pueden relacionarse con otras colaboraciones (18,9 %).

En cuanto al tipo de tecnología utilizado y la naturaleza de los materiales empleados, como se adelantó en el apartado de *Selección de los materiales objeto de estudio*, las tecnologías FDM y SLA destacaron como las herramientas más utilizadas, predominando PLA, PETG, PA y resinas fotopoliméricas como los materiales predominantes. En cuanto a la finalidad del uso de estos equipos, resalta la realización de copias y reproducciones, que llega al 78,4 %. Cabe destacar otras aplicaciones ya mencionadas, como la elaboración de piezas empleadas como recursos didácticos y tifológicos, el diseño de sistemas expositivos, la investigación e incluso la producción artística. Por último, respecto a las características relacionadas con el modelo 3D impreso, destaca principalmente el carácter permanente del objeto y la importancia que se atribuye al acabado y los aspectos visuales como criterio para la selección del material de impresión, como se aprecia en la Figura 3. Estos valores acentúan la necesidad de conocer los materiales y su estabilidad a largo plazo.

Respecto al segundo bloque de la encuesta referida a la formación del personal de la institución, la mayoría de respuestas (74,7 %) expresan ausencia de formación en áreas relacionadas con la digitalización, modelado e impresión 3D. De las respuestas afirmativas, el 80 % focaliza su formación en la digitalización mediante fotogrametría o escáner. Estos resultados sugieren algunos obstáculos para el uso interno de estas tecnologías, aunque no limitan su uso a través de otros canales.

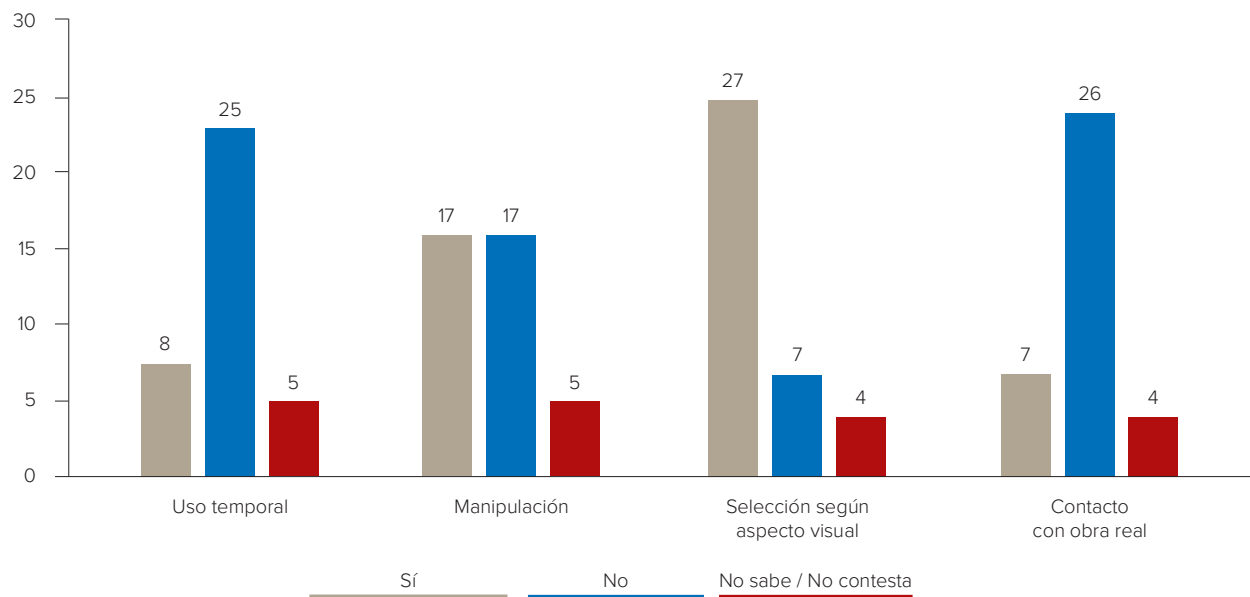


Figura 3. Valoración de características relacionadas con la impresión 3D.

En relación con las expectativas futuras que suscita la adquisición y uso de tecnologías de impresión 3D y la formación del personal del centro, los resultados son poco optimistas, con un 64,5 % de respuestas negativas en lo que se refiere a la posible adquisición de equipos en las que se considera lejano o altamente improbable. En numerosas ocasiones se menciona la limitación de los recursos personales y económicos para afrontar este escenario. También en el 56,9 % de las respuestas se estima poco probable afrontar la formación en estas tecnologías a corto o medio plazo.

Por último, hay que señalar que, teniendo en cuenta los resultados de la encuesta y las observaciones y comentarios aportados por los participantes, aunque es evidente que existen dificultades para la introducción de estas herramientas, de manera general se expresa un interés notable en el uso de estos métodos y herramientas y una considerable aceptación de su potencial implementación en un futuro.

Interpretación y discusión de la caracterización fisicoquímica

En la Figura 4a se muestran las probetas preparadas de los materiales seleccionados y en la Figura 4b su aspecto, después de haber sido sometidos a envejecimiento artificial acelerado. A partir de estas imágenes, se constata una diferencia de comportamiento importante. Solo en dos casos no se han apreciado cambios significativos: en concreto, en los materiales referenciados como EP y el PLA Recycled, ambos suministrados por SmartMaterials 3D y cuya matriz polimérica es PLA. En los restantes materiales se aprecian cambios significativos que afectan al color, morfología superficial y dimensiones, entre otros.

Como ya se ha indicado, en el contexto de esta investigación todos los materiales han sido estudiados por diferentes técnicas, lo que ha proporcionado un gran volumen de datos que actualmente están en fase de procesado e interpretación. En este artículo se presentan los que corresponden específicamente a PLA estándar de color blanco de marca Colido. En la Figura 4c se muestra en detalle la evolución de su aspecto después de la aplicación de los distintos ciclos de envejecimiento.

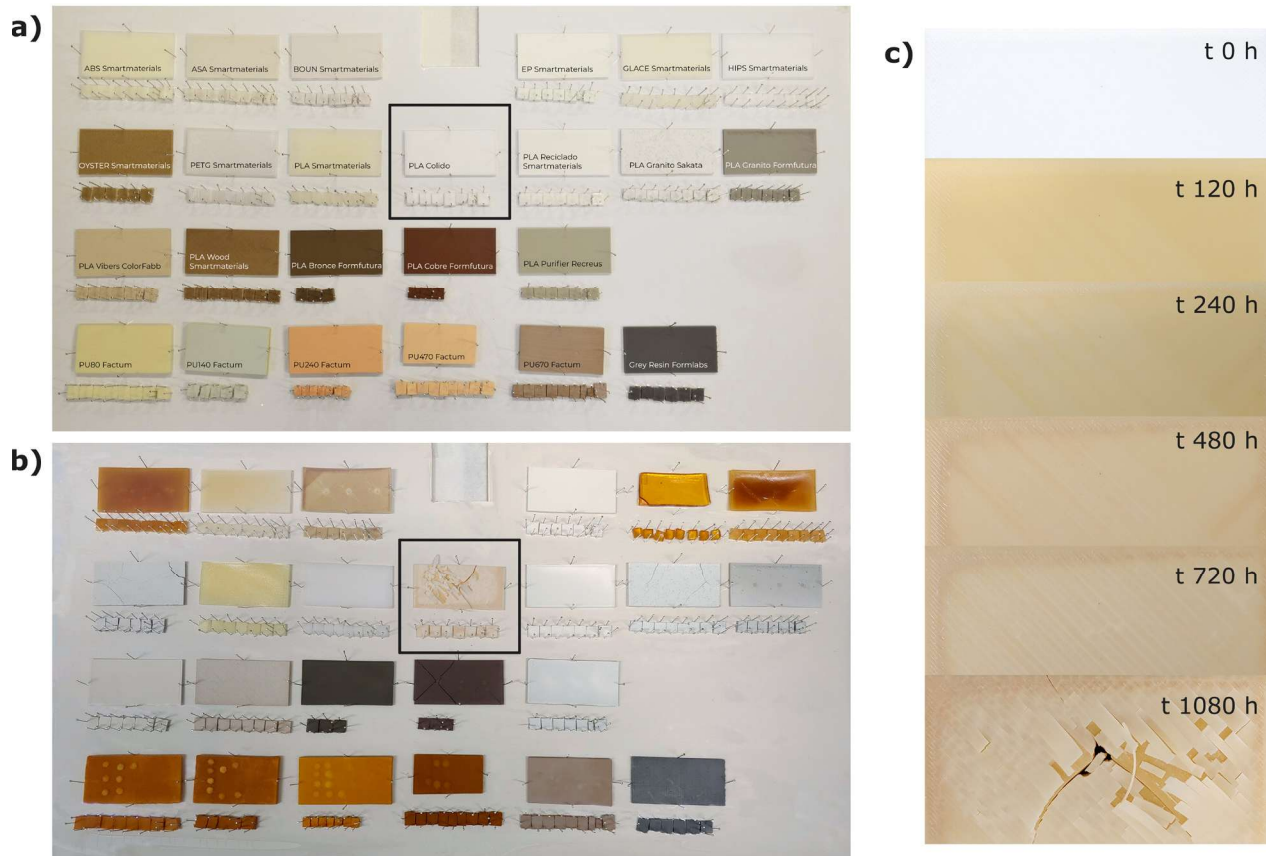
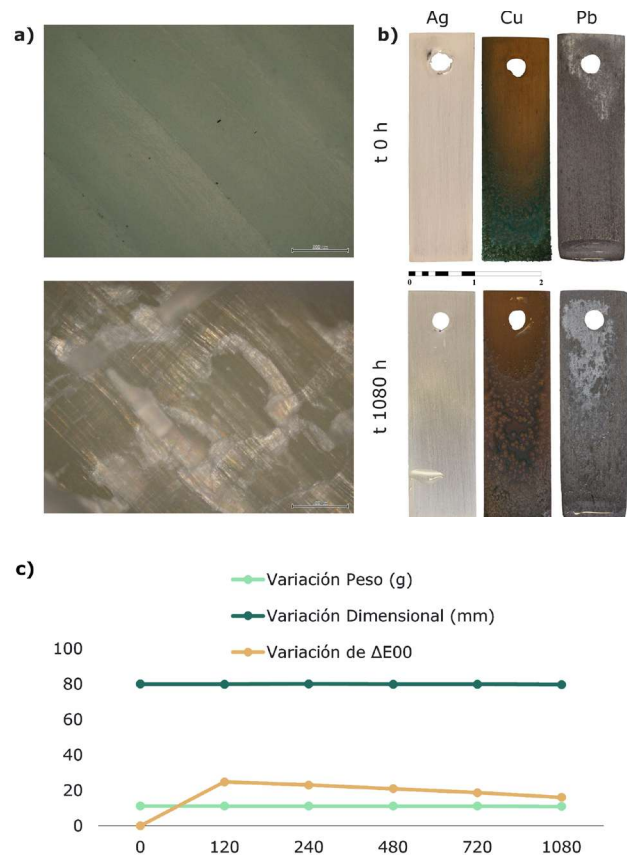


Figura 4. (a) Fotografía general inicial de los materiales ensayados; (b) Fotografía general final; (c) Ejemplo de resultados destacado: PLA ColiDo.

A simple vista, se constata una importante variación que se pone de manifiesto tras el primer ciclo de envejecimiento (120 h) y va asociada a un cambio de color. Finalizado el último ciclo (1080 h), se observa una importante alteración de la superficie del material con la aparición de separación de capas de impresión, deformaciones, descamaciones y fisuras que apuntan hacia un deterioro físico relevante (Figura 4c y 5a).

Los cambios en las características físicas (masa y dimensiones) fueron del 0,85 % de pérdida de masa y del 0,33 % de cambio dimensional, por lo que no se han considerado especialmente significativos (Figura 5c). Sin embargo, las medidas de color constataron un aumento notable del amarilleamiento en el primer ciclo de envejecimiento (ΔE_{00} de 24.8 a 120 h) y posterior cambio de color con reducción de ΔE_{00} (ΔE_{00} de 16.12 a 1080 h).

Figura 5. (a) Imágenes de MO de la superficie en estado inicial y final; (b) Resultado de Test de Oddy; (c) Variación de características físicas (peso, dimensiones y ΔE_{00}).



Respecto al test de Oddy, la Figura 5b muestra los productos de corrosión formados sobre las placas metálicas ensayadas con el material sin envejecer (superior) y después de envejecido (inferior). Ambas muestras emitieron compuestos orgánicos volátiles que reaccionaron con la superficie metálica del cobre y del plomo (Tabla 2). Adicionalmente, se observó la condensación de una sustancia con alta viscosidad y carácter adhesivo en algunas placas metálicas, principalmente en el borde inferior del plomo. La naturaleza de este compuesto podría estar relacionada con algún aditivo presente en el material de impresión 3D y su origen será objeto de estudio en futuras investigaciones.

Tabla 2. Clasificación de resultados obtenidos en test de Oddy según la idoneidad del material PLA White Colido para ser usado con carácter Permanente (P), Temporal (T) e Inadecuado (U)

Estado	Plata	Cobre	Plomo
t 0 h	P. Ningún indicio de corrosión.	U. Productos de corrosión verdes abundantes en sentido ascendente desde el borde inferior hasta los laterales generalizados por toda la superficie del cupón.	U. Productos de corrosión localizados en el borde superior. Condensación de una sustancia viscosa y adhesiva en el borde inferior.
t 1080 h	P. Ningún indicio de corrosión.	U. Productos de corrosión verdes muy abundantes en sentido ascendente desde el borde inferior en forma de gota generalizados por toda la superficie.	U. Productos de corrosión blancos localizados en el borde superior. Condensación de una sustancia viscosa y adhesiva en el borde inferior.

Como parte de la caracterización química del material y la identificación de sus propiedades térmicas, se determinó la composición de la matriz polimérica mediante FTIR-ATR (Figura 6a), coincidiendo con la información suministrada por el fabricante. El espectro obtenido muestra las principales bandas asociadas a PLA, coincidiendo con las identificadas en (San Andrés *et al.*, 2023). En particular, se reconocen: ν -CH₃ a ca. 2994 y 2945 cm⁻¹, ν -C=O a ca. 1747 cm⁻¹, δ -CH₃ a ca. 1452 y 1360 cm⁻¹, δ -CH a ca. 1381 cm⁻¹, ν -CO a ca. 1266 cm⁻¹ y ν -COC a ca. 1180 y 1078 cm⁻¹. Además, se han podido identificar otras bandas relacionadas con la presencia de una fase amorfa (ca. 866 cm⁻¹) y una fase cristalina (752 cm⁻¹). En el espectro correspondiente a la muestra envejecida, se aprecia que aumenta la intensidad de las bandas correspondientes a los grupos carbonilo (C=O) y éster (COC) y además, la intensificación de la banda a 866 cm⁻¹, relacionada con la presencia de fase cristalina.

Las curvas de DSC y TGA permitieron identificar el grado de cristalinidad del material (%), la temperatura de cristalización (T_c), la temperatura de transición vítrea (T_g), la temperatura de fusión (T_m) y la temperatura de descomposición (T_d) del material inicial y envejecido (Figura 6b). Para calcular el porcentaje de cristalinidad, se empleó el valor teórico de entalpía de fusión del PLA completamente cristalino correspondiente a 93 J/g (San Andrés *et al.*, 2023). Los resultados del material inicial muestran una T_g a 65 °C, una T_c a 94,8 °C, una T_m a 156 °C, una T_d a 362 °C con una pérdida de masa del 89 % y un 11 % de cristalinidad. Por otro lado, los resultados del material envejecido muestran una T_m de 150 °C y un aumento considerable en el grado de cristalinidad hasta el 38 %. La T_d se mantiene en 362 °C con una pérdida de masa del 94 % mientras que en la curva de flujo de calor no se identifican ni la transición vítrea ni la temperatura de cristalización.

Por último, los resultados de Py-GC-MS permitieron identificar los compuestos que se muestran en la Figura 7 y la Tabla 3. Se determinaron los picos característicos del PLA (n.º 1, 5, 6, 8, 9 y 10).

Tabla 3. Principales compuestos identificados en PLA Colido mediante Py-GC-MS

N.º	Compuesto	Tiempo de retención (min)	Peso Molecular (MW)	Relación m/z
1	Acetaldehyde	1634	44.03	29, 44
2	Acetone (mixed with others)	1816	58.04	29, 43, 58
3	Acetic acid	2203	60.02	32, 43, 60, 72
4	Tetrahydrofuran	2499	72.06	29, 39, 42, 69, 72
5	2,3-Pentadione	3114	100.05	29, 43, 57, 72, 100
6	Acrylic acid	3523	72.02	32, 45, 55, 72
7	Cyclopentanone	4275	84.06	29, 39, 41, 55, 84
8	Methyl 2-hydroxypropanoate	4571	104.05	29, 43, 45, 55, 75
9	3,6-Dimethyl-1,4-dioxane-2,5-dion (meso form)	7736	144.04	29, 45, 56
10	3,6-Dimethyl-1,4-dioxane-2,5-dion (DL form)	8031	144.04	32, 45, 56
11	Succinic acid anhydride	8305	100.02	29, 32, 39, 42, 56, 84
12	Ethyl acrylate	9898	100.05	29, 32, 45, 55, 82, 99, 102, 127, 145, 154
13	Monobut-3-enyl adipate	10490	200.1	32, 39, 43, 51, 55, 59, 69, 73, 83, 86, 101, 111, 129
14	1,6-Dioxacyclododecane-7,12-dione	10741	200.1	32, 39, 41, 43, 55, 59, 69, 71, 84, 100, 111, 114, 129, 172
15	Dibut-3-enyl adipate	11697	254.15	29, 39, 41, 55, 59, 80, 83, 93, 101, 111, 129, 183

Resulta llamativo que no se ha constatado la presencia de plastificantes ni lubricantes, componentes que sí han sido detectados en otros PLA (San Andrés *et al.*, 2023).

Conclusiones

Por una parte, la encuesta realizada a museos e instituciones culturales españolas permitió obtener una visión general sobre varios aspectos: el grado de implantación de las tecnologías de impresión 3D, la presencia de estas herramientas en las colecciones, la formación del personal en este ámbito y las expectativas futuras a medio y largo plazo respecto a la adquisición de equipos y la formación asociada. Destacan tanto la alta proporción de respuestas afirmativas respecto al uso de estos equipos, como el interés expresado por los participantes en su introducción. Sin embargo, desgraciadamente, la limitación de recursos económicos y humanos ralentiza su implantación a corto plazo.

Por otra parte, puede concluirse que la metodología de estudio de materiales planteada en esta investigación resulta efectiva para caracterizar y monitorizar el comportamiento a largo plazo de los materiales, como ha podido apreciarse en los resultados mostrados para el material PLA White de la marca Colido. A pesar de que cada una de las técnicas de ensayo realizadas tiene entidad propia y aporta información relevante en el estudio, la combinación de todos los resultados es fundamental para obtener una visión global del comportamiento. En este caso, han permitido establecer que el amarilleamiento observado puede estar relacionado con la intensificación de los grupos oxidados del material (C=O y COC, ambos del grupo éster); y la aparición de alteraciones superficiales (separación de capas, deformación, fisuras, etc.) puede tener relación con el aumento de la cristalinidad del material y la ausencia de plastificantes y lubricantes en su composición inicial. Estos resultados, unidos a la emisión de VOCs, no aconsejan su uso para intervenciones de conservación y restauración.

Por último, la aplicación de esta metodología a los restantes materiales seleccionados en esta investigación permitirá establecer los más adecuados para su aplicación en este ámbito.

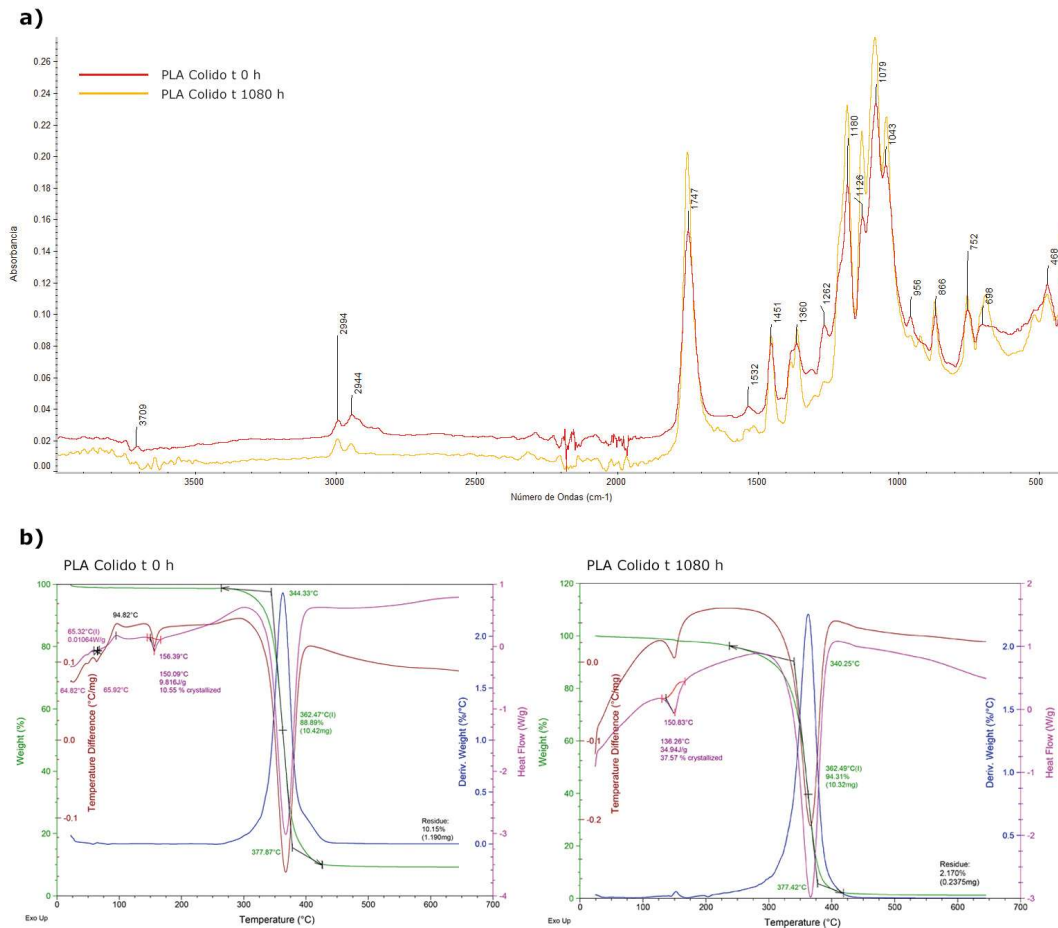


Figura 6. a) Espectro FTIR-ATR de las muestras de PLA White Colido a tiempos de envejecimiento 0 h y 1080 h; b) DSC y TGA de PLA White Colido a tiempo 0 h y 1080 h.

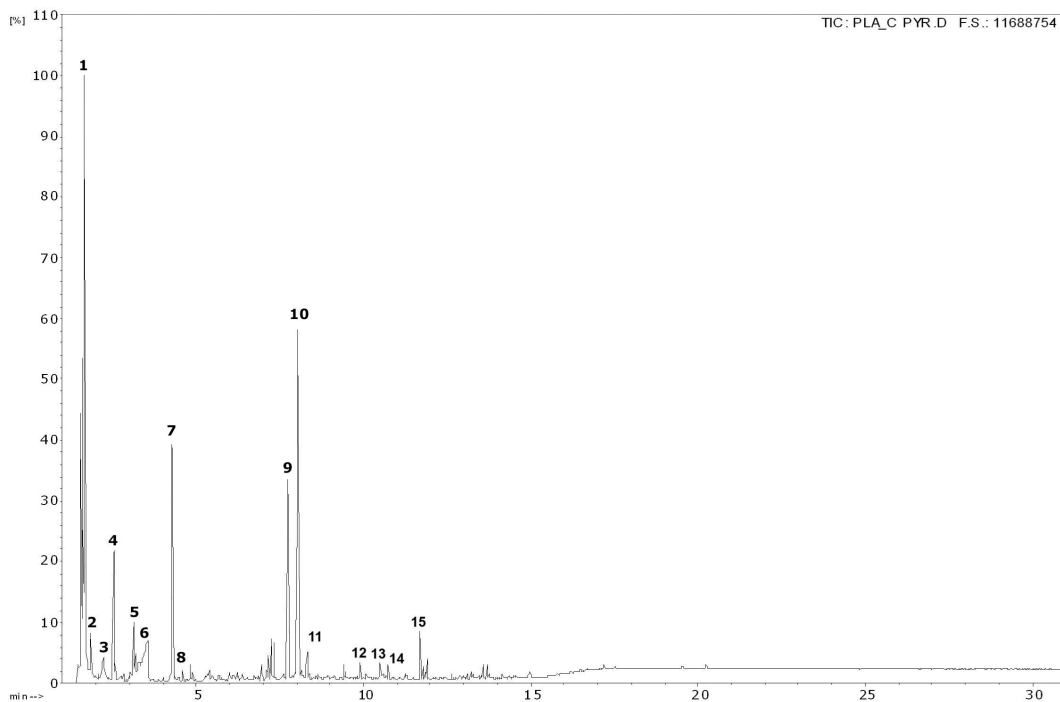


Figura 7. Pirograma de PLA White Colido.

Agradecimientos

Esta publicación es parte del proyecto de I+D+i PID2020-114393RB-100, financiado/a por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/. También cuenta con el apoyo del contrato predoctoral CT15/23 financiado por la Universidad Complutense de Madrid concedido a María Higuera. Asimismo, los autores expresan su agradecimiento a las unidades de Técnicas Geológicas, de Espectrometría de Masas y de Microscopía de los CAI de la UCM.

Bibliografía

- Acke, L., Vleugles, J., Kovac, M. & Verlinden, J. (2023). Comparative study of colour stability and shape retention: From virtual reconstruction to physical restoration of a porcelain figurine. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, (30), e00280. <https://doi.org/10.1016/J.DAACH.2023.E00280>
- Aura-Castro, E., Díaz-Marín, C., Mas-Barberà, X., Sánchez López, M. & Vendrell Vidal, E. (2021). Characterization of 3d printing filaments applied in restoration of sensitive archaeological objects using rapid prototyping. *Rapid Prototyping Journal*, 27(4), 645-657. <https://doi.org/10.1108/RPJ-06-2019-0153>
- Ávila-Rodríguez, M. & Santos, S. (2022). Aplicación de las tecnologías 3D en la conservación de la Farmacia Hispanoárabe de la UCM. *Revista de Museología: Publicación científica al servicio de la comunidad museológica*, (84), 111-124. <https://reunir.unir.net/handle/123456789/15847>
- Ávila Rodríguez, M. (2018). *Aplicación de la tecnología 3D a las técnicas de documentación, conservación y restauración de bienes culturales*. Universidad Complutense de Madrid.
- Ávila Rodríguez, M. & Santos Gómez, S. (2023). Aplicación de tecnologías 3D para reproducciones museísticas: el cráneo de Homo naledi del MNCN. *Conservar Patrimonio*, (43), 78-92. <https://doi.org/10.14568/cp26858>
- Byrnes, A. (2013). Replicating the tomb of Tutankhamun. Conservation and Sustainable Tourism in the Valley of the Kings, *Egyptological*, (8), 1-31.
- Curić, A., Jerković, I., Cavalli, F., Kružić, I., Bareša, T., Bašić, A., Mladineo, M., Jozić, R., Balić, G., Matetić, D., Tojčić, D., Dolić, K., Skejić, I. & Bašić, Ž. (2024). The Return of the Warrior: Combining Anthropology, Imaging Advances, and Art in Reconstructing the Face of the Early Medieval Skeleton. *Heritage*, 7(6), 3034-3047. <https://doi.org/10.3390/HERITAGE7060142>
- Curran, K. & Strlič, M. (2015). Polymers and volatiles: Using VOC analysis for the conservation of plastic and rubber objects. *Studies in Conservation*, 60(1), 1-14. <https://doi.org/10.1179/2047058413Y.0000000125>
- Díaz, I., Alvarez-Martin, A., Grau-Bové, J., Norrebed, S., Salvadori, B., Kraševac, I., Duran-Romero, D. & Cano, E. (2024). Review and interlaboratory comparison of the Oddy test methodology. *Heritage Science*, 12(1), 1-19. <https://doi.org/10.1186/S40494-024-01174-9>
- Doshi, M., Mahale, A., Kumar-Singh, S. & Deshmukh S. (2022). Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects. *Materials Today: Proceedings*, (50), 2269-2275. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.10.003>
- FactumArte (29 de noviembre de 2024). *The Reconstruction of the Eastern End of the Throne room of Ashurnasirpal II*. <https://www.factum-arte.com/pag/39/the-reconstruction-of-the-eastern-end-of-the-throne-room-of-ashurnasirpal-ii>
- Frigione, M. & Montagna, F. (2023). Application in Cultural Heritage of stereolithography techniques for the 3D reproduction. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-2(M-2-2023), 607-612. <https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLVIII-M-2-2023-607-2023>
- Frohwerk, E., Dürr, A. M., Fiebich, M., Zöller, N. & Mahnken A. H. (2024). Radiology meets archaeology: digital restoration and 3D printing using CT data. *RoFo: Fortschritte auf dem Gebiete der Rontgenstrahlen und der Nuklearmedizin*, 196(6), 607-611. <https://doi:110.1055/a-2206-5741>

- Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies. 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>
- Higuera, M., Carrasco-Huertas, A., Calero-Castillo, A. I., Moreno-Alcaide, M. & Collado-Montero, F.J. (2024). Study of liquid photopolymer 3D printing resins exposed to accelerated aging for cultural heritage purposes. *Rapid Prototyping Journal*, 30(7), 1476-1485. <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2024-0015>
- Higuera, M., Collado-Montero, F. J. & Medina, V. J. (2023). Colorimetric evaluation of 3D printing polymers exposed to accelerated aging for Cultural Heritage applications. *Color Research & Application*, 48(3), 283-295. <https://doi.org/10.1002/COL.22846>
- Huang, M., Liu, H., Cui, G., Luo, M. R. & Melgosa, M. (2012). Evaluation of threshold color differences using printed samples. *Journal of the Optical Society of America A*, 29(6), 883. <https://doi.org/10.1364/josaa.29.000883>
- Kantaros, A., Ganetsos, T. & Petrescu, F. I. T. (2023). Three-Dimensional Printing and 3D Scanning: Emerging Technologies Exhibiting High Potential in the Field of Cultural Heritage. *Applied Sciences*, 13(8), 4777. <https://doi.org/10.3390/APP13084777>
- Khan, S., Joshi, K. & Deshmukh, S. (2022). A comprehensive review on effect of printing parameters on mechanical properties of FDM printed parts. *Materials Today: Proceedings*, (50), 2119-2127. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.09.433>
- Krieg, T., Mazzon, C. & Gómez-Sánchez, E. (2021). Material Analysis and a Visual Guide of Degradation Phenomena in Historical Synthetic Polymers as Tools to Follow Ageing Processes in Industrial Heritage Collections. *Polymers*, 14(1), 121. <https://doi.org/10.3390/POLYM14010121>
- Marra, A., Vespasiano, L. & Brusaporci, S. (2023). Digital and Physical Replicas for the Study and Valorisation of Archaeological Artefacts: the Lead Seal of Pope Gregory IX from the Archaeological Excavation at Amiternum (Aq). *SCIRES-IT - SCientific REsearch and Information Technology*, 13(2), 61-70. <https://doi.org/10.2423/122394303V13N2P61>
- Melgosa, M., Hita, E., Romero, J. & Jiménez del Barco, L. (1992). Some classical color differences calculated with new formulas. *Journal of the Optical Society of America A*, 9(8), 1247. <https://doi.org/10.1364/josaa.9.001247>
- Moscattelli, M. (2024). Preserving Tradition through Evolution: Critical Review of 3D Printing for Saudi Arabia's Cultural Identity. *Buildings*, 14(3), 697. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS14030697>
- Nigro, L., Montanari, D., Sabatini, S., De Giuseppe, M., Benedettucci, F. M., Lucibello, S., Fattore, L., Trebbi, L., Nejat, B. & Rinaldi, T. (2024). Caress the pharaoh. The tactile reproduction of Ramses II's "mummy" in the Sapienza University Museum of the Near East, Egypt and Mediterranean. *Journal of Cultural Heritage*, (67), 158-163. <https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2024.02.010>
- Pelin, G., Sonmez, M. & Pelin, C.E. (2024). The Use of Additive Manufacturing Techniques in the Development of Polymeric Molds: A Review. *Polymers*, 16(8). <https://doi.org/10.3390/POLYM16081055>
- Pistofidis, P., Arnaoutoglou, F., Ioannakis, G., Michailidou, N., Karta, M., Kiourt, C., Pavlidis, G., Mouroutsos, S. G., Tsiadaki, D. & Koutsoudis, A. (2023). Design and evaluation of smart-exhibit systems that enrich cultural heritage experiences for the visually impaired. *Journal of Cultural Heritage*, (60), 1-11. <https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2023.01.004>
- Rizzo, D., Fico, D., Montagna, F., Casciaro, R. & Esposito-Corcione, C. (2023). From Virtual Reconstruction to Additive Manufacturing: Application of Advanced Technologies for the Integration of a 17th-Century Wooden Ciborium. *Materials*, 16(4), 1424. <https://doi.org/10.3390/MA16041424>
- Saha, S., Tomkowska A., Matusiewicz, J. & Sitnik R. (2023) Manufacturing of ceramic venus figurine replica from a mold by combining traditional and digital technologies. *Heritage Science*, 11(1), 1-12. <https://doi.org/10.1186/S40494-023-00870-2>
- San Andrés, M., Chércoles, R., Navarro, E., De La Roja, J. M., Gorostiza, J., Higuera, M. & Blanch, E. (2023). Use of 3D printing PLA and ABS materials for fine art. Analysis of composition and long-term behaviour of raw filament and printed parts. *Journal of Cultural Heritage*, (59), 181-189. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.12.005>

- Sharma, G., Wu, W. & Dalal, E.N. (2005). The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations. *Color Research & Application*, 30(1), 21-30. <https://doi.org/10.1002/col.20070>
- Solomon, I. J., Sevel, P. & Gunasekaran, J. (2021). A review on the various processing parameters in FDM, *Materials Today: Proceedings*, 37(Part 2), 509-514. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.05.484>
- Son, S., Jo, H., Gwak, H., Cho, S. & Shinh K. C. (2023). A study on multi-modeling for artifact restoration. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-2(M-2-2023), 1479-1484. <https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLVIII-M-2-2023-1479-2023>
- Thakar, C. M., Parkhe, S. S., Jain, A., Phasinam, K., Murugesan, G. & Ventayen, R. J. M. (2022). 3d Printing: Basic principles and applications. *Materials Today: Proceedings*, (51), 842-849. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.06.272>
- Wagner, M. (2018). *Thermal analysis in practice : fundamental aspects*. Hanser Publications. <http://www.sciencedirect.com:5070/book/9781569906439/thermal-analysis-in-practice>
- Xu, H., Yaguchi, H. & Shioiri, S. (2001). Estimation of color-difference formulae at color discrimination threshold using CRT-generated stimuli. *Optical Review*, 8(2), 142-147. <https://doi.org/10.1007/S10043-001-0142-1/METRICS>
- Xue, Y., Wen, X., Fu, W. & Yu, S. (2023). Application Research on Restoration of Ceramic Cultural Relics Based on 3D Printing. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, (14035 LNCS), 88-107. https://doi.org/10.1007/978-3-031-34732-0_7/FIGURES/26
- Zhou, L., Miller, J., Vezza, J., Mayster, M., Raffay, M., Justice, Q., Al Tamimi, Z., Hansotte, G., Sunkara, L. D. & Bernat, J. (2024). Additive Manufacturing: A Comprehensive Review. *Sensors*, 24(9), 2668. <https://doi.org/10.3390/S24092668>

Normativa

- Asociación Española de Normalización. (2023). *UNE-EN ISO/CIE 11664-6:2023. Colorimetry-Part 6: CIEDE2000 colour-difference formula*.