

Evolución de procesos técnicos en la creación escultórica de ojos hiperrealistas: desde las técnicas tradicionales hasta la creación digital

Evolution of technical processes in the sculptural creation of hyperrealistic eyes: From traditional techniques to digital creation

María Teresa Barranco Crespo

Universidad Europea de Madrid
maytebarranco@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-9401-9698>

Óscar Hernández-Muñoz

Universidad Complutense de Madrid
oscarhernandez@ucm.es
<https://orcid.org/0000-0002-1226-4789>

Sugerencias para citar este artículo:

Barranco Crespo, María Teresa y Hernández-Muñoz, Óscar (2023). «Evolución de procesos técnicos en la creación escultórica de ojos hiperrealistas: desde las técnicas tradicionales hasta la creación digital», *Tercio Creciente*, 23, (pp. 47-69), <https://dx.doi.org/10.17561/rtc.23.6977>

Recibido: 22/02/2022
Revisado: 17/11/2022
Aceptado: 17/11/2022
Publicado: 01/01/2023

Resumen

La creación de ojos de apariencia humana ha sido un objetivo perseguido históricamente desde diferentes campos del conocimiento, como atestiguan los múltiples avances técnicos logrados en dicho campo en disciplinas tan diversas como la oftalmología, la escultura, la robótica, la industria juguetera o los efectos especiales cinematográficos. Actualmente, la popularización de las nuevas tecnologías de impresión 3D ha hecho posible el planteamiento de nuevos flujos de trabajo en escultura hiperrealista para la elaboración de ojos artificiales. El objetivo de este estudio fue analizar mediante un caso práctico las ventajas de utilizar un abordaje mixto, incorporando técnicas tradicionales y digitales, orientado a la fabricación de ojos de resina para escultura figurativa. Los

resultados obtenidos empleando esta metodología han sido plenamente satisfactorios. Los ojos artificiales creados presentan un extraordinario parecido con los humanos y reflejan los pequeños detalles volumétricos y cromáticos con una precisión mayor que la que se puede alcanzar empleando únicamente técnicas artesanales. La principal conclusión de este trabajo es que el empleo de tecnologías de modelado e impresión 3D puede resultar de utilidad para agilizar el proceso de elaboración de estas estructuras anatómicas y mejorar su fiabilidad y la repetibilidad y calidad de los resultados.

Palabras clave: ojos artificiales, escultura hiperrealista, modelado 3D, impresión 3D.

Abstract

The creation of human-like eyes has been a goal historically pursued from different fields of knowledge, evidenced by the many technical advances achieved in this field in disciplines as diverse as ophthalmology, sculpture, robotics, toy industry or special effects in film. Currently, the popularization of new 3D printing technologies has made possible the development of new workflows in hyperrealistic sculpture for the production of artificial eyes. The aim of this study was to analyze through a case study the advantages of using a mixed approach, incorporating traditional and digital techniques, oriented to the manufacture of resin eyes for figurative sculpture. The results obtained using this methodology have been fully satisfactory. The artificial eyes created have an extraordinary resemblance to humans and reflect the small volumetric and chromatic details with a greater precision than that which can be achieved using only artisanal techniques. The main conclusion of this work is that the use of 3D modeling and printing technologies can be useful to speed up the process of making these anatomical structures and improve their reliability as well as the repeatability and quality of the results.

Keywords: Artificial Eyes, Hyperrealistic Sculpture, 3D Modeling, 3D Printing.

1. Introduction

En el mundo del arte, a la representación de la mirada de los seres vivos y, en especial la del ser humano, se le ha otorgado frecuentemente una atención especial. En búsqueda de esa esencia natural, los escultores han desarrollado a lo largo de la historia diversas técnicas para dar vida a sus figuras, llegando a alcanzar una alta fidelidad morfológica y cromática en la representación de los ojos.

Ya en Mesopotamia destacan algunos ejemplos de esculturas sumerias en las que los ojos han sido elaborados con una depurada técnica para resaltar la mirada.

La estatua del Superintendente Ebih-II, hallada en el templo de la diosa IShtar situado en Mari (Siria), y conservada en el Museo del Louvre de París, está realizada en alabastro y presenta en sus ojos incrustaciones de lapislázuli en el iris y de conchas blancas para representar la esclera. También han quedado las huellas de un material desaparecido

que se hallaba alojado en las cejas. Por último, las pestañas estaban contorneadas con betún. Esta mezcla de materiales con colores contrastados contribuía a destacar el rostro y a dar una mirada más viva a la figura.

La civilización egipcia también nos ha dejado notables muestras de esculturas en las que se prestó un especial interés a la mirada y en las cuales se emplearon complejas técnicas para representar los ojos. Así, en las esculturas egipcias, estos estaban elaborados con una técnica muy variable que en algunos casos consistía en una representación muy básica de la esclera, el iris y la pupila, pero que en otros alcanzaba un extraordinario nivel de realismo. Estas diferencias podían ser simplemente a cambios de estilo que se producían con el tiempo o deberse a las diferentes funciones que poseían en cada caso. Asimismo, los materiales podían ser muy diversos, incluyendo cuarzo, piedra caliza, cristal de roca, obsidiana, hueso, marfil, cobre, resina, yeso, adhesivos y pigmentos (Strudwick, 2016). Dentro del arte funerario egipcio existen numerosas esculturas en las que se realizó un tratamiento realista de la mirada mediante la mezcla de distintos materiales que trataban de imitar la apariencia de los ojos humanos. Como muestra de esta preocupación por dotar de vida a las figuras a través de la mirada, se puede apreciar un notable realismo en los ojos de la estatua de madera del sacerdote lector Ka-aper, pertenece al Imperio Antiguo (2686-2181 a. C., Dinastía IV tardía).

Asimismo, son destacables las esculturas del Príncipe Rahotep y su esposa Nofret, halladas en la excavación de las tumbas mastabas de la cuarta dinastía (2613-2494 a. C.) Sus ojos, de apariencia casi humana, están creados mediante piezas redondas de cristal de roca y el cuarzo blanco que ambos contienen en sus cuencas, enmarcados en negro bajo las líneas que dan forma a los ojos (Strudwick, 2016).

El arte del vidrio fue muy avanzado en Egipto y también la orfebrería, gracias a la cual realizaron las complejas incrustaciones que se conservan hoy día en los ojos de sus esculturas (Seco Álvarez et al., 2003). Estos eran generalmente fabricados a partir de un fragmento de cuarzo opaco blanco (que representaba la esclerótica), habitualmente engarzado en metal, en cuyo centro se colocaba una pieza redonda de cristal de roca a modo de córnea. La pupila era excavada y pintada en el reverso.

Otro ejemplo notorio de arte funerario egipcio por la representación realista de su mirada lo constituye la emblemática escultura conocida como “el escriba sentado”, esculpida a mediados del III milenio a. C., Esta figura fue hallada en excelentes condiciones en la necrópolis de Saqqara, cerca de la antigua ciudad de Menfis. Los ojos están formados por una esclera de magnesita de color blanco con vasos sanguíneos de color rojo, sobre las cuales fue adherida una córnea de cristal de roca pulido en cuya cara posterior se pintó el iris (Enoch, 1999).

En los ritos funerarios egipcios, se utilizaron a menudo máscaras con una estética más naturalista, en las cuales la expresión y la mirada era realzada a menudo mediante incrustaciones de piedras semipreciosas, como en la máscara de Tutankamón (1336-1327 a. C.). En ella, los expresivos ojos almendrados están realzados con lapislázuli y el blanco de los ojos está hecho de cuarzo con incrustaciones de obsidiana en las pupilas. Además se añadió un toque de pigmento rojo en el borde de los ojos para crear una expresión más realista (Uda et al., 2007).

De forma similar, en la Máscara de Tuyu, (1390-1352 a.C) los ojos son incrustaciones de cuarzo blanco y obsidiana negra, mientras que las pestañas y las cejas están rodeadas de vidrio azul.

Era algo habitual que las cejas y las líneas que enmarcaban los ojos tuvieran un tono azulado o turquesa, color de la regeneración y la vida eterna. Estos tonos se hacían con incrustaciones de lapislázuli (importado de Afganistán, considerado superior al resto de los metales, incluso al oro y la plata) y vidrio e incluso veces se intentaba imitar con vidrio coloreado o loza (Lucas y Harris, 2011).

El proceso de elaboración de ojos en la escultura egipcia alcanzó un alto grado de virtuosismo técnico, hasta el punto de requerir una formación específica en los talleres donde se producían debido a su elevada complejidad. De hecho, una de las principales teorías sobre la ausencia del ojo izquierdo en el famoso busto de Nefertiti, creado hacia el 1340 a.C., apunta a que fue un modelo didáctico, ya que ese globo ocular nunca fue insertado en la órbita, según parece indicar la ausencia de rastros de adhesivo o de otros signos de haber estado alojado en ella. Esto podría deberse según algunos egiptólogos a que esta figura fue empleada por su creador, el famoso escultor Tutmosis, como modelo para enseñar a sus alumnos la técnica de inserción de ojos en las cuencas en este tipo de esculturas (Foster, 2008).

Durante la civilización griega y romana, hay también evidencias del uso de incrustaciones en los ojos de sus esculturas en las que empleaban oro, plata, hierro, hueso, marfil, ámbar, y otros materiales y las pintaban con esmaltes para realzar finos detalles. A los procedimientos fabriles ya conocidos en las civilizaciones precedentes, los griegos añadieron otras técnicas en el arte de la orfebrería. De esta manera, pudieron realizar en la mirada lo sobrenatural, agregando además cualidades simbólicas. La práctica de incrustar otros materiales en el bronce comenzó a principios de la antigua Grecia. Para crear estas esculturas utilizaban la técnica de la cera perdida, construyéndolas pieza a pieza y colocando incrustaciones de piedra en los ojos, a los cuales se les añadían aparte las pestañas. Incluso tallaban aparte los rizos del pelo y después se los pegaban. Se trataba de un procedimiento realizado con gran meticulosidad y destreza que les permitía obtener resultados de extraordinaria finura.

La escultura del auriga de Delfos, realizada en el 474 a. C por un autor desconocido, que se encuentra en el museo de Delfos, posee una profunda expresividad en la mirada. Es una de las esculturas más importantes del arte griego antiguo del período clásico temprano. En ella se usó esmalte blanco para los globos oculares. Para el iris se utilizó una piedra semipreciosa marrón, mientras que las pupilas de los ojos son negras. Las pestañas estaban hechas de pequeños alambres de cobre, y sus labios formados por delgadas placas de cobre rojizo (Cohen, 1991).

Los llamados bronce Riace constituyen otro magnífico ejemplo del cuidado y perfección con que eran elaborados los ojos en las esculturas del periodo clásico temprano en la antigua Grecia. Los ojos en la escultura conocida como bronce A son de marfil y poseen una cavidad para el iris, que no se ha conservado. Las pestañas y los dientes son de plata, mientras que los labios y las areolas mamarias son de cobre (Cohen, 1991).

Una técnica similar, basada en la incrustación de diferentes materiales en el bronce para crear los ojos de las esculturas, fue también utilizada por los romanos, siendo ejemplos de esta práctica, entre otros muchos, el busto conocido como Bruto Capitolino, creado entre los siglos IV-III a.C. y conservado en los Museos Capitolinos, o el retrato denominado Pseudo-Séneca, descubierto en Herculano y datado en el siglo I a.C. En algunos bustos romanos de bronce se han identificado incrustaciones de metales preciosos, mediante los cuales probablemente se pretendía resaltar el poder de los personajes retratados, además de indicar la jerarquía social. Así ocurre, por ejemplo, con el busto de bronce denominado “Retrato de un niño”, realizado hacia el 50 d. C., conservado en el Museo Metropolitano de Nueva York, cuyos ojos poseen incrustaciones de plata (The Metropolitan Museum of Art, s. f.).

Otro tipo de esculturas que propiciaron el desarrollo de técnicas de representación realista de los ojos son las efigies funerarias de los miembros de la realeza. Estas figuras fueron creadas en Europa a partir del siglo XIV para acompañar al féretro de la persona fallecida durante el entierro o el funeral en lugar de exhibir el cadáver, como solía ser costumbre antes de su invención, con los consiguientes problemas de putrefacción, especialmente en épocas de calor.

Estaban confeccionadas con cera de abejas, lo que permitía imitar de forma bastante verosímil de la piel humana y con un estilo realista, empleando pelucas, ojos de cristal y ropajes. En la abadía de Westminster se conserva una colección de estas obras que se utilizaron en las pompas fúnebres de diferentes reyes y reinas a partir de Eduardo III de Inglaterra. Una de estas efigies es la de Frances Teresa Stewart, Duquesa de Richmond y Lennox, de 1702 (Howgrave-Graham, 1953; Karydis et al., 2021).

La imaginería religiosa ha sido otro ámbito de la escultura que ha proporcionado diferentes claves para lograr una mirada de aspecto vivo en las figuras. Durante el renacimiento, surgen en Europa numerosos artistas que van a realizar esculturas religiosas con un alto grado de realismo. En muchos casos se tratan de tallas de madera policromada o elaboradas en barro cocido. En España es donde este estilo alcanzó su más alto nivel, a partir del trabajo de escultores como Alonso Berruguete, y Juan de Juni, en cuyas obras se puede observar un tratamiento muy detallado de los ojos, representados con un alto grado de naturalismo y expresividad.

El desarrollo posterior de la imaginería durante los siglos XVII y XVIII, impulsó la utilización de las técnicas de incrustación de vidrio para crear los ojos en las esculturas talladas en madera, así como el empleo de cabello y pestañas humanos, dientes de marfil y de nácar, prendas de vestir u otros accesorios. También es frecuente la incorporación de lágrimas de cristal para aportar una mayor expresividad a la obra (Roda Peña, 2009; Rodríguez Simón, 2009).

Algunos destacados imagineros de este periodo, como Juan Martínez Montañés y Juan de Mesa, pertenecientes a la escuela andaluza, y Francisco Salzillo, máximo exponente de la escuela murciana, crearon obras de un asombroso realismo en la mirada (Navarro Guillen, 2019; Sánchez Moreno, 1945).

La utilización de ojos de cristal en imaginería religiosa se ha mantenido hasta nuestros días.

A lo largo de los siglos XVI y XVII se hizo asimismo frecuente la elaboración para diferentes iglesias de esculturas de cera en las que se incorporaban en su interior reliquias óseas, a semejanza de los cuerpos incorruptos de algunos santos que se conservan en iglesias de distintos países, y que a menudo se recubrían con una capa de cera. Este tipo de obras, realizadas en cera de abejas policromada, solían incorporar pelo, ojos de cristal, pestañas, así como vestimenta y diferentes accesorios. La colocación de los globos oculares se realizaba sobre el molde donde se iba vertiendo o pincelando la cera policromada, una vez creados los párpados. Tras ubicarlos, se fijaban derramando cera sobre ellos hasta formar un bloque con el resto. Un ejemplo de este tipo de artefactos es la imagen de Santa Faustina, conservada en la Iglesia de San Juan Bautista, ubicada en Pasajes de San Juan, Gipuzkoa (Barrio Olano et al., 2016).

También existen múltiples ejemplos de este tipo de imágenes religiosas en Iberoamérica, tales como el cuerpo relicario de Santa Celeste, conservado en la Iglesia de Santa Teresa la Nueva (Ciudad de México) o el de San Clemente Flavio, que se encuentra en la Iglesia de el Carmen de San Ángel, ambas situadas en Ciudad de México (Bazarte Martínez, 2006; Sánchez Reyes et al., 2016).

Un caso particular de este tipo de esculturas son las cabezas relicario o bustos relicario, ejecutados igualmente mediante la técnica de la ceroplástica, cubriendo con la cera el cráneo del santo. En este tipo de figuras podían insertarse, del mismo modo que en los cuerpos relicario, ojos de cristal, pelo o pestañas, entre otros elementos (Ballestrero, 2018; Barrón García y Criado Mainar, 2015).

También en culturas orientales se pueden encontrar ejemplos de esculturas religiosas en las que se ha tratado de recrear de forma realista la mirada. En Japón, la técnica denominada “gyokugan”, originada en el periodo Kamakura (1185–1392), fue empleada en la creación de múltiples representaciones escultóricas de Buda, así como en otras figuras relacionadas con esta religión. En este periodo destacó el escultor Unkei (1151-1223), de la escuela Kei, quien, a diferencia de sus predecesores, dotó a sus esculturas de un notable realismo, detallando meticulosamente los pliegues de la ropa así como los pequeños detalles anatómicos del rostro y añadiendo ojos de cristal para potenciar la mirada (Suzuki, 2011). Entre los ejemplos más destacados de su arte se encuentran las esculturas de los asistentes de Fudō Myōō, en el Museo Koyasan Reihōkan, Koya (1197) o las famosas figuras de Mujaku Bosatsu y Seshin Bosatsu, ubicadas en el templo Kōfuku-ji de Nara, Japón (Iwao et al., 1995). Finalmente, merece la pena mencionar también la estatua de madera sentada de Aizen Myō-ō, realizada en 1710 (Período Edo, Año 7 de Hoe) por el escultor de imágenes budistas Kunai Hokkyo, situada en el Templo del Oeste.

Fuera del ámbito religioso, la técnica de la ceroplástica antes mencionada, incorporando a la cera policromada tanto ojos de cristal como cabello humano, entre otros elementos, fue utilizada durante los siglos XVII y XVIII, para la realización de retratos de bulto redondo de la realeza, personajes nobiliarios o del entorno cardenalicio. Esta

tradición fue especialmente desarrollada en Italia, donde se pueden encontrar notables ejemplos elaborados por escultores de renombre como Luigi Dardani, Angelo Gabriello Piò o Filippo Scandellari.

En el Museo del Prado se conservan dos bustos de aspecto casi hiperrealista atribuidos a Filippo Scandellari, confeccionados con cera, pelo, hueso, tela, y ojos de vidrio (Scandellari, s. f.).

Las colecciones de figuras de cera tuvieron su origen en el siglo XVII. Una de las primeras series de figuras de este material fue creada por el escultor Antoine Benoist (1632-1717) y exhibida en su casa de París con enorme éxito, pues recibió visitantes de diversas partes del mundo atraídos por el extraordinario realismo de las esculturas. Lo que más les llamaba la atención era que parecían vivas gracias a la carnosidad del material céreo y la mirada casi humana que aportaban los ojos de vidrio (Wellington, 2017).

Posteriormente, en 1770 Philippe Curtius, médico y ceroescultor que había ganado fama por sus figuras de aspecto realista, abrió su Gabinete de cera, que se convirtió en una exitosa atracción turística. Tras su fallecimiento, sus figuras pasaron a formar parte de la colección de Marie Tussaud, protegida suya que fundaría el museo de cera Madame Tussauds en Londres, el más famoso del mundo incluso en la actualidad. Sus esculturas estaban realizadas con una increíble minuciosidad y parecido con los retratados (Spies-Gans, 2017).

La industria de maniqués de moda para escaparates también demandó desde principios de siglo XX ojos de aspecto realista que eran añadidos a las figuras para dotarlos de un mayor naturalismo. Hasta finales del siglo XIX la ropa era mostrada en escaparates sobre torsos sin cabeza o extremidades. Sin embargo, en la exposición universal de París de 1884 se presentaron unos nuevos maniqués de fabricación alemana que estaban fabricados en cera con armazón de madera, cabello humano insertado en pequeños mechones, cejas, pestañas, ojos de cristal y dientes postizos o incluso naturales. Hacia 1920 este tipo de figuras se habían extendido notablemente en los comercios pese a su elevado peso, que llegaba incluso a superar los 100 kg y la poca resistencia de la cera a los golpes o al calor, que provocaba su fusión cuando recibían el sol directo en épocas de calor (Strege, 1999). Posteriormente, estos maniqués de cera fueron sustituidos por materiales mucho más ligeros y resistentes como el papel maché y más tarde diferentes tipos de plásticos y resinas.

En la década de 1930 algunos fabricantes de maniqués trataron de lograr que estos fueran los más parecidos posible a las personas de carne y hueso, suscitando incluso diversas críticas hacia ellos porque representaban también las imperfecciones con excesivo naturalismo, tales como pecas o arrugas en la cara (Schneider, 1997).

En estos maniqués, los ojos también debían parecer humanos y por este motivo, utilizaron prótesis de cristal similares a las que empleaban los oftalmólogos para personas que habían perdido un ojo y les añadieron patas de gallo, pestañas y otros detalles. Un ejemplo destacado fue el de Cinthya, figura de mujer creada en escayola por Lester Gaba, un escultor norteamericano que produjo una serie de maniqués de gran naturalismo conocidos como “las chicas Gaba” (Staiti, 2020).

Diferentes tendencias se han ido sucediendo desde entonces pero actualmente, los maniqués más realistas suelen guardar un equilibrio entre lo verosímil y lo ideal. Así, por ejemplo, evitan representar por lo general las arrugas, por ejemplo, las que aparecen con la edad alrededor de los ojos.

Maniqués parecidos a los que se usaban para los escaparates también fueron empleados en museos etnográficos para representar diferentes etnias y culturas (Schneider, 1997).

Otro ámbito de la escultura donde se utilizaron ojos de cristal para dotar de mayor realismo a las figuras fue el de la docencia de la anatomía. Los problemas para realizar disecciones en las épocas de calor, hicieron necesaria la creación de modelos anatómicos fieles al natural, que fueron elaborados a partir del siglo XVII en cera de abejas policromada. Muchas de estas obras incorporaban cabello humano y ojos de cristal para lograr una mayor verosimilitud. La más importante colección de este tipo de trabajos se encuentra en el Museo de Ciencias Naturales La Specola de Florencia, siendo uno de los más insignes artífices Clemente Susini (1754–1814) (Riva et al., 2010).

Las muñecas de juguete han sido también figuras asociadas a la evolución de los ojos artificiales. Aunque se han hallado este tipo de objetos en yacimientos de culturas milenarias, es a partir del siglo XIX, con el inicio de su fabricación industrial, cuando estos juguetes se popularizaron. Para su elaboración, se utilizaron muy diversos materiales, como la madera, el papel maché, la porcelana o la cera. Ya en esa época, los modelos más sofisticados incorporaban cabello humano y también ojos de vidrio o cristal, dientes de bambú o porcelana, así como ropajes y accesorios muy elaborados (Montiel Alvarez, 2015). Posteriormente, en el siglo XIX estas materias dejaron paso a diferentes tipos de plásticos (Robson Strahlendorf y Tomlinson, 1990).

En los años 60, el surgimiento del movimiento hiperrealista y su llegada al campo de la escultura de la mano de artistas como Duane Hanson (Minnesota, 1925-1996), potenció la utilización de materiales que se asemejasen a los que componen el cuerpo humano (Rühse, 2019). Así, se emplearon la resina transparente o el cristal para crear los globos oculares y diferentes tipos de siliconas y resinas para la piel, alcanzándose niveles de realismo nunca antes conseguidos. Otros escultores destacados de este movimiento son: Ron Mueck, Sam Jinks, Patricia Piccinini o John de Andrea (Rühse, 2019). Todos ellos incorporan en sus obras ojos de extraordinario realismo realizados principalmente en resina mediante técnicas de moldeo.

En el campo cinematográfico, la necesidad de crear efectos especiales impactantes y creíbles, propició también el desarrollo de las técnicas de escultura hiperrealista para la elaboración de prótesis que se pudiesen aplicar sobre los actores con el fin de modificar su apariencia, o bien de esculturas que pareciesen humanas o representasen con una alta verosimilitud a otros seres vivos reales o imaginarios. Nuevamente, los ojos elaborados con distintos tipos de resinas o los ojos de cristal se emplearon para dar vida a estas creaciones. Además, la necesidad de simular el movimiento natural de la mirada, hizo que se desarrollaran gracias a la animatrónica multitud de mecanismos para girar los globos oculares o mover los párpados. Algunos ejemplos notables de este tipo de figuras podemos encontrarlos en producciones tan conocidas como Star Wars, Jurassic park, Terminator,

Predator, El exorcista, La Cosa, Gremlins o El muñeco diabólico, entre otros muchos, que impactaron en el público por la verosimilitud de sus escenas, en las que muñecos dotados de mecanismos robóticos realizaban complejos movimientos de los ojos, las cejas y los párpados, incluyendo incluso en algunos casos contracción de la pupila (Rickitt, 2006).

Hoy en día, la constante evolución de la robótica ha dado lugar también a androides con apariencia humana aprovechando muchos de los conocimientos derivados de disciplinas como la escultura hiperrealista o los efectos especiales empleados en el cine de acción real. Muchos de ellos incorporan pelo natural, piel de apariencia humana y una mirada vivaz (Hofree et al., 2014). Algunos de los androides más avanzados son: Sophia (Hanson Robotics), Erica, (Intelligent Robotics Laboratory), Junko Chihira (Toshiba) o Jia Jia (University of Science and Technology of China). No obstante, todavía hay mucho que mejorar en este tipo de dispositivos y posiblemente el mayor reto para el futuro sea lograr unos movimientos oculares y palpebrales que sean indistinguibles de los que realiza un ser humano, así como diseñar materiales que se deformen en respuesta al movimiento de forma parecida a como lo hace la fina y delicada piel que cubre los párpados. Dentro de los movimientos de los ojos, aquellos que rotan los globos oculares para cambiar la dirección de la mirada se han reproducido con cierta verosimilitud en diferentes proyectos, incluso algunos de ellos poseen dispositivos de seguimiento, de forma que los ojos pueden perseguir objetos en movimiento ubicados en el campo de visión (Wijayasinghe et al., 2019).

Otro campo en el que se han logrado grandes avances en la creación de ojos artificiales de gran realismo es el de las prótesis oculares para pacientes que han perdido un ojo o sufrido graves lesiones en él.

El ser humano lleva diseñando prótesis oculares desde la antigüedad para ocultar defectos producidos por patologías oftalmológicas. Algunas de estas prótesis primitivas se creaban con materiales como la madera, metales (oro o plata) o piedras preciosas, siendo su finalidad estética. El desarrollo de este tipo de piezas ha propiciado también un avance en las técnicas que los escultores han empleado para la representación de los órganos de la visión.

Aunque no tenemos evidencias directas de su utilización en la prehistoria, las prótesis oculares posiblemente fueron utilizadas por el ser humano desde hace miles de años pues se han encontrado restos óseos de individuos con patologías oculares severas, como tumores o traumatismos orbitarios, que eran susceptibles de recibir algún tipo de tratamiento estético. Además, se sabe que las antiguas civilizaciones de Egipto y Mesopotamia conocían y aplicaban distintos tratamientos para algunas de las enfermedades oftalmológicas más frecuentes (Escudero-Villanueva, 2017).

La prótesis ocular más antigua conocida, datada al inicio del III Milenio a.C., fue hallada en una tumba de la necrópolis iraní de Shahr-i-Sokhta. Pertenecía a una mujer de 32-36 años, en cuya órbita izquierda, mostraba una media esfera perfecta de aproximadamente tres centímetros de diámetro. Se desconoce el material con el que se construyó, pero los investigadores suponen que se utilizó madera en el núcleo recubierta de un material blando, seguramente pasta de alquitrán y grasa animal.

Esta prótesis ocular, mostraba un elevado perfeccionamiento técnico. Su superficie estaba presumiblemente recubierta de pintura blanca, imitando la esclera, ya que se han encontrado restos de esta fina película en algunas zonas. Además, su creador se valió de diversas incisiones y finísimas hebras de oro para imitar las venas y en el centro realizó una circunferencia, a modo de pupila (Moghadasi, 2014).

Posteriormente, existen evidencias del uso de prótesis oculares en la civilización egipcia, empleándose para su construcción diversos materiales como bronce, cobre, oro, cerámica o piedras preciosas (Patil et al., 2008). Este tipo de ojos artificiales solían incorporar también los párpados en el mismo bloque e iban unidos a una tela de color similar al de la piel (Dyer, 1980).

En América, los incas utilizaron mayoritariamente el oro para este tipo de prótesis, posiblemente por su abundancia en la región y por la facilidad para trabajar este metal (Dyer, 1980).

En épocas más modernas, los sopladores de vidrio venecianos del siglo XVI construyeron ojos artificiales de este material, lo que permitió el desarrollo de las técnicas de fabricación y el conocimiento de su comportamiento clínico.

El primer autor en hablar de prótesis oculares fue el cirujano francés Ambroise Paré (1510-1590), quien describió dos tipos diferentes: el Hyplépharon y el Eclépharon. El primero se alojaba en el saco conjuntival, por detrás de los párpados, y el segundo, era un parche que cubría la cavidad orbitaria, sujeto a la cabeza con una cinta, en el que se pintaban tanto el ojo como los párpados (Sánchez González et al., 2012). Paré marcó un hito en la historia de las prótesis oculares al diseñar un novedoso modelo de forma cóncava, parecida a una concha o cascarón, anticipo de las prótesis modernas. Estas eran generalmente de oro o plata pintados, aunque también utilizó vidrio y porcelana (Hernigou, 2013).

En el siglo XIX, el alemán Ludwig Muller-Uri (1811- 1888), un fabricante de ojos de muñecos, alcanzó un alto grado de realismo en sus piezas elaboradas en cristal, lo que llamó la atención del oftalmólogo Heinrich Adelman (1807-1884), quien se puso en contacto con Muller, para proponerle la creación de prótesis oculares para personas. Muller-Uri introdujo varios avances significativos en la fabricación de ojos de cristal, incluyendo un método nuevo para pintar el iris y las prótesis de cristal de doble pared (Raizada y Rani, 2007). Su labor fue posteriormente continuada por sus descendientes. El cristal siguió siendo el material más frecuentemente utilizado hasta la Segunda Guerra Mundial, cuando la dificultad para adquirir ojos de este material procedentes de Alemania obligó a buscar otras opciones comenzándose a usar un material acrílico de uso dental conocido como metacrilato de metilo (Patil et al., 2008).

Debido a las complicaciones médicas derivadas del uso de metacrilato de metilo, este ha sido paulatinamente sustituido por la hidroxiapatita, más biocompatible y que asegura una mejor integración con las estructuras remanentes tras la enucleación, permitiendo incluso realizar movimientos oculares (Shields et al., 1994).

Finalmente, otro de los avances tecnológicos destacables en la fabricación de ojos artificiales, y que puede ser de utilidad en la creación de ojos hiperrealistas para esculturas, es la utilización de fotografía digital para capturar el color del iris del ojo

sano del paciente con el fin de imprimirlo y lograr una copia fidedigna por un método alternativo a la pintura manual empleada tradicionalmente (Artopoulos et al., 2006; Jain et al., 2010; Walshaw et al., 2018; Zoltie et al., 2021).

Todos los adelantos logrados a lo largo de la historia en los diferentes ámbitos mencionados anteriormente en los que se han fabricado ojos artificiales, han derivado asimismo en un notable perfeccionamiento técnico en el campo de la escultura, y especialmente en el hiperrealismo, que ha permitido obtener figuras con una asombrosa naturalidad en la mirada. Hasta hace unos años, lo más habitual ha era elaborar los ojos de las figuras empleando técnicas tradicionales de moldeo y pintura. Sin embargo, al igual que en otros campos del diseño y de la producción industrial, las tecnologías de digitalización, modelado e impresión 3D han sido introducidas en los procesos de creación escultórica durante las últimas décadas y recientemente han posibilitado la mejora de los flujos de trabajo en la fabricación de ojos de apariencia real.

Como se ha comentado previamente, ha sido en el ámbito de la industria cinematográfica donde estas herramientas se han aplicado con mayor frecuencia debido al elevado coste que inicialmente tenían los materiales necesarios para su uso, que no hacían posible su popularización. Sin embargo, conforme los precios se han ido reduciendo, estas tecnologías han comenzado paulatinamente a ser utilizadas en producciones más modestas, resultando incluso asequibles hoy en día para aquellos artistas plásticos que deseen incorporarlas en sus procesos de creación de obra personal. Desafortunadamente, la formación y la experiencia relacionada con el uso de este tipo de herramientas de estos profesionales son insuficientes en muchos casos debido a que hasta fechas recientes su coste era prohibitivo. Por ese motivo, resulta conveniente explorar y divulgar todos los métodos posibles de trabajo que permitan el aprovechamiento máximo de esta tecnología en los diferentes campos de la escultura con el fin de mejorar el proceso creativo y los resultados obtenidos mediante su aplicación.

2. Metodología

En este artículo exponemos una experiencia práctica de elaboración de unos ojos hiperrealistas empleando un método constructivo mixto, digital y artesanal, mediante el cual se pretende optimizar el flujo de trabajo, mejorando los tiempos de ejecución y obteniendo un resultado de alta calidad que permite representar con extraordinaria precisión los detalles anatómicos más delicados.

2.1 Diseño e impresión 3D del ojo

En primer lugar se procedió a elaborar cada una de las estructuras anatómicas a representar en una malla 3D de poca resolución, también conocida como malla base o modelo de baja poligonización, con el fin de establecer un punto de partida básico sobre el cual ir añadiendo progresivamente detalles más finos (Fig. 1A, B y C). Esta tarea se realizó con ayuda del programa Autodesk 3ds Max 2021.

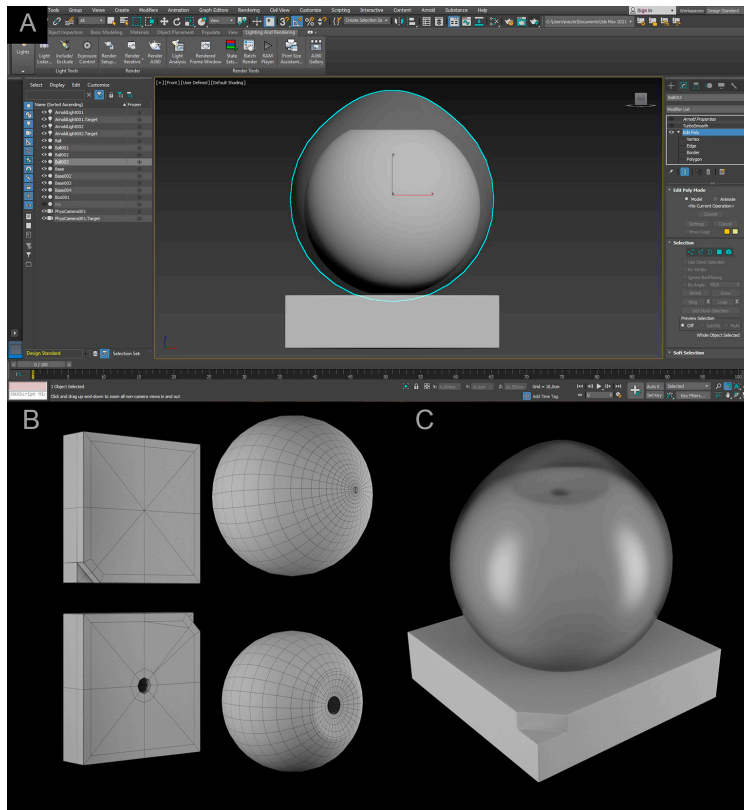


Figura 1. Modelado 3D del globo ocular: A) En la imagen se muestra el núcleo que representa el globo ocular, así como otra pieza de mayor diámetro para crear la cubierta exterior de la esclera y la córnea; B) Modelo 3D del ojo mostrando la malla poligonal del globo ocular (abajo) y cubierta exterior (arriba); C) Render del modelo digital. (Imagen de elaboración propia).

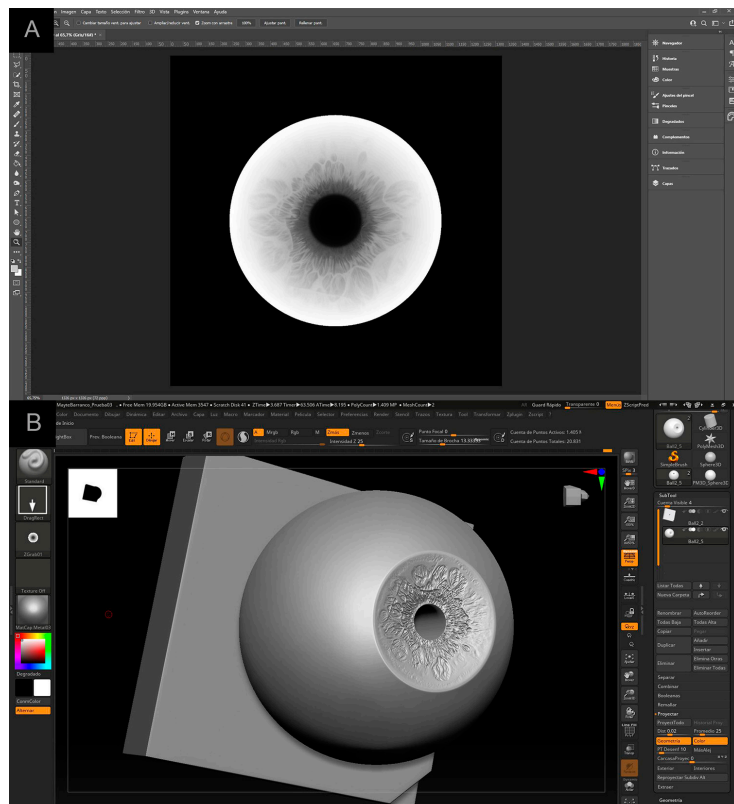
La ventaja de emplear los programas de modelado digital es que permiten que las medidas de los modelos sean exactas. De esta manera, se pueden establecer ajustes más precisos en cuanto a su tamaño. En cambio, en un proceso más artesanal, la mano está siempre más expuesta al fallo o al accidente y, por tanto, se pueden producir errores que obliguen incluso a repetir el proceso.

Las medidas empleadas para crear el modelo digital se basaron en las dimensiones habituales de un ojo humano de edad adulta, ya que se pretendía crear unos ojos para una figura de tamaño natural. Aunque habitualmente, el globo ocular se construye con un tamaño ligeramente mayor al deseado para compensar el desgaste producido por el pulido superficial, en este caso, al emplear una resina para su cobertura externa que no precisa lijado, no ha sido necesario aumentar el diámetro. El globo ocular se modeló con un diámetro de 24 mm, la pupila mide 3 mm y el iris 12,5 mm. Alrededor de este conjunto se creó una esfera concéntrica con 4 mm más de diámetro para representar la superficie de la esclera y la córnea. El polo anterior de esta última malla se hizo un poco más sobresaliente por delante del iris para que representara más fielmente la forma lenticular de la córnea.

Para crear estas formas, se partió de primitivas esféricas sobre las que se ejecutaron diferentes operaciones de desplazamiento y extrusión de polígonos para obtener las diferentes estructuras previamente comentadas. Una vez completado el modelado de estas

piezas, se aplicó el modificador Turbosmooth para suavizar las superficies aunque esto también se podría haber realizado posteriormente en el programa de modelado orgánico, Pixologic Zbrush 2021, subiendo las subdivisiones de la geometría. Al aumentar el nivel de división de la malla, el número de polígonos originado fue notablemente superior y esta alcanzó una gran resolución, lo que permitió crear sobre ella pequeños detalles, como las fibras del iris. Para ello, se utilizó un mapa de tipo alpha, imagen bidimensional en escala de grises que es interpretada por el programa de escultura digital traduciendo la claridad u oscuridad de cada píxel en un mayor o menor grado de desplazamiento perpendicular a la superficie de la malla tridimensional (Fig. 2A). La imagen alpha se creó tomando una macrofotografía frontal de un ojo humano con una cámara réflex Canon EOS 7D y un objetivo Canon 50mm, macro f/1.8 II, empleando un trípode para estabilizar el conjunto y un cable disparador para evitar trepidaciones. Una vez revelado el archivo fotográfico original en formato RAW en el programa Adobe Camera Raw, se editó en Adobe Photoshop versión 22.3.0 para convertirla a escala de grises y aumentar el contraste, tras lo cual se guardó en formato TIFF con una resolución de 4016 x 4016 píxeles por pulgada. Esta imagen alpha puede asignarse a diferentes herramientas o pinceles del software de modo que su acción sobre el modelo 3D se ve modificada, creando un patrón de relieve basado en dicha imagen cada vez que se aplica sobre un área de la figura (Fig. 2B).

Figura 2: Creación del iris en el modelo 3D: A) Imagen alpha del iris realizada en el programa de Adobe Photoshop versión 22.3.0; B) Se muestra el detalle obtenido a partir del desplazamiento de la geometría, una vez aplicada la imagen alpha en el programa Zbrush (Imagen de elaboración propia).



Durante este proceso es importante exagerar la profundidad de las cavidades, para que en la impresión se obtenga el máximo detalle por lo que se aumentó la fuerza del pincel lo suficiente para crear un relieve ligeramente superior al anatómico. Es habitual realizar esto cuando los tamaños de impresión son excesivamente pequeños con el fin de que se visualicen mejor. Debemos tener en cuenta, que el diámetro de un iris puede llegar a tener sólo 12-13mm y necesitamos que esta área sea representada con la máxima fidelidad.

Una vez terminados los modelos 3D, se procedió a optimizar la malla en Zbrush aplicando un algoritmo de reducción poligonal denominado Decimation master, que simplifica la malla de forma muy notable pero conservando en gran medida su apariencia y sus detalles superficiales. De esta forma, el archivo obtenido es más fácilmente manejable por el programa de laminado 3D que se requiere para preparar el modelo de cara a su impresión.

Para la obtención de la reproducción en resina del ojo, se utilizó una impresora 3D de estereolitografía enmascarada (MSLA), modelo ELEGOO Mars 2. Este tipo de dispositivos constan de una matriz de fuentes de luz led ultravioleta (UV), ubicada en el fondo de un tanque de resina líquida, que produce su curado o solidificación capa a capa por debajo de una base de impresión a medida que ésta asciende. La característica más destacada de este sistema es que entre la fuente emisora de luz UV y la base de impresión se dispone una máscara digital de cristal líquido que deja pasar la luz UV en cada capa únicamente en las zonas que deben consolidarse. Esta máscara dibuja la sección del objeto que debe reproducirse para cada capa, curándose toda ella en apenas 2 segundos. Esta es una diferencia esencial con las impresoras de estereolitografía convencionales, que disponen de un solo haz UV que debe recorrer toda la base de impresión para ir curando la resina.

Esta máquina, además cuenta con un LCD de 2K con fuente de luz monocromática que permite imprimir al doble de velocidad que las de tipo RGB tricromáticas, logrando además unos resultados más estables.

Para imprimir un modelo 3D es preciso emplear un programa de laminado en el que permite establecer los parámetros de impresión y generar los soportes necesarios para sustentar las partes de la figura que no tienen contacto directo con la base de impresión o con otra estructura de la escultura situada por debajo de ellas.

El software de laminado utilizado para imprimir cada una de las partes de que constaba el ojo fue Chitobox v1.8.1. En él se configuró una altura de capa de 0,05mm y un tiempo de exposición de 2,5s. La velocidad de elevación se ajustó a 80 mm/min y la velocidad de retracción a 210 mm/min (Fig. 3)

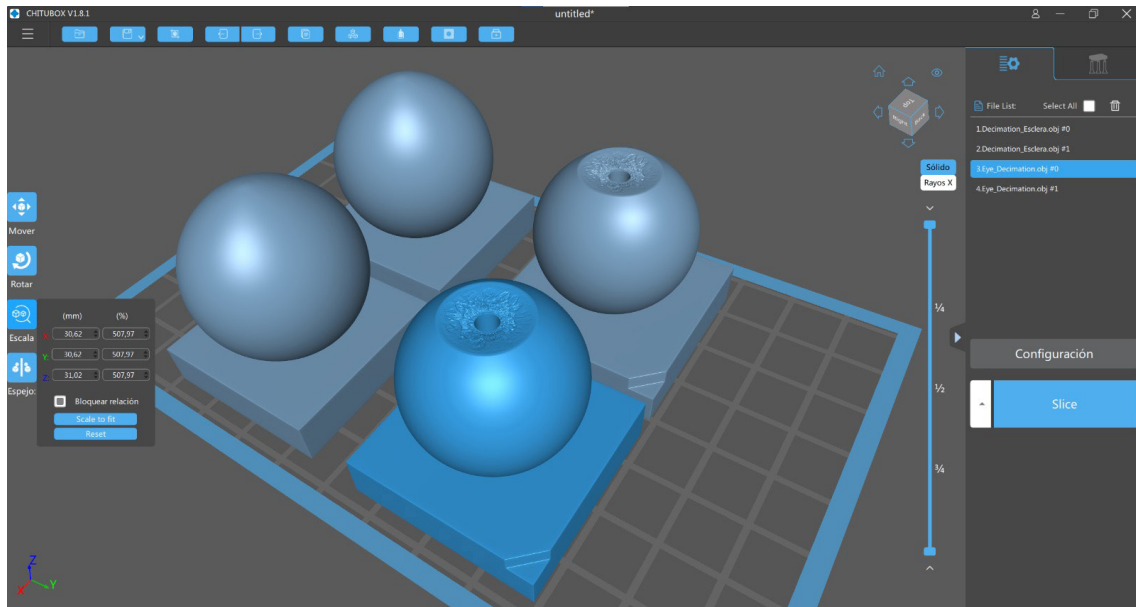


Figura 3. Importación y parametrización de los modelos 3D en el software Chitubox v1.8.1 (Imagen de elaboración propia).

El archivo resultante se guardó en una tarjeta de memoria SD que se insertó en la ranura de la impresora 3D para proceder a la reproducción. El tiempo total de impresión fue de 1h y 55min y se emplearon 67,62 ml de resina fotopolimerizable rápida ELEGOO standard (Fig. 4).

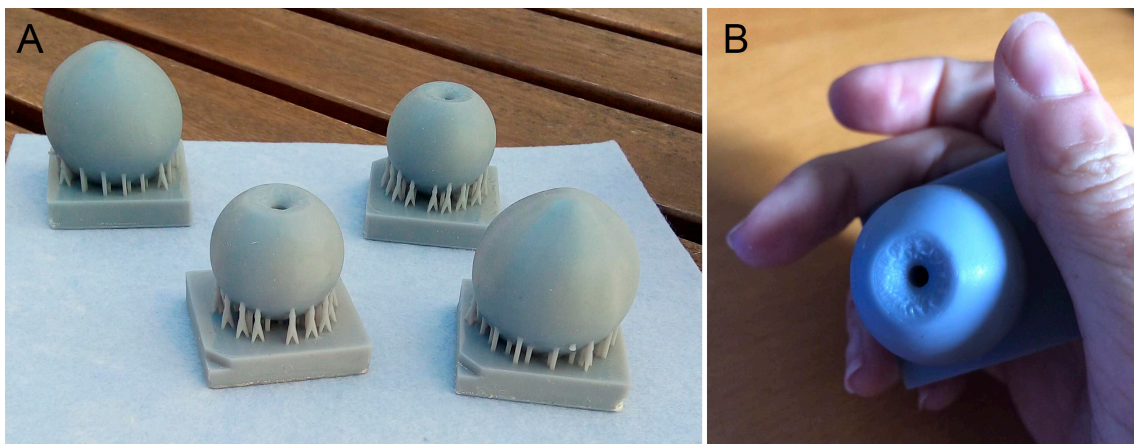


Figura 4. Muestras de los modelos reproducidos en resina fotopolimerizable (Imagen de elaboración propia).

DOI: <https://dx.doi.org/10.17561/rtc.23.6977>
Investigación

2.2 Elaboración del molde del núcleo y vaciado en resina

A partir de las copias impresas de ambas figuras, núcleo del globo ocular y su cubierta exterior, se obtuvieron moldes con silicona de estaño Feroxa Silastic 3481 de 1Kg con catalizador S83 y empleando el método de moldeado por colada (Fig. 5).

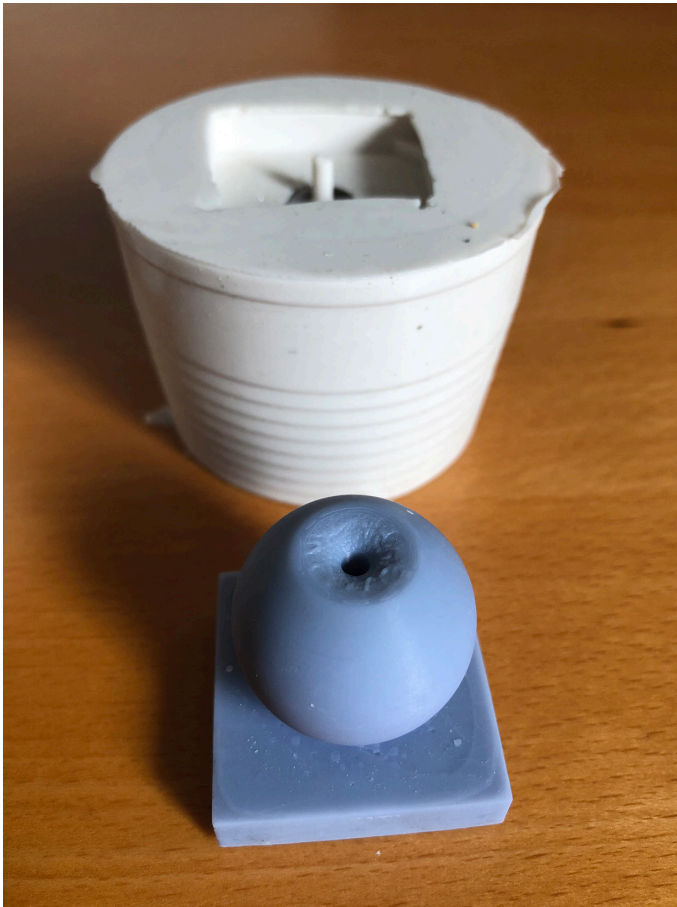


Figura 5. Moldes de silicona de estaño, obtenidos tras realizar el método de moldeado por colada y sus respectivos positivados en resina (Imagen de elaboración propia).

2.3 Pintado del iris y creación de los vasos sanguíneos de la esclera

En primer lugar, se aplicó una base de pintura negra con aerógrafo sobre el área del iris. De esta manera se consigue un fondo sobre el que pintar y el contorno se mantiene ligeramente difuminado (tal y como es el iris humano). Si el contorno fuera nítido no se conseguiría el efecto realista.

Se tomó como referencia una fotografía de un iris real para crear la paleta cromática. Esta imagen fue la misma empleada durante el proceso de creación del mapa alpha. Con el fin de lograr la máxima precisión durante el proceso de policromado del iris, se utilizaron pinceles extremadamente finos. Aunque generalmente se emplean pinturas

acrílicas, para este estudio se han elegido pinturas con base de alcohol, libres de ácidos. Se tomó esta decisión para comprobar la compatibilidad química con la resina y poder analizar la durabilidad del conjunto.

La aplicación de pintura se realizó según la técnica habitual en tres fases, trabajando empleando en las primeras capas colores más oscuros y en las siguientes capas tonos progresivamente más claros. Dependiendo del resultado que se quiera obtener, también es posible organizar las capas en sentido inverso, de colores claros a oscuros (Fig. 6).



Figura 6. Aplicación de pintura con base de alcohol a los modelos de resina (Imagen de elaboración propia).

Tras terminar el iris, se pintaron las áreas del globo ocular correspondientes a la esclera en unas tonalidades de amarillo anaranjado y posteriormente se cubrieron por una segunda capa de color gris claro con una ligera transparencia. Luego, se recreó la red de vasos sanguíneos de la esclera utilizando unas pequeñas hebras de hilo rojo. Estas pueden ser de algodón o de seda y se pegan con una pequeña cantidad de resina epoxi transparente.

2.4 Creación de la cubierta externa del ojo

Una vez que todas las piezas estuvieron pintadas, se recubrieron de resina transparente para recrear el brillo característico de la capa externa de la esclera y de la córnea. Para

ello, se realizó una mezcla conteniendo dos partes en volumen de resina transparente TRANSLUX D151 FAST por una del correspondiente catalizador, y se vertió rápidamente en los moldes de la cubierta externa para introducir en ellos a continuación las piezas pintadas de los globos oculares con mucho cuidado. Al sumergirlas, el orificio central creado para la pupila permite expulsar el aire y la resina sobrante.

Transcurridas 24 horas de catalización a temperatura de 25 ° C, la pieza estuvo lista para desmoldear y se procedió a extraer los positivos.

Las ventajas que presenta la resina empleada, es que es completamente transparente, lo que permite optimizar los tiempos de trabajo, sin tener que realizar el arduo trabajo de lijar las piezas.

En el proceso tradicional, se suele pulir con lijas de agua de distinto granulado y se continúa puliendo las superficies con pasta de cera en varias etapas. Todo este proceso es muy trabajoso y no se finaliza hasta conseguir un efecto completamente translúcido. Por este motivo, se suele exagerar la medida del grosor de la cubierta externa del ojo en su diseño para compensar la pérdida de volumen producida durante la fase de pulido.

Además, esta resina es resistente a los rayos ultravioleta, lo que significa que tarda más en amarillear que una resina de poliéster o una resina epoxi. Para conseguir la máxima transparencia, es importante ceñirse a los porcentajes recomendados por el fabricante y no aumentarlos, ya que podría coger un ligero tono amarillento.

3. Resultados



Figura 6. Aplicación de pintura con base de alcohol a los modelos de resina (Imagen de elaboración propia).

Mediante el procedimiento previamente descrito se han obtenido dos reproducciones hiperrealistas de ojos humanos de tamaño real mostrando un elevado grado de detalle volumétrico y cromático, especialmente en el iris. Ambos reflejan fielmente la forma del diseño creado mediante modelado 3D y no se aprecia en su superficie ningún rastro de las capas o puentes de impresión (Fig. 7).

En el iris, las pequeñas inflexiones creadas en su superficie mediante el programa de escultura digital se han conservado gracias al empleo de finas veladuras de pintura diluida durante la fase de policromado para evitar empastar los surcos.

El acabado superficial brillante recreando de forma bastante fiel la capa de lágrima que recubre tanto la esclera como la córnea se ha logrado por medio de una cubierta exterior de resina transparente.

4. Conclusiones

Las técnicas digitales permiten una mayor exactitud en cuanto a las medidas de diámetro, lo que hace que las piezas al imprimirlas encajen a la perfección a diferencia de lo que ocurre en los procesos tradicionales, en los que requieren frecuentemente realizar correcciones y ajustes.

La ventaja de emplear los programas de modelado digital es que asegura que el resultado obtenido sea preciso, fiable y fácilmente repetible. En cambio, un proceso artesanal siempre está expuesto al fallo humano o al accidente, por tanto, puede dar lugar a errores que obligarían a repetir incluso el proceso, con el gasto económico que esto conlleva debido al coste elevado de los productos que suelen emplearse, así como la pérdida de tiempo asociada que en ocasiones puede significar la pérdida de un cliente. Además, al tratarse de modelos digitales, pueden ser fácilmente modificados en tamaño o forma, permitiendo crear infinitas variantes a partir de una malla base sin la necesidad de modelar de cero una nueva matriz. De esta manera, se pueden crear bibliotecas de modelados para diferentes aplicaciones.

Hasta hoy, las impresoras de resina siguen siendo las que alcanzan un mayor grado de detalle, a diferencia de las impresoras que emplean la tecnología de modelado por deposición fundida (FDM) y esto se ha podido comprobar durante el caso que exponemos, ya que solo se pudieron reproducir los finos detalles del iris mediante impresoras de resina líquida y no mediante impresoras de filamento.

Por otro lado, la introducción en el flujo de trabajo de los últimos sistemas de impresión 3D hace que los procesos de producción sean menos laboriosos y se consiga un mayor registro de los detalles, aunque sería deseable que los tiempos de velocidad de impresión se reduzcan todavía más.

Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento a Bárbara Alonso Martínez por su apoyo y asesoramiento técnico durante la realización del estudio.

References

- Artopoulos, Ioli Ioanna, Montgomery, Patricia C., Wesley, Peggy J. y Lemon, James C. (2006). Digital imaging in the fabrication of ocular prostheses. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 95(4), 327-330. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2006.01.018>
- Ballestrero, Roberta. (2018). *The Dead in Wax: Funeral Ceroplastics in the European 17th-18th Century Tradition*. The University of Houston Libraries, 1(1), 13. <https://uh-ir.tdl.org/handle/10657/3001>

- Barrio Olano, Maite, Berasain Salvarredi, Ion, Muñiz Petralanda, Jesús, Miguélez Valcarlos, Ignacio, Timón Tiemblo, María Pía y Azua Brea, Itziar. (2016). Propuesta de evaluación cultural de Bienes Muebles de Patrimonio religioso. Ge-conservación, ISSN-e 1989-8568, No. 9, 2016, pág. 45, 9, 45. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5590160&info=resumen&idioma=SPA>
<https://doi.org/10.37558/gec.v9i0.327>
- Barrón García, Aurelio A. y Criado Mainar, Jesús. (2015). Bustos-relicario napolitanos de 1608 en la Colegiata de Borja. Cuadernos de Estudios Borjanos, 58, 73-113.
- Bazarte Martínez, Alicia. (2006). Veneración de reliquias y cuerpos de cera en los días de los Fieles Difuntos y Todos Santos. Patrimonio cultural y turismo 16.
- Cohen, Beth. (1991). Perikles' Portrait and the Riace Bronzes: New Evidence for «Schinocephaly». The Journal of the American School of Classical Studies at Athens, 60(4), 465-502. <https://doi.org/10.2307/148268>
- Enoch, Jay. (1999). First known lenses originating in Egypt about 4600 years ago. Documenta Ophthalmologica, 99, 303. <https://doi.org/10.1023/A:1002747025372>
- Escudero-Villanueva, Alberto. (2017). Oculoplastia en la prehistoria y la antigüedad. Afecciones de párpados, órbita y vías lagrimales y su tratamiento antes de la caída del imperio romano de occidente [Universidad Autónoma de Madrid]. <https://repositorio.uam.es/handle/10486/681059>
- Foster, Karen Polinger. (2008). The Eyes of Nefertiti. En M. Ross (Ed.), From the banks of the Euphrates: Studies in honor of Alice Louise Slotsky. Pennsylvania State University Press.
- Hernigou, Philippe. (2013). Ambroise Paré's life (1510-1590): part I. International Orthopaedics, 37(3), 543. <https://doi.org/10.1007/S00264-013-1797-5>
- Hofree, Galit, Ruvolo, Paul, Bartlett, Marian Stewart y Winkielman, Piotr. (2014). Bridging the Mechanical and the Human Mind: Spontaneous Mimicry of a Physically Present Android. PLOS ONE, 9(7), e99934. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099934>
- Howgrave-Graham, Robert Pickersgill. (1953). Royal portraits in effigy: some new discoveries in Westminster Abbey. Journal of the Royal Society of Arts, 101(4900), 465-474. <http://www.jstor.org/stable/41365498>
- Iwao, Seiichi, Iyanaga, Teizō, Ishii, Susumu, Yoshida, Shōichirō, Fujimura, Jun, Fujimura, Michio, Yoshikawa, Itsuji, Akiyama, Terukazu y Iyanaga, Shōkichi. (1995). Dictionnaire historique du Japon (Vol. 20). Maison Franco-Japonaise. https://www.persee.fr/doc/dhjap_0000-0000_1995_dic_20_1_951_t1_0023_0000_4
- Jain, Sidharth, Makkar, Sumit, Gupta, Sharad y Bhargava, Akshay. (2010). Prosthetic rehabilitation of ocular defect using digital photography: A case report. Journal of Indian Prosthodontist Society, 10(3), 190-193. <https://doi.org/10.1007/s13191-010-0027-8>
- Karydis, Christos, Kyriazi, Evangelia y Staka, Christina-Alkisti. (2021). Clothed wax effigies: construction materials, challenges and suggestions for preventive conservation. Conservar Património, 36, 62-81. <https://doi.org/10.14568/cp2020006>

- Lucas, Alfred y Harris, John Richard. (2011). *Ancient Egyptian materials and industries*. Dover Publications.
- Moghadasi, Abdorreza Naser. (2014). Artificial Eye in Burnt City and Theoretical Understanding of How Vision Works. *Iranian Journal of Public Health*, 43(11), 1595. /pmc/articles/PMC4449516/
- Montiel Alvarez, Teresa. (2015). La muñeca a lo largo del siglo XIX. 19, 166-177. <http://www.aacademica.org>.
- Navarro Guillen, Bernardino. (2019). La expresión del dolor en la imaginería religiosa. En Alejandro Cañestro Donoso (Ed.), *SVMMA STVDIORUM SCVLPTORICAE In memoriam Dr. Lorenzo Hernández Guardiola* (pp. 153-156). Instituto Alicantino de Cultura Juan Gil-Albert. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7669799.pdf>
- Patil, Sanjayagouda, Meshramkar, Roseline, Naveen, Bandlar y Patil, Narendra. (2008). Ocular prosthesis: A brief review and fabrication of an ocular prosthesis for a geriatric patient. *Gerodontology*, 25(1), 57-62. <https://doi.org/10.1111/j.1741-2358.2007.00171.x>
- Raizada, Kuldeep y Rani, Deepa. (2007). Ocular prosthesis. En *Contact Lens and Anterior Eye* (Vol. 30, Número 3, pp. 152-162). <https://doi.org/10.1016/j.clae.2007.01.002>
- Rickitt, Richard. (2006). *Designing Movie Creatures And Characters: Behind the Scenes With the Movie Masters*. 2006, 176. https://books.google.com/books/about/Designing_Movie_Creatures_and_Characters.html?hl=es&id=iLnhGidN8Y8C
<https://doi.org/10.4324/9780080927435>
- Riva, Alessandro, Conti, Gabriele, Solinas, Paola y Loy, Francesco. (2010). The evolution of anatomical illustration and wax modelling in Italy from the 16th to early 19th centuries. En *Journal of Anatomy* (Vol. 216, Número 2, pp. 209-222). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7580.2009.01157.x>
- Robson Strahlendorf, Evelyn y Tomlinson, Judy. (1990). *Dolls of Canada : A Reference Guide*. En University of Toronto Press. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/universidadcomplutense-ebooks/reader.action?docID=4671438&ppg=10#>
<https://doi.org/10.3138/9781442674028>
- Roda Peña, José. (2009). La escultura barroca del siglo XVIII en Andalucía occidental. *Cuadernos de Estepa* 4, 84-111. https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/30775/la_escultura_barroca_del_siglo_xviii_en_andalucia_occidental.pdf?sequence=4
- Rodríguez Simón, Luis Rodrigo. (2009). Los procedimientos técnicos en la escultura en madera policromada granadina. *Cuadernos de Arte de la Universidad de Granada*, 40, 457-479. <https://revistaseug.ugr.es/index.php/caug/article/view/278>
- Rühse, Viola. (2019). Duane hanson's man on mower: A suburban american everybody in the mid-1990s. En *Popularisation and Populism in the Visual Arts: Attraction Images* (pp. 138-151). <https://doi.org/10.4324/9780429467882-10>
- Sánchez González, Linda N., Barceló Santana, Federico H., Jiménez Castillo, René y Alejandro Benavides Ríos, Ii. (2012). *Revista Odontológica Mexicana Accelerated physical deterioration of in vitro ocular prostheses*. Núm. 1 Enero-Marzo, 16, 14-17. www.medigraphic.org.mx
<http://www.medigraphic.com/facultadodontologiaunam>
<https://doi.org/10.22201/fo.1870199xp.2012.16.1.30323>

- Sánchez Moreno, José. (1945). Vida y obra de Francisco Salzillo. En Vida y obra de Francisco Salzillo. https://digitum.um.es/digitum/bitstream/10201/6331/1/N_3_Vida_y_Obra_de_Francisco_Salzillo.pdf
- Sánchez Reyes, Gabriela, Velázquez Ramírez, José Luis y Montes Marrero, Ana Lucía. (2016). La radiología digital para relicarios de ceroplástica: estudio interdisciplinar para identificar el sistema constructivo y la ubicación de los restos óseos. *Geconservación*, ISSN-e 1989-8568, No. 10, 2016, págs. 54-65, 10, 54-65. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5764324&info=resumen&idioma=SPA> <https://doi.org/10.37558/gec.v10i0.370>
- Scandellari, Filippo. (s. f.). Busto femenino en una urna - Colección - Museo Nacional del Prado. Recuperado 28 de octubre de 2021, de <https://www.museodelprado.es/coleccion/obra-de-arte/busto-femenino-en-una-urna/3edbc47f-ea45-4b8a-9926-8d38ef9eda9e>
- Schneider, Sara. (1997). Body Design, Variable Realisms: The Case of Female Fashion Mannequins. *Design Issues*, 13(3), 5-18. <https://doi.org/10.2307/1511936>
- Seco Álvarez, Myriam, Ruiz Conde, Antonio, Villegas, María Ángeles y Sánchez Soto, Pedro José. (2003). El vidrio en la civilización egipcia. Descripción de piezas de vidrio del tipo incrustaciones de una colección de la Universidad de Sevilla. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 42(4), 223-228. <https://doi.org/10.3989/cyv.2003.v42.i4.639>
- Shields, Carol, Shields, Jerry, Potter, Patrick De y Singh, Arun. (1994). Problems with the hydroxyapatite orbital implant: experience with 250 consecutive cases. *British Journal of Ophthalmology*, 78(9), 702-706. <https://doi.org/10.1136/BJO.78.9.702>
- Spies-Gans, Paris Amanda. (2017). “The Fullest Imitation of Life”: Reconsidering Marie Tussaud, Artist-Historian of the French Revolution. *Journal18*, 3. <https://doi.org/10.30610/3.2017.8>
- Staiti, Alana. (2020). Real Women, Normal Curves, and the Making of the American Fashion Mannequin, 1932-1946. 28(4), 403-431. <https://doi.org/10.1353/con.2020.0029>
- Strege, Gayle. (1999). The art of selling: a history of visual merchandising. En *Historic Costume & Textiles Collection*. The Ohio State University. https://kb.osu.edu/bitstream/handle/1811/44670/Art_of_Selling_A_History_of_Visual_Merchandising_sm.pdf
- Strudwick, Helen. (2016). *La enciclopedia del Antiguo Egipto*. Edimat Libros.
- Suzuki, Hiroyuki. (2011). The Buddha of Kamakura and the “Modernization” of Buddhist Statuary in the Meiji Period. *The Journal of Transcultural Studies*, 2(1), 140-158. <https://doi.org/10.11588/ts.2011.1.7332>
- The Metropolitan Museum of Art. (s. f.). Bronze portrait bust of a young boy. Recuperado 12 de noviembre de 2021, de <https://www.metmuseum.org/art/collection/search/255215>
- Uda, Masayuki, Yoshimura, Shinobu, Ishizaki, Atsushi, Yamashita, Daisuke y Sakuraba, Y. (2007). Tutankhamun’s golden mask investigated with XRDF. *International Journal of PIXE*, 17(01n02), 65-76. <https://doi.org/10.1142/s0129083507001113>

- Walshaw, Emma Grace, Zoltie, Timothy, Bartlett, Paul y Gout, Taras. (2018). Manufacture of a high definition ocular prosthesis. *British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 56(9), 893-894. <https://doi.org/10.1016/j.bjoms.2018.08.016>
- Wellington, Robert. (2017). Antoine Benoist's Wax Portraits of Louis XIV. *Journal*18, 3. <https://doi.org/10.30610/3.2017.6>
- Wijayasinghe, Indika B., Das, Sumit K., Miller, Haylie L., Bugnariu, Nicoleta L. y Popa, Dan O. (2019). Head-Eye Coordination of Humanoid Robot with Potential Controller. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 94(1), 15-27. <https://doi.org/10.1007/S10846-018-0948-8>
- Zoltie, Timothy, Bartlett, Paul, Archer, Tom, Walshaw, Emma y Gout, Taras. (2021). Digital photographic technique for the production of an artificial eye. *Journal of Visual Communication in Medicine*, 44(2), 41-44. <https://doi.org/10.1080/17453054.2021.1882294>

Listado de imágenes

- Figura 1. Modelado 3D del globo ocular: A) En la imagen se muestra el núcleo que representa el globo ocular, así como otra pieza de mayor diámetro para crear la cubierta exterior de la esclera y la córnea; B) Modelo 3D del ojo mostrando la malla poligonal del globo ocular (abajo) y cubierta exterior (arriba); C) Render del modelo digital.
- Figura 2. Creación del iris en el modelo 3D: A) Imagen alpha del iris realizada en el programa de Adobe Photoshop versión 22.3.0; B) Se muestra el detalle obtenido a partir del desplazamiento de la geometría, una vez aplicada la imagen alpha en el programa Zbrush.
- Figura 3. Importación y parametrización de los modelos 3D en el software Chitobox v1.8.1.
- Figura 4. Muestras de los modelos reproducidos en resina fotorpolimerizable.
- Figura 5. Moldes de silicona de estaño, obtenidos tras realizar el método de moldeado por colada y sus respectivos positivados en resina.
- Figura 6. Aplicación de pintura con base de alcohol a los modelos de resina.
- Figura 7. Acabado final de los ojos artificiales tras desarrollar el proceso previamente descrito.