

MORTERO DE BAJA DENSIDAD PARA LA CONSERVACIÓN Y REPRODUCCIÓN DE ESCULTURA CON VALOR PATRIMONIAL

Joaquín I. Salas Álvarez¹, Flavia R. Santana², Ana Calleja Roldán³, Mario Lozano⁴, Eva Cuesta⁵, Elena Blanco Fernández⁶, Laura Castañón⁷

¹ Universidad de Cantabria, Santander, España, salasji@unican.es

² Universidad de Cantabria, Santander, España, flavia-rencina.santana@alumnos.unican.es

³ Universidad de Cantabria, Santander, España, ana.calleja@alumnos.unican.es

⁴ Universidad de Cantabria, Santander, España, mario.lozano@unican.es

⁵ Universidad de Cantabria, Santander, España, eva.cuesta@unican.es

⁶ Universidad de Cantabria, Santander, España, elena.blanco@unican.es

⁷ Universidad de Cantabria, Santander, España, laura.castanon@unican.es

Resumen

La conservación del patrimonio cultural presenta con frecuencia problemas de deterioro como pérdidas de material, fracturas o agrietamientos que requieren una intervención directa para reparar la pieza original o generar una reproducción. En estos casos, el material empleado debe ser compatible con el original y responder a los esfuerzos que exige la pieza. Además, en determinadas situaciones puede ser adecuado emplear materiales ligeros para que el sobrepeso de la intervención sea reducido. Esta investigación se centra en el desarrollo y caracterización de morteros de baja densidad orientados a la restauración y reproducción de esculturas patrimoniales. Se diseñaron distintas formulaciones incorporando áridos ligeros como arcilla expandida, corcho granulado y EPS, junto con aditivos superplastificantes y aireantes, buscando reducir la densidad aparente sin comprometer las propiedades mecánicas. El estudio se estructuró en dos fases experimentales: la Fase I evaluó 16 dosificaciones de mortero de cal NHL 3,5, analizando la influencia de aditivos fluidificantes y aireantes mediante análisis de resistencia mecánica, tenacidad, densidad y coste, con selección de la mezcla óptima a través de los métodos TOPSIS y WASPAS. La Fase II amplió el estudio a 15 formulaciones con cuatro tipos de conglomerante (cemento blanco tipo II, yeso, NHL 3,5 y cal hidráulica HL 5) y cuatro áridos ligeros, con especial énfasis en la caracterización de la resistencia. Paralelamente, se desarrolló y verificó el proceso de reproducción escultórica mediante encofrado de PLA impreso en 3D, desde el escaneo láser de las piezas originales hasta la comparación geométrica de la réplica, evidenciando la viabilidad técnica de la metodología propuesta.

Palabras Clave: Morteros de baja densidad, Conservación del patrimonio, Impresión 3D, Análisis multicriterio.

1 Introducción

La restauración de elementos arquitectónicos con valor patrimonial constituye uno de los retos más significativos de la ingeniería civil contemporánea. La preservación de esculturas y ornamentos en edificios históricos exige intervenciones que combinen rigor técnico con respeto por la autenticidad del original [1].

Un ejemplo representativo de esta problemática es el edificio de la sede del Banco Santander en el Paseo Pereda de Santander, construido entre 1919 y 1923 y declarado conjunto histórico. En 1958, el escultor Juan Luis Blanes incorporó a su fachada figuras alegóricas representando las artes, la cultura, el comercio y la navegación, así como pináculos ornamentales, ejecutados en piedra de Boñar, una arenisca procedente de León seleccionada por sus cualidades estéticas y

mecánicas [2]. Tras más de sesenta años de exposición al ambiente urbano costero, estos elementos presentan deterioros que requieren intervención de restauración o reproducción de piezas.

Las técnicas tradicionales de restauración escultórica: talla por puntómetro, reproducción por cuadrícula o moldeo en escayola, requieren artesanos altamente especializados cuyo número decrece progresivamente [3], lo que encarece y dificulta su contratación. Frente a esta situación, las tecnologías de digitalización tridimensional e impresión 3D ofrecen una alternativa prometedora, impulsada por la reducción sostenida de costes en equipamiento y software [4].

La propuesta de este trabajo parte de una innovación metodológica clave: la impresión 3D no se emplea para fabricar directamente la pieza escultórica, sino para producir encofrados de termoplástico (PLA) que se rellenan con mortero. Esta estrategia permite obtener acabados geoméricamente fieles al modelo digitalizado, mientras el mortero aporta la compatibilidad química y mecánica necesaria con el sustrato original. La baja densidad de estos morteros resulta especialmente ventajosa en intervenciones sobre elementos en altura, donde la carga adicional debe minimizarse [5].

Este trabajo se enmarca en el proyecto de investigación *Tecnologías 3D Aplicadas a la Conservación de Patrimonio Cultural* (3D-inHerit), financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (MICIU/AEI/10.13039/501100011033) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER, UE), con referencia PID2023-147803OB-100. El objetivo es describir el procedimiento completo desarrollado, desde la digitalización de las piezas originales hasta la verificación geométrica.

2 Procedimiento Experimental

El procedimiento global se organiza en cuatro etapas secuenciales para la fabricación de la réplica: (i) digitalización y caracterización colorimétrica de la pieza original; (ii) impresión 3D del encofrado de PLA; (iii) vaciado, desencofrado y post-procesado; y (iv) verificación geométrica. Paralelamente, y como elemento central de esta investigación, se llevaron a cabo dos fases independientes de fabricación y caracterización de morteros de baja densidad: la Fase I estudia 16 dosificaciones de mortero de cal NHL 3,5 variando el tipo de árido y los aditivos, mientras que la Fase II amplía el estudio a 15 formulaciones con distintos conglomerantes y áridos ligeros, con especial énfasis en las propiedades resistentes. Los resultados de ambas fases determinaron la selección del mortero empleado en el proceso de reproducción escultórica

2.1 Digitalización y caracterización colorimétrica

Antes de iniciar el proceso de fabricación de mortero es necesario realizar un escaneo de la pieza original a replicar y también determinar sus valores colorimétricos, con el objetivo de establecer los criterios de compatibilidad geométrica y de su colorimetría original.

El escaneo tridimensional se realizó con el escáner EinScan Pro-HD (Shining3D), en modo de alineación por marcadores adhesivos. Este equipo tiene una exactitud volumétrica de 0,045 mm + 0,3 mm/m y una cadencia de 3 millones de puntos/s [6]. El procedimiento de escaneo consiste en: (i) colocar los marcadores sobre la pieza de forma aleatoria para que el software pueda reconocer las diferentes posiciones del escáner; (ii) realizar pasadas completas alrededor del elemento, solapando las capturas; y (iii) procesar la nube de puntos con el software ExScan Pro para obtener la malla tridimensional y el archivo STL de referencia, como se indica en la siguiente figura 1.



Figura 1. Proceso de escaneo de pieza patrimonial.

La caracterización del color de la pieza original se realizó con el espectrofotómetro Konica Minolta CM-600d, midiendo en tres puntos distribuidos sobre la superficie de cada pieza. El aparato trabaja con el espacio de color CIE $L^*a^*b^*$, registrando la luminosidad (L^*), la componente rojo-verde (a^*) y la componente amarillo-azul (b^*), tanto en modo SCE (componente especular excluida, útil para comparación visual) como en modo SCI (incluida, útil para formulación de color). Estos valores sirven de referencia para dosificar el pigmento en las amasadas de mortero [7].

2.2 Fase I. Morteros de cal NHL 3,5 (M1-M16)

Se diseñaron 16 dosificaciones de mortero de baja densidad empleando cal hidráulica natural NHL 3,5 como único conglomerante. Se utilizaron dos configuraciones de árido: las mezclas M1–M8 emplean árido calizo (0–3 mm) sin árido ligero, mientras que las mezclas M9–M16 incorporan arcilla expandida (236 g por amasada) con una proporción reducida de caliza. Las variables estudiadas sistemáticamente fueron: superplastificante en polvo MasterCast 205 MA, superplastificante líquido MasterSure 950, agente aireante MasterCell 100 y fibras de vidrio AR de 13 mm. Las proporciones completas se indican en la Tabla 1. Las mezclas sin aireante se compactaron en dos capas de llenado, aplicando en cada una 60 golpes desde media altura, según la norma UNE-EN 1015 [8]. Las que incorporan agente aireante no se compactaron.

Tabla 1. Dosificaciones de la Fase I.

Mix	NHL 3.5	Caliza	Arlita	MasterSure 950	MasterCast 205 MA	MasterCell 100	Fibra de vidrio
M1	1.00	0.50	—	0.020	—	—	—
M2	1.00	0.50	—	—	0.020	—	—
M3	1.00	0.50	—	0.020	—	—	0.010
M4	1.00	0.50	—	—	0.020	—	0.010
M5	1.00	0.50	—	0.020	—	0.010	—
M6	1.00	0.50	—	—	0.020	0.010	—
M7	1.00	0.50	—	0.020	—	0.010	0.010
M8	1.00	0.50	—	—	0.020	0.010	0.010

M9	1.00	0.117	0.530	0.020	—	—	—
M10	1.00	0.117	0.530	—	0.020	—	—
M11	1.00	0.117	0.530	0.020	—	—	0.010
M12	1.00	0.117	0.530	—	0.020	—	0.010
M13	1.00	0.117	0.530	0.020	—	0.010	—
M14	1.00	0.117	0.530	—	0.020	0.010	—
M15	1.00	0.117	0.530	0.020	—	0.010	0.010
M16	1.00	0.117	0.530	—	0.020	0.010	0.010

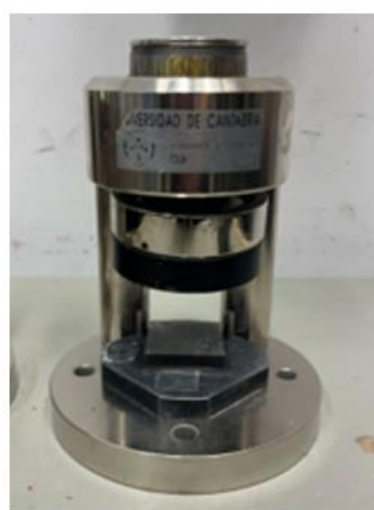
Nota: Agua de amasado: 330 ml para M1–M8 y 200 ml para M9–M16. Todas las proporciones de los componentes se encuentran normalizadas respecto al contenido de aglomerante, considerando un valor de referencia igual a 1,00.

Una vez finalizado el amasado, la mezcla se vierte en moldes prismáticos de acero de 160 × 40 × 40 mm previamente engrasados con aceite de desmoldeo. El llenado se realiza en dos capas para los morteros compactados y en una para los morteros en los que se adiciona el aireante (no compactados). La capa superior se enrasa con una espátula sin ejercer presión, para no alterar la estructura de poros en las muestras con aireante. Los moldes se dejan al aire durante las primeras 72 horas y, transcurrido ese tiempo, las probetas se desmoldan y se almacenan a temperatura ambiente y humedad controladas (20 ± 2 °C, HR > 90 %) hasta la fecha de ensayo.

Los ensayos de resistencia a flexión y compresión se realizaron a 7, 28 y 90 días en la máquina universal ZwickRoell Z 100 según UNE-EN 196-1:2018 [9]. Para el ensayo a flexión se empleó el método de carga en tres puntos (luz entre apoyos 100 mm; $\sigma_f = 1,5 \cdot F \cdot L / b^3$); tras la rotura, cada mitad de probeta se ensayó a compresión (sección de referencia: 1.600 mm²). La densidad se determinó a partir de la masa y el volumen medidos antes de cada campaña de ensayo. La tenacidad se estimó como el área bajo la curva fuerza–desplazamiento del ensayo de flexión. A continuación, se muestran en la figura 2 los equipos de cuna de ensayo utilizados.



Cuna de ensayo para ensayo a flexión



Cuna de ensayo para ensayo a compresión

Figura 2. Ensayos mecánicos.

2.3 Fase II – Morteros con múltiples conglomerantes

La Fase II analizó el efecto combinado del conglomerante y el árido ligero en 15 dosificaciones (LD01–LD15), empleando cuatro conglomerantes (CEM II, yeso, NHL 3,5 y HL 5) y cuatro áridos (arcilla expandida triturada, corcho, EPS y arena caliza como referencia). Se mantuvo la dosis óptima de superplastificante de la Fase I, se añadieron fibras de vidrio AR en mezclas seleccionadas, y los áridos porosos se pre-saturaron ≥ 24 h para preservar el agua de amasado.

Tabla 2. Dosificaciones de la Fase II (LD01-LD15).

Mezcla	Aglomerante		Arena caliza	Árido Ligero	Fibra Vidrio	Agua Sat.	Agua Amas.	Aditivos
LD1-0F-24h	CEM II 42.5R	1.00	0,117	Arlita: 0,530	–	0,449	–	SP: 0,020
LD1-0F-30'	CEM II 42.5R	1.00	0,117	Arlita: 0,530	–	0,18	0,098	SP: 0,012
LD1-GF-30'	CEM II 42.5R	1.00	0,117	Arlita: 0,530	0,01	0,18	0,098	SP: 0,013
LD2-0F	Yeso	1.00	0,117	Arlita: 0,530	–	0,18	0,458	SP: 0,024 / RF: 0,005
LD2-GF	Yeso	1.00	0,116	Arlita: 0,530	0,01	0,18	0,32	SP: 0,012 / RF: 0,005
LD3-0F-30'	NHL 3.5	1.00	0,117	Arlita: 0,530	–	0,18	0,239	SP: 0,012
LD3-GF-30'	NHL 3.5	1.00	0,117	Arlita: 0,530	0,01	0,18	0,25	SP: 0,012
LD4-0F	NHL 3.5	1.00	–	Corcho: 0,069	–	0,138	0,368	SP: 0,004
LD4-GF	NHL 3.5	1.00	–	Corcho: 0,069	0,007	0,138	0,378	SP: 0,004
LD5-0F	NHL 3.5	1.00	–	EPS: 0,012	–	0,104	0,321	SP: 0,005
LD5-GF	NHL 3.5	1.00	–	EPS: 0,012	0,006	0,104	0,324	SP: 0,008
LD6-0F	HL 5	1.00	–	Arlita: 0,647	–	0,22	0,281	SP: 0,014
LD6-GF	HL 5	1.00	–	Arlita: 0,647	0,01	0,22	0,462	SP: 0,030
LD7-0F	HL 5	1.00	–	EPS: 0,012	–	0,104	0,377	SP: 0,008
LD7-GF	HL 5	1.00	–	EPS: 0,012	0,006	0,104	0,384	SP: 0,012

Nota: Todas las proporciones de los componentes se encuentran normalizadas respecto al contenido de aglomerante, considerando un valor de referencia igual a 1,0. **SP:** aditivo superplastificante (Master Cast 205 MA); **RF:** aditivo retardante de fraguado (ácido cítrico).

2.4 Proceso de reproducción escultórica

El flujo de trabajo de reproducción comienza con la malla STL obtenida en el apartado 2.1. A partir de esta malla STL, para fabricar los moldes con las geometrías necesarias según la pieza original, se utilizan programas de modelado tridimensional compatibles con las impresoras 3D

FDM (Orcaslicer / Ultimaker Cura). Para este caso, se utilizó la impresora FDM Artillery Sidewinder X1 utilizando Filamento PLA para replicar el busto de la estatua 'La Banca', pieza que se encuentra ubicada en el edificio banco de Santander. A continuación, se muestran en la tabla 3 los parámetros de impresión.

Tabla 3. Parámetros de Impresión y Procesado

Parámetros de impresión	
Tipo de Impresión [mm]:	Normal
Tipo de filamento:	PLA
Diámetro boquilla [mm]:	0,6
Altura de capa [mm]:	0,3
Espesor pared [mm]:	1,2
Velocidad de impresión [mm/s]:	30
Soporte:	SI
Tipo de soporte:	Manual
Diseño de soporte:	Normal
Porcentaje de soporte:	12%
Ventilación activada:	SI
Capas superiores e inferiores:	3
Torre de purga:	No

Nota: Los parámetros de impresión fueron configurados en el software Ultimaker Cura.

El vaciado se ejecutó por vertido vertical lento empleando varillado para la eliminación de aire y un lecho de arena como soporte lateral del encofrado de PLA. Tras 48 horas de curado, se realizó el desencofrado manual mediante el corte de la carcasa. Finalmente, la superficie se acabó con una lechada de cal (NHL 3.5), calibrando el color mediante un espectrofotómetro CM-600d (proceso ilustrado en la Figura 3).



Figura 3. Proceso de reproducción escultórica.

3 Resultados y Discusión

3.1 Fase I: selección MCDM

Las mezclas M5 y M1 destacaron en resistencia a compresión (~19–21 MPa a 28–90 días), mientras que M7 obtuvo la mayor tenacidad (1.135 N·mm) gracias al aireante y las fibras de vidrio. Las mezclas con arcilla expandida (M9–M16) sacrificaron resistencia a cambio de densidades muy bajas (461–1.137 kg/m³). El aireante MasterCell 100 penalizó la resistencia al inducir alta porosidad abierta.

Tabla 4. Resultados mecánicos de la Fase I,

Mix	fc 28d (MPa)	ff 28d (MPa)	fc 90d (MPa)	ff 90d (MPa)	Densidad (kg/m ³)	Tenacidad (N·mm)
M1	18.9	1.8	21.1	2.1	1766	51
M2	14.8	3.4	17.4	6.9	1652	127.6
M3	3	0.9	5.5	1.9	859	64.9
M4	0.7	0.5	1.5	0.8	973	195.9
M5*	19.2	4.3	21.4	7.8	1699	675.7
M6	14.5	3.9	16.9	6.2	1625	187.9
M7	1.2	1.3	2.2	2.1	793	1135.4
M8	0.3	0.2	0.3	0.3	801	297.4
M9	12.3	2.9	11.4	3.3	1137	133
M10	10.3	3	10.8	5.1	1078	133.7
M11	2.5	0.5	3.5	0.7	664	24.4
M12	0.2	0.8	0.8	6	590	—
M13	11.5	2.5	11	4.8	1090	106
M14	9.6	2.8	9.3	0.6	1105	110.8
M15	0.6	0.4	0.9	—	512	250.4
M16	—	—	—	—	461	—

Nota: (*) Mezcla óptima seleccionada mediante análisis de decisión multicriterio (MCDM).

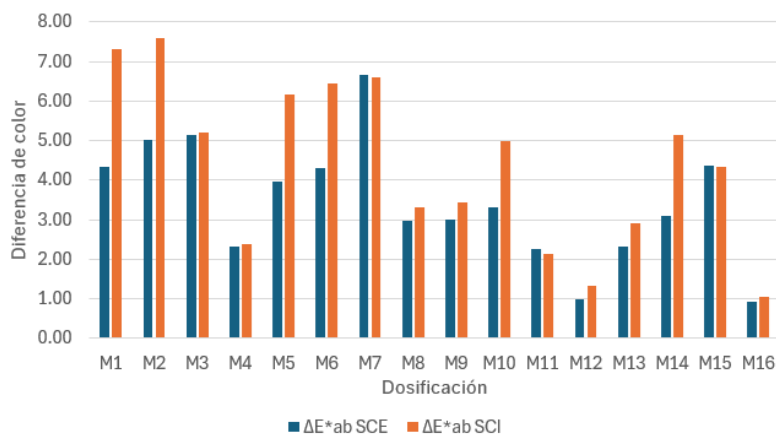


Figura 4. Diferencia de color respecto a la piedra de Boñar por dosificación (Fase I).

En cuanto a la compatibilidad colorimétrica, las mezclas M12 y M16 (mayor dosis de pigmento, 2 g/amasada) mostraron las menores diferencias de color respecto a la piedra de Boñar: $\Delta E^*_{ab} = 0,99$ y $0,93$ respectivamente en modo SCE, correspondientes a una diferencia perceptual considerada 'leve'. La mayoría de las mezclas restantes, presentaron valores de ΔE^*_{ab} entre 2 y 7, lo que refleja la necesidad de optimizar la dosis de pigmento, como se indica en la figura 4.

Para evaluar la viabilidad económica de las dosificaciones de mortero desarrolladas, se realizó un análisis del coste de los materiales componentes. Los precios unitarios se obtuvieron a partir de bases de datos del sector e información de proveedores comerciales (con Impuesto sobre el Valor Añadido, IVA, incluido), como se indica en la tabla 5.

Tabla 5. Desglose de costes de materiales

Material	Formato de suministro	Coste unitario comercial
Cal NHL 3.5	Sacos (≥ 17 kg)	0,37 €/kg
Caliza (0-3 mm)	Granel	2,61 €/t
Arlita	Palet (220 kg)	265,00 €/palet
Agua	Red municipal	1,63 €/m ³
Master Cast 205 MA	Sacos (12 kg)	19,20 €/kg
Master Sure 950	Garrafas (25 L)	3,58 €/kg
MasterCell 100	Garrafas (25 kg)	8,92 €/kg
Fibra de vidrio (13 mm)	Comercial	11,86 €/kg

A partir de los costes unitarios y las dosificaciones correspondientes, se determinó el coste de producción final para cada una de las probetas fabricadas (M1 a M16). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Coste de producción por probeta para cada dosificación de mortero.

Dosificación	Coste (€/probeta)	Dosificación	Coste (€/probeta)
M1	0.71	M9	0.62
M2	0.42	M10	0.52
M3	0.80	M11	0.66
M4	0.51	M12	0.57
M5	0.82	M13	0.67
M6	0.53	M14	0.58
M7	0.91	M15	0.71
M8	0.62	M16	0.62

De las 16 dosificaciones de la Fase I, se aplicó un filtro previo de resistencia mínima a compresión de 3 MPa a 28 días, con el objetivo de garantizar un comportamiento mecánico suficiente para la aplicación patrimonial tal como se muestra en la Figura 5. Este criterio eliminó las mezclas M3, M4, M7, M8, M11, M12, M15 y M16, reduciendo el conjunto de análisis a 8 dosificaciones (M1, M2, M5, M6, M9, M10, M13 y M14), sobre las cuales se aplicaron los

métodos TOPSIS [10] y WASPAS [11], donde se analizaron 4 criterios: tenacidad, resistencia mecánica, coste y densidad.

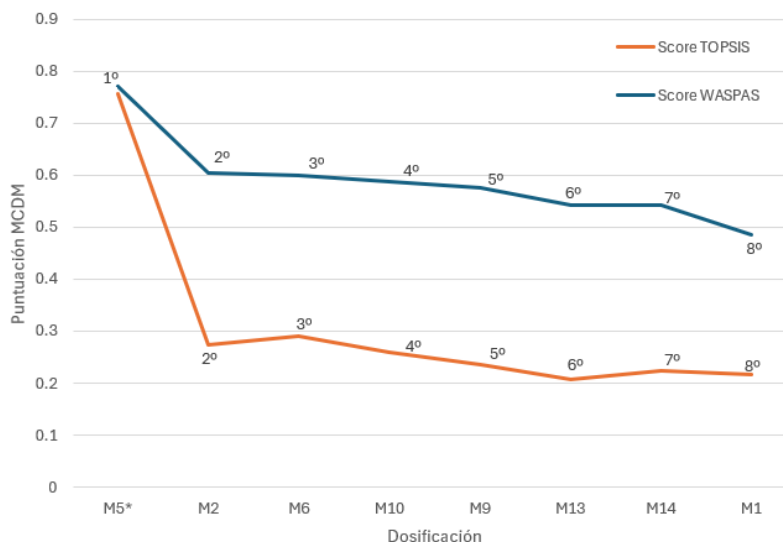


Figura 5. Resultados del análisis de decisión multicriterio (TOPSIS y WASPAS).

3.2 Fase II: caracterización mecánica

Para la evaluación de las propiedades mecánicas y físicas de los morteros en la Fase II, se fabricaron diferentes mezclas de las cuales se seleccionaron muestras representativas para ser sometidas a dos regímenes de curado diferenciados: curado en aire (a) y curado en agua (w). Tras cumplir el periodo de maduración estipulado, se procedió al ensayo de las probetas resultantes para caracterizar su comportamiento evolutivo, cuyos resultados principales se recogen en la Tabla 7.

Tabla 7: Resultados mecánicos de la fase II a los 28 días

Mix	fc 28d (MPa)	ff 28d (MPa)	Densidad (kg/m ³)	Tenacidad (N·mm)
LD1-24h(a)	31.3	5.0	1401.95	599.87
LD1*-24h(w)	36.1	6.6	1544.34	8387.21
LD*10F(a)	24.8	6.2	1372.46	1054.07
LD10F(w)	24.2	7.3	1496.91	1370.73
LD1GF (a)	26.4	5.3	1278.52	665.38
LD1GF (w)	27.5	5.9	1440.12	693.30
LD20F (a)	1.7	-	781.80	-
LD2GF (a)	1.5	-	780.31	-
LD30F (a)	13.1	3.4	1134.18	502.37
LD30F (w)	10.0	2.4	1371.91	510.67
LD3GF (a)	10.8	2.9	1196.52	429.04

LD3GF (w)	10.2	2.3	1424.41	377.84
LD40F (a)	3.3	1.0	860.20	176.64
LD40F (w)	1.7	0.6	1192.07	140.82
LD4GF (a)	3.2	1.4	830.90	274.72
LD4GF(w)	1.9	0.8	1207.66	251.24
LD50F (a)	1.8	0.6	690.16	141.71
LD50F (w)	1.6	0.9	924.45	222.46
LD5GF (a)	1.9	0.8	707.85	158.17
LD5GF (w)	1.5	0.7	834.02	160.24
LD60F (a)	12.8	3.1	1051.56	353.84
LD60F (w)	11.4	2.3	1264.69	242.49
LD6GF (a)	14.6	3.2	1067.70	357.19
LD6GF (w)	11.4	2.3	1346.91	253.12
LD70F (a)	2.1	0.6	696.95	127.55
LD70F (w)	14.0	0.6	845.27	69.47
LD7GF (a)	1.7	0.7	630.43	203.21
LD7GF (w)	2.6	1.2	909.00	409.92

Nota: (*) Mezcla óptima seleccionada mediante un análisis de toma de decisiones multicriterio (MCDM). (a): curado al aire. (w): curado en agua.

Las mezclas de control con cemento blanco (LD1) lideraron en resistencia a compresión (31–36 MPa), y LD1*-24h(w) registró la mayor tenacidad (8.387,21 N·mm) por el efecto combinado del curado en agua y las fibras de vidrio AR. Las series con áridos ligeros (LD50F–LD7GF) presentaron en general resistencias reducidas (en su mayoría <3 MPa) a cambio de densidades muy bajas (630–924 kg/m³), con la excepción de LD70F(w) (fc = 14,0 MPa), orientándolas a usos de aislamiento o construcción ligera.

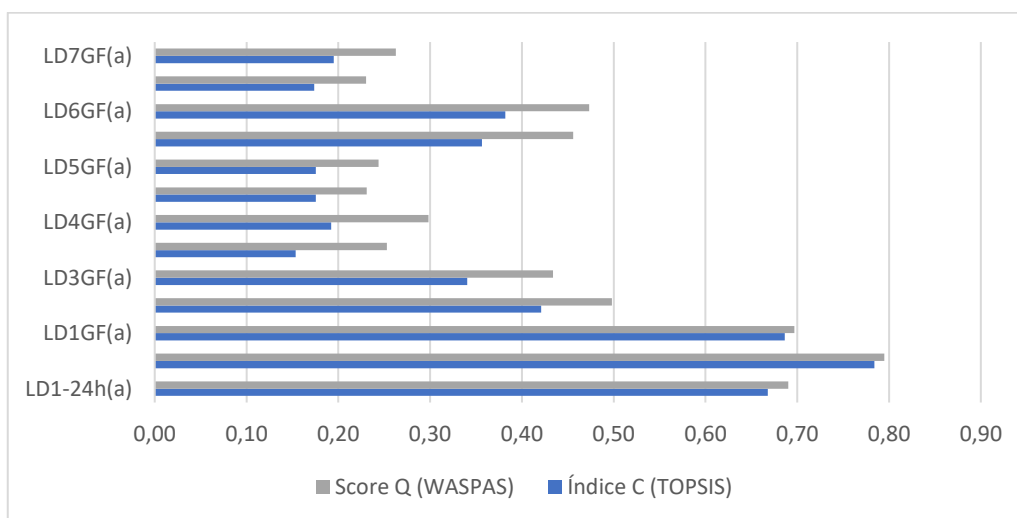


Figura 6. Resumen TOPSIS y WASPAS - Dosificaciones de mortero curado al aire (a).

TOPSIS y WASPAS coincidieron en ambas condiciones de curado: LD10F(a) fue óptima en curado al aire ($C = 0,789$; $Q = 0,795$) y LD1-24h(w) en curado en agua ($C = 0,880$; $Q = 0,849$) como se puede ver en las figuras 6 y 7. En ambos casos las mezclas ganadoras combinan CEM II/A-L 42,5R con arcilla expandida, mientras que las series con EPS y corcho obtuvieron las puntuaciones más bajas, resultando viable únicamente cuando la reducción de peso es el criterio prioritario. Se asignaron pesos iguales del 25% a cada criterio y se fijó $\lambda=0,5$ para WASPAS.

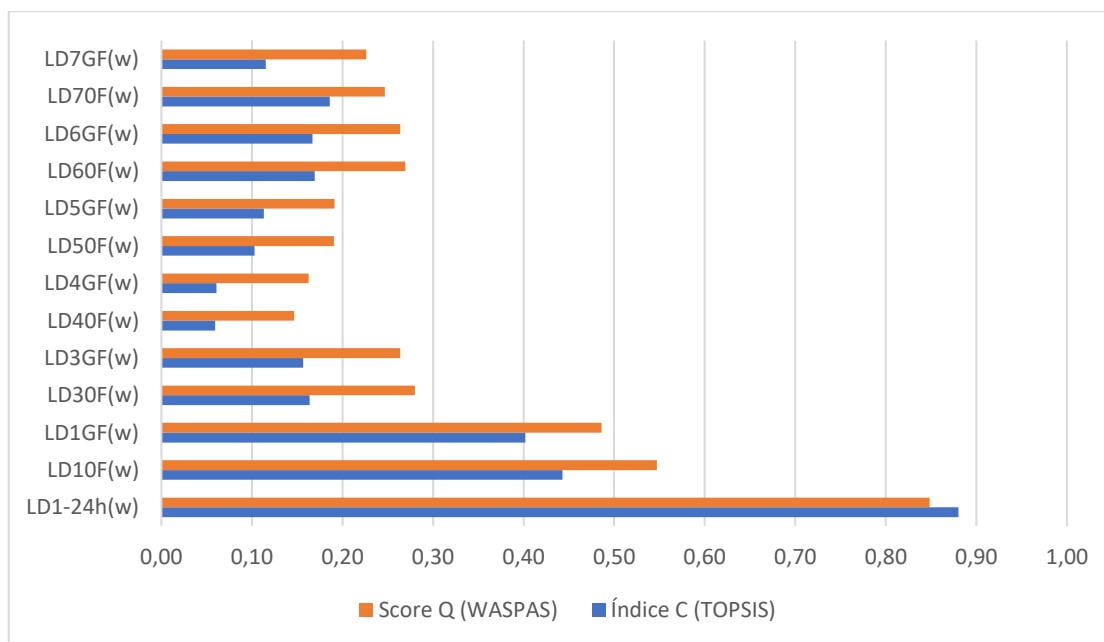


Figura 7. Resumen TOPSIS y WASPAS - Dosificaciones de mortero curado al agua (w).

4 Conclusión

Este trabajo presenta una metodología integral para la reproducción de esculturas patrimoniales mediante encofrado de PLA impreso en 3D y morteros de baja densidad, demostrando su viabilidad técnica desde la digitalización hasta la verificación geométrica de la réplica.

En la Fase I, el análisis de 16 dosificaciones de mortero de cal NHL 3,5 evidenció que los áridos ligeros reducen significativamente la densidad ($461-1.137 \text{ kg/m}^3$ frente a $800-1.766 \text{ kg/m}^3$ en mezclas convencionales), con el consiguiente descenso en resistencia a compresión. La aplicación conjunta de TOPSIS y WASPAS identificó la mezcla M5 como dosificación óptima (Score WASPAS = $0,771$; Índice C TOPSIS = $0,758$), con $f_c = 19,2 \text{ MPa}$ a 28 días y tenacidad de $675,7 \text{ N}\cdot\text{mm}$. El análisis colorimétrico confirmó la viabilidad del ajuste cromático mediante pigmento, con $\Delta E^*_{ab} \leq 1,0$ en las mezclas M12 y M16.

En la Fase II, las mezclas con CEM II/A-L 42,5R y curado en agua ofrecieron las mejores prestaciones mecánicas ($f_c = 36,1 \text{ MPa}$; tenacidad = $8.387,21 \text{ N}\cdot\text{mm}$), mientras que las series con corcho y EPS ($630-924 \text{ kg/m}^3$) son alternativas viables cuando la reducción de peso es prioritaria. El yeso resultó incompatible con estas formulaciones ligeras. El curado en agua mejoró consistentemente las propiedades mecánicas en las mezclas de cemento (CEM II), mientras que en las series de NHL 3,5 el curado al aire resultó más favorable. Por su parte, la Cal HL5 presentó

mejores resistencias mecánicas que la NHL 3,5, ofreciendo además un acabado más blanco, lo que la posiciona como una alternativa de interés estético y estructural dentro de las formulaciones ligeras.

El encofrado de PLA permitió obtener una réplica geoméricamente fiel al modelo digitalizado, con acabado superficial ajustado coloriméricamente, validando la metodología propuesta. La integración de la digitalización 3D, la impresión FDM y los morteros de baja densidad constituye un enfoque técnicamente viable para intervenciones de restauración en patrimonio edificado. Como trabajo futuro, se prevé el análisis de sistemas de anclaje en morteros integrados mediante fabricación aditiva.

Referencias

- [1] R. Liu, W. Gao, and F. Yang, “Authenticity, Integrity, and Cultural–Ecological Adaptability in Heritage Conservation: A Practical Framework for Historic Urban Areas—A Case Study of Yicheng Ancient City, China,” *Buildings*, vol. 15, no. 8, Apr. 2025, doi: 10.3390/buildings15081304.
- [2] B. Klimek and M. Grzegorzczak-Frańczak, “Properties of mortars with recycled stone aggregate for the reconstruction of sandstone in historic buildings,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 3, pp. 1–15, Feb. 2021, doi: 10.3390/su13031386.
- [3] J. Xu, L. Ding, and P. E. D. Love, “Digital reproduction of historical building ornamental components: From 3D scanning to 3D printing,” *Autom. Constr.*, vol. 76, pp. 85–96, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.autcon.2017.01.010.
- [4] M. Higuera, A. I. Calero, and F. J. Collado-Montero, “Digital 3D modeling using photogrammetry and 3D printing applied to the restoration of a Hispano-Roman architectural ornament,” *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, vol. 20, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.daach.2021.e00179.
- [5] Z. Pavlík *et al.*, “Lightweight pumice mortars for repair of historic buildings –Assessment of physical parameters, engineering properties and durability,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 404, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133275.
- [6] S. Morena, S. Barba, and A. Álvaro-Tordesillas, “Shining 3D EinScan-Pro, application and validation in the field of cultural heritage, from the Chillida-Leku museum to the archaeological museum of Sarno,” *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, pp. 135–142. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W18-135-2019.
- [7] Y. Govaerts, W. Meulebroeck, A. Verdonck, and M. De Bouw, “Measuring the colour of rendering mortars,” *The International Society for Optical Engineering*, 2014, doi: 10.1117/12.2052309.
- [8] “UNE-EN 1015-3 - Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table),” 2000. [Online]. Available: www.aenor.es
- [9] “UNE-EN_196-1=2018(EN) - Methods of testing cement Part 1: Determination of strength”.
- [10] S. Praveenkumar and G. Sankarasubramanian, “Optimization of mix proportions for high performance concrete using TOPSIS method,” *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, vol. 6, no. 1, Dec. 2021, doi: 10.1007/s41024-021-00135-0.
- [11] E. K. Zavadskas, “Optimization of Weighted Aggregated Sum Product Assessment,” 2012. doi: <https://doi.org/10.5755/j01.eee.122.6.1810>.