

# UTILIZACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS LÁSER 3D EN LOS TRABAJOS DE RESTAURACIÓN DE LA SALA DE LOS REYES

USE OF 3D LASER TECHNOLOGIES IN THE  
RESTORATION WORK OF THE HALL OF THE KINGS

PEDRO CANO OLIVARES

pcano@ugr.es

JUAN CARLOS TORRES CANTERO

jctorres@ugr.es

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN INFORMÁTICA GRÁFICA  
Y REALIDAD VIRTUAL DE LA UNIVERSIDAD DE GRANADA

---

**RESUMEN** Para proteger las bóvedas de piel durante el proceso de restauración se utilizaron contraformas colocadas bajo las bóvedas. Para construir estas contraformas se han escaneado las bóvedas usando un escáner láser.

El resultado del proceso de escaneado se ha limpiado para eliminar las estructuras ajenas a la bóveda. El modelo resultante se ha simplificado y se le ha reducido el ruido. La superficie de la bóveda en este modelo se ha desplazado para dejar espacio para una fina capa de espuma de poliuretano que amortigua el contacto entre la contraforma y la bóveda.

Para insertar el soporte en la bóveda y asegurar un contacto correcto además ha sido necesario descomponer las contraformas en once piezas.

Los modelos 3D de las piezas se han utilizado para fabricar las contraformas en poliestireno expandido, utilizando mecanizados con sistemas de control numérico, que han servido para sustentar las bóvedas durante el proceso de restauración.

Este artículo describe el proceso seguido desde la toma de datos hasta la colocación de las contraformas, haciendo énfasis en la metodología de digitalización y procesamiento de los datos generados por el escáner.

**PALABRAS CLAVE** Escáner 3D, Restauración, Impresión 3D, Alhambra, Sala de los Reyes

**ABSTRACT** Counterforms placed under the vaults were used to protect the leather vaults during the restoration process. To build these counterforms, the vaults have been scanned using a laser scanner.

The data generated by the scanner has been cleaned to remove non-vault structures. The resulting model has been simplified and its noise has been reduced. The surface of the vault in this model has been moved to make room for a thin layer of polyurethane foam that cushions the contact between the counterform and the vault.

In order to insert the support into the vault and ensure correct contact, it has also been necessary to break down the counterforms into eleven pieces.

The 3D models of the pieces have been used to manufacture the expanded polystyrene counterforms using numerical control machining systems. These counterforms have served to support the vaults during the restoration process.

This article describes the process followed from data collection to the placement of the counterforms, emphasizing the digitalization and processing methodology of the data generated by the scanner.

**KEYWORDS** 3D scanner, Restoration, 3D printing, Alhambra, Hall of the Kings

**COMO CITAR/ HOW TO CITE:** CANO OLIVARES, P., TORRES CANTERO, J.C., Utilización de las tecnologías láser 3D en los trabajos de restauración de la Sala de los Reyes, Cuadernos de la Alhambra, 2021, 50, pp. ISSN 0590-1987

La “Sala de los Reyes” es un conjunto de tres naves que se encuentran junto al Patio de los Leones en la Alhambra. Sus nombres proceden de los motivos de las pinturas que decoran el techo de la sala central. Los techos de las bóvedas están realizados sobre cuero sujeto por una estructura de madera y bambú. Este lugar fue usado para recepciones y como zona de descanso.

La estructura que soporta la superficie de cuero se había deteriorado. Para restaurarla es necesario sustituir los soportes de madera. Este proceso se debe realizar accediendo por el tejado, retirando para ello las cubiertas exteriores. Para evitar posibles desprendimientos de las bóvedas y golpes accidentales sobre las mismas que podrían dañar las pinturas, se propuso la fabricación de unas contraformas que sirvieran de apoyo a las bóvedas durante el tiempo en que no estaban protegidas por sus cubiertas.

Inicialmente esas contraformas se iban a construir de una forma totalmente artesanal, fabricando una serie de piezas de madera que, a modo de costillas, se adaptarían en distintas secciones de las bóvedas para formar un armazón de soporte. Esta alternativa, además de ser costosa era poco precisa<sup>1</sup>.

Analizando las diferentes posibilidades tecnológicas existentes en ese momento se optó por la construcción de unas contraformas en poliestireno expandido que se adaptaran a las bóvedas de forma exacta para facilitar una mejor sujeción. Para ello se requería digitalizar las bóvedas. Las técnicas de digitalización se han aplicado a patrimonio tanto mueble como inmueble con diferentes fines:

-Servir de documentación gráfica. El modelo digital proporciona una documentación precisa de la forma del elemento, que es especialmente valiosa cuando se va a realizar una intervención. Esta tecnología se usó para registrar el estado previo de las esculturas de los leones del Patio de los Leones antes de su restauración<sup>2</sup>.

-Difusión del patrimonio, generando imágenes, animación o visitas virtuales. Como ejemplo la digitalización de la Fuente de los Leones se ha utilizado para la creación de una aplicación de realidad virtual que permite comparar los leones y estudiar la

evolución de la fuente a lo largo del tiempo<sup>3</sup>.

-Maquetación física. Combinada con técnicas de impresión 3D permite generar replicas a escala o tamaño real de los elementos.

-Análisis. Es posible calcular propiedades físicas, o comparar el estado del elemento en dos momentos diferentes, por ejemplo antes y después de una intervención.

-Soporte de información. La mayor parte de la información relativa a los elementos patrimoniales está asociada a localizaciones en su superficie. El modelo digitalizado puede servir de soporte de un sistema de información 3D<sup>4</sup>, que se puede usar para registrar la información de las intervenciones realizadas en el elemento<sup>5</sup>.

En este trabajo la digitalización sirvió por un lado de documentación gráfica del estado de las bóvedas y sus soportes, y por otro para realizar una maqueta física, aunque no de las bóvedas si no del espacio debajo de ellas.

Para construir las contraformas era necesario generar un modelo tridimensional de cada bóveda para que permitiese construir la superficie de las contraformas con la forma exacta de cada bóveda. Este modelo se usó para modelar el espacio bajo la bóveda que debería ocupar la contraforma.

En este trabajo se describe el proceso seguido para digitalizar las bóvedas, y modelar y fabricar las contraformas. Este trabajo fue realizado dentro del contrato “Proyecto de restauración de las pinturas sobre piel de la Sala de los Reyes en el Palacio de los Leones de la Alhambra. Modelado en 3D de las bóvedas”, firmado entre el Patronato de la Alhambra y el Generalife y el Grupo de Investigación en Informática Gráfica de la Universidad del Granada, dirigido por el profesor de la Universidad de Granada D. Pedro Cano Olivares y coordinado por el Arquitecto jefe del servicio de conservación del patronato

1. GONZALEZ, María José; MONTERO, Araceli; BAGLIONI, Raniero. Las pinturas de la Sala de los Reyes de la Alhambra de Granada: un proyecto, un método, una intervención. Revista PH. Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico. N. 83. Octubre 2012. pp. 74-89

2. CANO, Pedro; LAMOLDA, Francisco; TORRES, Juan Carlos; VILLAFRANCA, María del Mar. Uso de escáner láser 3D para el registro del estado previo a la intervención de la Fuente de los Leones de La Alhambra. Virtual Archaeology Review. Vol 1 N. 2. pp. 89-94. Mayo 2010.

3. CANO, Pedro; GARCÍA, Manuel; TORRES, Juan Carlos; LAMOLDA, Francisco; PEREZ, Silvia. Interactive 3D Application for the multimedia valorization of the restoration process of the Fountain of the Lions of the Alhambra based on 3D laser scanner registration. En Digital Heritage 2015. International Congress on Digital Heritage – EXPO. IEEE.

4. LÓPEZ, Luis; TORRES, Juan Carlos; ARROYO, Germán; CANO, Pedro; MARTÍN, Domingo: An Efficient GPU Approach for Designing 3D Cultural Heritage Information Systems. Journal of Cultural Heritage. 2020. 41, pp.142-151.

5. TORRES, Juan Carlos; LÓPEZ, Luis; ROMO, Celia; ARROYO, Germán; CANO, Pedro; LAMOLDA, Francisco; VILLAFRANCA. Using a cultural heritage information system for the documentation of the restoration process. En: 2013 Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage). IEEE, 2013. p. 249-256.

de la Alhambra y del Generalife D. Francisco Lamolda Álvarez.

La siguiente sección describe brevemente la tecnología de digitalización e impresión utilizada. La sección 3 aborda la metodología utilizada en el proceso. Por último, la sección cuarta muestra los resultados obtenidos y las conclusiones de este trabajo.

## TECNOLOGÍA

Para la realización de este trabajo se combinaron dos tecnologías: la digitalización 3D con escáner láser y la impresión 3D. Ambas eran tecnologías emergentes en la época.

### Digitalización 3D

Un láser es un dispositivo que genera un haz de luz coherente (la relación de fase en el haz es constante). Si el medio en el que se transmite no es dispersivo, el haz viaja en línea recta permitiendo hacer corresponder la posición en la que incide el haz en el objeto con la dirección en que se ha emitido.

Los escáneres láser son dispositivos que envían un láser de baja intensidad al objeto y captan su reflejo usando un sensor óptico. Podemos distinguir dos tecnologías de escáner láser en función de como se realizan las medidas: tiempo de vuelo y triangulación, según el funcionamiento del sensor. El sensor puede usarse para medir el tiempo que tarda en viajar el láser, que es proporcional a la distancia, o el ángulo con el que llega el láser reflejado.

Los escáneres de tiempo de vuelo miden el tiempo que tarda en volver un pulso del haz láser reflejado por la superficie. Estos tiempos son muy pequeños (del orden de las milésimas de nanosegundo). Estos dispositivos tienen un alcance muy grande, que puede superar el kilómetro. Para conseguir captar una área extensa del objeto el dispositivo modifica el ángulo con el que emite el haz láser. Esto se puede hacer rotando la cabeza del escáner o utilizando espejos. Usualmente se rota la cabeza del escáner para modificar el ángulo respecto a la vertical y se utilizan espejos para modificar la inclinación. Algunos escáneres son capaces de recorrer todas las direcciones (salvo la zona que se encuentra debajo de él), capturando todo el espacio que rodea la posición en la que se encuentra. Como ejemplo, el escáner Callidus CP3200, utilizado en este trabajo, puede capturar 360° en horizontal y 140° en vertical.

Los escáneres del primer tipo se denominan de tiempo de vuelo, y se utilizan para digitalizar objetos a grandes distancias, desde unos metros hasta kilómetros.

Los escáneres de triangulación colocan el sensor en una posición distante del emisor, lo que les permite medir el

ángulo entre el haz incidente y el reflejado. Se utilizan para digitalizar objetos muy próximos, desde centímetros hasta unos pocos metros. La precisión de los escáneres de triangulación es mayor que la de los escáneres de tiempo de vuelo.

En cualquiera de los casos, el dispositivo devuelve las coordenadas de puntos de la superficie del objeto, usando la posición del escáner como origen de coordenadas. Con frecuencia, el dispositivo es capaz de realizar fotografías del objeto con lo que puede devolver, además de las coordenadas de los puntos, información de color. En algunos casos es también posible obtener información de la intensidad del láser reflejado, que es dependiente tanto de la distancia como de la reflectividad de la superficie.

Un aspecto a tener en cuenta al utilizar dispositivos láser es el nivel de protección necesario para utilizarlo. La norma UNE EN 60825-1/A2 establece siete clases de dispositivos láser en función de su peligrosidad, de las que solo los láser clase 1 son seguros en todas condiciones de utilización previsible, incluso cuando el haz incide en el ojo. Lo que, además de hacer más seguro su uso, permite utilizarlo en espacios con público sin necesidad de establecer un cordón de seguridad.

Independientemente de la tecnología usada, la digitalización implica una toma de datos del objeto (que se puede realizar tanto con un escáner láser como con otro tipo de tecnologías) y un procesamiento informático de los mismos, realizado con programas especiales.

La toma de datos que efectúa un escáner 3D es en esencia la realización de la medida de las posiciones de un conjunto denso de puntos de la superficie del objeto, referido habitualmente como nube de puntos. Dos de las características más importantes de un sistema de digitalización son el error en la medida de estos puntos y la densidad de puntos tomados sobre el modelo. El error de medida nos indica el margen de incertidumbre en las posiciones obtenidas, y es intrínseco al dispositivo de captura. La distancia entre muestras (relacionada con la densidad de muestreo, y referida habitualmente como resolución) nos indica cuál es el tamaño del menor detalle de la superficie que podemos capturar, depende del dispositivo, de la configuración usada y de la distancia a la que se encuentra el objeto.

En el proceso de captura es necesario registrar toda la superficie del objeto. En una toma del escáner solo tendremos las partes del elemento que sean visibles desde alguna de las posiciones en las que se haya colocado el escáner. Normalmente será necesario realizar varias tomas, bien moviendo el objeto o moviendo el escáner. En cada toma el escáner medirá posiciones de la superficie de objeto que es visible desde su posición,

estas posiciones estarán referidas a la posición en la que se encuentra el escáner en la toma.

El procesamiento informático genera un modelo 3D del objeto a partir de la nube de puntos. El modelo 3D es en esencia un conjunto de estructuras de datos que contienen la representación de la superficie del objeto. Esta información incluye normalmente tanto información geométrica (forma del objeto) como de color.

La estructura y complejidad del modelo geométrico dependerá de tipo de procesamiento que queramos hacer con ella, y determinará la complejidad del procesamiento a realizar para crearla. Necesitamos modelos mas simples para visualizar el objeto que para calcular su volumen.

En algunos casos el modelo puede ser simplemente un conjunto de puntos. En este caso el procesamiento se limita a fusionar las diferentes tomas que se hayan realizado del objeto.

Los modelos geométricos se pueden utilizar para:

- Visualizar el modelo: generando imágenes del mismo. La visualización puede tratar de ser lo mas parecida posible a una fotografía (visualización foto-realista) o tratar de ser parecida a un dibujo (visualización expresiva o no foto-realista).
- Generar animaciones: crear secuencias de animación por movimiento de cámara o modificación de elementos.
- Editar el modelo: realizar modificaciones en el modelo. Para, por ejemplo, hacer anastilosis o planificar procesos de restauración.
- Soporte de documentación: gestionar información del elemento asociada a la superficie del mismo.
- Calcular propiedades físicas: calcular peso, volumen, superficie, momento de inercia o centro de gravedad.
- Realizar copias físicas: utilización de técnicas de impresión 3D para realizar copias a tamaño real o a escala.

Tanto para realizar una impresión 3D del modelo como para realizar cálculos de propiedades es necesario que el modelo sea una malla de polígonos cerrada que no contenga autointersecciones. Una malla de polígonos es un conjunto de polígonos conectados que recubre la superficie exterior del objeto. Que sea cerrada implica que no existan fisuras en esta malla, de tal forma que no haya ningún camino que pase del interior al exterior sin cruzar la malla. La ausencia de autointersecciones implica que no haya dos triángulos de la malla que se intersecten. En conjunto estas propiedades son necesarias para poder orientar la malla, esto es, poder determinar cual es la cara interior y cual la exterior de la superficie. Una malla de este tipo se suele referir como un modelo sólido, ya que con ella podemos describir un sólido físico.

Las mallas generadas a partir de nubes de puntos de escáner láser están formadas solamente por triángulos. La creación de la malla a partir de la nube de puntos se realiza generando triángulos uniendo puntos próximos. Para poder comprobar que la malla es cerrada y permitir el cálculo de propiedades se deben almacenar, además de las coordenadas de los vértices, las relaciones de adyacencia entre los triángulos.

Una vez creada la malla es necesario comprobar si está cerrada, detectando y tapando posibles fisuras.

Por tanto, el proceso de digitalización, desde la captura hasta generación de la malla poligonal válida, se realiza habitualmente siguiendo los siguientes pasos<sup>6</sup>:

- Planificación de la captura, determinando el número de tomas necesarias y la posición del escáner para cada una de ellas. Cada zona de la superficie del objeto debe aparecer al menos en una toma, y cada toma debe tener una zona importante de solapamiento con el resto.
- Toma de datos. Se realiza una medida en cada una de las posiciones establecidas para el escáner, dando como resultado una nube de puntos para cada una.
- Fusión de las nubes de puntos. Se crea una única nube de puntos mezclando las distintas nubes de puntos. Para ello es necesario transformar las distintas nubes para colocarlas en el mismo sistema de coordenadas. La determinación de las transformaciones a aplicar se puede realizar identificando puntos que aparecen en diferentes tomas. En este proceso se pueden eliminar puntos duplicados, filtrar puntos demasiado próximos o filtrar el ruido generado por el error de medida del escáner.
- Este proceso se puede automatizar usando marcadores en las tomas.
- Generación de la malla de triángulos. Los puntos se unen de tres en tres formando triángulos que recubren la superficie del objeto.
- Detección y tapado de fisuras y autointersecciones. Parte del proceso se puede realizar automáticamente, pero la mayor parte de las fisuras deben de taparse de forma manual.

Estamos obviando aquí la captura del color, ya que en este trabajo no es relevante.

### Impresión 3D

La impresión 3D crea un objeto físico a partir de un modelo informático. En cierto modo es el proceso inverso a la

6. BERNARDINI, Fausto; RUSHMEIER, Holly. The 3D model acquisition pipeline. En Computer Graphics Forum. Oxford, UK: Blackwell Publishers Ltd, 2002. p. 149-172.

digitalización. Actualmente la impresión 3D se ha popularizado gracias al desarrollo de las impresoras 3D de filamento fundido. Estos dispositivos realizan una fabricación aditiva, en la que se va añadiendo material capa a capa para crear el objeto.

Esta tecnología no estaba disponible cuando se realizó el trabajo, y por otra parte no es fácil construir con ella objetos del tamaño necesario.

La alternativa es utilizar mecanización por Control Numérico (CNC) que realiza un proceso sustractivo, comenzando con un bloque de material del que se corta el material sobrante para crear el objeto. Para hacer esto, se usan cortadores y herramientas giratorias controladas por ordenador. Este sistema permite crear objetos con una gran tamaño y una alta precisión usando prácticamente cualquier tipo de material.

## METODOLOGÍA

La solución propuesta en este trabajo fue la creación de moldes de porexpán, impresos a partir de la digitalización de las bóvedas y colocarlos debajo de las mismas para conseguir un ajuste más exacto y un contacto continuo.

El porexpán, también conocido como poliestireno expandido (EPS), es un producto empleado habitualmente como protección en el embalado de productos delicados o como material de construcción. Entre sus características destaca el ser ligero, con gran resistencia a golpes e impactos, y no permitir el crecimiento de bacterias.

Por otra parte, el porexpán es rígido, por lo que su superficie de contacto es una superficie dura. Para facilitar un contacto suave con las bóvedas, las contraformas se recubren de una fina capa de espuma de poliuretano. La espuma de poliuretano es un material poroso y flexible que, al acolchar la contraforma, absorbe posibles vibraciones. Para que se pueda añadir esta capa de espuma es necesario que la superficie de las contraformas se contraiga dejando una pequeña holgura entre estas y la superficie de las bóvedas.

La superficie superior de las contraformas, que debe tener la forma de la bóveda, se obtiene por el proceso de digitalización. Para definir el resto de las superficies de la contraforma se debe añadir un plano inferior, que se debe colocar horizontal (independientemente de las deformaciones que tenga la contraforma) para facilitar su colocación, y planos laterales que no deben colisionar con las paredes de la sala.

Por otra parte, las dimensiones de la sala son menores que las de la propia bóveda, por lo que es necesario dividir la contraforma en varias piezas. Estas piezas se deben marcar en su superficie inferior para permitir su colocación en las posiciones correctas.

A continuación se describen en detalle los diferentes pasos del proceso.

## Digitalización

Para digitalizar las bóvedas se ha utilizado un escáner láser Callidus CP 3200, que es un escáner láser de tiempo de vuelo con un alcance máximo de 80 m, y una precisión de 5 mm equipado con una cámara digital integrada para la captura del color, que se controla desde un ordenador. Este escáner utiliza un láser de clase 1.

La cabeza del dispositivo está dotada de un sistema servoaccionado que le permite girar 360° en el plano horizontal en pasos de entre 0.0625° y 1.0°. Con la ayuda de un espejo giratorio, el rayo láser se dispersa en forma de abanico, cubriendo un área de 140° en el plano vertical. Esto le permite girar y recopilar automáticamente las coordenadas de los objetos circundantes con una velocidad de más de cien mil puntos por minuto. Las mediciones 3D se registran en la computadora de campo protegida Callidus LMS, que es parte del sistema.

Para registrar las contraformas se colocó el escáner, sin trípode, sobre el andamio colocado en la bóveda, tal como se muestra en la Il. 1. Para eliminar vibraciones y oclusiones durante la captura el ordenador de control se colocó en el suelo fuera del andamiaje. Las tomas se realizaron sin que hubiese ninguna persona sobre el andamio.

De cada bóveda se realizaron tres tomas una colocando el escáner en el centro de la bóveda y las otras dos colocándolo en los centros de los círculos descritos por los extremos de estas.



Il.1 El escáner se colocó sin trípode, depositado directamente sobre los andamios colocados en las bóvedas. Pedro Cano y Juan Carlos Torres. Año: 2007. © Patronato de la Alhambra y del Generalife

En los tres casos con el escáner sobre el andamio. Es necesario realizar las tres tomas, a pesar de tratarse de una superficie teóricamente simple, por las irregularidades y deformaciones que presentaban las contraformas, que hacían que en cada toma hubiese zonas que no se captaran. Estas irregularidades eran lo más importante en este proceso. No se captura el color en estas tomas ya que, por un lado, no es relevante en el proceso, y por otro las bóvedas estaban ya cubiertas de una capa de protección con lo que no se hubiera podido capturar el color de las pinturas. Por otra parte, capturar el color habría requerido utilizar iluminación artificial para asegurar un correcto funcionamiento de la cámara del escáner.

Cada toma contenía algo más de ochocientos mil puntos, con una distancia media entre puntos de 8 mm.

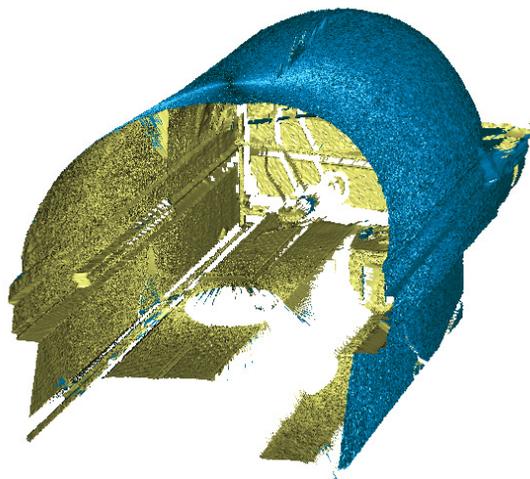
En cada una de estas tomas aparecen, además de la superficie de las bóvedas, todos los elementos que están presentes en la escena, como paredes, cornisa, telas y andamios.

#### Procesamiento de las nubes de puntos

Los datos obtenidos por el escáner, consistentes en un muestreo denso de puntos sobre las superficies visibles desde el escáner en cada toma. Estas nubes se procesan para fusionar las tres tomas realizadas de cada bóveda y se triangulan. Como resultado se obtiene una malla de triángulos que representa las superficies de todos los objetos que aparecen en la escena escaneada.

Para generar la malla se utilizó el software propio del escáner, junto con MeshLab<sup>7</sup> y programas desarrollados específicamente para el proyecto, siguiendo los siguientes pasos:

- Exportación de las nubes de puntos a archivos con formato ply, adecuados para su intercambio entre diferentes programas, permitiendo su procesamiento con software distinto al nativo del escáner.
- Alineación de las tres tomas, haciendo que las tres nubes de puntos estén en el mismo sistema de coordenadas. Para ello se transforman las dos tomas laterales al sistema de coordenadas de la toma central. Esta operación se realiza seleccionando puntos identificables en pares de tomas, y realizando posteriormente un ajuste iterativo minimizando la distancia entre las tres nubes.
- Se fusionaron las tres tomas generando una única. Como resultado se obtiene una única nube de puntos.



Il. 2. Sección del modelo 3D de una bóveda antes de eliminar las estructuras ajenas a la bóveda, en la que puede apreciarse el andamio. Pedro Cano y Juan Carlos Torres. Año: 2007. © Patronato de la Alhambra y del Generalife

-Generación de una malla de triángulos. Como resultado se obtiene una malla de triángulos de toda la escena.

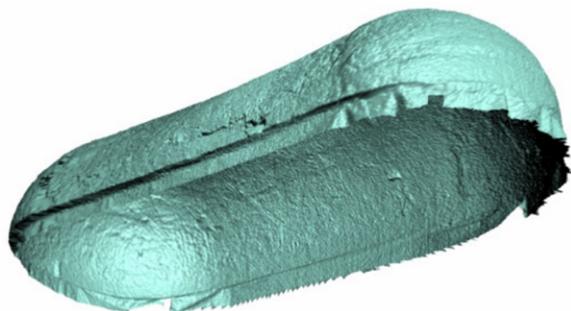
El modelo obtenido en este punto se debe limpiar para eliminar las estructuras ajenas a la bóveda (andamios de soporte, telas, etc.), dejando en el modelo de trabajo sólo la superficie de la bóveda, la cornisa que la soporta y las paredes de la sala que son necesarios para construir el modelo de la contraforma deseado. La Il. 2 muestra una sección del modelo de la primera bóveda en la que se puede apreciar la estructura del andamio. El modelo resultante se simplifica y se realiza un proceso de eliminación de ruido.

#### Modelado de las contraformas

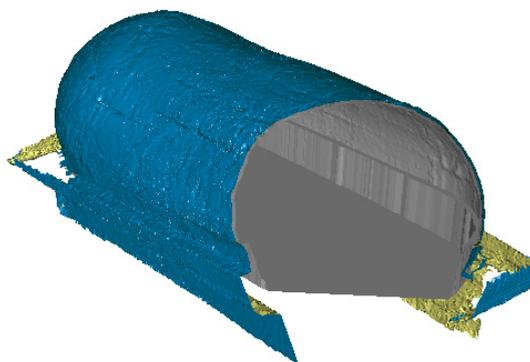
La malla resultante se divide en dos partes: la bóveda junto con la cornisa que la soporta (que es la zona de interés a la que debe ajustarse la contraforma) y el resto del modelo que se utilizará para ajustar las medidas del soporte inferior que se añadirá al modelo de la contraforma para facilitar colocación en los soportes instalados. La Il. 3 muestra el modelo resultante, en el que se ha dejado solamente la zona de interés.

Esa malla de interés para la construcción del modelo se procesa finalmente para eliminar autointersecciones y tapan las fisuras utilizando MeshLab. Las fisuras se detectan automáticamente y se tapan manualmente cerrando el espacio con una malla de triángulos. El resultado de este paso es una malla que representa la superficie de la bóveda.

7. CIGNONI, Paolo ; CALLIERI, Marco; CORSINI, M.assimiliano DELLEPIANE, Matteo; GANOVELLI, Fabio; RANZUGLIA, Guido. MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool. En: SCARANO, Vitorio; DE CHIARA, Rosario; ERRA, Ugo. Sixth Eurographics Italian Chapter Conference. (Salerno, Italia, 2008), pp. 129-136.



Il. 3. Zona de interés del modelo para construir la contraforma. En este modelo se han eliminado todas las estructuras ajenas a la bóveda. Pedro Cano y Juan Carlos Torres. Año: 2007. © Patronato de la Alhambra y del Generalife



Il. 4. Comparación del modelo de la contraforma (en azul) y la superficie de la bóveda (en gris). Pedro Cano y Juan Carlos Torres. Año: 2007. © Patronato de la Alhambra y del Generalife

Para generar las contraformas es necesario construir una malla cerrada, para lo que se le debe añadir una sección de superficie que delimite la parte inferior de la contraforma. Para asegurar la perfecta adaptación a la superficie de la bóveda, realizamos un corte del modelo por debajo de la cornisa, garantizando una distancia de seguridad de la cornisa que soporta la bóveda. Para ello se calcula un plano horizontal que se adapte a las deformaciones que presentan las cornisas, que se toma como referencia para crear el plano de corte. Como resultado obtenemos el modelo de la parte de la bóveda que nos interesa para construir la contraforma de soporte.

A partir de la malla resultante se genera una nueva desplazando la superficie de la bóveda hacia el interior en una distancia igual al grosor de la espuma de poliuretano (2 cm), de esta forma cuando se añada la lámina de espuma la contraforma se ajustará al espacio de la bóveda.

La zona inferior de este modelo se prolonga verticalmente para asegurar un apoyo estable de la contraforma sobre el andamio. La longitud de esa prolongación se ha estudiado con los responsables del montaje para asegurar que no existen complicaciones a la hora de la colocación en los soportes diseñados. Para facilitar el diseño de los soportes, y dado que las bóvedas se encuentran muy deformadas, el modelo final de la contraforma se define con base totalmente horizontal.

En la prolongación vertical de la zona inferior se utiliza un desplazamiento mayor que el utilizado para la bóveda con el fin de que pueda adaptarse sin colisionar con la cornisa que soporta cada bóveda. En algunos casos esa cornisa está totalmente desaparecida, pero se ha mantenido ese offset de seguridad ya que no es necesario un ajuste en esta zona.

En este punto se dispone de un modelo sólido de la contraforma. En la Il. 4 podemos ver la comparación del modelo de

la contraforma construido y el modelo original obtenido en el escaneado, donde podemos ver la perfecta adaptación de la superficie manteniendo el offset definido.

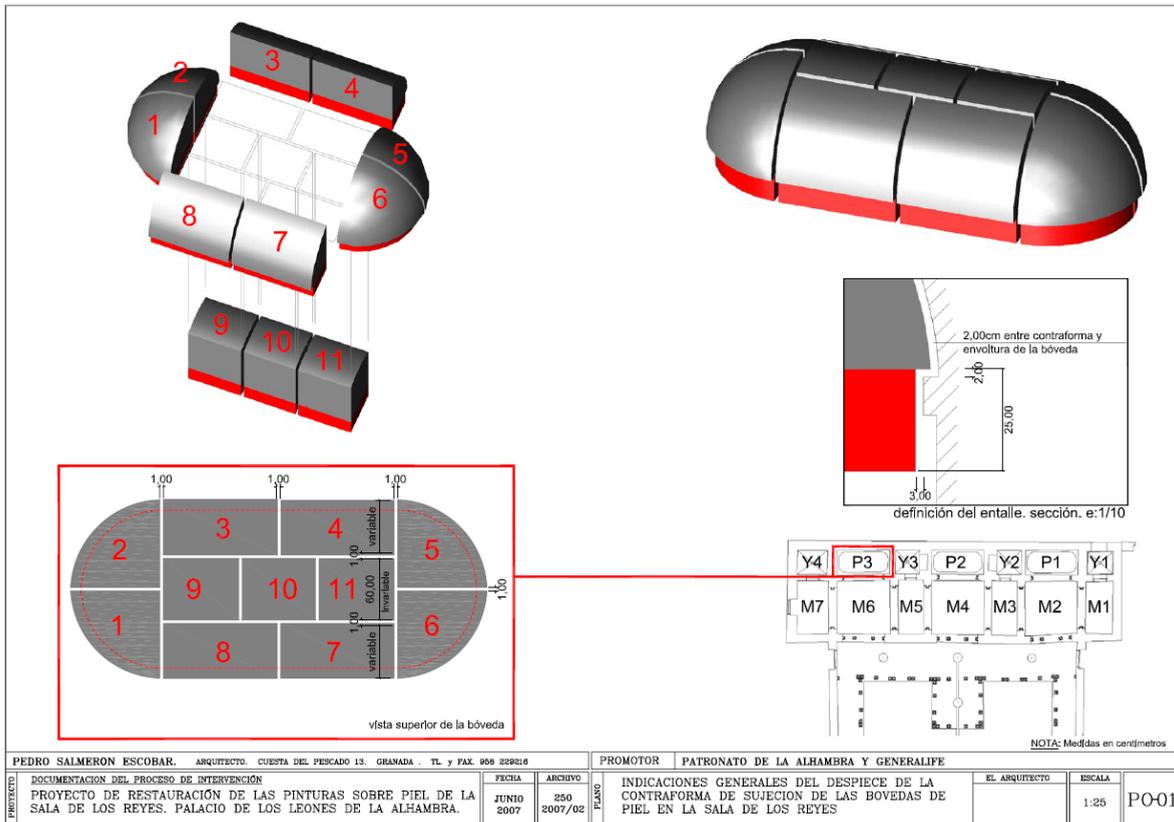
Dado que la superficie de la bóveda es mayor que la de la sala, es necesario dividir la contraforma en piezas más pequeñas para permitir su colocación. Además, esta descomposición facilitará el ajuste de la contraforma en la bóveda.

Por tanto, se realizó una división de la contraforma en piezas de forma que todas se introdujesen por el centro y se ajustasen hacia los lados, asegurando una correcta colocación sin arrastrar las piezas de la contraforma sobre la superficie de la bóveda. En la Il. 5 se puede observar el diseño de piezas que diseñó D. Pedro Salmerón Escobar, junto con la nomenclatura utilizada y detalles de las medidas de los offset definidos.

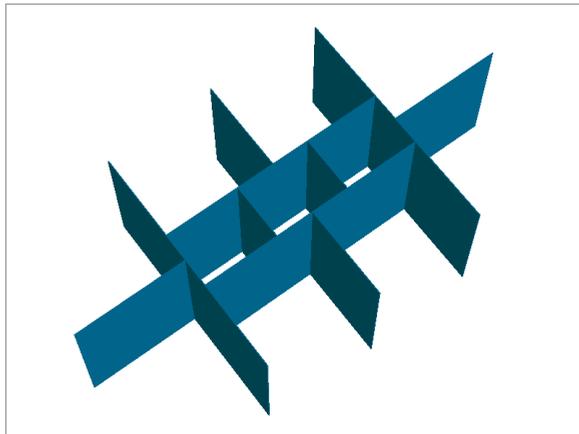
Para garantizar una correcta identificación de cada pieza el etiquetado se marcó como una extrusión del número de cada pieza en su parte interior.

Para dividir la contraforma en sus once piezas se definen los planos de corte que se muestran en la Il. 6. Estos planos se usarán para cortar el modelo de cada contraforma. Para realizar el etiquetado se crea un modelo con la numeración que se resta del modelo de las contraformas, haciendo que la numeración esté inscrita en las caras inferiores tal como se muestra en la Il. 7. En la Il. 8 se muestra una infografía de las piezas de la contraforma (en azul) colocadas en el modelo escaneado de la bóveda (en gris).

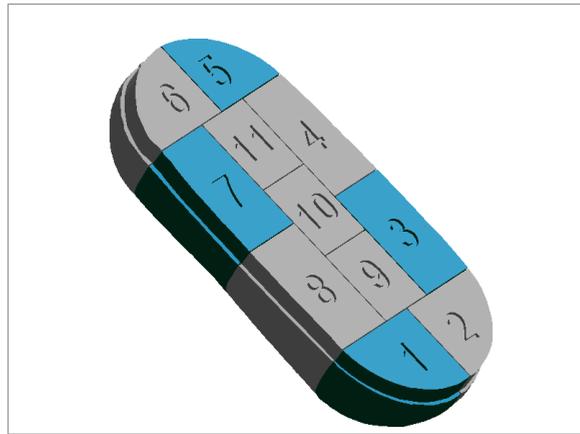
Con el fin de comprobar la exactitud del modelo construido, se calculó la distancia entre el modelo sólido de la contraforma y la superficie digitalizada de la bóveda. La Il. 9 muestra una imagen del cálculo de la distancia entre la bóveda y la contraforma, con una escala de colores que muestra la distancia en metros. Se puede observar que para la zona de la contraforma está



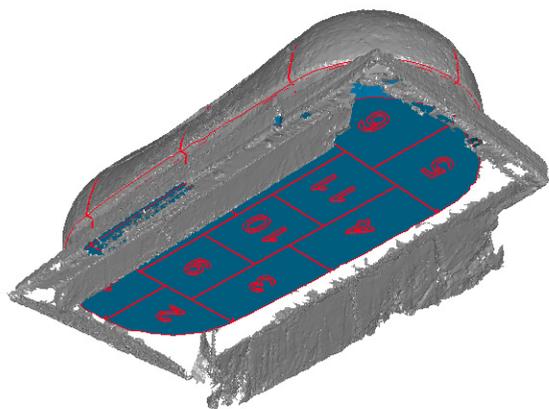
II. 5. División de de las contraformas en piezas. Pedro Salmerón Escobar. Año: 2007. © Patronato de la Alhambra y del Generalife



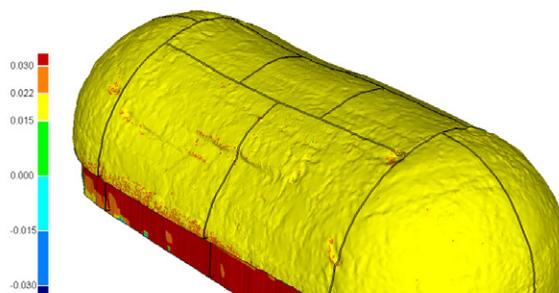
II. 6. Planos utilizados para cortar las contraformas en piezas. Pedro Cano y Juan Carlos Torres. Año: 2007. © Patronato de la Alhambra y del Generalife



II. 7. Modelo final de la contraforma, dividida en piezas y rotulada. Pedro Cano y Juan Carlos Torres. Año: 2007. © Patronato de la Alhambra y del Generalife



Il. 8. Simulación de la colocación de la contraforma (en azul) en el modelo original de la bóveda (en gris). Pedro Cano y Juan Carlos Torres. Año: 2007. © Patronato de la Alhambra y del Generalife



Il. 9. Comprobación de distancias con el modelo original. Se puede comprobar que la distancia en la zona de la bóveda de piel está entre 1.5 y 2.2 cm. Pedro Cano y Juan Carlos Torres. Año: 2007. © Patronato de la Alhambra y del Generalife

entre 1.5 y 2.2 cm. Calculando estas distancias se pudo verificar que la distancia entre el modelo de la contraforma y la bóveda estaba siempre dentro del rango de distancia establecido.

#### Creación de las contraformas

El resultado del proceso descrito en el punto anterior es el modelo sólido de las once piezas de las contraformas de las tres bóvedas. Estos modelos se han utilizado para la construcción física de las contraformas en porexpán. El proceso de fabricación lo realizó la empresa Tragacantos S.L.

La Il. 10 muestra las piezas de porexpán de una de las contraformas. A estas piezas se le añadió la capa de espuma de poliuretano en las zonas en las que tenían contacto con la bóveda. La Il. 11 muestra la colocación de la capa de espuma de poliuretano en una de las contraformas.

#### Colocación

Las contraformas se montaron sobre unos soportes de madera colocados sobre el andamio (ver Il. 12), comenzando con las piezas de la periferia (uno al ocho) y cerrando con las piezas interiores (nueve, diez y once). De esta forma se asegura que la colocación se realiza sin desplazar las contraformas sobre la superficie de la bóveda.

#### Digitalización de los reversos de las bóvedas

Una vez colocadas las contraformas y retiradas las cubiertas de las mismas, se procedió a digitalizar los soportes de las bóvedas desde fuera. Para este proceso se utilizó un escáner Minolta Vivid 910, que es un escáner láser de triangulación. Este dispositivo solo se puede usar en distancias cortas (no superiores a dos metros), pero permiten obtener medidas con una gran resolución y precisión (del orden de décimas de milímetro). Este escáner fue también

usado en la digitalización de los leones del Patio de los Leones. Estos modelos se usaron como documentación del estado previo a la intervención. La Il. 13 muestra la digitalización de los reversos.

#### RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El método descrito en este trabajo se aplicó a la bóveda número tres. Una vez concluido el montaje de la contraforma de esta de forma satisfactoria, se validó el procedimiento y se procedió a aplicarlo en las bóvedas uno y dos. El procedimiento utilizado ha garantizado una sujeción correcta y duradera de las bóvedas durante todo el proceso de restauración, evitando que este afectase al cuero o a las pinturas.

Gonzalez, Montero y Baglioni, en su trabajo sobre la intervención en las pinturas de la Sala de los Reyes de la Alhambra de Granada, valoran positivamente el resultado obtenido con esta metodología<sup>8</sup>:

«Se completó esta fase con el diseño y aplicación por los anversos de las pinturas de sendas contraformas pensadas, en principio, en madera revestida de diversos estratos de material amortiguante, sustituyéndose en curso de ejecución, gracias a los avances de la investigación tecnológica y a la realización de un escaneado láser en 3D de las tres pinturas, por contraformas en poliestireno expandido, obtenidas por control numérico sobre la base del escáner 3D efectuado. Estas contraformas se ajustaban como una segunda piel a cada superficie pictórica que conformaba un conjunto sólido y estable con cada bóveda, cumpliendo además los requisitos exigidos a esta pieza, considerada clave, en los momentos del proyecto en los que las bóvedas estarían desprovistas de su sujeción natural, sostenidas únicamente por ellas.»

8. Op. Cit. Las pinturas de la Sala de los Reyes de la Alhambra de Granada (1)



Il. 10. Piezas de porexpán de una de las contraformas. Pedro Cano y Juan Carlos Torres. Año: 2007. © Patronato de la Alhambra y del Generalife



Il. 11. Colocación de la capa de espuma de poliuretano en una de las contraformas. Pedro Cano y Juan Carlos Torres. Año: 2007. © Patronato de la Alhambra y del Generalife



Il. 12. Colocación de la contraforma. Pedro Cano y Juan Carlos Torres. Año: 2007. © Patronato de la Alhambra y del Generalife



Il. 13. Digitalización de los reversos de las bóvedas. Pedro Cano y Juan Carlos Torres. Año: 2007. © Patronato de la Alhambra y del Generalife

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha financiado por el “Patronato de la Alhambra y del Generalife” y la “Consejería de Innovación Ciencia y Empresa de la Junta de Andalucía” a través del proyecto PE-TIC-401.