

REPLICACIÓN SOSTENIBLE DE ELEMENTOS ORNAMENTALES EN PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO MEDIANTE INTEGRACIÓN DE BIM, FABRICACIÓN ADITIVA Y MORTEROS DE CAL HIDRÁULICA NATURAL REFORZADOS CON FIBRAS NATURALES

Gaspar Carrasco-Huertas¹, Eugenio Navarro¹

¹ TESELA, Materiales Innovación y Patrimonio S.L., Granada, España, gasparcarrasco@teselainnova.com; eugenionavarro@teselainnova.com

Resumen

La rehabilitación del patrimonio arquitectónico plantea la necesidad de reproducir elementos ornamentales perdidos o deteriorados mediante soluciones que garanticen la compatibilidad material, la legibilidad histórica y la sostenibilidad de la intervención. En este contexto, el presente trabajo expone la adaptación técnica del proyecto HERIFIX3D, orientado al desarrollo de una metodología integrada para la reproducción de elementos patrimoniales a partir de digitalización 3D, modelado BIM, fabricación aditiva de moldes y formulaciones de mortero de cal hidráulica natural reforzadas con fibras vegetales. La metodología combinó la captura geométrica de elementos reales, el procesamiento de nubes de puntos y mallas, la corrección digital de defectos de escaneo y de daños no atribuibles a la lectura artística original, el diseño de moldes negativos impresos en 3D y el colado de morteros compatibles con aplicaciones patrimoniales. De forma complementaria, se desarrollaron y evaluaron distintas formulaciones de morteros de base cal para su empleo en pruebas de reproducción. El flujo de trabajo se validó inicialmente sobre un bolardo histórico del Puente de Toledo, en Madrid, disponible en repositorios digitales, y posteriormente mediante una aplicación de campo sobre un elemento real: los leones rampantes con escudos de la ciudad situados en la plaza de Santo Domingo de Granada. Los resultados evidencian que la digitalización 3D adquiere valor operativo cuando se integra con criterios materiales y procesos de fabricación, al reducir iteraciones físicas, mejorar la trazabilidad, favorecer la producción localizada y permitir la obtención de réplicas ligeras, precisas y materialmente compatibles. Se concluye que HERIFIX3D constituye una metodología transferible para restauración patrimonial, especialmente aplicable en pymes y talleres que requieren soluciones sostenibles, reproducibles y técnicamente documentadas.

Palabras Clave: Patrimonio; Digitalización 3D; Fabricación aditiva; Restauración sostenible.

1 Introducción

La conservación del patrimonio arquitectónico requiere el desarrollo de soluciones técnicas que permitan reproducir elementos perdidos, deteriorados o funcionalmente comprometidos sin alterar la autenticidad material, visual y constructiva del bien intervenido. Esta necesidad resulta especialmente relevante en elementos ornamentales de fachada, molduras, piezas escultóricas, remates, balaustradas y otros componentes singulares, cuya geometría suele presentar elevada complejidad y cuya integración en soportes históricos exige criterios estrictos de compatibilidad. En este contexto, la sustitución o reposición de un elemento patrimonial no puede abordarse únicamente como un proceso de reproducción geométrica. El nuevo componente debe responder a criterios de compatibilidad mecánica, fisico-química, mineralógica e higrótérmica con el soporte original y con las condiciones ambientales de exposición. La utilización de materiales excesivamente rígidos, densos o con baja permeabilidad al vapor de agua puede inducir procesos de degradación asociados a fisuración,

acumulación de humedad, cristalización de sales, incompatibilidad capilar o pérdida de transpirabilidad del sistema constructivo.

Por ello, los morteros formulados a partir de cal aérea o cal hidráulica natural presentan un interés particular frente a soluciones cementicias convencionales, siempre que sus propiedades se ajusten tanto al proceso de fabricación como al uso previsto en obra [1]. A la complejidad material se suma una limitación operativa creciente: la pérdida progresiva de oficios especializados capaces de reproducir manualmente elementos ornamentales complejos con precisión geométrica, trazabilidad técnica y tiempos de ejecución compatibles con las necesidades actuales de intervención. En este escenario, la digitalización 3D, el modelado BIM y la fabricación aditiva constituyen herramientas de alto potencial, siempre que se integren dentro de un flujo de trabajo orientado no solo a la generación de modelos digitales, sino también a la obtención de moldes, réplicas y componentes verificables desde el punto de vista geométrico, material y funcional.

El proyecto europeo HERIFIX3D, cofinanciado por la Unión Europea en el marco de la convocatoria DREAM (Digital Resilient Europe for Advanced Manufacturing, G.A. No. 101074436), responde a esta problemática mediante una metodología integrada que combina digitalización 3D, procesado y reintegración volumétrica de modelos, fabricación aditiva de moldes y desarrollo de morteros de cal hidráulica natural reforzados con fibras vegetales. La propuesta se sitúa en la intersección entre la restauración patrimonial, la ciencia de materiales y la construcción digital, con una orientación aplicada hacia pymes, talleres de restauración y fabricantes de morteros especiales.

2 Objetivos y enfoque de innovación

A partir de este planteamiento, el objetivo general del trabajo fue desarrollar y presentar una metodología sostenible para la reproducción de elementos ornamentales aplicados al patrimonio arquitectónico, basada en la integración de tres bloques tecnológicos complementarios: la captura y el procesamiento digital de geometrías patrimoniales, la fabricación aditiva de moldes negativos y la formulación de eco-morteros compatibles reforzados con fibras naturales.

Para alcanzar este objetivo, el trabajo se estructuró en torno a varias líneas de actuación. En primer lugar, se desarrollaron formulaciones de mortero de cal hidráulica natural incorporando fibras de algodón reciclado y cáñamo como refuerzo. En segundo lugar, se evaluaron sus propiedades en estado fresco y endurecido mediante procedimientos normalizados y criterios de compatibilidad patrimonial. Paralelamente, se generaron modelos digitales corregidos a partir de técnicas de escaneo 3D y/o fotogrametría, con el fin de obtener geometrías aptas para su transformación en moldes negativos. Estos moldes fueron posteriormente diseñados y fabricados mediante impresión 3D, permitiendo validar la reproducción física de elementos patrimoniales reales mediante el colado de los morteros desarrollados. El enfoque innovador de la propuesta reside en considerar la digitalización no como un fin autónomo, sino como una herramienta habilitadora dentro de un flujo de trabajo integral que conecta el dato geométrico con la fabricación material de la réplica. Desde esta perspectiva, la información digital deja de tener un valor exclusivamente documental o visual y pasa a convertirse en un recurso operativo para la toma de decisiones técnicas. Esta aproximación permite reducir el número de iteraciones manuales, minimizar el desperdicio de material, documentar los criterios de reintegración volumétrica y favorecer modelos de producción más localizados, flexibles y adaptables a las particularidades de cada intervención patrimonial.

3 Materiales y métodos

3.1 Flujo digital y fabricación aditiva

El flujo digital, resumido en la Tabla 1 y contextualizado en la Figura 1, se estructuró en cinco etapas: captura geométrica, análisis y reparación de malla, reintegración o corrección volumétrica, diseño de molde negativo y fabricación aditiva. El primer caso de validación se realizó sobre un modelo digital de un bolardo del Puente de Toledo, Madrid, procedente de una biblioteca de patrimonio abierta. Posteriormente, el flujo se aplicó a un elemento real digitalizado en Granada, los leones rampantes con escudos de la ciudad, situados en el entorno del Realejo. La captura del elemento real se realizó mediante escáner láser FARO X Focus3D X HDR, generando una nube de puntos y archivos de malla en formatos interoperables como STL, OBJ y FBX. El procesamiento posterior incluyó análisis de integridad de malla, corrección de orientación en el sistema cartesiano, eliminación de fondo o elementos no deseados, regeneración de malla, suavizado de superficies, reparación de aristas y corrección de defectos no artísticos. Este tratamiento fue necesario para convertir un modelo capturado en campo en una geometría útil para fabricación [1].

Tabla 1. Cadena metodológica de HERIFIX3D y salida técnica de cada fase.

Fase	Operación	Resultado esperado	Impacto en construcción
1	Escaneado 3D o fotogrametría del artefacto	Nube de puntos y malla inicial	Documentación geométrica del estado real.
2	Corrección de malla, orientación y limpieza	Modelo 3D procesable	Reducción de errores antes de fabricar.
3	Reintegración volumétrica y diseño del negativo	Molde digital	Decisión trazable sobre zonas reproducidas.
4	Impresión 3D del molde	Plantilla física personalizada	Disminución de trabajo manual e iteraciones
5	Colado del mortero compatible	Réplica ornamental	Componente sostenible y verificable.

3.2 Materias primas y criterios de selección para una replicación sostenible

Para llevar a cabo una restauración de los elementos ornamentales se realizaron diferentes formulaciones de morteros. Las materias primas de dichas formulaciones se seleccionaron considerando compatibilidad con patrimonio, disponibilidad comercial, comportamiento reológico y potencial de reducción de impacto ambiental. Como ligantes se emplearon cal hidráulica natural NHL5 y silicato cálcico procedente de cuarzo natural y cal. Como áridos y finos se utilizaron filler calizo y polvo de mármol, buscando una matriz mineral congruente con materiales históricos y con granulometría adecuada para reproducir detalles finos. El refuerzo fibroso se basó en fibras naturales y subproductos textiles: algodón reciclado y fibras de cáñamo enriado con diferentes longitudes. La incorporación de fibras se orientó a mejorar la cohesión, controlar la fisuración, modular la densidad y facilitar la fabricación de réplicas más ligeras. Como aditivos se emplearon celulosa para retención de agua y trabajabilidad, agentes aireantes y aditivos reológicos basados en atapulgita, con el fin de controlar consistencia, tixotropía y estabilidad de la mezcla. Finalmente, la caracterización de materias primas y de elementos replicados incluyó técnicas mineralógicas, microestructurales y granulométricas. En el proyecto se emplearon difracción de rayos X, microscopía electrónica de

barrido con microanálisis y granulometría láser, lo que permitió evaluar fases minerales, morfología y distribución de tamaños de partícula antes de ajustar las formulaciones.

3.3 Desarrollo de formulaciones de mortero

El desarrollo de formulaciones de morteros se realizó de manera iterativa en la que se modificaron el tipo y la proporción de fibra, el contenido de agua, los aditivos reológicos y la relación entre ligante y fracción fina. Se generaron un total de 14 dosificaciones, incluyendo variantes con algodón reciclado y cáñamo. En lo relativo del proceso de mezclado, las formulaciones se prepararon mediante amasado mecánico hasta alcanzar homogeneidad. Las muestras se curaron en condiciones ambientales de laboratorio, con temperatura aproximada de 25 ± 3 °C y humedad relativa de 40 ± 5 %. La consistencia se evaluó conforme a UNE-EN 1015-3, la densidad en fresco conforme a UNE-EN 1015-6, la densidad endurecida conforme a UNE-EN 1015-7 y la resistencia a flexión y compresión conforme a UNE-EN 1015-11. El desmoldeo de probetas se realizó tomando como referencia el procedimiento EN 196-1 [2-6].

Una vez realizadas las diferentes formulaciones, las cuatro con mayor potencial (P1, P2, P3 y P4) se seleccionaron para ensayos de reproducción por su equilibrio entre trabajabilidad, densidad y resistencia a compresión [1] (véase Tabla 2).

Tabla 2. Síntesis de formulaciones seleccionadas para reproducción.

Form.	Refuerzo fibroso principal	Cons. (cm)	Dens. fresca (g/cm ³)	Compresión 28 días (MPa)	Dens. endurecida (g/cm ³)
P1	Algodón reciclado 80 % HT	156	1,88	2,60	1,60
P2	Cáñamo < 1 mm	150	1,83	2,20	1,50
P3	Cáñamo < 1 mm	149	1,80	3,40	1,50
P4	Cáñamo < 1 mm	157	1,84	4,30	1,50

4 Resultados y discusión

4.1 Compatibilidad material y comportamiento de las formulaciones

Los resultados obtenidos muestran que la incorporación de fibras naturales permite modular la respuesta del mortero sin perder la lógica de compatibilidad patrimonial. La formulación P1, basada en algodón reciclado, mantuvo una densidad fresca próxima a 1,88 g/cm³ y una resistencia a compresión a 28 días de 2,60 MPa. Las formulaciones con cáñamo permitieron obtener densidades endurecidas próximas a 1,50 g/cm³, con mejoras de resistencia en P4 y P3. En particular, P4 alcanzó 4,30 MPa a 28 días, valor relevante para elementos ornamentales no estructurales sometidos a manipulación, desmoldeo y colocación. La interpretación de estos valores debe hacerse desde los requisitos de restauración. El objetivo no es maximizar resistencia como en un componente estructural convencional, sino equilibrar resistencia suficiente, baja fisuración, trabajabilidad, transpirabilidad, compatibilidad mineral y capacidad de reproducir geometrías complejas. Desde esta perspectiva, la selección de cuatro formulaciones permitió cubrir un rango razonable de prestaciones para colado en moldes impresos.

4.2 Procesamiento de modelos digitales

El procesamiento del bolardo del Puente de Toledo permitió validar el flujo digital en un entorno controlado. El archivo inicial presentaba problemas de integridad de malla que requirieron análisis, orientación, eliminación de fondo, truncado y regeneración. La malla original, con 225.258 caras y 112.629 vértices, fue regenerada hasta obtener una malla uniforme de 713.196 caras y 356.598 vértices, apta para posteriores manipulaciones y diseño del molde. La Figura 2 sintetiza las operaciones de orientación, limpieza, regeneración y análisis de curvatura empleadas para preparar la geometría fabricable.

El caso de los leones del Realejo demostró una complejidad superior, propia de un artefacto real escaneado in situ. El modelo presentaba defectos derivados de la captura, presencia de fondo, zonas abiertas, caras degeneradas y elevado peso geométrico. El informe final registró más de 10.000 defectos iniciales y una malla de más de 2,5 millones de caras. Tras reexportación, decimación automatizada y reparación, se obtuvo un modelo con menor número de incidencias y posteriormente una malla regenerada con más de 7 millones de facetas, apta para manipulación fina. El estado del elemento original, la referencia restaurada y las operaciones digitales de análisis y reintegración se resumen en la Figura 3.

Estos resultados confirman que la digitalización útil para construcción no consiste únicamente en escanear. La etapa crítica es transformar datos geométricos imperfectos en información fabricable. Para ello se requieren criterios técnicos sobre qué defectos corregir, qué huellas conservar, cómo separar el elemento del entorno y cuándo una intervención debe pasar de reparación automática a remodelado por un especialista 3D o restaurador digital.

4.3 Fabricación de moldes y réplicas físicas

A partir del modelo optimizado del bolardo se imprimieron moldes negativos en PLA, que posteriormente fueron empleados para colar las formulaciones P1, P2, P3 y P4. Las primeras pruebas evidenciaron un problema de adhesión entre el mortero y el molde impreso, lo que generó defectos en algunas zonas durante el desmoldeo. Este problema se resolvió mediante la aplicación de aceites o agentes desmoldeantes sobre el molde, obteniéndose réplicas con menor número de defectos. Este resultado tiene importancia industrial porque muestra que la validez de la metodología depende de la interacción entre geometría, material y proceso. La orientación del molde, el acabado superficial del polímero impreso, la reología del mortero, el tiempo de desmoldeo y el tratamiento antiadherente condicionan la calidad final tanto como la precisión del modelo digital. Por tanto, la fabricación aditiva aporta impacto real cuando se integra con decisiones materiales y de control de proceso. La Figura 4 recoge la fabricación de los moldes, el ensayo de colado y el problema de adhesión observado antes de aplicar agentes desmoldeantes.

5 Digitalización con impacto real en la construcción

La contribución principal de HERIFIX3D a la mesa de digitalización reside en la demostración de una cadena completa: elemento patrimonial, dato digital, modelo corregido, molde impreso, mortero compatible, réplica física y documentación técnica. Esta cadena conecta el mundo digital con el material y con la ejecución, evitando que la digitalización se limite a una representación visual.

Desde la perspectiva de sostenibilidad, el enfoque permite minimizar residuos al reducir el número de modelos manuales desechados, optimizar diseños en función de la geometría y del comportamiento del

mortero, producir moldes y réplicas de forma localizada, disminuir el transporte de elementos pesados y generar componentes potencialmente más ligeros. Además, la documentación digital facilita trazabilidad de la intervención: origen del modelo, correcciones aplicadas, formulación empleada, parámetros de fabricación, curado, incidencias y ubicación final.

El potencial de integración con BIM es especialmente relevante. En este contexto, BIM no debe entenderse solo como un modelo tridimensional del edificio, sino como un contenedor de información sobre el elemento restaurado. El modelo puede registrar la geometría original, las zonas corregidas, la formulación del mortero, el lote de fabricación, los ensayos realizados y las condiciones de colocación. Esta trazabilidad mejora la transparencia de la intervención y facilita el mantenimiento posterior. La Tabla 3 resume el impacto de esta integración digital-material en el proceso de intervención patrimonial.

Tabla 3. Impacto real de la integración digital-material en HERIFIX3D.

Ámbito	Contribución de la metodología	Resultado esperado
Diseño	Uso de escaneado, malla corregida y reintegración volumétrica	Geometrías más precisas y decisiones documentadas
Fabricación	Moldes impresos en 3D adaptados a cada pieza	Menos iteraciones manuales y menor desperdicio
Material	Morteros NHL con fibras naturales y aditivos reológicos	Compatibilidad patrimonial y piezas más ligeras
Obra	Producción localizada y adaptación a artefactos concretos	Menor transporte y mayor flexibilidad de intervención
Gestión	Vinculación a BIM o gemelo digital patrimonial	Trazabilidad y mantenimiento futuro

6 Limitaciones y trabajo futuro

El desarrollo del proyecto permitió identificar una serie de limitaciones técnicas asociadas tanto al flujo digital como a la fabricación física de las réplicas. Una de las principales limitaciones se relaciona con el procesamiento de mallas procedentes de escaneados reales. En geometrías complejas, con elevada densidad de facetas, o en modelos que presentan discontinuidades, oclusiones, ruidos superficial o defectos de captura, las operaciones de limpieza, reparación y optimización pueden requerir tiempos de procesamiento elevados y el empleo de herramientas específicas de edición geométrica. Asimismo, la reintegración digital de elementos patrimoniales degradados exige un criterio técnico especializado para diferenciar entre alteraciones que deben corregirse y rasgos históricos, constructivos o artísticos que deben conservarse. En piezas con elevado grado de pérdida volumétrica o deformación, la reconstrucción de zonas faltantes no puede resolverse únicamente mediante algoritmos automáticos, sino que requiere la intervención coordinada de especialistas en modelado 3D, restauración y lectura material del bien.

Otra limitación relevante se asocia a la interacción entre el mortero y el molde impreso. Los ensayos realizados evidenciaron la necesidad de controlar variables como el tipo y dosificación de desmoldeante, la rugosidad derivada de la textura de impresión, la orientación del molde, la geometría de partición, los tiempos de fraguado, la retracción y la resistencia inicial del mortero durante el desmoldeo. En trabajos futuros será necesario profundizar en la selección de polímeros de impresión,

tratamientos superficiales del molde, sistemas de desmoldeo y estrategias de fabricación modular para geometrías de mayor complejidad formal. Desde el punto de vista de la validación prestacional, la transferencia de la metodología a entornos reales requerirá ampliar la evaluación mediante ensayos de durabilidad, envejecimiento acelerado, compatibilidad con soportes históricos, permeabilidad al vapor de agua, absorción capilar, comportamiento frente a sales y estabilidad dimensional. Igualmente, será necesario desarrollar campañas de validación con restauradores, administraciones públicas, fabricantes de morteros especiales y empresas de intervención patrimonial. El proyecto alcanzó un nivel de demostración próximo a TRL 6, por lo que las siguientes fases deberán orientarse a la fabricación de prototipos en entorno operativo, la validación en casos reales de intervención y la definición de acuerdos de explotación con agentes del sector patrimonial.

7 Conclusiones

Los resultados del proyecto HERIFIX3D mostraron que la digitalización aplicada al patrimonio arquitectónico adquiere valor técnico cuando se integra dentro de una cadena completa de fabricación, validación material y control geométrico. La metodología desarrollada permitió vincular la captura digital de elementos ornamentales con el diseño de moldes negativos, la fabricación aditiva y el colado de morteros de cal hidráulica natural reforzados con fibras vegetales, obteniendo réplicas físicas compatibles con criterios de intervención patrimonial.

Uno de los aspectos más relevantes del flujo propuesto es la transformación del modelo digital en un recurso operativo de fabricación. La geometría capturada no se limita a una representación documental del elemento, sino que se procesa, corrige y adapta para generar un molde físico, a partir del cual se obtiene una pieza material. Esta continuidad entre dato geométrico, molde y réplica permite reducir iteraciones manuales, minimizar pérdidas de material, mejorar la trazabilidad de las decisiones de reintegración y facilitar procesos de producción localizada ajustados a las condiciones específicas de cada intervención.

La validación realizada sobre bienes patrimoniales reales permitió identificar las principales etapas críticas del procedimiento. Entre ellas destacan la calidad de la captura geométrica, la limpieza y corrección de mallas, la eliminación de fondos y artefactos digitales, la regeneración controlada de zonas perdidas o deterioradas, el diseño del sistema de moldeo y el control del desmoldeo en función de la geometría y de las propiedades del mortero empleado. Estos factores condicionan directamente la viabilidad de transformar datos digitales en componentes patrimoniales funcionales y reproducibles.

Finalmente, desde una perspectiva técnico-aplicada, el proyecto HERIFIX3D evidencia que la innovación en restauración patrimonial no depende únicamente del grado de sofisticación tecnológica, sino de la capacidad del proceso para mejorar la compatibilidad material, la precisión geométrica, la trazabilidad documental y la transferencia al tejido productivo, configurando un procedimiento replicable y exportable para pymes, talleres de restauración, fabricantes de materiales especiales y administraciones responsables de la conservación del patrimonio arquitectónico.

8 Figuras

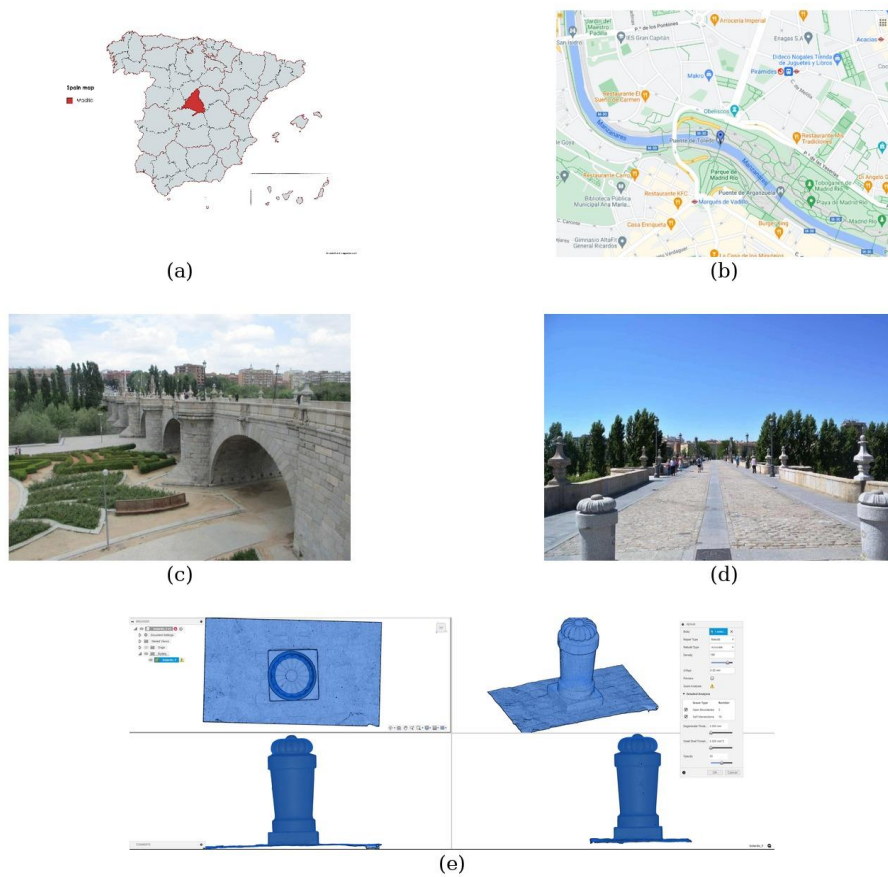


Figura 1. Contexto geográfico y digital del bolardo del Puente de Toledo: (a) ubicación de Madrid en España; (b) localización del Puente de Toledo; (c) vista general del puente; (d) detalle del bolardo; (e) modelo 3D disponible en repositorio abierto.

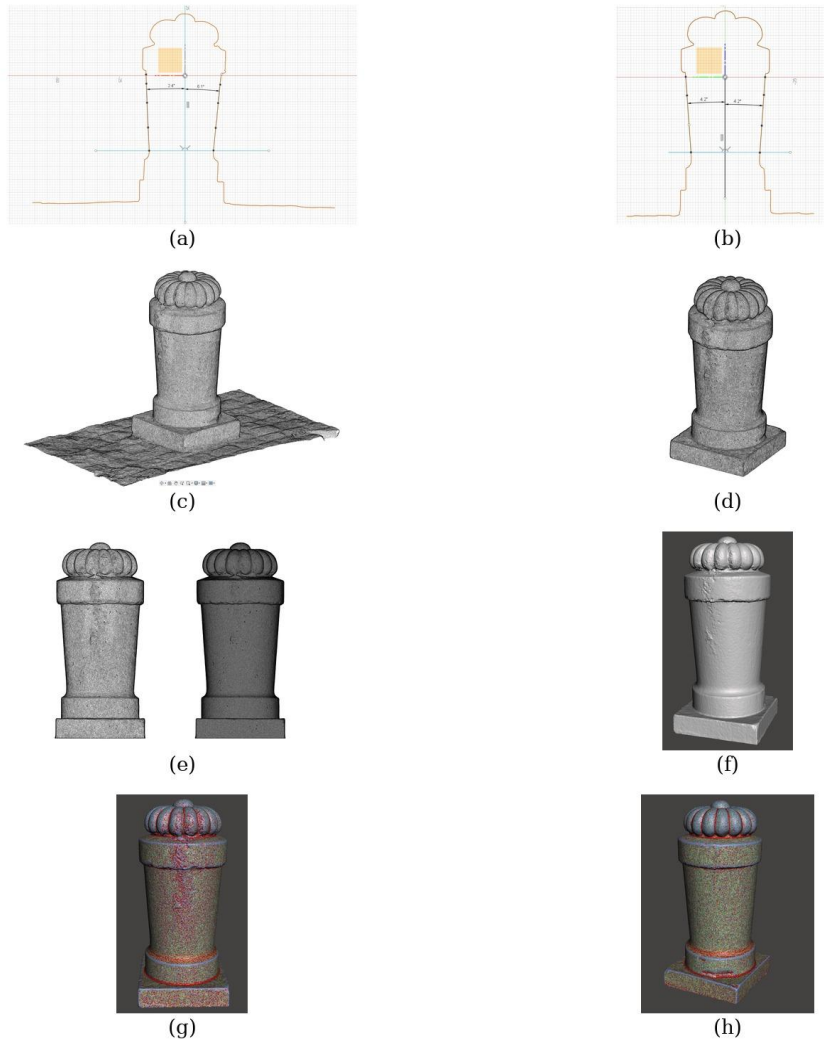


Figura 2. Procesamiento digital del bolardo: (a) orientación inicial; (b) orientación corregida; (c) modelo con fondo; (d) modelo sin fondo; (e) malla importada; (f) malla regenerada; (g) análisis de curvatura gaussiana; (h) análisis de curvatura media.



(a)



(b)



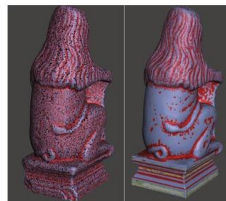
(c)



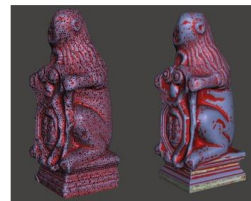
(d)



(e)



(f)



(g)

Figura 3. Caso de los leones rampantes con escudos de la ciudad de Granada: (a-b) estado en el entorno del Realejo antes de la intervención; (c-d) referencias restauradas en el Puente Romano sobre el río Genil; (e) análisis de curvatura; (f-g) comparación entre modelo original y modelo modificado.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4. Fabricación física de la réplica del bolardo: (a) moldes impresos en 3D; (b) molde ensamblado; (c) ensayo de colado; (d-e) adherencia del mortero al molde antes de aplicar agentes desmoldeantes.

9 Referencias

- [1] TESELA. (2023). HERIFIX3D Application DREAM Open Call.
- [2] UNE-EN 1015-3. Métodos de ensayo de morteros para albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco.
- [3] UNE-EN 1015-6. Métodos de ensayo de morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco.
- [4] UNE-EN 1015-7. Métodos de ensayo de morteros para albañilería. Parte 7: Determinación de la densidad aparente del mortero endurecido.
- [5] UNE-EN 1015-11. Métodos de ensayo de morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido.
- [6] EN 196-1. Methods of testing cement. Part 1: Determination of strength.