



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

**DESARROLLO METODOLÓGICO PARA LA APLICACIÓN
DE TÉCNICAS DE ADQUISICIÓN E IMPRESIÓN 3D
EN CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN DE VIDRIO ARQUEOLÓGICO,
Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES
RELACIONADOS CON LA FASE DE RECONSTRUCCIÓN.**

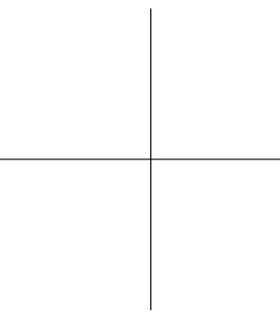
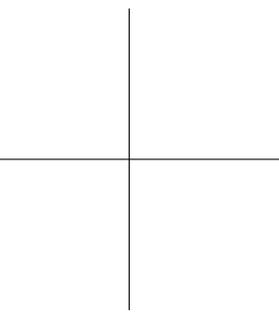
Tesis presentada para optar al grado de Doctor en Conservación y
Restauración de Bienes Culturales.

por

María del Carmen Díaz Marín

Directora y tutora
Dra. Elvira Aura Castro

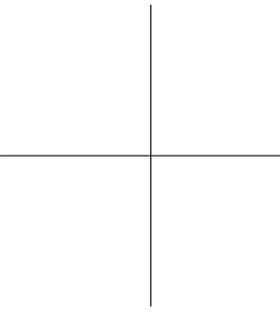
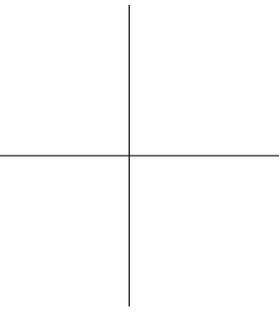
Julio, 2017



*A mis padres, el mejor ejemplo que he
tenido. Gracias por ser como sois.*

A mis sobrinos.

A Dana



Agradecimientos

La finalización de mi tesis doctoral ha sido posible gracias a la presencia de personas que han compartido conmigo su conocimiento y me han apoyado en cada etapa. Desde aquí quiero agradecer sinceramente a todas las personas que me hayan regalado su tiempo, su ayuda y su apoyo. En especial quiero agradecer:

En primer lugar, a Elvira Aura Castro, mi directora que me introdujo en el mundo del vidrio arqueológico y que me ha sabido guiar durante mi investigación y me ha ayudado en todo lo necesario.

También a Eduardo Vendrell Vidal y Carlos Sánchez Belenguer del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, compañeros de proyecto, que me ofrecieron la oportunidad de entrar en un mundo totalmente nuevo para mí como es el uso de las tecnologías 3D.

De igual manera a Dña. Sara Blañez Ibáñez, directora del Museo de Cerámica de Manises y a Dña. Helena Bonet Rosado, directora del Museo de Prehistoria de Valencia, que han proporcionado las piezas que se han intervenido en este estudio.

Agradezco a Jorge Francisco Martínez Piqueras que me enseñó todo sobre fotogrametría y que pacientemente ha solucionado todas mis dudas y a Amparo Linares Soriano, compañera y amiga, que ha compartido conmigo su conocimiento sobre ensayos, entre otras cosas.

Expresar toda mi gratitud a Cristina Nieto por su apoyo y consejos. Y también a mis compañeras Fran Lorenzo y Katia Santos.

Gracias a Carlos Peña Monferrer, mi amor, sin ti esto no hubiera sido posible ya que has sido mi principal apoyo en este camino que juntos hemos recorrido cada uno con su investigación pero siempre pendiente uno del otro.

Y por último a mi familia y amigos que han sabido apoyarme desde la distancia con sus muestras de cariño y sus ánimos.

Gracias a todos.

Resumen

La introducción de las tecnologías 3D en la conservación del patrimonio arqueológico ha permitido abrir nuevas vías de investigación. En el caso de los objetos de vidrio exhumados su frágil estado de conservación exige una manipulación extremadamente cuidadosa, que pone en riesgo su integridad física, por lo que ésta debe reducirse al máximo.

La presente Tesis Doctoral muestra la aplicación de las tecnologías 3D en diferentes etapas de la conservación y restauración de objetos de vidrio arqueológico. Se ofrecen así métodos alternativos a los tradicionales basados en la sustitución del objeto original por su modelo 3D de forma que solo sea necesaria su presencia en momentos puntuales para una mínima manipulación.

Al desarrollar metodológicamente como aplicar estas técnicas se emplean procedimientos alternativos que introducen nuevos materiales cuyo comportamiento desconocemos. Por ello, se ha desarrollado un capítulo para la caracterización de estos nuevos materiales incorporados. En concreto, se han estudiado aquellos utilizados en la fase de reconstrucción del volumen perdido mediante la creación e incorporación de implantes impresos en 3D. De este modo, se ha podido determinar su grado de adecuación y compatibilidad en los tratamientos de conservación y restauración del vidrio arqueológico intervenido.

La metodología propuesta ha demostrado que la tecnología 3D es aplicable en el campo de la conservación y restauración del vidrio arqueológico. Se ha resuelto la problemática inicial del escaneado en 3D de este material y se ha reducido la manipulación de los objetos durante las reconstrucciones volumétricas y en la creación de embalajes. La utilización de las resinas termoplásticas para elaborar los fragmentos faltantes ha proporcionado óptimos resultados obteniendo implantes de elevada precisión capaces de reproducir el detalle decorativo de estos objetos. Por último, en los modelos virtuales han sido incorporadas sus correspondientes texturas mediante fotogrametría llevando, también a cabo, la recreación hipotética de los faltantes de manera complementaria. Con ello se facilita la visualización y recuperación completa de los objetos estudiados en 3D sin manipular los originales de forma excesiva o no justificada. Estas visualizaciones no son específicas del vidrio y para dimensionar los resultados en su justa medida, este mismo proceso se ha llevado a cabo con material arqueológico de otra naturaleza permitiendo la reconstrucción virtual de una escultura incompleta de terracota y la visualización de un cráneo del Pleistoceno. Se propone de esta manera como interaccionar, a través de la realidad aumentada, con los modelos texturizados y mostrar como acercar las diferentes fases del proceso reconstructivo a un público potencial, al visitante de exposiciones y a los estudiosos atraídos.

Abstract

The introduction of 3D technology in the conservation of archaeological heritage has opened the gates for new researches. In the case of glass removed from the ground, their fragile state of conservation requires an extremely careful handle. That might cause its physical damage, so it should be minimized.

This PhD thesis deals with the application of 3D technology in the different stages of the conservation and restoration of archeological glass objects. Alternative methods based on the substitution of the original object by its 3D model are offered instead of the traditional ones. The appearance of the glass will be required only at specific times in order to minimize its handle.

The development of how to apply these techniques in a methodological way involves alternative procedures, those introduce new materials whose behavior we do not know. For this reason, a chapter has been produced to test them. In particular, we have studied the materials used in the reconstruction of missing areas which have been brought by the incorporation of 3D printed implants. In this way, it has been possible to determinate their rate of compatibility with archaeological glass conservation and restoration treatments.

The proposed methodology has demonstrated that 3D technology is applicable in the field of conservation and restoration of archaeological glass. The initial problem of the 3D scanning of this material has been resolved. Furthermore, the handle rate of the objects during the reconstruction of the missing areas and in the creation of packaging has been reduced. The use of thermoplastic resins to build the gap filling has provided excellent results as the implants obtained show highly accuracy when reproducing the depth of objects decoration. Finally, concerned textures have been incorporated to virtual models by photogrammetry. Furthermore, a hypothetical recreation of the gap filling textures has been made too. These visualizations contribute to the complete reconstruction of the objects studied in 3D but without handling the originals in an excessive or unjustified way. As they are not specific from glass, the same process has been carried out on a different archaeological materials. In this way, the virtual reconstruction of an incomplete terracotta sculpture and the visualization of a Pleistocene skull had been made to support that. Textured models are brought through virtual and augmented reality showing the different stages of the reconstructive process to the potential audience, museum visitors and researchers.

Resum

La introducció de les noves tecnologies 3D en la conservació del patrimoni arqueològic ha permès obrir noves vies d'investigació. En el cas dels objectes de vidre exhumats el seu fràgil estat de conservació exigeix una manipulació extremadament acurada, que posa en risc la seva integritat física, de manera que aquesta s'hauria de reduir al màxim.

La present Tesi Doctoral mostra l'aplicació de les tecnologies 3D en diferents etapes de conservació i restauració d'objectes de vidre arqueològic. S'ofereixen així mètodes alternatius als tradicionals basats en la substitució de l'objecte original pel seu model 3D de mena que només sigui necessària la seva presència en moments puntuals per una mínima manipulació.

En desenvolupar metodològicament com aplicar aquestes tècniques s'empren procediments alternatius que introdueixen nous materials de comportament desconegut. Per tant, s'ha desenvolupat un capítol per a la caracterització d'aquests nous materials incorporats. En concret, s'han estudiat aquells utilitzats en la fase de reconstrucció del volum perdut mitjançant la creació i incorporació d'implants impresos en 3D. D'aquesta manera, s'ha pogut determinar el seu grau d'adequació i compatibilitat en els tractaments de conservació i restauració del vidre arqueològic intervingut.

La metodologia proposada ha demostrat que la tecnologia 3D és aplicable en el camp de la conservació i restauració del vidre arqueològic. S'ha resolt la problemàtica inicial de l'escanejat en 3D d'aquest material i s'ha reduït la manipulació dels objectes durant les reconstruccions volumètriques i en la creació d'embalatges. La utilització de les resines termoplàstiques per elaborar els fragments mancants ha proporcionat òptims resultats obtenint implants d'elevada precisió capaços de reproduir el detall decoratiu dels objectes. Finalment, en els models virtuals s'han incorporat les textures corresponents per mitjà de la fotogrametria, realitzant també, la recreació hipotètica dels mancants de manera complementària. Amb aquesta pràctica, s'ha facilitat la visualització i recuperació completa dels objectes estudiats en 3D sense manipular els originals de forma excessiva o no justificada. Aquestes visualitzacions no són específiques del vidre i per dimensionar els resultats en la seva justa mesura, aquest mateix procés s'ha dut a terme amb material arqueològic d'una altra naturalesa, permetent la reconstrucció virtual d'una escultura incompleta de terracota i la visualització d'un crani del Plistocé. Es proposa d'aquesta manera com interaccionar, a través de la realitat augmentada, amb els models amb textura i mostrar com acostar les diferents fases del procés constructiu a un públic potencial, al visitant d'exposicions i als estudiosos atrets.

Índice general

Agradecimientos	5
Resumen	7
Abstract	9
Resum	11
Índice general	13
1 Introducción	19
1.1 Contexto de la tesis	19
1.2 Objetivos	23
1.3 Organización del documento.	24
2 Material de estudio. El vidrio arqueológico	27
2.1 El vidrio	27
2.2 Composición	28
2.3 Deterioro del vidrio arqueológico: procesos de corrosión.	29
2.4 Métodos de restauración del vidrio arqueológico.	34
2.4.1 Limpieza	34
2.4.2 Consolidación	35
2.4.3 Adhesión	35
2.4.4 Reconstrucciones volumétricas.	36

2.5 Selección de objetos de vidrio arqueológico para el estudio.	38
2.5.1 Contexto arqueológico de los materiales	39
2.5.2 Descripción de los objetos arqueológicos de vidrio seleccionados	41
I Metodología para la utilización de modelos 3D en procesos de conservación y restauración	45
3 Digitalización de objetos de vidrio arqueológico. Uso del ciclo-dodecano	47
3.1 Adquisición: obtención del modelo 3D	47
3.1.1 Métodos de adquisición del patrimonio.	47
3.1.2 Vidrio <i>vs</i> escáner láser de triangulación	48
3.1.3 Trabajos previos en la adquisición del vidrio	49
3.1.4 Ciclododecano como opacificante temporal	50
3.2 Metodología experimental	52
3.2.1 Capacidad de sublimación	53
3.2.2 Determinación del error introducido sobre una superficie plana	54
3.2.3 Determinación del error introducido sobre una superficie curva	56
3.2.4 Determinación del tamaño de partícula	56
3.2.5 Velocidad de sublimación	59
3.3 Resultados y discusión.	61
4 Dibujo arqueológico de objetos de vidrio a partir de su modelo 3D	63
4.1 El dibujo arqueológico: concepto y significado	63
4.1.1 Procedimiento tradicional.	64
4.2 Evolución del dibujo arqueológico	65
4.3 Metodología propuesta para la obtención del dibujo arqueológico	67
4.3.1 Orientación del objeto y obtención del perfil	67
4.3.2 Obtención del dibujo arqueológico	71
4.3.3 Obtención de datos métricos	77
4.4 Comparación entre el método tradicional y el método propuesto.	79
4.5 Resultados y discusión.	82

5 Reconstrucción de fragmentos faltantes mediante modelado e impresión 3D	85
5.1 Métodos de restauración virtual y <i>rapid prototyping</i>	85
5.2 La impresión 3D	87
5.2.1 Orientación de las piezas para la deposición del fundente	88
5.3 Metodología para la creación de implantes	89
5.3.1 Selección del objeto a intervenir	89
5.3.2 Adquisición 3D	89
5.3.3 Optimización de mallas 3D	90
5.3.4 Creación del implante	91
5.3.5 Impresión 3D de los implantes	93
5.4 Tratamiento superficial de los implantes	97
5.5 Unión entre piezas: original e implantes	100
5.6 Reintegración cromática de los implantes	100
5.7 Resultados y discusión	101
6 Proceso automatizado de fabricación de embalajes para vidrio arqueológico	107
6.1 Conservación de objetos arqueológicos mediante creación de embalajes	107
6.1.1 Elaboración de embalajes y estado actual de la cuestión	109
6.2 Metodología experimental	111
6.2.1 Fase 1: Generación automática del embalaje adaptado	112
6.2.2 Fase 2: Fresado del embalaje	115
6.3 Recomendaciones para el almacenamiento y transporte de objetos de vidrio	116
6.4 Resultados y discusión	117
7 Metodología para la obtención de los modelos 3D y aplicación de texturas	121
7.1 La obtención de los modelos virtuales en el patrimonio cultural	121
7.2 El uso de los modelos 3D en el patrimonio cultural	123
7.3 Desarrollo metodológico para la digitalización de objetos arqueológicos	125
7.3.1 Metodología experimental aplicada al vidrio arqueológico	128
7.3.2 Metodología experimental aplicada a otros materiales arqueológicos	140
7.4 Resultados y discusión	153

II	Caracterización de los materiales que intervienen en las reconstrucciones volumétricas	155
8	Ensayos de los materiales que intervienen en la fase de reconstrucción	157
8.1	Materiales	157
8.1.1	Filamento	157
8.1.2	Recubrimiento de pintura	159
8.1.3	Adhesivo	161
8.2	Ensayo 1. Envejecimiento artificial por radiación ultravioleta	163
8.2.1	Preparación de muestras	164
8.2.2	Técnicas analíticas	166
8.2.3	Resultados y discusión	167
8.3	Ensayo 2. Solubilidad del filamento ABS	178
8.3.1	Preparación de muestras	179
8.3.2	Resultados y discusión	180
8.4	Ensayo 3. Resistencia a la tracción	184
8.4.1	Preparación de muestras	184
8.4.2	Resultados y discusión	187
8.5	Ensayo 4. Medición del pH.	199
8.5.1	Resultados y discusión	200
8.6	Ensayo 5. Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier	201
8.6.1	Preparación de muestras	202
8.6.2	Resultados y discusión	203
8.7	Ensayo 6. Oddy test	210
8.7.1	Preparación de muestras	211
8.7.2	Resultados y discusión	212
9	Conclusiones	219
	Anexos	223
A	Proceso de creación del implante e impresión 3D	225
A.1	Creación del implante.	225

A.2 Impresión 3D: orientaciones	231
B Tratamiento superficial de los implantes	235
B.1 Resultados del filamento blanco	235
B.2 Resultados del filamento translúcido	241
Bibliografía	247

Capítulo 1

Introducción

1.1 Contexto de la tesis

Los objetos arqueológicos forman parte del patrimonio arqueológico cuya definición está recogida en la Carta Internacional para la gestión del Patrimonio Arqueológico, adoptada en 1990 por el ICOMOS (*Internatinal Council of Monuments and Sites*), que define en su artículo 1 al patrimonio arqueológico como "todas las huellas de la existencia del hombre y se refiere a los lugares donde se ha practicado cualquier tipo de actividad humana, a las estructuras y los vestigios abandonados de cualquier índole, tanto en la superficie, como enterrados o bajo las aguas, así como al material relacionado con los mismos". Los objetos recuperados en los yacimientos pasan por un proceso de conservación y restauración permitiendo su estudio y su difusión al resto de la sociedad. Este proceso conlleva a su vez unos riesgos debido al estado deficiente de conservación de las piezas y a la excesiva o inadecuada manipulación realizada durante el proceso de restauración seleccionado.

La elección del vidrio como material de estudio, se debe al delicado estado de conservación que presentan este tipo de piezas tras su exhumación (Fernández Navarro, 2000) y a la manipulación excesiva que sufren durante los procesos de restauración que permiten estabilizar su estado y hacen posible su conservación. El vidrio es importante ya que permite fechar yacimientos al considerarse un buen índice cronológico (Morales Illán, 1984). Generalmente, las piezas encontradas son de uso cotidiano con formas vulgares, muy fragmentadas, pero a pesar de ello son un documento que aporta información relevante del pasado. Los materiales recuperados en excavaciones arqueológicas son producto de la actividad humana y

por lo tanto fuentes de conocimiento. Su salvaguarda y preservación está justificada y es necesaria por ser testimonio y base de la investigación arqueológica (García Fortes y Flos Travieso, 2008a).

Con el propósito de minimizar estos riesgos y favorecer la preservación de piezas arqueológicas (especialmente las compuestas por materiales frágiles) se pretende introducir la tecnología 3D en la conservación y restauración de objetos arqueológicos. Para ello se aplicarán las técnicas y los materiales que utiliza esta tecnología tan novedosa en fases específicas de la intervención de objetos de vidrio arqueológico.

Los avances tecnológicos aplicados al campo de la conservación y restauración del patrimonio arqueológico, abren nuevas vías que deben ser exploradas ya que pueden introducir mejoras que faciliten el trabajo a los profesionales, optimicen los procesos y mejoren los resultados. La aplicación de las tecnologías 3D, como escaneado e impresión, en algunas fases de la restauración y conservación de este tipo de objetos mejoraría su salvaguarda al reducir la manipulación que experimentan en las diferentes fases. Tras los procesos de limpieza, consolidación y adhesión, donde la presencia de la pieza o de los fragmentos está justificada, hay otras fases en donde podría ser sustituida por su modelo 3D como son: la realización del dibujo arqueológico, la reconstrucción volumétrica de los faltantes, la creación de una réplica del objeto o la fabricación de un soporte o embalaje adaptado.

La introducción de este tipo de técnicas se realiza en primer lugar con la adquisición en 3D del objeto seleccionado obteniendo un modelo virtual. Para ello se necesita un sistema de registro. En nuestro caso el escaneado del vidrio arqueológico se realizará combinando un escáner láser de triangulación y técnicas fotogramétricas. Son los dos métodos más conocidos, aunque existe otras opciones cuya utilización depende del objeto de estudio. Para solucionar la problemática de incompatibilidad entre un escáner láser de triangulación y las superficies transparentes, brillantes y reflexivas/refractivas se estudiará la aplicación de un producto que funcione como opacificante temporal. El ciclododecano, un producto muy conocido en el campo de la conservación y la restauración, vuelve opaca la superficie de forma temporal y permite el escaneado del vidrio arqueológico.

Obtenido el modelo 3D se puede trabajar sobre él con diferentes programas de 3D que ofrece el mercado. Como sustituto del objeto original se puede experimentar sin poner en riesgo al mismo. Con la introducción de esta tecnología se buscará reducir el tiempo de los métodos habituales, conseguir procesos automáticos o semiautomáticos y aumentar la precisión y calidad del resultado.

Entre los procesos que se ven beneficiados con esa actualización estaría en primer lugar el dibujo arqueológico. Este método de registro y visualización de la información de una pieza ha estado muy unido al dibujo a lápiz, apoyándose también en la fotografía y en la digitalización de los dibujos con el ordenador. El siguiente

paso a seguir, contemplaría la introducción del modelo 3D en el proceso de estudio para evitar la manipulación excesiva de la pieza en la recogida de datos y mejorar el resultado final.

En segundo lugar, la reconstrucción volumétrica es otro proceso que también se vería beneficiado. En los objetos de vidrio arqueológico estas reconstrucciones se realizan sobre la pieza original vertiendo resina en un molde adaptado a la forma del faltante o haciendo un molde de la zona faltante y realizando el vertido a parte. En ambos métodos se manipula el objeto que interviene de forma directa en el proceso. Para evitar este riesgo, las tecnologías 3D permiten crear una copia digital del objeto (modelo 3D) que sirve como base para modelar el fragmento desaparecido de forma virtual. Por medio de la impresión 3D se pueden obtener estos implantes generados por ordenador buscando características compatibles con el material del objeto, en este caso el vidrio.

La tecnología 3D trae consigo materiales con una amplia variedad de características. Dentro del campo de la impresión 3D, se están investigando materiales que simulen las características del material vítreo, que en un futuro se podrían utilizar para la recuperación de fragmentos faltantes y la realización de réplicas. Existen investigaciones en curso, dado el interés sobre el tema, que utilizan la impresión 3D para obtener un vidrio completamente transparente. En Klein *et al.* (2012) utilizan como materia prima el propio vidrio, pero se encuentran con ciertas dificultades en su aplicación. Experimentan con la coincidencia de índices de refracción entre las partículas de vidrio y el disolvente que forma la pasta y con el tamaño de partícula de vidrio. Obteniendo diferentes resultados pero sin acercarse a un resultado completamente transparente. Un grupo de investigación de la Universidad de Washington compara resultados realizados con vidrio nuevo y vidrio reciclado, en busca de una solución como material sostenible en la impresión 3D (Bourell *et al.*, 2011). Un método que ha dado muy buenos resultados es el desarrollado en el Massachusetts Institute of Technology (MIT) donde han desarrollado un sistema basado en el modelado por deposición de fundente. Se extruye vidrio fundido al lograr mantener una temperatura de 1.037,78 grados celsius durante el proceso de impresión. El resultado es un objeto de vidrio completamente transparente (Klein *et al.*, 2015). En Kotz *et al.* (2017) han desarrollado un nanocompuesto fotocurable de sílice para ser utilizado en una impresora 3D por estereolitografía que se convierte en vidrio de sílice fundido de alta calidad mediante un tratamiento térmico. Por último en Nguyen *et al.* (2017) desarrollan un proceso donde primero se imprime con un material a base de sílice y que forma la geometría, una vez completada se deja secar y por la aplicación de altas temperaturas el polvo de sílice que contiene se densifica formando una capa transparente.

Estos métodos de impresión se encuentran en fase de experimentación son difíciles de aplicar por sus complejidades técnicas, dejando como solución inmediata el uso de las resinas termoplásticas para la recuperación de fragmentos faltantes y la realización de réplicas por medio de la impresión 3D. La gran variedad de

filamentos (bobina de polímero) que ofrece el mercado hace posible su adaptación a cualquier material, incluso el vítreo. En nuestro caso se ha seleccionado el polímero más utilizado, el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) al ofrecer una gran variedad de colores, opacos y translúcidos. Para probar la viabilidad del método se han seleccionado dos tipos de filamento ABS, uno blanco y otro translúcido. La calidad de los resultados se observan en los detalles de la pieza impresa y el acabado idóneo que ésta presenta. Como estos materiales son nuevos, su comportamiento será testado a partir de una serie de ensayos que demostrarán que esta opción es aplicable sobre vidrio arqueológico.

Y en tercer lugar la fabricación de embalajes también se vería beneficiada. En este caso utilizando otro tipo de reproducción 3D donde se realiza la sustracción del material utilizando una máquina de fresado. Este método será escogido para la realización de embalajes con el fin de poder utilizar los materiales que se utilizan actualmente para este fin (espumas de polietileno) al cumplir los requisitos de estabilidad requeridos. Este sistema es utilizado en instituciones como el Smithsonian Institute de Washington para la elaboración de embalajes de obras de arte contemporáneo (Smithsonian, 2014). Nuestro sistema permitirá el total automatizado del proceso ya que se hará a través del modelo 3D de la pieza que será importada a un software propio con el que se obtendrá un embalaje a medida que será reproducido por una máquina fresadora.

La investigación expuesta se realizará teniendo en cuenta la normativa existente. Al ser un campo de investigación tan novedoso, la normativa es bastante reciente. Debido al auge de las investigaciones donde se utilizan las tecnologías 3D en el campo del patrimonio cultural y en especial en arqueología, se ha tenido que crear normativas que regulen estas intervenciones. A través de reuniones de expertos en el tema, se han establecido una serie de principios que encontramos en *The London Charter for the computer-based visualization of cultural heritage* (Londoncharter, 2009) y en *Principales of Seville International Principles of virtual archaeology* (IFVA, 2011). La carta de Londres es un documento internacional que presenta recomendaciones para la realización de proyectos y guías del uso de los métodos de visualización adaptadas a cada ámbito que recoge el concepto de Patrimonio Cultural: monumental, etnográfico, industrial, artísticos, etc. En cuanto a los principios de Sevilla, se centra en el patrimonio arqueológico, incluyendo el patrimonio arqueológico industrial, simplificando y ordenando sus principios y ofreciendo una serie de recomendaciones del espacio que ocupa el patrimonio arqueológico dentro del patrimonio cultural, tomando en consideración el carácter específico de la Arqueología Virtual como "la disciplina científica que tiene por objeto la investigación y el desarrollo de formas de aplicación de la visualización asistida por ordenador a la gestión integral del patrimonio arqueológico" (IFVA, 2011). Cuando se realiza una intervención en un bien arqueológico también se tendrán en cuenta los criterios de intervención del campo de la conservación y restauración de bienes arqueológicos como son la preservación de la autenticidad de la obra original, el re-

conocimiento y la preservación del valor documental del objeto, la compatibilidad y la estabilidad de los materiales utilizados en la conservación y restauración de estos objetos, la reversibilidad de la intervención realizada y la diferenciación visual de los nuevos materiales respecto a los originales (García Fortes y Flos Travieso, 2008a).

Esta tesis doctoral se ha realizado al tiempo que se ha estado contratado como técnico de laboratorio dentro del proyecto: *Desarrollo de Técnicas y Métodos de Restauración Arqueológica mediante Escaneado e Impresión 3D* realizado gracias al Programa Nacional de I+D+i 2008-2011 del Ministerio de Economía y Competitividad de España (HAR2012-38391-C02-01) concedido y financiado por el MINECO y también dentro del proyecto: *Desarrollo de un sistema integrado de restauración, recomposición, restitución y representación de fragmentos arqueológicos* realizado gracias al Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación Orientada a los Retos de la Sociedad en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2013-2016 del Ministerio de Economía y Competitividad de España (HAR2015-69408-R) con cofinanciación del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

1.2 Objetivos

El objetivo principal de esta investigación es desarrollar una metodología que permita la sustitución del objeto original de vidrio arqueológico por su modelo 3D en procesos de conservación y restauración. En cuanto a los objetivos específicos son los siguientes:

- Digitalizar los objetos de vidrio arqueológico por medio de un escáner láser de triangulación optimizando el proceso.
- Generar y obtener los modelos 3D de las piezas arqueológicas que son objeto de estudio.
- Registrar la textura de la superficie de los objetos por medio de técnicas fotogramétricas combinándolas con otros métodos de adquisición estudiando la viabilidad de aplicación en este tipo de objetos.
- Perfeccionar los dibujos arqueológicos del material estudiado llevándolos a cabo a partir de la información proporcionada por los modelos 3D.
- Desarrollar de forma digital los implantes destinados a la reconstrucción volumétrica de las áreas perdidas del vidrio arqueológico.
- Producir los implantes mediante la impresión en 3D de los mismos ensayando distintos filamentos termoplásticos y caracterizando su comportamiento.

- Guiar el proceso para elaborar una herramienta software que de forma automática pueda orientar la pieza de cara a la elaboración de un embalaje adaptado.
- Poner en práctica dicha herramienta consiguiendo el fresado de espumas rígidas cumpliendo con las expectativas marcadas.
- Caracterizar por medio de ensayos normalizados los materiales que intervienen en la fase de reconstrucción.

1.3 Organización del documento

Después de este capítulo el documento queda dividido en los siguientes capítulos:

Capítulo 2: Presenta el vidrio arqueológico como el material arqueológico que inspira esta investigación por sus características generales y particularidades, su estado de conservación tras su exhumación en una excavación arqueológica y explica los métodos utilizados para la recuperación de fragmentos faltantes. Incluye la descripción de las piezas seleccionadas que intervienen en esta investigación y que forman parte de una colección de vidrio valenciano.

A partir de aquí la tesis queda dividida en dos partes. En la primera se muestran los procesos de conservación y restauración donde el modelo 3D sustituye al objeto original explicando la metodología desarrollada. La segunda parte comprende el capítulo 8 y se corresponde con los ensayos de caracterización realizados en los materiales de la fase de reconstrucción.

Capítulo 3: Resuelve la problemática existente en la adquisición del vidrio al utilizar un escáner láser de triangulación dando una solución compatible con el estado de conservación del vidrio arqueológico y optimizando el proceso.

Capítulo 4: Proporciona el dibujo arqueológico del objeto seleccionado a partir del modelo 3D con un resultado perfeccionado y donde se pueden extraer diferentes medidas y grosores del modelo 3D.

Capítulo 5: Muestra la metodología establecida para la recuperación de fragmentos faltantes con el modelado en 3D de la zona vacía a partir del modelo 3D del objeto original, utilizando software libres de modelado en 3D y reduciendo la manipulación de la pieza original de manera notable e imprimiendo en 3D el resultado.

Capítulo 6: Automatiza el proceso de fabricación de embalajes para vidrio arqueológico con un software propio para obtener el modelo 3D de la cavidad adaptada que posteriormente es fresada con materiales adecuados para el embalaje de este tipo de obras.

Capítulo 7: Desarrolla la metodología utilizándola para la creación de los modelos virtuales, texturizando tanto los modelos de los objetos como los modelos de los implantes.

Capítulo 8: Caracteriza los materiales que se utilizan en la fase de reconstrucción de los faltantes.

Capítulo 9: Presenta las conclusiones de esta investigación.

Y por último,

Anexo A: Forma parte del capítulo 5 y muestra el proceso de realización de los implantes de cada pieza y las diferentes orientaciones para su impresión.

Anexo B: Forma parte del capítulo 5 y muestra los resultados de la impresión realizada con los dos tipos de filamentos en todos los implantes y el resultado final tras el tratamiento superficial.

Capítulo 2

Material de estudio. El vidrio arqueológico

2.1 El vidrio

El término vidrio se aplica comúnmente a un tipo de material con unas características especiales, como son: dureza, transparencia, brillo, resistencia química y ausencia de porosidad. Su fragilidad singular es, sin embargo, su principal característica. A lo largo de la historia, este material, se ha utilizado principalmente en el cerramiento de huecos o ventanas y en la creación de recipientes y contenedores. De este modo, según su función principal se hace una clasificación general entre *vidrio plano* y *vidrio hueco* (Fernández Navarro, 2003a).

Desde un punto de vista químico la materia más importante del vidrio es la sílice (SiO_2). Su utilización se hace después de calentarla hasta el reblandecimiento. El resultado es una sustancia que al enfriarse posee un comportamiento y aspecto de un sólido pero con un ordenamiento interno distinto al que tienen los sólidos cristalinos ya que presentan un desorden estructural que es característico de los cuerpos en estado amorfo. Observando su estructura, se concluye que existen moléculas que se distribuyen en el espacio de manera total o parcialmente aleatoria. Efectivamente, se puede observar que los grupos tetraédricos (SiO_4), en las variedades cristalinas, están dispuestos de forma regular siguiendo una secuencia determinada, al contrario que en la sílice vítrea donde la ordenación es al azar (Fig. 2.1). Tanto por ese comportamiento atípico como por la diversidad que puede adquirir su fórmula resulta difícil de establecer una definición del vidrio. La definición adoptada por la A.S.T.M.¹ considera que “un vidrio es un producto inorgánico fundido

¹American Section of the International Association for Testing Materials

que se ha enfriado hasta un estado rígido sin experimentar cristalización”, que es una definición básica, pero existen numerosas definiciones que son consideradas incompletas o demasiado extensas (Fernández Navarro, 2003b) ya que se centran en un aspecto específico que lo caracteriza o pretenden reunir todos los aspectos en un intento de crear una definición que incluya todas las particularidades de este material.

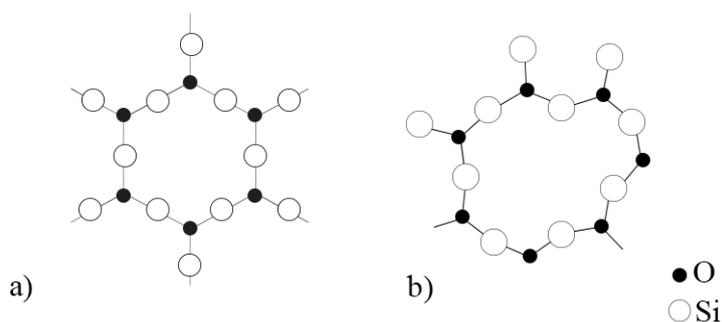


Figura 2.1: Esquema de la estructura SiO_2 . a) Red de una sustancia en estado cristalino; b) Red de una sustancia en estado vítreo.

2.2 Composición

El vidrio existe en la naturaleza en forma de roca volcánica llamada obsidiana y como arena de sílice fundida por la acción de un rayo atmosférico llamada fulgurita (Rodgers, 2004). El vidrio obtenido de modo artificial se logra por el enfriamiento de una masa fundida compuesta por vitrificantes, fundentes, estabilizantes y colorantes. Dependiendo de la cantidad de cada uno de estos compuestos, el vidrio tendrá unas características u otras.

Los vitrificantes o formadores de red son elementos que crean la estructura de los vidrios aportando los iones que constituirán sus unidades estructurales tetraédricas enlazando con los iones (O^{2-}). El más empleado es la sílice o dióxido de silicio (SiO_2). La sílice puede obtenerse de la arena, de los cristales de cuarzo o de pederrenal. Aporta resistencia, dureza y brillo ante los agentes químicos y atmosféricos.

Los fundentes facilitan la fusión del vidrio al bajar su temperatura de reblandecimiento. Los encargados son los óxidos alcalinos, comúnmente el óxido de sodio (Na_2O) y de potasio (K_2O). Los vidrios de base sódica se utilizaron en la antigüedad y también en la ciudad de Venecia durante los siglos XV-XVIII. Este tipo de vidrio lleva carbonato sódico (Na_2CO_3) como fundente, que se obtenía del lijado de las cenizas de las algas marinas. El resultado es un vidrio incoloro y

transparente que es muy fácil de moldear ya que es muy blando y se reblancea con facilidad. Se puede estirar y se solidifica muy lentamente pudiendo trabajar con él durante mucho tiempo. El vidrio de base potásica, utilizado en el norte de los Alpes a partir del siglo XI (Drahotová *et al.*, 1990) utiliza carbonato potásico (K_2CO_3) como fundente, que se obtiene del lijado de las cenizas de helechos y de madera de haya, de ahí la denominación de *vidrio de bosque*. En comparación con el anterior es más viscoso por lo que se reduce la aparición de fisuras y se alarga el tiempo de trabajo, pero disminuye la estabilidad química frente a los ácidos y alcalis. Son más blandos y se tallan con mayor facilidad. Se caracterizan por el aumento de densidad, el índice de refracción y el brillo (Fernández Navarro, 2003c).

La presencia de estabilizantes incrementa la resistencia química del vidrio, que se ve influenciada negativamente por los óxidos alcalinos que vuelven al vidrio vulnerable frente a la humedad al ser higroscópicos. Entre los utilizados destaca el óxido de calcio (CaO), que se obtenía de los limos o conchas calcinadas.

En cuanto a los colorantes, su adición a la mezcla se hacía de tres maneras: la primera a través de pequeñas cantidades de ciertos óxidos de metales de transición (cobalto, cobre, níquel...) que pasan a formar parte de la red. En segundo lugar, utilizando dispersiones coloidales de partículas metálicas o insolubles para obtener un efecto de reflejo metálico en amarillo, rojo o naranja. Y por último la adición de agentes opalescentes para conseguir un efecto opal y translúcido (López Ballester, 2009a).

Todos estos materiales se fundían en dos fases (García Fortes y Flos Travieso, 2008a):

- Frita: Es la primera cocción donde los materiales son calcinados durante 8 horas a $800^{\circ}C$ y se mezclaban entre ellos. Como resultado tenemos una masa de aspecto cristalizado (frita) con que se podría trabajar, aunque se solía cocer otra vez.
- Fusión: La segunda cocción se hacía entre $1000^{\circ}C$ y $1100^{\circ}C$, para eliminar las impurezas de la superficie. En este momento se añadían los óxidos metálicos.

2.3 Deterioro del vidrio arqueológico: procesos de corrosión

El vidrio arqueológico es un objeto arqueológico de naturaleza inorgánica. Un objeto arqueológico se define como “el resultado o producto de una actividad en el pasado que ha sido recuperado de un yacimiento arqueológico. Los objetos arqueológicos pueden tener origen en un pasado antiguo o bastante reciente. Dependiendo

de suelo y el clima del lugar, pueden ser excavados una amplia variedad de materiales” (Murdock y Johnson, 2001).

Durante el enterramiento del vidrio, su deterioro depende principalmente de su composición química y de las condiciones ambientales que lo rodean, pero hay otros factores secundarios a tener en cuenta como el pH, la temperatura y la presencia de microorganismos. A pesar de esto, la conservación del objeto es relativamente estable porque el deterioro se ralentiza al adaptarse a las condiciones ambientales que lo rodean. En el momento de la extracción, las condiciones ambientales que han protegido al vidrio durante años cambian bruscamente y la reacción con el nuevo ambiente provoca que se deshidrate rápidamente. Esto genera tensiones entre la capa de corrosión y el vidrio inalterado que se manifiesta en la aparición de delaminaciones, pérdida de transparencia por la formación de una capa blanca opaca e iridiscencias. Incluso puede llegar a producirse desprendimientos irreversibles del material alterado, provocando que los materiales más delicados desaparezcan durante su exhumación.

El envejecimiento del vidrio arqueológico es un proceso muy complejo que incluso hoy en día se entiende de forma imperfecta. Se ha escrito mucho a nivel teórico, sobre las reacciones y principios químicos que provocan el deterioro, pero el envejecimiento real es muy problemático ya que ha tenido lugar durante cientos de años estando influenciado por muchos factores (Fernández Navarro, 2003d).

El proceso de corrosión del vidrio, desencadenado por la presencia de agua y humedad, tiene lugar en dos fases: en la primera se produce la desalcalinización del vidrio y en la segunda, consecuencia de la primera, tiene lugar la descomposición de la red de sílice.

El proceso de desalcalinización superficial (Fig. 2.2.a) se produce cuando el agua y la humedad se depositan sobre la superficie del vidrio y una parte de la misma, muy pequeña, es absorbida a nivel superficial y originándose un intercambio iónico entre los iones hidrógeno de la solución acuosa y los iones alcalinos que se encuentran en el vidrio. Esto provoca que los compuestos de *Na* y *K* se disuelvan lentamente dando lugar, más adelante, a la formación de pequeñas concavidades (picado) que se harán presentes en el vidrio. Se origina así una capa de vidrio hidratada enriquecida en sílice denominada *capa gel*, algunas referencias bibliográficas la denominan también capa de vidrio lixiviada, capa de vidrio hidratada o capa rica en sílice (Davison y Newton, 2008a). A la vez, los iones alcalinos y alcalinotérreos, extraídos del vidrio, se combinan con los grupos OH y forman los hidróxidos. En este momento la disolución que se forma con el agua tiene carácter alcalino (Fernández Navarro, 2003d).

A partir de aquí comienza la descomposición de la red de sílice (Fig. 2.2.b), donde la disolución de carácter alcalino ($pH \geq 9$) corroe nuevamente la superficie del vidrio de modo mucho más intenso (Fearn, 2002). De esta forma, las pequeñas gotas de

agua iniciales, se convierten con el tiempo, en un álcali corrosivo que ataca al vidrio dejando huellas indelebles en el vidrio. En condiciones alcalinas hay gran cantidad de grupos OH presentes en el agua que van a reaccionar con la sílice rompiendo los enlaces del silicio con el oxígeno dando lugar a la descomposición de la sílice (Fernández Navarro, 2000).

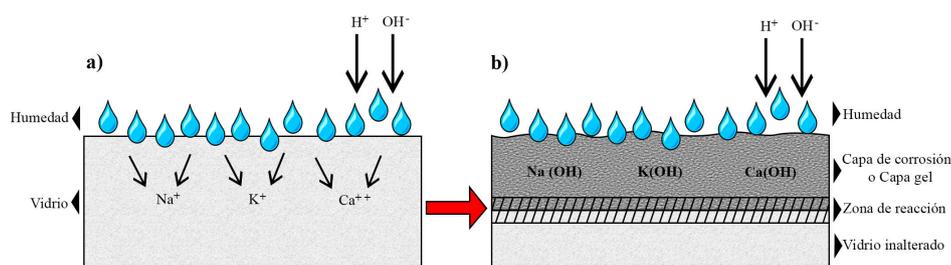


Figura 2.2: Desalcalinización (a) y descomposición del vidrio (b) por la presencia de niveles elevados de humedad que reacciona con los compuestos del vidrio y alteran su estado.

En la práctica, los procesos de desalcalinización y descomposición entran en competición. Si la desalcalinización es más rápida que la disolución de la sílice (vidrios con elevado porcentaje de fundentes) en la superficie del vidrio aparece la *capa de gel* (compuesta de sílice hidratada). Si la descomposición, es el mecanismo predominante (como en suelos muy ácidos) la *capa de gel* no se forma, y el vidrio se disuelve gradualmente. La descomposición del vidrio es más rápida cuanto más ácida es la disolución inicial. La mayoría del agua presente, tiene un pH intermedio, por lo que la desalcalinización aparece como el mecanismo dominante y la capa rica en sílice (*capa gel*) suele formarse en la mayoría de vidrios arqueológicos.

Los objetos resultantes tras este proceso de deterioro muestran una superficie con los siguientes alteraciones (Fernández Navarro, 2000; Davison y Newton, 2008a; García Fortes y Flos Travieso, 2008b; Fontaine, 1986–1987; Aura Castro y Doménech Carbó, 2004):

- **Fragmentación:** La mayor parte de los objetos de vidrio recuperados en excavaciones están muy fragmentados debido a la fragilidad del material ante un shock mecánico o térmico o por la presencia de defectos de fabricación (Fig. 2.3).
- **Pérdida de transparencia:** Es la condición que presenta el vidrio ante la pérdida de la claridad y transparencia del original volviéndose la superficie translúcida. Ver ejemplos en la figura 2.4.a y b.



Figura 2.3: Fragmentos de vidrio arqueológico recuperados en una excavación arqueológica. Es muy común este estado de fragmentación en este material y convierte la búsqueda de faltantes que coinciden en una labor complicada.

- Alteraciones cromáticas: Tras el proceso anterior, la superficie del vidrio se puede ir opacificando por la aparición de una serie de alteraciones como formación de capa blanca opaca o semiopaca (deterioro de color blanquecino), irisación (deterioro caracterizado por una coloración llamativa causada por la concentración óxidos metálicos en las capas más finas de la superficie), pigmentación moteada/concéntrica/dendrítica (pequeñas zonas de la superficie pigmentadas a modo de motas, círculos concéntricos o de aspecto ramificado) y pigmentado (zonas extensas de coloración provocadas por una alteración). Ver ejemplos en la figura 2.4.c, d, e, f, g y h.
- Pérdida de materia: con formación de huecos (picado o pequeñas cavidades puntiformes, cráter o cavidades profundas y faltantes o pérdida de fragmentos originales), sin formación de huecos (desintegración o pérdida superficial de la cohesión granular, disgregación o descohesión interna con desprendimiento y erosión o reducción del relieve), roturas (craquelado o grietas por envejecimiento natural, fisura o rotura sin separación y fractura o rotura con separación) y delaminaciones (separación de láminas delgadas, descamación o separación de láminas irregulares y separación de placas o levantamiento de láminas extensas y rígidas de varios milímetros de espesor). Ver ejemplos en la figura 2.4.

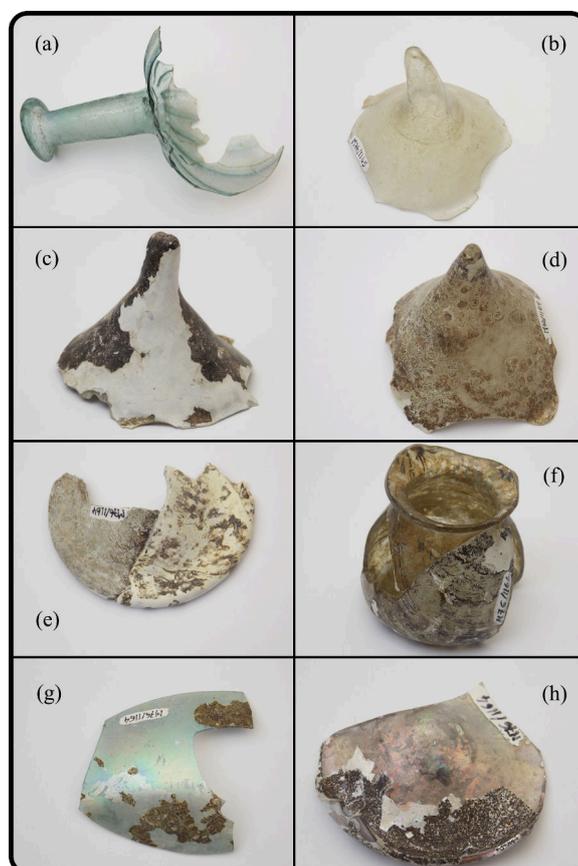


Figura 2.4: Diferentes alteraciones que pueden aparecer en la superficie de un vidrio arqueológico exhumado: (a) fragmento de una botella (boca, cuello y zona superior de cuerpo globular) cuya superficie presenta pérdida de transparencia, (b) fragmento de una base con pérdida de transparencia de su superficie, (c) fragmento de una base con formación de capa blanca opaca y pigmentado oscuro, (d) fragmento de base con formación de pigmentación concéntrica, (e) pie de copa formado por dos fragmentos que han tenido un deterioro diferente pero perdiendo ambos la transparencia: el fragmento de la izquierda presenta un nivel menos avanzado que en el fragmento de la derecha donde la capa blanca opaca cubre por completo su superficie, (f) frasco fragmentado y con faltantes, los fragmentos que se conservan presentan diferentes alteraciones uno con pigmentaciones extensas y dendríticas y el otro con formación de capa blanca semiopaca y opaca junto a pigmentaciones dendríticas, (g) fragmento con formación de iridiscencias que quedan a la vista tras la caída por delaminación de las capas superiores, y (h) base con formación de iridiscencias y pérdida por delaminación de las capas superiores de corrosión.

2.4 Métodos de restauración del vidrio arqueológico

La restauración de los objetos arqueológicos de vidrio recuperados durante una excavación, debido a su deterioro y alteraciones, resulta ser un proceso difícil de realizar.

A continuación se describen cada una de las fases que componen el proceso de restauración (García Fortes y Flos Travieso, 2008a; Davison y Newton, 2008b; López Ballester, 2009b), para centrarnos en la fase de reconstrucción de faltantes, ya que es la fase donde se ha centrado nuestra investigación.

2.4.1 Limpieza

La superficie de los objetos enterrados suele presentar la formación de costras terrosas, polvo y suciedad que ocultan el objeto y que deben ser eliminados. Por limpieza se entendería como “la eliminación de esas sustancias ajenas a la obra que pueden disminuir o impedir su lectura o ser causa directa de su deterioro” (García Fortes y Flos Travieso, 2008a). Por lo tanto es la primera fase de restauración y la que se realiza de manera más frecuentemente.

Los métodos de limpieza se dividen en dos (López Ballester, 2009b):

- Métodos mecánicos: se caracterizan por trabajar en “seco” y utilizan como instrumental pinceles, cepillo, lápiz de fibra de vidrio, escalpelo, bisturí y técnicas más avanzadas que utilizan el aire o la presión. Debido al grado de agresividad de este método se recomienda su utilización en la eliminación de costras terrosas.
- Métodos químicos: cuando se utilizan estos métodos para eliminar la costra, hay que tener cuidado de que a su vez no elimine la *capa de gel* ya que protege el vidrio inalterado. También se corre el riesgo de que la suciedad penetre por capilaridad en el interior de la superficie o que queden restos del producto químico que pueda causar daños a largo plazo. Por ello, su aplicación debe de ser cuidadosa y controlada. Entre los productos que se suelen utilizar tenemos el agua destilada, sola o junto a detergentes no iónicos por sus propiedades desengrasantes, y los disolventes orgánicos muy volátiles (en vidrio muy deteriorado). Y en casos muy particulares y de forma controlada, ya que podrían atacar al vidrio, las encimas (amilasa) y los agentes complejantes o las resinas de intercambio iónico (EDTA).

Antes de llevar cualquier tratamiento hay que realizar un análisis de la composición de los materiales que forman la superficie ya que pueden proceder del entorno de donde se ha extraído o del propio material vítreo que tras una serie de procesos físico-químicos han pasado a formar parte de las capas de deterioro. Hay que tener en cuenta que no se pretende recuperar el aspecto original, de ahí la polémica

de la eliminación de las escamas superficiales que provienen del deterioro de la superficie y están formadas por material original de objeto que impide ver el vidrio subyacente. A la vez son consecuencia del envejecimiento natural de la pieza, lo que denominamos pátina (García Fortes y Flos Travieso, 2008a).

2.4.2 Consolidación

La utilización de un consolidante tiene como objetivo “devolver a los materiales y bienes arqueológicos la capacidad estructural perdida, consecuencia de la incidencia negativa, prolongada en el tiempo, de los agentes físicos, químicos y biológicos presentes en el subsuelo” (García Fortes y Flos Travieso, 2008a). En los objetos de vidrio, al ser extraídos, se produce una rápida deshidratación de la superficie que crea numerosas capas de deterioro y del propio vidrio que se desprenden con facilidad, por lo que se recurre a un tratamiento consolidante para evitar esos problemas de delaminaciones y pérdida de material.

En su aplicación hay que tener cuidado con el estrato consolidado ya que el vidrio podría seguir deteriorándose debajo de esta capa. La alternativa a la consolidación estaría en realizar una conservación por medio de medidas de control de la humedad relativa y la temperatura (Flos Travieso, 2007).

2.4.3 Adhesión

La unión entre los fragmentos de un objeto es una labor muy común en vidrio arqueológico. Con la adhesión de fragmentos se pretende devolver a la pieza su forma original y facilitar su lectura.

Para ello se realiza un premontaje para posicionar los fragmentos sujetados con tiras de cinta adhesiva. Para la selección del adhesivo hay que tener en cuenta una serie de requisitos (Flos Travieso, 2007): rapidez de curado, aplicación en frío, transparencia (índice de refracción similar al vidrio), resistencia al envejecimiento (sobre todo a la exposición de las radiaciones ultravioleta), reversibilidad, resistencia mecánica, mínima contracción, elasticidad y baja viscosidad (adecuada penetración). Entre los materiales utilizados encontramos compuestos celulósicos, resinas acrílicas, vinílicas y epoxis.

2.4.4 Reconstrucciones volumétricas

Con frecuencia gran parte del vidrio arqueológico exhumado presenta un deterioro característico que es debido a las condiciones de elevada humedad con la que ha interactuado durante años. Este proceso ya ha sido explicado en el apartado anterior. Su extracción conlleva una rápida deshidratación del material y provoca la pérdida de transparencia, iridiscencia y desprendimientos superficiales. Es común, del mismo modo, encontrar los objetos divididos en fragmentos donde varios de éstos no se han podido recuperar. A esas áreas se las denomina áreas de fragmentos faltantes. Estas pérdidas, se pueden recuperar durante la restauración de la pieza a través de las reconstrucciones volumétricas. Este proceso consiste en volcar resinas translúcidas o transparentes en moldes que reproducen el hueco de las áreas que faltan. Estos procedimientos ya fueron comentados en Díaz-Marín y Aura-Castro (2017) al describir parte de los criterios de esta tesis.

Para la reconstrucción volumétrica se buscan materiales compatibles con el vidrio arqueológico. En algunos casos se ha recurrido al mismo vidrio como material de reintegración (Ortiz Palomar, 1994) admitiendo que la fragilidad de estas intervenciones puede llegar a ser un inconveniente importante. Otra alternativa ha sido optar por materiales utilizados en la restauración de piezas cerámicas, como es el yeso o la escayola, que a pesar de no cumplir con el requisito de la transparencia que caracteriza al vidrio, ofrecen un conjunto de ventajas destacables. Este tipo de reconstrucciones volumétricas aún son visibles en algunos museos (Martínez *et al.*, 2011). Pero sin duda, la llegada de las resinas transparentes o translúcidas de tipo epoxi, poliéster, poliuretano y acrílico, han hecho que se impongan a cualquier material anteriormente utilizado. Pueden ser coloreadas o pintadas modificando el resultado y adaptándose al color o a la policromía de la pieza (Guillem Casañ, 2015).

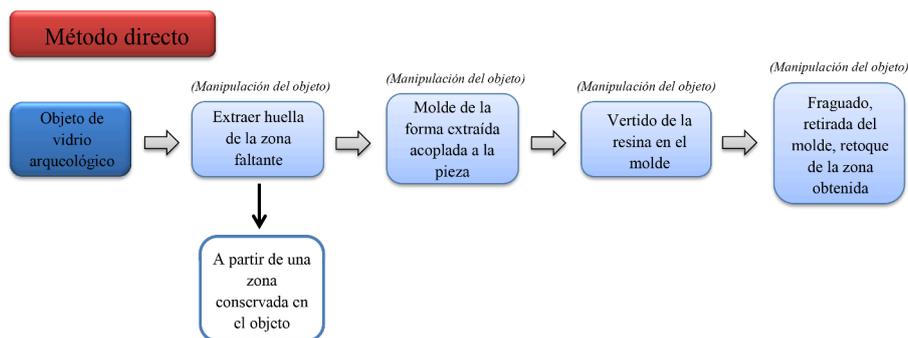


Figura 2.5: Método directo utilizado en las reconstrucciones volumétricas según el procedimiento tradicional. Se muestran las fases y los momentos donde el objeto original es manipulado.

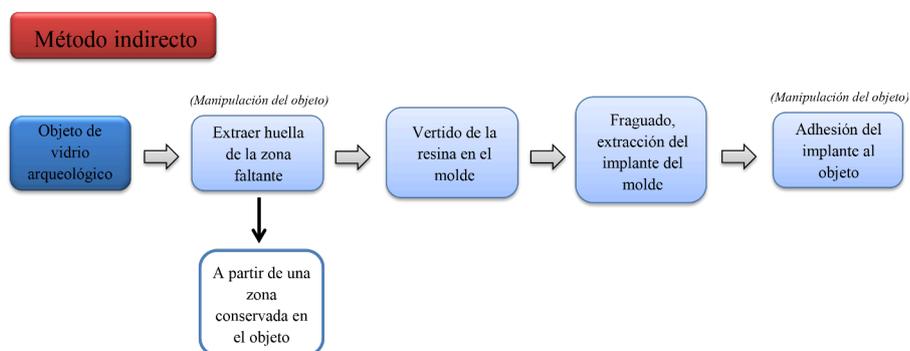


Figura 2.6: Método indirecto utilizado en las reconstrucciones volumétricas según el procedimiento tradicional. Se muestran las fases y los momentos donde el objeto original es manipulado.

En cuanto a los métodos que se utilizan para la obtención de los faltantes el más habitual es aplicando un molde. Estos moldes, que servirán para el vertido de la resina pueden ser: directos o indirectos. En el método directo la huella del molde se obtiene a partir de una zona del vidrio similar a la que se quiere reproducir. Este molde se traslada, posteriormente, a la zona del faltante y el vertido de la resina se realiza directamente sobre la pieza de vidrio. En el método indirecto el molde se obtiene a partir de una réplica del fragmento faltante. La réplica se extrae del objeto de vidrio para poder elaborar un molde a partir de ésta. De este modo, el vertido de la resina se realiza sobre un molde indirecto con total independencia de la pieza de vidrio que se está restaurando (Davison y Newton, 2008b; Koob, 2000; García-Patrón Santos, 2015). Dependiendo del objeto se abordará la reconstrucción con un método u otro.

El uso de moldes indirectos formados por varias partes es el método que generalmente está indicado cuando el porcentaje de vidrio que se conserva no es elevado. En estos casos, en lugar de replicar las áreas faltantes, se opta por realizar un soporte interior que recrea la forma completa de la pieza fragmentada, generalmente de resina transparente, que permita adherir o sujetar los fragmentos que se han conservado (Quiñones López y García Sandoval, 2009). El molde en este caso servirá para crear el soporte interior. Este molde estará constituido por varias partes debido a la complejidad del objeto a reproducir ya que se trata de crear una pieza similar a la existente, aunque de menor diámetro o tamaño, que necesita ser modelada de nuevo. La nueva pieza, de menor tamaño, puede realizarse con cera de modelar. Los dibujos arqueológicos, si están disponibles, pueden resultar de gran ayuda en cuanto que proporcionan información del perfil y del diámetro.

Los ejemplos expuestos aparecen frecuentemente en la bibliografía especializada ya que son los métodos más habituales. En otra línea encontramos un método sugerido en los años 60 (Gedye, 1968), aunque no recomendado para uso general dado las limitaciones propias del mismo. Se trata de recortar la silueta de los faltantes en una lámina de acrílico (Perspex), para darle forma con aire caliente y curvar el material según la morfología de la pieza original. Una versión más actual (Pasíes *et al.*, 2012; Pasíes Oviedo, 2012; Martínez *et al.*, 2011) utiliza láminas de tereftalato de polietileno o PET y láminas de polipropileno o PP. Primero se lleva a cabo una plantilla del faltante perdido que permite recortar la forma correcta para adherirlo al objeto. Se considera una intervención poco agresiva con la pieza pero su aplicación se limita a un tipo concreto de faltantes por lo que su práctica es limitada.

El Corning Museum of Glass ha presentado una nueva técnica para la recuperación de faltantes. Se vierte la resina acrílica Paraloid B-72 disuelta en acetona dentro de un molde plano para elaborar unas láminas del grosor necesario. Las láminas resultantes pueden quedar texturizadas por las burbujas de aire que quedan atrapadas en su interior o pigmentarse según el color de la pieza original. Se extraen del molde en estado todavía flexible para poder darle la forma deseada. Durante el proceso de polimerización y endurecimiento se recorta la silueta de la zona faltante y se adhiere a la pieza original por medio de un pincel impregnado en acetona (Koob *et al.*, 2011).

La reconstrucción habitual de faltantes de vidrio arqueológico implica, tal y como hemos visto, procesos manuales caracterizados por constituir tareas laboriosas, a menudo difíciles donde, de manera frecuente, el vidrio queda expuesto a un gran riesgo de deterioro por su fragilidad intrínseca y su delicado estado. Ante esta problemática, en la que el riesgo de deterioro se incrementa cuando se acomete la restauración directa, se propone un método de restauración no invasivo al llevar a cabo el modelado digital en 3D de las áreas faltantes y la impresión de estos implantes. De este modo, se intenta someter a la pieza original a la mínima manipulación al reducir los procesos a los que está sometida puesto que se sustituye el objeto original por un modelo digital en 3D con el que trabajar.

2.5 Selección de objetos de vidrio arqueológico para el estudio

Las piezas seleccionadas son parte de la colección del Museo de Cerámica de Manises (Valencia). Fueron recuperadas en la excavación realizada en 2004 en la calle Doctor Catalá nº 3 de Manises (Valencia).

2.5.1 Contexto arqueológico de los materiales



Figura 2.7: Vista general del solar tras la finalización de las excavaciones. En la parte central se ven los dos pozos de donde proceden las piezas. El círculo rojo (a) señala el pozo donde se localiza la UE 1147 y el círculo blanco (b) el pozo excavado donde se localiza la UE 1164. Imagen cedida por D. Ignacio Hortelano Uceda.

La excavación fue cofinanciada entre el Ayuntamiento de Manises por medio del Museo de Cerámica de Manises y la empresa promotora de la construcción de un edificio de viviendas en el solar de referencia. La dirección técnica estuvo a cargo de D. Ignacio Hortelano Uceda² siendo autorizada por la Dirección General de Patrimonio en el expediente nº 2004/0650-V. Los trabajos de excavación se realizaron entre agosto y octubre de 2004 encontrándose diversos silos y fosas excavadas en el terreno natural datados en los siglos XIII, XIV y XV (Fig. 2.7). Se han observado una superposición de estructuras constructivas de carácter doméstico fechadas en el siglo XV arrasadas por la construcción de nuevos edificios en el XVI que perduran por lo menos hasta el siglo XIX donde se levantó una gran vivienda decimonónica.

Las piezas seleccionadas fueron recuperadas de dos unidades estratigráficas (Fig. 2.8):

- UE 1147: se trata de un relleno heterogéneo de tierra arcillosa y suelta color marrón con abundantes escombros (ladrillos macizos, algunas piedras y fragmentos de mortero de cal). Este relleno amortizaba, junto con los rellenos UE 1159 y 1161, el pozo de planta ovalada UE 1081, excavado en el terreno

²La dirección técnica nos facilitó la información sobre el contexto arqueológico y los materiales encontrados. Esta información está inédita y disponible en Hortelano Uceda (2004).



Figura 2.8: Detalle de los pozos asociados a las unidades estratigráficas de la referencia UE 1081 y UE 1156. En primer término puede ver el pozo UE 1081 donde se localizó el relleno UE 1147. Detrás el pozo excavado de la referencia UE 1156 donde se localizó el relleno UE 1164. Imagen cedida por D. Ignacio Hortelano Uceda.

natural y con brocal construido con ladrillos macizos y piedras trabados con mortero de cal. El relleno de la UE 1147 se fecha a mediados del siglo XVII por los materiales cerámicos recuperados. De esta unidad estratigráfica se recuperó el objeto *Lámpara*.

- UE 1164: tierra suelta cenicienta de color gris verdoso. Se interpreta como un nivel generado por el uso del pozo ciego UE 1156, rico en materia orgánica. Este pozo estaba excavado directamente en el terreno natural sin ningún tipo de estructura construida como brocal. Presentaba planta en L y paredes verticales con huellas de escalones tallados en su lateral sur. El período de uso de este pozo negro se establece a lo largo del siglo XVI hasta inicios del siglo XVII. De esta unidad estratigráfica se recuperaron los objetos *Cuenco 1*, *Cuenco 2*, *Plato* y *Botella*.

2.5.2 Descripción de los objetos arqueológicos de vidrio seleccionados

Para su selección se ha tenido en cuenta que:

- Las piezas debían estar en la fase de reconstrucción volumétrica y presentar fragmentos faltantes (1).
- Los diferentes tipos de superficies tras el deterioro (semitransparentes, con iridiscencias, formación de capa blanca y pigmentaciones oscuras) debían estar presentes (2).
- Los espesores fueran diferentes (3).

Las piezas seleccionadas son 5 y de perfil completo:

- *Cuenco 1* (UE 1164): pieza realizada por soplado en molde. Presenta un cuerpo semiesférico, con un resalte exterior en la zona del labio con aspecto de cinta vuelta. Conserva dos pies de tipo pata de elefante y tres asas realizadas por aplicación en caliente de hilos de vidrio donde quedan marcados tres apéndices. Como decoración muestra relieves en forma de nervios distribuidos por parejas y con presencia de puntos de color blanco (Fig. 2.9).
 - 1) Analizando la morfología del objeto, las zonas faltantes se corresponden con parte del cuerpo semiesférico, un pie y un total de cuatro asas.
 - 2) En su superficie encontramos diferentes tipos de corrosión: iridiscencias, capa blanca, pigmentaciones oscuras y zonas translúcidas.
 - 3) Espesor entre 2 y 6 mm.
- *Cuenco 2* (UE 1164): pieza realizada por soplado en molde. Presenta un cuerpo semiesférico, con un resalte exterior en la zona del labio con aspecto de cinta vuelta. Tiene tres pies. Presenta como decoración un relieve de costillas de grueso decreciente (Fig. 2.10).
 - 1) Los faltantes se encuentran en la zona del cuerpo incluyendo parte del resalte exterior.
 - 2) Su superficie presenta con coloración marrón y caramelo, causada por el deterioro, dejando zonas translúcidas.
 - 3) Espesor entre 2 y 5 mm.
- *Plato* (UE 1164): pieza realizada por soplado al aire. Plato pequeño con ala horizontal y borde vuelto, base plana y fondo ligeramente convexo (Fig. 2.11).
 - 1) Tiene dos zonas faltantes, que ocupan gran parte del cuerpo central.

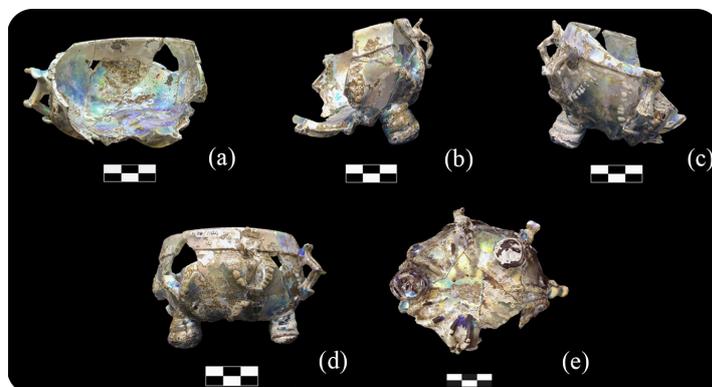


Figura 2.9: Diferentes vistas del objeto *Cuenco 1*: a) frontal, b) lateral derecho, c) lateral izquierdo, d) posterior y e) inferior. Imagen del Archivo del Museo de cerámica de Manises (Valencia).

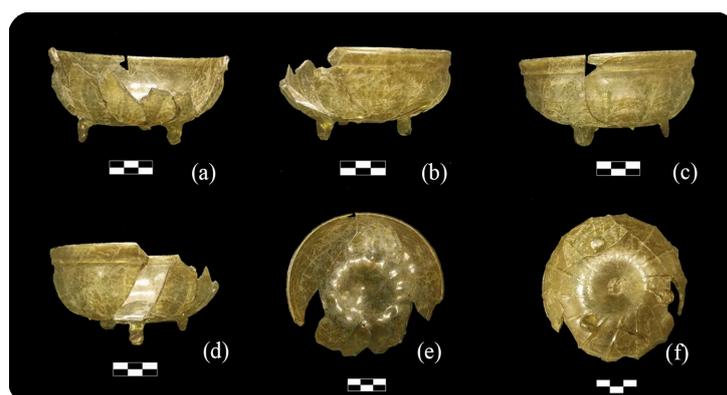


Figura 2.10: Diferentes vistas del objeto *Cuenco 2*: a) frontal, b) lateral derecho, c) posterior, d) lateral izquierdo, e) superior y f) inferior. Imagen del Archivo del Museo de cerámica de Manises (Valencia).

2) Presenta una superficie con formación de capa blanca nacarada y pigmentación oscura.

3) Espesor entre 0,8 y 5 mm.

- *Botella* (UE 1164): pieza realizada por soplado en molde. Presenta una forma globular achatada que forma el cuerpo de la botella sobre un pie de copa y un cuello que se estrecha hacia la boca. El cuello está decorado con costillas



Figura 2.11: Diferentes vistas del objeto *Plato*: a) frontal, b) lateral derecho, c) posterior, d) lateral izquierdo, e) superior y f) inferior. Imagen del Archivo del Museo de cerámica de Manises (Valencia).

verticales que presentan un ligero giro. Se observa una ligera inclinación en la zona superior hacia un lado (Fig. 2.12).

1) Los faltantes se localizan en el cuerpo globular, en forma de 6 huecos que dejan ver el interior. La boca ha desaparecido.

2) En su superficie se aprecia la formación de una capa blanca opaca de aspecto tornasolado y pigmentaciones oscuras que han vuelto por completo opaca toda la superficie.

3) Espesor entre 0,9 y 3 mm.

- *Lámpara* (UE 1147): pieza realizada por soplado al aire. Presenta una forma troncocónica que se ensancha en el ala. Su zona superior está formada por una carena³ desde donde sale el ala que se va abriendo. La carena tiene un remate inferior en forma de anillo de sección hueca (Fig. 2.13).

1) La zona fragmentada se corresponde con parte del ala quedando incompleta.

2) En cuanto a su superficie, presenta pérdida de transparencia aunque conserva zonas translúcidas y zonas de iridiscencias.

3) Espesor entre 0,8 y 6 mm.

³Carena: línea que marca un cambio brusco en la dirección del perfil mediante un marcado ángulo de inflexión que condiciona la forma del objeto. Puede haber una o más (Heras, 1992).

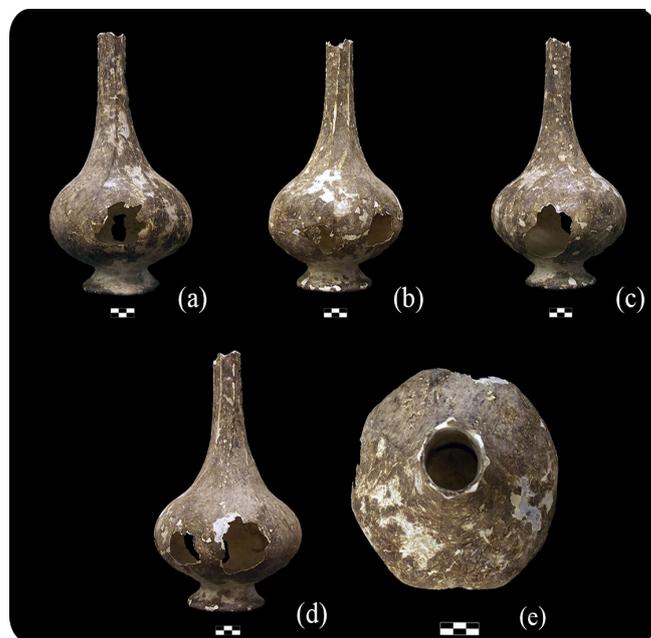
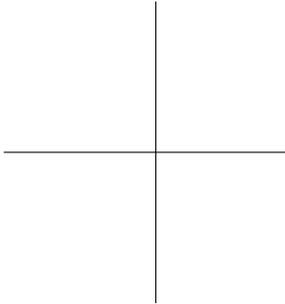
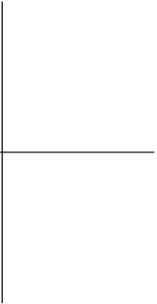


Figura 2.12: Diferentes vistas del objeto *Botella*: a) frontal, b) lateral derecho, c) posterior, d) lateral izquierdo y e) superior. Imagen del Archivo del Museo de cerámica de Manises (Valencia).

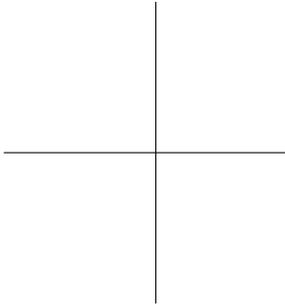
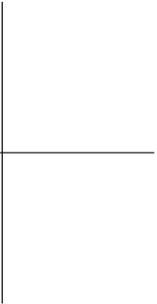


Figura 2.13: Diferentes vistas del objeto *Lámpara*: a) frontal, b) lateral derecho, c) posterior, d) lateral izquierdo, e) superior y f) inferior. Imagen del Archivo del Museo de cerámica de Manises (Valencia).



Parte I

Metodología para la utilización
de modelos 3D en procesos de
conservación y restauración



Capítulo 3

Digitalización de objetos de vidrio arqueológico. Uso del ciclododecano

3.1 Adquisición: obtención del modelo 3D

3.1.1 Métodos de adquisición del patrimonio

La adquisición del patrimonio permite tener representaciones digitales detalladas (modelos 3D) que pueden utilizarse para realizar análisis morfológicos, sustituir al objeto original en métodos de conservación y restauración, y ayudar a su difusión dentro de la comunidad científica y de la sociedad en general.

Para crear estas representaciones digitales, se utilizan dispositivos de adquisición 3D que capturan la topología de los objetos reales. Existen varios tipos de dispositivos para llevar a cabo dicha operación, se dividen en escáneres de contacto basado en el contacto físico o escáneres sin contacto. Éstos últimos son los más comunes en el campo de la digitalización del patrimonio. Entre ellos destacan, el escáner 3D de tiempo de vuelo, el escáner 3D de triangulación y el escáner de luz blanca estructurada. El funcionamiento del escáner láser, independientemente del tipo que sea, está basado en un sistema compuesto por una fuente láser y un sensor óptico. El láser emite una luz en forma de línea o patrón que recorre la superficie del objeto y a su vez el sensor recoge la luz reflejada por el objeto. Otra técnica muy utilizada, por su facilidad y bajo coste, es la fotogrametría. Es una técnica que obtiene las mediciones y las coordenadas 3D a partir de fotografías. Su principio básico también es la triangulación, donde a partir de una serie de fotografías con información superpuesta se puede calcular desde la posición de la

cámara hasta el objeto (Slama *et al.*, 1980). La toma fotográfica se hará rodeando el objeto siempre desde el mismo ángulo.

La digitalización 3D es un proceso complejo, que se puede dividir en tres fases (Pavlidis *et al.*, 2007):

- Planificación: A partir del tipo de objeto que se va a registrar, hay que seleccionar la técnica, la metodología a seguir, donde se realizará el registro, la iluminación, etc.
- Adquisición del objeto: Realizar el proceso de digitalización teniendo en cuenta lo establecido en la fase anterior.
- Procesamiento de datos: Donde se unifican las diferentes capturas, se optimiza la geometría y se procesa el mapa de textura para obtener el texturizado del objeto.

3.1.2 Vidrio *vs* escáner láser de triangulación

Para este estudio se ha utilizado un escáner láser Konica Minolta v-900 con una lente de 25 mm que proporciona una precisión de $600\mu\text{m}$, de acuerdo con las especificaciones del fabricante. Este escáner aplica el principio de triangulación¹, que permite al sistema extraer la geometría de los objetos (Pavlidis *et al.*, 2007).

Los vidrios presentan una serie de características ópticas que interfieren cuando un haz de radiación luminosa incide sobre su superficie. Si ésta es completamente lisa, transparente y homogénea, puede sufrir una reflexión parcial en las caras que atraviesa o una absorción por efecto de la masa que recorre y finalmente, desviarse de su dirección de incidencia por efecto de la refracción, emergiendo paralela a la dirección inicial. En el caso de una superficie rugosa o con heterogeneidades estas interferencias aumentan produciéndose una polarización, una doble refracción, interferencias luminosas, emisión espontánea y efectos fotoquímicos o fotoeléctricos (Fernández Navarro, 2003e).

Estas propiedades dificultan la aplicación de los algoritmos de visión que permiten la captura de la geometría de los objetos reales utilizados por los escáneres láseres de triangulación. Este sistema requiere superficies opacas como piedra o arcilla. Al ser aplicado sobre superficies reflexivas/refractivas, los supuestos fundamentales realizados por algoritmos de visión no se aplican correctamente provocando, por

¹El láser emite un haz luminoso en forma de línea o patrón proyectado sobre la superficie del objeto y el sensor detecta los rayos reflejados. De este modo, se configura un plano imaginario delimitado por un triángulo cuyos lados están marcados por la distancia que recorre el rayo láser emitido, el rayo láser reflejado y la separación entre emisor y detector. Los parámetros conocidos permiten calcular la topología del objeto en cada punto medio (Guidi *et al.*, 2010).

ejemplo, la deformación de la proyección de la imagen, la mezcla de los diferentes puntos de vista o la complicación en el proceso de reconstrucción.

3.1.3 Trabajos previos en la adquisición del vidrio

La tecnología de escaneado 3D ha sido extensamente utilizada en el patrimonio cultural en aplicaciones como inspección, documentación y con fines de investigación. Sin embargo, la aplicación de estos métodos en objetos de vidrio arqueológico es escasa y se remite a estudios de vidrieras históricas (Salemi *et al.*, 2008) y antiguos soportes fotográficos (Stanco *et al.*, 2011). En ambos casos, el vidrio fue pintado o recubierto por una emulsión, que permite la digitalización al hacer opaco el material original. Cuando consideramos el vidrio arqueológico para su escaneado en 3D hay que tener en cuenta el estado de conservación del mismo, ya que normalmente es recuperado muy fragmentado y se encuentra extremadamente frágil. Este hecho dificulta su estudio ya que su manipulación normalmente va acompañada de un complejo proceso de restauración.

Actualmente, la adquisición 3D del vidrio arqueológico es un problema no resuelto. Sin embargo, en los últimos años, se ha desarrollado sistemas para la adquisición de objetos transparentes y especulares. Un exhaustivo y completo estudio sobre el estado de la cuestión de estas técnicas ha sido encontrado en Ihrke *et al.* (2010) y Mériaudeau *et al.* (2012), donde una serie de soluciones se introducen para permitir adquirir objetos transparentes, semitransparentes y con alta reflectividad. Algunas de las soluciones propuestas consideran la fabricación de dispositivos específicos para la adquisición de vidrio transparente usando luz estructurada (Rantson *et al.*, 2010), cámaras infrarrojas (Eren *et al.*, 2009), dispositivos de polarización y desplazamiento de fase (Chen *et al.*, 2007) o incluso sumergiendo los objetos originales dentro de un tanque lleno de un fluido fluorescente (Hullin *et al.*, 2008). Otras soluciones utilizadas combinan el uso de una cámara de vídeo, un centro en movimiento rodeado de unas pequeñas esferas (Yeung *et al.*, 2011), o una plataforma giratoria junto a una serie de cámaras, luces y monitores (Matusik *et al.*, 2002). Todos estos sistemas efectivos ante la problemática de la adquisición de objetos transparentes o translúcidos, no pueden ser aplicados sobre el vidrio arqueológico, debido a sus estrictas restricciones.

Una alternativa eficaz que no requiere la utilización de dispositivos específicos es el uso de un aerosol anti-reflectante para superficies transparentes y brillantes, que vuelve opacas y mates. Esta solución es muy versátil y económica, y su uso es muy común en aplicaciones industriales de cara a la adquisición de objetos complejos (reflexión/refracción). En Skabek y Kowalski (2009) se evalúan 4 escáneres diferentes y, en algunos de los objetos, se aplica un producto en aerosol para facilitar la adquisición y registro de la resultante nube de puntos. Este tipo de aerosoles no crea una capa de pintura entendida como tal, pero están especialmente formulados para crear un color blanco que penetre en la superficie para realizar un test de

detección de fisuras y grietas. Permiten la inspección y la detección de las coloraciones que han sido previamente introducidas dentro de las grietas a caracterizar. Forman unas capas extremadamente delgadas y al mismo tiempo, proporciona una cobertura homogénea. En la mayoría de los casos, la elección del aerosol apropiado depende de la geometría de las superficies, el relieve y el número de registros que hay que hacer. Actualmente, su aplicación se ha extendido y comúnmente es usado para la adquisición 3D de objetos brillantes, translúcidos o muy oscuros. Sin embargo, el uso de estos productos no es adecuados para su aplicación en el patrimonio cultural (Celani *et al.*, 2009) porque pueden alterar la superficie de los objetos, y en el caso del vidrio arqueológico pueden dañar la superficie del objeto.

3.1.4 Ciclododecano como opacificante temporal

El principal problema del uso de los aerosoles descritos es que no son apropiados para su utilización sobre fragmentos arqueológicos: finalizado el proceso de adquisición hay que eliminar la capa de pulverización por medio de fricción y/o el uso de disolventes de carácter agresivo. Dada la naturaleza única de los fragmentos y su fragilidad, este procedimiento no se puede aplicar debido a que la superficie del objeto podría dañarse. Además, la estabilidad química es un requisito común para la manipulación de este tipo de objetos y ninguno de los aerosoles de pulverización comerciales disponibles satisface esta condición.

Para proporcionar una solución al problema de la adquisición en el campo de la arqueología, proponemos una nueva aplicación de un material comúnmente utilizado en conservación: el uso del ciclododecano como aerosol opacificante. El ciclododecano (abreviado como CCD) es un cicloalcano volátil ($C_{12}H_{24}$) que se solidifica a temperatura ambiente. Por ser no polar y estar compuesto exclusivamente por carbono e hidrógeno, se considera un material inerte. Su característica más atractiva es que sublima, es decir, pasa de estado sólido a gaseoso. Gracias a esta característica no son necesarios los tratamientos físicos o químicos para su eliminación. Sus propiedades físico-químicas incluyen una adecuada capacidad para la formación de la película, es insoluble en agua, es soluble en disolventes orgánicos y posee una baja toxicidad, que hacen que el compuesto sea particularmente útil en el ámbito del patrimonio cultural.

El CCD empezó a usarse en conservación y restauración del patrimonio a mediados de 1990 y fue propuesto originalmente por Hans Michael Hangleiter, Elisabeth Jägers and Erhard Jägers (Hangleiter *et al.*, 1995) tras observar la facilidad de remoción de esta sustancia que podía ser aplicada como consolidante y protector temporal. Desde entonces, se ha utilizado sobre muchos materiales como piedra, cerámica, papel, fósil y vidrio entre otros (Muros e Hix, 2004; Brown y Davidson, 2010; Berthet y Fraile-Ugalde, 2004). La propiedad más interesante de CCD para los restauradores del patrimonio cultural es el hecho de que sublima a temperatura ambiente, sin dejar residuos. Esto explica su extendido uso como consolidante

temporal, capa protectora, capa barrera y adhesivo (Rowe y Rozeik, 2008; Cleere, 2005).

Este producto ha sido muy estudiado por los investigadores. En Anselmi *et al.* (2011) se estudió el comportamiento del CCD aplicado en aerosol sobre superficies no porosas usando la perfilometría de contacto² (RMN, de sus siglas en inglés) y la espectroscopia infrarroja (FTIR, de sus siglas en inglés). De sus resultados se destaca como la sustancia permanece en la superficie y no penetra en el interior, en consonancia con el nivel de abrasión de la superficie ensayada. En Stein *et al.* (2000) se aplica el ciclododecano fundido y en una solución saturada de hexano, xileno y Shellsol OMS sobre vidrio y otros materiales. La sublimación fue monitorizada de tres formas: visual, por pérdida del peso en función del tiempo y por cromatografía de gases-espectrometría de masas (GC-MS, de sus siglas en inglés). Los resultados mostraron que el CCD se sublima sin dejar residuos. Sin embargo, otros estudios donde utilizan microscopía, FTIR y GC-MS muestran que la aplicación del CCD sobre probetas de vidrio, puede dejar residuos tras la sublimación, que posiblemente son impurezas del producto (Caspi y Kaplan, 2001). De acuerdo con estos estudios, se recomienda utilizar formulaciones de alta calidad para reducir la cantidad de residuos.

En Watters (2007) se estudiaron los rangos de sublimación a través de la monitorización de la pérdida del peso de la película fundida de CCD. Los resultados muestran largos periodos de sublimación básicamente influidos por el método de aplicación utilizado en forma de resina fundida. Cuando se cambió a la solución en aerosol, los resultados fueron bastante diferentes: la capa era más suave y delgada, proporcionando baja resistencia a la presión. El aerosol presenta la resina disuelta en un disolvente extremadamente volátil, una mezcla de metano y butano, que también actúa como propelente. Esta mezcla disminuye el tiempo de evaporación en comparación con el uso de la resina sólida.

En Neuner *et al.* (2001) se aplicó CCD con brocha y por goteo como consolidante y protector temporal en un vidrio romano laminado. Los resultados muestran que los vidrios protegidos pueden ser manipulados sin riesgos.

El ciclododecano se puede aplicar de diferentes maneras (Fig. 3.1), pero para el uso propuesto, el aerosol parece ser la más conveniente ya que crea una película más fina. Después de su aplicación en un objeto, se puede observar que su superficie se vuelve opaca y blanca, que son las condiciones más deseables para los propósitos de escaneado láser. Inmediatamente después de la aplicación, la capa comienza a sublimar.

²La perfilometría mecánica o de contacto es una técnica de análisis superficial 2D, basada en un estilete o punta. Se trata de un medidor de espesores. La punta móvil hace un desplazamiento vertical mientras se realiza un barrido lineal manteniendo constante la fuerza que éste realiza sobre la superficie de la muestra. La realización de barridos sucesivos y paralelos permite detectar cambios en el espesor (Telstar, 2013).

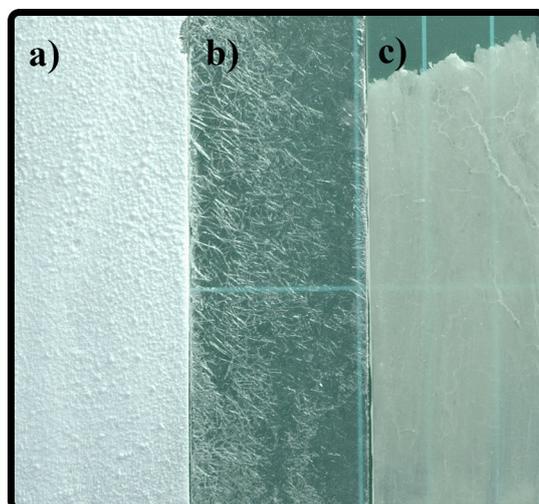


Figura 3.1: El ciclododecano se puede aplicar de tres formas: a) en aerosol, b) diluido en disolvente y c) fundiendo la resina con calor.

En la adquisición de un objeto cubierto por una capa de opacificante, hay que tener en cuenta el error introducido por la capa creada. Por ello, se ha sometido al CCD a una serie de ensayos para demostrar que ese error no es significativo y por tanto no interfiere en los datos adquiridos y que puede ser equiparado con otros pulverizadores usados en el sector industrial.

3.2 Metodología experimental

Los ensayos realizados al ciclododecano se plantean para: (1) evaluar la capacidad de sublimación del CCD en condiciones ambientales aceleradas (por la acción de un secador sobre la capa de CCD), mostrando la característica más interesante de este material. (2) y (3) para medir el error introducido en el proceso de adquisición cuando se usa CCD por el tamaño de partícula, y comparar este dato con los obtenidos al ensayar los tres aerosoles blanqueantes comunes (Fig. 3.2) que han sido seleccionados: Helling Developer U89 (U89), Helling Developer D70 (D70) y OPN Developer White (WHITE), (4) mostrar el tamaño de partícula de cada aerosol usando un microscopio electrónico para ver las diferencias entre los aerosoles y estimar el error introducido por cada uno de ellos, independientemente del escáner 3D utilizado. Y por último, (5) estimar la velocidad de sublimación del CCD estableciendo una ventana de tiempo donde el aerosol pueda ser utilizado como opacificante para la adquisición de objetos independientemente del tamaño de los mismos (Díaz Marín *et al.*, 2016).



Figura 3.2: Aerosoles blanqueantes industriales seleccionados, de izquierda a derecha: Helling Developer U89, OPN Developer White y Helling Developer D70 y por último ciclododecano en aerosol.

3.2.1 Capacidad de sublimación

De acuerdo con Hangleiter *et al.* (1995) el promedio de velocidad de sublimación del CCD en condiciones normales es de 0.03 mm cada 24 horas. Hay que tener en cuenta que hay factores adicionales que pueden afectar a su comportamiento como son: la densidad y el espesor de la capa, la porosidad del sustrato, la temperatura y la presión atmosférica y el intercambio de aire con la superficie creada.

De esta manera, la sublimación puede ser acelerada por el aumento del flujo del aire y de la temperatura sobre la superficie del objeto, o ser retardada por la reducción del flujo del aire sobre la superficie (por ejemplo sellándolo). Hemos realizado una prueba para demostrar esta característica. Se ha pulverizado la superficie de un objeto tridimensional con CCD, y ha sido expuesta a la acción de un secador de pelo con una temperatura de 50°C. En la figura 3.3 se muestra el proceso acelerado de la sublimación donde la primera imagen muestra el objeto cubierto por el CCD y en la última vemos la superficie del objeto libre de CCD.



Figura 3.3: De derecha a izquierda y de arriba a abajo, el proceso acelerado de sublimación del ciclododecano, con ayuda de un secador de pelo. Las imágenes se capturaron cada 45 segundos. Hay que señalar que las marcas blancas sobre el objeto que se observan en la foto final, son del propio material ya que el ciclododecano se ha sublimado por completo.

3.2.2 Determinación del error introducido sobre una superficie plana

Este ensayo consiste en escanear una carta de calibración para comparar la nube de puntos³ obtenida con el plano óptimo del objeto pulverizado que mejor se ajuste. Los residuos son expresados como signos de distancia entre el plano y cada punto, y se muestran juntos en un histograma. El cálculo del error promedio y la desviación estándar se realizan a la vez junto con dos intervalos de 2.5 % que contienen las peores muestras (uno para distancias positivas y otro para distancias negativas).

En primer lugar, se desarrolló el escaneado de la carta de calibración sin aplicación alguna del aerosol (para caracterizar la distribución del error por el sensor), y a continuación se escaneó la carta pulverizada con cada uno de los aerosoles. Para este experimento y los próximos, se ha utilizado un colorímetro para hacer las comparaciones: el aerosol es aplicado sobre la superficie hasta conseguir un tono específico de blanco. Los resultados de este ensayo, mostrados en la figura 3.4, revelan diferencias no significativas entre el uso o no uso del aerosol, y entre el ciclododecano y las otras marcas industriales. Como se puede apreciar, el 95 %

³Nube de puntos: es el resultado de la adquisición de un objeto por medio de un registro 3D, con este término nos referimos a un conjunto de vértices en un sistema de coordenadas tridimensional, (X,Y,Z) que representan la superficie externa del objeto (Hollinger *et al.*, 2013).

de las muestras están siempre en un rango casi centrado en 0, y con $600\mu\text{m}$ de tamaño, lo cual tiene sentido dada la precisión del escáner.

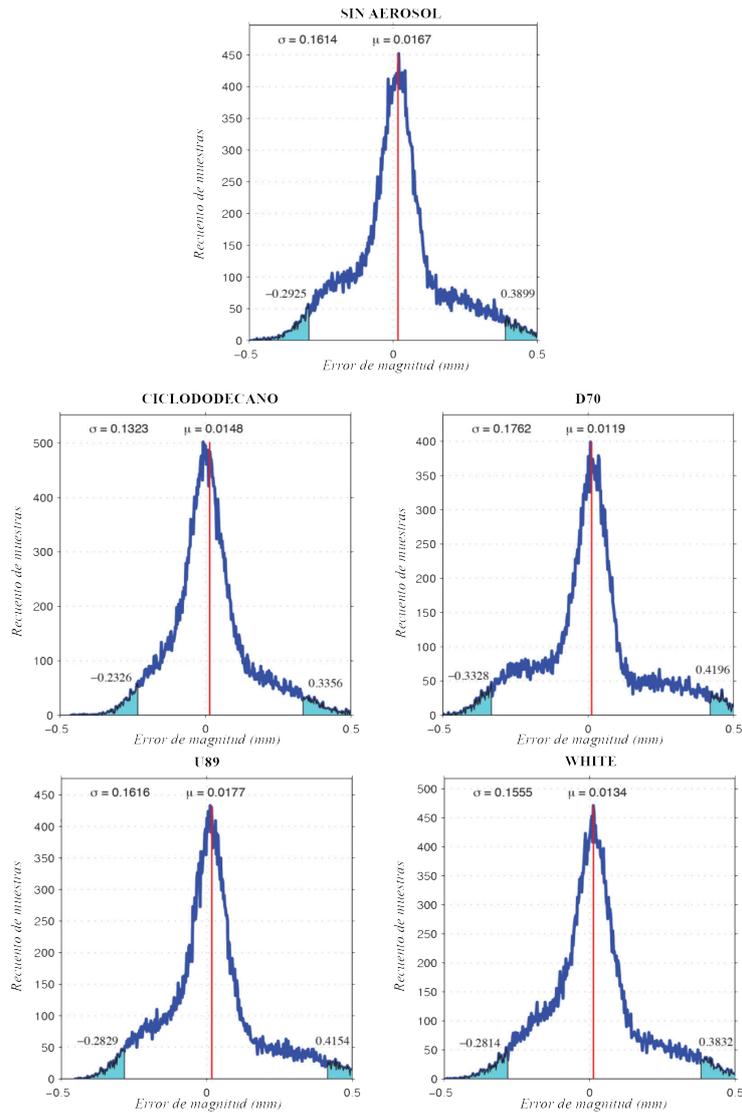


Figura 3.4: En las gráficas se pueden observar error introducido por los aerosoles después de la pulverización con ciclododecano en la carta de calibración, con respecto al plano óptimo. La línea roja indica el error promedio. Los intervalos azules de ambos lados representan (cada uno) un 2,5 % del total de las muestras adquiridas.

3.2.3 Determinación del error introducido sobre una superficie curva

En este ensayo se han utilizado objetos con formas complejas y parecidas a casos reales, para evaluar la actuación de cada aerosol. El primer objeto (*CO*) tiene una superficie lisa con suaves curvas (como un típico objeto de vidrio), y el segundo tiene fuertes incisiones (*MO*).

Dado que, en este caso, ningún objeto presenta un plano óptimo, los residuos se calculan por diferentes vías: se hace una primera adquisición del objeto, sin mover el objeto y dejando el escáner en un punto fijo, se aplica el aerosol hasta el nivel de blanco deseado. Entonces, el modelo es adquirido otra vez y ambas nubes de puntos son comparadas (porque, aunque no se enfoque el escáner otra vez, se observa un cambio constante entre las adquisiciones). Los residuos son expresados como distancias de punto a punto entre ambas nubes de puntos.

Para evitar los errores de medición, cada objeto ha sido escaneado 3 veces con cada aerosol, y no ha sido reutilizado ningún objeto tras el test. Por lo que se han usado 12 réplicas de cada objeto: después de la adquisición de un aerosol, el objeto es descartado para los demás ensayos, para que los posibles residuos que puedan quedar en la superficie no alteren la siguiente medida.

En las figuras 3.5 y 3.6 se muestran los resultados expresados como el número total de muestras de las tres adquisiciones desarrolladas para cada aerosol.

3.2.4 Determinación del tamaño de partícula

Como sugieren los resultados anteriores, los 4 productos comparados son adecuados para la adquisición de los modelos 3D de fragmentos arqueológicos. Sin embargo, una inspección visual de la superficie testada después de la aplicación de los aerosoles revela diferencias entre el CCD y los otros aerosoles mostrando más irregularidades y sugiriendo un mayor tamaño de partícula. Para confirmar esto, y medir las diferencias, se han tomado una serie de imágenes utilizando un microscopio electrónico de barrido (SEM, de sus siglas en inglés). En la figura 3.7 se puede apreciar como las partículas del CCD son considerablemente más grandes que en las presentes en los otros productos. Sin embargo, con 5000x la imagen del CCD (superior-derecha) muestra claramente que la partícula mide alrededor de $10\mu\text{m}$, que es un orden de magnitud inferior respecto a la precisión del escáner láser de triangulación. Esta observación confirma los resultados de los experimentos previos, y explica las diferencias visuales entre CCD y los otros aerosoles.

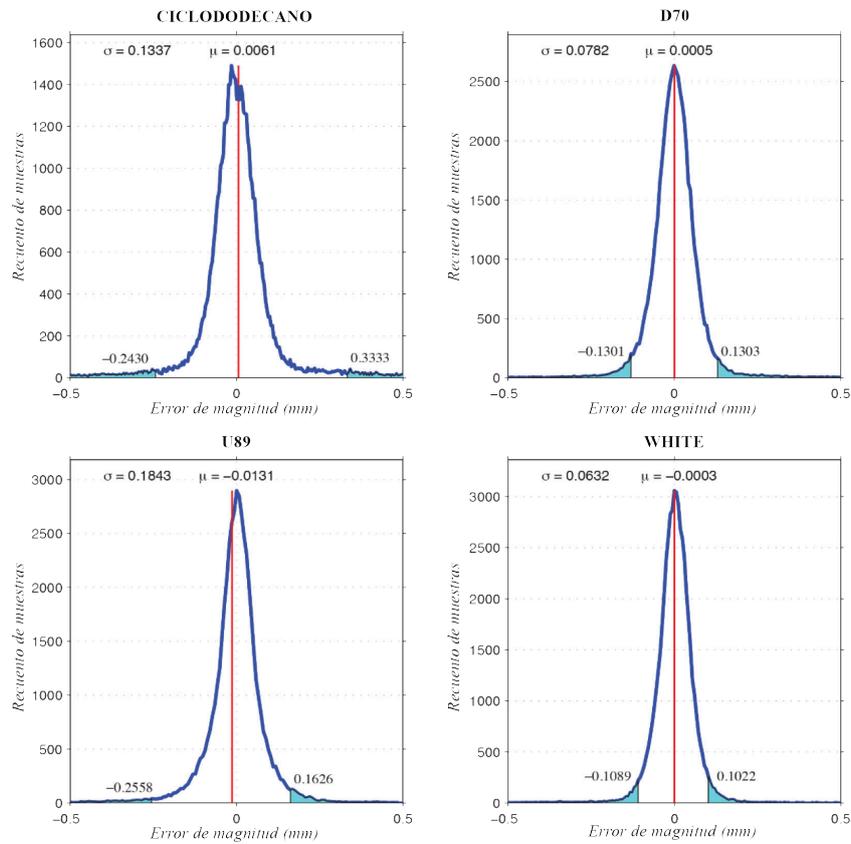


Figura 3.5: Las gráficas muestran los residuos del modelo *CO* después de aplicar el aerosol, con respecto al mismo modelo antes de la pulverización. La línea roja indica el error promedio. Los intervalos azules de ambos lados representan (cada uno) un 2,5% del total de muestras adquiridas. Este modelo presenta una forma irregular con alguna curvatura suave en la superficie. Los resultados muestran que el ciclododecano se comporta ligeramente peor que las alternativas, pero siempre dentro del rango de la precisión del escáner.

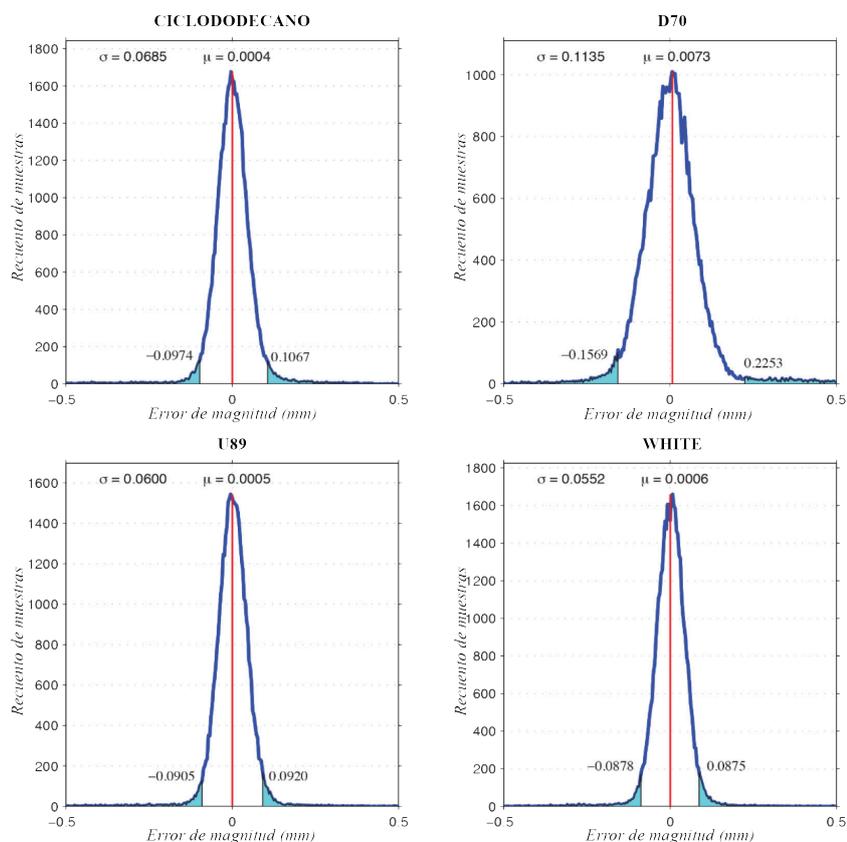


Figura 3.6: Estas gráficas muestran los residuos del modelo *MO* después de aplicar el aerosol, con respecto al mismo modelo antes de la pulverización. La línea roja indica el error promedio. Los intervalos azules de ambos lados representan (cada uno) un 2,5% del total de muestras adquiridas. Este modelo presenta una forma irregular con incisiones fuertes en la superficie. Como sucedió en el caso anterior, los cuatro aerosoles presentan una distribución de errores muy similar, y dentro del rango de precisión del escáner y, en este caso, CCD tiene un rendimiento mejor que D70.

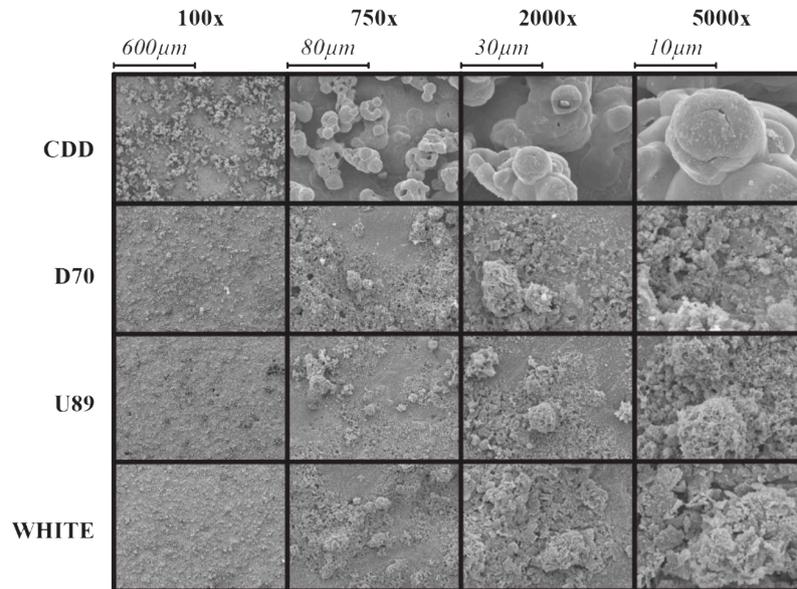


Figura 3.7: Imágenes del microscopio electrónico donde se compara los 4 aerosoles a diferentes aumentos. Se observa el tamaño de partícula de cada aerosol donde el ciclododecano presenta el mayor tamaño de partícula, pero aún así no interfiere con la precisión del escáner.

3.2.5 Velocidad de sublimación

Para estimar el tiempo efectivo donde el CCD puede ser usado como opacificante para la adquisición, se han seleccionado dos objetos: un vidrio plano con superficie rugosa (*Vidrio Plano*) y un recipiente de vidrio con relieves pronunciados e irregularidades (*Vidrio Hueco*). Ambos objetos han sido pulverizados y escaneados varias veces en una posición fija. Tomando como referencia la nube de puntos del modelo adquirido inmediatamente después de la aplicación del aerosol, éste se compara con la secuencia de adquisiciones posteriores y se toman 2 estimaciones diferentes para calcular la velocidad de sublimación: el número de medidas válidas tomadas por el escáner y la media de desviación respecto al modelo de referencia. De media, la cantidad total de CCD aplicada en cada objeto para asegurar una buena adquisición ha sido estimada en $7,998 \text{ mg/cm}^2$.

Los resultados presentados en la figura 3.7 muestran como, después de la primera hora desde la aplicación del aerosol, el número total de puntos válidos no cambia significativamente (98,41 % de los puntos originales están todavía presentes en el caso del *Vidrio Hueco* y 98,44 % en el caso del *Vidrio Plano*), mientras que en las medias de desviación de la adquisición está siempre muy cerca de 0 (0.0526 mm

para el *Vidrio Hueco* y 0.0052 mm en el *Vidrio Plano*). Durante los siguientes 4 días, el error promedio no cambió significativamente, mientras que el número de medidas válidas decreció gradualmente, restando un 77,74 % de puntos originales en el *Vidrio Hueco* y un 59,44 % en el *Vidrio Plano* al final del ensayo.

Se puede notar como la velocidad de sublimación cambia considerablemente dependiendo del caso: en el *Vidrio Plano* el intercambio de aire sobre la superficie es mayor que un objeto irregular como en el *Vidrio Hueco*, el proceso de evaporación aparece acelerado. Sin embargo, ambos objetos han podido ser escaneados de manera perfecta durante los primeros 75 minutos después de la aplicación del aerosol. Desde nuestra experiencia, es un tiempo más que suficiente para el escaneo de un objeto.

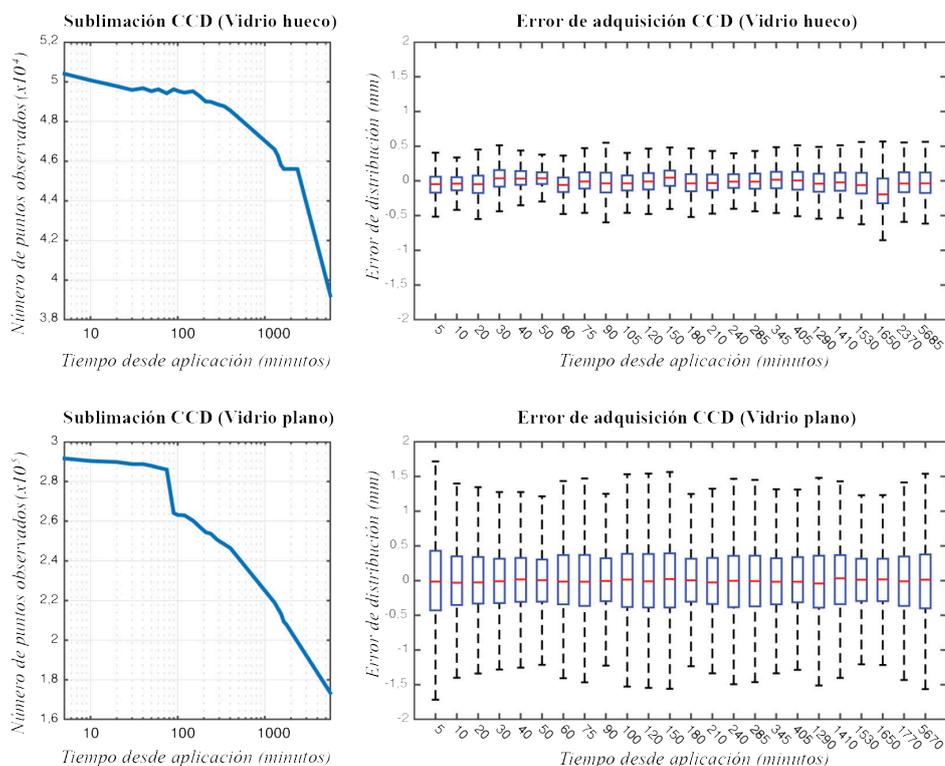


Figura 3.8: Evaluación de la velocidad de sublimación del CCD. Los gráficos de la izquierda muestran el número de medidas válidas en el tiempo con respecto al modelo de referencia (adquirido inmediatamente después de aplicar el pulverizado), mientras que los gráficos de la derecha muestran la distribución del error en el tiempo.

3.3 Resultados y discusión

De acuerdo con la serie de experimentos realizados y las ventajas halladas en el uso del CCD respecto a su estabilidad química y el hecho de que sublima a temperatura ambiente, este producto se posiciona como un candidato perfecto en la adquisición de objetos arqueológicos con superficies reflexivas/refractivas incluso teniendo en cuenta que su tamaño de partícula es algo mayor.

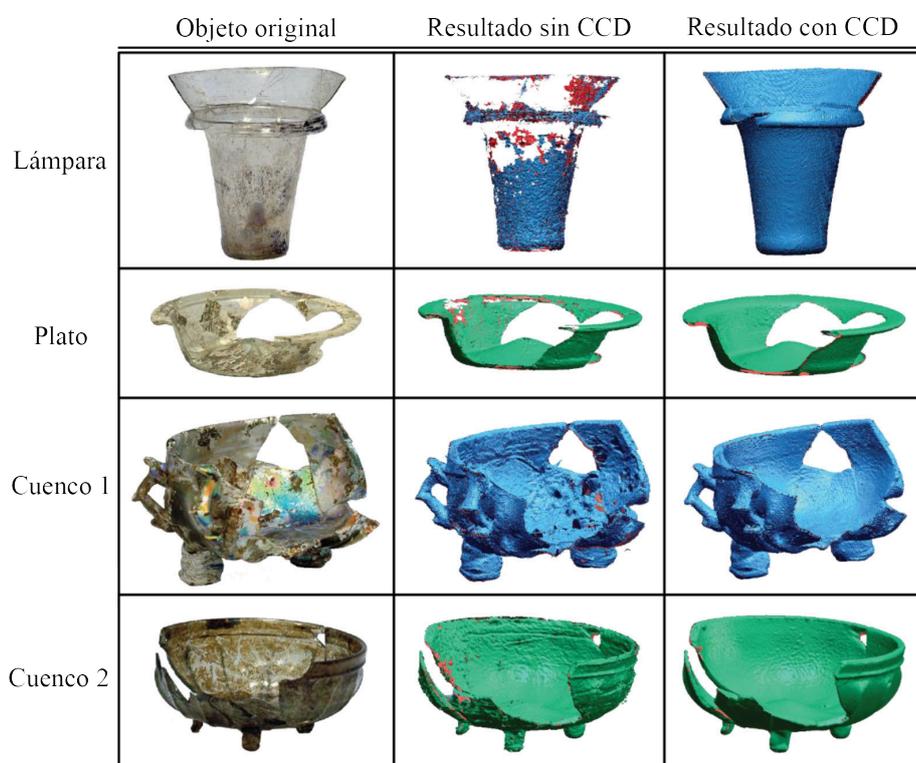


Figura 3.9: Resultados de la adquisición de diferentes objetos de vidrio: sin CCD y con el CCD en aerosol sobre su superficie.

La figura 3.9 muestra la aplicación del ciclododecano en cuatro piezas de vidrio arqueológico de las cinco seleccionadas ⁴. Se pueden ver el resultado de la adquisición de los objetos con y sin el ciclododecano. Los dos primeros objetos (*Lámpara* y *Plato*) presentan áreas translúcidas que no son registradas por el escáner y que

⁴La pieza *Botella* no necesitó el uso de ciclododecano para su registro por que el nivel de corrosión de su superficie es tan elevado que ha perdido toda transparencia y no presenta brillos.

en el modelo se traducen como espacios vacíos o huecos. En cambio, en los modelos *Cuenco 1*, *Cuenco 2*, y *Plato* en las áreas opacas, el resultado de la corrosión del vidrio, permiten adquirir la superficie aunque generando unas deformaciones y rugosidades inexistentes. El uso del CCD facilita la captura de todos los objetos al reducir el ruido considerablemente en todos los casos. En la figura 3.10 se muestra el aspecto de uno de los objetos (*Cuenco 1*) rociado con CCD para su adquisición, y el mismo objeto tras la eliminación de la capa blanca sin ningún tratamiento superficial.



Figura 3.10: A la izquierda el objeto *Cuenco 1* con ciclododecano aplicado sobre toda su superficie, y a la derecha el mismo objeto sin CCD finalizado el proceso de sublimación (no acelerado). Se observa que no queda rastro del aerosol sobre la superficie del objeto. El proceso de sublimación llevó unas 5 días tras su pulverización por ser un objeto tridimensional y por el grosor de la capa pulverizada.

Capítulo 4

Dibujo arqueológico de objetos de vidrio a partir de su modelo 3D

4.1 El dibujo arqueológico: concepto y significado

El dibujo es una herramienta básica de descripción y catalogación tipológica muy utilizada en las intervenciones arqueológicas. Su aplicación se realiza tanto en obra mueble (objetos recuperados en excavaciones) como inmueble (el propio yacimiento) y dependiendo del tipo de representación se seguirán unas pautas, características y matices diferentes. Este método tiene una importancia fundamental al reproducir con imágenes ciertos aspectos de la realidad de forma gráfica normalizada, simplificada y con información objetiva, que permite crear repertorios para poder comparar diferentes piezas. Además permite, por un lado mostrar las principales características del objeto y por otro lado tipificar los objetos para el análisis tipológico (Caballero Zoreda, 2006). Su principal característica es mostrar varios aspectos o vistas, incluyendo elementos anexos, del mismo objeto con un simple golpe de vista. Al utilizarse sistemáticamente las mismas convenciones de dibujo, las representaciones resultan comprensibles y útiles para la comunidad científica. En resumen, “cuando decimos que el dibujo de una pieza concreta es una hipótesis, lo decimos con todas las consecuencias: es verificable, puesto que cualquier investigador puede romperlo a control; repetible, puesto que puede reproducirse el proceso y comparar los resultados; muestra un conocimiento científico de la pieza (que como todo conocimiento es aproximado, no absoluto); sigue fielmente el método y hasta se expresa en un lenguaje cinético propio, que no sólo es un instrumento de comunicación, sino una herramienta de pensamiento que objetiviza las ideas, de tal manera que, a veces, sólo dibujando una pieza hemos comproba-

do si la interpretación que habíamos hecho de la misma era cierta o no" (Benito y Benito Álvarez, 1998).

Habitualmente estos dibujos responden a cuatro necesidades básicas: describir el mayor número de datos relevantes sobre el objeto, facilitar un registro homogéneo y metódico de la información, propiciar el posterior manejo de los datos recopilados y proporcionar un análisis lo más exhaustivo posible del material en relación con su contexto (Cobas Fernández y Prieto Martínez, 1998).

4.1.1 Procedimiento tradicional

Los materiales básicos para realizar un dibujo arqueológico son: papel (blanco y milimetrado), portaminas fino, goma de borrar, sistemas de medida como compás, escuadra, cartabón, calibre, pie de rey¹, peine perfilador², escalímetro y diana de diámetro³, y además estilógrafos de distintos grosores para el acabado en tinta. También se suele utilizar la plastilina para la sujeción de piezas inestables durante el registro.

Dependiendo del objeto arqueológico a representar, el dibujo sigue unas pautas u otras. En el caso de la cerámica y el vidrio son prácticamente las mismas. El proceso comienza orientando el fragmento o la pieza y tomando las medidas del objeto o fragmento conservado (el diámetro de la base o de la boca, y la altura). Para ello se utilizan los sistemas de medida anteriormente citados. Se traza una línea horizontal con el diámetro de la pieza, y una línea perpendicular (en el punto medio del anterior) hacia abajo o hacia arriba dependiendo de si la línea horizontal se corresponde con la boca o la base, señalando la altura conservada de la pieza o fragmento. Esta línea además cumple la función de división entre las dos partes que forma el dibujo (Fig. 4.1): en el lado izquierdo se representa la sección de la pieza, es decir, como si hicieramos un corte perpendicular a la pieza, para representar el perfil, grosor y trayectoria (indispensable el pie de rey y el peine perfilador). Y el lado derecho, muestra la proyección frontal de la pieza, con sus aristas, curvas y elementos externos. Cuando se trata de un fragmento, la parte inferior o superior (depende de la parte conservada, boca o base) hay que marcarla con un dentado o líneas discontinuas para indicar que está incompleta (Moreno Martín y Quixal Santos, 2012-2013).

¹Pie de rey: regla de precisión para realizar medidas exteriores, interiores y profundidades. Con él podemos trasladar los diferentes datos medidos del objeto al dibujo (Moreno Martín y Quixal Santos, 2012-2013).

²Peine perfilador: sirve para tomar y trasladar el perfil del objeto al papel. Está formado por una parte rígida sobre la que se deslizan una serie de barillas, de diámetro muy pequeño que puede adaptarse al contorno de la pieza (Moreno Martín y Quixal Santos, 2012-2013).

³Diana de diámetro: consiste en una gráfica de diferentes circunferencias concéntricas ya trazadas donde se colocan los bordes conservados (superior e inferior) hasta que se observe la coincidencia entre ambos diámetros (Moreno Martín y Quixal Santos, 2012-2013).

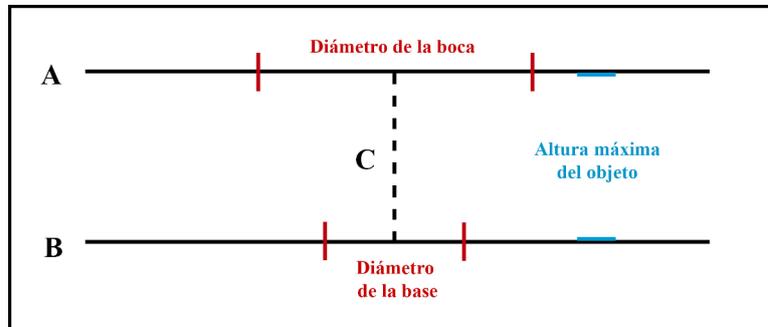


Figura 4.1: Esquema que muestra las líneas base del dibujo arqueológico y donde deben ir las medidas de la pieza. Donde A) indica el diámetro de la boca, B) el diámetro de la base y C) divide en dos la pieza y muestra la altura del objeto.

Para la representación de los elementos aplicados y las decoraciones hay unas pautas especiales. Un caso a considerar serían las asas, se deben de colocar en el lado izquierdo (si hay más de una en ambos lados) con su sección longitudinal y transversal, indicando el lugar donde se ha extraído la sección con dos pequeños trazos. En cuanto a la decoración, depende de su disposición sobre el objeto (Dillon y Joyce, 1985):

- Si la decoración ocupa todo el interior, se realiza una vista cenital de la misma.
- Si recorre el cuerpo del objeto, se puede representar en la sección derecha, o desarrollado en plano en el lado derecho, indicando su posición en la sección derecha.
- Si en cambio recorre el borde, se dibujará un arco sobre la parte superior, para mostrar una vista superior.

Por último, el dibujo puede ir acompañado de datos complementarios como una escala, la identificación del objeto y el diámetro.

4.2 Evolución del dibujo arqueológico

El dibujo arqueológico forma parte intrínseca del proceso técnico de la arqueología y por tanto la evolución tecnológica dentro de este campo también ha afectado a esta herramienta. Con la introducción de las aplicaciones informáticas, la versión final del dibujo pasa a hacerse por ordenador. En primer lugar, tomando las medidas directamente de la pieza, se hace el dibujo arqueológico a mano simpli-

ficando el resultado. El dibujo se escanea para obtener una imagen vectorizada⁴. para trabajar sobre ella. A continuación, se abre dentro de un programa de edición donde se repasa el dibujo con las herramientas del programa y se completa el resto de la información omitida en la versión inicial (Moreno Martín y Quixal Santos, 2012-2013). De este proceso la parte inicial ha sido sustituida, recientemente, o asistida con la realización de tomas fotográficas cuidadosamente planificadas para evitar el “efecto barril”⁵, y utilizarlas como base para hacer el dibujo digital en un programa de edición (Benito Álvarez, 2007).

Con la introducción de las tecnologías 3D, se escanean las diferentes vistas del fragmento y junto al cálculo de su eje de rotación y la posición del objeto, se puede extraer el perfil de la pieza por medio de una serie de algoritmos (Kampel y Sablatnig, 2007; Karasik y Smilansky, 2008). De los resultados obtenidos se pueden extraer parámetros métricos como altura, grosor, anchura y otros como el volumen, el área de la superficie o la posición del centro de masa de forma objetiva (Grosman *et al.*, 2008). Además se pueden crear bases de datos que permitan su divulgación.

Manteniendo la característica del trazo lineal del dibujo, también se ha propuesto la utilización de una representación basada en el principio de descripción de longitud mínima⁶ (MDL, de sus siglas en inglés), donde el espacio se entiende como una serie de formas 3D a diferentes niveles dependiendo de su relieve o profundidad. El resultado muestra las líneas que ha detectado el método en el modelo 3D (Luo *et al.*, 2011).

Tener el modelo 3D del objeto abre un camino de posibilidades para seleccionar la mejor visualización de las características del objeto. En objetos con relieves, se pueden resaltar las zonas que por el paso del tiempo han quedado desdibujadas editando el modelo 3D y extrayendo un dibujo lineal o coloreando ciertas zonas para mejorar la visualización del motivo principal (Gilboa *et al.*, 2013).

Otras investigaciones han aplicado las herramientas matemáticas y computacionales a antiguos dibujos arqueológicos en 2D, para mejorar la descripción morfológica, la clasificación y el análisis de los objetos arqueológicos, escaneando previamente el dibujo (Gilboa *et al.*, 2004).

⁴Vectorización: conversión de una imagen en formato *bitmap* (compuesta por píxeles) en una estructura de datos vectorial compuesta por puntos codificados en vectores y líneas codificadas como una sucesión de puntos (Moreno Martín y Quixal Santos, 2012-2013).

⁵Efecto barril: la distorsión que se produce en las fotografías al realizar la toma de cerca con un zoom abierto al máximo y cuyo resultado es que las líneas rectas se curvan hacia fuera (Benito Álvarez, 2007).

⁶Descripción de longitud mínima: este principio establece la mejor representación de un conjunto de datos perteneciente a un modelo complejo, manteniendo la exactitud del resultado pero simplificándolo (Gámez Martín y Puerta Callejón, 1998).

4.3 Metodología propuesta para la obtención del dibujo arqueológico

El método propuesto utiliza el modelo 3D del objeto para seleccionar la mejor visualización del objeto y obtener el dibujo arqueológico. Para ello se utilizarán dos programas uno para trabajar con la malla 3D y otro para editar la imagen 2D. Se ha seleccionado el objeto *Cuenco 1* para mostrar el proceso.

4.3.1 Orientación del objeto y obtención del perfil

El modelo 3D del objeto es importado al programa Netfabb Studio Basic 4.9 (ahora Netfabb trial) que es una versión gratuita muy completa del programa Netfabb de Autodesk (4.2).

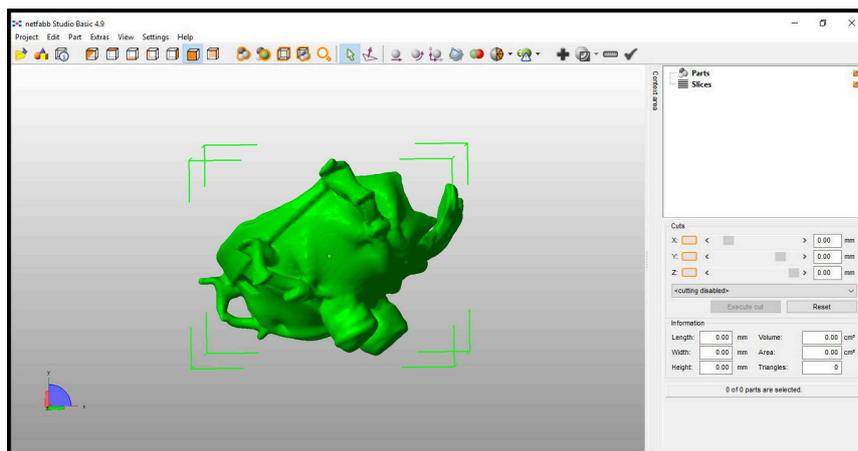


Figura 4.2: Interfaz del programa Netfabb Studio Basic 4.9 y la pieza *Cuenco 1* importada en formato OBJ.

El primer paso es orientar el objeto para tener una vista frontal del mismo y así los cortes quedarán completamente rectos. A continuación se marcan los cortes con una opción del programa que podemos encontrar en la columna de la derecha con los tres ejes (X,Y,Z,) y al mover el botón se activa una línea de color que se mueve por la superficie del modelo en la dirección del eje seleccionado. Para colocar la línea donde se va hacer el corte se aconseja utilizar tanto la vista superior como la frontal del modelo para que los cortes pasen por el centro, además de que puede interesar seccionar una asa o un pie (Fig. 4.3). Hay que tener en cuenta el resultado que queremos obtener para colocar la pieza y los cortes en la posición correcta.

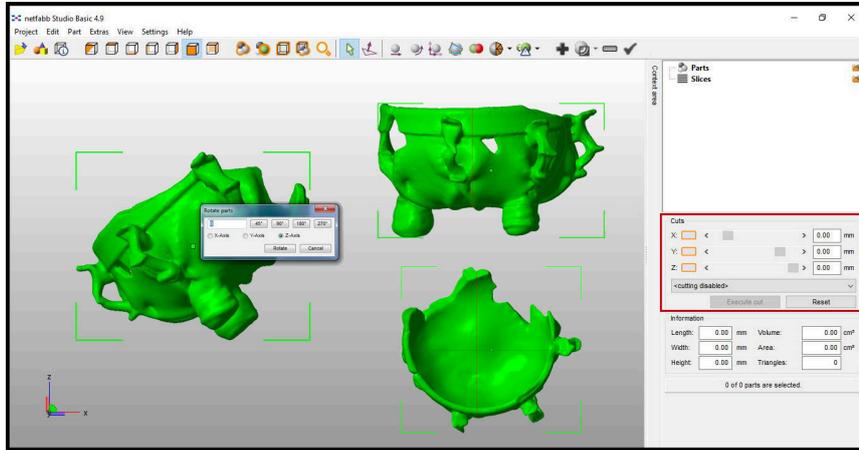


Figura 4.3: Orientación de la pieza (vista superior y frontal). La líneas de corte, en rojo y verde, se posicionan sobre el objeto en base a los ejes de coordenadas X,Y,Z (rectángulo rojo).

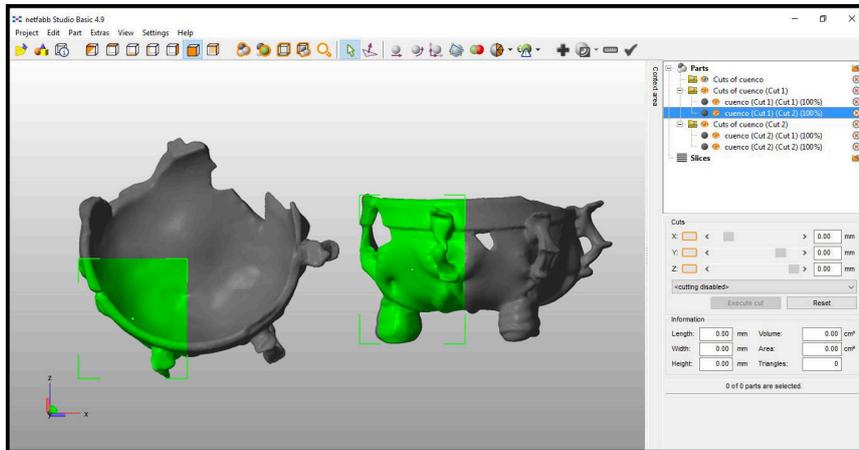


Figura 4.4: Vista superior y frontal de la sección que va a ser eliminada (en verde).

Una vez realizados los cortes, la pieza queda dividida en cuatro partes y se elimina la sección que está delante en el lado izquierdo (Fig. 4.4). El resultado es un corte limpio que deja ver el perfil completo de la pieza en el lado izquierdo y el exterior de la pieza en el lado derecho (Fig. 4.5). Por último, se guarda la imagen obtenida en un archivo PNG o JPG para tratar editarla posteriormente con un programa de edición como Gimp o Adobe Photoshop.

4.3 Metodología propuesta para la obtención del dibujo arqueológico

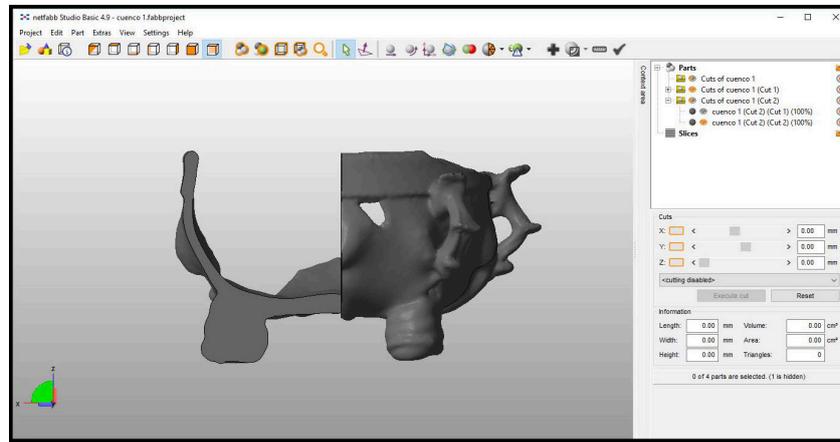


Figura 4.5: Resultado final de la pieza *Cuenco 1* con la sección posicionada en el lado izquierdo. Se ha realizado el corte de la sección en el lado que se conserva y se ha incluido la sección de un pie en el mismo corte.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de la sección en las piezas *Cuenco 2* (Fig. A.3), *Plato* (Fig. A.4), *Lámpara* (Fig. A.5) y *Botella* (Fig. A.6). En todas se ha seguido el proceso explicado anteriormente teniendo en cuenta donde están las zonas faltantes para poder obtener el perfil completo de cada una.

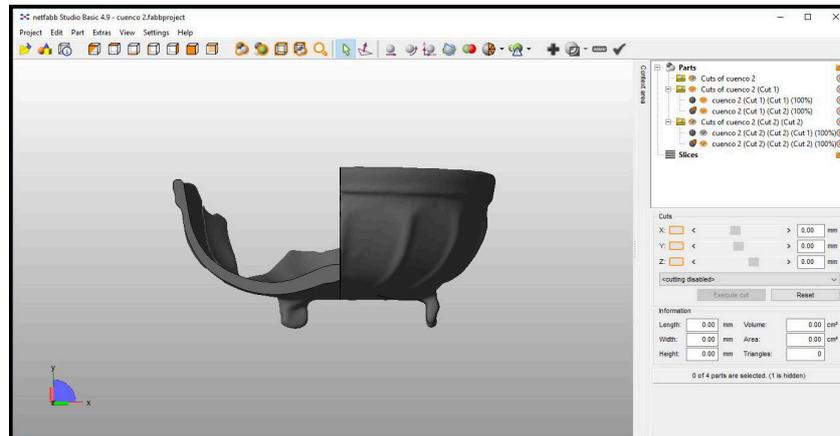


Figura 4.6: Resultado final de la pieza *Cuenco 2* con la sección posicionada en el lado izquierdo. Igual que en el *Cuenco 1* la sección se ha realizado en el lado que se conserva completo. Debido a la colocación de los pies y de la zona faltante ha sido imposible obtener el perfil de un pie en el mismo corte.

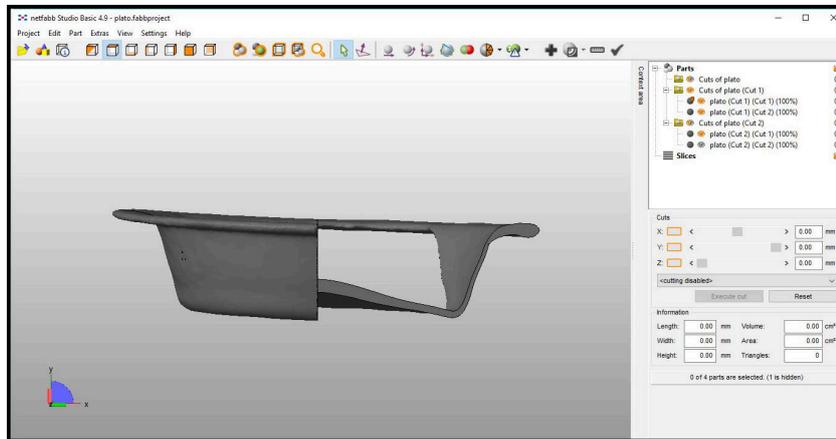


Figura 4.7: Resultado final de la pieza *Plato* con la sección posicionada en el lado derecho. El proceso de esta pieza ha sido complicado por el tamaño y la posición de los dos faltantes que presenta en el cuerpo y en parte del borde. Para realizar la sección se han tenido que colocar las líneas de corte de modo preciso bordeando los faltantes, pero pasando el cruce de ambas líneas por el centro. Por ello, el resultado de la sección del corte ha quedado en el lado derecho.

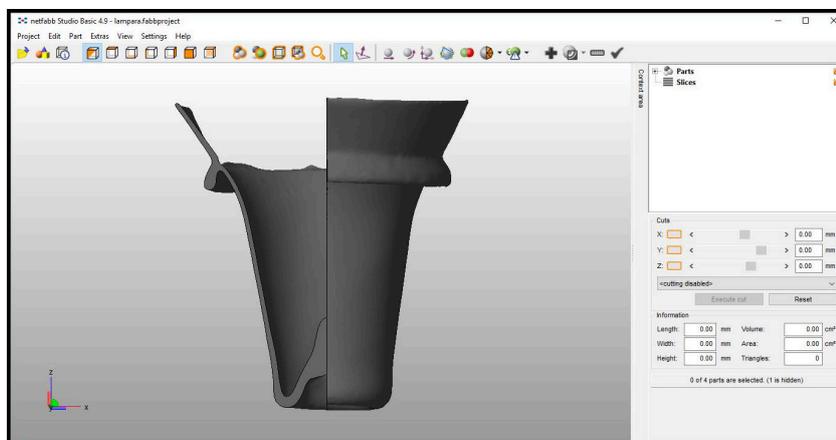


Figura 4.8: Resultado final de la pieza *Lámpara* con la sección posicionada en el lado izquierdo. En este objeto se ha realizado la sección en el lado donde se conserva la mayor parte del ala. Al pasar el corte por el centro se ha seccionado la forma interior obteniendo todo el perfil: base, cuerpo, anillo y ala.

4.3 Metodología propuesta para la obtención del dibujo arqueológico

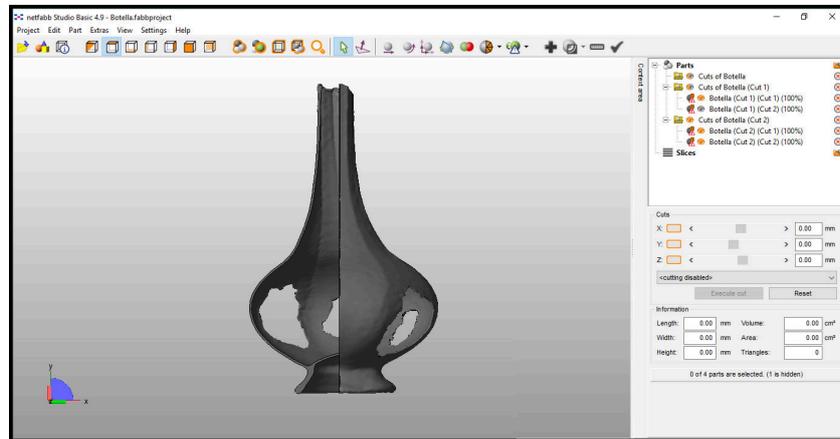


Figura 4.9: Resultado final de la pieza *Botella* con la sección posicionada en el lado izquierdo. Para la sección se ha escogido una zona entre los dos huecos, obteniendo así el perfil completo.

4.3.2 Obtención del dibujo arqueológico

El siguiente paso sería retocar la imagen 2D extraída para obtener un resultado similar a la conseguida por el método tradicional donde se tendrá en cuenta lo siguiente:

- La representación se realizará en escala de grises.
- Una línea dividirá la pieza en dos para separar el lado con la sección y el lado completo.
- El corte de la sección se resaltará en negro.
- En el caso de querer resaltar la vista superior, se realizará en el plano superior y solo se mostrará un 50 % de la misma.
- En el caso de presentar elementos decorativos, como asas, deberán de introducirse en el lado izquierdo en sección. Si no se ha podido obtener la sección del elemento con la pieza, aparecerá su sección separado de la misma.
- Finalmente se colocará una escala de referencia visual.

En las figuras 4.10-4.14 se muestran los resultados de los dibujos arqueológicos obtenidos en las diferentes piezas.

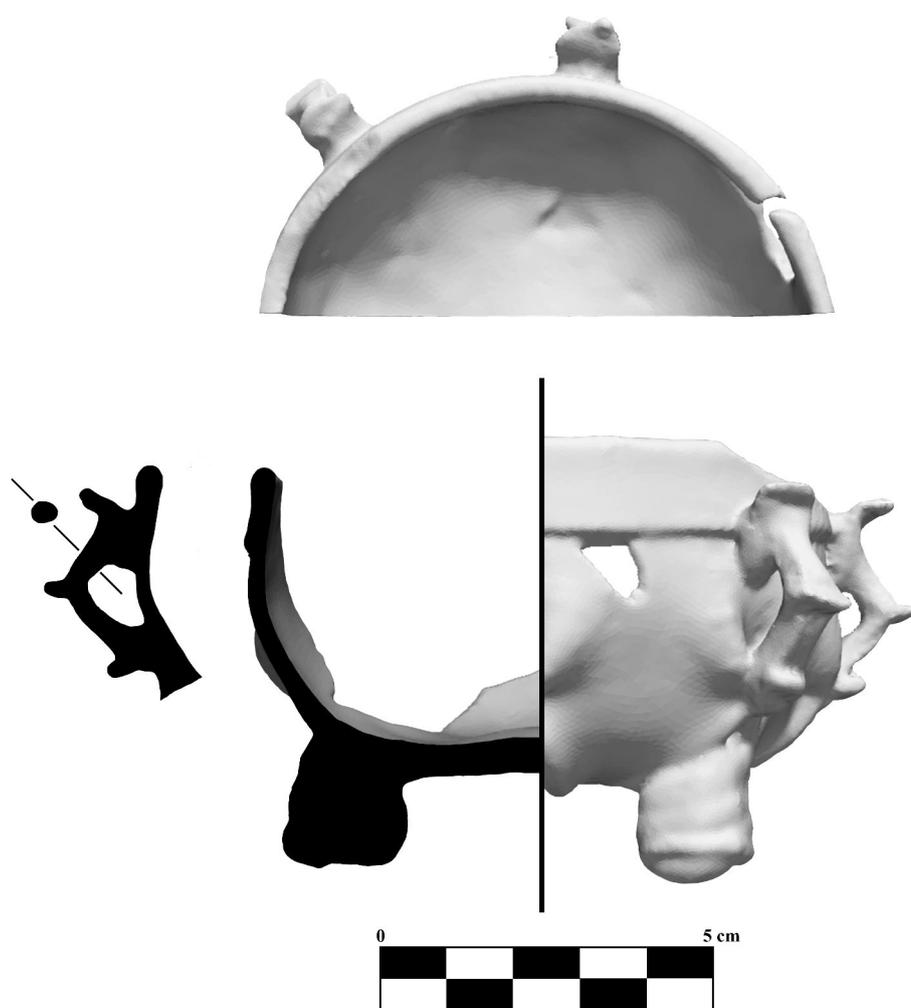


Figura 4.10: Dibujo arqueológico de la pieza *Cuenco 1* obtenido a partir de su modelo 3D. En la parte superior se puede ver la vista del objeto desde arriba (solo la mitad), en la parte central se muestra la pieza desde la vista frontal que queda dividida en dos por una línea: en el lado derecho se observa el exterior de la pieza y en el lado izquierdo la sección pudiendo ver el interior y el borde seccionado en negro incluyendo la sección de una pie. Por último, en el lado izquierdo se ha añadido la sección de un asa.

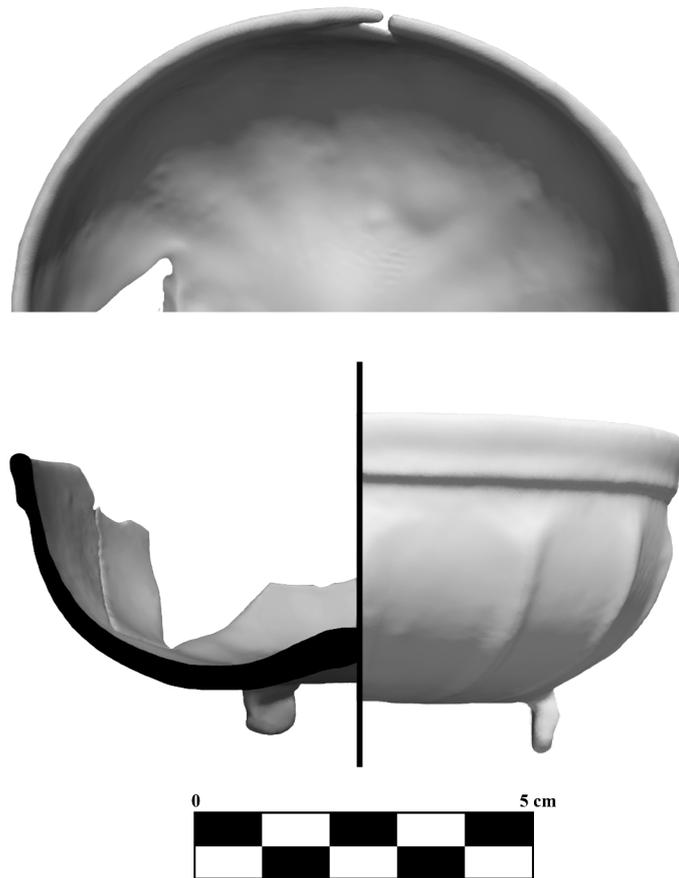


Figura 4.11: Dibujo arqueológico de la pieza *Cuenco 2* obtenido a partir de su modelo 3D. En la parte superior se puede ver la vista del objeto desde arriba (solo la mitad) del lado completo, en la parte central se muestra la pieza desde la vista frontal que queda dividida en dos por una línea: en el lado derecho se observa el exterior de la pieza y en el lado izquierdo la sección pudiendo ver el interior y el borde seccionado en negro.

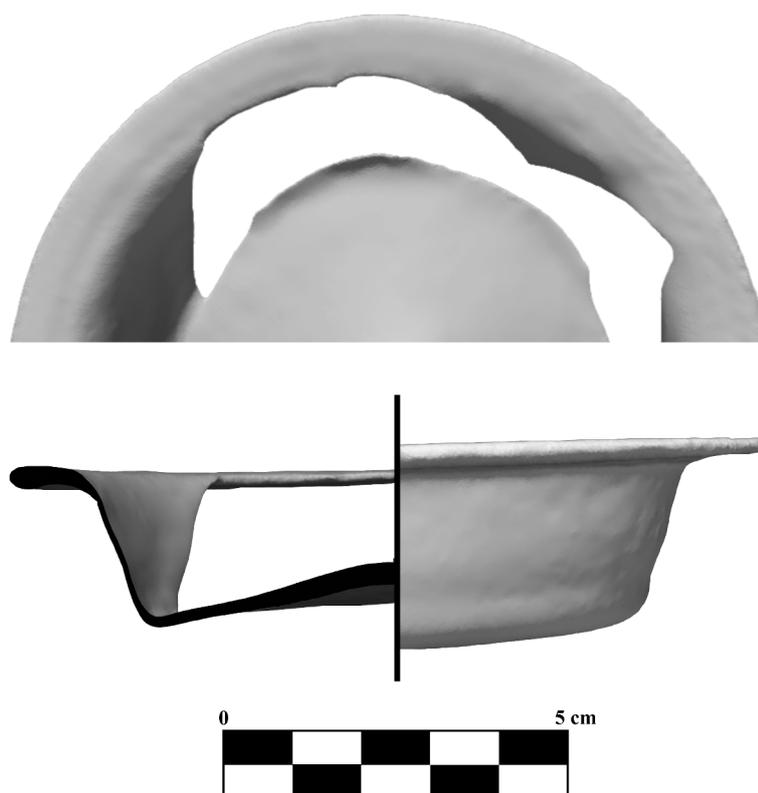


Figura 4.12: Dibujo arqueológico de la pieza *Plato* obtenido a partir de su modelo 3D. En la parte superior se puede ver la vista del objeto desde arriba (solo la mitad), en la parte central la pieza se muestra desde la vista frontal que queda dividida en dos por una línea: en el lado derecho se observa el exterior de la pieza y en el lado izquierdo la sección pudiendo ver el interior y el borde seccionado en negro.

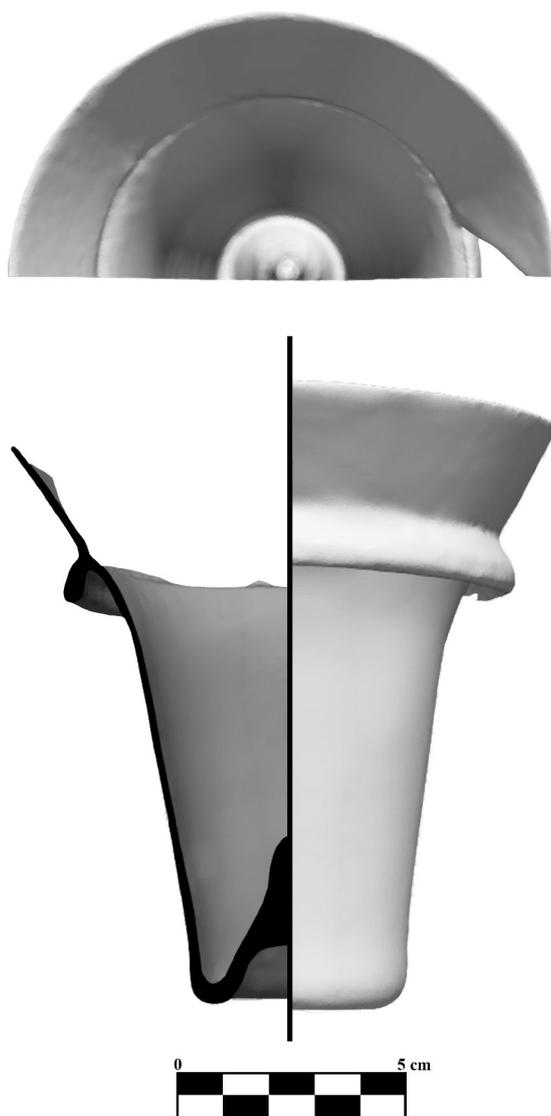


Figura 4.13: Dibujo arqueológico de la pieza *Lámpara* obtenido a partir de su modelo 3D. En la parte superior se puede ver la vista del objeto desde arriba (solo la mitad que coincide con el ala conservada), en la parte central se muestra la pieza desde la vista frontal que queda dividida en dos por una línea: en el lado derecho se observa el exterior de la pieza y en el lado izquierdo la sección pudiendo ver el interior y el borde seccionado en negro que incluye la sección del anillo.



Figura 4.14: Dibujo arqueológico de la pieza *Botella* obtenido a partir de su modelo 3D. Esta pieza solo tiene vista frontal que se divide en dos por una línea: en el lado derecho se observa el exterior de la pieza y en el lado izquierdo la sección pudiendo ver el interior y el borde seccionado en negro.

4.3.3 Obtención de datos métricos

El modelo 3D puede ser utilizado para realizar tomas de medidas y distancias y obtener los diferentes espesores que pueden tener los objetos de vidrio seleccionando uno o dos puntos de la superficie del objeto. Por medio de sistemas de medida tradicionales esta tarea es complicada de llevar a cabo sobre objetos de vidrio arqueológico, debido a su delicado estado de conservación y sobre todo porque algunas zonas son difíciles de medir al ser inaccesibles, como por ejemplo las zonas interiores. Al tener el modelo 3D de la pieza se puede subsanar esta problemática ya que todas las zonas son accesibles. Con un programa específico, como puede ser Netfabb Studio Basic 4.9, se pueden tomar medidas y espesores (de diferentes zonas de la pieza) seleccionando entre las diferentes opciones que ofrece el programa que aparecen cuando se selecciona el icono correspondiente (una regla de medir) en la derecha de la pantalla.

Los resultados de la toma de medidas y de grosores en las piezas seleccionadas se pueden ver en las figuras 4.15, 4.16, 4.17, 4.18 y 4.19.

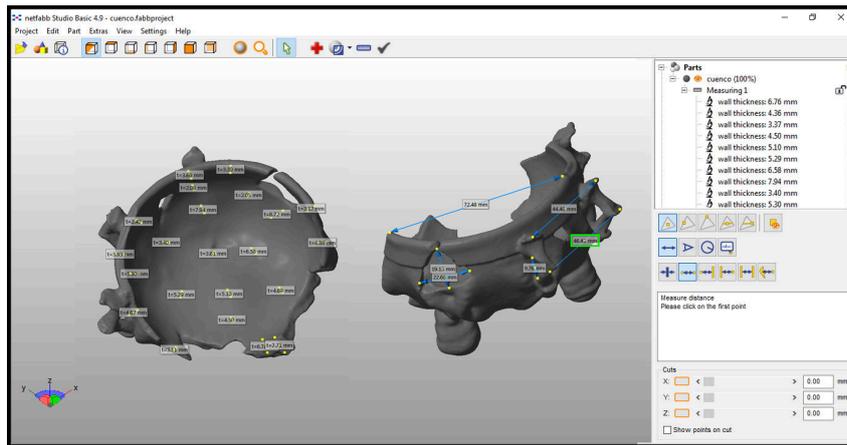


Figura 4.15: Toma de medidas de la pieza *Cuenco 1* a partir de su modelo 3D. A la izquierda los datos numéricos de los espesores tomados en diversos puntos de la superficie de la pieza y a la derecha los datos numéricos de algunas distancias como el tamaño de faltantes, distancias entre asas o huecos pequeños como el interior de las asas.

4.4 Comparación entre el método tradicional y el método propuesto

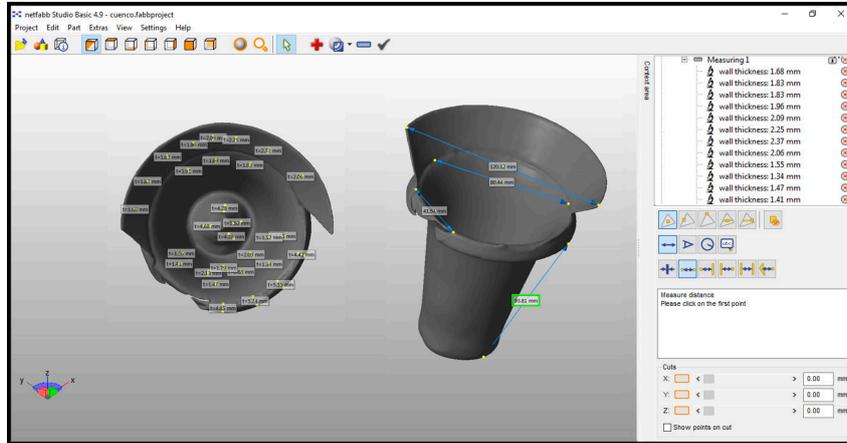


Figura 4.18: Toma de medidas de la pieza *Lámpara* a partir de su modelo 3D. A la izquierda los datos numéricos de los espesores tomados en diversos puntos de la superficie de la pieza y a la derecha los datos numéricos de algunas distancias como la medida entre la base y el anillo o tamaño de faltantes.

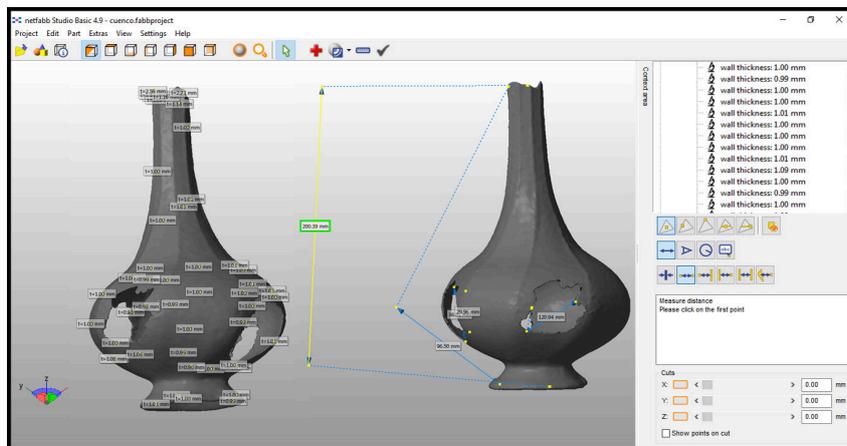


Figura 4.19: Toma de medidas de la pieza *Botella* a partir de su modelo 3D. A la izquierda los datos numéricos de los espesores tomados en diversos puntos de la superficie de la pieza y a la derecha los datos numéricos de algunas distancias como tamaño de faltantes y altura de la pieza.

4.4 Comparación entre el método tradicional y el método propuesto

Se han comparado los dos métodos realizando por el método tradicional las piezas seleccionadas, para mostrar las mejoras que proporciona el método propuesto. Los

dibujos arqueológicos realizados por el método tradicional han sido extriados de la tesis de máster *La tecnología de digitalización 3D como herramienta idónea en el registro arqueológico y en la realización de dibujos arqueológicos de vidrio* (Sotodosos San Clemente, 2015).

- *Cuenco 1*: Para que las dos imágenes sean similar se ha añadido, en nuestro resultado, en la zona superior una vista de la base para que coincida con la imagen a comparar (Fig. 4.20). Lo primero que se observa es que el dibujo tradicional presenta una forma más simplificada llegando a perder las formas características de la pieza, como se pueden ver en los pies, la curvatura del cuerpo y la base o en la cinta vuelta del remate del labio. También hay cierta variación entre los grosores del vidrio pero hay que tener en cuenta que la toma de medidas directa en un cuerpo curvo puede ser complicado.

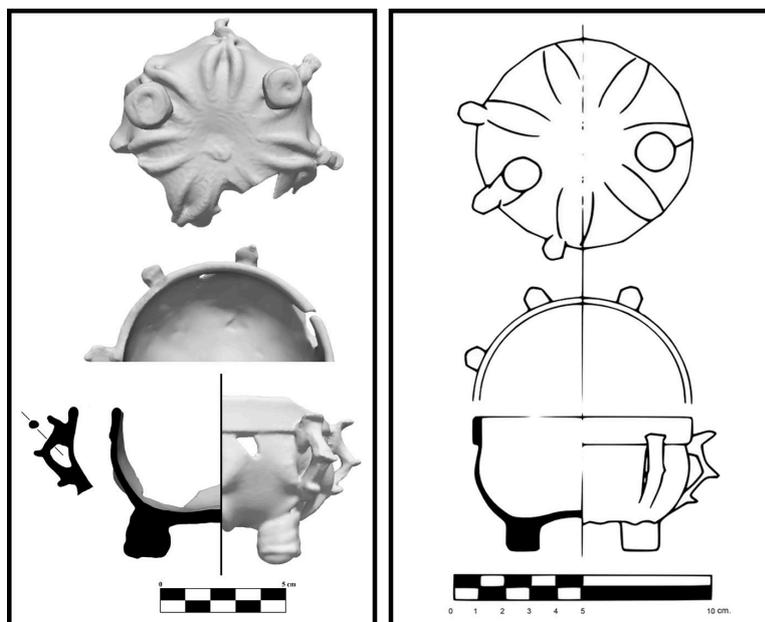


Figura 4.20: Dibujo arqueológico de la pieza *Cuenco 1*. A la izquierda el dibujo obtenido a través del modelo 3D y a la derecha el dibujo realizado por el método tradicional. Se observa diferencias entre ambos respecto a las formas de los pies y de la forma del cuenco.

- *Cuenco 2*: Al igual que en la pieza anterior se ha añadido en la zona superior una vista de la base (Fig. 4.21). Lo que más llama la atención, como en el caso anterior, es la diferencia en la forma del cuenco entre ambas imágenes y en los grosores del vidrio.

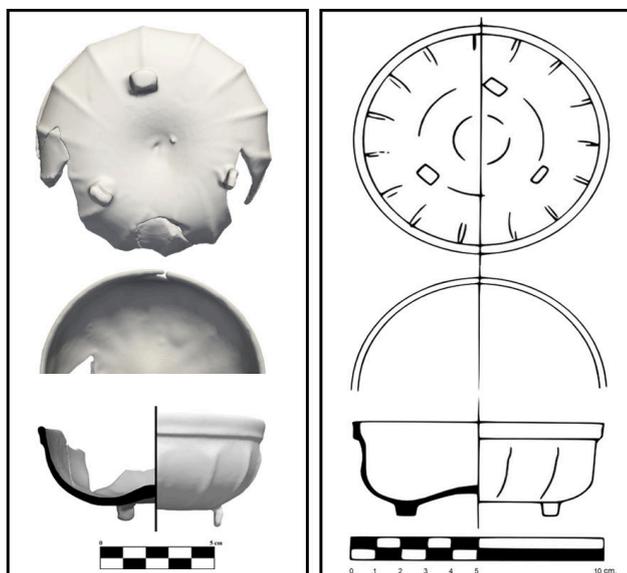


Figura 4.21: Dibujo arqueológico de la pieza *Cuenco 2*. A la izquierda el dibujo obtenido a través del modelo 3D y a la derecha el dibujo realizado por el método tradicional. Encontramos diferencias en la forma y en los grosores del vidrio.

- *Plato*: En este caso, las formas más o menos coinciden aunque si hay diferencias entre grosores, sobre todo en zonas difíciles de medir como el centro de la base (Fig. 4.22).

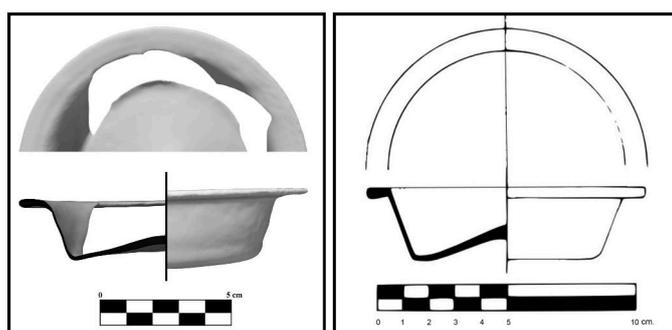


Figura 4.22: Dibujo arqueológico de la pieza *Plato*. A la izquierda el dibujo obtenido a través del modelo 3D y a la derecha el dibujo realizado por el método tradicional. En este caso solo detalles como el grosor de la base (sobretudo en el centro) o la forma y grosor del borde varían entre las dos vistas.

- *Lámpara*: La forma es bastante similar entre ambas imágenes pero en el grosor del vidrio se observan diferencias que se corresponden con el interior del objeto (zona totalmente inaccesible por el método tradicional) y en el anillo, donde en la imagen de la derecha ni siquiera se contempla (Fig. 4.23).

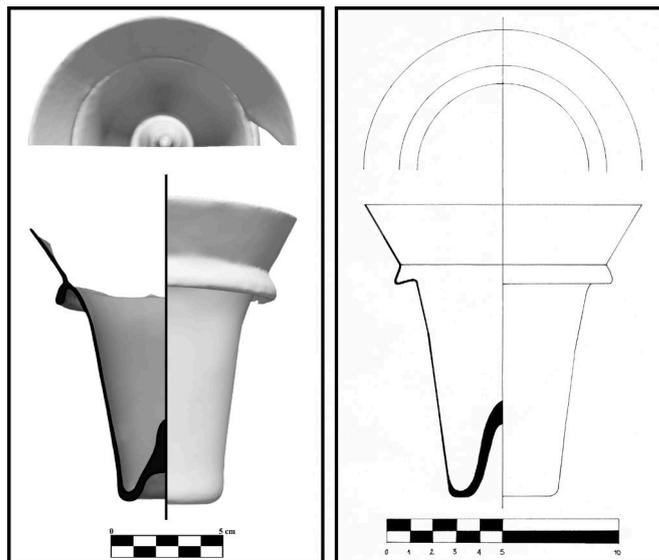


Figura 4.23: Dibujo arqueológico de la pieza *Lámpara*. A la izquierda el dibujo obtenido a través del modelo 3D y a la derecha el dibujo realizado por el método tradicional. Debido al difícil acceso al interior del objeto, las diferencias entre ambas imágenes se localizan en esa parte por lo que los perfiles de corte resultantes son muy diferentes.

- *Botella*: Esta pieza es sin duda la más difícil de realizar por el método tradicional ya que su interior es completamente inaccesible (Fig. 4.24). Encontramos que las formas más o menos coinciden pero el grosor del vidrio a lo largo del perfil era imposible de medir por lo que no se representa a excepción del pie que comparando con la imagen de la izquierda, ni siquiera se acerca a la realidad.

4.5 Resultados y discusión

Tras el proceso explicado se han obtenido los dibujos arqueológicos y los datos métricos de las cinco piezas seleccionadas. Los dibujos muestran un resultado similar al obtenido por el método tradicional, si bien la información es más completa. Se muestra de manera más exacta la morfología del objeto, el grosor del perfil incluso de zonas inaccesibles, sus características principales y sus elementos anexos. Utilizando el modelo 3D de los objetos se han podido medir diferentes zonas de

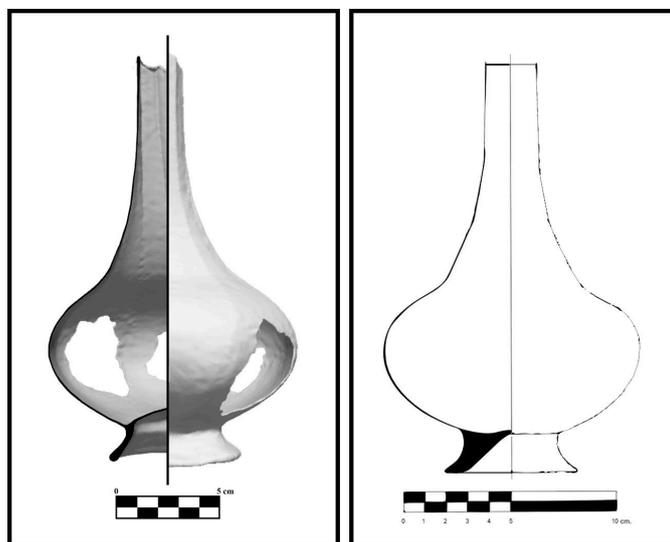


Figura 4.24: Dibujo arqueológico de la pieza *Botella*. A la izquierda el dibujo obtenido a través del modelo 3D y a la derecha el dibujo realizado por el método tradicional. Como no se puede acceder al interior, esta parte no se refleja en el dibujo tradicional, por lo que se observa muchas diferencias entre los perfiles.

las piezas, incluso zonas del interior y de difícil acceso y mostrar la variedad de espesores de una pieza de vidrio dependiendo del área elegida.

Capítulo 5

Reconstrucción de fragmentos faltantes mediante modelado e impresión 3D

5.1 Métodos de restauración virtual y *rapid prototyping*

Las tecnologías 3D reproducen con exactitud la geometría de los objetos registrados. Su aplicación en el campo de la restauración y conservación de objetos arqueológicos nos permite replicar volumen, forma y textura; y reconstruir los fragmentos faltantes sin necesidad de contacto físico y con una mínima manipulación del objeto.

Estas tecnologías se basan en la utilización de modelos 3D adquiridos por medio de técnicas de registro, programas para modelado y reproducción de los modelos por medio de técnicas de impresión 3D en un reducido periodo de tiempo (de ahí el término *rapid prototyping*).

Estas técnicas han sido experimentadas en procesos de restauración en diferentes tipos de obras. En arqueología encontramos ejemplos en piezas de cerámica, donde se puede obtener una reconstrucción completa de las piezas a través del perfil de los fragmentos recuperados (Kampel y Sablatnig, 2003) donde una vez adquiridos con un escáner se procesan para recuperar la morfología completa de la pieza obteniendo el modelo virtual texturizado con la zona original y la zona reconstruida (Tejerina Antón *et al.*, 2011) o se puede ir más allá e imprimir en 3D la forma completa como soporte de los fragmentos conservados de la pieza (Barreau *et al.*, 2014). En material fósil, (Lautenschlager, 2016), se ha recuperado la morfología

original a partir de zonas simétricas, y los resultados son aprovechados con fines educativos y para futuras investigaciones.

Otro campo donde su uso está muy extendido es el escultórico. Utilizado para el estudio exhaustivo de esculturas a través de su modelo 3D como en el *David* de Miguel Ángel (Callieri *et al.*, 2004) o la reconstrucción virtual de una escultura de *Buddha* (Fowles *et al.*, 2003) para recuperar elementos perdidos y la decoración original. También se puede utilizar para la reconstrucción virtual cuando falta información sobre el estado original de una obra como en la *Estatua de Livia* de mármol blanco (Melchor *et al.*, 2016) donde se hizo una reinterpretación de la posición de los brazos y de los elementos que podría portar como una cornucopia en la mano izquierda y una patera en la derecha y un velo en la cabeza, todo ello basado en la información extraída durante la fase de documentación. Un caso muy llamativo, debido al uso completo de estas técnicas, es el realizado en la *Madonna de Pietranico* (Arbace *et al.*, 2013). Esta escultura de terracota quedó muy dañada tras un terremoto, dividida en fragmentos de diferentes tamaños y con pérdidas importantes. A través de los modelos 3D de los fragmentos se hizo un ensamblaje virtual, modelando y generando los faltantes y realizando una reintegración cromática virtual con el objetivo de facilitar y guiar la labor de los restauradores. Siguiendo una metodología similar, en Tsiafaki *et al.* (2016) se obtiene la reconstrucción virtual de un objeto cerámico alineando de forma manual los grupos de fragmentos unidos. A continuación, a partir del eje de simetría y generando la pieza completa a través del perfil de la pieza, se posicionan los fragmentos sobre la réplica, para hacer una intersección entre ambas piezas y eliminar la zona que se conserva de la réplica.

La aplicación de las nuevas tecnologías puede abrir nuevas posibilidades como la presentada en Díaz-Marín *et al.* (2015), donde se realizó la reconstrucción virtual de una escultura arqueológica de terracota llamada el *Crist del Fossar* (la explicación completa de este caso se encuentra en la sección 7.3.2). La estatua formará parte de una exposición temporal del Museo de Prehistoria de Valencia. Los visitantes podrán apreciar la restauración de los fragmentos que se han conservado al mismo tiempo que podrán explorar la reconstrucción virtual de la escultura completa a través de una visualización mediante realidad visual inmersiva.

Debido a que algunas piezas durante el proceso de restauración no son reconstruidas, por diferentes motivos, se puede crear un modelo 3D completo de la pieza para imprimir en 3D y presentarla junto a la obra original como en Singh *et al.* (2015) donde se realiza una restauración virtual del rostro de unas esculturas dañadas. No se pretende intervenir las piezas sino realizar réplicas mediante impresión 3D de las mismas con los rostros completos.

El estudio de estas técnicas, que potencialmente pueden sustituir a las tradicionales, va en aumento constituyendo una opción que debe ser investigada.

5.2 La impresión 3D

La impresión 3D es una tecnología de fabricación digital basada en la reproducción de un modelo o geometría 3D. Dentro del grupo de técnicas aditivas encontramos cuatro tipos: por extrusión, por vinculación de materiales granulares, por vinculación de capas laminadas y por fotopolimerización.

En la vinculación de materiales granulares, un láser o un fluido sintetiza el material, en forma de pequeños granos, en un sólido sin necesidad de crear soportes auxiliares. Existen varias opciones: sinterizado láser directo de metal (LMD de sus siglas en inglés), fusión por haz de electrones (EBM de sus siglas en inglés), sinterización selectiva por calor (SHS de sus siglas en inglés), sinterización selectiva láser (SLS de sus siglas en inglés) e impresión 3D con cabezal de inyección de tinta sobre lecho de polvo (Jain *et al.*, 2013).

Por otro lado, la vinculación de capas laminadas (LOM de sus siglas en inglés) fabrica el objeto por capas de papel, plástico o metal laminados recubierto con adhesivo. Son pegadas sucesivamente entre sí y cortadas en una forma deseada mediante una cuchilla o un cortador láser.

La fotopolimerización se basa en la polimerización de una resina líquida por parte de una luz ultravioleta (Scopigno *et al.*, 2014). Se utiliza principalmente en la estereolitografía (SLA de sus siglas en inglés), pero también el procesamiento digital de luz (DLP de sus siglas en inglés).

Por extrusión tenemos el modelado por deposición de fundente (FDM de sus siglas en inglés) que utiliza materiales termoplásticos, que funden por calor volviéndose más fluidos y pueden ser extruidos y depositados. Estos materiales denominados filamentos, van enrollados en bobinas que se colocan al lado de la impresora. Su funcionamiento es simple, el filamento se calienta y sale por el extrusor depositándose sobre una plataforma precalentada. Dependiendo del tipo de impresora puede crear una primera capa, como base de la impresión, que coincide con el espacio que va a ocupar la pieza impresa o puede realizar directamente la deposición sobre la plataforma. Levanta la estructura de abajo arriba. Lo hace capa por capa, solidificándose inmediatamente después de salir por el extrusor. Para las partes salientes, de manera simultánea, se van construyendo unos soportes auxiliares de menor densidad que son eliminados posteriormente (Dudek, 2013).

En término de costes, esta última técnica es más económica que las otras técnicas aditivas. El mayor gasto lo supondría la propia máquina, que dependería de las prestaciones adquiridas y del coste de las bobinas de filamento. El mercado ofrece una gran variedad de tipos, a precios muy competitivos.

5.2.1 Orientación de las piezas para la deposición del fundente

En el proceso de impresión de una pieza utilizando la tecnología FDM, hay que tener en cuenta una serie de parámetros que afectan tanto al proceso como al resultado: tipo y naturaleza del material, orientación de la pieza, porcentaje de relleno sólido establecido, etc. De un modo más específico, la orientación de la pieza dentro del espacio de impresión, afecta a la precisión dimensional, a la mayoría de las propiedades mecánicas y al tiempo de procesado y por lo tanto al coste final de la pieza (Raut *et al.*, 2014; Cantrell *et al.*, 2017).

La pieza a imprimir se sitúa dentro de un espacio de coordenadas X, Y, Z . Cada eje se corresponde con un movimiento: el eje X se desplaza hacia delante y hacia atrás y es realizado por la plataforma, el eje Z se desplaza de arriba abajo, también lo realiza la plataforma y por último el eje Y se desplaza de izquierda a derecha y lo realiza el extrusor. Estos son los movimientos que realiza nuestra impresora (EntresD, 2013) aunque hay otros equipos donde el eje X y el eje Y invierten sus posiciones en el espacio y por tanto sus movimientos. Dependiendo de esto, se puede orientar la pieza de tres formas (Fig. 5.1) ya que la construcción de la pieza se realiza de tres formas diferentes y se muestran sus diferencias en el acabado de la superficie. Por tanto tenemos dos orientaciones en horizontal y una en vertical. En la primera orientación la pieza tiene su cara principal en paralelo con el soporte, en la segunda la pieza se coloca sobre el lateral más ancho y la superficie queda perpendicular al soporte y por último la tercera la pieza se apoya sobre su lado más estrecho quedando la superficie totalmente en vertical (Tanoto *et al.*, 2017).

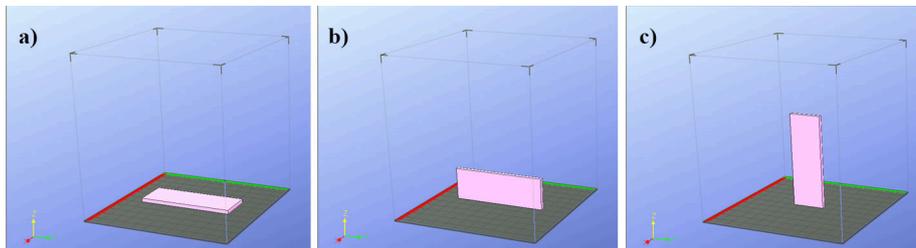


Figura 5.1: Tipos de orientaciones: a) primera, b) segunda, c) tercera.

Según el tipo de orientación que se ha seleccionado, la superficie tendrá una apariencia u otra (Fig. 5.2). En el caso de la primera orientación obtenemos una superficie lisa donde se aprecia la estructura interna de construcción de la pieza formada por barridos diagonales cruzados. En la segunda orientación, la superficie quedaría surcada por líneas horizontales correspondiéndose con cada capa creada, y lo mismo pasa en la tercera orientación aunque en este caso las líneas quedarían en posición vertical.

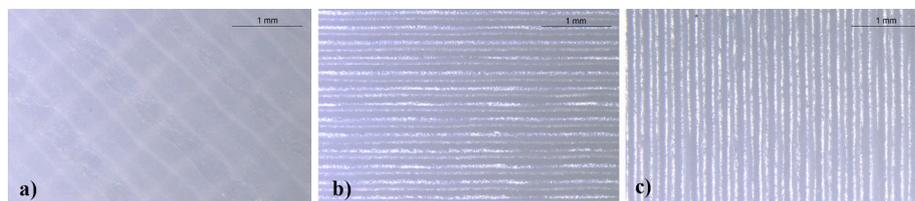


Figura 5.2: Resultado de la superficie de las tres orientaciones, vista superior de la probeta colocada en horizontal y apoyada sobre el reverso: a) primera, b) segunda, c) tercera.

5.3 Metodología para la creación de implantes

El método propuesto se inicia una vez que la pieza arqueológica seleccionada ha sido estabilizada durante la fase de intervención y todos los fragmentos han sido adheridos. La manipulación de la pieza queda reducida a su escaneado y a la prueba del implante impreso. Las fases serían (Fig. 5.3): adquisición 3D, optimización de la malla 3D, creación del implante, obtención del modelo 3D e impresión 3D (Díaz-Marín y Aura-Castro, 2017).

5.3.1 Selección del objeto a intervenir

La pieza seleccionada para validar este método es el objeto *Cuenca 1*. Su parte faltante se corresponde con parte del cuerpo semiesférico, cuatro asas y un pie, que hace que la pieza pierda su estabilidad. Los implantes obtenidos son dos: el implante 1 que lo compone el cuerpo esférico, tres asas y un pie y el implante 2 que se corresponde con un asa. A continuación se muestra el proceso del implante 1.

Posteriormente el método fue trasladado a las demás piezas del estudio como se puede ver en el anexo A.

5.3.2 Adquisición 3D

En primer lugar, se opacificó la superficie del objeto con ciclododecano en aerosol, ocultando temporalmente las características de este tipo de objetos (superficies transparentes, refractivas/reflexivas o brillantes) que los hacen incompatibles con el sistema de registro utilizado, un escáner láser de triángulación, siguiendo el método desarrollado en el capítulo 3.

Una vez opacificado el vidrio, se colocó sobre una plataforma giratoria, haciendo un registro cada 45° y obteniendo un total de 8 mallas alineadas. Este proceso se

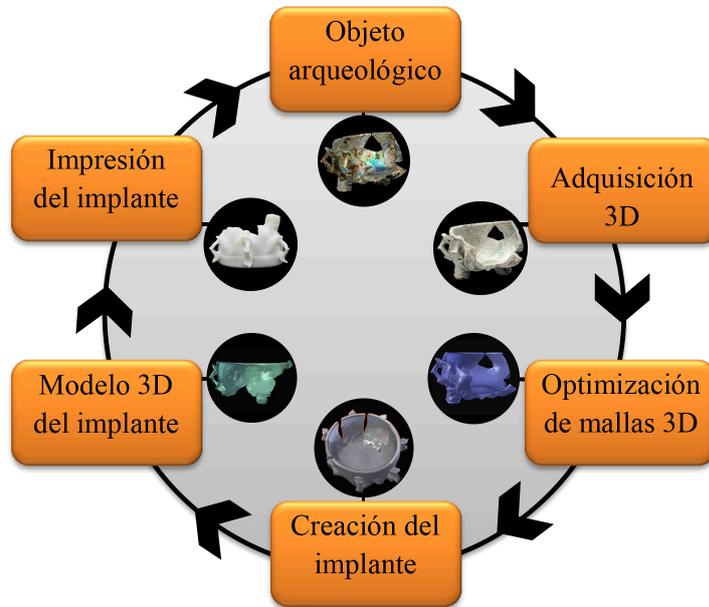


Figura 5.3: Esquema de las fases desarrolladas para la reconstrucción de la zona faltante e impresión del faltante.

realizó dos veces: una para adquirir la parte interior y otra para la parte exterior. El archivo generado por la aplicación del escáner (Polygon Editing Tool) es exportado en formato STL para su optimización.

5.3.3 Optimización de mallas 3D

El proceso de adquisición ha generado dos mallas que se corresponden con el interior y exterior de la pieza. A continuación se realiza la alineación y la fusión de las diferentes capturas para obtener el modelo 3D y después en el postprocesado, se eliminan los errores y se optimiza el modelo final (Gómez *et al.*, 2015). Hay que tratar cada malla por separado, para unir las después, revisar y corregir la superficie del resultado de la fusión (Fig. 5.4). El tiempo de trabajo de esta fase se ve reducido considerablemente por el resultado tan satisfactorio en la calidad de la malla obtenida con la ayuda del ciclododecano.

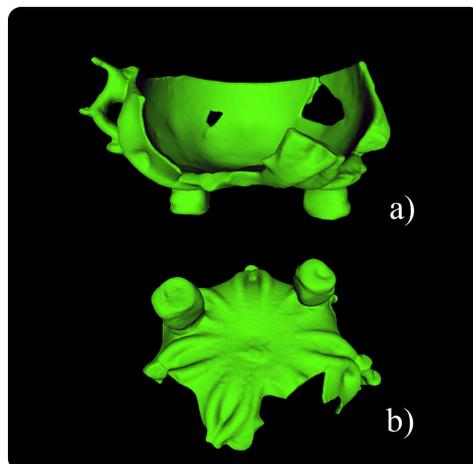


Figura 5.4: Modelo 3D del *Cuenco 1* optimizado: vista de frente (a), vista de la base (b).

5.3.4 Creación del implante

El modelado del implante (zona faltante) se ha hecho a partir del objeto original, en vez de modelar desde cero esa zona hemos adaptado la parte que ya existía adaptándola a la área vacía. El proceso se realiza a partir del modelo 3D que importamos a MeshLab¹.

- Analizando la superficie del objeto, se selecciona un área similar a la desaparecida. En este caso hay que tener en cuenta la decoración exterior, como no se tiene un lateral completo se opta por escoger una sección reducida, la cual se duplicará y unirá creando el faltante. Ésta se corresponde con la zona del asa y del nervio en relieve (Fig. 5.5.b).

Este modelo lo exportamos para llevarlo a Blender^{TM2}, donde haremos todo el trabajo de modelado.

- Se importan tanto el modelo 3D del objeto original como la sección extraída. Se alinean los modelos y se duplica la sección para dar forma al implante (Fig. 5.5.c). En este caso el proceso se facilita por la existencia de las asas, y al analizar la pieza se observa que faltan tres, por lo que se duplica la sección tres veces. Para completar el implante se extrae una sección del

¹MeshLab: sistema de código abierto para procesar y editar mallas tridimensionales 3D (CNR, 2016)

²BlenderTM: es un sistema de código abierto y de creación 3D gratuita para realizar modelado, animación, simulación, renderizado, composición y seguimiento de movimiento, incluso la edición de vídeo y creación de juegos (Foundation, 2016).

borde superior, que también le falta, utilizando para ello la sección extraída y eliminando la zona inferior. Otra vez en MeshLab con el modelo resultante, se unen las diferentes secciones que lo forman, y se genera un solo modelo. Por último se vuelve a Blender™ para ultimar el modelado (Fig. 5.5.d).

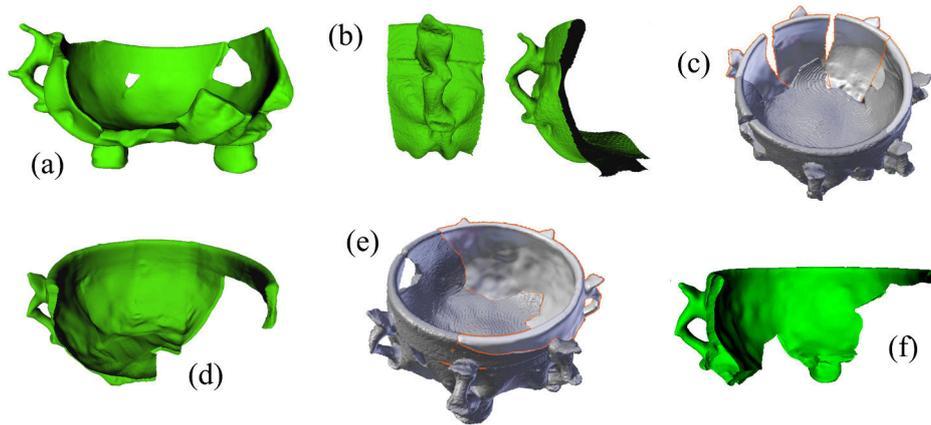


Figura 5.5: Proceso de creación del implante a partir del modelo 3D utilizando MeshLab y Blender™: (a) modelo 3D, (b) sección del modelo extraída para realizar el implante, (c) duplicado de la sección para cubrir la zona faltante, (d) malla del implante cerrada, (e) posicionado del implante y opción *Boolean*, (f) resultado del *Boolean* en el implante.

- Con las herramientas de modelado que ofrece Blender™, se adapta el implante y se retoca el modelado recuperando así la forma perdida (Fig. 5.5.e). Por último, se obtiene el perfil de la fractura para poder unir ambos modelos. Para ello se aplicó la opción *Boolean* (Diferencia) que encontramos en la barra de *Propiedades*, en *Modificadores*. Teniendo seleccionado el implante se obtiene el perfil de la fractura, es decir, la huella opuesta del perfil original (Fig. 5.5.f) para conseguir el acople entre el implante impreso y el cuenco de vidrio. En cuanto al pie (desaparecido) y la última asa, se recuperó de la misma manera, duplicando uno de los pies y una de las asas que se conservan y adaptándolos a la zona del faltante. El pie resultante fue incorporado al implante 1 (el proceso completo se puede ver en el anexo A).

Tras este proceso los implantes obtenidos se exportan en STL para su impresión en 3D.

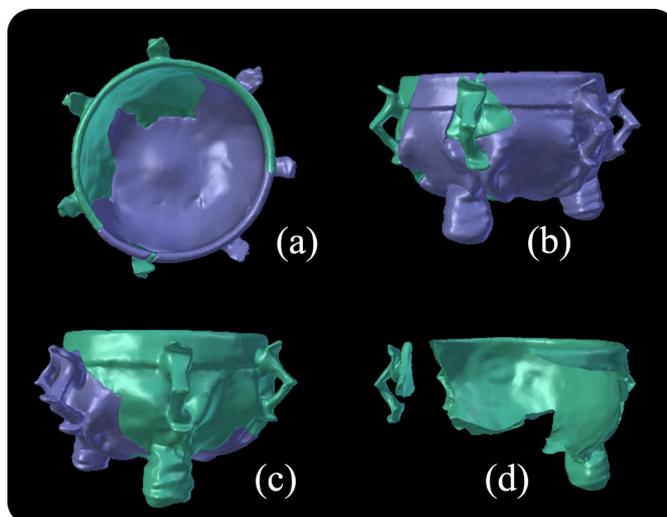


Figura 5.6: Modelo 3D del *Cuenco 1* junto al faltante reconstruido de forma digital: (a) vista superior de la unión del interior, (b) y (c) vista lateral de la unión exterior y (d) vista interior del implante.

5.3.5 Impresión 3D de los implantes

La impresora 3D utilizada es una *3D Mini Up!*, y realiza la reproducción por modelado por deposición de fundente (Fig. 5.7). Está preparada para imprimir filamentos de 1,75 mm de diámetro de dos tipos: ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) y PLA (ácido poliláctico), que es un termoplástico biodegradable. El espesor de capa varía entre 0,25-0,35 mm y la velocidad de impresión entre 10 – 100cm³/h. Tiene un área de impresión o plataforma que mide 120 x 120 mm, está diseñada para imprimir piezas pequeñas. Para facilitar la impresión lleva un soporte en la parte de atrás para colocar el filamento. Como formato de entrada al programa de la impresora se requiere un archivo STL.

Se han seleccionado dos filamentos de ABS, ya que es el tipo de filamento más utilizado y asimismo debido a las ventajas de sus características (como se verá en el capítulo 8). Ha sido suministrados por *EntresD* (EntresD, 2016) y *3D Ink* (Ink, 2016) de un diámetro de 1.75 mm. El primero es un filamento blanco (*White*) y el segundo es un filamento translúcido (*Clear*). Este último filamento se ha seleccionado debido a su similitud con la coloración del vidrio (Fig. 5.8).

Para realizar una impresión 3D hay que indicar una serie de parámetros: la resolución *Z*, relleno (como se quiere el entramado), el ángulo del soporte auxiliar y

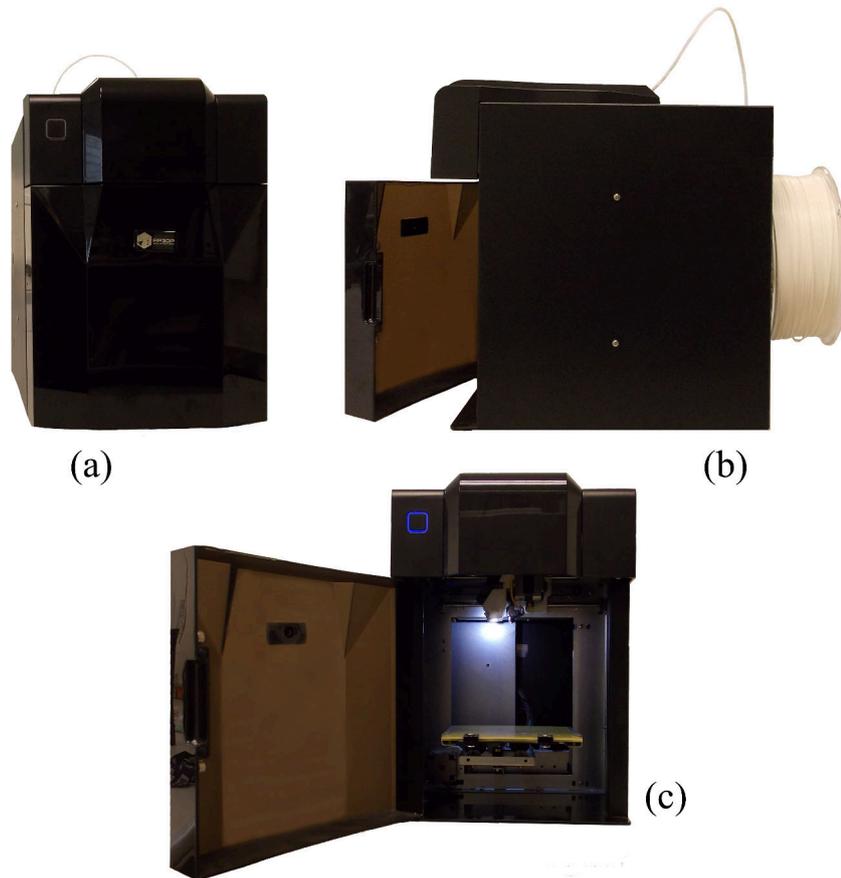


Figura 5.7: Impresora 3D *Mini Up!*: (a) frontal con la puerta cerrada, (b) perfil donde se puede ver el soporte del filamento, (c) frontal con la puerta abierta donde se puede ver su interior, gracias a la iluminación que lleva incorporada, compuesto por la plataforma (abajo) y el extrusor (arriba).

la calidad de la impresión (fina, normal, rápida). En la figura 5.9 se muestran los parámetros seleccionados para las impresiones de los implantes.

Otro parámetro a tener en cuenta es la orientación de la pieza sobre la plataforma. Dependiendo de los parámetros seleccionados se variará el tiempo de impresión, el material consumido y el número de capas fabricadas por la máquina. Teniendo en cuenta las tres orientaciones posibles, que hemos denominado horizontal-tumbada (primera), horizontal-frontal (segunda) y vertical-frontal (tercera). Para imprimir el implante 1 del *Cuenca 1* se han seleccionado dos orientaciones, segunda y tercera

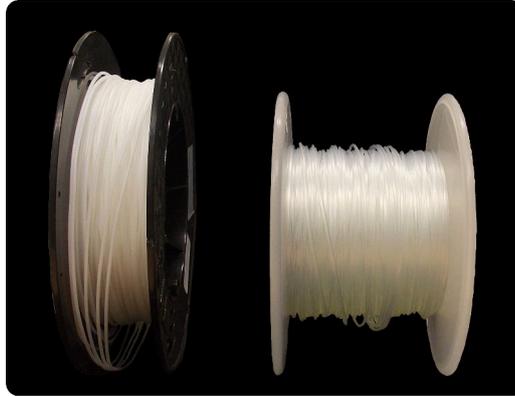


Figura 5.8: Filamentos ABS seleccionados: a la izquierda el filamento blanco (*White*) y a la derecha el filamento translúcido (*Clear*).

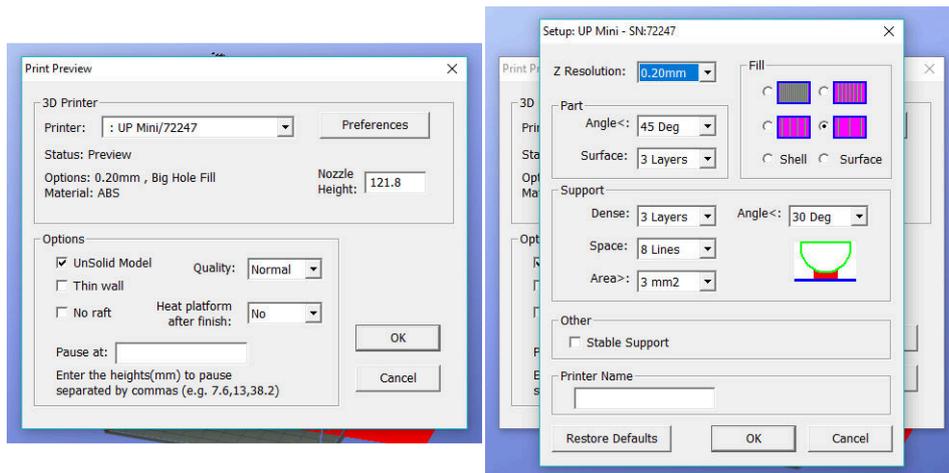


Figura 5.9: Parámetros seleccionados para la impresión de los implantes.

(Fig. 5.10) y se han comparado como afectan cada una a los siguientes parámetros: material consumido, tiempo de impresión y número de capas (Tabla 5.1). Comparando dos orientaciones seleccionadas para esta pieza (segunda y tercera), se observa que la tercera orientación tarda más tiempo en imprimirse, gasta más cantidad de material y presenta un mayor número de capas. En cuanto a la calidad del resultado muestra mejor precisión la realizada con la segunda orientación.

Tabla 5.1: Parámetros de la impresión que varían dependiendo de la orientación de la pieza.

Orientación	Material consumido(gr)	Tiempo(min)	Capas
Horizontal-frontal	26.6	148	316
Vertical-frontal	37.0	207	472

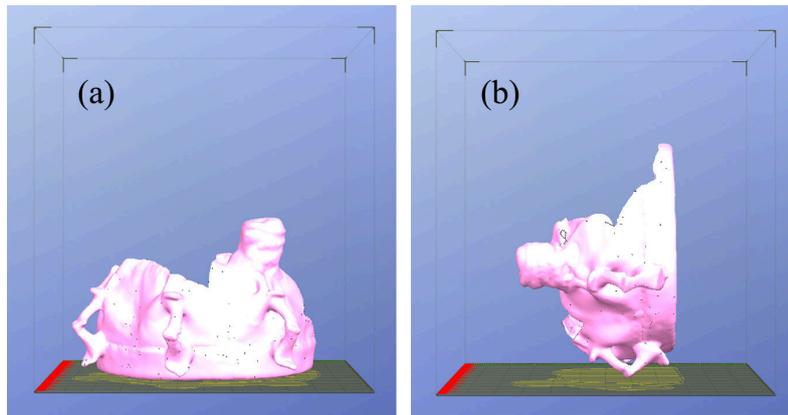


Figura 5.10: Orientaciones seleccionadas para la impresión del implante 1 de la pieza *Cuenco 1*: (a) izquierda horizontal-frontal (segunda) y (b) vertical-frontal (tercera).

Finalmente se optó a nivel general por la impresión con la orientación horizontal-frontal (segunda) ya que ofrece una superficie y unas dimensiones excelentes y además esta orientación proporciona mejores propiedades mecánicas como queda demostrado en Tanoto *et al.*, 2017. En las figuras 5.11 y 5.12 se muestran los resultados finales tras la impresión de la segunda orientación.



Figura 5.11: Resultado de la impresión 3D con la orientación horizontal-frontal del implante 1 del *Cuenco 1* con el filamento blanco (*White*): (a) exterior, (b) interior.



Figura 5.12: Resultado de la impresión 3D con la orientación horizontal-frontal del implante 1 del *Cuenco 1* con el filamento translúcido (*Clear*): a) exterior, (b) interior.

Para elegir la orientación más óptima para los implantes se ha analizado cada uno teniendo en cuenta zonas con decoración, zonas planas, partes salientes y zonas de adhesión con la pieza original. Los tipos de orientaciones seleccionados para cada implante se pueden ver en la anexo A. Los resultados de las impresiones del resto de implantes se pueden ver en el anexo B.

5.4 Tratamiento superficial de los implantes

Los modelos 3D que son impresos por FDM tienen la característica de mostrar en su superficie las diferentes capas que la forman. Ésta no queda lisa sino que la superficie muestra una discontinuidad de tamaño apreciable, que puede ser suavizada. Para ello, se puede hacer por medio de un tratamiento mecánico con papeles abrasivos o microtorno, o por medio de un tratamiento químico por fricción con acetona o por su exposición a vapores de acetona. Para seleccionar el tratamiento hemos ensayado cada uno de ellos sobre la superficie de cada filamento para conocer el resultado de su aplicación. Se han impreso 4 probetas de cada filamento, con unas dimensiones de 25 x 25 x 10 mm, y en 3 de ellas se ha aplicado un tratamiento. La primera probeta (b) se ha tratado con papeles abrasivos y microtorno, la segunda (c) con una muñequilla de algodón impregnada en acetona y la última (d) con vapores de acetona utilizando un desecador de vidrio y colocando acetona en la parte inferior y las muestras en la parte superior. En general el filamento blanco ha mostrado menor resistencia al tratamiento en los tres casos, desapareciendo el relieve y quedando la superficie lisa. Con la exposición a los vapores de acetona también se ha conseguido un brillo intenso (Fig. 5.13.d), algo que no ha pasado en las muestras donde se ha aplicado el tratamiento de abrasión en seco y de fricción con acetona (Fig. 5.13.b-c). En cuanto al filamento translúcido el tratamiento que mejor resultado ha mostrado es el tratamiento de seco, quedando la superficie lisa (Fig. 5.13.b) pero perdiendo su característica translúcida. En los otros dos casos

se observan restos de las capas. Con el tercer tratamiento también ha aumentado el brillo intensamente (Fig. 5.13.d).

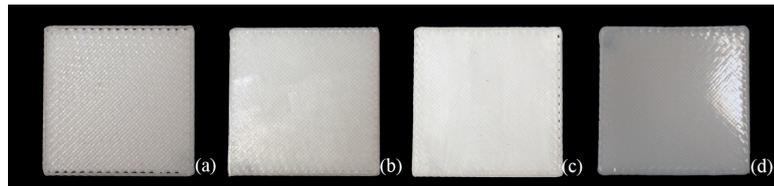


Figura 5.13: Resultado de los tratamientos superficiales aplicados al filamento blanco (*White*): (a) probeta sin tratamiento, (b) probeta erosionada con papeles abrasivos, (c) probeta friccionada con acetona, (d) probeta expuesta a vapores de acetona.

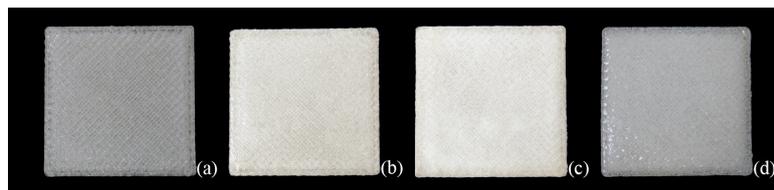


Figura 5.14: Resultado de los tratamientos superficiales aplicados al filamento translúcido (*Clear*): (a) probeta sin tratamiento, (b) probeta erosionada con papeles abrasivos, (c) probeta friccionada con acetona, (d) probeta expuesta a vapores de acetona.

Tras los resultados se ha optado por realizar abrasión en seco sobre la superficie de los implantes impresos primero con una lija N.50 *Waterproof*, a continuación con dos tipo de fresas con el microtorno y por último terminar con una lija P600 *Waterproof*, y después aplicar un recubrimiento de pintura. Los implantes que no van a llevar recubrimiento de pintura, tras el proceso abrasivo, se expondrán a vapores de acetona (en nuestro caso 400 ml durante 30 minutos) para conseguir el brillo superficial y en el caso del filamento translúcido recuperar la superficie translúcida.

En la figuras 5.15 y 5.16 se muestran los resultados del implante 1 del *Cuenco 1* con filamento blanco (*White*). En las figuras 5.17 y 5.18 los mismos resultados pero aplicados sobre el filamento translúcido (*Clear*). El resultado del tratamiento aplicado al implante 2 del *Cuenco 1*, los implantes de los objetos *Cuenco 2* y *Plato* se pueden ver en en anexo B.



Figura 5.15: Resultado del tratamiento superficial de abrasión en seco sobre el implante 1 del *Cuenco 1* con filamento blanco (*White*): (a) exterior, (b) interior.



Figura 5.16: Resultado del tratamiento superficial con vapores acetona sobre el implante 1 del *Cuenco 1* con filamento blanco (*White*): (a) exterior, (b) interior.



Figura 5.17: Resultado del tratamiento superficial de abrasión en seco sobre el implante 1 del *Cuenco 1* con filamento translúcido (*Clear*): (a) exterior, (b) interior.



Figura 5.18: Resultado del tratamiento superficial con vapores acetona sobre el implante 1 del *Cuenco 1* con filamento translúcido (*Clear*): (a) exterior, (b) interior.

5.5 Unión entre piezas: original e implantes

La unión entre el objeto de vidrio y el implante impreso se debería de hacer con un adhesivo que cumpliera con los requisitos impuestos dentro de la disciplina de conservación y restauración. De este modo se ha optado por adhesivos en disolución debido a que su uso está más generalizado en este campo. Estos adhesivos están formados habitualmente por un polímero sintético en disolventes que potencialmente reaccionarían con el material impreso. Por este motivo, se han realizado una serie de ensayos para conocer que adhesivos son compatibles con el ABS y son además seguros e idóneos para el vidrio. Los ensayos realizados y los resultados obtenidos de manera desarrollada se pueden ver en el capítulo 8.

5.6 Reintegración cromática de los implantes

Para la reintegración cromática se ha realizado primero una simulación virtual (que se puede ver en el sección 7.3.1), que ha facilitado la selección de pinturas que van a ser utilizadas. Se ha escogido una marca de pinturas acrílicas (sección 8.1.2) que han sido testadas para conocer su comportamiento sobre el ABS realizando varios ensayos que se pueden ver en la subsección 8.2.3 y en la 8.4.2.

Se han aplicado sobre los implantes las pinturas seleccionadas y se ha observado que a pesar del tratamiento superficial no se consigue que la líneas de impresión se eliminen por completo y por tanto es difícil obtener una superficie homogénea (Fig.5.19) por lo que se recomienda una capa de imprimación adecuada para el material impreso.

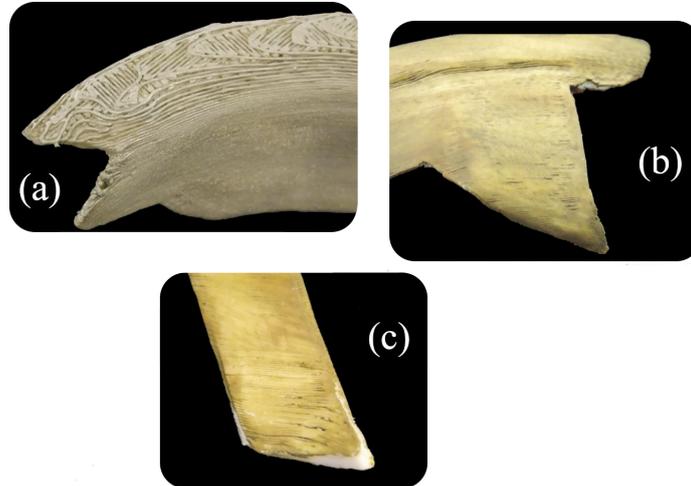


Figura 5.19: Pruebas de reintegración sobre los implantes del *Cuenco 2* y *Plato* donde son visibles las marcas de la impresión 3D a pesar del tratamiento superficial: (a) detalle del *Plato* donde se puede ver unas marcas profundas debidas a que la zona del borde fue la base durante la impresión, (b) y (c) detalle del *Cuenco 2* donde se pueden ver restos del relieve de las capas que aparecen con la impresión 3D.

5.7 Resultados y discusión

Con la metodología desarrollada se ha obtenido el modelo 3D del objeto a restaurar, los modelos 3D de los implantes creados y las impresiones 3D en filamento ABS en blanco y translúcido. El desarrollo se ha mostrado a través de la pieza *Cuenco 1* pero también ha sido realizado en las demás piezas, mostrando el proceso en el anexo A.

El vidrio ha sido adquirido gracias a la utilización del ciclododecano en aerosol. El modelo 3D optimizado ha perdido cierta precisión con respecto al original durante el proceso de corrección de la malla. Esto ha provocado algunos errores de acople entre el objeto y el implante que han sido corregidos tras la primera impresión y su prueba en el objeto original. La óptima calidad de la impresión del implante ha quedado patente al comparar los detalles de la decoración exterior reproducida. Los modelos 3D de los objetos *Cuenco 2*, *Plato*, *Lámpara* y *Botella* junto a sus implantes 3D se puede ver en la sección A.1.

La impresión 3D por modelado por deposición de fundente utilizada para reproducir los modelos 3D de los implantes presenta tres posiciones posibles para orientar la pieza que afectan al resultado final. Teniendo en cuenta las zonas de adhesión y la morfología de los implantes se ha optado por elegir la orientación horizontal-

frontal (segunda). El resultado con esta orientación es muy satisfactorio primero por la calidad de la decoración y la forma general del objeto y por la disposición de las capas en horizontal que disminuyen el riesgo de separarse por la tracción ejercida por el adhesivo que se encuentra a ambos lados.

Las piezas impresas resultantes son de dos colores, blanco y translúcido, donde tras un tratamiento superficial, a base de papeles abrasivos y microtorno, se obtiene una superficie óptima para reintegrar cromáticamente aplicando antes una capa de imprimación especial. En caso de no pigmentar la superficie del implante, se puede exponer a vapores de acetona para que la superficie adquiera brillo en caso de ser requerido. Estos implantes, que sustituyen a las zonas perdidas, han devuelto la estabilidad a la pieza y recrean la morfología original mediante el modelado de áreas que se adaptan a las zonas vacías.

La superficie del implante sin cubrir cromáticamente ofrece diferentes cualidades a valorar. En el filamento blanco (*White*) las formas de la decoración se aprecian bien definidas, mientras que en el filamento translúcido (*Clear*) las formas se perciben más suavizadas por el color del material. Tras el tratamiento superficial los dos materiales adquieren brillo y en el caso de *Clear* mayor grado de transparencia. Cuando no se opta por llevar a cabo un recubrimiento de pintura y se busca un acabado de brillo intenso, la opción *Clear* es la más adecuada.

A continuación se muestran los resultados entre la unión de los objetos restaurados y sus correspondientes implantes donde las figuras 5.20 y 5.21 son del *Cuenco 1*, las figuras 5.22 y 5.23 son del *Cuenco 2* y las figuras 5.24 y 5.25 son del *Plato*.

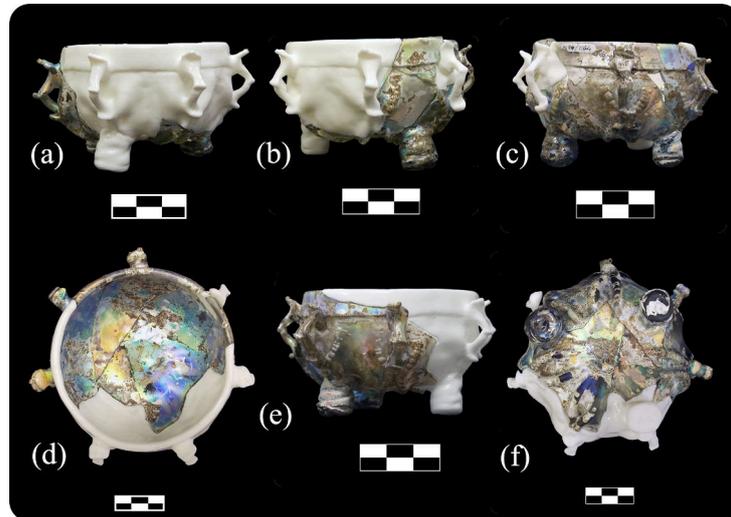


Figura 5.20: Resultado final del objeto *Cuenco 1* con el filamento blanco (*White*): (a) frontal, (b) lateral derecho, (c) posterior, (d) superior, (e) lateral izquierdo, (f) inferior.

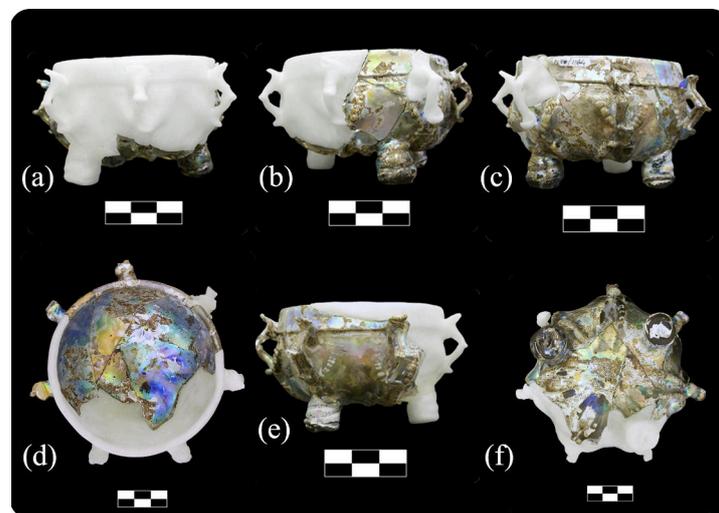


Figura 5.21: Resultado final del objeto *Cuenco 1* con el filamento translúcido (*Clear*): (a) frontal, (b) lateral derecho, (c) posterior, (d) superior, (e) lateral izquierdo, (f) inferior.

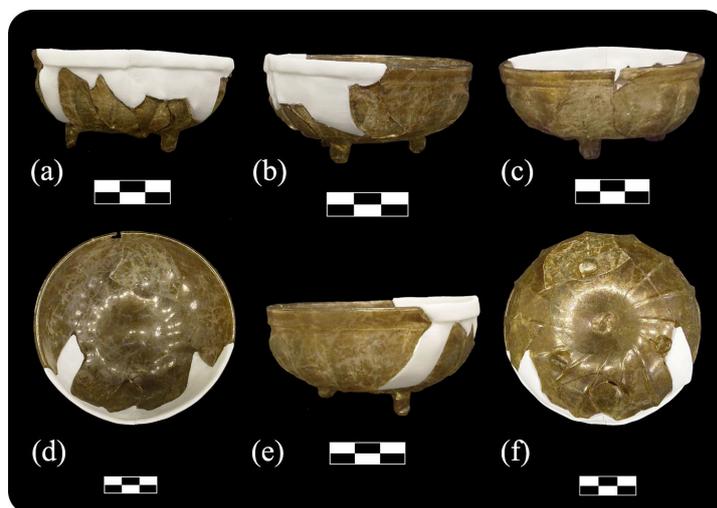


Figura 5.22: Resultado final del objeto *Cuenco 2* con el filamento blanco (*White*): (a) frontal, (b) lateral derecho, (c) posterior, (d) superior, (e) lateral izquierdo, (f) inferior.



Figura 5.23: Resultado final del objeto *Cuenco 2* con el filamento translúcido (*Clear*): (a) frontal, (b) lateral derecho, (c) posterior, (d) superior, (e) lateral izquierdo, (f) inferior.

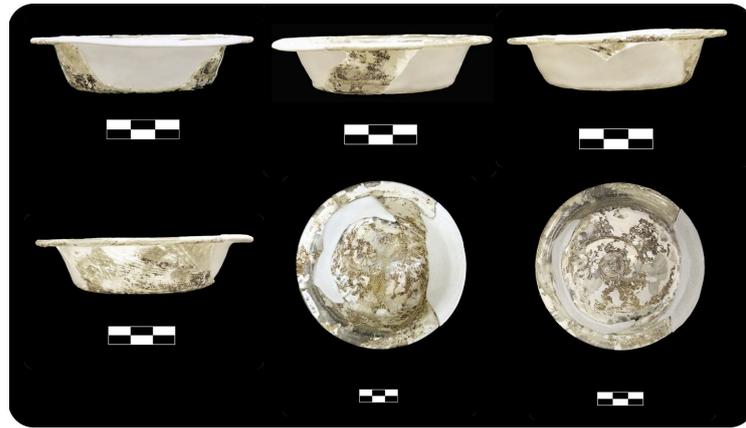


Figura 5.24: Resultado final del objeto *Plato* con el filamento blanco (*White*): (a) frontal, (b) lateral derecho, (c) posterior, (d) superior, (e) lateral izquierdo, (f) inferior.



Figura 5.25: Resultado final del objeto *Plato* con el filamento translúcido (*Clear*): (a) frontal, (b) lateral derecho, (c) posterior, (d) superior, (e) lateral izquierdo, (f) inferior.

Capítulo 6

Proceso automatizado de fabricación de embalajes para vidrio arqueológico

6.1 Conservación de objetos arqueológicos mediante creación de embalajes

Para continuar con la conservación de objetos arqueológicos tras el proceso de restauración se realiza, entre otras tareas, la construcción de un embalaje idóneo para su transporte y almacenamiento. A pesar de la variedad de materiales arqueológicos, incluyendo formas y tamaños, el tipo de embalajes utilizados es normalmente el mismo: una caja y un sistema de soportes interiores.

La evolución de los embalajes que protegen a este tipo de objetos se ha basado en introducir dentro de una caja un material de relleno. Se ha pasado de un relleno suelto que ocupaba todo el espacio, a un acolchado más complejo y compacto que se adapta a la forma del objeto y que tiene como principal función la protección contra golpes y vibraciones.

A partir de este modelo de embalaje, una obra dentro de una caja sencilla o doble y protegida por una o varias capas de acolchado, surgen estudios concretos encaminados a diseñar embalajes específicos para las particularidades de cada obra, teniendo en cuenta su condición de almacenaje o tránsito (Stolow, 1987; Jonhson, 1999).

Un material muy utilizado para este tipo de estructuras adaptadas es la espuma rígida¹ la cual puede ser recortada basándose en la forma del objeto a proteger, y ser adaptada. Estas espumas permiten sujetar las piezas de manera muy estable y segura, muy importante cuando se trabaja con materiales extremadamente frágiles como el vidrio arqueológico.

Los sistemas más comunes de sujeciones interiores realizadas con espuma rígida, mostrados en la figura 6.1, son:

- **Sujeciones interiores de espumas rígidas:** que consiste en el uso de travesaños o soportes interiores de espuma, introducidos en ranuras, que inmovilizan la pieza dentro de una caja (Stolow, 1981).
- **Embalaje con cavidades:** donde la silueta del objeto es recortada en la espuma, creando un hueco donde el objeto se introduce y queda inmovilizado. Es importante que la pieza no esté excesivamente apretada, para poder extraerla con facilidad (Bauer, 1993).
- **Montajes cuna:** son utilizados en objetos con base cóncava o inestable y consisten en cortar varios bloques de espuma rígida para crear una base que proporcione estabilidad (Murdock y Johnson, 2001).



Figura 6.1: Tipos de embalajes adaptados: sujeciones interiores de espumas rígidas (derecha), embalaje con cavidades (centro) y montajes cuna (izquierda).

¹Espuma rígida: actualmente las espumas son los materiales de relleno más utilizados, especialmente espumas de poliuretano, polipropileno, poliestireno y polietileno principalmente.

6.1.1 Elaboración de embalajes y estado actual de la cuestión

En los últimos años ha habido considerables avances en el diseño específico de cajas y sistemas de acolchado para la salvaguarda del patrimonio. De este modo en Marcon (1991) se diseña unas tablas guía para el cálculo de las especificaciones de embalajes óptimos, y posteriormente el Canadian Conservation Institute crea una herramienta de tipo software para el diseño automático del sistema de acolchado de objetos frágiles (Marcon y Strang, 1999). Más recientemente aparece una guía para la ejecución de embalajes de objetos frágiles y traslados seguros (Marcon, 2011) y adquiere importancia la acción de las fuerzas físicas implicadas en los traslados y sus consecuencias en el deterioro en obras patrimoniales (Marcon, 2013).

Gracias a estos trabajos, los objetos arqueológicos tan frágiles como el vidrio pueden ser embalados para su almacenamiento y/o transporte sin riesgos (Fulton y Rossi-Wilcox, 2008). Los estudios de sistemas de acolchado han permitido la caracterización de los materiales aptos para esta tarea (Tétreault y Williams, 1993). Uno de los materiales destacados debido a su elevada capacidad de amortiguación y a su gran estabilidad es la espuma rígida de polietileno² (Schlichting, 1994). Sin embargo, trabajar con este material no es fácil ni rápido: debe recortarse de forma manual tanto la silueta como el volumen del objeto (Aboe, 2012), y si la morfología es compleja, el resultado no suele ser muy preciso.

Actualmente, con la aplicación de la tecnología de impresión 3D se abren nuevas posibilidades en el campo del embalaje adaptado. En Mohamed y Mahmoud (2012) se destaca su influencia y se describe el comienzo de una revolución en el mundo del *packaging*. En Sá *et al.* (2012) se muestran sus aplicaciones en la conservación del patrimonio y, de este modo, se ponen de manifiesto las ventajas del método llevando a cabo un estudio sobre la realización de embalajes. En el estudio utilizan una impresora 3D de adición por capas, a base de polvo de yeso, para la creación de armazones ligeros.

A pesar de las ventajas de las impresoras 3D, las limitaciones impuestas por los materiales que deben usarse, hace que las máquinas de corte CNC (Computer Numerical Control) resulten más adecuadas para la creación de los embalajes propuestos.

Por este método, en un estudio de la Yale University Art Gallery (Gallup y Harlow, 2006), se realizaron los embalajes adaptados mediante el corte de espumas rígidas por medio de una máquina CNC a partir de los modelos 3D obtenidos por un láser escáner de triangulación. Más recientemente, y de manera similar, en el Smithso-

²Espuma de polietileno: es un polímero termoplástico formado por la polimeración del etileno. Son de celda cerrada y se fabrican en varias densidades. Sus propiedades de aislamiento térmico y vibratorio son excelentes. Como son de celda cerrada no absorben humedad ni suciedad superficial y son muy resistentes a los agentes químicos y presentan buena resistencia a la rotura y tracción. En función del espesor y la densidad de la espuma, se puede ir aumentando su poder de absorción de vibraciones y de aislamiento de acuerdo con las necesidades del objeto (Rotaeche, 2007).

nian Institution de Washington también han usado una fresadora para cortar las espumas de polietileno con las que hacer embalajes para obras contemporáneas (Smithsonian, 2014).

Figura 6.2: Fases del proceso automático para embalajes adaptados, desde el objeto original a las trayectorias CNC usadas por una máquina de fresado. Cada fase utiliza los datos obtenidos en la etapa anterior, junto con los parámetros introducidos por el conservador que permite personalizar el resultado final de acuerdo con las especificaciones de cada pieza o máquina fresadora.

6.2 Metodología experimental

En la metodología desarrollada se modela en 3D de manera automática el negativo de la forma de la pieza como una malla 3D sólida que forma una cavidad adaptada. Para ello se hace uso de técnicas modernas de computación con GPU (Graphics Processor Unit). Durante la fase del modelado 3D, la geometría se construye teniendo en cuenta los procedimientos y las restricciones de la máquina de fresado, buscando facilitar el mecanizado del modelo y proporcionar una solución eficiente y rentable.

Este enfoque difiere considerablemente del presentado en Sá *et al.* (2012), anteriormente citado, en dos aspectos principales: (1) nuestro trabajo se basa en la tecnología de fresado CNC, que permite el uso de una mayor variedad de materiales, más adecuados para fines arqueológicos (la estabilidad química de los materiales es un factor clave). Por otro lado, las máquinas de fresado CNC resultan más económicas que las impresoras 3D a base de polvo de yeso, ofreciéndonos una solución de bajo coste. (2) La topología de la cavidad adaptada propuesta en Sá *et al.* (2012) se basa en estructuras de baja densidad, que son difíciles de calcular, proporcionando una superficie de contacto limitado, y son muy difíciles de imprimir (en realidad, el documento original muestra algunos fallos de impresión). Nuestra técnica propone un cálculo fácil y una fresado fácil de la estructura que potencia el área de contacto con la superficie.

El proceso que proponemos para la obtención automática del embalaje está dividido en 4 etapas o fases (Fig. 6.2), detalladas a continuación (Sánchez-Belenguer *et al.*, 2015):

- **Adquisición:** Usando un escáner láser 3D de triangulación y una plataforma giratoria, los objetos son adquiridos y almacenados como mallas 3D. Sobre estos datos se trabaja para la creación del algoritmo.
- **Modelado:** A partir del modelo 3D, se calcula de forma automática una posición que maximice el contacto entre la superficie del objeto y la cavidad. A continuación una herramienta software genera un modelo 3D de la cavidad que tiene en cuenta las restricciones físicas introducidas por la máquina de fresado. Los resultados son calculados rápidamente y con una precisión extremadamente alta.
- **Cálculo de la trayectoria:** Obtenido el modelo 3D de la cavidad adaptada en la fase anterior, y considerando algunos parámetros de fabricación (radio y longitud de la herramienta de fresado), se calculan las trayectorias de la máquina fresadora y el código de control (G-Code) de la máquina fresadora, que se guarda en un archivo.

- **Fresado:** Una vez que las trayectorias han sido calculadas, el G-Code generado en la fase previa, se envía a una máquina fresadora de bajo coste a través de ordenador al que va conectada, y esculpe en un bloque de espuma la cavidad adaptada del objeto.

6.2.1 Fase 1: Generación automática del embalaje adaptado

El objetivo de esta fase consiste en el cálculo automático de la estructura 3D de la cavidad adaptada de un objeto de vidrio. Los datos necesarios para obtener el algoritmo son los modelos 3D de los objetos adquiridos, junto con los parámetros introducidos por el restaurador. El resultado es una malla 3D que envuelve al objeto original, y que considera las restricciones impuestas por la máquina fresadora y el restaurador.

Las restricciones relacionadas con el proceso de fabricación son en su mayoría la consecuencia de los grados de libertad³ que tiene la máquina fresadora y la precisión alcanzada. En nuestro caso, usamos una típica máquina fresadora porticada de 3 grados de libertad, donde la herramienta realiza un movimiento libre siempre perpendicular al plano X - Y . Los parámetros introducidos por el restaurador establecen las dimensiones del embalaje y la holgura deseada para evitar la creación de una cavidad adaptada demasiado estrecha. En la figura 6.3 se muestra estos parámetros. La holgura se necesita para evitar los errores de fabricación que son introducidos por la máquina fresadora, y están relacionados con la precisión de la máquina.

Teniendo en cuenta los 3 grados de libertad de la máquina fresadora, el espacio de trabajo del algoritmo propuesto puede ser representado como una matriz discreta P_{uxv} donde cada muestra $p_{i,j}$ guarda las coordenadas de un punto 3D, definidas como: $(i * \frac{w}{u}, j * \frac{d}{v}, P(i, j))$, donde w y d corresponden con la anchura y profundidad seleccionadas por el restaurador, y u y v la resolución de la malla en ambos ejes.

Con el fin de calcular los valores de Z para todos los puntos, y teniendo en cuenta que el modelo final 3D debe ser convexo visto desde el eje Z , las distancias ortogonales proyectadas entre la base de la cavidad adaptada y la superficie del objeto se calculan utilizando las capacidades de computación de la GPU (Sánchez Belenguer y Vendrell Vidal, 2012).

Una vez calculadas las coordenadas de cada punto, se aplica el dato de la holgura general introducida para prevenir la estrechez de la cavidad adaptada que impediría la introducción del objeto original en la forma. Para hacerlo de un modo más eficiente, nos aprovechamos de la representación plana elegida: desde la convexidad

³ *Degrees of freedom*. El número de grados de libertad coincide con el número de ejes de la fresadora.

del eje Z puede aplicarse un núcleo de convolución (operador matemático) a cada punto en la matriz, actualizándose los valores Z de acuerdo con su localización.

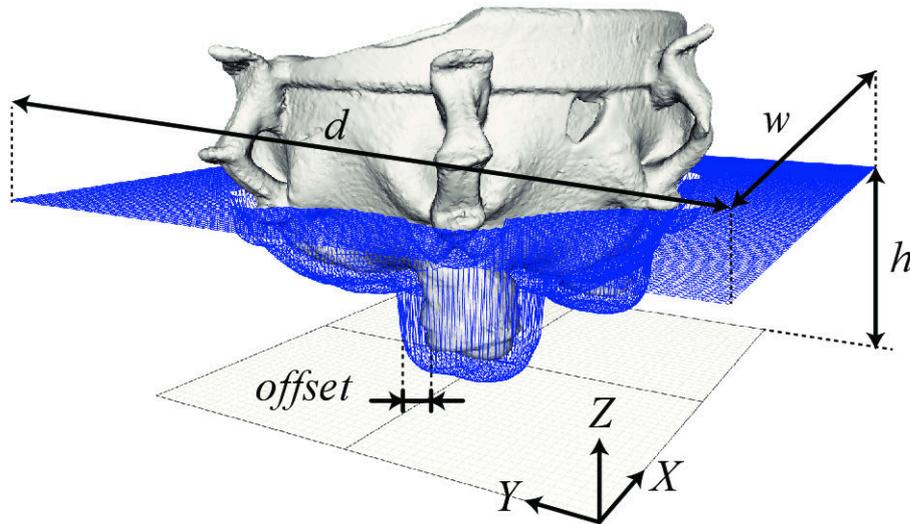


Figura 6.3: Parámetros utilizados para generar automáticamente la cavidad adaptada.

Orientación automática de los objetos

Para realizar un proceso completo de la fabricación de un embalaje, los objetos tienen que ser orientados correctamente sin intervención del usuario. Para ello, se necesitan los valores de θ_X y θ_Y . Dado el marco de referencia propuesto (Fig. 6.4), los valores θ_Z no afectan el resultado final, ya que el eje Z está alineado con la dirección de fresado.

Definimos la calidad de la orientación (θ_X, θ_Y) de acuerdo con dos criterios: (1) el contacto de la superficie entre la cavidad y el objeto, y (2) el grado de perpendicularidad entre el contacto de la superficie y la cavidad. El valor más grande se corresponde con la mejor orientación.

Para decidir qué posición es la más apropiada para el embalaje, tomamos el algoritmo sobre GPU previamente introducido para la búsqueda de la optimización de la red. De esta manera, mediante la evaluación de forma exhaustiva de todos los pares de orientaciones de ambos ejes (repetiendo un valor fijo), se calcula cada combinación de rotaciones individuales. A continuación, la posición que maximiza este valor se selecciona como la mejor. Formalmente, el proceso de optimización se puede expresar como:

$$\max_{\theta_X, \theta_Y} \sum_{t \in T} \frac{1}{2} |(t_2 - t_0) \times (t_2 - t_1)| * \langle (0, 0, 1)^T, t_n \rangle^2 \quad (6.1)$$

donde T es el conjunto de triángulos devueltos por el algoritmo previamente introducido usando los ángulos θ_X y θ_Y , t_i es la posición de la i -th vértice del triángulo $t \in T$ corresponde a su estado normal, el operador \times es el producto vectorial, y el operador $\langle a, b \rangle$ corresponde al producto entre los vectores a y b .

Ahora, con la ventaja del algoritmo sobre GPU, los resultados archivados con la técnica iterativa propuesta son más precisos que usando una solución de forma cerrada así como análisis PCA (Principal Component Analysis). La principal razón para esto es que se tienen en cuenta las oclusiones (hace referencias a zonas entrantes o salientes que impedirían extraer o introducir el objeto en el embalaje si no se tienen en cuenta) y perpendicularidad.

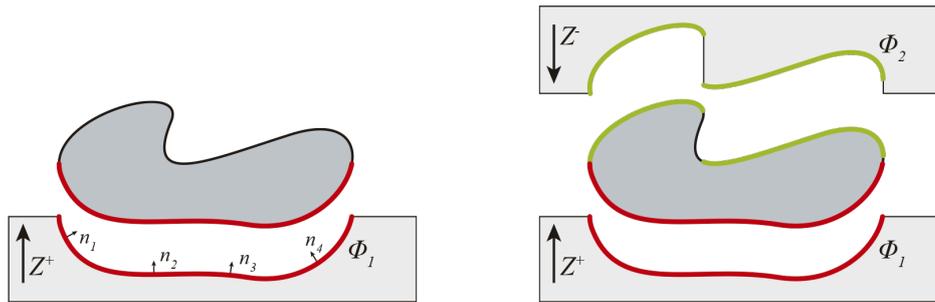


Figura 6.4: (Izquierda) embalaje de la zona inferior de un objeto (representado en gris más claro), considerando sólo la dirección Z^+ . La línea roja se corresponde con el área de contacto total (superficie Φ_1), donde no ocurren oclusiones. Se muestran algunas zonas (n_{1-4}), siendo el área que rodea n_2 y n_3 más interesante en términos de perpendicularidad con respecto al área que rodea n_1 y n_4 . (Derecha) embalaje de las dos caras del mismo objeto. Se observa que la superficie de contacto Φ_2 (arriba) no es continua. Esta situación sólo se puede detectar cuando se tienen en cuenta las oclusiones.

Considerando que para transportar los objetos deberían estar completamente cerrados en un embalaje, la optimización del proceso propuesto con la ecuación 6.1, puede ser extendida considerando T como la unión del conjunto de triángulos devueltos para el cálculo de forma independiente de la cavidad por el usuario y las partes inferiores del objeto (direcciones de fresado definidas por $Z^+ = (0, 0, 1)$ y $Z^- = (0, 0, -1)$). De esta manera, los resultados asegurarán que el contacto total de la superficie de ambos lados sea la máxima. Este concepto está ilustrado en detalle en la figura 6.4.



Figura 6.5: Máquina CNC porticada.

6.2.2 Fase 2: Fresado del embalaje

La última etapa del enfoque propuesto se ocupa de la fabricación del embalaje adaptado. Los materiales utilizados para el embalaje son en su mayoría diferentes tipos de espumas de densidad relativamente baja. Para mecanizar estos materiales, se puede utilizar como equipamiento una máquina CNC de bajo coste (Fig. 6.5), que utiliza una técnica sustractiva que reproduce un modelo 3D a partir de un bloque de material. Sin embargo, a la larga, la mayor parte del coste vendrá del gasto en los materiales utilizados para hacer el embalaje.

Tomando de entrada el modelo 3D generado en la fase anterior, en nuestra estrategia de fresado el usuario define el porcentaje de solapamiento (entre pasadas de la herramienta) y los valores de reducción gradual en forma de zig-zag. Se crean las trayectorias de desbaste y acabado, aunque para algunas espumas la fase del desbaste (donde se extrae mayor parte de material) puede ser omitida y pasar a la fase del acabado directamente.

La trayectoria de la herramienta se calcula como una secuencia de puntos obtenidos mediante la intersección de los diferentes planos de corte del eje X con la malla 3D del embalaje. La separación entre planos contiguos en el eje Y corresponde con el porcentaje de superposición previamente definido. Si la máxima profundidad alcanzable con la herramienta es inferior a la altura del embalaje, sería necesario realizar múltiples pasadas a diferentes niveles.

Teniendo en cuenta que el modelo 3D final tiene que ser fresado, se calcula el punto de resolución en el plano X - Y de acuerdo con la distancia de superposición

y el diámetro de la herramienta. De esta manera generar las trayectorias en zigzag es tan simple como la conversión de la anterior matriz discreta, calculada previamente, en el conjunto de comandos G-Code.

6.3 Recomendaciones para el almacenamiento y transporte de objetos de vidrio

Según Rico (2009), las características básicas de los embalajes se dividen en tres puntos fundamentales: solidez y seguridad, aislamiento térmico y vibroaislamiento. Debido al grado de vulnerabilidad del vidrio, el embalaje para proteger una pieza de vidrio arqueológico debe tener una resistencia mecánica que impida que cualquier golpe o caída, que se pueda producir durante su manipulación o traslado, deterioren la pieza. Para ello, hay que conocer muy bien las características de los materiales que se utilizan.

Teniendo en cuenta la fragilidad del vidrio hay que poner varias capas, aunque tampoco se debe sobreproteger, realizando un embalaje adecuado a cada pieza y que sea rentable.

El embalaje para transporte estaría formado por cuatro capas, de dentro hacia fuera: estaría la pieza, rodeada de una primera capa con la función de evitar el contacto con la siguiente, que es la capa de acolchado. Ésta capa cuya función reside en la absorción de los impactos y vibración, se adapta a la forma de la pieza (y es la capa fabricada automáticamente en este estudio). La capa siguiente da consistencia a la capa de acolchado, creando un espacio cerrado. Y por último una capa exterior rígida que protege al embalaje interior (Díaz Marín, 2011). Hay que tener en cuenta el aislamiento térmico para el transporte. Éste se consigue con los materiales que presentan características que permitan la transpiración, no condensando la humedad y que mantengan una temperatura intermedia entre el exterior e interior del embalaje, en el menor tiempo posible y sin cambios bruscos. La elección de los materiales es muy importante pero su colocación dentro del embalaje lo es aún más, para que pueda realizar su función correctamente. Los materiales aislantes deben cubrir todas las caras del interior del embalaje, incluidas las juntas y prestar atención a la tapa del embalaje, intentado que el cierre sea lo más estable posible. La vibración está presente en cualquier manipulación o traslado de una pieza. Como las piezas de vidrio tienen un grado de fragilidad muy alto, los materiales que funcionarán como vibroaislantes deben tener un comportamiento óptimo frente a los choques y vibraciones. Se deben buscar unos materiales que su frecuencia de resonancia⁴ sea diferente a la de la pieza y que la atenúen.

⁴Frecuencia de resonancia: un objeto sólido está compuesto por un sistema de muelles (elementos elásticos) y masas (elementos rígidos). Cuando este sistema recibe un impacto, la masa tiende a retroceder en la dirección del muelle, que recoge la inercia para devolverla en la dirección opuesta, es decir, hacia la masa lo que provoca un movimiento rítmico hasta que la energía se

En cuanto al almacenamiento, el esquema sería el mismo pero sin la última capa. Debido a que el almacén sería en un lugar climatizado, donde la humedad y la temperatura estarían controladas, los materiales aislantes no deberían ser necesarios. Si ocurriese lo contrario se tendrían que tener en cuenta. Por otro lado, se debería poder acceder a la pieza con facilidad, sin tener que desmontar el embalaje y volver a montarlo durante las revisiones periódicas. Se recomienda una humedad relativa 45-50 % y una temperatura de 18-21°C, controlar de modo regular el estado del vidrio y evitar al máximo la manipulación del objeto.

6.4 Resultados y discusión

Para ilustrar las posibilidades de la metodología desarrollada, se ha seleccionado la pieza *Cuenca 1*.

Una vez adquirido el objeto, generar el modelo 3D para el embalaje es casi inmediato: con una previsualización en tiempo real acelerado de los parámetros de la GPU, donde solo hay que decidir la altura correcta de la cavidad. El cálculo de la geometría final llevó alrededor de 2 segundos, y generar las trayectorias CNC otros 2 segundos más. La fabricación de la cavidad final, por parte de la fresadora de bajo coste, llevó aproximadamente una hora donde no se observaron errores durante el proceso (algo común en impresora 3D de bajo coste) y no se necesitó la intervención del usuario.

Se testaron dos materiales para el fresado: espuma de poliestireno extruido y espuma de polietileno, ambas de 40 mm de alto. Estos materiales han sido seleccionados por su bajo coste y por que son trabajados fácilmente por la fresadora. Además, ambos materiales han sido tradicionalmente utilizados en el transporte de objetos de museos.

Teniendo en cuenta que la herramienta utilizada medía 60 mm, solo fue necesaria una pasada del eje Z. En el caso de que la herramienta fuera más pequeña que la altura de la espuma, se añadiría una segunda pasada, incrementando el tiempo de fabricación.

El resultado final, mostrado en la figura 6.6, es un soporte/cavidad con la forma del objeto donde se introduce. Esta espuma puede ser colocada dentro de una caja para su uso en transporte o almacenamiento de una pieza.

Con el fin de evaluar empíricamente los resultados del algoritmo para la estimación automática de la posición, se han utilizado un conjunto de objetos con diferentes topologías. Todas las pruebas se han realizado teniendo en cuenta una estrategia

disipe. Todos los elementos poseen una frecuencia de resonancia (medida en hercios), es el punto máximo estiramiento del muelle, su amplitud límite. Si el tiempo de vibración coincide con la frecuencia de resonancia del objeto que sufre la vibración, fatiga el material y produce una rotura.

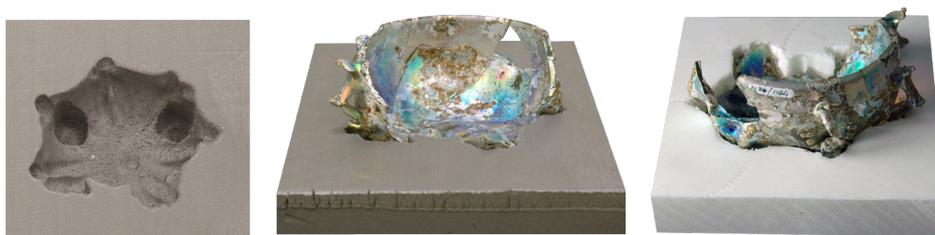


Figura 6.6: Resultado obtenido después de completar el proceso de fresado. La precisión final del embalaje generado es muy alta, y la coincidencia con el objeto original es perfecta, proporcionando un soporte adecuado para el almacenamiento. En el caso de su uso para transportar, se podría fresar la parte superior para encerrar completamente el objeto original. (Izquierda y centro) vista superior y frontal del resultado obtenido en la espuma de poliestireno. (Derecha) resultado obtenido con la espuma de polietileno (*Plastazote* Foam, tipo LD45).

Tabla 6.1: Tiempo de procesado

	Triángulos	Orientación estimada(s)	Modelado embalaje (s)
Cuenco 1	138.818	1,531116	6,49399
Cuenco 2	681.702	5,50679	6,44027
Plato	400.702	3,49614	6,31780

de doble cara para el embalaje, con una distancia entre líneas de 0,2 milímetros y un error de fabricación de 1 milímetro. Con este conjunto de parámetros, pueden obtenerse resultados extremadamente precisos (tal vez demasiados detalles para una fresadora de bajo coste). El tamaño final del paquete se ha calculado de forma automática para proporcionar una holgura constante en ambos lados, y encerrar totalmente el objeto original.

La tabla 6.1 resume el tiempo de ejecución de cada objeto, junto con el número de triángulos de su modelo 3D. Como se puede notar, la complejidad de la malla afecta al tiempo necesario para la estimación de la orientación (*Cuenco 2* es un claro ejemplo de este hecho), mientras que el modelado del embalaje se ve afectado por el tamaño del objeto. Al comparar los tres objetos la variación es mínima.

La figura 6.7 muestra los resultados del algoritmo para orientar automáticamente el objeto. Con el fin de facilitar la lectura de las imágenes, las partes superiores de los embalajes no están representadas. Sin embargo, los resultados mostrados en la Tabla 6.1 incluyen el tiempo empleado para su cálculo.

Se observa cómo las posiciones obtenidas satisfacen los criterios propuestos de maximización de la perpendicularidad y el contacto del área con la cavidad. Además, las orientaciones resultantes de los objetos (inicialmente cargados en una posición

aleatoria) se corresponde con la forma natural de su almacenamiento: la espuma se pone en su base en los casos *Cuenco 1* y *Cuenco 2*, quedando los dos cuencos de pie sobre sus patas. En el caso *Plato*, el objeto queda al revés para facilitar su extracción.

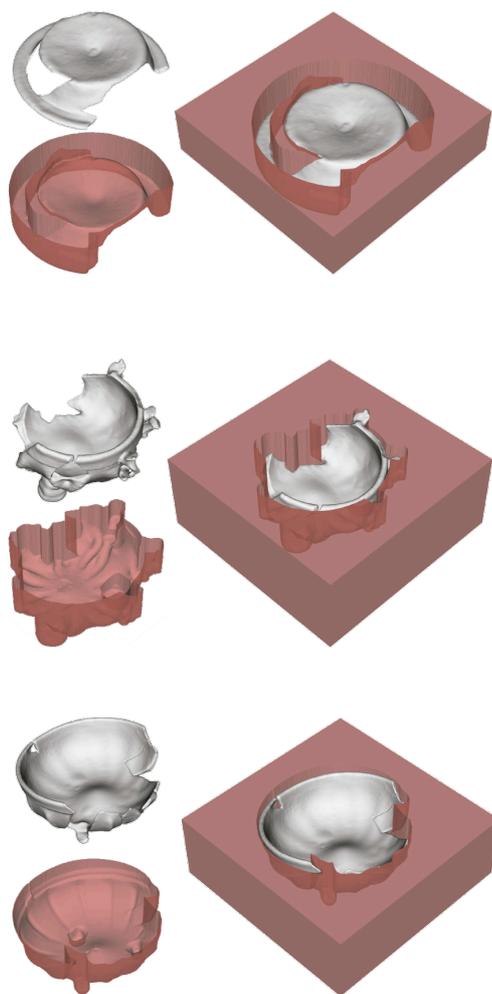


Figura 6.7: Resultado obtenido por el algoritmo automático de estimación de orientación. De arriba a abajo, los objetos son *Plato*, *Cuenco 1* y *Cuenco 2*. Cada objeto se compone de tres imágenes: la imagen superior izquierda muestra el objeto orientado, la imagen inferior izquierda muestra el área de contacto con la espuma y la imagen a la derecha muestra cómo encaja en el embalaje modelado.

Capítulo 7

Metodología para la obtención de los modelos 3D y aplicación de texturas

7.1 La obtención de los modelos virtuales en el patrimonio cultural

El desarrollo de la tecnología 3D y su aplicación en el campo del patrimonio cultural ha proporcionado una herramienta para la preservación de los bienes culturales. Usando esta tecnología se puede obtener un modelo virtual (geometría y textura) de cualquier objeto o construcción. El registro digital del patrimonio permite que los modelos virtuales resultantes puedan utilizarse en tareas de conservación y restauración; y facilitar su difusión sin la necesidad de la presencia del original.

En arqueología se ha extendido la práctica de las restauraciones y reconstrucciones virtuales, términos que se utilizan en la actualidad y que hay que definir. Se considera restauración virtual a "la reordenación, a partir de un modelo virtual, de los restos materiales existentes con objeto de recuperar visualmente lo que existió en algún momento anterior al presente", y por reconstrucción virtual "el intento de recuperación visual, a partir de un modelo virtual, en un momento determinado de una construcción u objeto fabricado por el ser humano en el pasado a partir de las evidencias físicas existentes sobre dicha construcción u objeto..."(IFVA, 2011).

Las fases del proceso para crear un modelo 3D de un objeto existente son: la digitalización de la geometría, texturizado de la superficie para obtener el modelo digital¹ y por último crear un ambiente virtual para hacer accesible el modelo virtual² (Neamtu y Comes, 2016). El proceso de digitalización de un objeto o construcción conlleva la captura de datos, el proceso de alineado, el modelado de la geometría que incluye poligonizar la nube de puntos³, rellenar agujeros, decimar la malla⁴ entre otros procesos para terminar con el mapeado de la textura⁵ (Li *et al.*, 2010).

Las principales técnicas para el registro en 3D son el uso del escáner láser 3D y la fotogrametría. En el caso de la primera técnica, no-invasiva y de coste variable dependiendo del equipo adquirido, el proceso es bastante rápido ya que solo hay que registrar la pieza haciéndola girar de forma manual o con ayuda de una plataforma giratoria y el software que acompaña al escáner combina automáticamente las capturas. Cada registro suele tardar unos segundos. La fotogrametría es una técnica de bajo coste, no-invasiva y basada en la captura de fotografías. El modelo se obtiene a través de la información (geometría y textura) que tienen las imágenes 2D (fotografías) tomadas usando un modelo matemático de colinealidad⁶ que relaciona la geometría de las imágenes y genera el objeto. Para ello hay que rodear el objeto capturando imágenes manteniendo la misma distancia (Cardinale *et al.*, 2013) y combinar las imágenes en un software específico. El proceso a realizar tras la adquisición es el mismo en ambas técnicas y se ha explicado en el apartado anterior.

Otro método utilizado más sencillito y que no tiene coste de equipos para obtener modelos virtuales es el realizado a partir de dibujos bidimensionales del perfil de los objetos. Una vez vectorizados los perfiles se importan a un software, como BlenderTM o 3DS MAX[®], donde se corrige la posición y el ángulo del perfil. A continuación el volumen se genera por revolución de perfil, obteniendo la geometría completa de la pieza como en Martínez Carrillo *et al.* (2010) y Delgado Aguilar

¹Modelo digital: representa una réplica digital del objeto original e incluye los archivos generados durante el proceso que pueden ser procesados según los cambios requeridos (Neamtu y Comes, 2016).

²Modelo virtual: es una forma derivada del modelo digital (donde solo se muestra la forma y la textura del modelo) y a través de la cual se puede mostrar el modelo 3D de una forma interactiva con simulaciones o animaciones (Neamtu y Comes, 2016).

³Poligonizar: el modelo 3D representado por una serie de puntos sin relación entre ellos, se puede procesar para obtener una malla poligonal (formada por triángulos) que resulta más fácil de trabajar (Li *et al.*, 2010).

⁴Decimar la malla: este proceso permite reducir el número de polígonos sin perder la forma de la geometría y agilizar otros procesos (Li *et al.*, 2010).

⁵Texturizar: es un método para añadir colores o textura exteriores aún gráfico generado por ordenador (modelo 3D). El resultado es una imagen de mapa bits que se usa para cubrir la superficie de un objeto tridimensional o bidimensional, con un programa de gráficos especial (Bruno *et al.*, 2010).

⁶Colinealidad: condición geométrica que se cumple cuando en una misma recta coinciden el punto de vista, el punto de imagen y el punto del objeto (Cardinale *et al.*, 2013).

(2010). El inconveniente que presenta es que, por defecto siempre se reproducirá un objeto simétrico y aunque es posible su aplicación en objetos asimétricos el resultado no será real (Solórzano-Venegas *et al.*, 2016). Tras este proceso se pueden modelar elementos exteriores e incluso añadir textura.

7.2 El uso de los modelos 3D en el patrimonio cultural

Los modelos 3D de un objeto o construcción pueden ser utilizados en una amplia gama de aplicaciones.

Se puede crear una base de datos con toda la información del objeto incluyendo modelos 3D, fotos y texto, y pudiendo acceder libremente a detalles del objeto y realizar algunos análisis y medidas. Un ejemplo lo tenemos en el proyecto que se está desarrollando en el Smithsonian Institution para digitalizar en 3D la parte de su colección que no se expone al público. En Smithsonian (2014) se puede consultar el modelo 3D de los objetos que van generando dentro de un espacio virtual donde se pueden explorar a través de una serie de herramientas.

También se puede obtener el dibujo arqueológico que muestra la forma y la estructura de los objetos dejando a un lado el proceso manual como hemos explicado en el apartado 4.3.

Se pueden buscar correspondencias entre fragmentos cuando la cantidad es abrumadora como suele pasar en la restauración arqueológica. Se estudian las zonas de fractura utilizando funciones matemáticas que buscan coincidencias entre ellas (Huang *et al.*, 2006; Velios y Harrison, 2007; Vendrell Vidal y Sánchez Belenguer, 2014; Zheng *et al.*, 2014).

En el caso de las restauraciones se pueden recuperar los fragmentos faltantes y por tanto la forma completa del objeto de modo digital. Las zonas faltantes se pueden generar basándose en la información que se obtiene del original (como hemos demostrado en el apartado 5.3.4) o a partir de fotos e información histórica logrando recrear objetos y construcciones totalmente desaparecidos (Li *et al.*, 2010). Las restauraciones virtuales ofrecen la oportunidad de restaurar la obra si no se quiere intervenir en ella por diversos motivos que impiden una actuación directa en ese momento. En Fowles *et al.* (2003) se decide que la intervención en una escultura de madera de *Buddha* no sea física, sino virtual para recrear su apariencia del pasado sin alterar la actual. De esta forma se pudo eliminar la decoración de la superficie y recuperar los elementos perdidos: la corona, el collar y el peinado. Otro caso similar lo encontramos en Di Paola (2015) donde se realiza el modelado de una figura de San Francisco perteneciente a un escena del Oratorio de San Lorenzo en Palermo. Esta figura desaparecida, se ha recuperado realizando el modelado de la figura a partir de fotografías anteriores al robo. Se ha creado el modelo 3D tanto de la escena como de la figura de San Francisco y se ha realizado la restauración

virtual generando varias hipótesis antes de la impresión 3D para su restauración física.

Además los modelos virtuales pueden utilizarse por los restauradores como herramienta de investigación y análisis, por ejemplo en Callieri *et al.* (2004) se utiliza el modelo 3D del *David* de Miguel Ángel para evaluar la exposición que sufre esta obra a la contaminación y extraer un mayor número de datos.

Las reintegraciones cromáticas también se han visto influenciadas por la introducción de las opciones virtuales. Un primer paso lo encontramos en González-López (2009) donde se pasa del proceso manual al digital pero manteniendo las mismas fases. Se digitaliza la obra, en este caso pinturas murales, y se importa a un programa de dibujo vectorial. Se trabaja por capas delimitando la zona. Primero se le da un tono base, se identifican los colores a utilizar con ayuda de una herramienta del programa y se reintegra según el sistema seleccionado. Por último, se actúa sobre los elementos de la decoración. Ya sobre modelos virtuales, en Siotto *et al.* (2015) se realiza la hipótesis de la reconstrucción del color original de un sarcófago romano. A partir de los análisis de los restos de la policromía se han identificado los pigmentos y obtenido las coordenadas RGB. Se ha llevado a cabo la reintegración en MeshLab utilizando herramientas específicas.

Los modelos 3D de objetos han permitido llevar a cabo las réplicas de piezas con impresoras 3D con la consiguiente difusión del patrimonio y su acercamiento a la sociedad. Obras muy conocidas han sido adquiridas y su modelo 3D es accesible a través de su descarga gratuita como se hizo con el busto de Nefertiti del Neues Museum en Berlín (Al-Badri y Nelles, 2016).

La introducción de las aplicaciones 3D también ha afectado al entorno museístico. Los modelos virtuales dan origen a los museos virtuales (Tucci *et al.*, 2011). A través de la realidad virtual se pueden presentar de dos formas: la primera se muestra una reconstrucción ya existente en el museo donde el usuario puede simular una visita inmersiva para disfrutar de la obra; en el segundo caso se crea un ambiente virtual, que no se corresponden con las estructuras existentes, donde el usuario puede ver y navegar en la reconstrucción de los objetos. Estas instalaciones pueden ser itinerantes (Bruno *et al.*, 2010). También se puede realizar un museo virtual, donde a partir de una base de datos con todos los modelos 3D, se crea un ambiente virtual a través de un portal web recreando habitaciones dinámicas donde se muestran las piezas (Robles-Ortega *et al.*, 2012) o reproducciones de edificios históricos visualizadas a través de videos en el propio museo o a través de modelos interactivos que permiten al visitante organizar su recorrido a través de la página web del museo (Melchor *et al.*, 2016).

Y por último, en el caso de sitios históricos dañados o desaparecidos se pueden recrear de forma virtual con la información que se conserva. También se pueden visualizar la evolución de un objeto o monumento en diferentes periodos de la

historia y crear escenas históricas con ambientes virtuales y humanos virtuales acercando esa realidad al espectador (Carmo y Clá, 2013).

7.3 Desarrollo metodológico para la digitalización de objetos arqueológicos

Para crear el modelo 3D de los objetos seleccionados se ha optado por utilizar dos técnicas de registro con diferente fin. Por una lado, utilizando el escáner láser de triangulación 3D para adquirir la geometría de los objetos y por otro lado la fotogrametría para obtener la textura real de cada pieza. Aunque con la fotogrametría se obtiene tanto la malla como la textura, se ha decidido utilizar el escáner por la alta calidad de la malla resultante gracias al uso del ciclododecano, como se ha explicado en el capítulo 3.

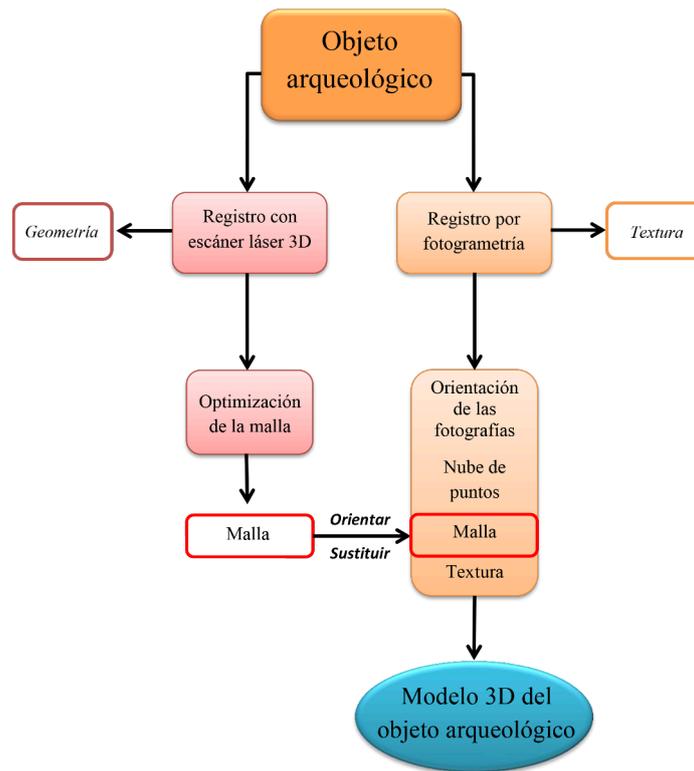


Figura 7.1: Esquema del proceso desarrollado para la obtención del modelo 3D de un objeto arqueológico.

La metodología desarrollada comienza con el proceso de digitalización de la pieza. Para ello, disponemos el escáner 3D conectado a un ordenador y a la plataforma giratoria (Fig 7.2). En primer lugar, se coloca la pieza (en el caso de los objetos de vidrio, con su superficie recubierta con ciclododecano) sobre la plataforma giratoria. Se indica en el programa que controla la plataforma giratoria los grados del giro para el registro. Para un registro completo se invierte la pieza, quedando adquirido el interior y el exterior de la pieza. En cuanto a la fotogrametría en vez de rodear la pieza, se ha optado por utilizar la plataforma giratoria del escáner indicando los grados del giro. La cámara fotográfica va montada sobre un trípode y va variando su posición (0° , 45° , 90°), como queda explicado en el esquema de la figura 7.3, obteniendo imágenes de diferentes grados que recojan toda la pieza. Igual que con la técnica anterior hay que girar la pieza para su completa adquisición. Como esta técnica utiliza, para alinear las fotos, puntos comunes entre ellas, se ha colocado bajo la pieza un damero de alineación⁷ para ayudar en el proceso de adquisición de las piezas de vidrio. El equipamiento utilizado para el proceso de registro ha sido un escáner láser de triangulación 3D Konica Minolta (Tabla 7.1), y una cámara de fotos Nikon D70.

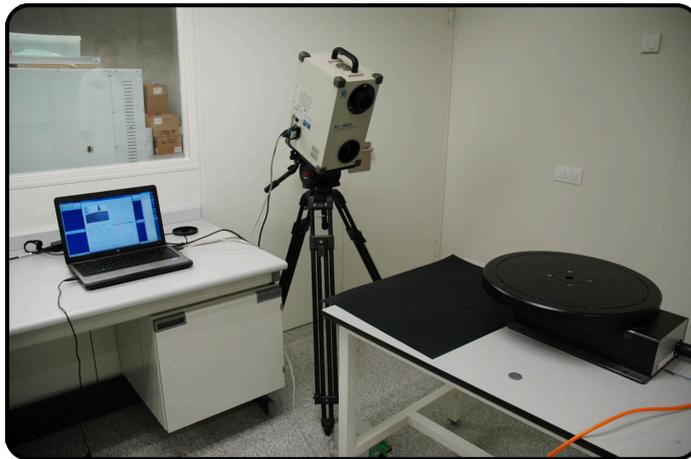


Figura 7.2: Disposición del equipamiento para el escaneado de los objetos.

A continuación, los datos adquiridos con el escáner se procesan en un software específico donde se optimizan las mallas, este proceso se ha explicado en el apartado 5.3.3. Las fotografías tomadas son importadas a un software para procesar las imágenes (Agisoft Photoscan o PhotoModeler), donde se orientan, se genera la nube de puntos, se crea la malla y, por último, se añade la textura creando un mapeado de texturas. En este punto sustituimos la malla obtenida por fotogrametría por la malla ya optimizada del escáner láser. Hay que tener en cuenta que la malla

⁷Lámina compuesta de cuadros blancos y negros.

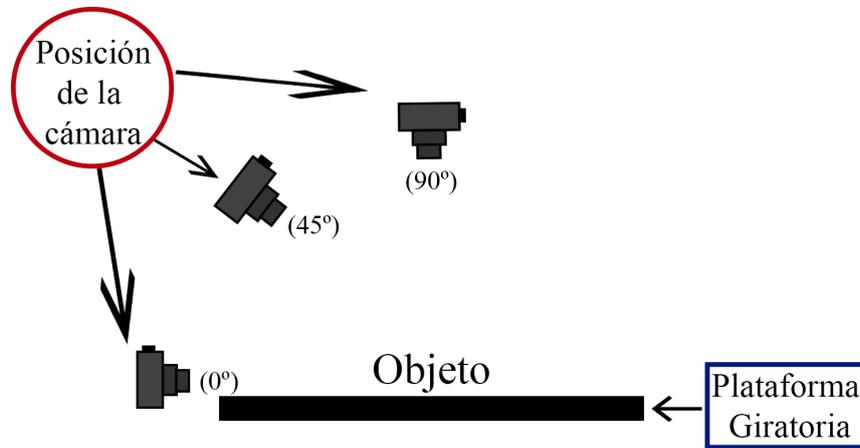


Figura 7.3: Posición de la cámara para el registro fotográfico con fotogrametría.

importada tiene que estar orientada igual que la malla que se va a sustituir si no la textura variará su posición. Este proceso queda simplificado en la figura 7.1. Al exportar el modelo se generan los siguientes archivos: OBJ, JPG o PNG y MTL. Los archivos JPG y PNG contienen la textura en 2D, y se editan en un programa de imagen para retocar los defectos de la textura. Tras este proceso obtenemos el modelo 3D del objeto junto a su textura completada.

En el capítulo 5 se crearon los implantes que reconstruyen las zonas faltantes de los objetos *Cuenca 1*, *Cuenca 2*, *Plato* y *Botella*, que han sido incorporados al modelo 3D texturizado. Como solo tenemos la geometría del implante se ha tenido que crear el mapeado de texturas para indicar como se sitúa la textura en el modelo y para poder hacer la reintegración cromática. Para ello se ha reducido el número de polígonos que forman la malla para extraer el mapeado más fácilmente. Esta operación se puede realizar de forma automática o manual indicando donde se tiene que cortar la textura en programas como ZBrush o Rhinoceros 3D. Generado el mapa de textura en 2D en un archivo PNG o JPG, se importa a un software de procesamiento de imágenes y se reintegra cromáticamente a partir de la tonalidad de la superficie del objeto original.

Tabla 7.1: Especificaciones del escáner Non-contact 3D digitizer VIVID 900/VI900 Konica Minolta

Nombre	Descripción
Peso	Aprox. 11 kg
Dimensiones	213 x 413 x 271 mm
Lente (Distancia focal)	TELE: f=25 mm; MIDDLE: f=14 mm WIDE: f=8 mm
Precisión (plano Z como referencia)	TELE X: ±0.22 mm, Y: ±0.16 mm Z: ±0.19 mm MIDDLE X: ±0.38 mm, Y: ±0.31 mm Z: ±0.35 mm WIDE ±1.40 mm, Y: ±1.04 mm Z: ±0.64 mm
Campo de visión	0.6 a 1.2 m
Entrada de datos (tiempo)	0.3 segundos (Fast mode) 2.5 segundos (Fine mode) 0.5 segundos (Color)

7.3.1 Metodología experimental aplicada al vidrio arqueológico

En el caso particular de los objetos de vidrio, como se ha explicado anteriormente, presentan cierta dificultad respecto a su registro con un escáner láser de triangulación. La solución a este problema ya ha sido presentada con la pulverización sobre la superficie del objeto de ciclododecano en aerosol. En cuanto al registro de este tipo de objetos utilizando la fotogrametría, también suele ser complicado debido a los mismos factores que afectan al escáner láser de triangulación. De todas las piezas solo en la *Lámpara*, que es el objeto con más grado de transparencia en su superficie, no se ha podido realizar el registro de su textura. En cambio en las otras cuatro piezas si se la logrado introduciendo la plataforma giratoria y un damero de alineación.

Cuenco 1

El proceso de adquisición mediante un escáner láser de triangulación de este objeto quedó explicado en el apartado 5.3.2. En la figura 7.4 se pueden ver las mallas antes de la optimización y en la figura 7.5 tenemos el resultado ya optimizado. En cuanto al registro por fotogrametría, la pieza se colocó sobre un damero de alineación en una plataforma giratoria. Se ha programado la plataforma para que realice un giro cada 22,5° hasta completar los 360°, con un total de 16 tomas, donde la primera y la última son iguales. Este proceso se ha realizado cuatro veces colocando la pieza en su posición normal (apoyada sobre sus pies) e invertida, y con la cámara en

una posición de 0° y 45° , teniendo como punto de partida la superficie de apoyo (Fig. 7.7):

- Posición normal y cámara en 0° (Fig 7.6.a).
- Posición invertida y cámara en 0° (Fig 7.6.b).
- Posición normal y cámara en 45° (Fig 7.6.c).
- Posición invertida y cámara en 45° (Fig 7.6.d).

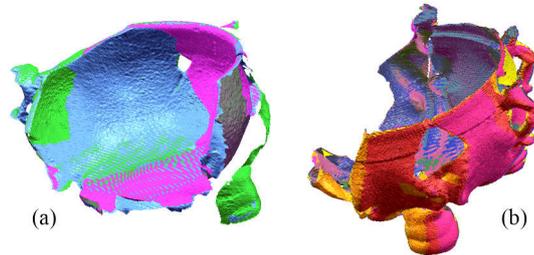


Figura 7.4: Mallas después de la adquisición donde cada color se corresponde con una captura. Imagen antes de la alienación de las diferentes vistas tomadas: (a) interior y (b) exterior (*Cuenco 1*).

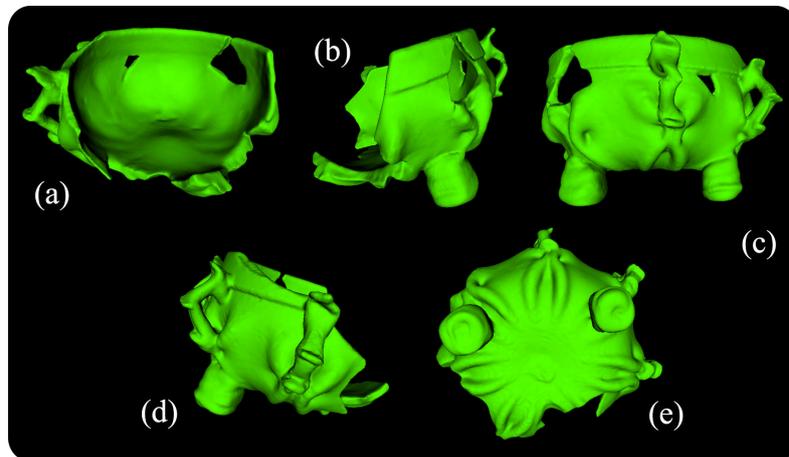


Figura 7.5: Resultado de la optimización de la malla 3D de la pieza *Cuenco 1* desde diferentes vistas: (a) frontal, (b) lateral derecho, (c) posterior, (d) lateral izquierdo, (e) inferior.

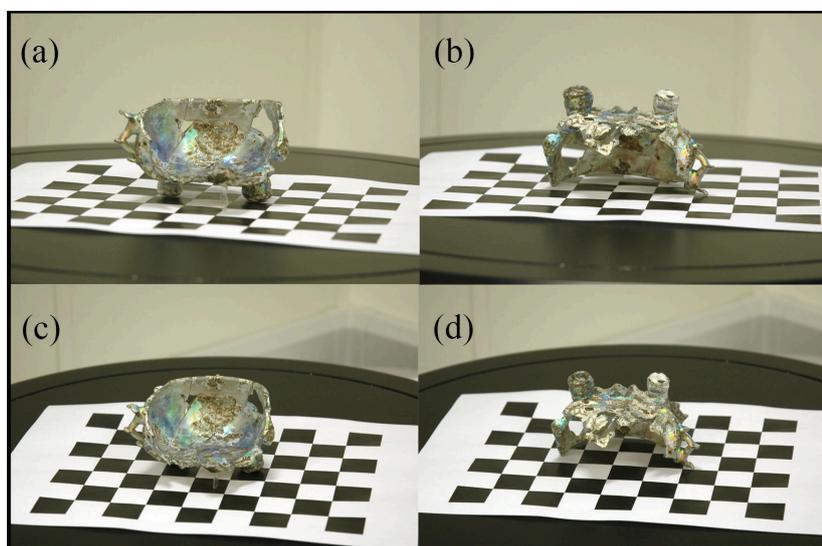


Figura 7.6: Posición de la pieza *Cuenco 1* y de la cámara para su registro fotográfico por fotogrametría: (a) posición normal y a 0° , (b) posición invertida y a 0° , (c) posición normal y a 45° y (d) posición invertida y a 45° .

En la figura 7.7 se puede ver el resultado del modelo 3D de la pieza *Cuenco 1* (geometría y textura) tras el proceso explicado.

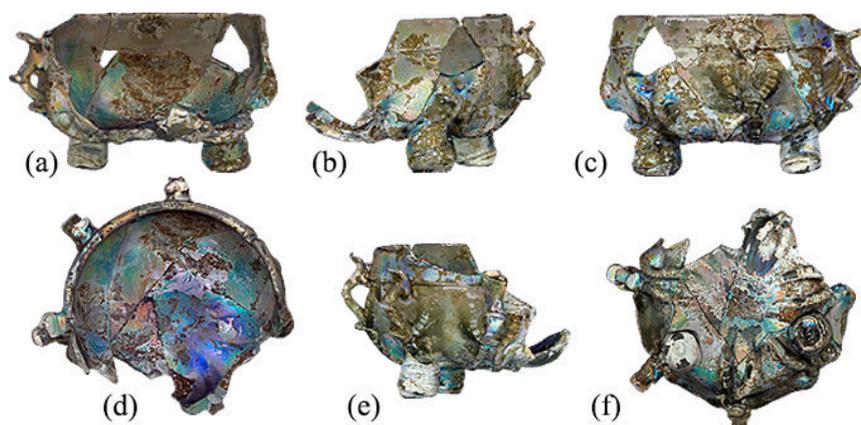


Figura 7.7: Modelo 3D de la pieza *Cuenco 1* desde vistas: (a) frontal, (b) lateral derecho, (c) posterior, (d) superior, (e) lateral izquierdo, (f) inferior.

A continuación, se añadieron al modelo los 2 implantes, que recuperan las zonas perdidas, y que también fueron texturizados (Fig. 7.8).

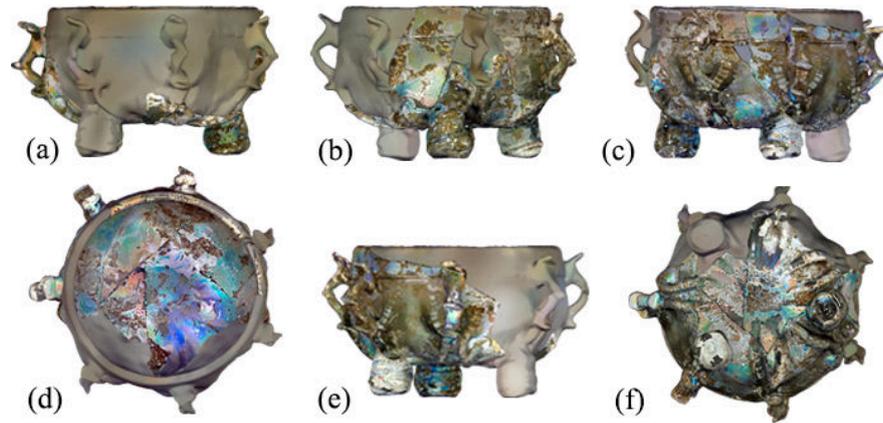


Figura 7.8: Modelo 3D completo (parte original e implantes) de la pieza *Cuenco 1* desde diferentes vistas: (a) frontal, (b) lateral derecho, (c) posterior, (d) superior, (e) lateral izquierdo, (f) inferior.

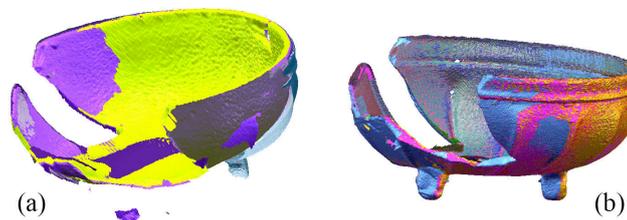


Figura 7.9: Mallas después de la adquisición donde cada color se corresponde con un registro. Imagen antes de la alienación final: (a) interior y (b) exterior (*Cuenco 2*).

Cuenco 2

El registro de este objeto se realizó de la misma manera que en el caso anterior. Se usó el ciclododecano para la adquisición por medio del escáner láser 3D haciendo giros cada 45° . La pieza se colocó en posición normal (sobre sus pies) y en posición invertida haciendo un total de 8 adquisiciones (Fig. 7.9). En la figura 7.10 se puede observar el resultado. En cuanto al registro por fotogrametría, en vez de un damero de alineación completo se utilizaron dos bandas dobles de cuadros negros y blancos rodeando el objeto que dieron mejor resultado. La plataforma también se programó

para realizar giros cada $22,5^\circ$ hasta completar los 360° . Se han realizado un total de 16 tomas donde la primera y la última son iguales. Este proceso se ha ejecutado dos veces:

- Posición normal y la cámara en 45° (Fig. 7.11.a).
- Posición invertida y la cámara en 45° (Fig. 7.11.b).

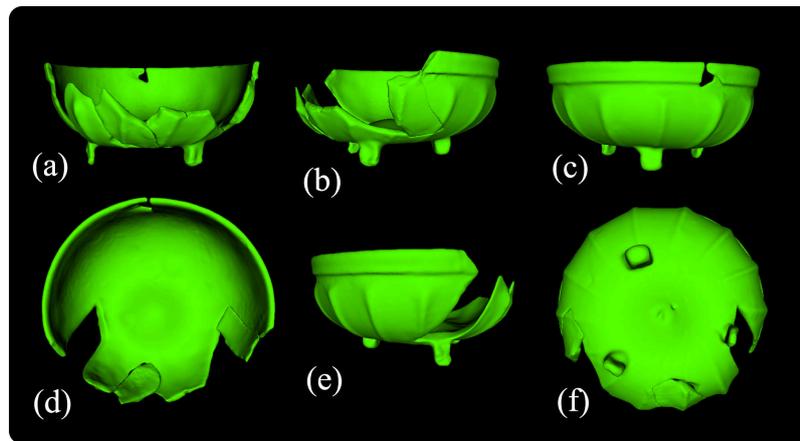


Figura 7.10: Resultado de la optimización de la malla 3D de la pieza *Cuenco 2* desde diferentes vistas: (a) frontal, (b) lateral derecho, (c) posterior, (d) superior, (e) lateral izquierdo, (f) inferior.



Figura 7.11: Posición de la pieza *Cuenco 2* y de la cámara para su registro fotográfico por fotogrametría: (a) posición invertida a 45° y (b) de pie a 45° .

En la figura 7.12 se puede ver el resultado del modelo 3D de la pieza *Cuenco 2* tras el proceso indicado.

En la figura 7.13 podemos ver el resultado final de esta pieza con los implantes texturizados.

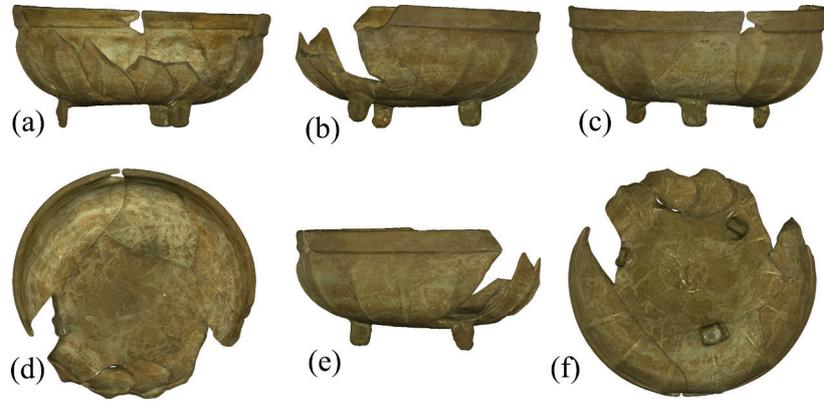


Figura 7.12: Modelo 3D de la pieza *Cuenco 2* desde diferentes vistas: (a) frontal, (b) lateral derecho, (c) posterior, (d) superior, (e) lateral izquierdo, (f) inferior.



Figura 7.13: Modelo 3D completo (parte original e implantes) de la pieza *Cuenco 2* desde diferentes vistas: (a) frontal, (b) lateral derecho, (c) posterior, (d) superior, (e) lateral izquierdo, (f) inferior.

Plato

En este objeto también se hizo uso del ciclododecano en la fase de escaneado. Se colocó sobre la plataforma de giro en posición normal (sobre su base) y en posición invertida realizando tomas cada 45° con un total de 8 capturas (Fig. 7.15). Como en el caso del *Cuenco 2*, en vez de utilizar un damero de alineación completo para la fotogrametría se utilizaron dos bandas de tres tiras de cuadros blancos y negros, cada una a los lados del objeto. Se hicieron giros cada $22,5^\circ$, con un total de 16

tomas para cada posición donde la primera y la última son iguales. Se registró la pieza en tres posiciones:

- Posición normal y cámara a 45° (Fig. 7.16.a.)
- Posición invertida y cámara a 45° (Fig. 7.16.b.)
- Posición en vertical y cámara a 0° (Fig. 7.16.c.)

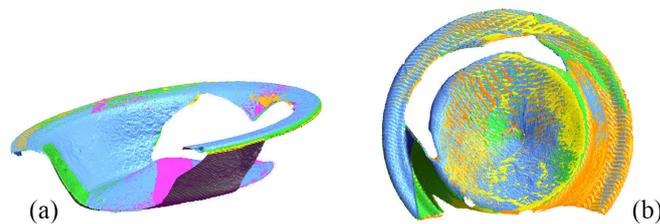


Figura 7.14: Mallas después de la adquisición donde cada color se corresponde con un registro. Imagen antes de la alienación final: (a) interior y (b) exterior (*Plato*).

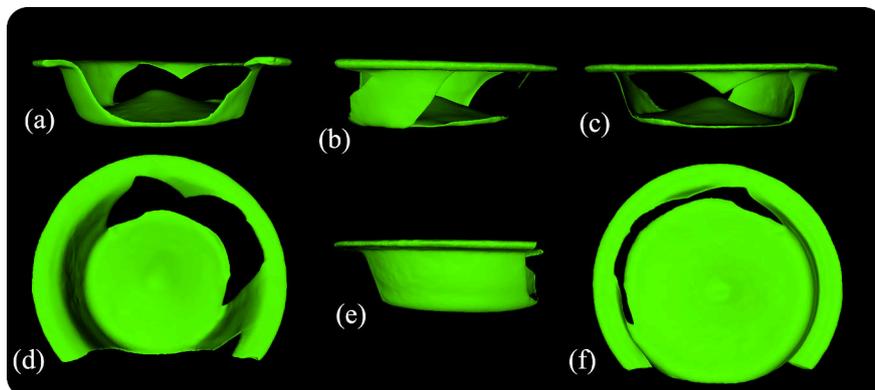


Figura 7.15: Resultado de la optimización de la malla 3D de la pieza *Plato* desde diferentes vistas: (a) frontal, (b) lateral derecho, (c) posterior, (d) superior, (e) lateral izquierdo, (f) inferior.

En las figura 7.17 se muestra el modelo 3D texturizado.

En la figura 7.18 se muestran el modelo 3D final que incluye los implantes texturizados.



Figura 7.16: Posición de la pieza *Plato* y de la cámara para su registro fotográfico por fotogrametría: (a) posición normal a 45° , (b) posición invertida a 45° y (c) posición vertical a 0°

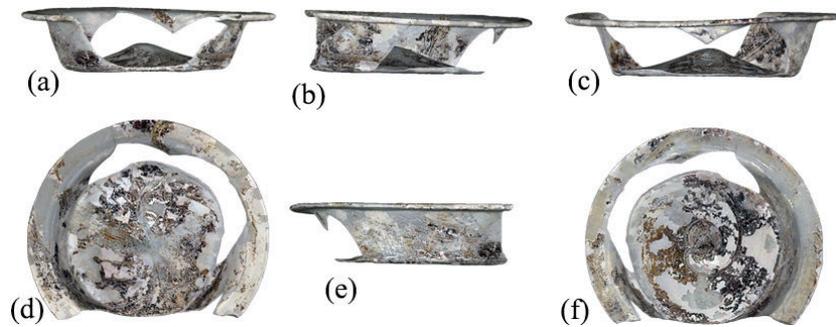


Figura 7.17: Modelo 3D de la pieza *Plato* desde diferentes vistas: (a) frontal, (b) lateral derecho, (c) posterior, (d) superior, (e) lateral izquierdo, (f) inferior.



Figura 7.18: Modelo 3D completo (parte original e implante) de la pieza *Plato* desde diferentes vistas: (a) frontal, (b) lateral derecho, (c) posterior, (d) superior, (e) lateral izquierdo, (f) inferior.

Lámpara

En este objeto se obtuvo la malla poligonal con el escáner láser 3D (con ayuda del ciclododecano) y no se pudo realizar la fotogrametría por que su superficie presenta amplias zonas transparentes. Con la superficie recubierta con el opacificante se colocó sobre la plataforma giratoria haciendo un registro cada 45° (Fig. 7.19). La pieza fue registrada en posición normal (sobre su base), invertida y tumbada. En la figura 7.20 se puede ver el resultado tras el proceso de optimización.

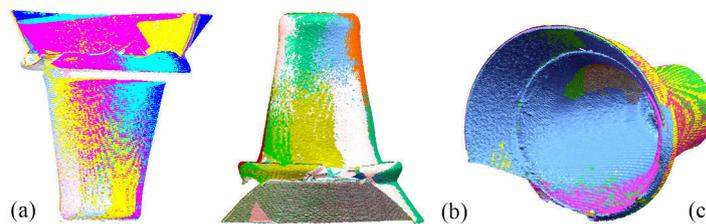


Figura 7.19: Mallas después de la adquisición donde cada color se corresponde con un registro. Imagen antes de la alienación final: (a) posición normal, (b) posición invertida y (c) tumbada (*Lámpara*).

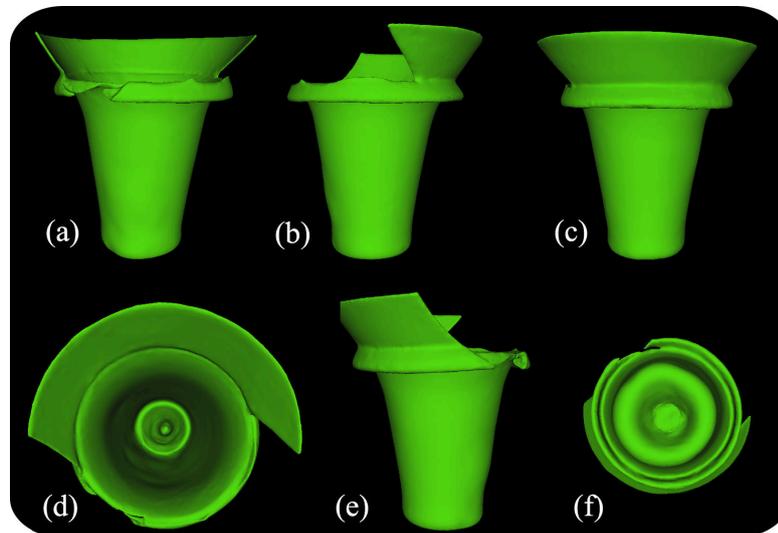


Figura 7.20: Resultado de la optimización de la malla 3D de la pieza *Lámpara* desde diferentes vistas: (a) frontal, (b) lateral derecho, (c) posterior, (d) superior, (e) lateral izquierdo, (f) inferior.

Como no se pudo obtener su textura se ha realizado una recreación hipotética de su estado inicial (antes de su enterramiento y deterioro) que se puede ver en la figura 7.21. El implante de la zona faltante, también ha sido incluido en esta recreación siendo discernible la parte original y la reconstrucción (Fig. 7.22).

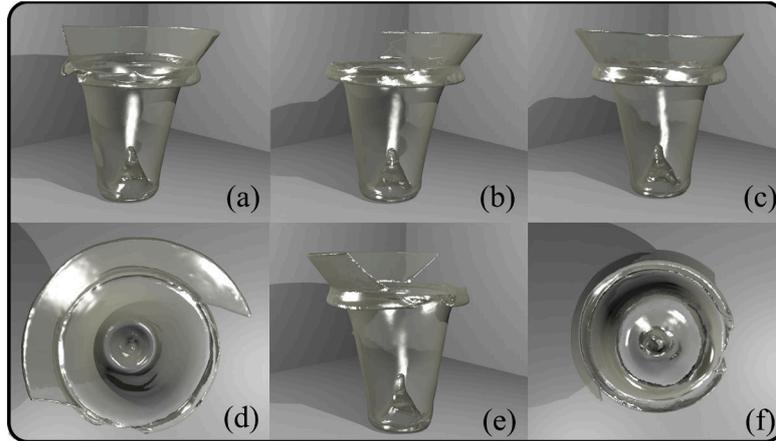


Figura 7.21: Recreación hipotética de la textura de la pieza *Lámpara* desde diferentes vistas: (a) frontal, (b) lateral derecho, (c) posterior, (d) superior, (e) lateral izquierdo, (f) inferior.

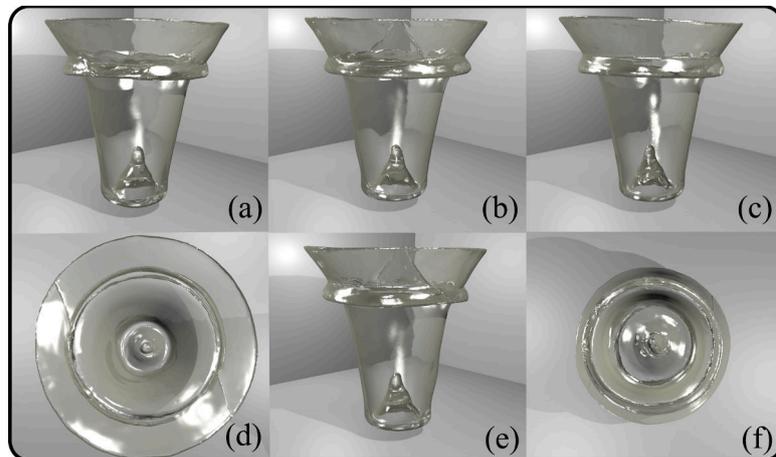


Figura 7.22: Recreación hipotética de la textura de la pieza *Lámpara* y sus implantes desde diferentes vistas: (a) frontal, (b) lateral derecho, (c) posterior, (d) superior, (e) lateral izquierdo, (f) inferior.

Botella

En el caso de este objeto su adquisición por las dos técnicas fue complicada. La forma del objeto (con cuerpo globular) y su estado de conservación (extremadamente delicado) hacia imposible tumbar la pieza para registrar la parte inferior. Para ello se fabricó una cama con dos soportes que sujetaban la pieza a la altura del cuello y a la altura de la base haciendo posible poner la pieza en esa posición. Al adquirir la zona inferior, no se utilizó la plataforma y se fue girando a mano la botella sobre si misma de forma manual. Este sistema se utilizó tanto para el registro con el escáner como con la cámara por fotogrametría. Para la obtención de la malla poligonal no se utilizó el ciclododecano ya que la superficie de este objeto está cubierta completamente por la corrosión que hizo de opacificante. Se capturó todo el objeto de pie con giros de 45° y un total de 8 tomas. Después se colocó el objeto sobre la cama tumbado girándolo de forma manual hasta un total de 16 tomas (Fig. 7.23). En la figura 7.24 se puede ver el resultado final.

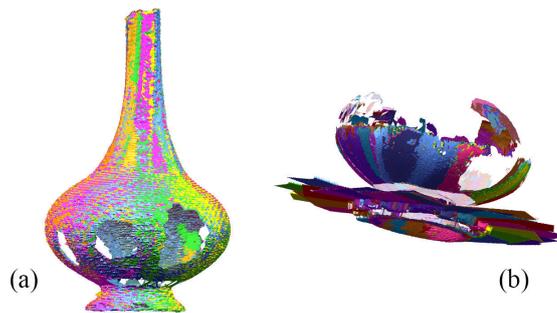


Figura 7.23: Mallas después de la adquisición donde cada color se corresponde con un registro. Imagen antes de la alienación final: (a) perfil completo y (b) parte inferior (*Botella*).

En cuanto a la fotogrametría, se hicieron un total de 18 tomas del objeto en las siguientes posiciones:

- Posición normal (vista general) y la cámara a 0° (Fig. 7.25.a.)
- Posición normal (vista del cuello) y cámara a 0° (Fig. 7.25.b.)
- Posición normal (vista del cuerpo globular) y cámara a 0° (Fig. 7.25.c.)
- Posición normal (vista del pie) y cámara a 0° (Fig. 7.25.d.)
- Posición frontal de la zona inferior del cuerpo globular y cámara a 0° (Fig. 7.25.e.)
- Posición frontal del interior del pie y cámara a 0° (Fig. 7.25.f.)

Se procedió de este modo para que toda la superficie del objeto estuviera enfocada. En cuanto a la parte inferior de cuerpo globular, se colocó la *Botella* sobre la cama y se registró haciendo 11 tomas y la zona interna del pie se registró con 6 tomas. En ambos casos se hizo el giro a mano.

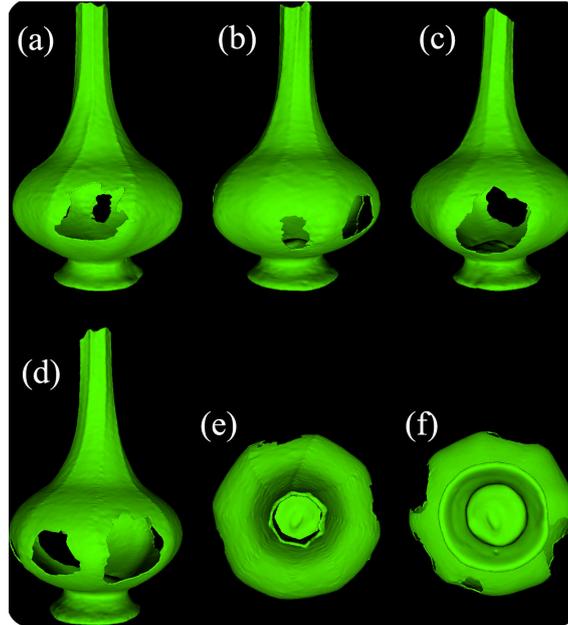


Figura 7.24: Resultado de la optimización de la malla 3D de la pieza *Botella* desde diferentes vistas: (a), (b), (c) y (d) vistas alrededor de la pieza, (e) superior, (f) inferior.

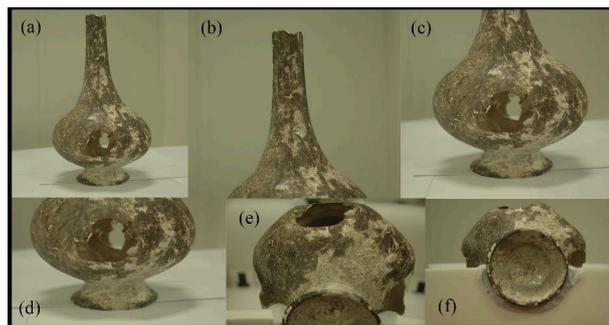


Figura 7.25: Posición de la pieza *Botella* y de la cámara para su registro fotográfico por fotogrametría: (a) Posición normal (sobre su base), (b) cuello, (c) cuerpo globular, (d) pie, (e) zona inferior del cuerpo globular y (f) zona interior del pie, todas desde 0°.

En la figura 7.27 se puede ver el resultado del modelo 3D con las texturas.

En la figura 7.26 se puede ver el modelo 3D final texturizado incluyendo sus implantes, también texturizados.



Figura 7.26: Modelo 3D de la pieza *Botella* desde diferentes vistas: (a), (b), (c), (d) y (e) vistas alrededor der la pieza, (f) superior, (g) inferior.

7.3.2 Metodología experimental aplicada a otros materiales arqueológicos

Las metodologías desarrolladas en la obtención del modelo virtual no son específicas para el vidrio arqueológico y para mostrar los resultados de su aplicación en otro tipo de materiales arqueológicos, se han aplicado en dos objetos arqueológicos procedentes de la colección del Museo de Prehistoria de Valencia: una escultura de terracota (*Crist del Fossar*) y un cráneo de leopardo prehistórico. Se decidió incluir estos modelos para reflejar diferentes problemáticas como en el caso de la escultura por tener faltantes que son imposible de recuperar a partir de la parte conservada y del cráneo por tener zonas inaccesibles durante el escaneado. Además han permitido mostrar casos reales de aplicación de los modelos 3D dentro de una exposición de un museo.

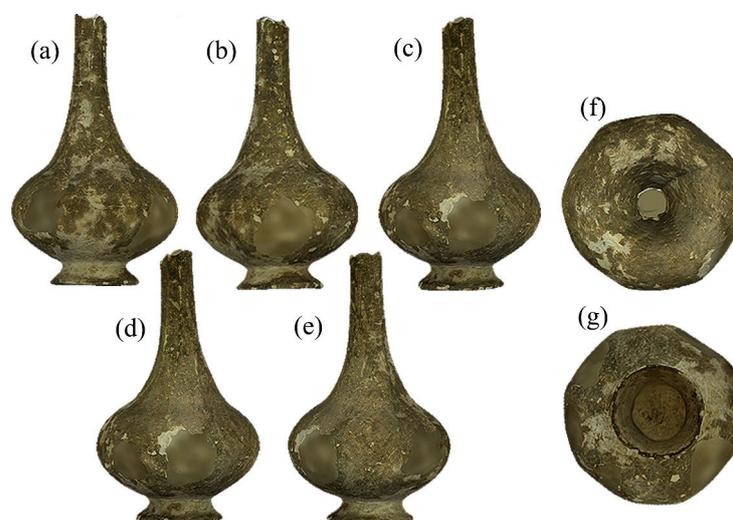


Figura 7.27: Modelo 3D completo (parte original e implante) de la pieza *Botella* desde diferentes vistas: (a), (b), (c), (d) y (e) vistas alrededor der la pieza, (f) superior, (g) inferior.

Terracota

Se ha realizado el registro de una escultura de terracota que representa la figura de un Cristo crucificado. Fue encontrado en una excavación realizada durante el período de 2003-2004 en la Colegiata de Santa María de Gandía (Valencia) en un lugar donde había existido un antiguo cementerio cristiano (Collado, 2009; Bordonado *et al.*, 2015). La escultura presentaba como fragmentos faltantes: los dos brazos y la parte inferior de la pierna derecha (Fig. 7.28).

Para su digitalización se escaneó la pieza tras el proceso de adhesión, pero dejando sin adherir la parte superior (cabeza y torso) y la parte inferior (cadera y piernas) entre si. Se colocó la pieza sobre la plataforma giratoria haciendo un registro cada 45° con un total de 8 tomas del anverso y del reverso. En la figura 7.30 (a-f) se puede ver el resultado final. En cuanto a la fotogrametría se colocó la escultura sobre un damero de alineación en la plataforma y se hizo un registro cada $22,5^\circ$ con un total de 16 tomas para cada posición donde la primera y la última son iguales. Se registró la pieza:

- Parte Superior boca arriba y la cámara a 45° y a 0° (Fig. 7.31.a y b).
- Parte Superior boca abajo y la cámara a 45° y a 0° (Fig. 7.31.c y d).
- Parte Inferior boca arriba y la cámara a 45° y a 0° (Fig. 7.31.e y f).

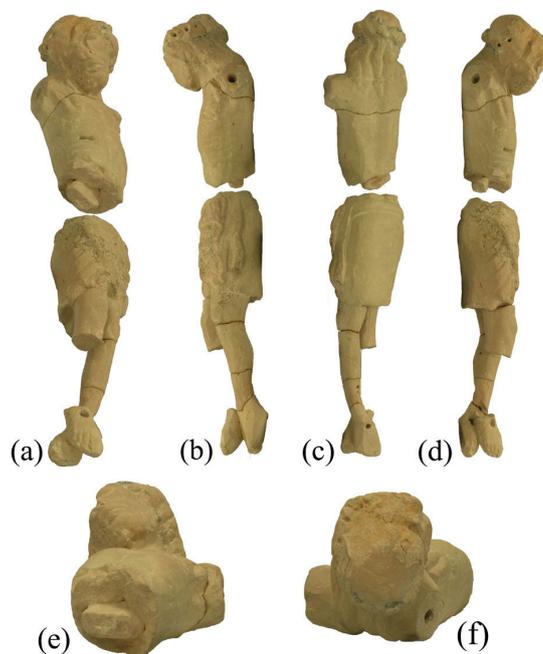


Figura 7.28: Escultura de terracota *Crist del Fossar* desde diferentes vistas: (a) frontal, (b) lateral izquierdo, (c) posterior, (d) lateral derecho, (e) inferior, (f) superior. Imagen del Archivo del Museo de Prehistoria (Valencia).

- Parte Inferior boca abajo y la cámara a 45° y a 0° (Fig. 7.31.g y h).

Tras el registro fotográfico se procesó la textura y se obtuvo el modelo completo (Fig. 7.30.g-l).

Para realizar los fragmentos faltantes de los brazos se han tenido que crear desde cero, ya que no se ha conservado nada de los brazos, en cambio en el faltante las piernas si se conservaba una pierna completa. Por un lado, se han modelado los brazos en el software libre Blender™ que proporciona varias herramientas para el modelado escultórico, y se han añadido al modelo 3D. Para ello, la zona de contacto se ha obtenido utilizando la opción *Boolean* de la pestaña de modificadores. Y por otro lado, se ha duplicado y adaptado la pierna que se ha conservado para añadirla al modelo 3D. El resultado se puede ver en la figura 7.32 (a-f).

A continuación se texturizaron las partes reconstruidas. Para ello se creó un mapa de textura de cada parte y se procedió a reintegrar esas zonas en base al original (Fig. 7.32.g-l).

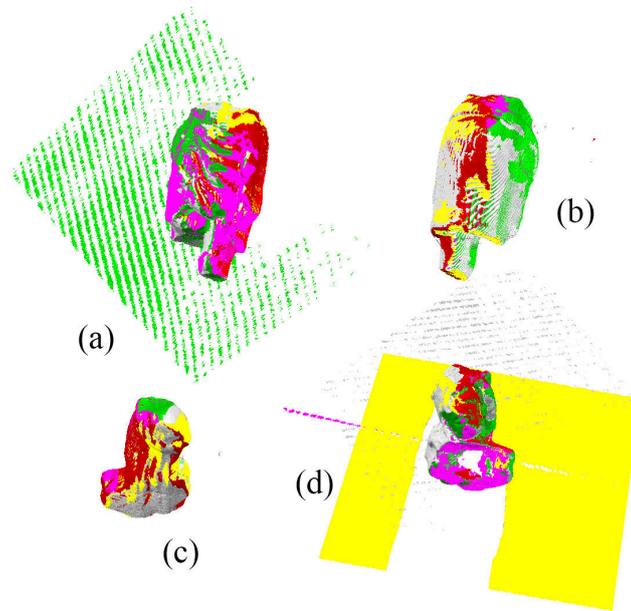


Figura 7.29: Mallas después de la adquisición donde cada color se corresponde con un registro. Imagen antes de la alienación final: (a) anverso parte inferior, (b) reverso parte inferior, (c) reverso parte superior y (d) anverso parte superior (*Crist del Fossar*).

Reconstrucción virtual de la escultura de terracota Crist del Fossar

Se ha desarrollado una solución para la participación de esta escultura en una exposición en el Museo de Prehistoria de Valencia donde los visitantes pueden interactuar con la escultura en un ambiente interactivo a través de la realidad aumentada visualizando las partes de la escultura.

El sistema de visualización consiste en un HMD Oculus Rift DevKit 2 (VR, 2017) que ofrece una resolución de 960 x 1080 píxeles por ojo y un cómodo campo de visión de 100°. La interacción sin contacto se ha logrado utilizando un Leap Motion Controller (Leap Motion, 2017) (Fig. 7.33).

El usuario interactúa con el modelo virtual a través de diferentes gestos intuitivos utilizando las manos. En la figura 7.34 se resumen los cuatro posibles gestos con los que puede interactuar el usuario con el modelo 3D a través de sus manos:

- **Círculo:** Girando el dedo índice se produce un zoom y se puede acercar o alejar el modelo.

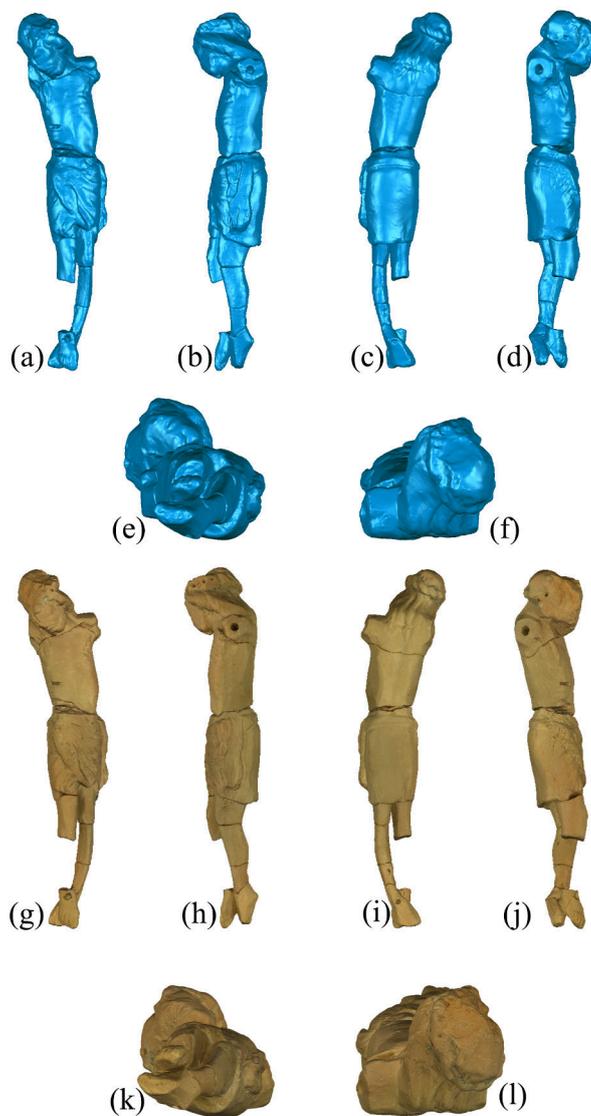


Figura 7.30: (Arriba) modelo 3D (malla) de la escultura de terracota *Crist del Fossar*: (a) frontal, (b) lateral izquierdo, (c) posterior, (d) lateral derecho, (e) inferior, (f) superior. (Abajo) modelo 3D completo (malla y textura) de la escultura de terracota *Crist del Fossar*: (g) frontal, (h) lateral izquierdo, (i) posterior, (j) lateral derecho, (k) inferior, (l) superior.

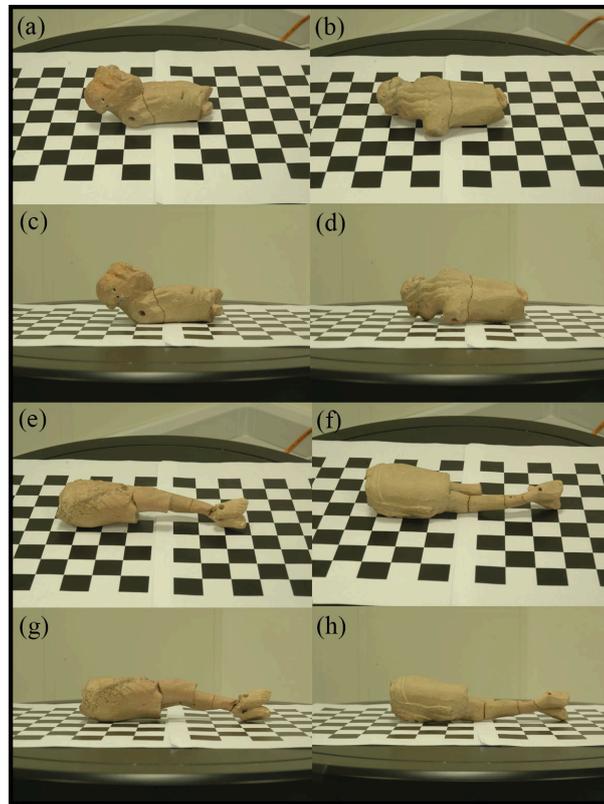


Figura 7.31: Posición de la escultura de terracota *Crist del Fossar* y de la cámara para su registro fotográfico por fotogrametría. Se hizo el registro por separado: (a) parte superior boca arriba a 45° , (b) parte superior boca abajo a 45° , (c) parte superior boca arriba a 0° , (d) la parte superior boca abajo a 0° , (e) parte inferior boca arriba a 45° , (f) parte inferior boca abajo a 45° , (g) parte inferior boca arriba a 0° y (h) boca abajo parte inferior a 0° .

- Movimiento grande: Utilizando la mano desde la derecha a la izquierda o viceversa el modelo gira a la derecha o a la izquierda respectivamente.
- Movimiento pequeño: Realizado con el dedo índice, se separa la parte original de las reconstrucciones, que pasan a tener un color más claro.
- Herramienta: Sujetando una herramienta (como un lápiz) se activa un láser virtual que permite seleccionar individualmente cada parte del modelo cambiando a un color más claro la selección realizada.

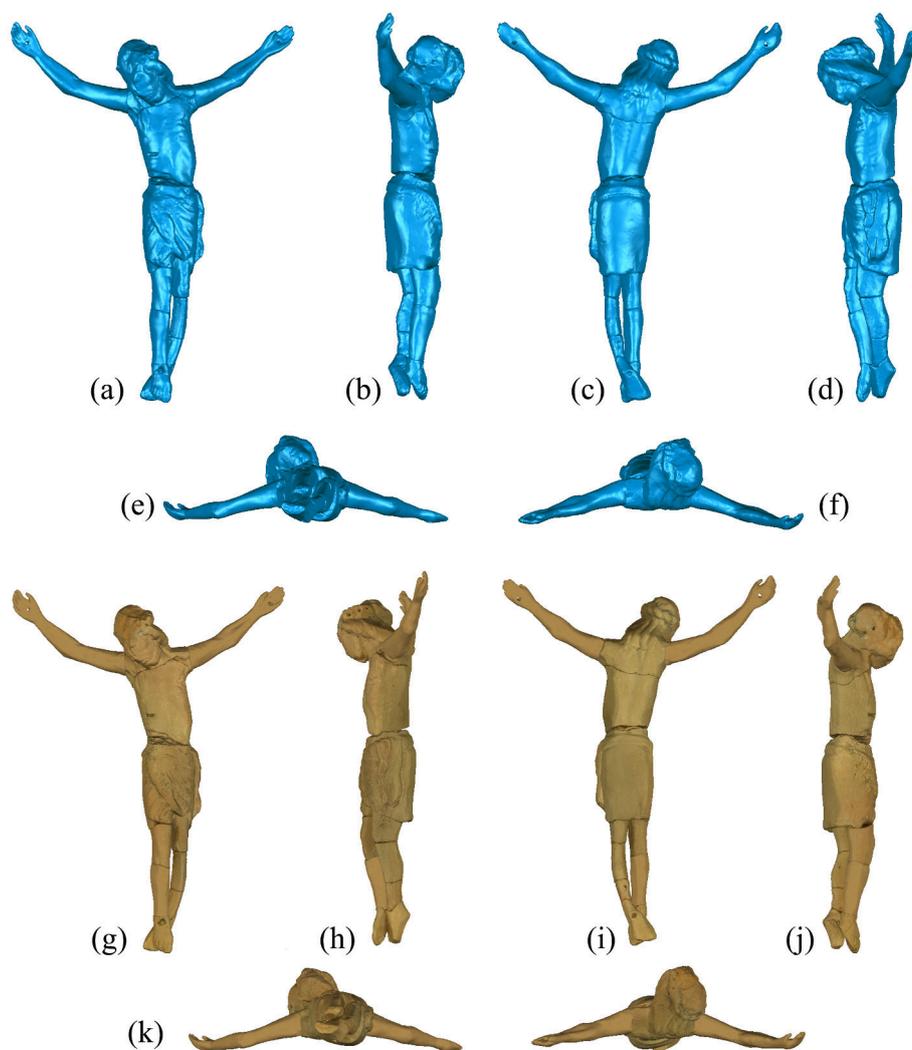


Figura 7.32: (Arriba) modelo 3D con los fragmentos faltantes reconstruidos (malla) de la escultura de terracota *Crist del Fossar*: (a) frontal, (b) lateral izquierdo, (c) posterior, (d) lateral derecho, (e) inferior, (f) superior. (Abajo) modelo virtual de la escultura de terracota *Crist del Fossar* completo: (g) frontal, (h) lateral izquierdo, (i) posterior, (j) lateral derecho, (k) inferior, (l) superior.



Figura 7.33: Usuario llevando el HMD Oculus Rift DK2 e interactuando con el modelo virtual de la escultura de terracota *Crist del Fossar* usando el Leap Motion Controller.

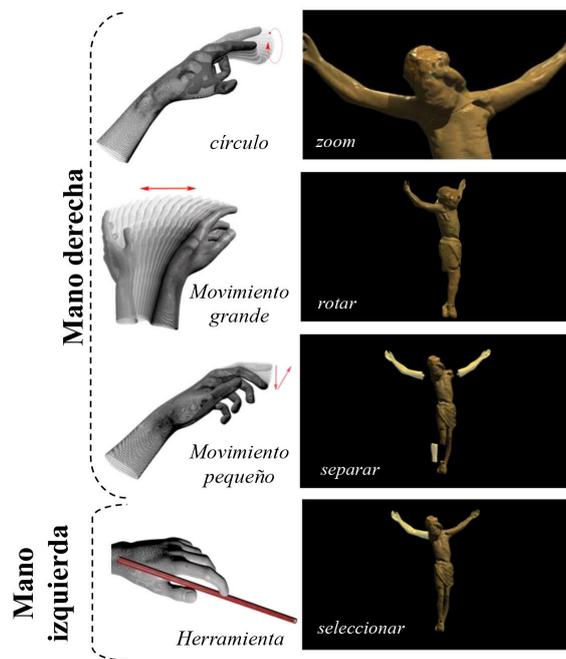


Figura 7.34: Gestos que permiten al usuario interactuar con el modelo virtual de la escultura de terracota *Crist del Fossar*.

Hueso

Se ha realizado el registro de un cráneo de leopardo prehistórico de la Península ibérica (Fig. 7.35). Pertenece a un esqueleto casi completo de 221 elementos, de una hembra de una edad comprendida entre 1,5 y 2 años (Sanchis *et al.*, 2015).

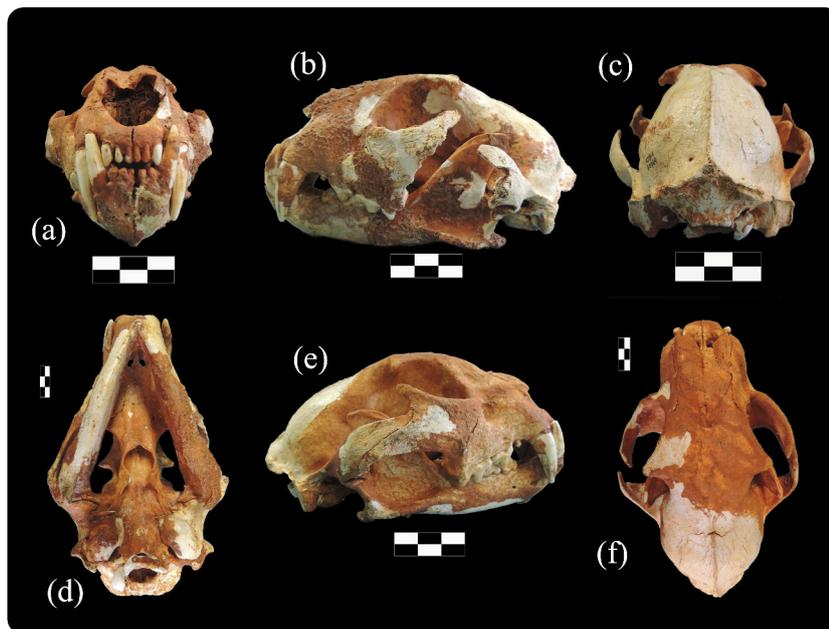


Figura 7.35: Cráneo de un leopardo prehistórico desde diferentes vistas: (a) frontal, (b) lateral derecho, (c) posterior, (d) inferior, (e) lateral izquierdo, (f) superior. Imagen del Archivo del Museo de Prehistoria (Valencia).

La adquisición del cráneo con el escáner de triangulación se realizó con una captura cada 45° con un total de 8 tomas boca arriba y 8 tomas boca abajo (Fig. 7.36). En la figura 7.38 (a-f) se puede ver el resultado de la malla optimizada. La dificultad para obtener el modelo 3D estuvo en modelar la parte interior del cráneo porque el haz del escáner no pudo acceder y por tanto se quedó sin registrar en forma de huecos.

En cuanto a la fotogrametría, el cráneo fue colocado sobre dos daderos de alineación y se registró cada 22,5°C, con un total de 16 tomas donde la primera y la última son iguales. Las posiciones utilizadas fueron:

- Boca arriba y cámara a 0° (Fig. 7.37.a.)
- Boca abajo y cámara a 0° (Fig. 7.37.b.)

- Boca arriba y cámara a 45° (Fig. 7.37.c.)
- Boca abajo y cámara a 45° (Fig. 7.37.d.)
- Boca arriba y cámara a 90° (Fig. 7.37.e.)

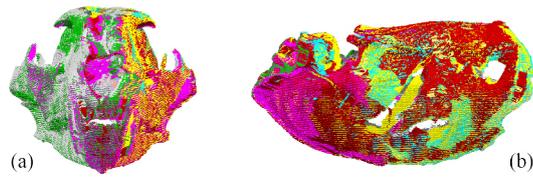


Figura 7.36: Mallas después de la adquisición donde cada color se corresponde con un registro. Imagen antes de la alienación final: (a) frontal exterior y (b) lateral exterior (*Cráneo*).

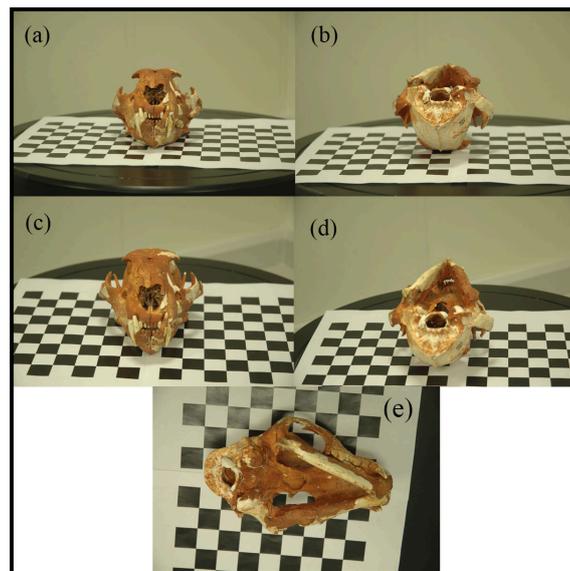


Figura 7.37: Posición del cráneo del leopardo y de la cámara para su registro fotográfico por fotogrametría: (a) boca arriba a 0°, (b) boca abajo a 0°, (c) boca arriba a 45°, (d) boca abajo a 45° y (e) base desde a 90° .

En la figura 7.38 (g-l) se puede ver el resultado del modelo 3D texturiza del cráneo del leopardo.

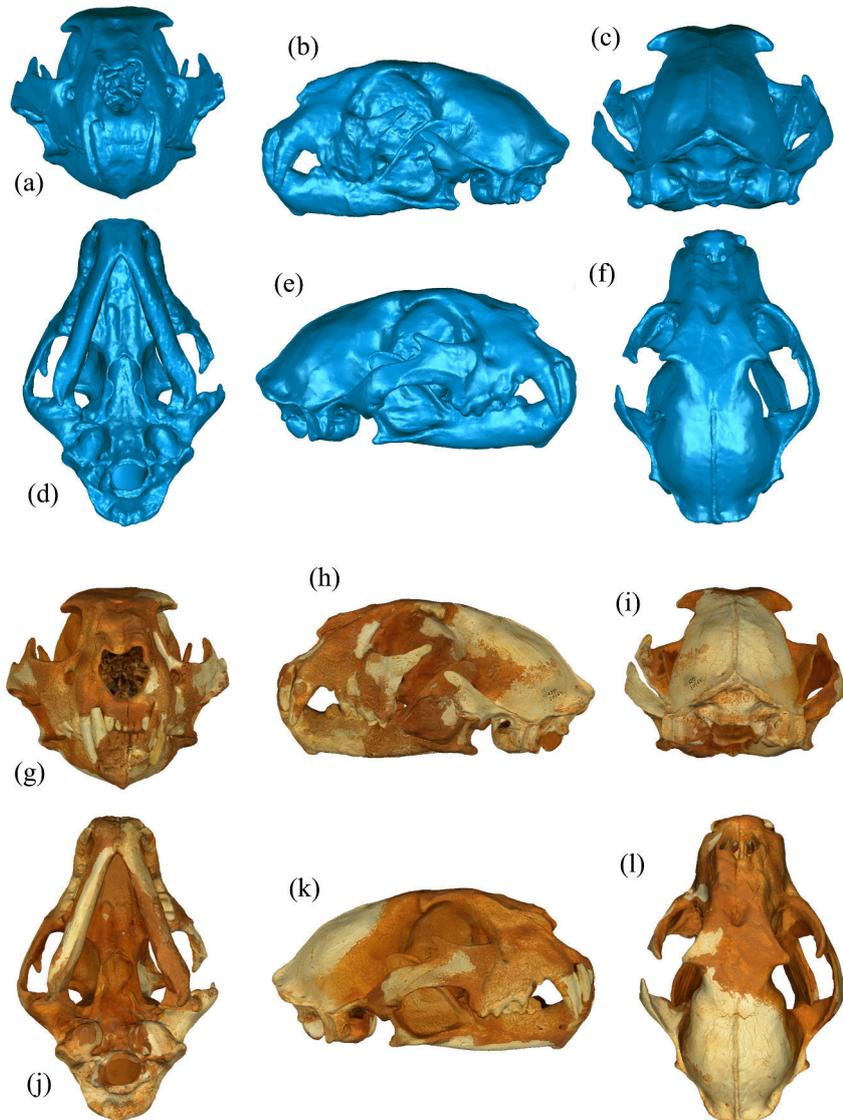


Figura 7.38: (Arriba) modelo 3D (malla) del cráneo de leopardo: (a) frontal, (b) lateral derecho, (c) posterior, (d) inferior, (e) lateral izquierdo, (f) superior. (Abajo) modelo 3D completo (malla y textura) del cráneo de leopardo: (g) frontal, (h) lateral izquierdo, (i) posterior, (j) inferior, (k) lateral derecho, (l) superior.

Visualización en 3D y replicado del cráneo de leopardo del pleistoceno

El modelo 3D del cráneo fue utilizado en la exposición *Un món de feres, Grans carnívors en la prehistòria valenciana* (Sanchis, 2015) realizada para presentar el descubrimiento del esqueleto casi completo del leopardo. Para hacer accesible a los visitantes de la exposición el cráneo del leopardo se creó un ambiente interactivo a través de una pantalla táctil. El usuario puede girar el modelo y presionando sobre los puntos blancos marcados en el modelo, acceder a información sobre el leopardo (Fig. 7.39). Además se colocó una réplica del cráneo realizado por impresión 3D con filamento PLA⁸ en la entrada de la exposición para que los visitantes pudieran manipularla (Fig. 7.40). Finalmente se realizó una réplica en color por impresión por sinterización selectiva láser (SLS de sus siglas en inglés)⁹ que fue texturizada como el cráneo original (Fig. 7.41).

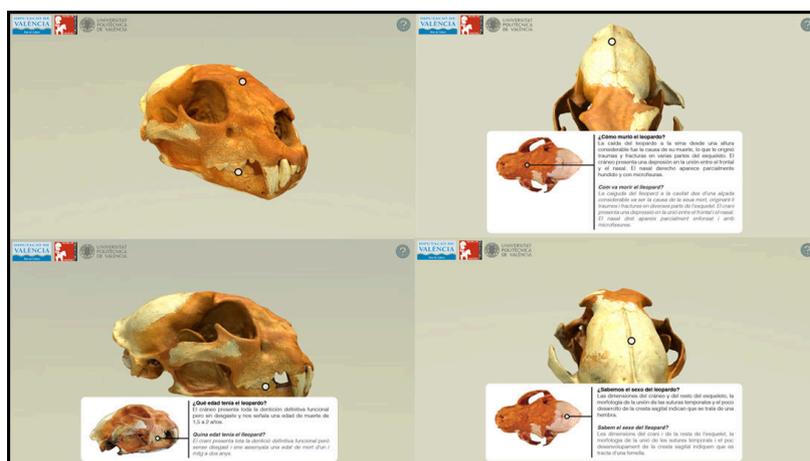


Figura 7.39: Imágenes extraídas de la aplicación de la pantalla táctil. Se puede ver como el cráneo gira y hay puntos blancos que al presionarlos crean una ventana desplegable con información sobre el leopardo.

⁸ Ácido poliláctico o poliácido láctico, es un termoplástico que se obtiene principalmente del maíz y por tanto es biodegradable. Es conocido por su facilidad de impresión y su nula toxicidad. No necesita plataforma caliente y su temperatura de extrusión es entre 190 – 220°C. Por contra, tiene baja resistencia química, térmica y absorbe la humedad (Drumright *et al.*, 2000).

⁹ Sinterización selectiva láser: donde el láser impacta en el polvo, fundiendo el material que se solidifica (sinterizado). Todo el material que no se sinteriza funciona como soporte para la pieza y tras retirarla se puede reutilizar (Advanced Manufacturing, 2016).



Figura 7.40: Réplica del cráneo impresa en PLA para ser manipulada por los visitantes a la exposición desde diferentes vistas: (a) perfil izquierdo, (b) perfil derecho, (c) frontal.

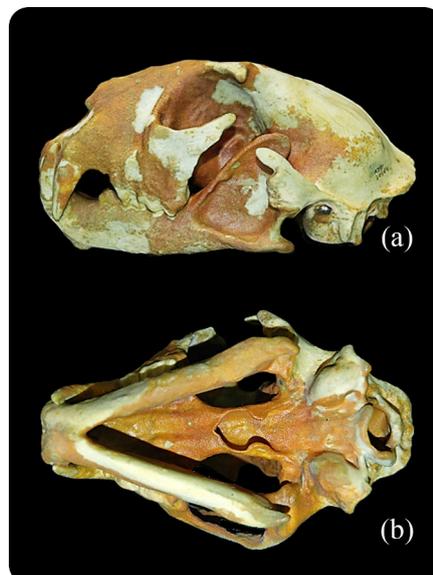
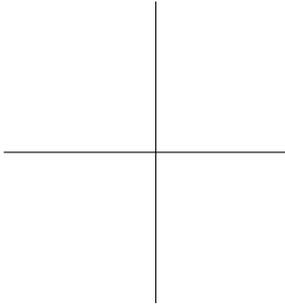
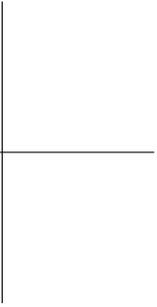


Figura 7.41: Réplica del cráneo impresa por SLS desde diferentes vistas: (a) perfil izquierdo, (b) base.

7.4 Resultados y discusión

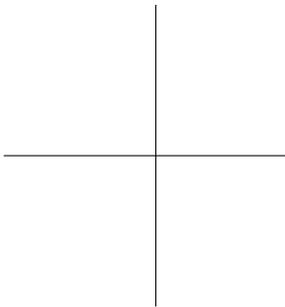
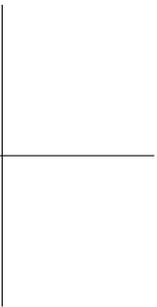
Con la metodología desarrollada en la digitalización y obtención de los modelos 3D texturizados se han podido obtener los modelos de los objetos de vidrio del *Cuenco 1*, *Cuenco 2*, *Plato* y *Botella*, además se le han añadido los implantes de las zonas faltantes texturizados con una reintegración cromática basada en la textura superficial del objeto original. Un caso especial ha sido el objeto *Lámpara*, se ha realizado su digitalización pero no el texturizado debido a una de sus características: su transparencia que, como pasa con el escáner láser de triangulación, aparece un error y no realiza la orientación de las fotos. En cambio si se ha conseguido realizar el modelo 3D de la geometría y de los implantes. Para su visualización se ha realizado una recreación hipotética con un acabado de la superficie para que se asemeje al vidrio nuevo, con la reconstrucción de la zona faltante discernible de la parte original.

Por otro lado, se ha aplicado la misma metodología a objetos arqueológicos de diferente material, una escultura de terracota (*Crist del Fossar*) y un cráneo de un leopardo prehistórico. Como resultado, en el caso de la escultura se ha obtenido el modelo 3D texturizado de la parte original y de los implantes, que han tenido que ser modelados desde cero. En el caso del cráneo se ha realizado el modelo 3D texturizado reconstruyendo la zona interior ya que el haz del escáner no podía llegar a esta zona impidiendo su registro. Ambos modelos 3D van destinados a su utilización en una exposición junto a las piezas originales. En cuanto a la escultura de terracota, la exposición aún no se ha realizado pero se está viendo la posibilidad de presentar la restauración virtual a través de la realidad aumentada donde el visitante podría interactuar con la escultura manipulándola en un ambiente virtual. La exposición del esqueleto del leopardo ya fue realizada y se preparó una aplicación para que los visitantes pudieran visualizar de cerca el cráneo del leopardo a través de una pantalla táctil y además obtener información sobre el leopardo. Además se realizó una réplica del cráneo por impresión 3D en PLA para ser manipuladas por los visitantes.



Parte II

Caracterización de los
materiales que intervienen en
las reconstrucciones
volumétricas



Capítulo 8

Ensayos de los materiales que intervienen en la fase de reconstrucción

8.1 Materiales

8.1.1 Filamento

Como se ha explicado anteriormente, denominamos filamento al material plástico que utilizan las impresoras 3D que funcionan por deposición de fundente. Para este estudio se ha seleccionado el filamento ABS, es decir, acrilonitrilo butadieno estireno. Se trata de uno de los materiales más comúnmente utilizados por las impresoras 3D de adición que trabajan con el sistema de extrusión. Además el ABS puede fácilmente ser extruido, inyectado, prensado o soplado.

Este copolímero fue comercializado en 1948. Reúne las propiedades de los tres monómeros que lo forman (Shashoua, 2012): tiene cierta resistencia química y térmica (acrilonitrilo), ductilidad y resistencia frente al impacto (butadieno) y una superficie brillante (estireno).

En general, la mayoría de polímeros sintéticos tienden a degradarse a causa de la interacción con agentes atmosféricos (San Andrés *et al.*, 2010) ya que se originan procesos de oxidación, termo-oxidación o foto-oxidación cuyo efecto visual es el amarilleamiento del material provocado por la formación de grupos cromóforos

como los grupos carbonilo (C=O), que dan lugar a la pérdida de sus propiedades iniciales. Esta fotodegradación es uno de los procesos asociados al deterioro de los polímeros y se puede valorar a través de los ensayos de envejecimiento acelerado.

La fotodegradación del ABS tras su exposición a la radiación ultravioleta (UV) es bien conocida, principalmente por la presencia del butadieno que inicia la degradación y se extiende a los demás componentes (Davis *et al.*, 2004). Para evitar los efectos de la degradación se ha llevado a cabo estudios para la introducción de una serie de estabilizadores (Santos *et al.*, 2013) testándolos en ambientes de exterior (Santos, et al., 2013b) para evaluar su eficacia y la durabilidad del material.

El ABS es uno de los materiales más conocidos en la impresión 3D. Tiene un punto de fusión entre los 200°C y lo 250°C, soporta temperaturas mínimas de hasta -20°C y máximas de 80°C. Se imprime utilizando la impresión 3D por deposición de fundente y requiere una bandeja térmica que permanezca caliente entre los 90° y 105°C (Berchon y Luyt, 2016).

El ABS es destacable por sus propiedades de resistencia mecánica frente al impacto y resistencia química. También por su estabilidad dimensional frente a los cambios de temperatura que permite emplearlo en cavidades de poca tolerancia dimensional, además su baja capacidad de absorción contribuye notoriamente a esa estabilidad y posee una gran facilidad para el procesado. Se trata de un material ligero y liviano (Bryce, 1997). Su superficie puede ser modificada mediante abrasión o pulido con baño o vapor de acetona, permitiendo un acabado liso y brillante, además de disminuir la porosidad de la capa más superficial de la pieza. Aunque su toxicidad es nula, si emite volátiles que pueden ser perjudiciales cuando se imprime el material (Azimi *et al.*, 2016).

Del mismo modo posee una conductividad térmica baja y se altera frente a la exposición de una fuente de calor directa, como la llama. Por lo general, presenta un óptimo comportamiento frente al envejecimiento natural y buena resistencia frente a los agentes atmosféricos; no obstante, la exposición prolongada de este polímero al sol, puede provocar la formación de una fina capa quebradiza que reduce la resistencia a la flexión, el brillo del material y su coloración. Presenta una cierta impermeabilidad que favorece que la resina ABS no se vea afectada por el agua, sales inorgánicas, álcalis y por muchos ácidos, lo que lo hace resistente a ciertos agentes de corrosión que comúnmente afectan a la mayoría de los plásticos. Por contra es ligeramente permeable al vapor y soluble en ésteres, aldehídos, en algunos hidrocarburos clorados y en acetona, ésta última empleada como disolvente del material en la mejora de su acabado superficial (Shashoua, 2012).

Para este estudio se han seleccionado dos marcas de filamento ABS (*UP! 3D Printer* y *3D Ink Filaments*), para probar dos tonalidades (Fig. 8.1): blanco (*White*) de la marca *UP! 3D Printer* y translúcido (*Clear*) de *3D Ink Filaments*, ambos de 1,75 mm de diámetro. La selección de tonalidades se hizo en base al más utilizado

(blanco) y al que más se acercaba a la apariencia del vidrio (translúcido). Se utilizó la misma impresora 3D *UP! Mini* para imprimir ambos filamentos.

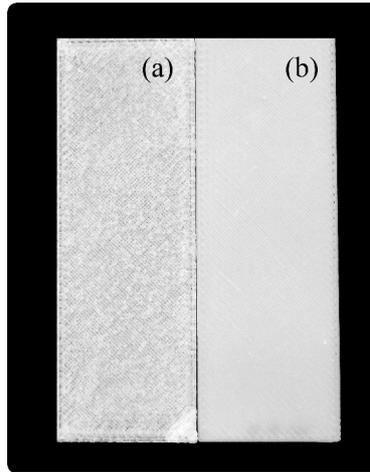


Figura 8.1: Resultado de la impresión de los filamentos: (a) filamento translúcido (*Clear*) y (b) filamento blanco (*White*).

8.1.2 Recubrimiento de pintura

Como material pictórico para el recubrimiento de la superficie del filamento impreso se ha elegido una pintura acrílica soluble en agua evitando así la gama que contiene disolventes. Se ha seleccionado la marca Americana® por su amplia gama de colores, y se han escogido siete tonos (Fig. 8.2), en base tanto a las tonalidades de los objetos *Cuenco 1*, *Cuenco 2* y *Plato* y como a la reintegración cromática realizada por simulación virtual (Capítulo 7).

1. Cocoa DA259
2. Black Forest Green DA083
3. Sapphire DA099
4. Citron Green DA235
5. Light Cinnamon DA114
6. Terra Cotta DA062
7. Mustard Seed DA264



Figura 8.2: Pigmentos utilizados en el ensayo, de izquierda a derecha: Cocoa DA259, Black Forest Green DA083, Sapphire DA099, Citron Green DA235, Light Cinnamon DA114, Terra Cotta DA062 y Mustard Seed DA264.



Figura 8.3: *Medium* y barniz utilizados en el ensayo, de izquierda a derecha: Adhesion Medium DS39, Easy Float DS20 y Gloss Varnish DS19.

También dos *medium*, uno para mejorar la adhesión de la capa pictórica y otro para conseguir una capa de mayor transparencia (Fig 8.3):

- Adhesion Medium DS39 (*medium adhesión*)
- Easy Float DS20 (*medium transparencia*)

Y por último un barniz con brillo para recrear las superficies brillantes del vidrio en los implantes:

- Gloss Varnish DS19

8.1.3 Adhesivo

Se considera un adhesivo una sustancia que se aplica en estado líquido o viscoso sobre dos superficies y las mantiene unidas. En conservación y restauración, los restauradores formulan ellos mismos los adhesivos que van a utilizar con materiales que han sido testados para su contacto con obras patrimoniales. Los adhesivos de uso más generalizado están compuestos por una resina y un disolvente.

Las resinas ¹ que han sido seleccionadas para este estudio son:

- Vinavil K60©: acetato de polivinilo. Resina termoplástica a base de homopolímeros de acetato de polivinilo. El acetato de polivinilo o PVA es una resina que resulta de la polimerización del monómero vinilacetato o acetato de vinilo (VAc). Su temperatura de transición vítrea (Tg de sus siglas en inglés) es de 20° - 30°C. En estado puro es soluble en disolventes orgánicos como el alcohol o la acetona y en hidrocarburos clorados. Aunque su presentación más habitual es en forma de emulsión acuosa, también se puede presentar como sólido en forma de perlas. Son resinas relativamente rígidas y duras que necesitan la incorporación de un plastificante para que la resina se ablande. El pH de este tipo de resina comprende el rango de 3 a 5 unidades. Pueden emitir pequeñas cantidades de gases de ácido acético, que reaccionan con materiales sensibles a los ácidos. Densidad: 1,2 g/cm³.
- Mowital B30H©: nombre comercial de una resina vinílica² de una gama de resinas de butiral-polivinilo. Las variedades que encontramos bajo la denominación de Mowital se deben a las diferencias de sus grados de polimerización. Este grupo de resinas muestran una buena compatibilidad con plastificantes y otras resinas. Son solubles en una amplia variedad de disolventes orgánicos. Este producto tiene un contenido en acetato de polivinilo de 83 %, en alcohol de polivinilo de 12-16 % y una viscosidad (solución al 10 % en Etanol) de 120-280 mPa·s. Se presenta en forma de polvo blanco. Su Tg es de 63°C.
- Paraloid B-44™: nombre comercial de una resina acrílica³. Es un copolímero acrílico a base de metilmetacrilato (MMA de sus siglas en inglés) en más de un 50 % y de un monómero no declarado. Su Tg es de 60°C. Se presenta en forma de resina sólida que es soluble en tolueno, sileno, algunos ésteres, acetona y metil etil cetona. Proporciona una excelente combinación de dureza, flexibilidad y adhesión a diversos sustratos. Densidad: 0,66 g/cm³.

¹Información extraída del Diccionario técnico de Akal de Materiales de restauración (Muñoz *et al.*, 2014) y de las fichas técnicas de cada producto (CTS, 2017b).

²Resina vinílica: son compuesto elaborados con vinilo. Se considera un grupo funcional, donde un grupo de átomos enlazados de una misma manera pasan a formar parte de una molécula más grande (Muñoz *et al.*, 2014, pág. 275).

³Resina acrílica: polímero orgánico sintético obtenido de la polimerización de derivados del ácido acrílico (Muñoz *et al.*, 2014pág. 269.)

- Paraloid B-72™: nombre comercial de una resina acrílica compuesta por un copolímero orgánico sintético a base de acrilato de metilo y de metacrilato de etilo. Su Tg es de 40°C. Se presenta como resina sólida en forma de granulado translúcido ligeramente soluble en disolventes del tipo de cetonas, ésteres, éteres, hidrocarburos aromáticos e hidrocarburos clorados. Es insoluble en agua y bajo grado de solubilidad en alcohol etílico e hidrocarburos alifáticos. Densidad: 0,66 g/cm³.
- Evalcite 2044©: nombre comercial de una resina acrílica compuesta por polímeros o copolímeros de metacrilato de metilo y de otros monómeros acrílicos. Su Tg es de 15°C y por lo tanto se muestra mucho más flexible y elástica que otras resinas, aunque puede aparecer inconvenientes de deposición de polvo y suciedad. Se presenta en forma de pequeñas esferas. Es soluble en disolventes como etanol, acetona, etil acetato y algunos hidrocarburos aromáticos. Crea una película transparente, flexible, de elevada resistencia a los rayos UV y a los agentes atmosféricos. Densidad: 1,062 g/cm³.

Los disolventes seleccionados⁴ para diluir con las resinas anteriores son:

- Alcohol etílico (CH_3CH_2OH): alcohol derivado del etanol. Es transparente, muy inflamable y miscible en agua, acetona y otros disolventes. Presenta una moderada polaridad y baja toxicidad.
- Acetona (C_3H_6O): es un líquido transparente de olor característico. Tiene una alta polaridad que favorece su miscibilidad con el agua, etanol y otros productos apolares. Evapora con rapidez, tiene baja toxicidad y es muy inflamable.
- Dowanold PM: disolvente a base de éter glicólico. Está formado por 98 % 1-Metoxi-2-propanol y un 2 % de 2-Metoxi-1-propanol. Es un líquido transparente e incoloro que puede mezclarse con el agua. Es un disolvente de baja toxicidad.
- Etil acetato ($C_4H_8O_2$): es un éster a partir de acetaldehído o por destilación lenta de una mezcla de ácido acético, alcohol etílico y ácido sulfúrico. Se presenta como un líquido transparente y con un olor afrutado. Se clasifica como un disolvente moderadamente tóxico y muy inflamable.
- Butil acetato ($C_6H_{12}O_2$): es un éster que se obtiene por la condensación del ácido acético y el alcohol butílico en presencia de un catalizador. Se presenta como un líquido transparente y con un olor afrutado. Se clasifica como un disolvente moderadamente tóxico y muy inflamable.

⁴Información extraída del Diccionario técnico Akal de Materiales de restauración (Muñoz *et al.*, 2014) y de las fichas técnicas de cada producto (CTS, 2017a).

Tabla 8.1: Mezclas resultantes entre las resinas y los disolventes seleccionados, junto al porcentaje de resina utilizado.

Disolvente	Resina	Porcentaje
Alcohol etílico	K60	20 %
Alcohol etílico	Mowital	20 %
Acetona	Paraloid B-72	25 %
Acetona	Paraloid B-44	25 %
Acetona	Evalcite	25 %
Dowanold PM	Paraloid B-72	25 %
Dowanold PM	Paraloid B-44	25 %
Dowanold PM	Evalcite	25 %
Etil acetato	Paraloid B-72	25 %
Etil acetato	Paraloid B-44	25 %
Etil acetato	Evalcite	25 %
Butil acetato	Paraloid B-72	25 %
Butil acetato	Paraloid B-44	25 %
Butil acetato	Evalcite	25 %
Fluoline A	-	-

Por último, se ha añadido un adhesivo comercial, Fluoline A, compuesto por fluor-elastómeros y polímeros acrílicos en acetona. Se presenta como un líquido transparente.

En la tabla 8.1 se muestran los diferentes adhesivos obtenidos de las mezclas entre las resinas y los disolventes con las proporciones utilizadas.

8.2 Ensayo 1. Envejecimiento artificial por radiación ultravioleta

En conservación y restauración es muy común evaluar anticipadamente las características de los materiales que van a ser incorporados a los objetos patrimoniales para conocer su comportamiento tras el paso del tiempo. El envejecimiento es un fenómeno complejo y provoca una serie de alteraciones químicas, estructurales y ópticas. Para estudiar sus efectos, pueden realizarse ensayos en cámaras de envejecimiento artificial acelerado que operan principalmente sobre variables climáticas y luminosas (Matteini y Moles, 1996).

El ensayo de envejecimiento acelerado se han realizado en una cámara QUV-Basic de Q-Panel, utilizando lámparas UVA-351nm, con una emisión radiante por debajo de 310 nm, es decir, inferior al 1 % de la luz total emitida. Se utiliza para la

simulación de la parte del UV de la radiación solar filtrada a través de una ventana, según la norma UNE- EN ISO 4892-3 . Con esto se pretende simular las condiciones de iluminación que hay dentro de un museo. Las diferentes probetas preparadas: filamentos, filamentos con recubrimiento de pintura y adhesivos fueron sometidas a un total de 264 h de exposición, teniendo como referencia para establecer el límite de horas de exposición el grado de amarilleamiento de los filamentos utilizados establecido alrededor del 50 %.

8.2.1 Preparación de muestras

Las probetas de filamento se imprimieron con un tamaño de 76 x 26 x 10 mm.

Para el ensayo de cambios de color del filamento sin recubrimiento (F) se imprimieron 16 probetas de cada filamento: 16 de filamento blanco (*White*) y 16 de filamento translúcido (*Clear*). Cada grupo se dividió en dos donde la mitad de las probetas recibieron un tratamiento superficial a base de papeles abrasivos y microtorno para eliminar la marca del filamento depositado (relieve escalonado). En resumen:

- 8 probetas *White* sin tratamiento superficial ($W.S.$), donde una probeta se queda como testigo del estado del filamento antes del ensayo, otra probeta se utiliza para la medición de cada ciclo y las 6 restantes se utilizan como testigos de cada ciclo de horas, para ser utilizadas en posibles análisis.
- 8 probetas *White* con tratamiento superficial ($W.L.$), donde una probeta se queda como testigo del estado del filamento antes del ensayo, otra probeta se utiliza para la medición de cada ciclo y las 6 restantes se utilizan como testigos de cada ciclo de horas, para ser utilizadas en posibles análisis.
- 8 probetas *Clear* sin tratamiento superficial ($C.S.$), donde una probeta se queda como testigo del estado del filamento antes del ensayo, otra probeta se utiliza para la medición de cada ciclo y las 6 restantes se utilizan como testigos de cada ciclo de horas, para ser utilizadas en posibles análisis.
- 8 probetas *Clear* sin tratamiento superficial ($C.L.$), donde una probeta se queda como testigo del estado del filamento antes del ensayo, otra probeta se utiliza para la medición de cada ciclo y las 6 restantes se utilizan como testigos de cada ciclo de horas, para ser utilizadas en posibles análisis.

Las probetas de filamento con recubrimiento de pintura ($F+C$) se imprimieron realizándose 56 probetas *White* y 56 probetas *Clear*. Se aplicaron las diferentes combinaciones entre pintura, *medium* y barniz (Fig. 8.4). Todas las probetas recibieron un tratamiento superficial por fricción con papeles abrasivos y microtorno, dejando la superficie lisa para la correcta aplicación de la pintura. La mezcla de los dos *medium* con la pintura hace que cambie el resultado, en estado puro es densa

y opaca, mezclada con el *medium adhesión* la pintura se vuelve más fluida conservando la opacidad inicial mientras que con el *medium transparencia* la pintura es aún más fluida volviéndose translúcida.

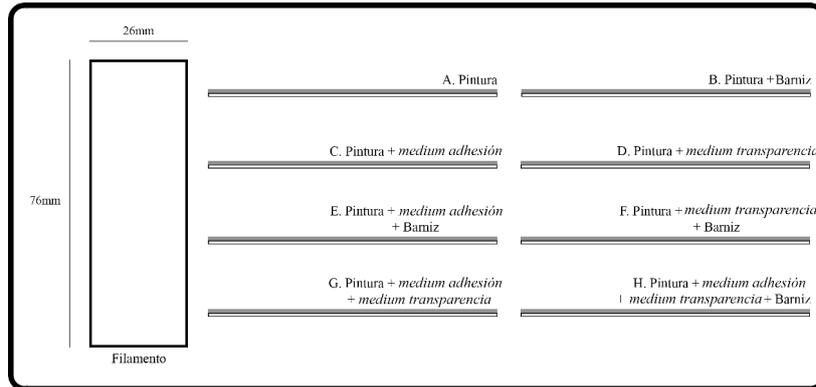


Figura 8.4: Las diferentes combinaciones realizadas en el recubrimiento de pintura para ser testadas en la cámara de envejecimiento acelerado UV.

En cuanto a las probetas de los adhesivos se decidió aplicar una capa fina de cada adhesivo por impregnación utilizando un pincel sobre una superficie de vidrio, que no altera su color por la acción del UV, y para ello se utilizaron portaobjetos de vidrio de 76 x 26 x 1 mm (Fig. 8.5).



Figura 8.5: Probetas de vidrio recubiertas con los adhesivos seleccionados.

8.2.2 Técnicas analíticas

Espectrofotometría

La medición de los cambios de color tras la exposición de las probetas a la radiación UV se realizó por medio de un espectrofotómetro Minolta CM-2600d. Este espectrofotómetro usa una geometría difusa y detección a 8° con su componente especular incluida (SCI de sus siglas en inglés) con brillo o componente especular excluida (SCE de sus siglas en inglés) sin brillo, el iluminante estándar CIE D65 (luz día con temperatura de color 6500K) y usando el observador estándar de 10°C, en conformidad con las recomendaciones de la CIE⁵ (CIE, 2004).

Las diferencias de color (a^* b^*), luminosidad (L^*), tono (h°), y saturación (C^*) se obtuvieron a partir de las coordenadas de los espacios de color CIELAB y CIELCH. El cálculo de la diferencia total de color entre dos estímulos CIELAB se realiza por medio de la siguiente ecuación:

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{[(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]} \quad (8.1)$$

donde ΔL^* es la diferencia entre L^* final y L^* inicial, Δa^* es la diferencia entre a^* final y a^* inicial, y Δb^* es la diferencia entre b^* final y b^* inicial, que se corresponden con la referencia inicial antes del UV y la referencia final después del UV.

También se ha optado por calcular específicamente el índice de amarillamiento⁶ en la probetas de filamento a través del espacio de color XYZ. El cálculo se realiza con la siguiente ecuación:

$$YI = 100(C_X X - C_Z)/Y \quad (8.2)$$

donde XYZ se corresponden con los valores triestimulares CIE⁷ que dependen del iluminante y el observador estándar y le da valor a C_x y C_z . Para el iluminante D65 y el observador estándar 1964, los coeficientes indicados serían: 1.3013 para C_x y 1.1498 para C_z según la norma ASTM E313-00.

⁵CIE: the Commission Internationale de l'Éclairage (en francés), The International Commission on Illumination (en inglés).

⁶Índice de amarilleamiento: se calcula por un procedimiento dado a partir de datos colorimétricos o espectrofotométricos, que indica el grado inicial del color de un objeto incoloro o preferiblemente blanco a amarillo (ASTM E313-00, 2002).

⁷Valores triestimulares CIE: porcentajes de los componentes en una mezcla aditiva de máximo de tres colores primarios necesarios para igualar un color dado. En el sistema CIE se les denomina X, Y y Z. También se deben designar el iluminante y el observador estándar a usar (CIE, 2004).

Las mediciones se hicieron en el caso de las probetas filamento (F) a las 0 h, 24 h, 48 h, 72 h, 144 h, 192 h y 264 h; para las probetas de filamento con recubrimiento ($F+C$) a las 0 h, 24 h, 72 h, 144 h y 264 h; y para las probetas de adhesivo a las 0 h, 24 h, 48 h, 72 h, 144 h, 192 h y 264 h. Para realizar las mediciones con el espectrofotómetro se decidió realizar las tres mediciones (por la homogeneidad de la superficie) en la misma probeta y para asegurar que fuera siempre en el mismo área se fabricó una plantilla con tres orificios del tamaño del área del objetivo del espectrofotómetro.

El ensayo está basado en las normas UNE-EN ISO 48-073-94/1-3 y UNE-EN ISO 4582.

Microscopía óptica (MO)

Técnica utilizada para la observación y estudio de estructuras de materiales de dimensiones inferiores utilizando radiaciones visibles reflejadas, transmitidas o derivadas de la excitación de la materia. Se consigue el aumento de la imagen por refracción con lentes ópticas. El material no necesita preparación preliminar, se puede observar directamente (Matteini y Moles, 1996).

Para realizar el examen morfológico de la superficie de las probetas se utilizó una Lupa binocular Leica MZ APO con una cámara digital acoplada. Para valorar la degradación tanto del filamento como de la capa pictórica se ha seguido la norma UNE-EN ISO 4628.

8.2.3 Resultados y discusión

Para la evaluación de los resultados, se considera como diferencia de color "supra-umbral" de 1.75-2 unidades CIELAB, por tanto tras analizar los datos y no mostrar diferencia significativa entre SCI y SCE, los datos reflejados en la evaluación se corresponden con los valores con brillo (SCI).

Caracterización de filamento. Evaluación visual y de los cambios cromáticos

La degradación de las probetas filamento (F) tras su exposición al UV queda reflejada visualmente por el tono amarillento que experimenta el material tras las primeras 24 h horas y que se incrementa exponencialmente en las siguientes exposiciones (Fig. 8.6 y 8.7).

Al observar las probetas mediante MO (Fig. 8.8), se confirma que la foto-oxidación es el único efecto tras la exposición, es decir, que la superficie no presenta otros



Figura 8.6: Resultado de la exposición a la radiación ultravioleta del filamento blanco (*White*). Se muestra el cambio de la tonalidad de la superficie con el paso de las horas. En línea superior están las probetas sin tratamiento superficial (*W.0*) y en la línea inferior las probetas con tratamiento superficial (*W.1*).

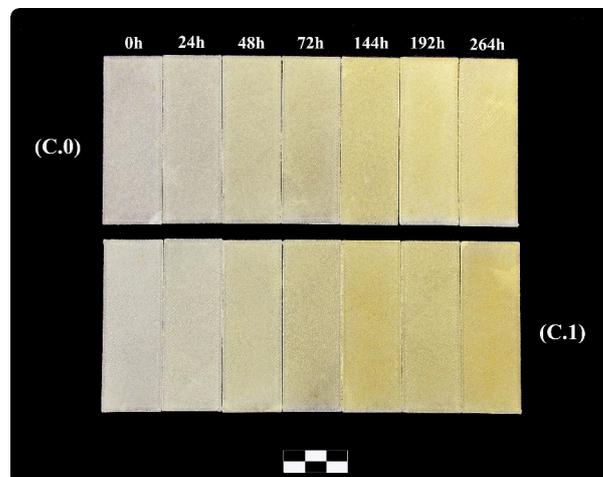


Figura 8.7: Resultado de la exposición a radiación ultravioleta del filamento translúcido (*Clear*). Se muestra el cambio de la tonalidad de la superficie con el paso de las horas. En línea superior están las probetas sin tratamiento superficial (*C.0*) y en la línea inferior las probetas con tratamiento superficial (*C.1*).

daños como ampollas o fisuras. El material ha perdido su flexibilidad inicial, y puede ser fragmentado fácilmente tras 264 h de exposición.

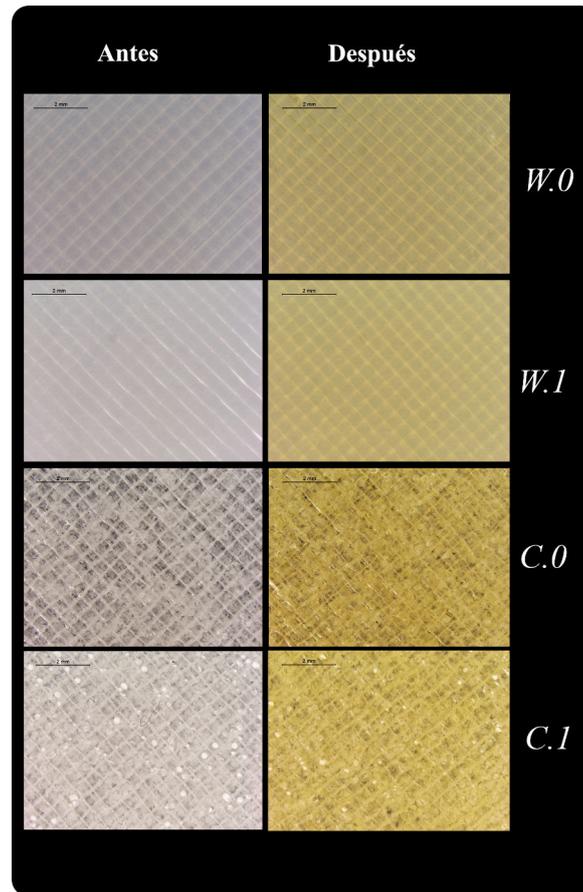


Figura 8.8: Imágenes tomadas con microscopía óptica a 8 aumentos de las probetas filamento de antes y después de la exposición a la radiación ultravioleta: filamento blanco sin tratamiento superficial (*W.0*), filamento blanco con tratamiento superficial (*W.1*), filamento translúcido sin tratamiento superficial (*C.0*) y filamento translúcido con tratamiento superficial (*C.1*).

En cuanto al análisis en los cambios cromáticos se puede observar que todos los valores iniciales se localizan muy próximas al eje azul-amarillo. Las muestras de 0 h se localizan algo más próximas al azul mientras que todas las muestras de 264 h, en especial *C.0* y *C.1*, están más próximas del amarillo (Fig. 8.9). En cuanto al análisis de los valores finales, la mayor variación aparece en las muestras *C* observando que el cambio es visible a simple vista. Tras 48 h de exposición ya se

hace muy notable este cambio. Las cuatro muestras quedan agrupadas en dos tipos diferenciados; por un lado, las muestras *C.0* y *C.1* presentan el mayor incremento con una variación de 39 unidades sobre las dos muestras iniciales *C* (Fig. 8.10). Por otro lado, todas las muestras tienen una ligera pérdida de luminosidad (ΔL^*) tras la exposición y aumentan la saturación (ΔC^*) siendo más intensa y sobretodo el tono (Δh^*) siendo el más afectado variando con unidades de -178, desde el estado inicial, en el caso de *C.0* (Fig. 8.2). Todo esto como consecuencia de la oxidación que modifica el tono de la superficie del material de blanco a amarillo.

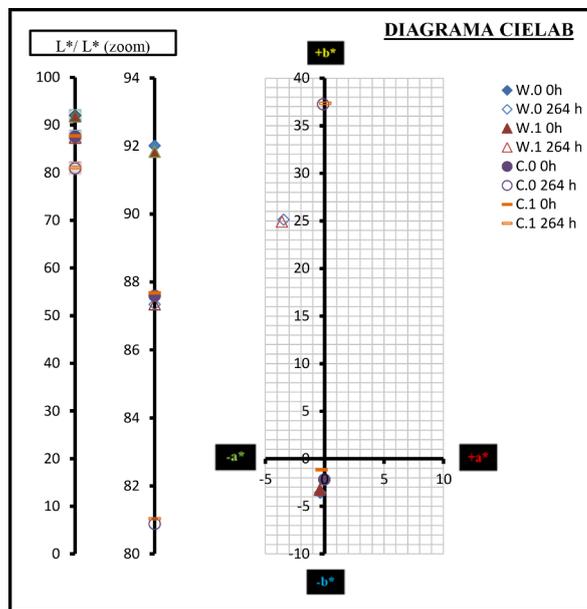


Figura 8.9: Diagrama CIELAB con las diferencias de color entre el antes y el después de las probetas filamento *F*.

Como el amarilleamiento es la consecuencia más notable de la exposición al UV, se ha decidido estudiarlo más a fondo calculando el índice de amarillamiento (*YI*). Observando los resultados se concluye que el amarillamiento se produce desde las primeras 24 h (Tab. 8.3) y continúa hasta alcanzar valores positivos de mayor rango que los iniciales como en el caso de *C.0* y *C.1* que inicialmente alcanza valores de -43 y -40 y finalizando con un valor de 65 (Fig. 8.11). Comparando los dos tipos de filamento se observa que la coloración amarillenta es más acusada en las probetas *Clear*. Por último y comparando las probetas sometidas a un tratamiento mecánico superficial con las que no, la variación es prácticamente inexistente.

Tabla 8.2: Resultado tras el cálculo de diferencias SCI antes y después en: luminosidad(ΔL^*), croma (ΔC^*), tono ($\Delta h^{\circ*}$) y variación del color total (ΔE^*ab).

Probeta	ΔL^*	ΔC^*	$\Delta h^{\circ*}$	ΔE^*ab
W.0	-4,668	21,742	-166,007	29,234
W.1	-4,488	21,868	164,757	28,708
C.0	-6,708	35,049	-178,969	39,991
C.1	-6,643	36,062	-152,854	39,081

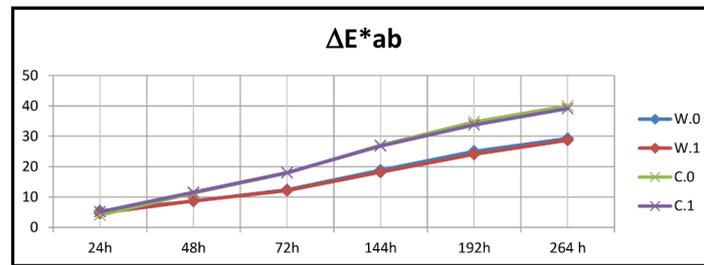


Figura 8.10: Gráfica de la variación de color total en función del tiempo de exposición.

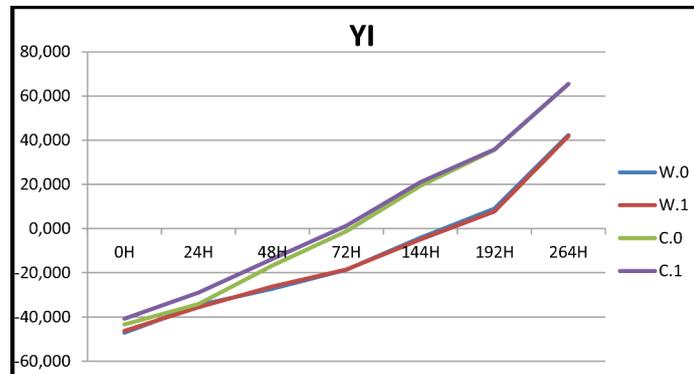


Figura 8.11: Evolución del índice de amarillamiento en las probetas filamento (F) durante la exposición a la radiación UV.

Tabla 8.3: Resultados del cálculo del índice de amarillamiento en las probetas *F*.

Probeta	0 h	24 h	48 h	72 h	144 h	192 h	264 h
W.0	-47,131	-34,683	-27,185	-18,573	-4,177	9,049	42,271
W.1	-46,316	-35,641	-26,281	-18,475	-4,933	7,711	41,866
C.0	-43,373	-34,123	-16,693	-1,214	19,298	35,574	65,316
C.1	-40,783	-20,001	-13,728	-1,335	20,988	35,796	65,530

Caracterización del recubrimiento de pintura. Evaluación visual y de los cambios cromáticos

En cuanto a las probetas de filamento con recubrimiento de pintura (*F+C*), tras el primer examen visual no presentan cambios significativos en la capa pictórica. Si podemos apreciar, sin embargo, que en la serie de probetas donde la capa de pintura no es opaca se ha visto afectado el material base por la foto-oxidación. El filamento se degrada igual que en las probetas *F*, pero solo en las combinaciones E, F, G y H (Fig 8.14). Estos resultados se mantienen en todos los colores, ya que se producen porque la capa cubriente es translúcida y deja pasar mayor radiación lumínica. Estos datos se confirman con la lupa (Fig. 8.13) y se advierte la ausencia de otro tipo de degradación apreciable.

Una vez procesados los datos colorimétricos, se observa que el comportamiento, entre la selección de colores de esta marca de pintura, es similar aunque podemos hacer tres grupos: 1, 2, 3, 6 por un lado; 4, 5 por otro y 7 como tercer grupo. En los valores analizados se observa la estabilidad general que mantienen la pintura tras las 264 h. Se han descartado los datos de las probetas E, F, G y H, donde se incrementan notablemente las variaciones tras la exposición por la influencia del amarilleamiento del filamento (Fig. 8.14 - 8.16) salvo cuando en este recubrimiento interviene el color Mustard Seed DA 264 (color 7), debido a que su coloración amarillenta es similar a la producida por la oxidación (Fig. 8.18). A causa de esta interferencia la valoración de los cambios cromáticos producidos en las probetas *F+C* se hará a partir de las probetas A, B, C y D de cada filamento (Fig. 8.4).

Para poder discutir los resultados de los incrementos se ha elegido un color representativo de cada grupo: del primer grupo el color Black Forest Green DA082 (color 2), para el segundo el color Citron Green DA235 (color 4) y para el tercero el color Mustard Seed DA264 (color 7). En primer lugar, en el color 2 (Fig.8.15) se puede ver que tanto en el croma como la luminosidad disminuyen, mientras que el tono y la variación de color total aumentan. En general, los incrementos varían de 0,2 a 2,5, y de -0,2 a -2,3. Teniendo en cuenta que visualmente los cambios son perceptibles por el ojo humano a partir de 1,75 - 2,00 unidades, la variación es apenas apreciable. Y de manera similar ocurre en los colores Cocoa DA259 (color

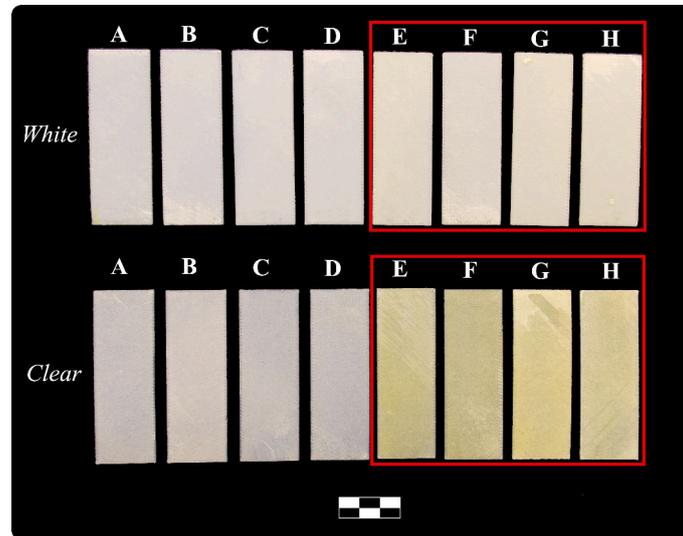


Figura 8.12: Vista del reverso de las probetas con recubrimiento de pintura Sapphine DA 099 (color 3) arriba el filamento blanco (*White*) y abajo el filamento translúcido (*Clear*). Se observa el efecto de la foto-oxidación en el filamento en las probetas E, F, G y H (cuadrado rojo). Como la capa es translúcida facilita la filtración de la radiación luminica a los estratos inferiores. En el caso de las probetas *Clear* incluso muestra sus efectos en el reverso.

1), Sapphine DA099 (color 3) y Terra Cotta DA062 (color 6). En cuanto al color 4 (Fig. 8.17) todos los parámetros se presentan en positivo y su incremento es considerable (entre 18-70 unidades) como ocurre en el color Light Cinnamon DA114. Por último, el color 7 (Fig. 8.19), aún siendo el de menor incremento, presenta variaciones que sobrepasan el umbral de lo visible en 1 unidad.

En cuanto al aumento de la luminosidad (ΔL^*) en todos los casos, el cambio es mínimo.

Adhesivo. Cambios cromáticos

Para la valoración de los resultados se han dividido el conjunto de adhesivos en 7 grupos dependiendo del disolvente empleado:

- Grupo A: (A.1) K60 20% en alcohol etílico y (A.2) Mowital 20% en alcohol etílico (Fig. 8.20).

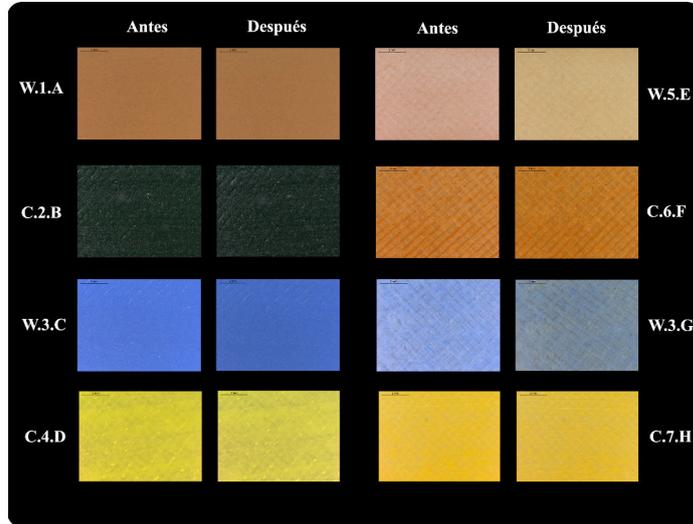


Figura 8.13: Imágenes tomadas con microscopía óptica a 8 aumentos de las probetas filamento con recubrimiento de pintura. Pueden observarse los cambios visuales experimentados antes y después de la exposición a la radiación ultravioleta.

- Grupo B: (B.1) Paraloid B-72 25 % en butil acetato, (B.2) Paraloid B-44 25 % en butil acetato y (B.3) Evalcite 25 % en butil acetato (Fig. 8.21).
- Grupo C: (C.1) Paraloid B-72 25 % en acetona, (C.2) Paraloid B-44 25 % en acetona y (C.3) Evalcite 25 % en acetona (Fig. 8.22).
- Grupo D: (D.1) Paraloid B-72 25 % en dowanold PM, (D.2) Paraloid B-44 25 % en dowanold PM y (D.3) Evalcite 25 % dowanold PM (Fig. 8.23).
- Grupo E: (E.1) Paraloid B-72 25 % en etil acetato, (E.2) Paraloid B-44 25 % en etil acetato y (E.3) Evalcite 25 % en etil acetato (Fig. 8.24).
- Grupo R: (R) Fluoline A (Fig. 8.25).

Como se puede observar en los espectros (Fig. 8.20 - 8.25), en todos los casos estudiados no hay variaciones significativas producidas dentro del rango de 0 h a 264 h. Los adhesivos tienen un comportamiento aparentemente estable durante el tiempo al que han sido expuestos a radiación UV.

8.2 Ensayo 1. Envejecimiento artificial por radiación ultravioleta

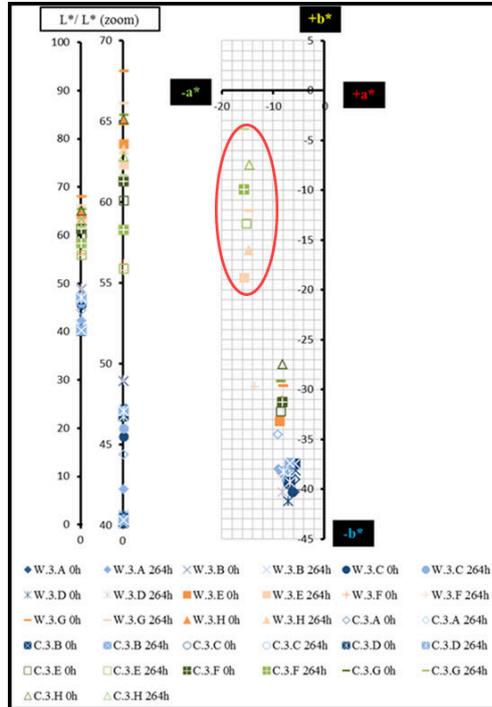


Figura 8.14: Diagrama CIELAB del color 3 (Sapphire DA099). El círculo rojo señala los valores que marcan las variaciones tonales producidas por la oxidación del filamento que interfieren en las medidas del color de recubrimiento.

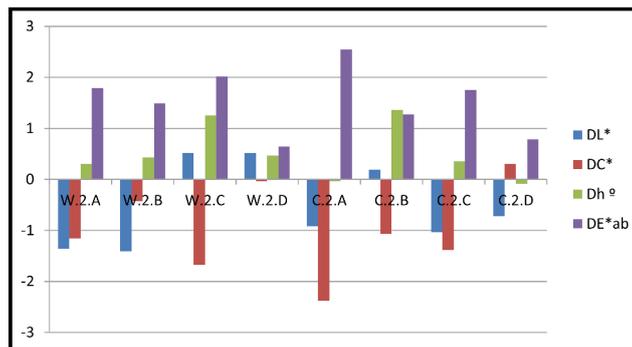


Figura 8.15: Gráfica de incrementos en ΔL^* , ΔC^* , Δh° y ΔE^*_{ab} del color 2 (Black Forest Green).

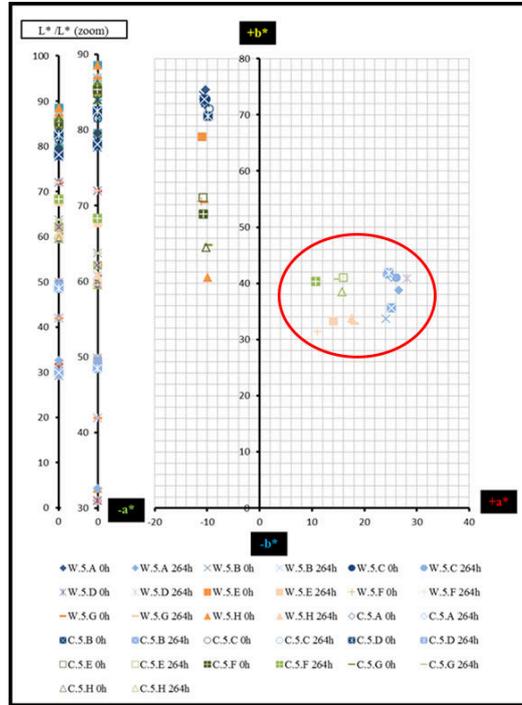


Figura 8.16: Diagrama CIELAB del color 5 (Ligth Cinamon DA114). El círculo rojo señala los valores que marcan las variaciones tonales producidas por la oxidación del filamento que interfieren en las medidas del recubrimiento de pintura.

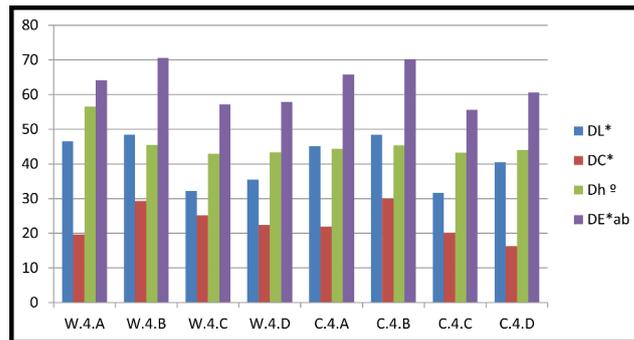


Figura 8.17: Gráfica de incrementos en ΔL^* , ΔC^* , Δh° y ΔE^*ab del color 4 (Citron Green).

8.2 Ensayo 1. Envejecimiento artificial por radiación ultravioleta

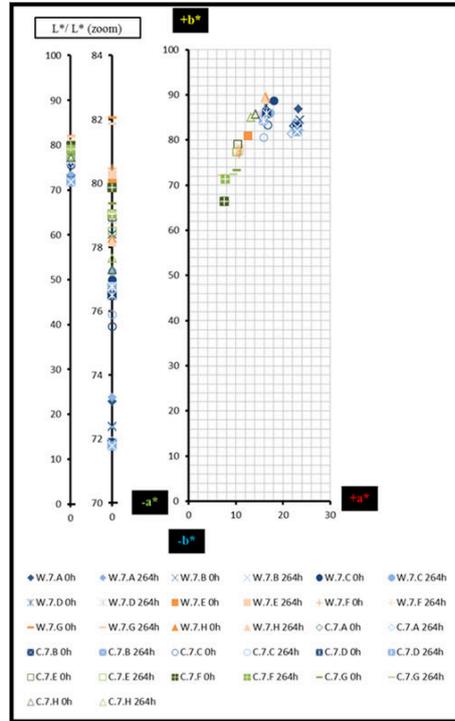


Figura 8.18: Diagrama CIELAB del color 7 (Mustard Seed DA264). La oxidación del filamento no se aprecia por la similitud entre el tono de la oxidación y el tono de este color.

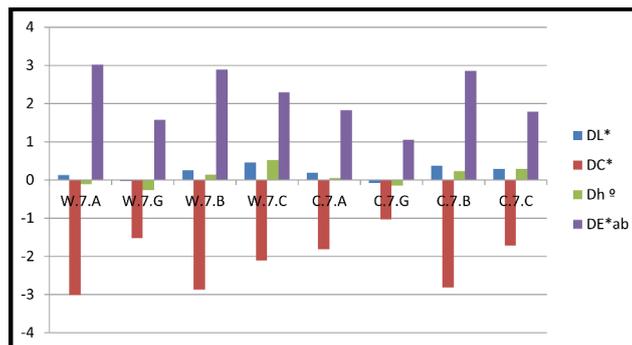


Figura 8.19: Gráfica de incrementos en ΔL^* , ΔC^* , Δh° y ΔE^*_{ab} del color 7 (Mustard Seed).

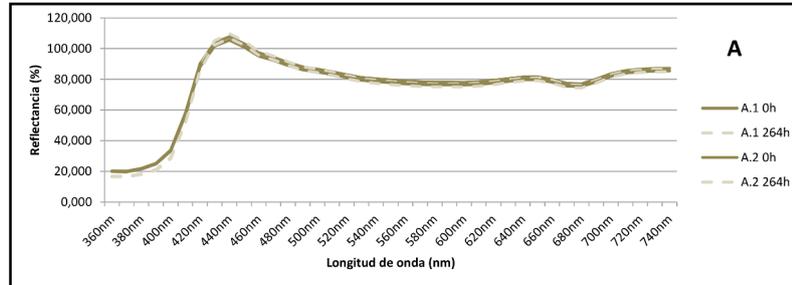


Figura 8.20: Espectro colorimétrico del antes (0h) y del después (264h) de la exposición a la radiación ultravioleta de los adhesivos del grupo A: K60 20 % en alcohol etílico y (A.2) Mowital 20 % en alcohol etílico.

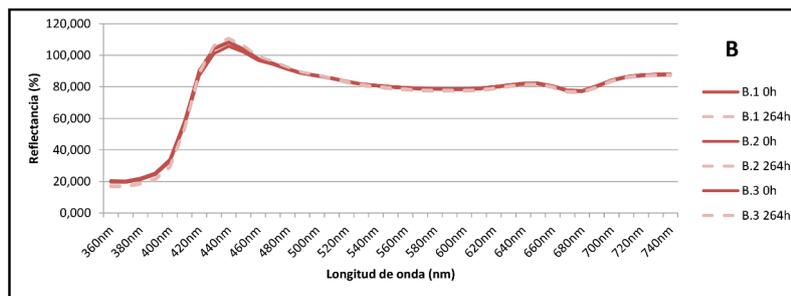


Figura 8.21: Espectro colorimétrico del antes (0h) y del después (264h) de la exposición a la radiación ultravioleta de los adhesivos del grupo B: (B.1) Paraloid B-72 25 % en butil acetato, (B.2) Paraloid B-44 25 % en butil acetato y (B.3) Evalcite 25 % en butil acetato.

8.3 Ensayo 2. Solubilidad del filamento ABS

Para la selección del adhesivo, en relación a su comportamiento soluble, se ha tenido en cuenta el disolvente empleado en la mezcla ya que el ABS se verá afectado en mayor o menor grado por el mismo. Se ha realizado un ensayo que consiste en la inmersión de una muestra de cada filamento dentro de una serie de disolventes controlando el tiempo de disolución total.

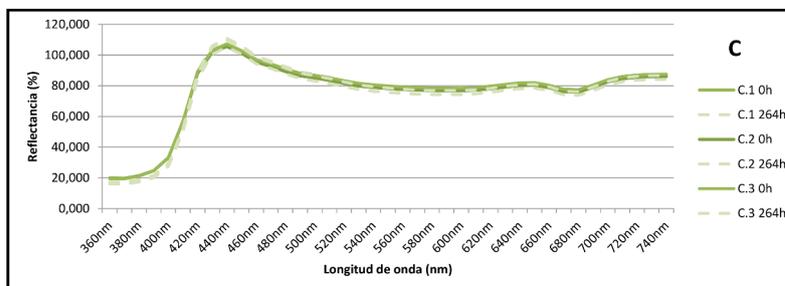


Figura 8.22: Espectro colorimétrico del antes (0h) y del después (264h) de la exposición a la radiación ultravioleta de los adhesivos del grupo C: (C.1) Paraloid B-72 25 % en acetona, (C.2) Paraloid B-44 25 % en acetona y (C.3) Evalcite 25 % en acetona.

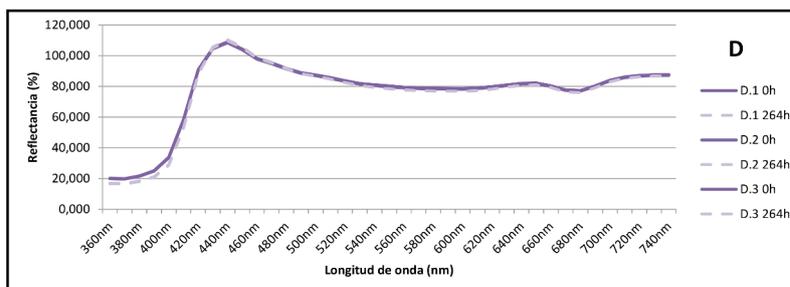


Figura 8.23: Espectro colorimétrico del antes (0h) y del después (264h) de la exposición a la radiación ultravioleta de los adhesivos del grupo D: (D.1) Paraloid B-72 25 % en downald PM, (D.2) Paraloid B-44 25 % en downald PM y (D.3) Evalcite 25 % downald PM.

8.3.1 Preparación de muestras

Se han preparado una serie de cinco recipientes con tapa, en cada uno se ha dispuesto 20 ml de cada uno de los disolventes seleccionados (acetona, etil acetato, downald PM, butil acetato, alcohol etílico) y se han sumergido dos muestras de cada filamento, de 40 mm de longitud, con un diámetro de 1,75 mm y un peso de 0,09 gr. Se ha controlado el tiempo (6 h) para determinar sus características de solubilidad.

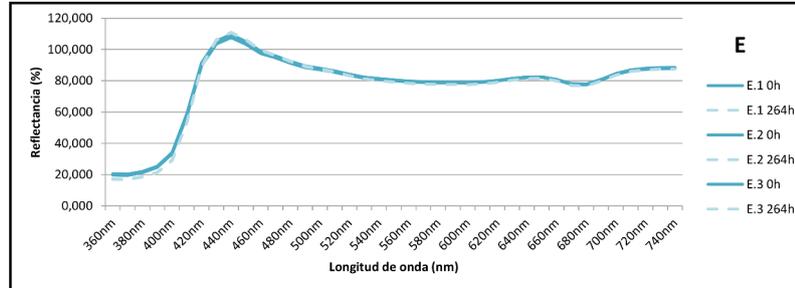


Figura 8.24: Espectro colorimétrico del antes (0h) y del después (264h) de la exposición a la radiación ultravioleta de los adhesivos del grupo E: (E.1) Paraloid B-72 25 % en etil acetato, (E.2) Paraloid B-44 25 % en etil acetato y (E.3) Evalcite 25 % en etil acetato.

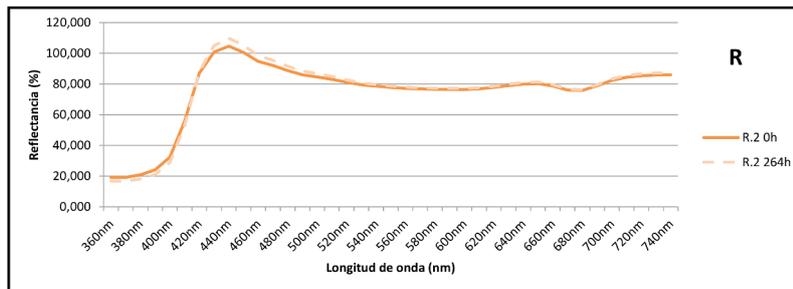


Figura 8.25: Espectro colorimétrico del antes (0h) y del después (264h) de la exposición a la radiación ultravioleta de los adhesivos del grupo R: Fluoline A.

8.3.2 Resultados y discusión

Tras finalizar el ensayo se observa que el disolvente que actúan con mayor rapidez es la acetona. Los filamentos ensayados (*White* y *Clear*) se disuelven en un tiempo estimado de 1 h. El siguiente sería el etil acetato que tras 2 h disuelve los filamentos completamente y a continuación el butil acetato con un tiempo de 4 h. En cambio el downold PM pasadas 6 h ha hinchado ambos filamentos y parece haber afectado al filamento translúcido volviéndolo opaco (pasado 7 días se ha comprobado que el filamento translúcido ha sido disuelto mientras que el blanco no). Y por último el alcohol etílico que tras 6 h no muestra que altere a los filamentos (tras 7 días los filamentos siguen sin presentar cambios).



Figura 8.26: Ensayo de solubilidad: recipiente con tapa y dos muestras de filamentos.

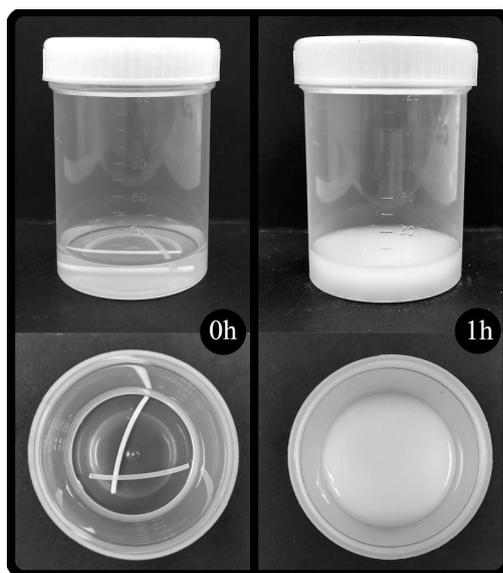


Figura 8.27: Muestras de los filamentos blanco (*White*) y translúcido (*Clear*) sumergidos en acetona a las 0 h y al final del ensayo a 1 h.

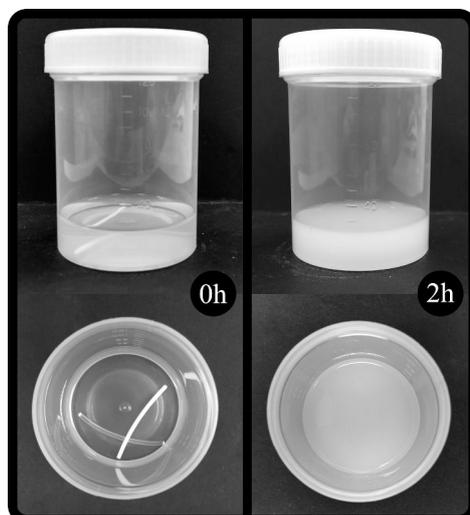


Figura 8.28: Muestras de los filamentos (*White*) y translúcido (*Clear*) sumergidos en etil acetato a las 0 h y al final del ensayo a las 2 h.

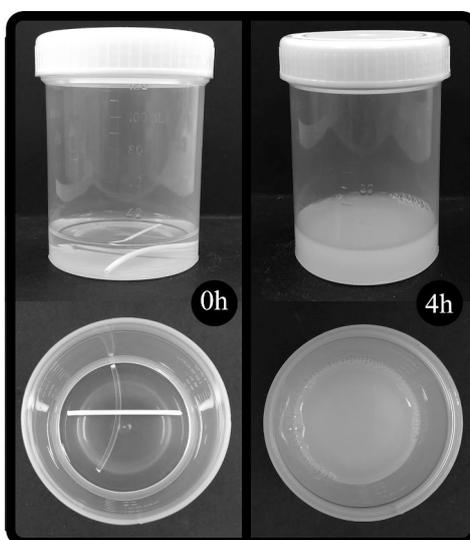


Figura 8.29: Muestras de los filamentos (*White*) y translúcido (*Clear*) sumergidos en butil acetato a las 0 h y al final del ensayo a las 4 h.

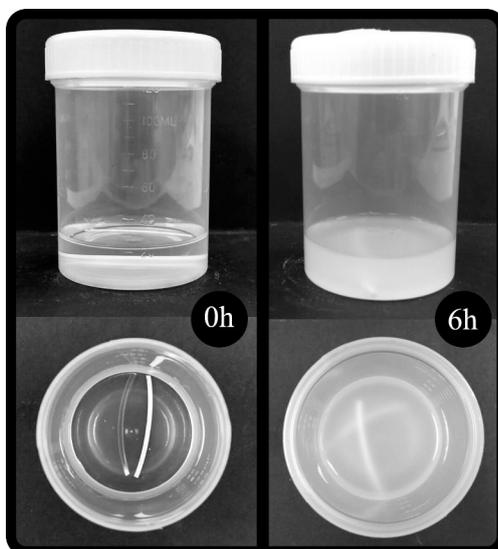


Figura 8.30: Muestras de los filamentos (*White*) y translúcido (*Clear*) sumergidos en Dowanol PM a las 0 h y al final del ensayo a las 6 h.

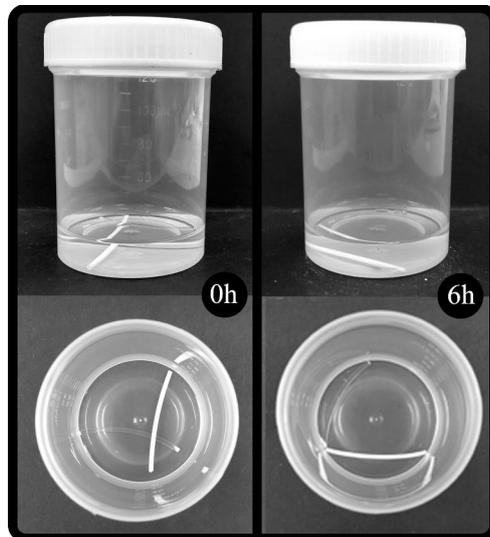


Figura 8.31: Muestras de los filamentos (*White*) y translúcido (*Clear*) sumergidos en alcohol etílico a las 0 h y al final del ensayo a las 6 h.

8.4 Ensayo 3. Resistencia a la tracción

Con este ensayo se pretende determinar el grado de adherencia del filamento ABS (*White* y *Clear*) al vidrio con los diferentes adhesivos seleccionados y paralelamente, se determinará también el grado de adherencia del recubrimiento de la pintura con los dos tipos de ABS. Para ello, se ha utilizado un equipo mecánico de medición de la resistencia a la tracción para adhesión estándar (KN-10) de la marca Neurtek instruments con un rango de medición de 5 a 1000 Kgf y utilizando para los arranques las sufrideras de 20 mm de diámetro que van adheridas al material que se va a testar por medio del adhesivo de ensayo Araldit rápido 5 minutos de la marca Ceys (adhesivo epoxi). El equipo lleva un anillo exterior que rodea la sufridera y que sirve de apoyo al equipo. El ensayo se basa en la norma UNE-EN ISO 4624.

8.4.1 Preparación de muestras

Para la realización del ensayo de resistencia a la tracción se imprimieron 180 probetas circulares del diámetro de la sufridera (20 x 20 x 2 mm), 12 probetas por cada adhesivo, los adhesivos ensayados son 15: K60 20% en alcohol etílico, Mowital 20% en alcohol etílico, Paraloid B-72 en 25% en acetona, Paraloid B-44 en 25% en acetona, Evalcite 25% en acetona, Paraloid B-72 25% en downold PM, Paraloid B-44 25% en downold PM, Evalcite 25% en downold PM, Paraloid B-72 25% en etil acetato, Paraloid B-44 25% en etil acetato, Evalcite 25% en etil acetato, Paraloid B-72 25% en butil acetato, Paraloid B-44 25% en butil acetato, Evalcite 25% en butil acetato y Fluoline A) y cada ABS (*White* y *Clear*). Las probetas se dividen en dos grupos, donde uno se expondrá a la radiación UV. Así se podrá comparar los datos de la resistencia de la tracción antes y después de la exposición a radiación ultravioleta de 264 h (Fig. 8.32)

El montaje del ensayo se hizo sobre un substrato rígido de vidrio (Fig.8.34) con unas medidas de 300 x 420 x 4 mm, sobre el que se adhirieron las probetas de ABS con el adhesivo seleccionado (Fig. 8.34 y 8.35). Tras su curado (llevado a cabo durante 30 días) se adhirió una sufridera sobre cada muestra circular utilizando un adhesivo epoxi de dos componentes (Araldit 5 minutos) que se dejó curar durante 24 h.

En el caso de los arranques de recubrimiento de pintura se imprimieron probetas rectangulares (76 x 26 x 1 mm) de cada filamento. La superficie fue tratada con papeles abrasivos y microtorno. Se dividió la superficie de cada probeta en dos: en la mitad izquierda fueron pintadas con la pintura pura y en la mitad derecha con pintura y *medium de adhesión* (Fig. 8.36 y Fig. 8.37). Tres probetas de cada filamento fueron expuestas a radiación ultravioleta (Fig. 8.38).

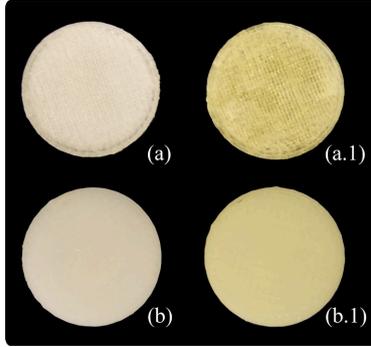


Figura 8.32: Probetas impresas de filamento de ABS del ensayo de resistencia a la tracción: (a) filamento translúcido antes del UV, (a.1) filamento translúcido después del UV, (b) filamento blanco antes del UV y (b.1) filamento blanco después del UV.

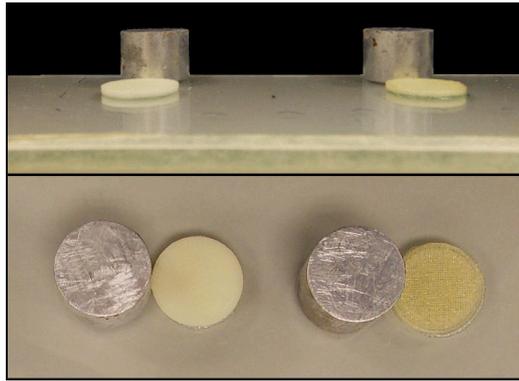


Figura 8.33: Adhesión de las probetas de ABS al vidrio y al lado la sufridera metálica antes de su adhesión. (Arriba) vista frontal de la adhesión y (abajo) vista superior de la adhesión (a la izquierda el filamento *White* y a la derecha el filamento *Clear*).

Para realizar el ensayo, la sufridera fue adherida con un adhesivo epoxi de dos componentes directamente sobre la capa pictórica y antes del arranque se realizó un corte sobre el recubrimiento de pintura alrededor de la sufridera para reducir la zona de arranque al diámetro de la sufridera.

Tras cada prueba el resultado de la fuerza de tracción aparece en el visor digital. Estos datos se corresponden con la fuerza directa (F) que se utiliza para obtener la tensión de rotura (σ) a través de una fórmula:

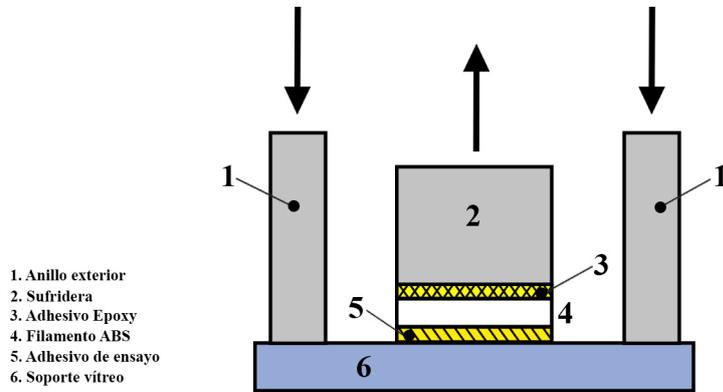


Figura 8.34: Esquema del montaje de las probetas ABS para realizar el ensayo de resistencia a la tracción de adhesivos de ABS.

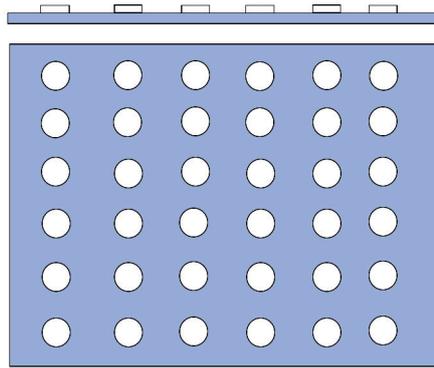


Figura 8.35: Esquema de la colocación de las probetas sobre la superficie del vidrio.

$$\sigma = F/A \quad (8.3)$$

donde F es la fuerza de la rotura en newtons y A es el área de la sufridera en milímetros cuadrados. Como las sufrideras son de 20 mm de diámetro la tensión de rotura, en megapascuales (MPa), viene dada por la siguiente fórmula:

$$\sigma = 4/F400\pi = F/314 \quad (8.4)$$

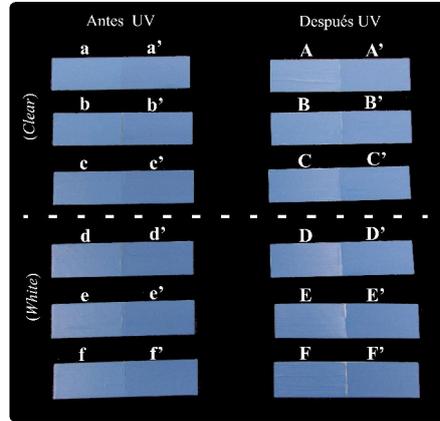


Figura 8.36: Probetas impresas con ABS para el ensayo de resistencia a la tracción: arriba el filamento translúcido (*Clear*) y abajo el filamento blanco (*White*). En la derecha probetas sin exponer a la radiación ultravioleta (a, b, c, d, e, f capa de pintura y *medium adhesión* y a', b', c', d', e', f' capa de pintura pura) y en la izquierda probetas tras la exposición a la radiación ultravioleta (A, B, C, D, E, F capa de pintura pura y A', B', C', D', E', F' capa de pintura y *medium adhesión*).

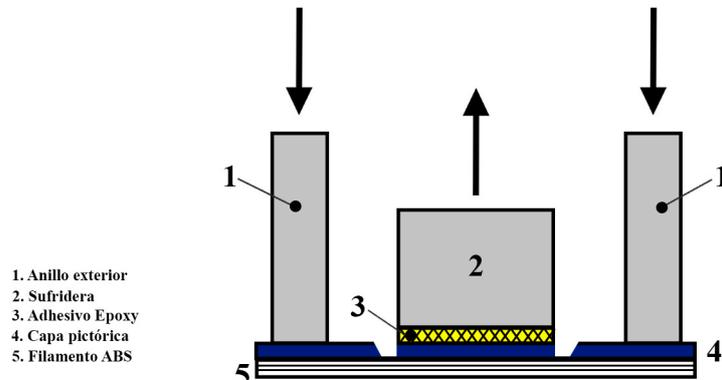


Figura 8.37: Esquema del montaje de las probetas ABS con recubrimiento de pintura para realizar el ensayo de resistencia a la tracción del recubrimiento.

8.4.2 Resultados y discusión

La tracción directa se ha realizado para conocer la fuerza de unión entre el vidrio y cada filamento de ABS y de manera paralela se ha llevado a cabo un segundo ensayo para la fuerza de unión entre el recubrimiento de pintura y el filamento

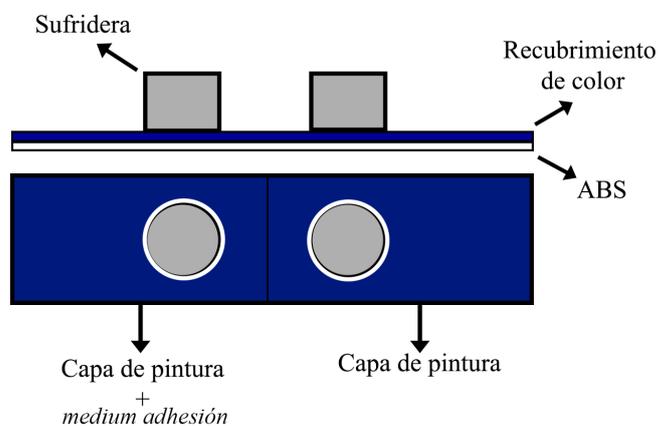


Figura 8.38: Esquema de la división de la superficie de la probeta de ABS con recubrimiento de pintura y *medium adhesión* y posición de las sufrideras.

ABS. Se ha tenido en cuenta la tensión de rotura (Kgf), la adherencia (MPa) y la naturaleza de la rotura (Tab. 8.4 y 8.5).

Tabla 8.4: Naturaleza de la rotura entre el vidrio, el adhesivo y al ABS.

Denominación	Descripción
A	Rotura cohesiva del vidrio
A/B	Rotura adhesiva entre el vidrio y el adhesivo a testar
B	Rotura cohesiva del adhesivo
B/C	Rotura adhesiva entre el adhesivo y el ABS
C	Rotura cohesiva del ABS
C/Y	Rotura adhesiva entre el ABS y el adhesivo epoxi
Y	Rotura cohesiva del adhesivo epoxi
Y/Z	Rotura adhesiva entre el adhesivo epoxi y la sufridera

Tabla 8.5: Naturaleza de la rotura entre el ABS y el recubrimiento de pintura.

Denominación	Descripción
A	Rotura cohesiva del ABS
A/B	Rotura adhesiva entre el ABS y el recubrimiento de pintura
B	Rotura cohesiva del recubrimiento de pintura
B/Y	Rotura adhesiva entre el recubrimiento de pintura y el adhesivo epoxi
Y	Rotura cohesiva del adhesivo epoxi
Y/Z	Rotura adhesiva entre el adhesivo epoxi y la sufridera

Caracterización de la adherencia entre el vidrio y el filamento ABS

El grado de adherencia entre el filamento ABS y el vidrio se ve influenciado por el tipo de disolvente utilizado en la mezcla adhesiva. El disolvente puede reaccionar con el filamento, lo solubiliza e incrementa la fuerza adhesiva entre ambos quedando fusionados parcialmente.

En las tablas 8.6 y 8.7 se muestran los resultados de adherencia entre el vidrio y el filamento blanco (*White*) antes y después de la exposición a la radiación UV que serán comentados agrupándolos por el disolvente del que están compuestos:

- Alcohol etílico: los adhesivos formados por este disolvente (K60 y Mowital) han mostrado una baja adherencia al soporte vítreo, produciéndose la separación casi completa de la capa de adhesivo con valores de adherencia inferiores a 5 Kgf (0,16 MPa) tanto antes como después de la exposición a la radiación UV.
- Acetona: en los adhesivos formados por este disolvente se han obtenido unos resultados variados. En el Paraloid B-72 con una fuerza entre 5 y 14 Kgf se produjo la separación total del adhesivo epoxi (tipo C/Y), siendo por tanto la adherencia entre el vidrio y el ABS considerablemente alta. Tras la exposición al UV, la fuerza varía poco (13 Kgf) pero el tipo de rotura si, separándose la capa de adhesivo en dos (tipo B). En cuanto al Paraloid B-44 se han obtenido diferentes fuerzas de tracción por la influencia del UV (antes inferiores 19 Kgf y después inferior a 5 Kgf) reduciéndose la adherencia, pero el tipo rotura resultante es el mismo con valores similares de separación de la capa de adhesivo del vidrio (tipo A/B), donde se muestra la baja adherencia de adhesivo con la superficie vítrea. Por último en el Evalcite se ha obtenido el mayor cambio pues de una fuerza inicial inferior a 5 Kgf (0,16 MPa) se pasa tras la exposición al UV a 16 Kgf (0,49 MPa), aumentando la adherencia que se ve reflejada en el tipo de rotura, donde inicialmente el adhesivo se separaba

completamente del vidrio (tipo A/B), tras la exposición la separación (100 %) ocurre entre el el ABS y el adhesivo epoxi (tipo C/Y).

- Dowanold PM: en los adhesivos formados por este disolvente también se han obtenido resultados variados. En el Paraloid B-72 se produce la misma rotura cohesiva del adhesivo (tipo B) antes y después de UV donde se muestra que la adherencia al vidrio y al ABS es buena, y se produce un cambio en la fuerza ejercida antes y después por la separación de esta capa, aumenta el valor tras la exposición de 0,40 MPa (13 Kgf) a 1,20 MPa (39 Kgf). En el Paraloid B-44 la influencia del UV es menor, pero también se observan cambios en la fuerza necesaria de 0,55 MPa (18 Kgf) a 0,77 MPa (25 Kgf) a pesar de ello se observa una escasa adherencia al soporte vítreo que se ve reflejada en la separación del adhesivo casi por completo de la superficie (tipo A/B en ambos casos). Y por último en el Evalcite, se han obtenido unos valores similares antes y después del UV (inferiores a 5 Kgf) y una escasa adherencia a la superficie vítrea por parte del adhesivo (tipo A/B).
- Etil acetato: en los adhesivos formados por este disolvente también se han obtenido resultados diferentes. En el Paraloid B-72 se obtiene la misma fuerza de tracción antes y después del UV (20 Kgf) aunque varía el tipo de rotura pasando de la separación casi por completo del adhesivo del vidrio (tipo A/B) al aumento de esta adherencia y que la rotura se produzca, tras la exposición, en la capa de adhesivo quedando dividido en dos (tipo B). En el Paraloid B-44 se obtiene un aumento de la fuerza de tracción después del UV (de 5-12 Kgf a 47 Kgf) que se muestra en el tipo de rotura, inicialmente la separación se producía por completo entre el adhesivo y la superficie vítrea y después hay un aumento de adherencia elevado que hace que la rotura se produzca entre el ABS y el adhesivo epoxi (tipo C/Y). Y por último en el Evalcite, que como en el caso anterior, también muestra un aumento en la fuerza de tracción tras la exposición al UV (de inferior de 5-14 a 31 Kgf) lo que conlleva a un aumento en la adherencia que se refleja en el tipo de rotura donde inicialmente la separación ocurría entre el vidrio y el adhesivo (tipo A/B 100 %) y tras la exposición hay un cambio de tipo de rotura, separándose la capa de adhesivo en dos (tipo B).
- Butil acetato: en los adhesivos formados por este disolvente también se han obtenido resultados diferentes. En el Paraloid B-72 la fuerza ejercida antes y después del UV es bastante similar (20 Kgf y 22 kgf) que a pesar de ser un poco elevada se traduce en una escasa adherencia, produciéndose la rotura casi completa (en ambos casos) entre el vidrio y el adhesivo (tipo A/B). En el Paraloid B-44 sucede algo parecido aunque en este caso se produce una reducción en la fuerza obtenida (de 11 Kgf a inferior de 5 Kgf) y mostrando una escasa adherencia entre el vidrio y el adhesivo (tipo A/B) con una separación completa de esta capa antes y después del UV. Por último en el Evalcite, la fuerza de tracción inicial es de 23 Kgf aunque con escasa

adherencia al soporte vítreo del cual se separa la capa de adhesivo casi por completo (tipo A/B), por el contrario tras la exposición del UV se produce un aumento tanto de la fuerza de tracción (40 Kgf) como de la adherencia, pasado a producirse la rotura en la capa del adhesivo dividida en dos (tipo B).

- Fluoline A: este compuesto presenta una fuerza de tracción antes y después de la exposición UV muy baja (inferior a 5 Kgf) que se refleja en la poca adherencia inicial (tipo A/B 100%) pero que se ve aumentada tras el UV donde la rotura cambia de posición pasando a tipo B, rotura cohesiva del adhesivo.

En las tablas 8.8 y 8.9 se muestran los resultados de adherencia entre el vidrio y el filamento translúcido (*Clear*) antes y después de la exposición a la radiación UV, que también son comentados en función del disolvente empleado:

- Alcohol etílico: en los adhesivos formados por este disolvente se han obtenido resultados similares con ambas resinas (K60 y Mowital) tanto antes como después del UV. Los valores de la fuerza de tracción son inferiores a 5 Kgf por lo que tiene una baja adherencia como se muestran en los tipos de rotura donde la separación se produce entre el vidrio y el adhesivo (tipo A/B), a excepción del K60 tras el UV, que aumenta su adherencia produciéndose la rotura en la capa de adhesivo quedando dividido en dos (tipo B).
- Acetona: en los adhesivos formados por este disolvente se han obtenido resultados diferentes. En el Paraloid B-72 la fuerza de tracción ha aumentado con la exposición al UV de 20 Kgf a 29 Kgf, por lo que presenta una adherencia media según estos valores pero han dado dos tipos de rotura: la inicial donde la separación ha sido entre el ABS y el adhesivo epoxi (tipo C/Y) mientras que después del UV la separación se ha producido entre el vidrio y el adhesivo (tipo A/B), mostrando una pérdida de adherencia. En el Paraloid B-44 se ha producido una disminución de la fuerza de tracción tras la exposición al UV (15 Kgf a inferior de 5 Kgf) pero dando unos resultados de rotura donde la adherencia es mayor después del UV ya que antes la separación se producía entre el vidrio y el adhesivo (tipo A/B) y después en el propio adhesivo quedando dividido en dos (tipo B). Y por último en el Evalcite, también ha aumentado la fuerza de tracción (de inferior de 5 Kgf a 31 Kgf) y ha mejorado la adherencia tras el UV pasando de una rotura entre el vidrio y el adhesivo (tipo A/B) casi completa a una rotura entre el adhesivo y el ABS (tipo (B/C)).
- Dowanold PM: en los adhesivos formados por este disolvente también se han obtenido resultados diferentes. En el Paraloid B-72 con una fuerza de tracción inicial de 10 Kgf presenta una buena adherencia al vidrio y al ABS produciéndose la rotura en la capa de adhesivo que queda dividida en dos (tipo B), y tras la exposición al UV aumenta la fuerza de tracción (30 Kgf)

Tabla 8.6: Naturaleza de la rotura entre el vidrio, el adhesivo y el ABS (*White*) antes de la exposición a la radiación ultravioleta.

Adhesivo	Fuerza rotura(Kgf)	Tensión rotura(MPa)	Tipo rotura
K60 20 % en alcohol etílico	< 5 – 10	< 0,16 – 0,31	97 % A/B - 3 % B
Mowital 20 % en alcohol etílico	< 5	< 0,16	100 % A/B
Paraloid B-72 25 % en acetona	< 5 – 14	< 0,16 – 0,43	100 % C/Y
Paraloid B-44 25 % en acetona	19	0.58	98 % A/B - 2 % B
Evalcite 25 % en acetona	< 5	< 0,16	100 % A/B
Paraloid B-72 25 % en downold PM	13	0.40	63 % B - 37 % A/B
Paraloid B-44 25 % en downold PM	18	0.55	95 % A/B - 5 % B
Evalcite 25 % en downold PM	< 5 – 10	< 0,16 – 0,31	100 % A/B
Paraloid B-72 25 % en etil acetato	20	0.62	95 % A/B - 5 % B
Paraloid B-44 25 % en etil acetato	< 5 – 12	< 0,16 – 0,37	100 % A/B
Evalcite 25 % en etil acetato	< 5 – 14	< 0,16 – 0,431	100 % A/B
Paraloid B-72 25 % en butil acetato	20	0.62	95 % A/B - 5 % B
Paraloid B-44 25 % en butil acetato	11	0.34	100 % A/B
Evalcite 25 % en butil acetato	23	0.71	90 % A/B - 10 % B
Fluoline A	< 5	< 0,16	100 % A/B

Tabla 8.7: Naturaleza de la rotura entre el vidrio, el adhesivo y el ABS (*White*) después de la exposición a la radiación ultravioleta.

Adhesivo	Fuerza rotura(Kgf)	Tensión rotura (MPa)	Tipo rotura
K60 20 % en alcohol etílico	< 5 – 10	< 0,16 – 0,31	55 % B - 45 % A/B
Mowital 20 % en alcohol etílico	< 5	< 0,16	90 % A/B - 10 % B
Paraloid B-72 en 25 % en acetona	13	0.40	80 % B -10 % B/C
Paraloid B-44 en 25 % en acetona	< 5	< 0,16	87 % A/B - 13 % B
Evalcite 25 % en acetona	16	0.49	100 % C/Y
Paraloid B-72 25 % en downold PM	39	1.20	70 % B - 30 % A/B
Paraloid B-44 25 % en downold PM	25	0.77	85 % A/B - 15 % B
Evalcite 25 % en downold PM	< 5	< 0,16	99 % A/B - 1 % B
Paraloid B-72 25 % en etil acetato	20	0.62	93 % B - 7 % B/C
Paraloid B-44 25 % en etil acetato	47	1.45	100 % C/Y
Evalcite 25 % en etil acetato	31	0.96	85 % B - 15 % B/C
Paraloid B-72 25 % en butil acetato	22	0.68	95 % A/B - 5 % B
Paraloid B-44 25 % en butil acetato	< 5	< 0,16	97 % A/B - 3 % B
Evalcite 25 % en butil acetato	40	1.24	65 % B - 35 % A/B
Fluoline A	< 5	< 0,16	50 % B - 50 % A/B

pero disminuye la adherencia produciéndose la rotura entre el vidrio y el adhesivo (tipo A/B). En el Paraloid B-44 se registra una fuerza de tracción inicial de 18 Kgf con una adherencia escasa en la unión de la capa de adhesivo del vidrio (tipo A/B) pero tras la exposición al UV aumenta la fuerza de tracción (51 Kgf, la más alta registrada en este ensayo) y también aumenta la adherencia ocurriendo la rotura entre el ABS y el adhesivo epoxi (tipo C/Y). Y por último en el Evalcite, no hay cambios significativos entre el antes y el después, la fuerza de tracción es de 10 y 14 Kgf y la separación se produce entre el vidrio y el adhesivo siendo la adherencia escasa al separarse la capa de adhesivo casi por completo (tipo A/B).

- Etil acetato: en los adhesivos formados por este disolvente se han obtenido resultados similares. En el Paraloid B-72 se inicia con una fuerza de tracción de 16 Kgf y una adherencia media donde se produce la rotura en el adhesivo quedando dividido en dos (tipo B) y tras la exposición del UV la fuerza de tracción aumenta a 32 Kgf con una adherencia muy alta que provoca una rotura entre el ABS y el adhesivo epoxi (tipo C/Y). En el Paraloid B-44 con un fuerza de tracción inferior a 5 Kgf y una adherencia escasa con una rotura del 100 % entre el vidrio y el adhesivo (tipo A/B), se pasa tras la exposición al UV a una fuerza de tracción de 42 Kgf y una adherencia muy alta que provoca una rotura entre el ABS y el adhesivo epoxi (tipo C/Y). Y por último en el Evalcite, con un fuerza de tracción inferior de 13 Kgf y una adherencia escasa con una separación casi completa entre el vidrio y el adhesivo (tipo A/B), se pasa tras la exposición al UV a una fuerza de tracción de 31 Kgf y una adherencia muy alta que provoca una rotura entre el ABS y el adhesivo epoxi (tipo C/Y).
- Butil acetato: en los adhesivos formados por este disolvente también se han obtenido resultados diferentes. En el Paraloid B-72 se inicia con una fuerza de tracción de 18 Kgf y una adherencia media donde se produce la rotura en el adhesivo quedando dividido en dos (tipo B) y por la exposición del UV se pasa a una fuerza de tracción de 33 Kgf y a una adherencia muy alta que provoca una rotura entre el ABS y el adhesivo epoxi (tipo C/Y). En el Paraloid B-44 con un fuerza de tracción inicial de 16 Kgf y una adherencia muy alta que provoca una rotura entre el ABS y el adhesivo epoxi (tipo C/Y), se pasa tras la exposición al UV, a una fuerza de tracción de 30 Kgf y una adherencia muy alta que provoca una rotura entre el ABS y el adhesivo epoxi (tipo C/Y). Y por último en el Evalcite, con un fuerza de tracción inferior de 24 Kgf y una adherencia escasa con una separación 100 % entre el vidrio y el adhesivo (tipo A/B), tras la exposición al UV se pasa a una fuerza de tracción de 48 Kgf y una adherencia media que provoca una rotura en la capa del adhesivo quedando dividido en dos (tipo B).
- Fluoline A: Este compuesto presenta una fuerza de tracción antes y después de la exposición UV muy baja (inferior a 5) que se refleja en la poca adhe-

rencia inicial (A/B 100 %) pero que se ve aumentada tras el UV donde la rotura cambia de posición pasando a tipo B, rotura cohesiva del adhesivo.

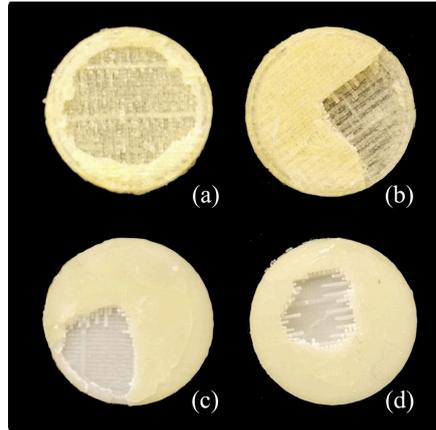


Figura 8.39: Daños producidos en el ABS expuesto a radiación ultravioleta cuando la rotura se produce en el adhesivo epoxi que une la sufridera.

Comparando los resultados de ambos filamentos encontramos similitudes en el comportamiento de los adhesivos: la fuerza de tracción antes de la exposición al UV muestran valores escasos (inferior a 5 Kgf) y medios (menos de 24 Kgf) y una adherencia escasa entre el vidrio y el adhesivo donde predominan las roturas del tipo A/B. Tras la exposición a la radiación UV (264 h) se ve un aumento en los valores de tracción, aunque se siguen obteniendo valores escasos y medios, se observan valores altos (superiores a 24) y la adherencia también aumenta disminuyendo el tipo de rotura A/B (siendo más numerosa en el filamento blanco) y apareciendo más casos donde la rotura se produce entre el ABS y el adhesivo epoxi (tipo C/Y) y pérdidas de material en el ABS (Fig. 8.39). Hay casos que no se ven influenciados por la radiación UV en los dos filamentos, como son el Fluoline A, el K60 y el Mowital en alcohol etílico que presentan los mismos valores antes y después. Y otros casos en donde la influencia de la radiación UV o más bien el calor producido durante la exposición han provocado la adhesión de las probetas al vidrio haciendo muy difícil el arranque, posiblemente debido a alguna reacción química entre el adhesivo y el ABS. Estos casos ocurren sobre todo en el filamento translúcido (*Clear*) donde los tipos de rotura C/Y son numerosos.

Tras la valoración de los datos se muestra como valores idóneos de fuerza de tracción entre 10 y 25 Kgf, que representan unos valores medios y el tipo de rotura correcta sería la B, es decir, en la capa de adhesivo ya que muestra una buena adherencia del adhesivo tanto en el vidrio como en el ABS donde el porcentaje

Tabla 8.8: Naturaleza de la rotura entre el vidrio, el adhesivo y el ABS (*Clear*) antes de la exposición a la radiación ultravioleta.

Adhesivo	Fuerza rotura(Kgf)	Tensión rotura (MPa)	Tipo rotura
K60 20 % en alcohol etílico	< 5 – 12	< 0,16 – 0,37	98 % A/B - 2 % B
Mowital 20 % en alcohol etílico	< 5 – 16	< 0,16 – 0,49	100 % A/B
Paraloid B-72 25 % en acetona	20	0.74	100 % C/Y
Paraloid B-44 25 % en acetona	15	0.46	80 % A/B - 20 % B
Evalcite 25 % en acetona	< 5 – 12	< 0,16 – 0,37	90 % A/B - 10 % B
Paraloid B-72 25 % en downold PM	10	0.31	65 % B - 35 % A/B
Paraloid B-44 25 % en downold PM	18	0.55	97 % A/B - 3 % B
Evalcite 25 % en downold PM	10	0.31	100 % A/B
Paraloid B-72 25 % en etil acetato	16	0.49	70 % B - 30 % B/C
Paraloid B-44 25 % en etil acetato	< 5	< 0,16	100 % A/B
Evalcite 25 % en etil acetato	13	0.40	97 % A/B - 3 % B
Paraloid B-72 25 % en butil acetato	18	0.55	60 % B - 40 % A/B
Paraloid B-44 25 % en butil acetato	16	0.49	100 % C/Y
Evalcite 25 % en butil acetato	24	0.74	100 % A/B
Fluoline A	< 5	< 0,16	100 % A/B

Tabla 8.9: Naturaleza de la rotura entre el vidrio, el adhesivo y el ABS (*Clear*) después de la exposición a la radiación ultravioleta.

Adhesivo	Fuerza rotura(Kgf)	Tensión rotura (MPa)	Tipo rotura
K60 20 % en alcohol etílico	< 5	< 0,16	50 % B - 50 % A/B
Mowital 20 % en alcohol etílico	< 5 – 16	< 0,16 – 0,49	90 % A/B - 10 % B
Paraloid B-72 25 % en acetona	29	0.89	98 % A/B - 2 % B/C
Paraloid B-44 25 % en acetona	< 5	< 0,16	30 % B - 70 % B/C
Evalcite 25 % en acetona	31	0.96	5 % B/C - 95 % B
Paraloid B-72 25 % en downold PM	30	0.94	98 % A/B - 2 % B
Paraloid B-44 25 % en downold PM	51	1.58	100 % C/Y
Evalcite 25 % en downold PM	14	0.43	95 % A/B - 5 % B
Paraloid B-72 25 % en etil acetato	32	0.99	100 % C/Y
Paraloid B-44 25 % en etil acetato	42	1.30	100 % C/Y
Evalcite 25 % en etil acetato	31	0.96	100 % C/Y
Paraloid B-72 25 % en butil acetato	33	1.02	100 % C/Y
Paraloid B-44 25 % en butil acetato	30	0.94	100 % C/Y
Evalcite 25 % en butil acetato	48	1.48	35 % B - 65 % B/C
Fluoline A	< 5 – 12	< 0,16 – 0,37	50 % B -50 % A/B

Tabla 8.10: Naturaleza de la rotura entre el vidrio, el adhesivo y el ABS.

Filamento	Capa	Tensión rotura	Tipo rotura
<i>Clear</i> (antes)	pintura+adhesión	<0.16	88 % A/B - 12 % B
	pintura	<0.16	85 % A/B - 15 % B
<i>Clear</i> (después)	pintura+adhesión	<0.16	88 % A/B - 12 % B
	pintura	<0.16	60 % B/C - 40 % B
<i>White</i> (antes)	pintura+adhesión	<0.16	86 % A/B - 14 % B
	pintura	<0.16	95 % A/B - 5 % B
<i>White</i> (después)	pintura+adhesión	<0.16	91 % A/B - 9 % B
	pintura	<0.16	89 % A/B - 11 % B/Y

estaría entre 25 % y 75 % de separación del adhesivo en cada lado. Dentro de estos rangos el adhesivo más idóneo sería el Paraloid B-72 al 25 % en downald PM.

Caracterización de la adherencia entre el ABS y el recubrimiento de pintura

En cuanto a los arranques entre el ABS y el recubrimiento de pintura, los diferentes tipos de rotura se pueden ver en la tabla 8.5. Los resultados (Tab 8.10) muestran que los valores obtenidos antes y después de la exposición UV y con *medium* y sin *medium* presentan una fuerza de tracción inferior a 5 Kgf y las roturas producidas son de tipo A/B a excepción de una del tipo B/C (probeta *Clear* tras el UV con capa de pintura pura). La presencia del *medium* no mejora (ni empeora) la adherencia de la capa de recubrimiento. La adherencia presentada por esta pintura parece suficiente para su función a pesar de su baja adherencia.

Durante los arranques se ha observado que tras la exposición a la radiación UV de la capa de pintura (sin *medium*), tanto en el filamento blanco (*White*) como translúcido (*Clear*), el recubrimiento de pintura quedaba adherido en su gran mayoría a la superficie del ABS, es decir, no se arranca, al contrario de lo que pasaba en las demás probetas donde el recubrimiento se separa de la superficie y queda adherido a la sufridera (Fig. 8.40). Para conocer con exactitud que ha ocurrido habría que analizar las probetas, pero se cree que pudo ser provocado por alguna reacción química entre el recubrimiento y la superficie del ABS producida por el calor durante el ciclo de exposición UV.

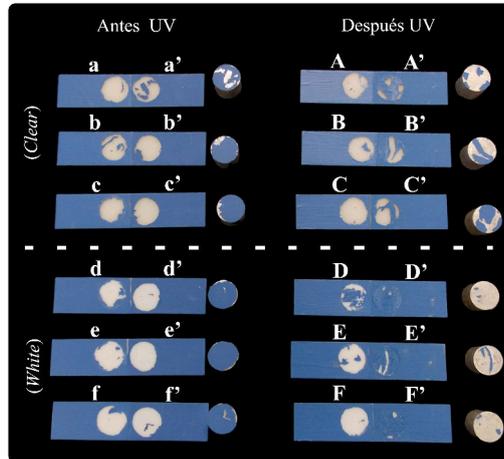


Figura 8.40: Probetas de ABS con capa pictórica tras el ensayo de adherencia, donde se puede ver los restos de pintura que se quedan en la superficie del ABS y en la superficie de la sufridera.

8.5 Ensayo 4. Medición del pH

La conservación del vidrio arqueológico depende, en gran medida, de los factores medioambientales que lo rodean y de las reacciones desencadenantes influenciadas por el factor del pH presente. El vidrio arqueológico se ve afectado por el pH tanto si son soluciones básicas (de pH 9 o más) como ácidas (de pH 5 o menos). Por eso en el proceso de restauración es fundamental conocer el pH de los materiales que van a ser utilizados, en este caso se han testado los adhesivos y los filamentos seleccionados. Como estos dos materiales están en estado sólido se ha obtenido el pH del extracto acuoso. Para ello hemos realizado un test basado en la norma BS4971, 2002 que aparece en Thickett y Lee (2004). Este método mide el pH sumergiendo un peso conocido de la muestra en un volumen conocido de agua durante un tiempo determinado. La calidad del agua es importante, se recomienda agua destilada o desionizada. Dentro de ese agua, una vez pasado el tiempo, se sumerge el electrodo o el papel indicador de pH. Se recomienda que el pH de los materiales que entran en contacto con objetos de vidrio arqueológico debería estar entre 5.5 y 8.5.

El proceso que se ha seguido para realizar este ensayo ha sido el siguiente:

- Utilización de agua desionizada con un grado de pureza de $1\mu S/cm$ y un valor de pH de 6,24 a temperatura ambiente.

Tabla 8.11: Resultados de pH de los filamentos.

Muestra	pH	Temperatura
White	6,22	20, 5°C
White extruido	6,3	20, 7°C
Clear	6,17	20, 3°C
Clear extruido	6,25	20, 5°C

- Inmersión de 1 gr de muestra, seccionada en pequeños fragmentos, en 50 ml de agua desionizada durante una hora.
- Utilización de un baño de ultrasonido durante la etapa de inmersión para acelerar el proceso de extracción.
- Filtración del agua para separar las muestras sólidas.
- Determinación del pH del agua utilizando un Tester medidor de pH HI 98130 Combo Waterproof, con un rango de 0.00 a 14.00 pH, con una resolución de 0.01 pH y una precisión (a 20°C) de $\pm 0,05$ pH.
- Realización de 3 medidas en cada muestra para la obtención del valor medio.

8.5.1 Resultados y discusión

En cuanto a los filamentos los resultados obtenidos muestran unos valores de pH próximos a 6,2 en todas las muestras ensayadas (tabla 8.11) no produciéndose ningún cambio tras la extrusión del filamento. Teniendo en cuenta que 6,24 es el valor inicial, las variaciones no son significativas. La medición del pH también se llevó a cabo, de manera complementaria en los filamentos, con tiras indicadoras de pH por cambio de color (Fig. 8.41 y 8.42) que muestran unos valores de 6 unidades por comparación de color con la escala estándar.

En el caso de los adhesivos los valores obtenidos muestran una ligera acidez en relación al valor del agua inicial. Esta variación no es significativa y se encuentran dentro del rango idóneo.

En resumen, los resultados muestran que los filamentos y los adhesivos presentan unos valores de pH extraídos dentro del rango idóneo.

Tabla 8.12: Resultados del pH de los adhesivos.

Adhesivo	pH	Temperatura
K60 20 % en alcohol etílico	5,6	20,6°C
Mowital 20 % en alcohol etílico	5,8	20,4°C
Paraloid B-72 en 25 % en acetona	5,8	20,5°C
Paraloid B-44 en 25 % en acetona	5,8	20,2°C
Evalcite 25 % en acetona	5,3	20,4°C
Paraloid B-72 25 % en downold PM	5,9	20,3°C
Paraloid B-44 25 % en downold PM	5,7	20,3°C
Evalcite 25 % en downold PM	5,4	20,7°C
Paraloid B-72 25 % en etil acetato	5,9	20,3°C
Paraloid B-44 25 % en etil acetato	5,1	20,1°C
Evalcite 25 % en etil acetato	5,0	20,4°C
Paraloid B-72 25 % en butil acetato	5,7	20,6°C
Paraloid B-44 25 % en butil acetato	5,4	20,2°C
Evalcite 25 % en butil acetato	5,5	20,6°C
Fluoline A	5,6	20,4°C

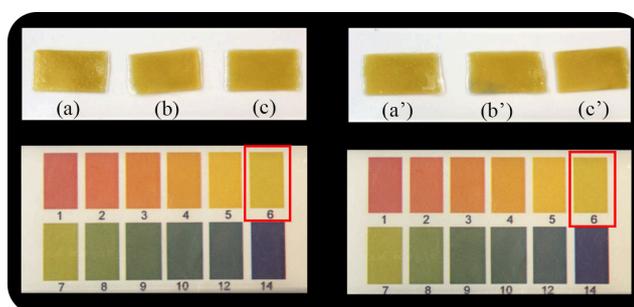


Figura 8.41: Resultados obtenidos con las tiras de indicadores de pH en la caracterización del filamento blanco (*White*). En la línea superior aparecen las medidas del filamento sin extruir (a,b,c), y las medidas del filamento extruído (a',b',c') y en la línea de abajo las escalas de color comparativas para saber el pH obtenido, en este caso pH 6 (cuadrado rojo).

8.6 Ensayo 5. Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR de sus siglas en inglés), ofrece oportunidades casi ilimitadas para la caracterización de polímeros

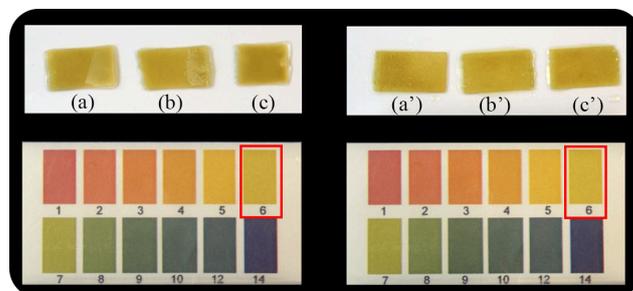


Figura 8.42: Resultados obtenidos con las tiras de indicadores de pH en la caracterización del filamento translúcido (*Clear*). En la línea superior las medidas del filamento sin extruir (a,b,c), y las medidas del filamento extruido (a',b',c') y en la línea de abajo las escalas de color comparativas para saber el pH obtenido, en este caso pH 6 (cuadrado rojo).

y aditivos. Las ventajas son: realiza tanto análisis cualitativo como cuantitativo muy rápido y fácil. Se basa en la interacción entre la materia y la radiación electromagnética de longitud de onda en la región del infrarrojo ($0,7- 1000\mu m$). La radiación electromagnética infrarroja produce cambios vibracionales y rotatorios en la molécula que forma la estructura química de la sustancia analizada donde cada espectro obtenido es único en cada sustancia (Naranjo *et al.*, 2008).

Esta técnica se ha utilizado para determinar la naturaleza de los plásticos y evaluar los cambios experimentados como consecuencia de la acción de la radiación UV. Para ello, se ha empleado un equipo Vertex 70, Bruker Optics, con sistema de reflexión total atenuada (ATR de sus siglas en inglés) y con un detector FR-DTGS con recubrimiento para estabilización de temperatura⁸. Número de barridos acumulados: 32, resolución: 4 cm⁻¹.

8.6.1 Preparación de muestras

Las muestras seleccionadas para este ensayo fueron 8 probetas, 4 de cada filamento (*White* y *Clear*), donde la mitad fue sometida a una tratamiento de superficie con papeles abrasivos y microtorno y expuesta a radiación ultravioleta. En resumen:

- Muestra ABS *White* sin tratamiento superficial y sin exposición al UV (W.0.0)
- Muestra ABS *White* sin tratamiento superficial y con exposición al UV (W.1.0)

⁸El ensayo fue realizado por el Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio, en la Universitat Politècnica de València

- Muestra ABS *White* con tratamiento superficial y sin exposición al UV (W.0.1)
- Muestra ABS *White* con tratamiento superficial y con exposición al UV (W.1.1)
- Muestra ABS *Clear* sin tratamiento superficial y sin exposición al UV (C.0.0)
- Muestra ABS *Clear* sin tratamiento superficial y con exposición al UV (C.1.0)
- Muestra ABS *Clear* con tratamiento superficial y sin exposición al UV (C.0.1)
- Muestra ABS *Clear* con tratamiento superficial y con exposición al UV (C.1.1)

En la figura 8.43, se pueden ver las probetas utilizadas.

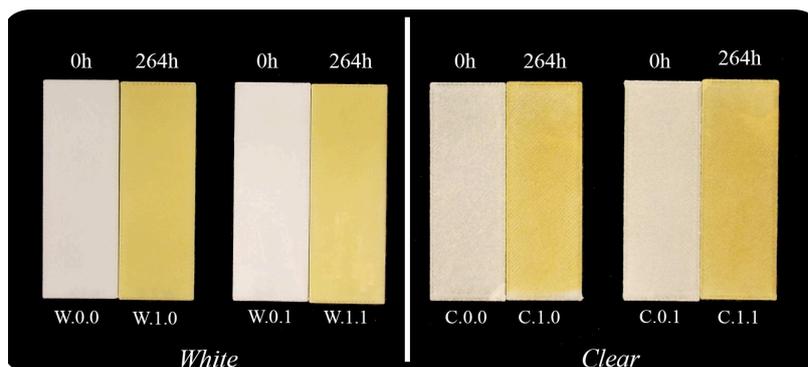


Figura 8.43: Probetas realizadas para su análisis por FTIR: a la izquierda el filamento *White* (el primer grupo ha recibido tratamiento superficial y el segundo no y en cada uno la probeta de la derecha ha sido expuesta a radiación UV) y a la derecha el filamento *Clear* (el primer grupo ha recibido tratamiento superficial y el segundo no y en cada uno la probeta de la derecha ha sido expuesta a la radiación UV).

8.6.2 Resultados y discusión

En la tabla 8.13, perteneciente a los datos del filamento *White*, el análisis espectroscópico de las probetas de ABS ha evidenciado bandas de absorción características del estireno, del butadieno y del acrilonitrilo, las tres fases constituyentes de este polímero. De la misma manera para las anteriores probetas, los cambios observados tras la exposición a la radiación UV son:

- Ensanchamiento de la banda a $\approx 1722 \text{ cm}^{-1}$, e incremento de la intensidad de la banda a $\approx 3440 \text{ cm}^{-1}$, que se relacionan con la formación de especies

Tabla 8.13: Asignación de las bandas de las probetas del filamento *White*.

Banda (cm^{-1})	Asignación	Componente
3059	ν anillo aromático	Estireno
3025	ν anillo aromático	Estireno
2918	ν_{as} C-H del grupo CH_2	Vinilbutadieno
2235	ν_s C-H del grupo CH_2	Vinilbutadieno
1723	ν C-O de grupos carbonilo	Aditivos estabilizantes frente al tratamiento térmico
1600	ν anillo aromático	Estireno
1582	ν anillo aromático	Estireno
1492	ν anillo aromático	Estireno
1451	ν anillo aromático	Estireno
1181	ν anillo aromático	Estireno
1155	ν anillo aromático	Estireno
1069	ν anillo aromático	Estireno
1027	ν anillo aromático	Estireno
964	ω CH	Trans-butadieno
909	ωCH_2	Vinil butadieno/Estireno
757	ωCH_2 anillo aromático	Estireno
697		

de tipo hidroperóxido, por procesos de oxidación inducidos por la acción de la radiación UV.

- Disminución significativa de la intensidad de las bandas a 964 y 906 cm^{-1} , que se asocia a rupturas de cadenas y entrecruzamientos de la microestructura de la fase butadieno.

De la figura 8.44 a la 8.47 se muestran los espectros infrarrojos del filamento *White*.

En cuanto a los resultados del filamento *Clear*, se pueden observar en la tabla 8.14 la caracterización mediante espectroscopía infrarroja en modo ATR de las probetas de ABS con referencia C, han puesto de relieve la presencia en los espectros infrarrojos de bandas asociadas a vibraciones características del estireno y del butadieno, dos de las principales fases integrantes de este tipo de polímero, mientras que no se detectaron bandas significativas asociadas al acrilonitrilo. Cabe destacar, la banda prominente relativa a compuestos con grupos carbonilos, que podrían asociarse a la presencia de aditivos estabilizadores frente a la temperatura. El estudio comparativo del espectro infrarrojo correspondiente a la resina antes y después de la exposición a la radiación UV, ha puesto en evidencia cambios significativos en algunas de las bandas:

8.6 Ensayo 5. Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier

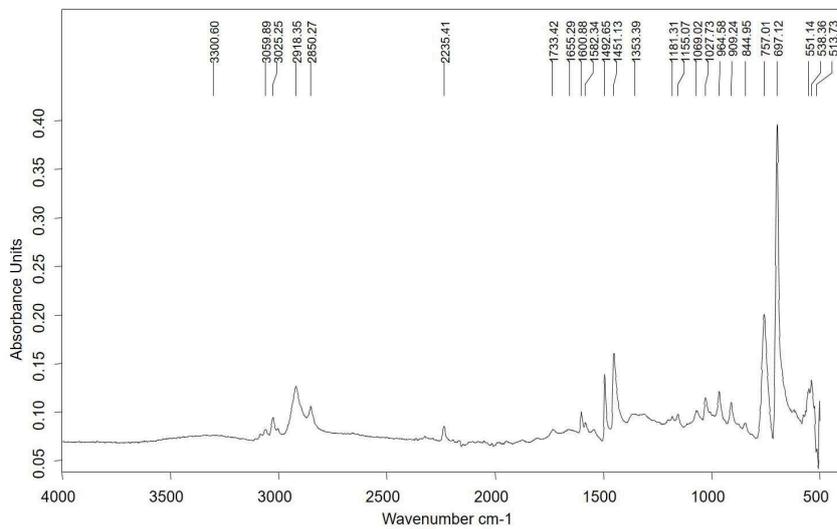


Figura 8.44: Espectro infrarrojo de la muestra W.0.0 (sin tratamiento superficial y sin exposición al UV).

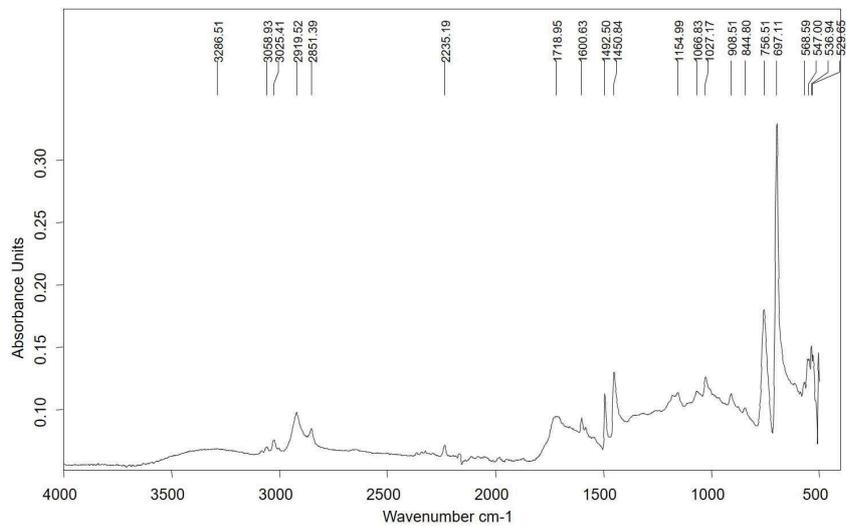


Figura 8.45: Espectro infrarrojo de la muestra W.1.0 (sin tratamiento superficial y con exposición al UV).

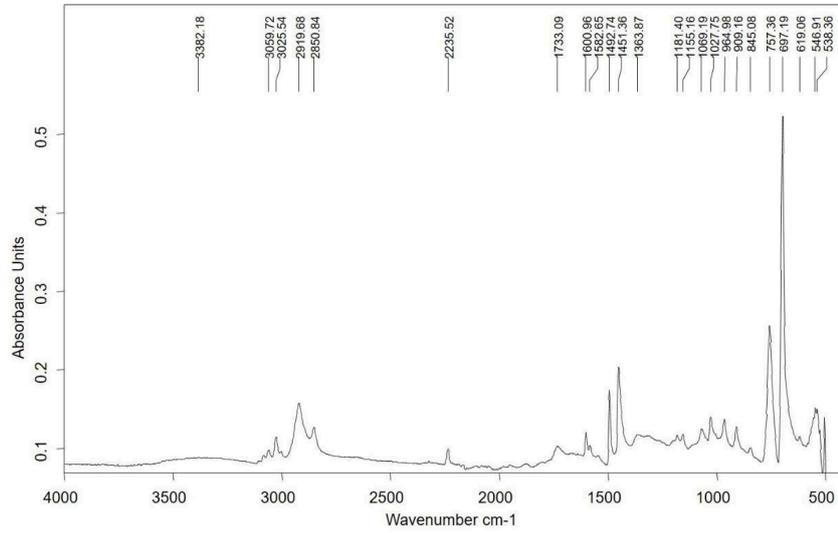


Figura 8.46: Espectro infrarrojo de la muestra W.0.1 (con tratamiento superficial y sin exposición al UV).

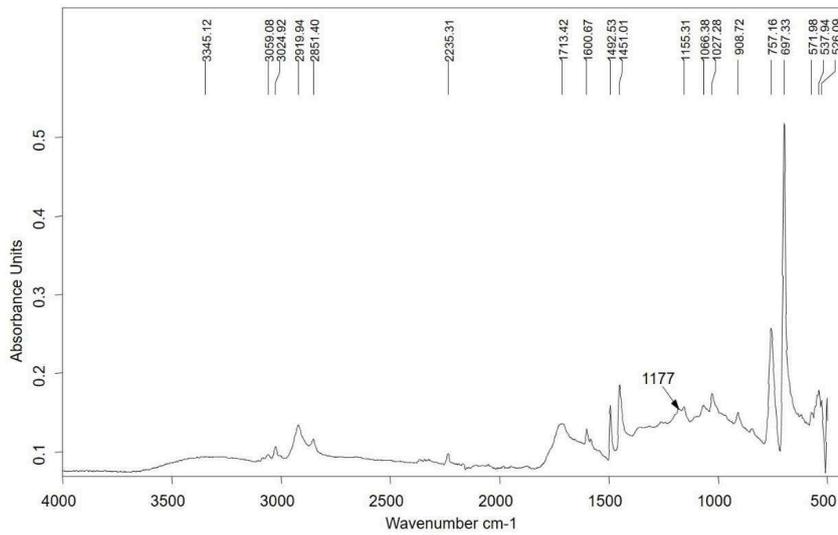


Figura 8.47: Espectro infrarrojo de la muestra W.1.1 (con tratamiento superficial y con exposición al UV).

- Ensanchamiento de la banda a $\approx 1722 \text{ cm}^{-1}$, e incremento de la intensidad de la banda a $\approx 3470 \text{ cm}^{-1}$, que se relacionan con la formación de especies de tipo hidropéroxido, por procesos de oxidación inducidos por la acción de la radiación UV.
- Disminución significativa de la intensidad de las bandas a 964 y 909 cm^{-1} , que se asocia a rupturas de cadenas y entrecruzamientos de la microestructura de la fase butadieno.

En lo que respecta a las probetas antes y después del tratamiento superficial, los espectros infrarrojos no han mostrado cambios significativos.

De la figura 8.48 a la 8.51 se muestran los espectros infrarrojos del filamento *Clear*.

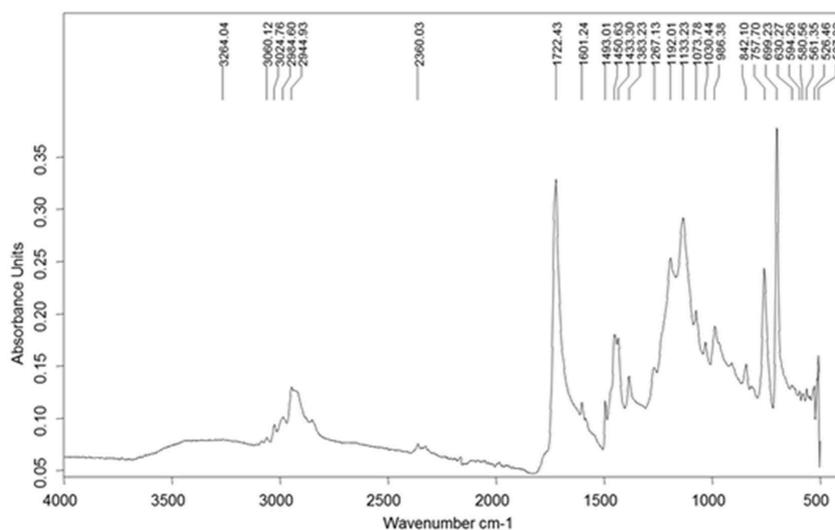


Figura 8.48: Espectro infrarrojo de la muestra C.0.0 (sin tratamiento superficial y sin exposición al UV).

Tabla 8.14: Asignación de las bandas de las probetas del filamento *Clear*.

Banda (cm^{-1})	Asignación	Componente
3103	ν C-H del anillo	Estireno
3083	ν C-H del anillo	Estireno
3060	ν C-H del anillo	Estireno
3024	ν C-H del anillo	Estireno
2985	ν_{as} C-H del grupo CH_2	Vinilbutadieno
2944	ν_{as} C-H del grupo CH_2	Vinilbutadieno
2847	ν_{as} C-H del grupo CH_2	Vinilbutadieno
1723	ν C-O de grupos carbonilo	Aditivos estabilizantes frente al tratamiento térmico
1601	ν anillo aromático	Estireno
1723	ν anillo aromático	Estireno
1601	ν anillo aromático	Estireno
1493	δ C-H del grupo CH_2	Trans-butadieno
1450	ν C-H, C-O y C-C	Aditivos estabilizantes frente al tratamiento térmico
1433	ν C-H, C-O y C-C	Aditivos estabilizantes frente al tratamiento térmico
1383	ν C-H, C-O y C-C	Aditivos estabilizantes frente al tratamiento térmico
1268	ν C-H, C-O y C-C	Aditivos estabilizantes frente al tratamiento térmico
1192	ν C-H, C-O y C-C	Aditivos estabilizantes frente al tratamiento térmico
1133	ν C-H, C-O y C-C	Aditivos estabilizantes frente al tratamiento térmico
1074	ν C-H, C-O y C-C	Aditivos estabilizantes frente al tratamiento térmico
1030	ν C-H, C-O y C-C	Aditivos estabilizantes frente al tratamiento térmico
987	ν C-H, C-O y C-C	Aditivos estabilizantes frente al tratamiento térmico
964	ω CH	Trans-butadieno
909	ωCH_2	Vinil butadieno/Estireno
757	ωCH_2 anillo aromático	Estireno
698		

8.6 Ensayo 5. Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier

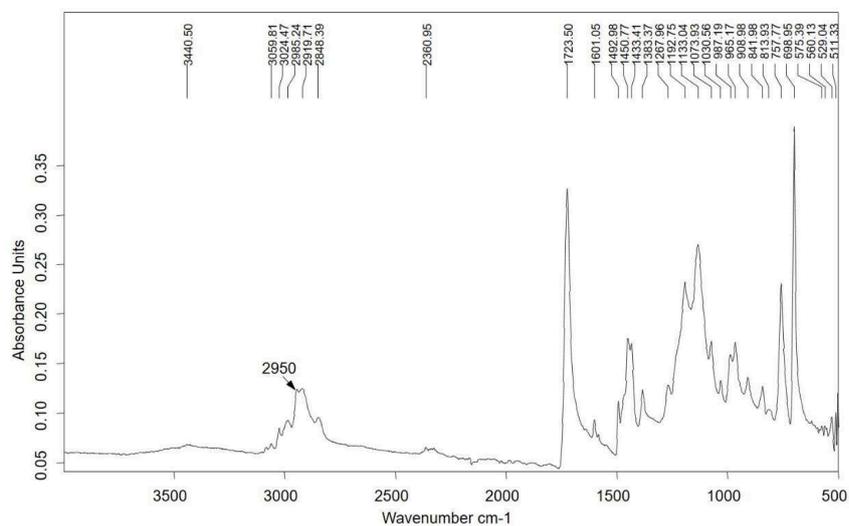


Figura 8.49: Espectro infrarrojo de la muestra C.0.1 (sin tratamiento superficial y con exposición al UV).

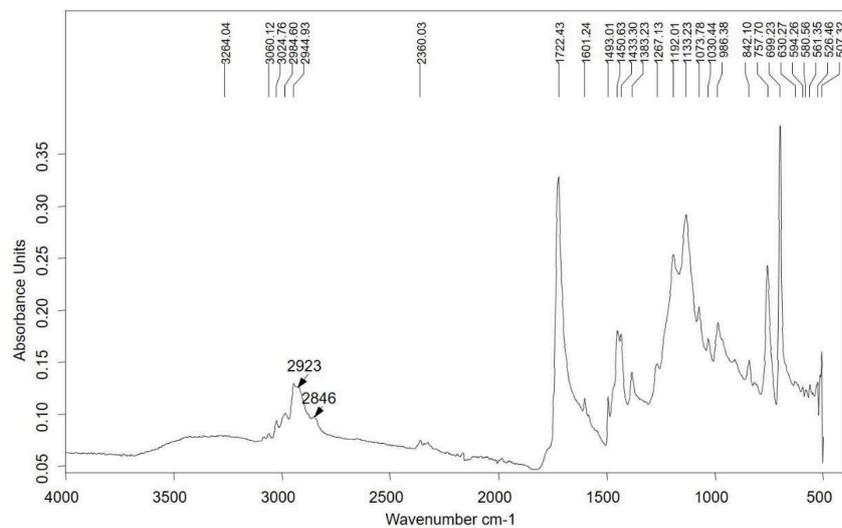


Figura 8.50: Espectro infrarrojo de la muestra C.1.0 (con tratamiento superficial y sin exposición al UV).

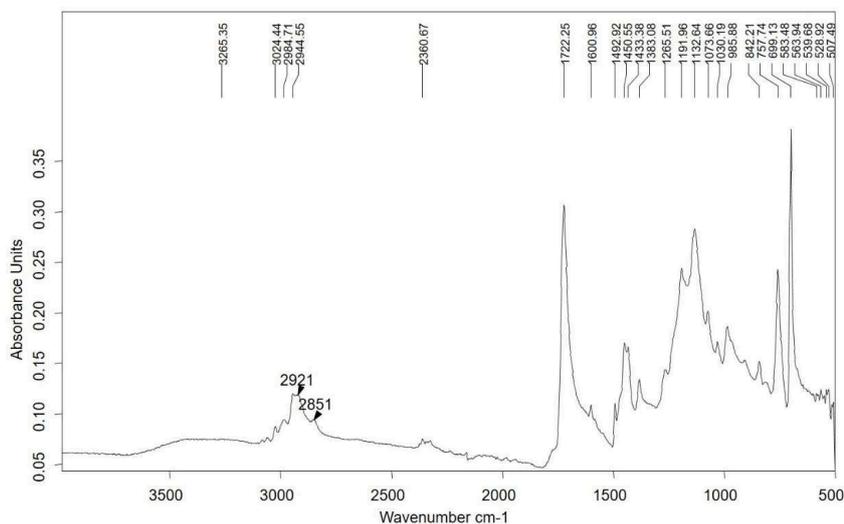


Figura 8.51: Espectro infrarrojo de la muestra C.1.1 (con tratamiento superficial y con exposición al UV).

8.7 Ensayo 6. Oddy test

Se trata de un ensayo de envejecimiento acelerado que determina la interacción que se establece entre el material seleccionado con un metal patrón. Se realiza para detectar la presencia de compuestos orgánicos volátiles (VOCs) que emanan de los materiales testados y producen una corrosión en los metales. Estos compuestos son productos químicos orgánicos que tienen una presión de vapor relativamente alta. Estas emisiones pueden tener un efecto perjudicial sobre los objetos patrimoniales al provocar una reacción química que causa degradación. Es importante detectar estas emisiones para evitar concentraciones dentro de espacios cerrados como embalajes, vitrinas o armarios (Samide y Smith, 2015). La estabilidad de los materiales en museos se evalúa con el Oddy test. Desde su desarrollo a principios de 1970 por Dr. Andrew Oddy en el British Museum, el protocolo ha ido variado introduciendo ciertas mejoras, aunque su planteamiento inicial se ha conservado. Consiste en exponer la muestra a temperatura constante de 60°C durante 28 días dentro de un frasco sellado. Junto a la muestra se colocan tres tiras de metal (plata, cobre y plomo), que se mostrarán sensibles a los VOCs permitiendo detectar así su presencia, y una pequeña cantidad de agua para saturar el ambiente (Aray Monaserio e Icaza Toro, 2016).

8.7.1 Preparación de muestras

Este ensayo se llevó a cabo siguiendo el protocolo '*3 in 1' accelerated corrosion test* descrito en Thickett y Lee (2004). Se han utilizado tiras de plata de 99 % de pureza, cobre de 99 % de pureza y plomo de 97 % de pureza. Se han cortado los metales con unas medidas de 35 x 10 x 0.1 mm. Posteriormente se ha eliminado la corrosión superficial que pudiese estar presente limpiando las tiras mecánicamente haciendo una ligera fricción con lápices de fibra de vidrio. Por último, se ha desengrasado la superficie haciendo una inmersión en acetona. Las tres tiras de metal se han introducido dentro de un tubo de ensayo de vidrio, practicando tres ranuras en la base estrecha del tapón de silicona utilizado como cierre. La tira de plomo ha quedado en medio y se ha evitado el contacto entre ellas (Fig. 8.52). En el fondo del tubo se han colocado 2 gr de muestra y un capilar con 0.8 ml de agua desionizada con un pequeño tapón de algodón (Fig. 8.53). La muestra patrón también se introduce dentro de un tubo con el capilar de agua pero sin material a testar. Los tubos fueron colocados en una gradilla metálica y colocados en el interior de una estufa de desecación por aire Digitronic.



Figura 8.52: Tapón de silicona con los tres metales para el Oddy test. De izquierda a derecha: cobre, plomo y plata. Los metales se introducen en unas ranuras practicadas en el interior del tapón, quedando las tiras lo suficientemente separadas para no entrar en contacto.

Transcurridos los 28 días los metales se extraen y se comparan con la muestra patrón. Es necesario observar cambios en el brillo, color o textura. Los VOCs que atacan a cada metal son: los sulfatos, los ácidos orgánicos y clorados al cobre, los sulfatos a la plata y los ácidos orgánicos al plomo.



Figura 8.53: Tubos de ensayo sellados con tapón de silicona. En su interior se puede ver: el material a testar junto al capilar con el agua y su tapón de algodón. Las tiras de metal se encuentran en la parte alta, parcialmente introducidas en los tapones de silicona.

8.7.2 Resultados y discusión

El nivel de corrosión de las tiras se analizó comparando estos metales con las muestras de control y asignando a los resultados el uso que se debe hacer con ellos.⁹

- Permanente (P): El material testado no emite VOCs o lo hace en cantidades que no afectarían a los objetos dentro de un espacio cerrado. Las tiras de metal no presentan cambios tras el test.
- Temporal (T): El material testado emite VOCs pero en pequeñas cantidades por lo que hay que controlar el ambiente en los espacios cerrados. Las tiras de metal presentan un cambio ligero de color.
- Inadecuado (I): El material testado emite VOCs en cantidades que pueden afectar a los objetos en espacios cerrados. Las tiras de metal presentan corrosión y pérdida de brillo.

Hay que tener en cuenta que en la muestra control de cobre suelen aparecer iridiscencias de color naranja o rojo debido a la oxidación por la presencia de agua como se explica en Thickett y Lee (2004).

⁹La clasificación de los resultados en estos tres grupos se hace a partir de la normativa del British Museum: P (Pass-Suitable for permanent use), T (Temporary- Suitable for temporary use, less than six months, U (Fail- Unsuitable, do not use).

En los adhesivos formados con alcohol etílico (Fig. 8.54) las tiras de plata no presentan ningún cambio respecto a la muestra patrón. En las tiras de cobre la corrosión se detecta por la presencia de manchas anaranjadas y pardas oscuras. Por último, la tira de plomo presenta diferentes estados. En el adhesivo formulado con Mowital la tira de plomo se mantienen inalteradas, en cambio en el adhesivo con K60 en la superficie del plomo se detecta una corrosión rojiza y puntos blancos.

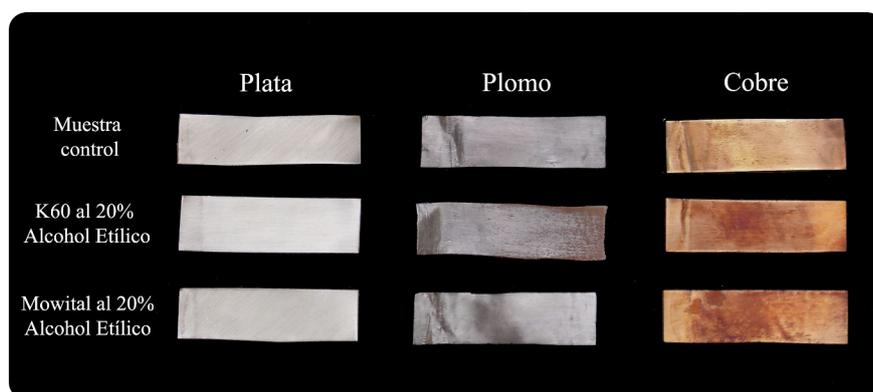


Figura 8.54: Muestras metálicas (plata, plomo y cobre) correspondientes al ensayo de adhesivos formulados con alcohol etílico. En la primera línea se encuentran las muestras control, en la segunda los resultados del adhesivo K60 al 20% en alcohol etílico y en la tercera línea el adhesivo Mowital al 20% en alcohol etílico.

En los adhesivos cuyo disolvente es la acetona (Fig. 8.55), las tiras de plata no se alteran, las tiras de plomo si presentan cambios aunque solamente en dos de los tres casos ensayados: con el Paraloid B-44, aparece una corrosión oscura y con el Evalcite se ha formado una capa blanca granulada. Por último, las muestras de cobre, en los tres casos, presentan manchas oscuras muy parecidas a la muestra control.

En los adhesivos que contienen downald PM como disolvente las tiras de metal se mantienen inalteradas a excepción de las manchas anaranjadas del cobre, que coinciden con las manchas de la muestra patrón, y la presencia de una corrosión oscura presente en el plomo en el caso del adhesivo Paraloid B-72 (Fig. 8.56).

En los adhesivos con etil acetato las tiras de plata no presentan ningún tipo de alteración, las tiras de cobre presentan una tonalidad anaranjada y las tiras de plomo presentan una corrosión oscura presente en el Paraloid B-44 y en el Evalcite, con el Paraloid B-72 aparece una corrosión blanca y de textura granulada aunque de dimensiones menores (Fig. 8.57). En los adhesivos con butil acetato las tiras de plata no presentan alteraciones, las tiras de plomo si presentan corrosión oscura y con el Paraloid B-44 también presenta una corrosión rojiza; y las tiras de cobre,

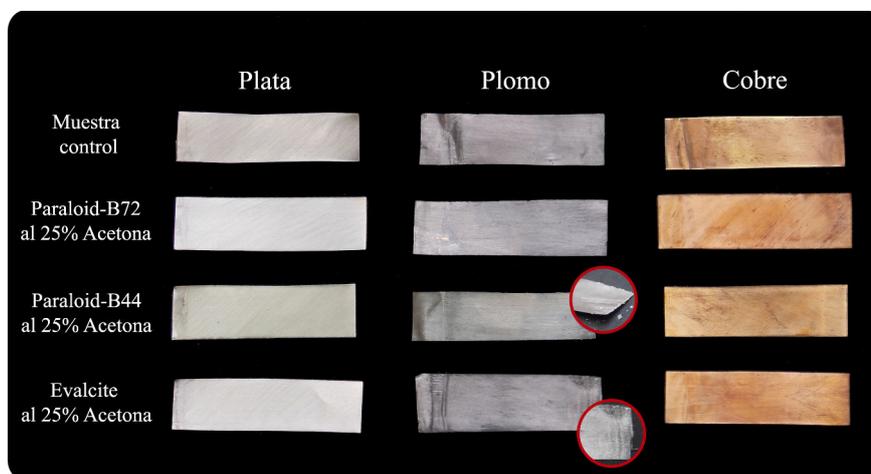


Figura 8.55: Muestras metálicas (plata, plomo y cobre) correspondientes al ensayo de adhesivos formulados con acetona. En la primera línea se encuentran las muestras control, en la segunda los resultado del adhesivo Paraloid-B72 al 25 % en acetona, en la tercera línea el adhesivo Paraloid B-44 al 25 % en acetona y en la última línea el adhesivo Evalcite al 25 % en acetona. El círculo rojo muestra un *zoom* de la corrosión.

además de la coloración naranja, presentan manchas muy destacadas de color naranja-rojo y tono oscuro (Fig. 8.58). Por último, el adhesivo Fluoline A muestra como resultado que la plata y el plomo no presentan ninguna alteración y el cobre muestra una corrosión parecida como en la muestra control.

La tabla 8.15 muestra las valoraciones del uso que se debe hacer con estos adhesivos según los resultados del Oddy test.

En general, todos los adhesivos testados se pueden utilizar controlando el ambiente en espacios cerrados. Los adhesivos que se muestran como seguros en ambiente de museo y que pueden llegar a utilizarse de forma permanente en ambientes cerrados son: el Paraloid B-72 en 25 % en acetona, el Paraloid B-44 25 % en downold PM, el Evalcite 25 % en downold PM y el Fluoline A, donde todos los metales han permanecido inalterados. Los adhesivos peor valorados son: el K60 20 % en alcohol etílico donde el plomo y el cobre presentan una corrosión notable y el Paraloid B-44 25 % en butil acetato con una corrosión muy destacada en el plomo y el Mowital al 20 % en alcohol etílico con una corrosión en el cobre muy destacable.

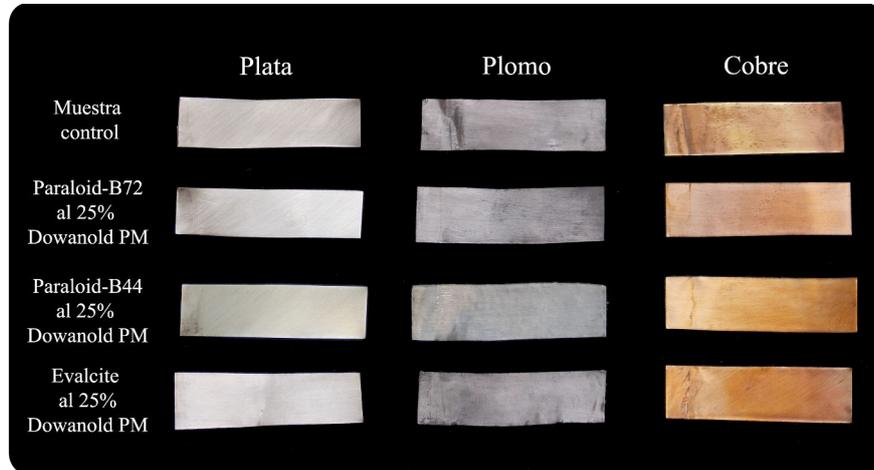


Figura 8.56: Muestras metálicas (plata, plomo y cobre) correspondientes al ensayo de adhesivos formulados con downold PM. En la primera línea se encuentran las muestras control, en la segunda los resultado del adhesivo Paraloid-B72 al 25 % en downold PM, en la tercera línea el adhesivo Paraloid B-44 al 25 % en downold PM y en la última línea el adhesivo Evalcite al 25 % en downold PM.

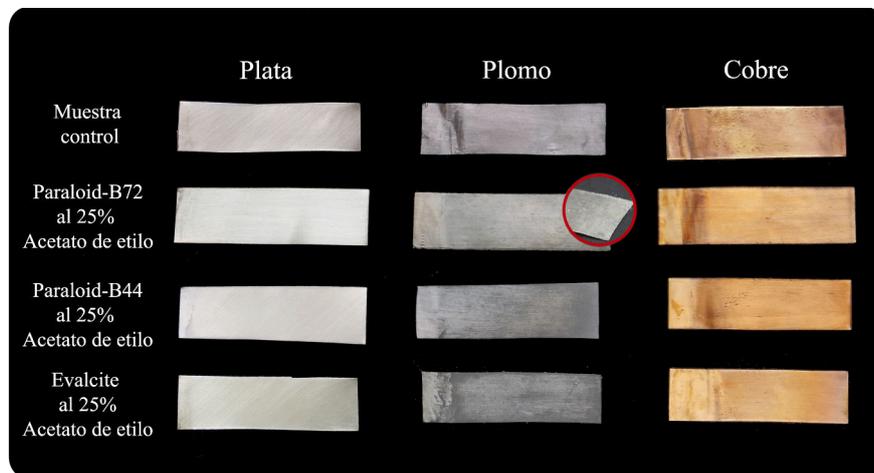


Figura 8.57: Muestras metálicas (plata, plomo y cobre) correspondientes al ensayo de adhesivos formulados con etil acetato. En la primera línea se encuentran las muestras control, en la segunda los resultado del adhesivo Paraloid-B72 al 25 % en etil acetato, en la tercera línea el adhesivo Paraloid B-44 al 25 % en etil acetato y en la última línea el adhesivo Evalcite al 25 % en etil acetato. El círculo rojo muestra un *zoom* de la corrosión.

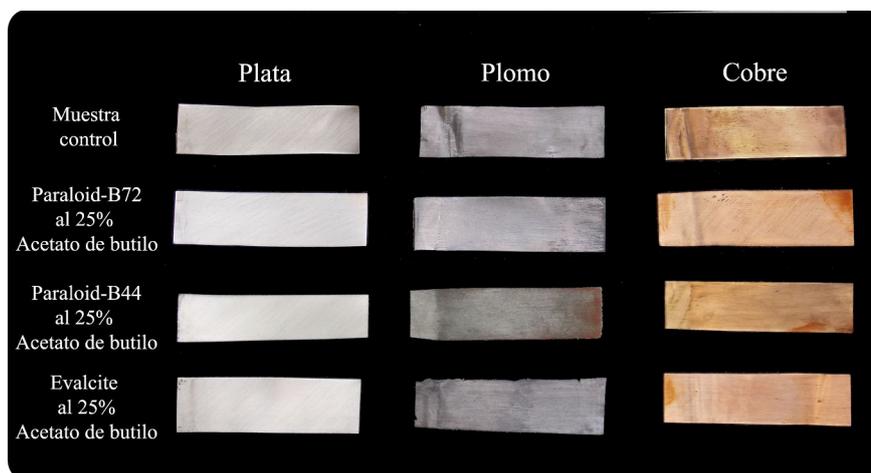


Figura 8.58: Muestras metálicas (plata, plomo y cobre) correspondientes al ensayo de adhesivos formulados con butil acetato. En la primera línea se encuentran las muestras control, en la segunda los resultados del adhesivo Paraloid-B72 al 25 % en butil acetato, en la tercera línea el adhesivo Paraloid B-44 al 25 % en butil acetato y en la última línea el adhesivo Evalcite al 25 % en butil acetato.



Figura 8.59: Muestras metálicas (plata, plomo y cobre) correspondientes al ensayo de adhesivos formulados con Fluoline A. En la primera línea se encuentran las muestras control y en la segunda los resultados del adhesivo Fluoline A.

Tabla 8.15: Valoración de los adhesivos según el Oddy test.

Adhesivo	Plata	Plomo	Cobre
K60 20 % en alcohol etílico	P	I	I
Mowital 20 % en alcohol etílico	P	P	I
Paraloid B-72 en 25 % en acetona	P	P	P
Paraloid B-44 en 25 % en acetona	P	T	P
Evalcite 25 % en acetona	P	T	P
Paraloid B-72 25 % en dowanold PM	P	T	P
Paraloid B-44 25 % en dowanold PM	P	P	P
Evalcite 25 % en dowanold PM	P	P	P
Paraloid B-72 25 % en etil acetato	P	T	P
Paraloid B-44 25 % en etil acetato	P	T	P
Evalcite 25 % en etil acetato	P	T	P
Paraloid B-72 25 % en butil acetato	P	T	T
Paraloid B-44 25 % en butil acetato	P	I	T
Evalcite 25 % en butil acetato	P	T	T
Fluoline A	P	P	P

Capítulo 9

Conclusiones

En esta tesis se han aplicado las nuevas tecnologías 3D en procesos de conservación y restauración de vidrio arqueológico, mostrando que su introducción en este campo es aplicable y posible. De este modo, se han obtenido los modelos 3D de 5 objetos de vidrio hueco con diferentes tipos de corrosión, formas y espesores: *Cuenco 1*, *Cuenco 2*, *Plato*, *Botella* y *Lámpara*, para operar con ellos en sustitución de los objetos originales que experimentan una excesiva manipulación y riesgo durante estos procesos.

Los modelos 3D se han conseguido capturar después de solucionar la problemática existente sobre la incompatibilidad del uso del escáner láser 3D de triangulación sobre las superficies transparentes, reflexivas/refractivas y brillantes características del vidrio. Este inconveniente se ha resuelto utilizando un producto muy conocido en conservación y restauración: el ciclododecano. El ciclododecano (CCD) utilizado en su versión en aerosol crea una capa blanca, opaca y fina sobre la superficie del vidrio que permite su adquisición con un escáner láser 3D de triangulación. El uso del CCD ha posibilitado, de este modo, la captura de 4 de los objetos de vidrio estudiados reduciendo la interferencia de datos introducidos en todos los casos. Por otro lado, la metodología experimental llevada a cabo ha permitido determinar que el error introducido, al aplicar esta capa, no es significativo. De manera paralela, se han podido determinar los cambios en la velocidad de sublimación en función de la superficie sobre la que se ha aplicado y estimar en minutos el tiempo efectivo donde el CCD puede ser usado como opacificante temporal del vidrio.

Obtenido el modelo 3D de los objetos de vidrio, éstos se han utilizado como sustitutos de los objetos originales en diferentes fases del proceso de conservación y restauración. Esta sustitución ha permitido mejorar el sistema de elaboración de dibujos arqueológicos, al reducir la excesiva manipulación que pone en riesgo piezas frágiles como son las de vidrio arqueológico durante la fase de recogida de

datos. Por otro lado, el dibujo arqueológico obtenido a partir del modelo 3D ofrece la posibilidad de visualizar cualquier sección o plano, aporta información más completa y permite conocer los datos métricos de incluso zonas de difícil acceso.

En cuanto a la fase de reconstrucción de las zonas faltantes se ha llevado a cabo desarrollando una metodología a partir de la parte conservada de la pieza que, ha permitido la creación e incorporación de implantes modelados en 3D que luego han sido impresos. La utilización de las resinas termoplásticas de ABS por deposición de fundente (FDM) para elaborar los fragmentos faltantes, ha proporcionado óptimos resultados obteniendo implantes de elevada precisión capaces de reproducir el detalle decorativo de estos objetos. El resultado puede ser comparado con el obtenido por métodos tradicionales pero, difiere en la excesiva manipulación del objeto y contribuye así a la preservación y salvaguarda del material recuperado. Se han obtenido los implantes digitales de todas las piezas y se han impreso los implantes del *Cuenco 1*, *Cuenco 2* y *Plato*.

Respecto a la creación de embalajes se ha guiado el proceso presentando una solución completamente automatizada que abarca desde el diseño de la cavidad adaptada del embalaje hasta el fresado de las partes. Para enlazar todo este proceso y facilitar el diseño de este tipo de embalajes se propone una herramienta software que, de forma automática, oriente la pieza de cara a obtener una mayor superficie de contacto entre el objeto a proteger y su espuma soporte. Esta aplicación comienza con los datos recogidos en el modelo 3D del objeto y, por medio de algunos parámetros introducidos por el usuario, se termina obteniendo el diseño de la cavidad adaptada. Este diseño se fabrica utilizando una máquina fresadora y usando materiales ya testados dentro del campo de la conservación, como es la espuma de polietileno. Los resultados obtenidos satisfacen los criterios propuestos de maximización de la perpendicularidad de contacto del área del objeto con la cavidad diseñada. Donde la orientación de cada objeto (inicialmente cargados en una posición aleatoria) se corresponde con la forma natural de su almacenamiento: los dos cuencos embalados quedan sobre sus pies y el *Plato* queda en posición invertida para facilitar su extracción debido a la fragilidad en la zona superior del mismo formada por un ala.

En otra etapa de la investigación se han incorporado sus correspondientes texturas a los modelos 3D mediante fotogrametría llevando, también a cabo, la recreación hipotética de la textura de los faltantes de manera complementaria. Con ello, se ha facilitado la visualización y recuperación completa de los objetos estudiados en 3D, sin que ello implique manipular los originales de manera excesiva o no justificada. Estas visualizaciones no son específicas del vidrio y para dimensionar los resultados en su justa medida, este mismo proceso se ha llevado a cabo con material arqueológico de otra naturaleza permitiendo la reconstrucción virtual de una escultura incompleta de terracota y la visualización de un cráneo del Pleistoceno. Se propone de esta manera como interaccionar en estos casos, a través de la realidad aumentada, con los modelos texturizados y mostrar como acercar las

diferentes fases del proceso reconstructivo a un público potencial, al visitante de exposiciones y a los estudiosos atraídos.

Por último, se han caracterizado los materiales que intervienen en la fase de reconstrucción: filamentos, adhesivos y recubrimiento de pintura.

- Filamento: el ensayo de envejecimiento acelerado por radiación UV se ha realizado durante un ciclo máximo de 264 h. Las muestras de filamento ABS ensayadas (de dos tipos *White* y *Clear*), se han visto afectadas por la fotooxidación a través del amarilleamiento de la superficie. El análisis de los valores finales muestra que la mayor variación aparece en las muestras de tipo *Clear* observándose que el cambio es visible a simple vista. En el caso de las probetas de filamento recubiertas con pintura, ambos tipos de filamentos (*White* y *Clear*) se han mostrado estables cuando el recubrimiento de pintura era opaco. En el ensayo para caracterizar la solubilidad de los filamentos en los disolventes seleccionados, los resultados obtenidos han revelado que la acetona, el etil acetato y el butil acetato actúan con mayor rapidez siendo el dioxanold PM y sobre todo el alcohol etílico los que menos les afectan. En el ensayo de medición del pH de los filamentos se han obtenido valores de pH similares a los valores iniciales del agua desionizada, en todas las muestras ensayadas. En el análisis de los filamentos por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier, se ha evidenciado la presencia de estireno, de butadieno y de acrilonitrilo en el filamento *White* y solo del estireno y del butadieno en *Clear*. Finalmente, cabe destacar en el filamento *Clear* la banda prominente relativa a compuestos con grupos carbonilos, que podrían asociarse a la presencia de aditivos estabilizadores frente a la temperatura.
- Recubrimiento de pintura: el ensayo de envejecimiento acelerado por radiación UV se ha realizado durante un ciclo máximo de 264 h. El tipo de pintura acrílica seleccionada se ha mostrado estable a la exposición de radiación UV. El ensayo de resistencia a la tracción se llevó a cabo para determinar adherencia del recubrimiento de pintura con el ABS con y sin la adición de un *medium* que mejorase la adhesión. Los resultados han mostrando una unión idónea tanto con *medium* como sin él.
- Adhesivos: el ensayo de envejecimiento acelerado por radiación UV se ha realizado durante un ciclo máximo de 264 h. Los adhesivos ensayados también han mostrado un comportamiento muy estable frente a los ciclos de radiación UV a los que han sido expuestos. El ensayo de resistencia a la tracción se llevó a cabo para determinar el grado de adhesión del ABS al vidrio con los diferentes adhesivos seleccionados dando como resultado variaciones en las muestras sometidas a la exposición del UV frente a las no sometidas. De este modo, se observó un aumento significativo en la adherencia del ABS y el vidrio que llegó en algunos casos a superar los valores de 30 Kgf (0.94 MPa).

La radiación UV influyó en mayor o menor grado en todas las muestras preparadas. Tras la valoración de los datos se ha obtenido como muestra mejor valorada, para ambos filamentos, la unión del ABS al vidrio por medio de Paraloid B-72 al 25 % en downald PM, ya que con ambos filamentos presenta una adherencia óptima con unas fuerza de resistencia a la tracción entre los 10 y 13 Kgf que tras el UV aumentan entre los 30-39 Kgf que aunque se considera elevada no supera la adherencia de la resina epoxi. En el ensayo de medición del pH de los adhesivos se han obtenido valores de pH dentro del rango que se considera seguro en cuanto que no se distancian de los esperados para el fin perseguido. El último ensayo realizado a los adhesivos fue el Odly test para detectar la presencia de compuestos orgánicos volátiles (VOCs). Tras la valoración de los resultados se puede concluir que los adhesivos pueden emitir VOCs en pequeñas cantidades por lo que se aconseja limitar el tiempo de exposición en espacios cerrados. Como adhesivos idóneos para su utilización se recomiendan el Paraloid B-72 25 % en acetona, el Paraloid B-44 25 % en downald PM, el Evalcite 25 % en downald PM y el Fluoline A, ya que son los mejores valorados al mantenerse inalterables las tres tiras de metal patrón expuestas.

Para concluir señalaremos que, estas nuevas tecnologías que están en pleno desarrollo, muestran aspectos de interés que han sido aplicadas a la conservación y restauración del patrimonio de vidrio arqueológico, objeto del presente estudio. De este modo, la tecnología 3D introduce amplias posibilidades que pueden abrir otras vías de investigación relacionadas con este campo y aunque las conclusiones aquí expuestas únicamente pueden ser aplicables en los casos estudiados, con ellas se inicia una línea de investigación de gran interés que podría ser la base de futuros trabajos.

Anexos

Anexo A

Proceso de creación del implante e impresión 3D

En este anexo se muestran los procesos de creación de cada implante de las piezas seleccionadas para este estudio, siguiendo la metodología desarrollada en el capítulo 5. Se incluyen las imágenes de los modelos virtuales junto a los implantes. Además se muestran la posición de cada implante según las tres orientaciones de impresión y los datos de cada una de ellas en cuanto a consumo de material, tiempo de impresión y número de capas necesarias para completar el implante.

A.1 Creación del implante

Esta sección complementa a la sección 5.3 del capítulo 5 al presentar los procesos realizados, a partir de la metodología desarrollada, en el resto de piezas que intervienen en este estudio:

- *Cuenco 1*: En la subsección 5.3.4 se ha mostrado el proceso de creación del implante 1 de esta pieza, a continuación se muestran el proceso, por un lado del implante 2 (asa) en la figura A.1 y por otro se completa el proceso del implante 1 mostrando en la figura A.2 como se reconstruyó el pie que posteriormente fue unido al implante 1.
- *Cuenco 2*: Se ha reconstruido la parte faltante de esta pieza que se corresponde con parte del cuerpo semiesférico y del borde vuelto. Para ello se ha realizado una sección del modelo 3D del original que llega casi a la mitad del tamaño de la pieza y que ha sido suficiente para cubrir la zona faltante (Fig. A.3), siguiendo la metodología establecida.

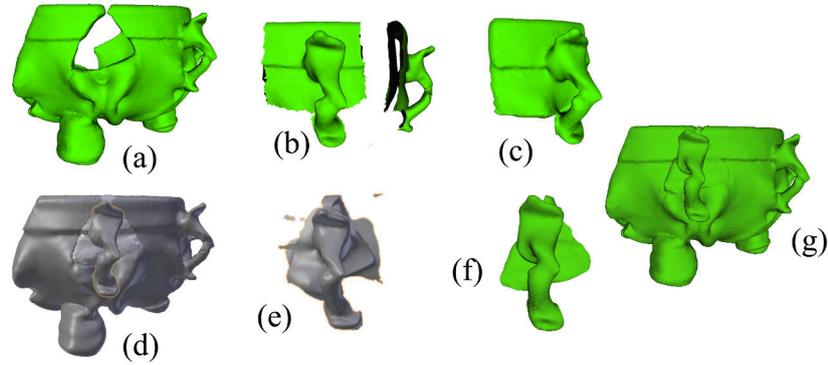


Figura A.1: Proceso del implante 2 de la pieza *Cuenco 1*: (a) modelo 3D del objeto donde se ve la zona faltante, (b) sección del modelo extraída para realizar el implante, (c) malla de la sección cerrada, (d) posicionamiento de la sección y adaptación a la zona vacía, (e) resultado del *Boolean* en el implante y (f) resultado final del implante.

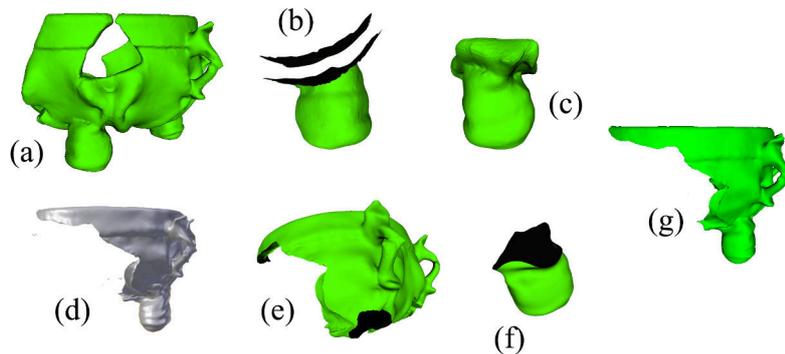


Figura A.2: Proceso del pie que va unido al implante 1 de la pieza *Cuenco 1*: (a) modelo 3D del objeto donde se ve la zona faltante, (b) sección del modelo extraída para realizar el implante, (c) malla de la sección cerrada, (d) posicionamiento de la sección y adaptación a la zona vacía, (e) no se utiliza la función *Boolean* si no que se unen las dos mallas, para ello se abre un hueco en cada parte, (f) hueco abierto en la malla del pie para unirla con el implante 1 y formar una sola malla y (g) resultado final del implante 1.

- *Plato*: En el caso de este objeto debido al tamaño de las zonas faltantes se ha realizado la sección incluyendo parte de una zona faltante que ha sido cerrada y se ha utilizado la sección obtenida para recuperar los dos faltantes que hay en esta pieza, siguiendo la metodología desarrollada (Fig. A.4).

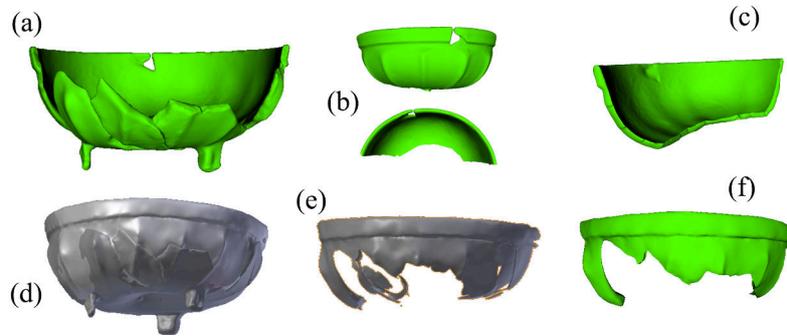


Figura A.3: Proceso del implante de la pieza *Cuenco 2*: (a) modelo 3D del objeto, (b) sección del modelo extraída para realizar el implante (vista superior y frontal), (c) malla de la sección cerrada, (d) posicionamiento de la sección y adaptación a la zona vacía, (e) resultado de la función *Boolean* en el implante, (f) resultado final del implante.

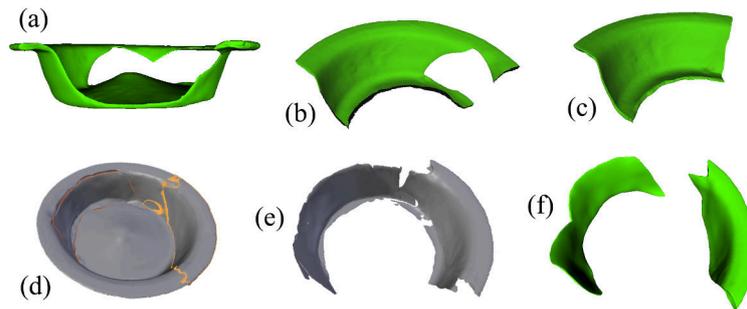


Figura A.4: Proceso de los implantes de la pieza *Plato*: (a) modelo 3D del objeto, (b) sección del modelo, (c) malla de la sección cerrada, (d) posicionamiento de la sección y adaptación a la zona vacía, (e) resultado de la función *Boolean* en el implante, (f) resultado final del implante.

- *Lámpara*: En este objeto los faltantes están localizados en la misma zona y comprende parte del ala y una sección pequeña del anillo. Se ha completado el proceso siguiendo la metodología desarrollada (Fig. A.5).
- *Botella*: En esta pieza los faltantes están localizado en el cuerpo globular, por lo que se ha seccionado todo el globo cerrando los agujeros para adaptarla la forma al modelo. Se prosiguió con el proceso siguiendo con la metodología desarrollada (Fig. A.6).

En las figuras A.7, A.8, A.9 y A.10 se pueden ver el modelo 3D de cada pieza junto a sus implantes correspondientes.

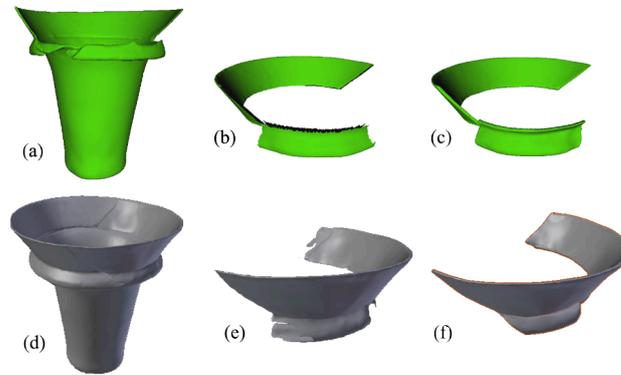


Figura A.5: Proceso de reconstrucción de la parte faltante de la pieza *Lámpara*: (a) modelo 3D del objeto, (b) sección del modelo, (c) malla de la sección cerrada, (d) posicionamiento de la sección y adaptación a la zona vacía, (e) resultado del *Boolean* en el implante, (f) resultado final del implante.

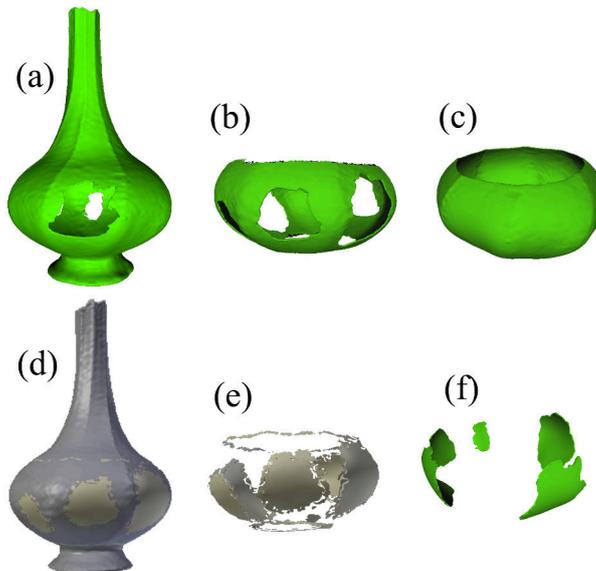


Figura A.6: Proceso de los implantes de la pieza *Botella*. Estos implantes no se han impreso pero han sido utilizados para la reconstrucción virtual: (a) modelo 3D del objeto, (b) sección del modelo, (c) malla de la sección cerrada, (d) posicionamiento de la sección y adaptación a la zona vacía, (e) resultado del *Boolean* en el implante, (f) resultado final del implante.

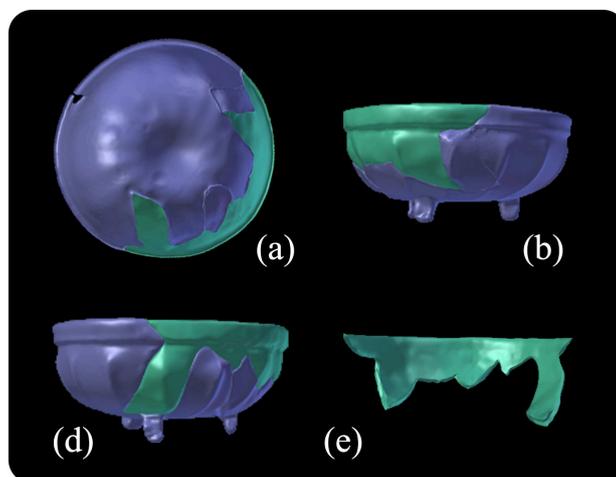


Figura A.7: Modelo 3D del *Cuenco 1* junto al faltante reconstruido (implante) de forma digital: (a) vista superior de la unión del interior, (b) y (c) vista lateral de la unión exterior y (d) vista interior del implante.

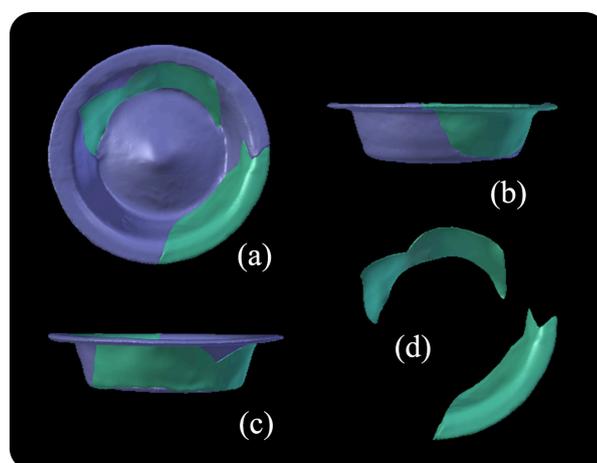


Figura A.8: Modelo 3D del *Plato* junto al faltante reconstruido (implante) de forma digital: (a) vista superior de la unión del interior, (b) y (c) vista lateral de la unión exterior y (d) vista interior del implante.

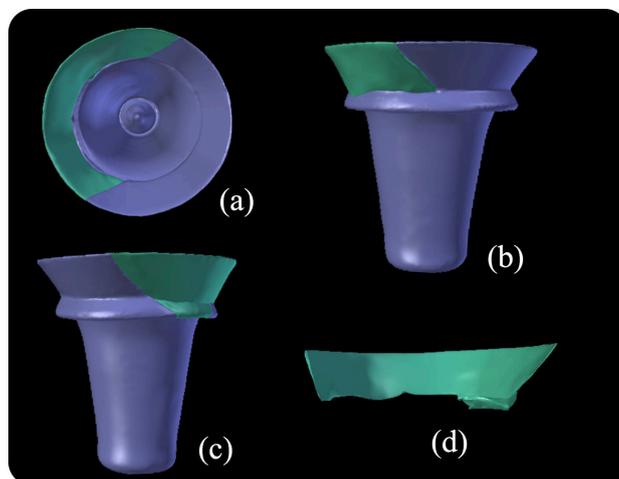


Figura A.9: Modelo 3D de la *Lámpara* junto al faltante reconstruido (implante) de forma digital: (a) vista superior de la unión del interior, (b) y (c) vista lateral de la unión exterior y (d) vista interior del implante.

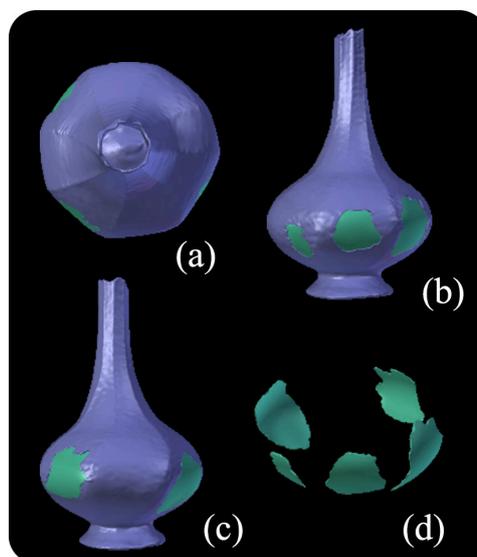


Figura A.10: Modelo 3D de la *Botella* junto al faltante reconstruido (implante) de forma digital: (a) vista superior de la unión del interior, (b) y (c) vista lateral de la unión exterior y (d) vista interior del implante.

A.2 Impresión 3D: orientaciones

A continuación se muestra la posición de los implantes de cada pieza, según las tres orientaciones posibles, para su impresión 3D dentro de la interfaz del programa (Fig. A.11, A.12, A.13, A.14 y A.15). Para la impresión de todos los implantes se ha seleccionado la segunda orientación (horizontal-frontendal). Además se muestra en las tablas A.1, A.2, A.3, A.4 y A.5 los parámetros que varían dependiendo de la orientación.

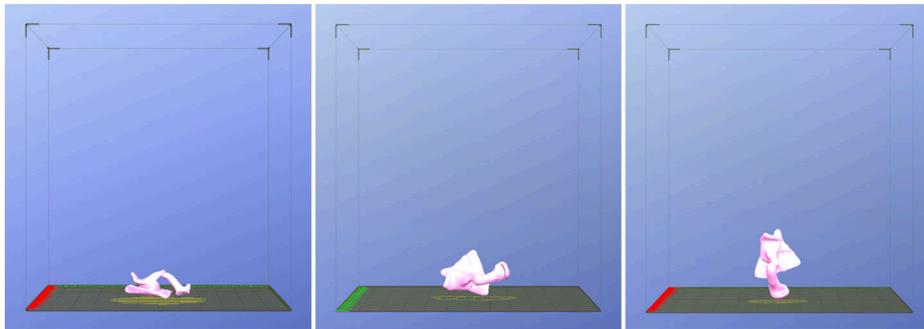


Figura A.11: Posición del implante 2 de la pieza *Cuenco 1* según las tres orientaciones para su impresión: A la izquierda horizontal-tumbada (primera), en el centro horizontal-frontendal (segunda) y a la derecha vertical-frontendal (tercera).

Tabla A.1: Proceso de impresión del implante 2 del *Cuenco 1*

Orientación	Material consumido(gr)	Tiempo(min)	Capas
Horizontal-tumbada	3.0	18	79
Horizontal-frontendal	2.4	17	124
Vertical-frontendal	2.4	20	176

Tabla A.2: Proceso de impresión del implante 1 del *Cuenco 2*

Orientación	Material consumido(gr)	Tiempo(min)	Capas
Horizontal-tumbada	7.1	37	86
Horizontal-frontendal	4.4	27	184
Vertical-frontendal	4.6	33	271

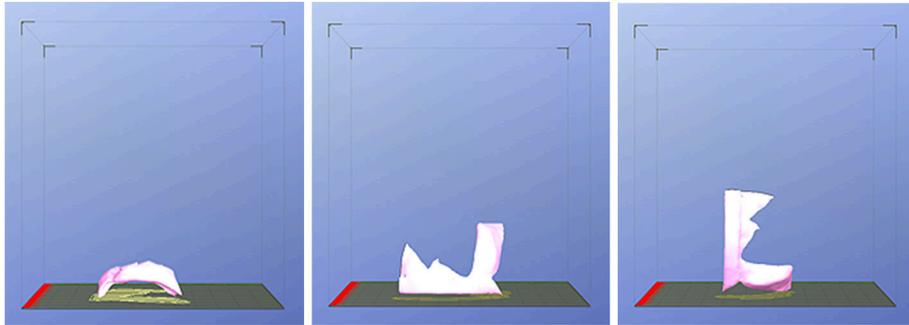


Figura A.12: Posición del implante 1 de la pieza *Cuenco 2* según las tres orientaciones para su impresión: la izquierda horizontal-tumbada (primera), en el centro horizontal-frontal (segunda) y a la derecha vertical-frontal (tercera).

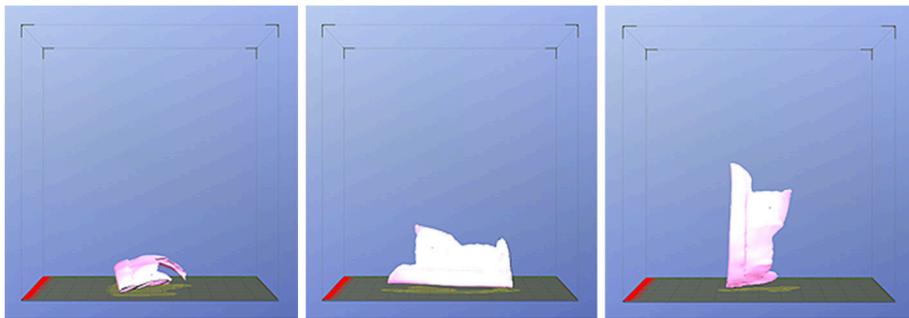


Figura A.13: Posición del implante 2 de la pieza *Cuenco 2* según las tres orientaciones para su impresión: a la izquierda horizontal-tumbada (primera), en el centro horizontal-frontal (segunda) y a la derecha vertical-frontal (tercera).

Tabla A.3: Proceso de impresión del implante 2 del *Cuenco 2*

Orientación	Material consumido(gr)	Tiempo(min)	Capas
Horizontal-tumbada	5.5	31	167
Horizontal-frontal	4.1	33	329
Vertical-frontal	4.6	33	271

Tabla A.4: Proceso de impresión del implante 1 de la pieza *Plato*

Orientación	Material consumido(gr)	Tiempo(min)	Capas
Horizontal-tumbada	3.0	27	419
Horizontal-frontal	5.0	25	130
Vertical-frontal	6.9	43	377

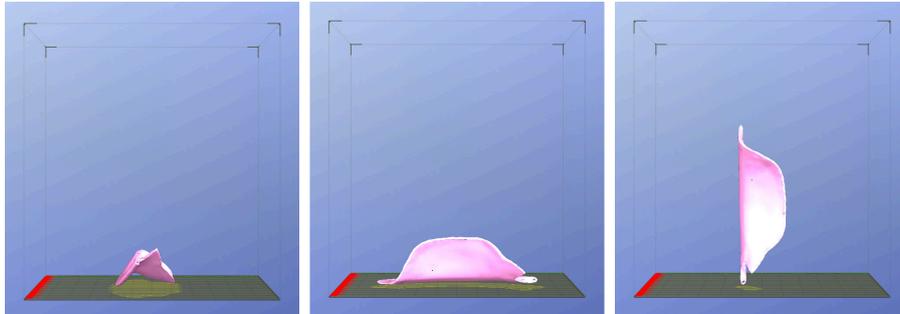


Figura A.14: Posición del implante 1 de la pieza *Plato* según las tres orientaciones para su impresión: a la izquierda horizontal-tumbada (primera), en el centro horizontal-frontal (segunda) y a la derecha vertical-frontal (tercera).

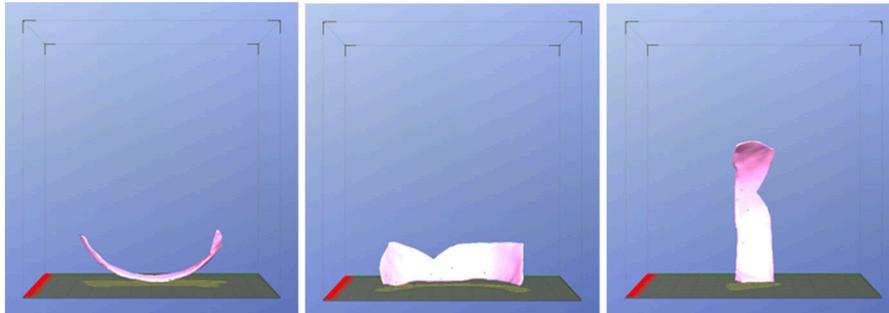


Figura A.15: Posición del implante 2 de la pieza *Plato* según las tres orientaciones para su impresión: a la izquierda horizontal-tumbada (primera), en el centro horizontal-frontal (segunda) y a la derecha vertical-frontal (tercera).

Tabla A.5: Proceso de impresión del implante 2 de la pieza *Plato*

Orientación	Material consumido(gr)	Tiempo(min)	Capas
Horizontal-tumbada	6.5	36	147
Horizontal-frontal	3.7	22	115
Vertical-frontal	6.9	43	377

Anexo B

Tratamiento superficial de los implantes

En este anexo se muestran los resultados de las impresiones 3D de los implantes: implante 2 del *Cuenca 1*, implantes 1 y 2 del *Cuenca 2* e implantes 1 y 2 del *Plato*. Además se muestra el resultado del tratamiento superficial de todos los implantes tanto por tratamiento mecánico como químico. Como se puede ver el *Cuenca 2* tiene dos implantes, se decidió imprimir la reconstrucción dividiendo en dos el implante porque al colocar el implante en la zona faltante, los extremos no encajaban. Así se dividió haciendo un corte por en medio (utilizando el programa Netfabb) y retocando los extremos.

B.1 Resultados del filamento blanco

A continuación se presentan los resultados de los implantes impresos con el filamento blanco (*White*). Se puede observar el antes y el después de la superficie una vez tratada, por un lado con papeles abrasivos y microtorno y por otro tras la exposición a vapores de acetona.

- Implante 2 del *Cuenca 1*: En la figura B.1 se muestra el implante tras la impresión donde es apreciable el relieve de la superficie por la deposición del fundente en capas. En la figura B.2 se muestra el resultado del tratamiento por erosión utilizando papeles abrasivos y microtorno donde se ha conseguido suavizar el relieve de la superficie, aunque en ciertas zonas, de difícil acceso, no se ha conseguido eliminar el relieve de las capas por completo. En la figura B.3 se muestra el resultado de la superficie del implante tras la exposición

a vapores de acetona, donde se observa una superficie lisa (con alguna zona con relieve) y con brillo.

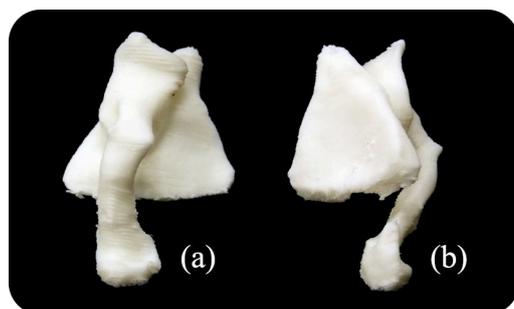


Figura B.1: Resultado de la impresión 3D del implante 2 del objeto *Cuenco 1*: (a) exterior, (b) interior.

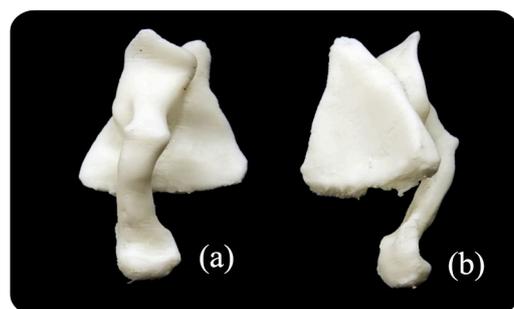


Figura B.2: Resultado del tratamiento superficial de abrasión en seco sobre el implante 2 del objeto *Cuenco 1*: (a) exterior, (b) interior.

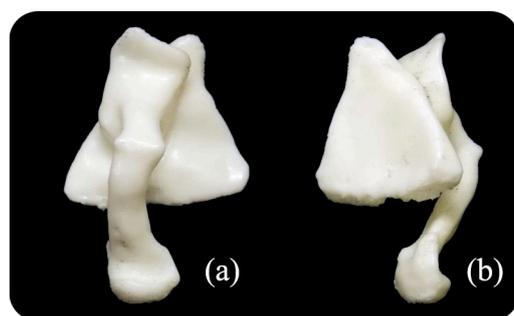


Figura B.3: Resultado del tratamiento superficial con vapores de acetona en la impresión 3D del implante 2 del objeto *Cuenco 1*: (a) exterior, (b) interior.

- Implante 1 del *Cuenco 2*: En la figura B.4 se muestra el implante tras la impresión donde es apreciable el relieve de la superficie por la deposición del fundente en capas sobre todo en las zonas de acople con la pieza original. En la figura B.5 se muestra el resultado del tratamiento por erosión utilizando papeles abrasivos y microtorno donde el relieve de la superficie se ha suavizado aunque hay algunas zonas que no se han podido alisar. En la figura B.6 se muestra el resultado de la superficie del implante tras la exposición a vapores de acetona donde se observa que la superficie se ha suavizado (quedando alguna zona con relieve) y con brillo.



Figura B.4: Resultado de la impresión 3D del implante 1 del objeto *Cuenco 2*: (a) exterior, (b) interior.

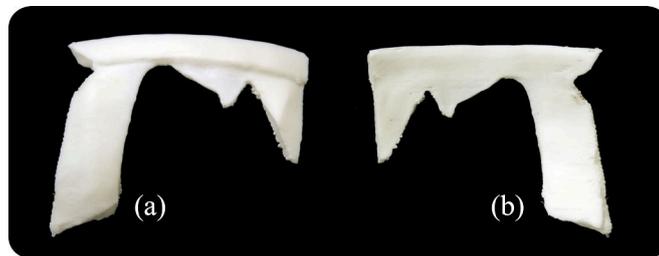


Figura B.5: Resultado del tratamiento superficial de abrasión en seco sobre del implante 1 del objeto *Cuenco 2*: (a) exterior, (b) interior.

- Implante 2 del *Cuenco 2*: En la figura B.7 se muestra el implante tras la impresión donde es apreciable el relieve de la superficie por la deposición del fundente en capas. En la figura B.8 se muestra el resultado del tratamiento por erosión utilizando papeles abrasivos y microtorno donde el relieve de la superficie se ha suavizado pero han quedando zonas que no se han podido alisar. En la figura B.9 se muestra el resultado de la superficie del implante tras la exposición a vapores de acetona donde se observa que la superficie se ha suavizado (quedando alguna zona con relieve) y con brillo.
- Implante 1 del *Plato*: En la figura B.10 se muestra el implante tras la impresión donde es apreciable el relieve de la superficie por la deposición del



Figura B.6: Resultado del tratamiento superficial con vapores de acetona en la impresión 3D del implante 1 del objeto *Cuenco 2*: (a) exterior, (b) interior.



Figura B.7: Resultado de la impresión 3D del implante 2 del objeto *Cuenco 2*: (a) exterior, (b) interior.



Figura B.8: Resultado del tratamiento superficial de abrasión en seco sobre del implante 2 del objeto *Cuenco 2*: (a) exterior, (b) interior.



Figura B.9: Resultado del tratamiento superficial con vapores de acetona en la impresión 3D del implante 1 del objeto *Cuenco 2*: (a) exterior, (b) interior.

fundente en capas. En la figura B.11 se muestra el resultado del tratamiento por erosión utilizando papeles abrasivos y microtorno donde el relieve de la superficie se ha alisado sobre todo en el exterior, ya que en el interior han quedado algunas zonas con relieve. En la figura B.12 se muestra el resultado de la superficie del implante tras la exposición a vapores de acetona donde se observa que la superficie se ha suavizado (quedando alguna zona con relieve) y con brillo.

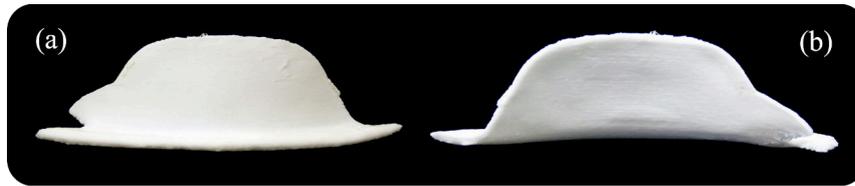


Figura B.10: Resultado de la impresión 3D del implante 1 del objeto *Plato*: (a) exterior, (b) interior.



Figura B.11: Resultado del tratamiento superficial de abrasión en seco sobre del implante 1 del objeto *Plato*: (a) exterior, (b) interior.

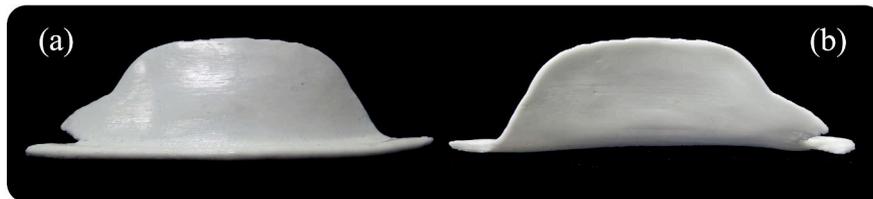


Figura B.12: Resultado del tratamiento superficial con vapores de acetona en la impresión 3D del implante 1 del objeto *Plato*: (a) exterior, (b) interior.

- **Implante 2 del *Plato*:** En la figura B.13 se muestra el implante tras la impresión donde es apreciable el relieve de la superficie por la deposición del fundente en capas incluso en algunas zonas presentan ciertas acumulaciones de material. En la figura B.14 se muestra el resultado del tratamiento por erosión utilizando papeles abrasivos y microtorno que han dejado una superficie suavizada pero con algunas zonas con relieve. En la figura B.15 se

muestra el resultado de la superficie del implante tras la exposición a vapores de acetona donde se observa que la superficie se ha suavizado (quedando alguna zona con relieve) y con brillo.



Figura B.13: Resultado de la impresión 3D del implante 2 del objeto *Plato*: (a) exterior, (b) interior.



Figura B.14: Resultado del tratamiento superficial de abrasión en seco sobre el implante 2 del objeto *Plato*: (a) exterior, (b) interior.



Figura B.15: Resultado del tratamiento superficial con vapores de acetona en la impresión 3D del implante 2 del objeto *Plato*: (a) exterior, (b) interior.

B.2 Resultados del filamento translúcido

A continuación se presentan los resultados de los implantes impresos con el filamento translúcido (*Clear*). Se puede observar el antes y el después de la superficie una vez tratada, por un lado con papeles abrasivos y microtorno y por otro tras la exposición a vapores de acetona.

- Implante 2 del *Cuenco 1*: En la figura B.16 se muestra el implante tras la impresión donde es apreciable el relieve de la superficie por la deposición del fundente en capas. En la figura B.17 se muestra el resultado del tratamiento por erosión utilizando papeles abrasivos y microtono donde se ha conseguido suavizar el relieve de la superficie, aunque en ciertas zonas, de difícil acceso, no se ha conseguido eliminar el relieve de las capas por completo y con la erosión la superficie de la pieza se ha vuelto opaca. En la figura B.18 se muestra el resultado de la superficie del implante tras la exposición a vapores de acetona donde se observa que la superficie se ha suavizado (quedando alguna zona con relieve), con brillo y con zonas translúcidas.

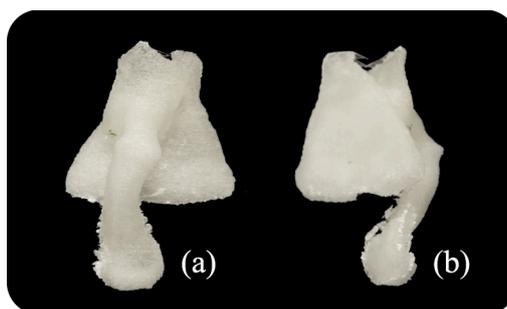


Figura B.16: Resultado de la impresión 3D del implante 2 del objeto *Cuenco 1*: (a) exterior, (b) interior.

- Implante 1 del *Cuenco 2*: En la figura B.19 se muestra el implante tras la impresión donde es apreciable el relieve de la superficie por la deposición del fundente en capas y han quedado adheridos al implante hilos de filamento. En la figura B.20 se muestra el resultado del tratamiento por erosión utilizando papeles abrasivos y microtono donde se ha suavizado el relieve de la superficie aunque han quedado algunas zonas con relieve y con la erosión la superficie de la pieza se ha vuelto opaca. En la figura B.21 se muestra el resultado de la superficie del implante tras la exposición a vapores de acetona donde se observa que la superficie se ha suavizado (quedando alguna zona con relieve), con brillo y con zonas translúcidas.
- Implante 2 del *Cuenco 2*: En la figura B.22 se muestra el implante tras la impresión donde es apreciable el relieve de la superficie por la deposición del

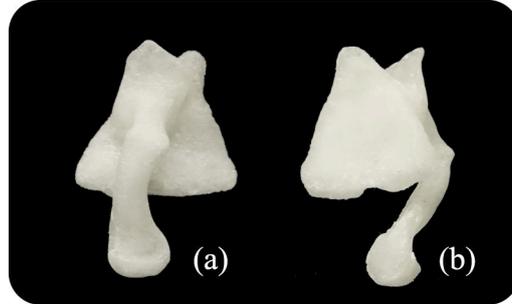


Figura B.17: Resultado del tratamiento superficial de abrasión en seco sobre del implante 2 del objeto *Cuenco 1*: (a) exterior, (b) interior.

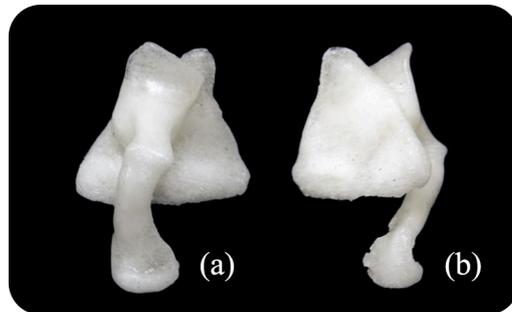


Figura B.18: Resultado del tratamiento superficial con vapores de acetona en la impresión 3D del implante 2 del objeto *Cuenco 1*: (a) exterior, (b) interior.

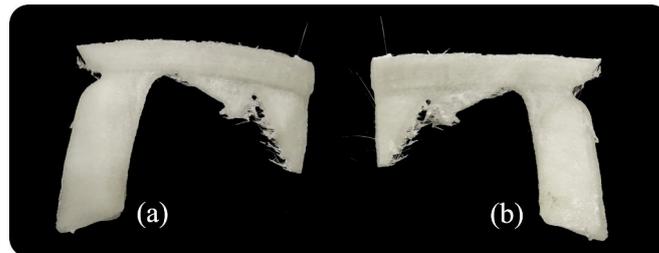


Figura B.19: Resultado de la impresión 3D del implante 1 del objeto *Cuenco 2*: (a) exterior, (b) interior.

fundente en capas. En la figura B.23 se muestra el resultado del tratamiento por erosión utilizando papeles abrasivos y microtorno donde la superficie se ha suavizado pero algunas zonas han quedado con relieve y con la erosión la superficie se ha vuelto opaca. En la figura B.24 se muestra el resultado de



Figura B.20: Resultado del tratamiento superficial de abrasión en seco sobre del implante 1 del objeto *Cuenco 2*: (a) exterior, (b) interior.



Figura B.21: Resultado del tratamiento superficial con vapores de acetona en la impresión 3D del implante 1 del objeto *Cuenco 2*: (a) exterior, (b) interior.

la superficie del implante tras la exposición a vapores de acetona donde se observa que la superficie se ha suavizado (quedando alguna zona con relieve) y con brillo y con zonas translúcidas.



Figura B.22: Resultado de la impresión 3D del implante 2 del objeto *Cuenco 2*: (a) exterior, (b) interior.

- Implante 1 del *Plato*: En la figura B.25 se muestra el implante tras la impresión donde es apreciable el relieve de la superficie por la deposición del fundente en capas. En la figura B.26 se muestra el resultado del tratamiento por erosión utilizando papeles abrasivos y microtorno donde la superficie se ha suavizado, a excepción de algunas zonas y con la erosión la superficie se

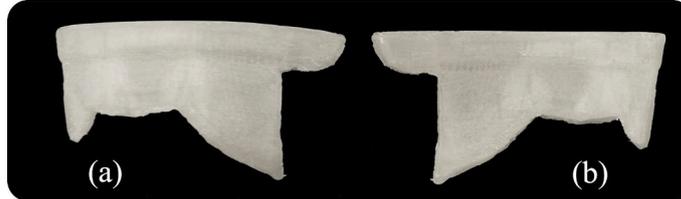


Figura B.23: Resultado del tratamiento superficial de abrasión en seco sobre del implante 2 del objeto *Cuenco 2*: (a) exterior, (b) interior.



Figura B.24: Resultado del tratamiento superficial con vapores de acetona en la impresión 3D del implante 1 del objeto *Cuenco 2*: (a) exterior, (b) interior.

ha vuelto opaca. En la figura B.27 se muestra el resultado de la superficie del implante tras la exposición a vapores de acetona donde se observa que la superficie se ha suavizado (quedando alguna zona con relieve), con brillo y con zonas translúcidas.

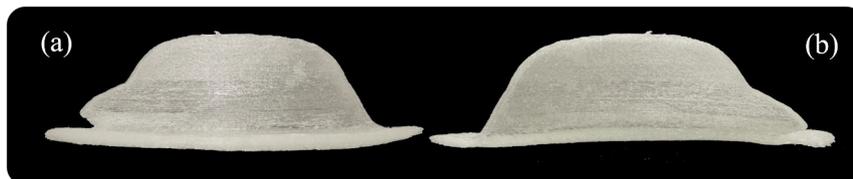


Figura B.25: Resultado de la impresión 3D del implante 1 del objeto *Plato*: (a) exterior, (b) interior.

- **Implante 2 del *Plato*:** En la figura B.28 se muestra el implante tras la impresión donde es apreciable el relieve de la superficie por la deposición del fundente en capas. En la figura B.29 se muestra el resultado del tratamiento por erosión utilizando papeles abrasivos y microtono donde se ha suavizado la superficie pero en algunas zonas no se ha podido eliminar el relieve y por la erosión la superficie se ha vuelto opaca. En la figura B.30 se muestra el resultado de la superficie del implante tras la exposición a vapores de acetona

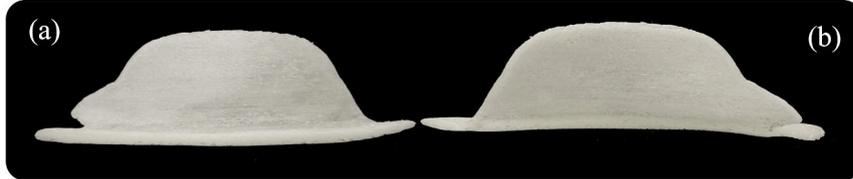


Figura B.26: Resultado del tratamiento superficial de abrasión en seco sobre del implante 1 del objeto *Plato*: (a) exterior, (b) interior.



Figura B.27: Resultado del tratamiento superficial con vapores de acetona en la impresión 3D del implante 1 del objeto *Plato*: (a) exterior, (b) interior.

donde se observa que la superficie se ha suavizado (quedando alguna zona con relieve), con brillo y con zonas translúcidas.



Figura B.28: Resultado de la impresión 3D del implante 2 del objeto *Plato*: (a) exterior, (b) interior.



Figura B.29: Resultado del tratamiento superficial de abrasión en seco sobre del implante 2 del objeto *Plato*: (a) exterior, (b) interior.



Figura B.30: Resultado del tratamiento superficial con vapores de acetona en la impresión 3D del implante 2 del objeto *Plato*: (a) exterior, (b) interior.

Bibliografía

- Aboe, G. (2012). "Packaging and storage solutions for archaeological basketry: a selection of practical designs". En: *Journal of the Institute of Conservation*, Vol. 35 (1), págs. 103-111.
- Advanced Manufacturing, C. (2016). *Sinterización laser SLS*. URL: <http://www.ctadvancedmanufacturing.com/impresoras-3d/elija-por-tecnologia/sinterizacion-laser/>.
- Al-Badri, N. y Nelles, J. N. (2016). *Nefertiti Hack*. URL: <http://nefertitihack.alloversky.com/>.
- Anselmi, C, Presciutti, F, Doherty, B, Brunetti, B., Sgamellotti, A y Miliani, C (2011). "The study of cyclododecane as a temporary coating for marble by NMR profilometry and FTIR reflectance spectroscopies". En: *Applied Physics A* Vol. 104 (1), págs. 401-406.
- Aray Monaserioi, C. e Icaza Toro, M. (2016). "Evaluación de la calidad de conservación de materiales de embalaje: una realidad temporal". En: *Conserva*, págs. 25-40.
- Arbace, L., Sonnino, E., Callieri, M., Dellepiane, M., Fabbri, M., Idelson, A. I. y Scopigno, R. (2013). "Innovative uses of 3D digital technologies to assist the restoration of a fragmented terracotta statue". En: *Journal of Cultural Heritage* Vol. 14 (4), págs. 332-345.
- ASTM E313-00 (2002). *Standard Practice for Calculating Yellowness and Whiteness Indices from Instrumentally Measured Color Coordinates*.
- Aura, E. y Doménech, T. (1998). "Evaluación de adhesivos cerámicos ensayados". En: *Actas del XII Congreso de Conservación y Restauración de Bienes Culturales 28 de octubre de 1998 (Alicante)*, págs. 211-220.

- Aura Castro, E y Doménech Carbó, M. (2004). “Estudio de caracterización morfológica del deterioro en vidrio arqueológico mediante microscopía óptica sometida a análisis de imagen”. En: *XV Congreso de Consevación y Restauración de Bienes Culturales 21 de octubre de 2004 (Murcia)*, págs. 1-9.
- Azimi, P., Zhao, D., Pouzet, C., Crain, N. E. y Stephens, B. (2016). “Emissions of ultrafine particles and volatile organic compounds from commercially available desktop three-dimensional printers with multiple filaments”. En: *Environmental science & technology* Vol. 50 (3), págs. 1260-1268.
- Barreau, J.-B., Nicolas, T., Bruniaux, G., Petit, E., Petit, Q., Bernard, Y., Gagne, R. y Gouranton, V. (2014). “Ceramics Fragments Digitization by Photogrammetry, Reconstructions and Applications”. En: *International Conference on Cultural Heritage, EuroMed.arXiv preprint arXiv:1412.1330*.
- Bauer, E. (1993). “Packing museum objects for shipment”. En: *Conserve O Gram*, Vol. 17 (2), págs. 1-4.
- Benito, L. y Benito Álvarez, J. M. (1998). *Métodos y materias instrumentales en prehistoria y arqueología: (La Edad de Piedra tallada más antigua) II Tecnología y tipología*. Salamanca: Librería Cervantes.
- Benito Álvarez, J. M. (2007). “Dibujo digital del material lítico prehistórico. Consejos básicos para mejorar la cualificación profesional en prehistoria y arqueología”. En: *Arqueoweb, Revista sobre arqueología en Internet* Vol. 9 (1), págs. 1-24.
- Berchon, M. y Luyt, B. (2016). *La impresión 3D*. Editorial Gustavo Gili, SL.
- Berthet, M y Fraile-Ugalde, E (2004). “Cyclododecane as temporary fixative in paper conservation”. En: *Paper Conservation News* 111, pág. 13.
- Bordonado, S., Carrascosa, B., Pasíes, T. y Doménech, M. T. (2015). “El Crist del Fossar: estudios técnicos, contexto histórico y propuesta para su reconstrucción virtual.” En: *Jornadas de investigación emergente en conservación y restauración de patrimonio*. IRP, Universitat Politècnica de València, págs. 307-315.
- Bourell, D., Stucker, B., Marchelli, G., Prabhakar, R., Storti, D. y Ganter, M. (2011). “The guide to glass 3D printing: developments, methods, diagnostics and results”. En: *Rapid Prototyping Journal* 17.3, págs. 187-194.

- Brown, M. y Davidson, A. (2010). "The use of cyclododecane to protect delicate fossils during transportation". En: *Journal of Vertebrate Paleontology* Vol. 30 (1), págs. 300-303.
- Bruno, F., Bruno, S., De Sensi, G., Luchi, M.-L., Mancuso, S. y Muzzupappa, M. (2010). "From 3D reconstruction to virtual reality: A complete methodology for digital archaeological exhibition". En: *Journal of Cultural Heritage* Vol. 11 (1), págs. 42-49.
- Bryce, D. M. (1997). *Plastic injection molding: material selection and product design fundamentals*. Vol. 2. Society of Manufacturing Engineers.
- BS4971 (Enero 2002). *Repair and allied processes for the conservation of documents. Recommendations*.
- Caballero Zoreda, L. (2006). "El dibujo arqueológico. Notas sobre el registro gráfico en arqueología". En: *Papeles del Partal* (3), págs. 75-95.
- Callieri, M., Cignoni, P., Ganovelli, F., Impoco, G., Montani, C., Pingi, P., Ponzio, F. y Scopigno, R. (2004). "Visualization and 3D data processing in the David restoration". En: *IEEE computer graphics and applications* Vol. 24 (2), págs. 16-21.
- Cantrell, J., Rohde, S., Damiani, D., Gurnani, R., DiSandro, L., Anton, J., Young, A., Jerez, A., Steinbach, D. y Kroese, C. (2017). "Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D Printed ABS and Polycarbonate Parts". En: *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics*. Vol. 3. Springer, págs. 89-105.
- Cardinale, T, Valva, R y Lucarelli, M (2013). "Advanced representation technologies applied to the temple of neptune, the sphinx and the metope in the archaeological park of Paestum". En: *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* Vol. 1 (1), págs. 35-41.
- Carmo, M. B. y Clá, A. P. (2013). "3D virtual exhibitions". En: *DESIDOC Journal of Library & Information Technology* Vol. 33 (3).
- Caspi, S. y Kaplan, E. (2001). "Dilemmas in transporting unstable ceramics: a look at cyclododecane". En: *Objects Specialty Group Postprints*. Vol. 8, págs. 116-135.

- Celani, G., Cancherini, L., Jardini, A., Oliveira, M., Silva, J. Lopes da y Piccoli, V. (2009). “3D digitation of museum sculptures for model-making purposes: difficulties and possible solutions”. En: *Innovative Developments in Design and Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping-Proceedings of VRP4*.
- Chen, T., Lensch, H., Fuchs, C. y Seidel, H.-P. (2007). “Polarization and phase-shifting for 3D scanning of translucent objects”. En: *Computer Vision and Pattern Recognition, 2007. CVPR'07. IEEE Conference on*. IEEE, págs. 1-8.
- CIE (2004). “15: 2004”. En: *Colorimetry*.
- Cleere, D. C. (2005). “Cyclododecane reinvestigated: an experimental study on using cyclododecane to secure unstable ceramic surfaces prior to transportation”. En: *Conservation news: UKIC* 94, págs. 26-28.
- CNR, I. (2016). *MeshLab*. URL: <http://www.meshlab.net/#description>.
- Cobas Fernández, M. I. y Prieto Martínez, M. P. (1998). “Criterios y Convenciones para la Gestión y el Tratamiento de la cultura material mueble”. En: *CAPA: cadernos de arqueología e patrimonio* (7), págs. 1-81.
- Collado, I. (2009). “Vida y muerte en la Gandía cristiana: Estudio antropológico y paleopatológico de los restos óseos del fósar de la Colegiata de Santa María de Gandía”. Tesis doct. Ph. D. diss., Valencia: Universidad de Valencia.
- CTS (2017a). *Productos químicos y disolventes*. URL: http://www.ctseurope.com/es/catalogo.php?category=25#form_news.
- (2017b). *Resinas acrílicas y vinílicas*. URL: http://www.ctseurope.com/es/catalogo.php?category=6#form_news.
- Davis, P., Tiganis, B. y Burn, L. (2004). “The effect of photo-oxidative degradation on fracture in ABS pipe resins”. En: *Polymer degradation and stability* 84 (2), págs. 233-242.
- Davison, S. y Newton, R. G. (2008a). *Conservation and restoration of glass*. Routledge. Cap. 4, pág. 174.
- (2008b). *Conservation and restoration of glass*. Routledge. Cap. 7, págs. 284-307.
- Delgado Aguilar, S. (2010). “Restituciones virtuales de la vajilla de mesa romana (Terra Sigillata)”. En: *Virtual Archaeology Review* Vol. 1 (1), págs. 77-80.

- Di Paola, F. (2015). "Digital Technologies for virtual recomposition. The case study of Serpotta stuccoes." En: *Journal of The Malta Chamber of Scientists*, págs. 63-68.
- Díaz-Marín, C. y Aura-Castro, E. (2017). "Creación de implantes 3D en procesos de consevación y restauración de vidrio arqueológico". En: *Virtual Archaeology Review* Vol. 8 (16), págs. 103-109.
- Díaz-Marín, C., Vendrell-Vidal, E., Aura-Castro, E., Abate, A. F., Sánchez-Belenguer, C. y Narducci, F. (2015). "Virtual reconstruction and representation of an archaeological terracotta statue". En: *2015 Digital Heritage*. Vol. 2. IEEE, págs. 699-702.
- Díaz Marín, C., Aura Castro, E., Sánchez Belenguer, C. y Vendrell Vidal, E. (2016). "Cyclododecane as opacifier for digitalization of archaeological glass". En: *Journal of Cultural Heritage* 17, págs. 131-140.
- Díaz Marín, M. d. C. (2011). "La problemática del embalaje y almacenaje de vidrio arqueológico. Elaboración de una guía de actuación." Tesis de mtría. Universitat Politècnica de València.
- Dillon, B. D. y Joyce, O. (1985). *Student's Guide To Archaeological Illustration*. Institute of Archaeology, University of California. Cap. Chapter 7: Ceramics, págs. 95-109.
- Doménech Carbó, M. T., Aura Castro, E. y Más Barberá, X. (2006). "Analysis of archaeological glazed ceramic from Manises by atomic force microscopy (AFM), electrochemicla techniques, light microscopy (LM) and scanning electron microscopy/x-ray microanalysis (SEM/EDX)". En: *XV Congreso de Conservación y Restauración de Bienes Culturales 30 de octubre de 2006 (Murcia)*, págs. 1143-1154.
- Drahotová, O., Rayo, M. I. G. y Rego, E. L. (1990). *El arte del vidrio en Europa*. Libsa.
- Drumright, R. E., Gruber, P. R. y Henton, D. E. (2000). "Polylactic acid technology". En: *Advanced materials* Vol. 12 (23), págs. 1841-1846.
- Dudek, P (2013). "FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements". En: *Archives of Metallurgy and Materials* Vol. 58 (4), págs. 1415-1418.
- EntresD (2013). *Manual de Usuario de la Impresora Up! Mini 3D*, pág. 14.

- EntresD (2016). *Consumibles*. URL: <http://entresd.es/es/info/sobre-nosotrosentresd>.
- Eren, G., Aubreton, O., Meriaudeau, F., Secades, L. S., Fofi, D., Naskali, A. T., Truchetet, F. y Ercil, A. (2009). "A 3D scanner for transparent glass". En: *Image Analysis and Processing-ICIAP 2009*. Springer, págs. 519-527.
- Fearn, S. (2002). "Continued studies in the deterioration of glass". En: *V&A conservation journal* (42), págs. 12-13.
- Fernández Navarro, J. M. (2000). "Causas del deterioro físico y químico de los vidrios históricos". En: *Jornadas Nacionales sobre Restauración y Conservación de Vidrios, Fundación Centro Nacional del Vidrio, La Granja de San Ildefonso, Spain*, págs. 17-37.
- Fernández Navarro, J. M. (2003a). *El vidrio*. Vol. 6. Editorial CSIC-CSIC Press. Cap. 19, págs. 561-565.
- (2003b). *El vidrio*. Vol. 6. Editorial CSIC-CSIC Press. Cap. 2, págs. 54-55.
- (2003c). *El vidrio*. Vol. 6. Editorial CSIC-CSIC Press. Cap. 4, págs. 137-140.
- (2003d). *El vidrio*. Vol. 6. Editorial CSIC-CSIC Press. Cap. 18, pág. 535.
- (2003e). *El vidrio*. Vol. 6. Editorial CSIC-CSIC Press. Cap. 15, págs. 417-420.
- Flos Travieso, N. (2007). "La fragilidad en el tiempo: el vidrio en la antigüedad". En: (Exposición celebrada en el Museo Arqueológico de Alicante, del 14 de diciembre de 2007 al 4 de marzo de 2008). Cap. Conservación y restauración del vidrio, págs. 18-22.
- Fontaine, C. (1986–1987). "Le verre : principes de conservation, d'exposition et d'entretien". En: *Bulletin de l'Institut royal du Patrimoine artistique* 21, págs. 9-34.
- Foundation, B. (2016). *Blender*. URL: <https://www.blender.org/>.
- Fowles, P. S., Larson, J. H., Dean, C. y Solajic, M. (2003). "The laser recording and virtual restoration of a wooden sculpture of Buddha". En: *Journal of cultural heritage* Vol. 4, págs. 367-371.
- Fulton, S. E. y Rossi-Wilcox, S. M. (2008). "Harvard's glass flowers: a case study in traveling a fragile collection". En: *Journal of the American Institute for Conservation*, Vol. 47 (1), págs. 15-26.

- Gallup, K. y Harlow, B. (2006). "Finding solutions to the problems of complex art packing". En: *AIC news*, Vol. 31 (6), págs. 1-7.
- Gámez Martín, J. A. y Puerta Callejón, J. M. (1998). *Sistemas expertos probabilísticos*. Vol. 20. Universidad de Castilla La Mancha, pág. 128.
- García Fortes, S. y Flos Travieso, N. (2008a). *Conservación y restauración de bienes arqueológicos*. Editorial Síntesis.
- (2008b). *Conservación y restauración de bienes arqueológicos*. Editorial Síntesis. Cap. 4, págs. 105-106.
- García-Patrón Santos, N. (2015). "Conservación y restauración de un lote de 94 piezas pertenecientes al Departamento de Antigüedades Medievales del Museo Arqueológico Nacional". En: *Boletín del Museo Arqueológico Nacional* (33), págs. 155-170.
- Gedye, I. (1968). "Pottery and glass". En: *The conservation of cultural property with special reference to tropical conditions*, págs. 109-113.
- Gilboa, A., Karasik, A., Sharon, I. y Smilansky, U. (2004). "Towards computerized typology and classification of ceramics". En: *Journal of Archaeological Science* Vol. 31 (6), págs. 681-694.
- Gilboa, A., Tal, A., Shimshoni, I. y Kolomenkin, M. (2013). "Computer-based, automatic recording and illustration of complex archaeological artifacts". En: *Journal of Archaeological Science* Vol. 40 (2), págs. 1329-1339.
- Gómez, F. D., Peiró, J. J., Benavent, A. B., Recuenco, B. A. y Juan, J. H. (2015). "Modelado 3D para la generación de patrimonio virtual". En: *Virtual Archaeology Review* Vol. 6 (12), págs. 29-37.
- González-López, M.-J. (2009). "Reintegración virtual de lagunas. Las pinturas de la Sala de los Reyes de la Alhambra de Granada". En: *PH: Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico* Vol. 17 (70), págs. 98-113.
- Grosman, L., Smikt, O. y Smilansky, U. (2008). "On the application of 3-D scanning technology for the documentation and typology of lithic artifacts". En: *Journal of Archaeological Science* Vol. 35 (12), págs. 3101-3110.
- Guidi, G., Russo, M. y Beraldin, J.-A. (2010). *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*. McGraw-Hill Milano, págs. 91-95.

- Guillem Casañ, L. (2015). “Estudio de resinas idóneas en los procesos de reconstrucción de vidrio arqueológico”. Tesis de mtría. Universitat Politècnica de València.
- Hangleiter, H., Jägers, E. y Jägers, E. (1995). “Flüchtige Bindemittel”. En: *Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung* 9, págs. 385-392.
- Heras, C. M. *et al.* (1992). “Glosario terminológico para el estudio de las cerámicas arqueológicas”. En: *Revista española de antropología americana* 22, págs. 9-34.
- Hollinger, R. E., John Jr, E., Jacobs, H., Moran-Collins, L., Thome, C., Zastrow, J., Metallo, A., Waibel, G. y Rossi, V. (2013). “Tlingit-Smithsonian collaborations with 3D digitization of cultural objects”. En: *Museum Anthropology Review* Vol.7 (1-2), págs. 201-253.
- Hortelano Uceda, I. (2004). *Intervención arqueológica en el solar de la calle Doctor Catalá Díez nº 3 de Manises (L’Horta Oest)*. Memoria inédita depositada en la Direcció Territorial de Cultura de la Conselleria de Cultura, Educació i Esport.
- Huang, Q.-X., Flöry, S., Gelfand, N., Hofer, M. y Pottmann, H. (2006). “Reassembling fractured objects by geometric matching”. En: *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. Vol. 25. ACM, págs. 569-578.
- Hullin, M. B., Fuchs, M., Ihrke, I., Seidel, H.-P. y Lensch, H. P. (2008). “Fluorescent immersion range scanning”. En: *ACM Transactions on Graphics-TOG* Vol. 27 (3), págs. 87-87.
- ICOMOS (1990). *Carta internacional para la gestión del patrimonio arqueológico*. URL: https://www.icomos.org/images/DOCUMENTS/Charters/arch_sp.pdf.
- IFVA, I. F.o.V. A. (2011). *Principles of Seville. International Principles of virtual archaeology*. URL: <http://smartheritage.com/seville-principles/seville-principles>.
- Ihrke, I., Kutulakos, K. N., Lensch, H., Magnor, M. y Heidrich, W. (2010). “Transparent and specular object reconstruction”. En: *Computer Graphics Forum*. Vol. 29. Wiley Online Library, págs. 2400-2426.
- Ink, D. (2016). *ABS 1,75 mm*. URL: <http://www.buy3dink.com/>.

- Jain, M. C. S., Vibhandik, M. D. V. y Gade, S. (2013). "3D Printing". En: *International Journal of Emerging Technology and Advance Engineering* Vol. 3, págs. 18-23.
- Jeberien, A. (2002). "Cyclododecan für archäologische Funde? Bergung stark fragmentierter Keramik der Hallstattzeit". En: *Restauro* 108, págs. 509-511.
- Jonhson, J (1999). "Handling, packing and shipping". En: *NPS Museum Handbook, Part I: Museum Collections*. National Park Service Museum Management Program, Washington, DC, págs. 6:1-6:30.
- Kampel, M. y Sablatnig, R. (2003). "Virtual reconstruction of broken and unbroken pottery". En: *3-D Digital Imaging and Modeling, 2003. 3DIM 2003. Proceedings. Fourth International Conference on*. IEEE, págs. 318-325.
- (2007). "Rule based system for archaeological pottery classification". En: *Pattern Recognition Letters* Vol. 28 (6), págs. 740-747.
- Karasik, A. y Smilansky, U. (2008). "3D scanning technology as a standard archaeological tool for pottery analysis: practice and theory". En: *Journal of Archaeological Science* Vol. 35 (5), págs. 1148-1168.
- Klein, J., Stern, M., Franchin, G., Kayser, M., Inamura, C., Dave, S., Weaver, J. C., Houk, P., Colombo, P., Yang, M. *et al.* (2015). "Additive manufacturing of optically transparent glass". En: *3D Printing and Additive Manufacturing* 2.3, págs. 92-105.
- Klein, S., Simske, S., Adams, G., Parraman, C., Walters, P., Huson, D. y Hoskins, S. (2012). "3D Printing of Transparent Glass". En: *NIP & Digital Fabrication Conference*. Vol. 2012. 2. Society for Imaging Science y Technology, págs. 336-337.
- Koob, S, Benrubi, S., Giffen, N. A. R. van y Hanna, N. (2011). "An Old Material, a New Technique: Casting Paraloid B 72 for filling Losses in Glass". En: *Proceedings of Symposium*, págs. 1-12.
- Koob, S. P. (2000). "New techniques for the repair and restoration of ancient glass". En: *Studies in Conservation* Vol. 45 (1), págs. 92-95.
- Kotz, F., Arnold, K., Bauer, W., Schild, D., Keller, N., Sachsenheimer, K., Nargang, T. M., Richter, C., Helmer, D. y Rapp, B. E. (2017). "Three-dimensional printing of transparent fused silica glass". En: *Nature* 544.7650, págs. 337-339.

- Lautenschlager, S. (2016). "Reconstructing the past: methods and techniques for the digital restoration of fossils". En: *Royal Society Open Science* Vol. 3 (10), pág. 160342.
- Leap Motion, I. (2017). *Leap Motion Controller*. URL: <https://leapmotion.com/product>.
- Li, R., Luo, T. y Zha, H. (2010). "3D digitization and its applications in cultural heritage". En: *Digital Heritage*, págs. 381-388.
- Londoncharter (2009). *The London Charter for the computer-based visualization of cultural heritage*. URL: <http://www.londoncharter.org/>.
- López Ballester, M. E. (2009a). "Estudio analítico y desarrollo de métodos de intervención conservativa de vidrio arqueológico (siglos XV-VII) de la Comunidad Valenciana". Tesis doct. Cap. 2.
- (2009b). "Estudio analítico y desarrollo de métodos de intervención conservativa de vidrio arqueológico (siglos XV-VII) de la Comunidad Valenciana". Tesis doct. Cap. 5.
- Luo, T., Li, R. y Zha, H. (2011). "3D line drawing for archaeological illustration". En: *International Journal of Computer Vision* Vol. 94 (1), págs. 23-35.
- Marcon, P. (1991). "A circular slide rule for protective package design". En: *Arte in Transit: Studies in the Transport of Paintings*, págs. 93-106.
- (2011). *Six Steps to Safe Shipment*. URL: <http://canada.pch.gc.ca/eng/1444920450433>.
- (2013). *Agent of Deterioration: Physical Forces*. URL: <http://canada.pch.gc.ca/eng/1444924113472>.
- Marcon, P. y Strang, T. (1999). *PadCAD Cushion Design Software Version 3.0 for Windows*. Canadian Conservation Institute. Ottawa. Canada.
- Martínez, B., Pasies, T. y Peiró, M. A. (2011). "Reversibility and minimal intervention in the gap-filling process of archaeological glass". En: *e_conservation* (20), pág. 45.
- Martínez Carrillo, A., Ruiz Rodríguez, A. y Paramio Rubio, M. Á. (2010). "Digitalización y visualización 3D de cerámica arqueológica". En: *Virtual Archaeology Review* Vol. 1 (2), págs. 133-136.

- Matteini, M. y Moles, A. (1996). *Ciencia y restauración*. Editorial NEREA.
- Matusik, W., Pfister, H., Ziegler, R., Ngan, A. y McMillan, L. (2002). "Acquisition and rendering of transparent and refractive objects". En: *Thirteenth Eurographics Workshop on Rendering*. Association for Computing Machinery.
- Melchor, J. M., Martínez, J., Bonafe, C. y Cabrera, A. (2016). "La virtualización en el museo arqueológico de Burriana (Castellón-España)". En: *Proceedings of the 8th International Congress on Archaeology, Computer graphics, Cultural Heritage and Innovation 'ARQUEOLOGICA 2.0'*, págs. 78-83.
- Mériaudeau, F., Rantson, R., Fofi, D. y Stolz, C. (2012). "Review and comparison of non-conventional imaging systems for three-dimensional digitization of transparent objects". En: *Journal of Electronic Imaging* Vol. 21 (2), págs. 021105-1.
- Mohamed, R y Mahmoud, A (2012). "Emphasizing the advantage of 3D printing technology in packaging design development and production in local industries". En: *International Design Journal*, Vol. 1 (1), págs. 111-119.
- Morales Illán, M. L. (1984). "Vidrios de Begastri". En: *Antigüedad y cristianismo, Vol. 1*, págs. 173-180.
- Moreno Martín, A. y Quixal Santos, D. (2012-2013). "Bordes, bases e informes: el dibujo arqueológico de material cerámico y la fotografía digital". En: *Arqueo-web. Revista sobre Arqueología en Internet* (14), págs. 178-214.
- Muñoz, S., Osa, J. y Gironés, I. (2014). *Diccionario Técnico Akal de materiales de restauración*. Ediciones Akal.
- Murdock, C. y Johnson, S. (2001). "Curatorial care of archaeological objectives". En: *NPS Museum Handbook, Part I: Museum Collections*. National Park Service Museum Management Program, Washington, DC, págs. I:1-I:15.
- Muros, V. e Hix, J. (2004). "The Use of Cyclododecane As a Temporary Barrier for Water-Sensitive Ink on Archaeological Ceramics During Desalination". En: *Journal of the American Institute for Conservation* Vol. 43 (1), págs. 75-89.
- Naranjo, A., Pilar Noriega, E del, María, O., Tim, A., Roldán-Alzate, A., Sierra, J. D., Naranjo, A., Pilar Noriega, E del, María, O. y Tim, A (2008). *Plastics Testing and Characterization*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.

- Neamtu, C. y Comes, R. (2016). "Methodology to created digital and virtual 3D artefacts in archaeology". En: *Journal of ancient history and archaeology* Vol. 3 (4).
- Neuner, M., Hubert, M.-O. y Omnès, O. (2001). "Consolidation et protection temporaire: un exemple de traitement des matériaux vitreux à l'aide de cyclo-dodécane". En: *CoRé: conservation et restauration du patrimoine culturel* 10, págs. 18-21.
- Nguyen, D. T., Meyers, C., Yee, T. D., Dudukovic, N. A., Destino, J. F., Zhu, C., Duoss, E. B., Baumann, T. F., Suratwala, T., Smay, J. E. *et al.* (2017). "3D-Printed Transparent Glass". En: *Advanced Materials* Vol. 29, págs. 1-5.
- Ortiz Palomar, M. E. (1994). "Tratamiento para la conservación, restauración y exposición de vidrios antiguos: la reintegración del vidrio con vidrio". En: *Boletín del Museo de Zaragoza* (13), págs. 303-312.
- Pasías, T., Martínez, B., y Peiró, M. A. (2012). "Cuestiones de criterio en la intervención sobre vidrio arqueológico: hacer realidad el concepto de reversibilidad y mínima intervención". En: *Actas del V Congreso del Grupo Español del IIC. Patrimonio Cultural. Criterios de calidad en intervenciones*. Madrid: Grupo Español de Conservación, págs. 285-294.
- Pasías Oviedo, T. (2012). "Reconstrucciones desmontables como alternativa reversible en el proceso de reintegración de materiales arqueológicos". En: *Geconservación* (3), págs. 117-131.
- Pavlidis, G., Koutsoudis, A., Arnaoutoglou, F., Tsioukas, V. y Chamzas, C. (2007). "Methods for 3D digitization of cultural heritage". En: *Journal of cultural heritage* Vol. 8 (1), págs. 93-98.
- Quiñones López, M y García Sandoval, J (2009). "Restauración de vidrio arqueológico. Montaje de vidrio arqueológico sobre resina en las lámparas de la sinagoga de Lorca para su exposición". En: *XX Jornadas de Patrimonio Cultural de la Región de Murcia*, págs. 267-275.
- Rantoson, R., Stolz, C., Fofi, D. y Mériaudeau, F. (2010). "Non contact 3D measurement scheme for transparent objects using UV structured light". En: *Pattern Recognition (ICPR), 2010 20th International Conference on*. IEEE, págs. 1646-1649.

- Raut, S., Jatti, V. S., Khedkar, N. K. y Singh, T. (2014). "Investigation of the effect of built orientation on mechanical properties and total cost of FDM parts". En: *Procedia Materials Science* Vol. 6, págs. 1625-1630.
- Rico, J. C. (2009). *Los conocimientos técnicos: museos, arquitectura, arte*. Sílex ediciones.
- Robles-Ortega, M. D., Feito, F. R., Jiménez, J. J. y Segura, R. J. (2012). "Web technologies applied to virtual heritage: An example of an Iberian Art Museum". En: *Journal of Cultural Heritage* Vol. 13 (3), págs. 326-331.
- Rodgers, B. A. (2004). *The archaeologist's manual for conservation: a guide to non-toxic, minimal intervention artifact stabilization*. Springer Science & Business Media. Cap. 6, pág. 145.
- Rotaeche, M. (2007). *Transporte, depósito y manipulación de obras de arte*. Síntesis.
- Rowe, S. y Rozeik, C. (2008). "The uses of cyclododecane in conservation". En: *Studies in Conservation* Vol. 53 (sup2), págs. 17-31.
- Sá, A. M., Rodríguez-Echavarría, K., Griffin, M., Covill, D., Kaminski, J. y Arnold, D. B. (2012). "Parametric 3D-fitted Frames for Packaging Heritage Artefacts." En: *VAST*, págs. 105-112.
- Salemi, G., Achilli, V. y Boatto, G. (2008). "3D virtual modelling of a gothic stained-glass panel". En: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* Vol. 37 (B5), págs. 297-302.
- Samide, M. J. y Smith, G. D. (2015). "Analysis and quantitation of volatile organic compounds emitted from plastics used in museum construction by evolved gas analysis-gas chromatography-mass spectrometry". En: *Journal of Chromatography A* 1426, págs. 201-208.
- San Andrés, M., Chércoles, R., Roja, J. De la y Gómez, M (2010). "Factores responsables de la degradación química de los polímeros. Efectos provocados por la radiación lumínica sobre algunos materiales utilizados en conservación de objetos patrimoniales. Primeros resultados". En: *Proceedings XI Jornada de Conservación de Arte Contemporáneo (GEIIC), Madrid*, págs. 331-338.
- Sánchez Belenguer, C. y Vendrell Vidal, I. E. (2012). "Archaeological fragment characterization and 3D reconstruction based on projective GPU depth maps".

- En: *Virtual Systems and Multimedia (VSMM), 2012 18th International Conference on*. IEEE, págs. 275-282.
- Sánchez-Belenguer, C., Vendrell-Vidal, E., Sánchez-López, M., Díaz-Marín, C. y Aura-Castro, E. (2015). "Automatic Production of Tailored Packaging for Fragile Archaeological Artifacts". En: *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)* 8.3, págs. 1-11.
- Sanchis, A. (2015). *Un mundo de fieras. Grande carnívotos en la prehistoria valenciana*. (Exposición celebrada en el Museo de Prehistoria de Valencia, del 11 de noviembre de 2015 al 20 de marzo de 2016). Diputación de Valencia.
- Sanchis, A., Tormo, C., Sauqué, V., Sanchis, V., Díaz, R., Ribera, A. y Villaverde, V. (2015). "Pleistocene leopards in the Iberian Peninsula: New evidence from palaeontological and archaeological contexts in the Mediterranean region". En: *Quaternary Science Reviews* Vol. 124, págs. 175-208.
- Santos, R., Pimenta, A, Botelho, G y Machado, A. (2013). "Influence of the testing conditions on the efficiency and durability of stabilizers against ABS photo-oxidation". En: *Polymer Testing* Vol. 32 (1), págs. 78-85.
- Saviello, D., Pouyet, E., Toniolo, L., Cotte, M. y Nevin, A. (2014). "Synchrotron-based {FTIR} microspectroscopy for the mapping of photo-oxidation and additives in acrylonitrile-butadiene-styrene model samples and historical objects". En: *Analytica Chimica Acta* Vol. 843, págs. 59-72.
- Schlichting, C. (1994). *Working with polyethylene foam and fluted plastic sheet. Travail de la mousse de polyéthylène et des feuilles de plastique cannelées*. Canada. Department of Canadian Heritage. Canadian Conservation Institute. Canada. Ministère du patrimoine canadien. L'Institut canadien de conservation.
- Scopigno, R., Cignoni, P., Pietroni, N., Callieri, M. y Dellepiane, M. (2014). "Digital fabrication technologies for cultural heritage (STAR)". En: *12th Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage, Darmstadt, Germany*. Vol. 10.
- Shashoua, Y. (2012). *Conservation of plastics*. Routledge.
- Singh, K., Kalra, P. y Singh, J. (2015). "Virtual restoration and rapid prototyping of archaeological findings". En: *International Journal for Technological research in engineering* Vol. 2, págs. 2877-2879.

- Siotto, E., Dellepiane, M., Callieri, M., Scopigno, R., Gratziu, C., Moscato, A., Burgio, L., Legnaioli, S., Lorenzetti, G. y Palleschi, V. (2015). "A multidisciplinary approach for the study and the virtual reconstruction of the ancient polychromy of Roman sarcophagi". En: *Journal of Cultural Heritage* Vol. 16 (3), págs. 307-314.
- Skabek, K. y Kowalski, P. (2009). "Building the models of cultural heritage objects using multiple 3D scanners". En: *Theoretical and Applied Informatics* Vol. 21 (2), págs. 115-129.
- Slama, C. C., Theurer, C. y Henriksen, S. W. (1980). *Manual of photogrammetry*. American Society of photogrammetry.
- Smithsonian (2014). *Smithsonian X 3D*. URL: <https://3d.si.edu>.
- Solórzano-Venegas, M. S., Bolaños-Zarate, J. E., Velazco, U. C. J. y Gallardo, M. S. V. (2016). "Guía básica para modelado en 3D de objetos cerámicos arqueológicos completos y fragmentados". En: *@rqueología y Territorio* (13), págs. 123-132.
- Sotodosos San Clemente, A. (2015). "La tecnología de digitalización 3d como herramienta idónea en el registro arqueológico y en la realización de dibujos arqueológicos de vidrio". Tesis de maestría. Universitat Politècnica de València.
- Stanco, F., Tanasi, D. y Gallo, G (2011). "Virtual restoration of fragmented glass plate photographs of archaeological repertoires". En: *Virtual Archaeology Review* Vol. 2 (3), pág. 141.
- Stein, R., Kimmel, J., Marincola, M. y Klemm, F. (2000). "Observations on cyclo-dodecane as a temporary consolidant for stone". En: *Journal of the American Institute for Conservation* Vol. 39 (3), págs. 355-369.
- Stolow, N. (1981). *Procedures and conservation standards for museum collections in transit and on exhibition*. Unesco.
- (1987). *Conservation and exhibitions: packing, transport, storage, and environmental considerations*. Butterworths.
- Tanoto, Y. Y., Anggono, J., Siahaan, I. H., Budiman, W., Kristiawan, B., Anwar, M., Wijayanta, A. T., Hadi, S., Danardono, D. y Ariawan, D. (2017). "The effect of orientation difference in fused deposition modeling of ABS polymer on the processing time, dimension accuracy, and strength". En: *AIP Conference Proceedings*. Vol. 1788. AIP Publishing, págs. 030051-1-030051-7.

- Tejerina Antón, D., Esclapés Jover, F. J., Pasíes Oviedo, T. y Melchor Montserrat, J. M. (2011). “La restauración virtual de piezas arqueológicas a partir de datos procedentes de escáner 3D: reconstrucción volumétrica de una jarrita islámica del Museo Arqueológico Municipal de la Plana Baixa-Burriana (Castellón).” En: *III Internacional de Arqueología, Informática Gráfica, Patrimonio e Innovación 'ARQUEOLOGICA 2.0'*.
- Telstar (2013). *Perfilometría mecánica*. URL: <http://www.telstar-instrument.com/productos/metrologia/%20de%20superficies/perfilometria/%20mecanica.htm>.
- Tétreault, J. y Williams, S. (1993). “Guidelines for selecting materials for exhibit, storage and transportation”. En: *“Conservationally Correct”: Realities and Innovations for Exhibitions*.
- Thickett, D. y Lee, L. R. (2004). *Selection of materials for the storage or display of museum objects*. British Museum London.
- Tiganis, B., Burn, L., Davis, P e Hil, l. (2002). “Thermal degradation of acrylonitriles-butadiene-styrene (ABS) blends”. En: *Polymer Degradation and Stability* Vol. 76 (3), págs. 425-434.
- Tsiafaki, D., Koutsoudis, A., Arnaoutoglou, F. y Michailidou, N. (2016). “Virtual reassembly and completion of a fragmentary drinking vessel”. En: *Virtual Archaeology Review* Vol. 7 (15), págs. 67-76.
- Tucci, G, Cini, D y Nobile, A (2011). “Effective 3D digitization of archaeological artifacts for interactive virtual museum”. En: *Proceedings of the 4th ISPRS International Workshop 3D-ARCH*, págs. 413-420.
- UNE-EN ISO 4582 (Diciembre 2014). *Plásticos. Determinación de los cambios de coloración, aspecto superficial en general y variaciones de las propiedades después de la exposición a la luz natural bajo vidrio, al envejecimiento natural o a las fuentes de luz de laboratorio*.
- UNE-EN ISO 4624 (Diciembre 2003). *Pinturas y barnices. Ensayo de adherencia por tracción*.
- UNE-EN ISO 4628 (Julio 2016). *Pinturas y barnices. Evaluación de la degradación de los recubrimientos. Designación de la intensidad, cantidad y tamaño de los tipos más comunes de defectos*.
- UNE-EN ISO 48-073-94/1-3 (Junio 1994). *Pinturas y barnices*.

- UNE-EN ISO 4892-3 (Julio 2014). *Plásticos. Métodos de exposición a fuentes luminosas de laboratorio*.
- Velios, A. y Harrison, J. (2007). "Digital reconstruction of fragmented archaeological objects". En: *Studies in conservation* Vol. 52 (1), págs. 19-36.
- Vendrell Vidal, E. y Sánchez Belenguer, C. (2014). "A discrete approach for pairwise matching of archaeological fragments". En: *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)* Vol. 7 (3), pág. 15.
- VR, O. (2017). *Oculus Rift DevKit 2*. URL: <https://oculus.com/dk2/>.
- Watters, C. (2007). "Cyclododecane: A Closer Look at Practical Issues". En: *AAS:GXVI*, págs. 195-204.
- Yeung, S.-K., Wu, T.-P., Tang, C.-K., Chan, T. F. y Osher, S. (2011). "Adequate reconstruction of transparent objects on a shoestring budget". En: *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2011 IEEE Conference on*. IEEE, págs. 2513-2520.
- Zheng, S., Huang, R., Li, J y Wang, Z (2014). "Reassembling 3D thin fragments of unknown geometry in cultural heritage". En: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* Vol.2 (5), pág. 393.