

Alcantud, Almudena; Didier Niquet, Nicolás; Azahara Rodríguez Rodríguez, Medina; Mas-Barberà, Xavier. "Optimización y aplicación de prótesis 3D mediante tecnologías físico-digitales como solución para la restauración de faltantes en escultura", *TAREA 5* (5), pp. 218-233.

RESUMEN

El siguiente trabajo de investigación tiene por objetivo optimizar y aplicar prótesis 3D en fases de reposición de faltantes en escultura y ornamentos. Las tecnologías digitales comienzan a tener su hueco en distintos sectores industriales y, en el campo de la conservación y restauración de bienes culturales, se convierten en una alternativa a las técnicas convencionales con el uso de tecnología 3D durante las fases de reconstrucción de volumen. La intervención se desarrolla sobre un faltante localizado en la testa de una escultura de alabastro que representa a san Antonio Abad. Para ello, se llevaron a cabo distintas fases: registro 3D mediante un escáner Go!SCAN50 Creaform, el modelado digital mediante Zbrush® y la impresión del prototipo de prótesis en 3D mediante una impresora Form2. Asimismo, dicha prótesis es unida al original por medio de sistemas magnéticos de acuerdo con el modelo teórico optimizado. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto el carácter no invasivo, reversible y reconocible de la intervención. En definitiva, el uso de prótesis 3D usando tecnologías físico-digitales como solución en la restauración de faltantes de escultura se muestra como un método viable, reversible y eficaz.

Palabras clave: *Prótesis 3D, sistemas magnéticos, escaneado 3D, impresión 3D, modelado digital.*

ABSTRACT

"Optimization and Application of 3D Prosthesis Using Physical-Digital Technologies as a Solution for the Restoration of Missing Parts on Sculpture"

In this paper we present an optimized method for the use of 3D prostheses in the reconstruction of damaged sculptures and ornaments. The use of digital technologies has become increasingly important in many industrial sectors. In in the field of Conservation and Restoration of Cultural Heritage, they have become an alternative to conventional techniques, e.g. with the use of 3D technology during the volume reconstruction phases. Here, this method is applied to replace the missing part of the head of an alabaster sculpture (*San Antonio Abad*), which consist of different stages. First, the damaged sculpture was digitized using with the *Go!SCAN50* scanner (*Creaform*) and a 3D model was created. Then, a digital model of the missing piece was created using the digital sculpting tool *Zbrush*. This 3D prototype model of the prosthesis was printed with a *Form2* printer. Finally, the prosthesis was attached to the original sculpture by a magnetic system, according to a previously calculated optimized theoretical model. This approach is characterised by its non-invasive and reversible character. Moreover, the prosthesis is also discreetly recognizable, thus meeting all the requirements of the principles of responsible restoration. In short, it can be shown that the use of 3D prostheses with physical-digital technologies as a solution for the restoration of missing parts of sculptures is a viable and effective method.

Key words: *3D prosthesis, magnetic systems, 3D scanning, 3D printing, digital modelling.*

Optimización y aplicación de prótesis 3D

Mediante tecnologías físico-digitales como solución para la restauración de faltantes en escultura

Almudena Alcantud,¹ Nicolás Didier Niquet,² Medina Azahara Rodríguez Rodríguez³ y Xavier Mas-Barberà⁴

En la actualidad, los medios tecnológicos experimentan una etapa marcada por importantes avances, así como la aparición de herramientas creativas e innovadoras que amplían el abanico de posibilidades a un rango inimaginable.

El desarrollo de soluciones tecnológicas en el sector industrial ha perfeccionado los procesos de fabricación y la eficiencia en las fases de actuación/intervención. Un caso destacado resulta en el ámbito médico, donde la tecnología permite obtener, a partir de la tomografía axial computarizada (TAC), una réplica 3D del hueso u órgano

1 Conservadora restauradora *freelance*. dena.gandia@gmail.com.

2 Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio. Universitat Politècnica de València/ Departamento de Conservación y Restauración de Bienes Culturales (Facultad de Bellas Artes). Universitat Politècnica de València.

3 Conservadora restauradora *freelance*.

4 Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio. Universitat Politècnica de València/ Departamento de Conservación y Restauración de Bienes Culturales (Facultad de Bellas Artes). Universitat Politècnica de València.

del paciente de modo que pueda conocerse, manipularse y practicarse previamente a la intervención quirúrgica.

Pero también empiezan a incorporarse estas herramientas en ámbitos donde, como en la conservación y restauración de bienes culturales, todavía impera una corriente más convencional. Si bien a pesar de que en este campo se emplean métodos científicos que analizan en profundidad los materiales constituyentes de las obras de arte y sus alteraciones, la metodología de intervención no ha avanzado de manera significativa en las últimas décadas.

La reintegración volumétrica mediante prótesis, tema que aquí se trata, es una de las fases que más controversia genera entre los distintos profesionales del patrimonio por su influencia en la lectura estética de la obra. Existen diversas teorías sobre la realización de reconstrucciones, reposiciones y/o copias. No obstante, todas tienen un punto en común, es un tratamiento que debe ser totalmente reversible y que no afecte al original en caso de sustitución.⁵ El conjunto de necesidades y el estado de conservación de la obra, sumado al contexto histórico y al valor artístico-formal, son indicadores que influyen evidentemente en el método de intervención tomado por el restaurador.

Según el procedimiento habitual, en los casos donde la superficie a reconstruir ocupa un espacio reducido dentro del objeto, se emplea un mortero directamente en la zona del faltante, donde se adapta y ajusta *in situ*. Si la superficie es de mayor tamaño, también se puede modelar el fragmento sobre la superficie para obtener un molde y la posterior prótesis, que se une al original mediante pernos de sostén.⁶ Sin embargo, estas técnicas implican durante la intervención un contacto frecuente con el original que comporta determinados riesgos de deterioro.

La presente investigación es el resultado de una búsqueda de soluciones innovadoras en el proceso restaurativo de obras con pérdidas de volumen. El propósito del proyecto es ciertamente reconstituir la morfología sin actuar directamente sobre la obra. Esta labor ha sido posible mediante el empleo de herramientas de fabricación digital apoyadas con técnicas convencionales de reconstrucción.⁷

De igual modo, se ha buscado un método de adhesión de la prótesis menos invasivo. Para ello, se ha utilizado un conjunto de sistemas magnéticos reversibles y respetuosos con la obra de arte. La fuerza que han

5 X. Mas-Barberà. *Conservación y Restauración de Materiales Pétreos: Diagnóstico y Tratamientos*. Valencia, Universitat Politècnica de València, 2010, p. 139.

6 *Ibid.*

7 C. Caple. *Conservation Skills: Judgement, Method and Decision Making*. London/New York, Routledge, 2000.

de hacer los imanes se ha calculado mediante un procedimiento físico, un modelo teórico desarrollado previamente para este tipo de intervenciones.⁸ El uso de los imanes en conservación y restauración se puede dividir en tres grupos: los empleados para sistemas expositivos,⁹ los utilizados como herramienta en procesos restaurativos¹⁰ y los usados como sistema de unión de fragmentos y prótesis.¹¹

Asimismo, en este estudio, la digitalización de la obra durante el proceso de escaneado 3D constituye en sí un proyecto al tratarse de una operación que permite disponer de un registro completo de la obra. Esta documentación digital mejora el estudio del bien cultural generando un repositorio permanente y de alta fidelidad conforme a la conservación preventiva.

El escaneado 3D complementa el proceso de modelado digital, el cual, entre sus muchas ventajas, permite la obtención de diferentes tipologías de prótesis. La impresión 3D de fragmentos supone el paso definitivo o, por el contrario, el paso previo a la posterior realización de moldes y ulterior positivado mediante pastas o morteros. Durante la fase de toma de decisiones se analizan y se presta atención a los distintos criterios funcionales y estéticos, de este modo se elige la opción más adecuada en la reintegración volumétrica de la obra.

El estudio se realiza sobre una escultura que representa a san Antonio Abad (58 x 27,5 x 19 cm). Muestra sus atributos característicos, el libro y el cerdo,¹² también el bastón que no se conserva. Viste con el hábito de color marrón y blanco con capucha correspondiente a la Orden de los Antonianos a la cual pertenecía.

La obra, datada en el siglo XVII, manifiesta una escasa calidad artística. Probablemente pueda tratarse de una talla de la etapa inicial de un artista o de un aprendiz de taller, gremio o escuela. Está realizada en

8 X. Mas Barberà et al. "Development of a methodology for the restoration of stone sculpture using magnets", en Hughes, J. y Howind, T. (eds.): *Science and Art: A Future for Stone: Proceedings of the 13th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone*, vol. 2. Paisley, University of the West of Scotland, 2016, pp. 871-878.

9 Gwen Spicer. "Defying Gravity with Magnetism", *AIC News* 35, noviembre, 2010, pp. 1-5; Deanna Hovey. "Short Communication: Simple and invisible solutions using rare earth disc magnets in mountmaking", *Journal of the American Institute for Conservation*, 51:1, 2012, pp. 51-58.

10 Tammy Jordan. "Using Magnets as a Conservation Tool: A New Look at Tension Drying Damaged Vellum Documents", *The Book and Paper Group Annual* 30, 2011, pp. 47-55.

11 Andrew Oddy y Sara Carroll. *Reversibility, does it exist?* London, British Museum, 1999, p. 180; Kristen Watson Adsit. "An Attractive Alternative: The Use of Magnets to Conserve Homer by John Chamberlain", *WAAC Newsletter* 33, May 2011, pp. 16-21; Paola Franca Lorenzi y Franca Sorella. "Il San Giovannino restituito. El San Juanito restituido", en: Maria Cristina Impronta: *Collana problemi di conservazione e restauro. Il San Giovannino di Ubeda restituito. El San Juanito de Ubeda restituido*. Firenze, Edifir, 2014, pp. 101-126.

12 L. Réau. *Iconografía Del Arte Cristiano. Tomo 2. Volumen 3, Iconografía De Los Santos: A-F*. Barcelona, Ediciones del Serbal, 1997-2000.

alabastro policromado, y tanto la procedencia de este material como el autor de la escultura es desconocida.

Desde el punto de vista del estado de conservación destaca, en rasgos generales, el oscurecimiento que predomina en toda la escultura. Ello podría deberse a la oxidación del barniz y a la acumulación de diversa suciedad superficial depositada a lo largo de los años. También, es evidente que la figura ha sido repintada en su totalidad. La imagen tiene serias pérdidas de soporte en la cabeza del santo, concretamente en la parte superior de la mejilla izquierda próxima al ojo. Además, muestra una pérdida total de la oreja, la parte trasera de la cabeza y la mano derecha. El libro sufre lagunas importantes en ambas esquinas y, también, varios daños en la cabeza del cerdo.

El método de trabajo se centró, en primer lugar, en la búsqueda de documentación acerca de la escultura,¹³ a pesar de la escasez de datos existentes. El *modus operandi* del desarrollo de todo el proyecto de obtención de la prótesis se describe a continuación.

Digitalización de la escultura

La digitalización se realiza por medio del escáner 3D, que recopila la información del exterior y la transforma en coordenadas tridimensionales. Estas, agrupadas en una nube de puntos, forman una malla de superficie que genera la textura del objeto.

Para el escaneado de la escultura (figura 1) se utilizó un escáner Go!SCAN50, de la compañía canadiense Creaform,¹⁴ firma pionera en el desarrollo de sistemas de metrología y digitalización 3D. Se trata de un escáner láser portátil de altas prestaciones, de luz blanca, preparado para aplicarse en objetos de tamaño medio-grande, con el que se obtiene una nube de puntos de precisión milimétrica con respecto a la obra original a escala 1:1 y a color. La toma de datos y su tratamiento se llevan a cabo mediante el software VXelements® y la aplicación VXmodel®, ambos programas desarrollados por la misma empresa específicamente para el manejo de su tecnología.

Finalmente, la interfaz permite visualizar los resultados en tiempo real con gran nivel de detalle. La información recogida directamente

13 Jasmina Prada-Lorente. *Estudio de policromía en soporte pétreo. Análisis y teorías*. Trabajo final de Maestría en Conservación y Restauración de Bienes Culturales, Universitat Politècnica de València, 2010.

14 Página web de la empresa: <https://www.creaform3d.com/es> [Fecha de consulta: 10 septiembre 2017].

resulta ventajosa, de modo que nos asegura documentar todas las zonas evitando agujeros en el modelo. La exploración es muy rápida y eficaz, con óptimos resultados. Una vez terminado el proceso de toma de datos, el resultado es una malla hermética y fotorrealista, con pequeñas zonas ciegas y ruido que deben repararse. El software VXelements® hace uso de algoritmos basados en la recepción de información específica del escáner para optimizar el resultado final.



Figura 1. Fase de registro 3D de la escultura San Antonio Abad mediante escáner Go!SCAN50, de la empresa Creaform. Obsérvese la visualización digital del proceso de escaneado en tiempo real.

Modelado 3D de la prótesis

El archivo se exporta a un software de modelado 3D denominado ZBrush®, desarrollado por la compañía Pixologic.¹⁵ La particularidad de este programa reside en el concepto de modelar digitalmente un trozo de arcilla, es decir, como si se manipulara este material de manera convencional, pero en un medio virtual (figura 2).

15 Página web de la compañía: <http://pixologic.com> [Fecha de consulta: 10 septiembre 2017].

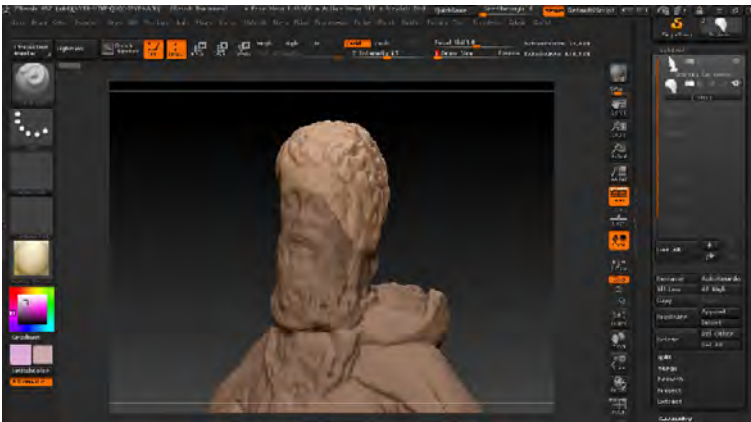
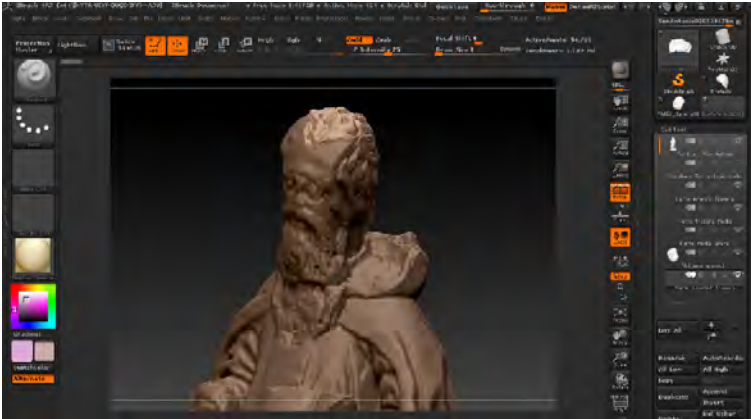


Figura 2. Fase de modelado con ZBrush®. Arriba: Vista de la testa en proceso de modelado digital; Abajo: Vista final del fragmento de testa reconstruido digitalmente.

En términos prácticos, y para el caso que nos ocupa, se han aprovechado las características morfológicas de la escultura para reconstruir la zona faltante. El modelado digital permite elaborar variantes de una misma prótesis modificando zonas y rehaciendo otras con el fin de conseguir un modelo acorde al fin deseado. ZBrush® trabaja con dimensiones inferiores al volumen real de la escultura¹⁶ de manera que, una vez terminado el modelo, el archivo es exportado a un software de impresión en el que se reajustan los parámetros dimensionales. En este

16 W. Robson. *Essential ZBrush*. Plano, Texas, Wordware, 2008.

sentido, se toman las medidas registradas en el proceso de escaneo 3D. Esta metodología de trabajo asegura que cualquier prótesis modelada en 3D se ajuste al tamaño original de la obra.

Impresión 3D

Para la realización del prototipo se ha optado por la técnica de estereolitografía (SLA).¹⁷ El proceso consiste, a grandes rasgos, en la obtención de un objeto volumétrico por fabricación aditiva de resina fotosensible. Esta se encuentra en estado líquido y se endurece en contacto con un láser de luz UV que, capa tras capa, va formando el volumen previamente establecido (figura 3A).

La razón principal por la que se ha empleado esta tecnología es el alto grado de detalle que ofrece, pues, como se ha mencionado anteriormente, la prótesis debe ajustarse perfectamente a la zona de fractura de la obra original.

En este caso, se ha usado una impresora Form2 (figura 3B) de la compañía Formlabs.¹⁸ Se trata de una impresora 3D “de oficina” de altas prestaciones, pensada para ser muy fiable a la hora de imprimir piezas que requieren un margen de deformación muy reducido, aspecto que la diferencia de otras tecnologías en cuanto a la realización de una prótesis de estas características. Además, el material de impresión (resina Grey Form2) es estable, ligero, resistente a nivel mecánico (figura 4) y presenta algunas características óptimas para ser imprimado y coloreado.

Diversas alternativas como resultado final de la reconstrucción volumétrica

Una vez obtenida la prótesis SLA impresa en 3D, resultan varias soluciones añadidas. Por un lado, dicha prótesis resulta la pieza definitiva como objeto de reposición, el cual se ajusta en color al soporte original. Por otro, la prótesis es el medio a partir del cual se obtienen otras réplicas mediante la realización de moldes y ulterior positivado con pastas o morteros (figura 5A).

17 M. Berchon y B. Luyt. *La impresión 3D: Guía definitiva para makers, diseñadores, estudiantes, profesionales, artistas y manitas en general*. Barcelona, Gustavo Gili, 2016.

18 Página web: <https://www.formlabs.com/3d-printers/form-2> [Fecha de consulta: 10 septiembre 2017].

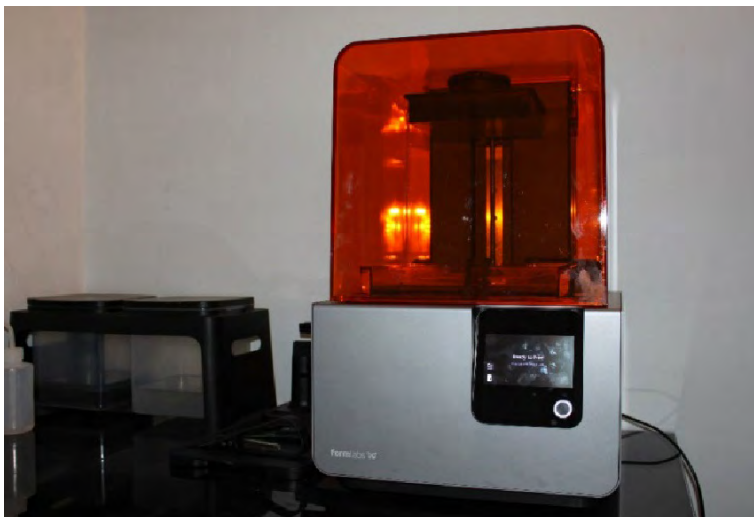
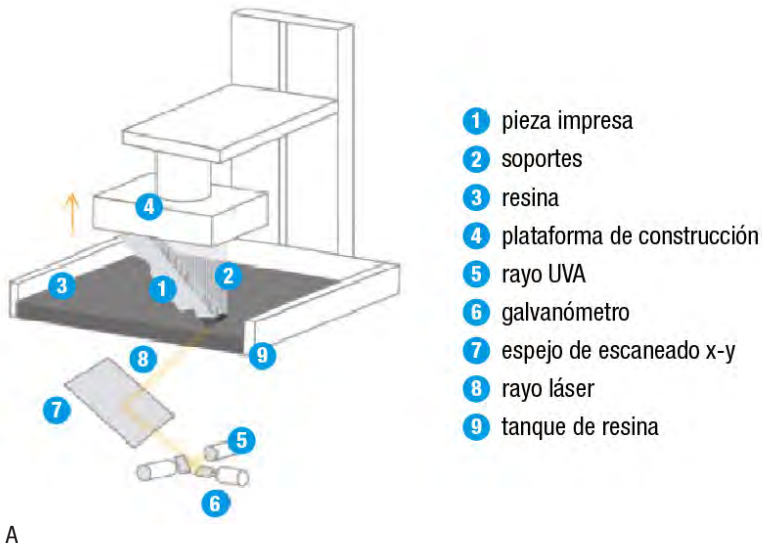
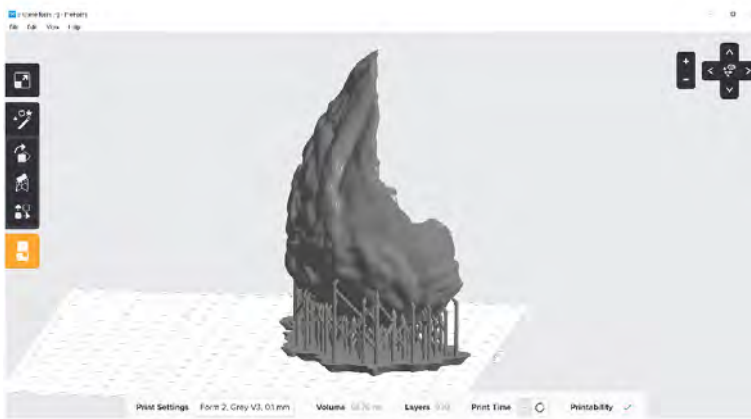


Figura 3. Técnica de la estereolitografía (SLA). A) Esquema del funcionamiento de la SLA https://formlabs.com/fr/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/#sla-systems; B) Impresora SLA Form2.

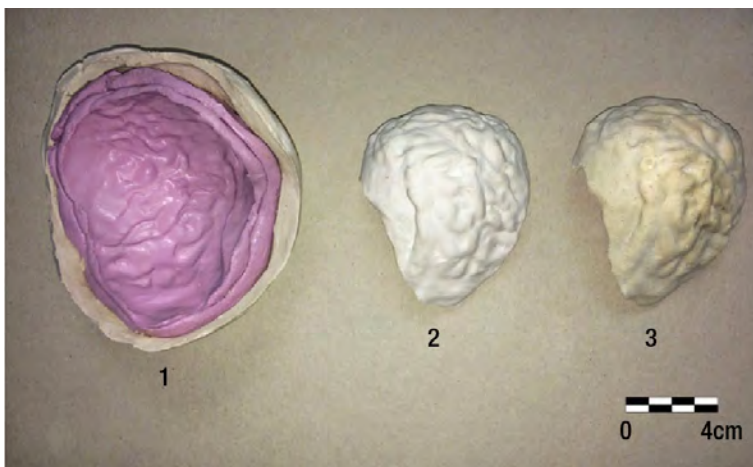


A

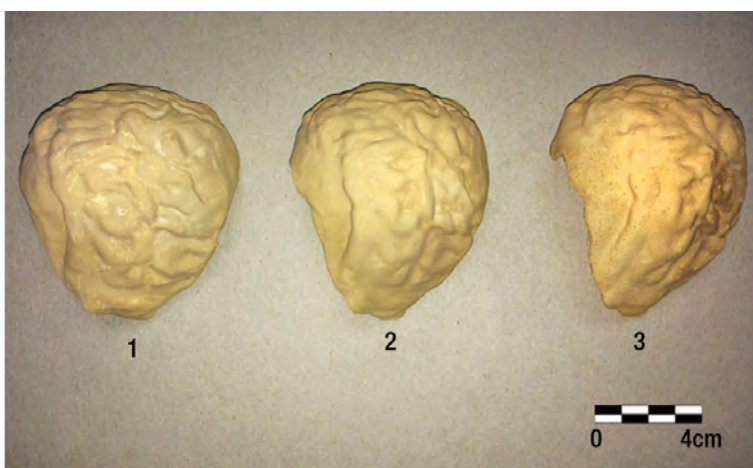


B

Figura 4. Prótesis generada. A) Vista de la prótesis digital calculada en Preform®, software de optimización de la Impresora Form2; B) Prótesis impresa con resina grey form2, vista externa e interna de la testa, en esta última se aprecia la zona en negativo de la zona de fractura.



A



B

Figura 5. Obtención de variaciones de prótesis a partir de la prótesis digital impresa en 3D. A) Molde de silicona y caja rígida (1), prótesis de escayola Alamo 70 (2) y mortero sintético (3); B) Coloreado de las prótesis a modo de mancha neutra: prótesis impresa SLA (1), prótesis de escayola Alamo 70 (2) y mortero sintético (3).

Los dos procedimientos son perfectamente aceptables según los principios de la conservación y restauración, por su reversibilidad, respeto, reconocimiento, mínima intervención y tratamiento no invasivo.

Paralelamente, el moldeado convencional se realizó con elastómeros silicónicos (pasta de silicona Equinox 38[®] de Smooth-On¹⁹ y caja rígida de escayola Alamo 50), mientras que en el proceso de reposición se emplearon materiales inorgánicos (escayola Alamo 70) y morteros sintéticos compuestos por un conglomerante (resina poliéster Ferpol 1973),²⁰ cargas inertes (árido de alabastro 800 micras) y pigmentos inorgánicos (colores tierra) en una proporción 1:1 a peso (conglomerante: carga).²¹ Finalmente, las prótesis obtenidas se han coloreado a modo de mancha neutra (figura 5B).

Sistemas magnéticos como método de unión menos invasivo

En cuanto a la unión de la prótesis, esta se ha llevado a cabo mediante sistemas magnéticos. Para este caso concreto de unión de la testa en la zona de fractura, se ha calculado el modelo teórico desarrollado basado en las leyes de la estática.²² En este sentido, se busca tanto el equilibrio de fuerzas como el equilibrio de momentos para saber la fuerza necesaria que han de hacer los imanes fijados, y conseguir así, una unión estable.²³

19 Página web: <https://www.smooth-on.com> [Fecha de consulta: 10 septiembre 2017].

20 Página web: <http://www.feroca.com/es> [Fecha de consulta: 10 septiembre 2017].

21 Corpas Iglesias F. A. *et al.* "Caracterización del material compuesto mármol-poliéster", *Materiales de construcción* 52 (268), 2002, pp. 65-71. En línea. Disponible en: <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/318/366> [Fecha de consulta: 10 septiembre 2017]; J. Roig Salom *et al.* "SEM/EDX and vis-spectrophotometry study of the stability of resin-bound mortars used for casting replicas and filling missing parts of historic stone fountains", *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 375 (9), 2003, pp. 1176-1181. En línea. Disponible en: <http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00216-003-1826-0.pdf> [Fecha de consulta: 10 septiembre 2017]; M. Muthukumar y D. Mohan. "Studies on polymer concretes base on optimized aggregate mix proportion", *Science direct* 40 (9), 2004, pp. 2167-2177. En línea. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0014305704001727> [Fecha de consulta: 10 septiembre 2017]; Y. Peraza Zurita. *Biodeterioro por microalgas en Fuentes de mármol*. Tesis doctoral. Granada, Universidad de Granada, 2004; X. Mas Barberà. *Estudio y caracterización de Morteros Compuestos, para su aplicación en intervenciones de sellados, reposiciones y réplicas, de elementos pétreos escultórico-ornamentales*. Tesis doctoral. Valencia, Universitat Politècnica de València, Facultat de Belles Arts de San Carles, 2006.

22 M. A. Rodríguez *et al.* "Estudio de sistemas magnéticos a base de imanes para uniones de fragmentos y prótesis a la obra original escultórica", en *La Ciencia y el Arte V. Ciencias y tecnologías aplicadas a la conservación del patrimonio*. Madrid, Editorial Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte de España, 2015, pp. 121-135.

23 X. Mas Barberà *et al.* "Development of a methodology for the restoration of stone sculpture

Para el cálculo del modelo teórico, se toman las características principales de las prótesis que deben unirse a la testa de la escultura, que son: una masa de 69 g para la prótesis, realizada con resina sintética por impresión 3D SLA; 64 g para la prótesis con mortero sintético de alabastro y 79 g para la prótesis en escayola Alamo 70. Todas ellas miden 7 x 6 cm (alto por ancho), la sección de la testa es 7 x 5 cm aproximadamente, y forma ángulo de 30°. Además, el coeficiente de rozamiento es el parámetro necesario para aplicar el modelo²⁴ y se toma el valor de la escayola ($\mu = 0,86$) para todas las prótesis, dada la afinidad con la obra real de alabastro.

De acuerdo con el modelo teórico,²⁵ se obtuvo, en el caso de las prótesis (tomando como masa media de las tres 0,071 kg) (figura 6):

Para la ecuación correspondiente al equilibrio de fuerzas:

$$F = \frac{P}{\mu} = \frac{0,071 * 9,81}{0,86} = 0,81 \text{ N}$$

Para la ecuación correspondiente al equilibrio de momentos: α

$$F = \frac{P d_2 \cos \alpha}{d_1} = \frac{0,70 * 3 * 0,87}{5} = 0,37 \text{ N}$$

Teniendo en cuenta la geometría de la pieza, los resultados determinaron que era necesario aplicar como mínimo una fuerza de 0,81 N para que la unión fuese estable. Se decidió colocar la prótesis con dos imanes S-04-01,5-N de 3,43 N, cada uno, para aportar un margen de seguridad. Los imanes fueron suministrados por la compañía Supermagnete²⁶ y adheridos con Paraloid B-72. La colocación fue en una configuración antiparalela, minimizando el campo magnético en el exterior (figura 7).

Finalmente, en la figura 8 se muestra la intervención finalizada con la prótesis obtenida mediante SLA unida a la pieza mediante sistemas magnéticos.²⁷

using magnets", *op. cit.*

24 Medina Azahara Rodríguez Rodríguez. *Análisis de sistemas magnéticos aplicados a uniones de fragmentos*. Tesis doctoral. Valencia, Universitat Politècnica de València, 2017, p. 208.

25 *Ibid.*

26 Página web: <https://www.supermagnete.es/company> [Fecha de consulta: 10 septiembre 2017].

27 Para ver el proceso, puede consultar el video en el siguiente link: <https://www.youtube.com/watch?v=2BdaSZ8NUzE>.

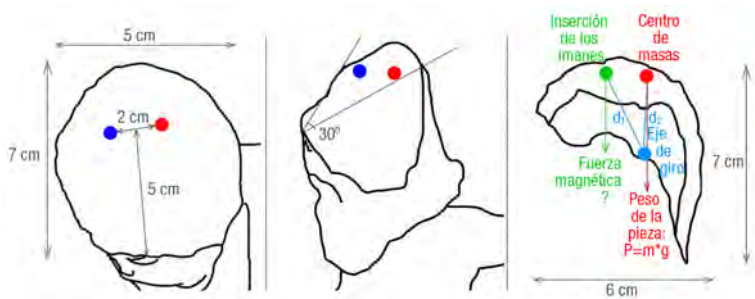


Figura 6. Aplicación del modelo teórico al caso del San Antonio Abad.



Figura 7. Prótesis SLA coloreada y ajuste de los sistemas magnéticos.

Conclusiones

Este trabajo de investigación pone de manifiesto la implementación de un nuevo método de reintegración volumétrica en escultura. Sin duda, las nuevas tecnologías 3D plantean nuevas posibilidades procedimentales y de exploración en el campo de la conservación y restauración del patrimonio cultural.

El proyecto digital desarrollado amplía las posibilidades en los acabados de las prótesis, donde pueden aplicarse diferentes criterios de intervención y elegirse el que finalmente se adapte mejor a la obra. Además, el software de modelado 3D puede almacenar patrones y/o texturas de partes del original, de modo que la reconstrucción resulte más fiel a la factura del artista.

Esta investigación demuestra que la obra no sufre riesgos durante la intervención de reconstrucción. La información obtenida durante el registro 3D y posterior modelado digital reduce el contacto con la obra y elimina la totalidad de los riesgos que podrían producirse durante su manipulación (desprendimientos de material original, rasguños, frota-mientos, roces, entre otros).

La obtención de la prótesis por impresión 3D, así como el uso de técnicas convencionales de moldeado y reproducción mediante pastas y morteros, devuelven la lectura estética a la escultura y reafirman el principio de reversibilidad.

El uso de sistemas físicos de sujeción mediante sistemas magnéticos confirma la viabilidad del sistema para unir prótesis en una obra original. Se presenta el modelo teórico que permite la unión de forma óptima y sencilla a partir de las características estructurales de los fragmentos por unir (medidas, forma, posición y coeficiente de rozamiento). En general, su aplicación resulta viable, reversible y eficaz.

Finalmente, se considera muy interesante averiguar, en próximas investigaciones, cómo interactúan los materiales de la impresión 3D en contacto con los materiales constituyentes de la obra original, en cuanto al envejecimiento y degradación se refiere.

Agradecimientos

Los autores agradecen a todas aquellas personas e instituciones que han hecho posible el desarrollo de este innovador trabajo de investigación, especialmente a la compañía Creaform por su inestimable contribución



A



B

Figura 8. Prótesis SLA coloreada colocada en la testa y unida mediante sistemas magnéticos. A) Vista lateral; B) Vista frontal. Obsérvese el ajuste exacto entre el original y la prótesis.