

Trabajo Fin de Máster

Propuesta metodológica para documentación y evaluación de elementos patrimoniales dentro del complejo histórico de la Alhambra (Granada) mediante modelización tridimensional

M^a Sonia
FLORES RODRIGUEZ

Curso | 2012-2013
Convocatoria | Septiembre

Director/es:

Fernando CARVAJAL RAMÍREZ
Francisco AGÜERA VEGA

Resumen:

Las técnicas de escaneo 3D cada día se están extendiendo más en el sector del patrimonio. Aunque inicialmente este sector fue reactivo a su implantación, en la actualidad se ha abierto un campo de investigación muy amplio, permitiendo la documentación, evaluación y análisis de piezas de una forma precisa y duradera, entre otras ventajas.

El sector del patrimonio incorpora una serie de dificultades para desarrollar el escaneo 3D, que en ocasiones es complejo o imposible de salvar, como es el caso de piezas donde no puede haber un contacto, el acceso es limitado y con poco espacio, no pueden ser manipuladas, o su reproducción artística dificulta las capturas de las técnicas de escaneo.

El proyecto de investigación desarrollado por este Trabajo Fin de Máster ha consistido en el desarrollo de una técnica capaz de permitir el proceso de escaneo 3D mediante técnicas de escaneo láser tipo pistola con colocación de target o puntos de control, sin necesidad de tocar las piezas escaneadas. La investigación ha sido desarrollada sobre piezas de un alto valor patrimonial procedentes del museo de la Alhambra de Granada y Medina Azahara en Córdoba, cuyo estilo artístico responde al nazarí que configura en las piezas una gran cantidad de agujeros y oquedades que son complejas de capturar por otro tipo de tecnologías.

Para ello se ha desarrollado un sistema de malla envolvente capaz de reproducir la forma de las piezas a una distancia que oscila entre 1cm y 10cm como máximo, sobre las que ubicar las target de referencia del equipo de escaneo, evitando el contacto directo con la pieza de patrimonio y permitiendo su captura de una forma óptima.

Los resultados obtenidos fueron muy buenos consiguiendo reproducir la superficie de las piezas aunque con un cierto retraso en el escaneo frente a la técnica original.

Se consigue por tanto unir con este sistema dos conceptos opuestos dentro de las técnicas de escaneo láser, como son el no contacto y el empleo de target de posicionamiento.



INDICE

Resumen.

1. Introducción.	3
1.1 Tecnologías existentes.....	4
1.2 Proceso de escaneado 3D	9
1.3 Aplicación al sector del patrimonio.	13
1.4 Factores a considerar previamente en cualquier proceso de escaneado 3D.....	13
1.5 Objetivos de investigación	15
2. Materiales y métodos.....	18
2.1. Equipo de digitalización 3D (escáner 3D +PC)	18
2.2. Desarrollo sistema de escaneado sin contacto. Malla flexible.....	24
2.3. Selección de piezas a digitalizar.....	27
2.4. Método de escaneado 3D. Ejecución del proceso de digitalización 3D mediante sistema de malla flexible.....	30
3. Resultados.....	37
3.1. Proceso de digitalización llevado a cabo	37
4. Discusión.....	47
5. Conclusiones.....	48
6. Agradecimientos.	49
7. Referencias.....	49

Resumen.

Las técnicas de escaneado 3D cada día se están extendiendo más en el sector del patrimonio. Aunque inicialmente este sector fue reacio a su implantación, en la actualidad se ha abierto un campo de investigación muy amplio, permitiendo la documentación, evaluación y análisis de piezas de una forma precisa y duradera, entre otras ventajas.

El sector del patrimonio incorpora una serie de dificultades para desarrollar el escaneado 3D, que en ocasiones es complejo o imposible de salvar, como es el caso de piezas donde no puede haber un contacto, el acceso es limitado y con poco espacio, no pueden ser manipuladas, o su reproducción artística dificulta las capturas de las técnicas de escaneado.

El proyecto de investigación desarrollado por este Trabajo Fin de Máster ha consistido en el desarrollo de una técnica capaz de permitir el proceso de escaneado 3D mediante técnicas de escaneado láser tipo pistola con colocación de target o puntos de control, sin necesidad de tocar las piezas escaneadas. La investigación ha sido desarrollada sobre piezas de un alto valor patrimonial procedentes del museo de la Alhambra de Granada y Medina Azahara en Córdoba, cuyo estilo artístico responde al nazarí que configura en las piezas una gran cantidad de agujeros y oquedades que son complejas de capturar por otro tipo de tecnologías.

Para ello se ha desarrollado un sistema de malla envolvente capaz de reproducir la forma de las piezas a una distancia que oscila entre 1cm y 10cm como máximo, sobre las que ubicar las target de referencia del equipo de escaneado, evitando el contacto directo con la pieza de patrimonio y permitiendo su captura de una forma óptima.

Los resultados obtenidos fueron muy buenos consiguiendo reproducir la superficie de las piezas aunque con un cierto retraso en el escaneado frente a la técnica original.

Se consigue por tanto unir con este sistema dos conceptos opuestos dentro de las técnicas de escaneado láser, como son el no contacto y el empleo de target de posicionamiento.

Palabras clave. Escaneado láser, target de posición, escaneado 3D, digitalizado, patrimonio.



Abstract.

Nowadays 3D scanning techniques are increasing in the heritage sector. Though this sector was opposed initially to its implementation, today it has opened a wide research field, allowing the documentation, evaluation and the analysis of pieces by accurate and durable way, among other advantages.

The heritage sector incorporates some difficulties to develop the 3D scanning, which sometimes are complex or impossible to be saved, such as parts where contact is not possible, access is limited and with little space, cannot be manipulated or its artistic reproduction complicates the scanning techniques catches.

The research project developed in this article has consist in the development of a technique able to allowing the 3D scanning process using laser scanning techniques pistol with target placement, without touching the pieces scanned. The research was carried out on pieces with a high heritage value from the Museum of the Alhambra in Granada and Madinat al-Zhara in Cordoba, whose artistic style reflects a Moorish style that sets the pieces in a lot of holes and cavities that are complex captured by other technologies.

For this technique we have developed an evolved metallic mail, able to reproduce the surround and the shape of the pieces at a distance between 1cm and 10cm at most, on which we locate the scanning reference equipment and generate a specific scanning technique for these heritage pieces allowing us his capture in an optimal way.

The results obtained were very good at getting reproduce the surface of the smooth parts, scoring a delay in the scan versus the original technique.

Therefore this technique join two opposites concepts within the laser scanning techniques, such as not contact technique and the use of positioning target.

Key words. Scanning laser, target position, 3D scanning, digitized, heritage.



1. Introducción.

Un escáner 3D es un dispositivo que analiza un objeto o una escena para reunir datos de su forma y ocasionalmente su color. La información obtenida se puede usar para construir modelos digitales tridimensionales que se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones. Desarrollados inicialmente en aplicaciones industriales (metrología, automóvil), han encontrado un vasto campo de aplicación en actividades como la arqueología, arquitectura, ingeniería, y entretenimiento.

El propósito de un escáner 3D es, generalmente, el de crear una nube de puntos a partir de muestras geométricas en la superficie del objeto. Estos puntos se pueden usar entonces para extrapolar la forma del objeto (proceso llamado reconstrucción). Si la información de color se incluye en cada uno de los puntos, entonces los colores en la superficie del objeto se pueden determinar también.

Los escáneres 3D son distintos a las cámaras. Al igual que éstas, tienen un campo de visión en forma de cono, pero mientras una cámara, reúne información de color acerca de las superficies dentro de su campo de visión, los escáneres 3D reúnen información acerca de su geometría. El modelo obtenido por un escáner 3D describe la posición en el espacio tridimensional de cada punto analizado.

Si se define un sistema esférico de coordenadas y se considera que el origen es el escáner, cada punto analizado se asocia con dos coordenadas angulares y con una distancia, que corresponde al componente r . Estas coordenadas esféricas describen completamente la posición tridimensional de cada punto en el modelo, en un sistema de coordenadas local relativo al escáner.

Para la mayoría de las situaciones, un solo escaneo no producirá un modelo completo del objeto. Generalmente se requieren múltiples tomas, incluso centenares, desde muchas direcciones diferentes para obtener información de todos los lados del objeto. Estos escaneos tienen que ser integrados en un sistema común de referencia mediante, un proceso que se llama generalmente alineación, y que transforma las coordenadas locales de cada toma en coordenadas generales del modelo. El proceso completo que va de las tomas individuales a un modelo completo unificado define el flujo de captura de modelo 3D.



1.1. Tecnologías existentes.

Hay dos tipos de escáneres 3D en función de si hay contacto con el objeto o no. Los escáneres 3D sin contacto se pueden dividir además, en dos categorías principales: escáneres activos y escáneres pasivos, que a su vez agrupan a una gran variedad de tecnologías.

Escáneres de Contacto

Los escáneres 3D examinan el objeto apoyando el elemento de medida (palpador) sobre la superficie del mismo, típicamente una punta de acero duro o zafiro. Una serie de sensores internos permiten determinar la posición espacial del palpador. Unos ejemplos de este tipo de sistemas son el CMM (Máquina de medición por coordenadas) o un brazo de medición. Se usan en su mayoría en control dimensional en procesos de fabricación y pueden conseguir precisiones típicas de 0,01 mm. Su mayor desventaja es que requiere el contacto físico con el objeto para ser escaneado, por lo que el acto de escanear el objeto quizás lo modifique o lo dañe. Este hecho es crítico cuándo se escanean objetos delicados o muy valiosos tales como piezas históricas o patrimoniales. La otra desventaja de los CMMs es que son muy lentos en comparación con los otros métodos que se pueden utilizar para escanear. El movimiento físico del brazo donde se monta el escáner puede ser muy lento y el CMMs más rápido, puede sólo operar en unos pocos cientos de hertz. Por contraste, un sistema óptico semejante al de un sistema de escáner de láser puede operar de 10 a 1000 khz.

Escáneres sin contacto

Activos (de interés para la investigación)

Los escáneres activos emiten alguna clase de señal y analizan su retorno para capturar la geometría de un objeto o una escena. Se utilizan radiaciones electromagnéticas (desde ondas de radio hasta rayos X) o ultrasonidos.

Tipo 1 _ Tiempo de vuelo (Time of flight)

El tiempo de vuelo de un escáner 3D determina la distancia a la escena cronometrando el tiempo del viaje de ida y vuelta de un pulso de luz. Un diodo láser emite un pulso de luz y se cronometra el tiempo que pasa hasta que la luz reflejada es vista por un detector. Como la velocidad de la luz C es conocida, el tiempo del viaje de ida y vuelta determina la distancia del viaje de la luz, que es dos veces la distancia entre el escáner y la superficie. Si T es el tiempo del viaje completo, entonces la distancia es igual a $(C * T)/2$. Claramente la certeza de un escáner láser de tiempo de



vuelo 3D depende de la precisión con la que se puede medir el tiempo T: 3,3 picosegundos (aprox.) es el tiempo requerido para que la luz viaje 1 milímetro. Se utilizan láseres visibles (verdes) o invisibles (infrarrojo cercano).

El distanciómetro láser sólo mide la distancia de un punto en su dirección de la escena. Para llevar a cabo la medida completa, el escáner va variando la dirección del distanciómetro tras cada medida, bien moviendo el distanciómetro o deflectando el haz mediante un sistema óptico. Este último método se usa comúnmente porque los pequeños elementos que lo componen pueden ser girados mucho más rápido y con una precisión mayor. Los escáneres láser de tiempo de vuelo típicos pueden medir la distancia de 10.000 ~ 100.000 puntos cada segundo.

Sus características principales son:

- Rápido muestreo.
- Dispone de un sistema de medición (contador) que se reinicia al alcanzar el objetivo.
- Suelen ser equipos de alta precisión (submilimétrica).
- Apto para trabajos de alta precisión en monumentos o elementos constructivos (para el análisis de las deformaciones).
- Generación de una alta densidad de puntos.
- Frecuencia oscilante entre los 10.000-100.000 puntos.

A continuación se enumeran algunos ejemplos de escáneres basado en el tiempo de vuelo, Callidus CP3200, Leica ScanStation2, Leica C10, Mensi GS100/200 (ahora Trimble GX), Optech ILRIS, Riegl (toda la gama).

Tipo 2 _ de triangulación.

El escáner láser de triangulación 3D es también un escáner activo que usa la luz del láser para examinar el entorno. El haz de luz láser incide en el objeto y se usa una cámara para buscar la ubicación del punto del láser. Dependiendo de la distancia a la que el láser golpee una superficie, el punto del láser aparece en lugares diferentes en el sensor de la cámara.



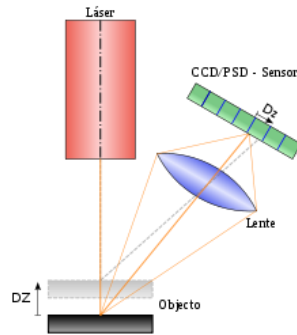


Imagen 1. Representación de la captura en los escáneres de captura por triangulación.

Esta técnica se llama triangulación porque el punto del láser, la cámara y el emisor del láser forman un triángulo. La longitud de un lado del triángulo definido por la cámara y el emisor del láser es conocida. El ángulo del vértice del emisor de láser se sabe también. El ángulo del vértice de la cámara (paralaje) puede ser determinado mirando la ubicación del punto del láser en la cámara. Estos tres valores permiten determinar el resto de las dimensiones del triángulo, y por tanto, la posición de cada punto en el espacio.

La precisión de este sistema de medida puede ser muy elevada (milésimas de milímetro), pero depende del ángulo del vértice opuesto al escáner (cuanto más se aparte de 90° más baja es la precisión), lo que limita el tamaño de la escena a analizar. Dado que ese ángulo depende fuertemente de la distancia entre el emisor láser y la cámara, el aumentar el alcance supone incrementar mucho el tamaño del equipo de medida. En la práctica, el alcance máximo de estos escáneres se limita a 20-30 cm, requiriendo un espacio de trabajo circundante de 1m alrededor de la pieza si está tiene unas dimensiones considerables.

En la mayoría de los casos en lugar de un punto de medida se proyecta una línea que barre la superficie del objeto para acelerar el proceso de adquisición.

A continuación se enumeran algunos ejemplos de escáneres 3D por triangulación: Konica Minolta Vivid, Exascan, ZScanner, etc.

Tipo 3 _ Diferencia de fase

Este tercer tipo de escáner mide la diferencia de fase entre la luz emitida y la recibida, y utiliza dicha medida para estimar la distancia al objeto. El haz láser emitido por este tipo de escáner es continuo y de potencia modulada.

El rango y la precisión de este tipo de escáner son intermedios, situándose como una solución entre el largo alcance de los dispositivos TOF y la alta precisión de los



escáneres por triangulación. Su alcance ronda los 200 m en condiciones de poco ruido (baja iluminación ambiente), y su error característico ronda los 2 mm por cada 25m.

En algunos modelos, el alcance está limitado precisamente por su modo de funcionamiento, ya que al modular el haz con una frecuencia constante, existe ambigüedad en la medida de la distancia proporcional a la longitud de onda de la modulación utilizada.

La precisión de la medida también depende de la frecuencia utilizada, pero de manera inversa a como lo hace el alcance, por lo cual estos conceptos son complementarios, y se debe encontrar un punto de compromiso entre ambos, o bien utilizar dos frecuencias distintas (multi-frequency-ranging). La velocidad de adquisición es muy alta, consiguiendo en los modelos actuales velocidades de escaneo que oscilan entre los 100.000 y 1 millón de puntos por segundo, en función de la precisión requerida.

Las características principales de este tipo de equipos se enumeran a continuación:

- Haz continuo y de potencia modulada.
- Rango y precisión intermedio (100 metros en condiciones de baja iluminación ambiente).
- Error característico de 2 mm a los 25 m.
- Alcance limitado por el fenómeno de ambigüedad de la onda en función de la frecuencia utilizada.
- Posibilidad de establecer un modo de multifrecuencia.
- Tiempo de adquisición del producto intermedio.
- Velocidades de escaneo comprendidas entre los 100.000 y el millón de puntos.

Se indican a continuación algunos ejemplos de escáneres basados en la tipología de diferencia de fase: Faro Photon, Zoom, Trimble CX (mixto, fase y tiempo de vuelo), Trimble FX, Z+F Imager 5005, 5010, etc.

Además de la tecnología láser empleada por los equipos de escaneo, también se emplea la tecnología denominada luz estructurada, la cual es más novedosa y en la actualidad sigue conformando gran parte de las líneas de investigación en el campo de la digitalización 3D.



La luz estructurada

Los escáneres 3D de luz estructurada proyectan un patrón de luz en el objeto y analizan la deformación del patrón producida por la geometría de la escena. El modelo puede ser unidimensional o de dos dimensiones. Un ejemplo de un modelo unidimensional es una línea. La línea se proyecta sobre el objeto que se analiza con un proyector de LCD o un láser. Una cámara, desviada levemente del proyector de modelo, mira la forma de la línea y usa una técnica semejante a la triangulación para calcular la distancia de cada punto en la línea. En el caso del modelo de una sola línea, la línea se barre a través del campo del panorama para reunir información de distancia. Un ejemplo de un modelo bidimensional es una cuadrícula o un modelo de líneas. Para registrar la deformación del modelo se utiliza una cámara y un algoritmo complejo para calcular la distancia a cada punto en el modelo. Uno de los inconvenientes que presenta esta tecnología es la ambigüedad. En objetivos no triviales que contienen cambios de patrón y de profundidad, hoyos y oclusiones, la secuencia capturada por el equipo puede esconder ciertas líneas creadas por la descomposición de la toma, dando lugar a zonas ocultas o incluso cambiadas de orden, esto se debe al fenómeno de ambigüedad de raya que se ocasiona en el láser. Si bien en la actualidad este fenómeno ha sido resuelto mediante una tecnología de ruptura llamada Multistripe Laser Triangulation (MLT).

La ventaja de los escáneres 3D de luz estructurada es la velocidad. En vez de escanear un punto, escanean múltiples puntos o el campo entero del panorama. Esto reduce o elimina el problema de la deformación del movimiento. Algunos sistemas existentes son incluso capaces de escanear objetos en movimiento en tiempo real.

La luz modulada

Los escáneres 3D de luz modulada emiten una luz continuamente cambiante en el objeto. Generalmente la fuente de luz simplemente cicla su amplitud en un patrón sinodal, una cámara detecta la luz reflejada y la cantidad que el patrón de luz cambia para determinar la distancia que viaja la luz.

A continuación se muestra un esquema resumen de las tecnologías de escaneado 3D existentes:



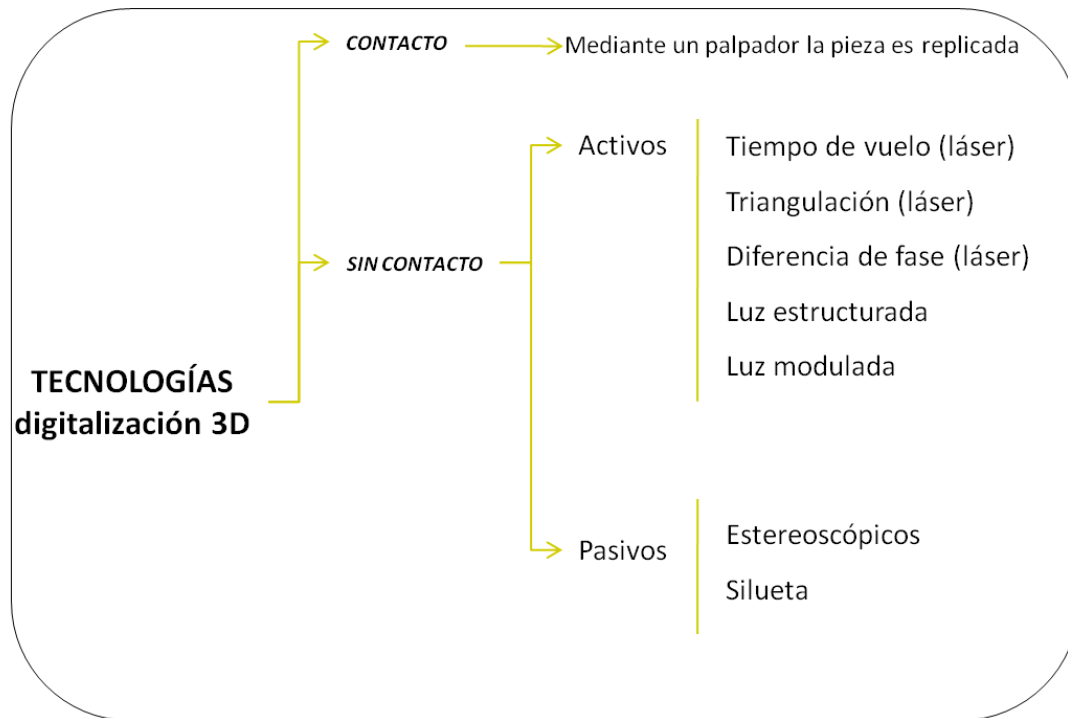


Imagen 2. Tecnologías de escaneado 3D existentes.

1.2. Proceso de escaneado 3D

El proceso de escaneado 3D está conformado por dos pasos principales:

- 1- Toma de datos o Captura.
- 2- Reconstrucción y Modelado.

A estos pasos les seguirán aquellos específicos del sector para el que haya sido realizado el escaneo, pudiendo servir para documentación de piezas, como base en la representación de edificios, etc.

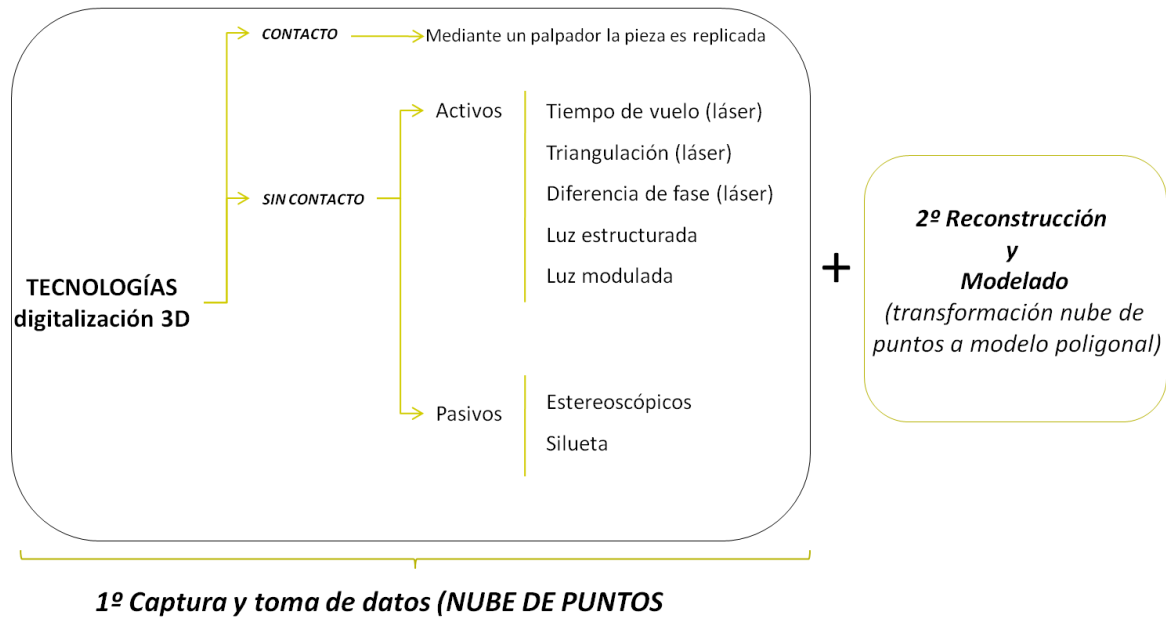


Imagen 3. Esquema de división de pasos a seguir en el proceso de escaneo 3D.

1- Toma de datos o Captura.

Como se ha explicado en el apartado anterior, el paso uno, se realiza mediante el equipo de escaneo seleccionado, que variará en función del objetivo a escanear, pieza de detalle, edificio, entorno, etc. En líneas generales, la selección se realiza en base a la pieza u objeto y al uso del resultado.

En el siguiente cuadro se indican los principales campos de aplicación de cada uno de los equipos y tecnologías:



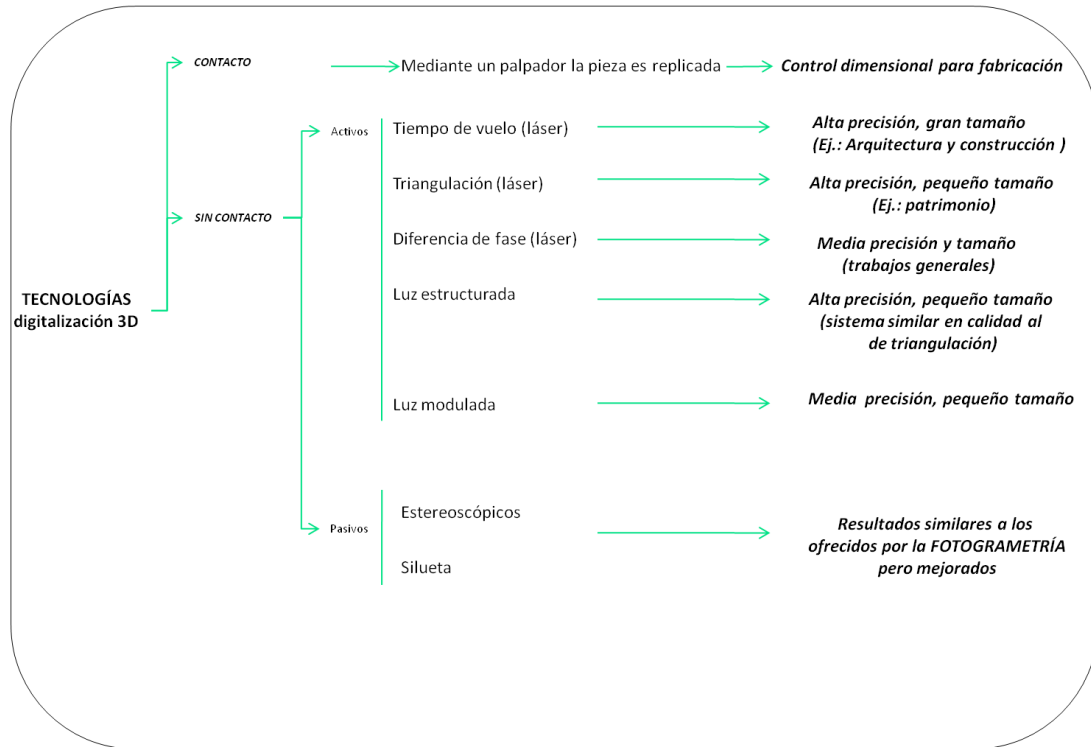


Imagen 4. Usos de la tecnología de escaneo 3D.

2- Reconstrucción y Modelado

Las nubes de puntos producidas por los escáneres 3D pueden ser utilizadas directamente para la medición y la visualización en el mundo de la arquitectura y la construcción. No obstante, la mayoría de las aplicaciones utilizan modelos 3D poligonales, modelos de superficies NURBS, o modelos CAD basados en las características (modelos sólidos).

Modelos de malla de polígonos

Es una representación poligonal de una forma, una superficie curva es modelada a partir de muchas superficies planas pequeñas (al igual que una esfera es modelada como una bola de discoteca). El proceso de convertir una nube de puntos en un modelo poligonal 3D se llama reconstrucción. La reconstrucción de modelos poligonales implica encontrar y conectar los puntos adyacentes mediante líneas rectas con el fin de crear una superficie continua.

Los modelos poligonales, también llamados modelos de malla, son útiles para la visualización o para algunas aplicaciones CAM, pero son, en general, "pesados" (archivos de datos muy grandes), y son relativamente difíciles de editar en este formato.



Modelos de superficies

El siguiente nivel de sofisticación en la modelización implica el uso de un conjunto de pequeñas superficies curvas que unidas entre sí modelan la forma del objeto. Estas superficies pueden ser NURBS, T-Splines u otras representaciones de curvas. Utilizando NURBS, la esfera es una esfera matemática verdadera.

Estas superficies tienen la ventaja de ser más ligeras y más fácilmente manipulables cuando se exportan a CAD. Los modelos de superficie son algo más modificables, pero sólo en un sentido escultórico de empujar y tirar para deformar la superficie. Esta representación se presta bien al modelado de formas orgánicas o artísticas.

Modelos sólidos CAD

Desde el punto de vista de la ingeniería y la fabricación, la representación fundamental de una forma digitalizada es el modelo CAD, totalmente editable. En CAD, la esfera está descrita por parámetros que son fácilmente editables mediante el cambio de un valor (por ejemplo, el centro de la esfera o su radio).

Estos modelos CAD no describen simplemente el envoltorio o la forma del objeto, sino que también incorporan la "intención del diseño" (es decir, las características fundamentales y su relación con otras funciones).

Existen multitud de enfoques que pueden ser empleados para llegar al modelo CAD, algunos exportan las superficies NURBS tal cual y dejan que sea el diseñador el que complete el modelo en CAD (por ejemplo, Geomagic, ImageWare, Rhino), otros utilizan el análisis de los datos para crear un modelo editable basado en las características que se importa en CAD con el árbol de características intacto, produciendo un modelo completo y nativo de CAD, recogiendo tanto la forma como la finalidad del diseño (Geomagic, Rapidform). Mientras que otras aplicaciones de CAD son lo suficientemente robustas como para manipular modelos de un número limitado de puntos o polígonos dentro del entorno CAD (por ejemplo, Catia).

Por tanto el proceso general de escaneado 3D puede resumirse a una captura de datos mediante el equipo de escaneo, transformación de estas capturas en puntos mediante el software específico del escáner, reconstrucción y modelado mediante otros softwares específicos de trabajo sobre la superficie y finalización mediante un archivo digital con el volumen de la pieza completo.



1.3. Aplicación al sector del patrimonio.

A continuación se enumeran las posibles aplicaciones que pueden darse al archivo generado por escaneo 3D dentro del campo del patrimonio que es donde aplica la técnica generada por esta investigación:

- Documentación, registro, evaluación y análisis.
- Réplicas de seguridad en caso de catástrofe.
- Réplicas virtuales para investigación de proporciones y mediciones.
- Réplicas virtuales para creación de soportes de transferencia del conocimiento hacia el público general.
- Desarrollo de hologramas de realidad virtual.
- Visitas guiadas virtuales de los museos.
- Réplicas en diversos materiales para su uso en exposiciones itinerantes, copias expuestas al público para que puedan ser manipuladas, copias para estudios en diversos puntos geográficos, etc.
- Soporte para medios de aprendizaje en universidades y público en general sobre estilos y proporciones de las técnicas empleadas por un periodo cultural.
- Estudios sobre los productos de la época para el desarrollo de productos actuales basados en ese conocimiento cultura.

Expuestas las bases del sistema de escaneado y las diferentes tecnologías existentes, se expone el objetivo y motivaciones que han dado lugar al proyecto de investigación desarrollado.

1.4. Objetivos de investigación

El objetivo de la investigación es fijar las bases y la metodología a seguir para el desarrollo del escaneado 3D de piezas del patrimonio histórico donde se presenten las peculiaridades de requerir versatilidad de movimiento, captura de oquedades y donde el contacto con las piezas no sea posible, quedando un vacío respecto de las técnicas a emplear.

Para el desarrollo de la investigación se ha contado en el proyecto con la colaboración de CTAP (Centro Tecnológico Andaluz de la Piedra) como entidad desarrolladora de un proyecto de digitalización de piezas del museo de la Alhambra y Medina Azahara para el futuro desarrollo de nuevos productos capaces de abrir nuevos mercados en Marruecos, este proyecto se acoge a la línea ReTCETEC del Programa Cooperación Transfronteriza España-Fronteras Exteriores (POCTEFEX) del Objetivo de Cooperación Territorial Europea 2007-2013 y está cofinanciada en un 75%



por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER). El mismo, ha permitido la financiación de todas las acciones y los permisos para digitalizar en los entornos de trabajo del proyecto. Se ha contado además con la colaboración del Patronato de la Alhambra y el Generalife de Granada y Madinat al-Zhara Medina Azahara en Córdoba como responsables de las piezas y gestores de estos espacios del patrimonio histórico.

Con este trabajo se pretende poner de manifiesto los conocimientos adquiridos y desarrollados en la ejecución de este trabajo a modo de transferencia y divulgación de los mismos, desarrollando un conjunto de técnicas que sienten las bases de una metodología para el digitalizado de piezas patrimoniales mediante técnicas de modelado 3D donde no pueda existir contacto con la pieza y se requiera versatilidad en la toma de superficies, mediante el uso de un escáner 3d manual de tipo pistola.

Objetivos específicos

- Desarrollar un sistema que permita el escaneado 3D con equipos transportables tipo pistola de piezas patrimoniales de difícil acceso o donde se requiere mucha versatilidad mediante la creación de una técnica basada en la colocación de un sistema sobre la pieza capaz de contener los target propios de referenciación del equipo de escaneo sin tocar la pieza ni causar ningún tipo de daño.
- Desarrollar un sistema flexible capaz de adaptarse a la geometría de cualquier pieza y que tenga la capacidad de dar soporte a los target necesarios en los equipos láser tipo pistola.
- Búsqueda de un material de malla flexible con capacidad de mantenimiento de forma pero con aspecto plástico y no metálico para no interferir con la tecnología láser.
- Sistema de malla con capacidad para albergar los target a distancias mínimas de 2-3cm entre ellas.
- Sistema de malla con espesor por debajo de los 2mm para no aparecer como ruido en las capturas con el equipo.
- Sistema de malla con capacidad de captura de pieza principal



1.5. Factores a considerar previamente en cualquier proceso de escaneado 3D.

La digitalización 3D en sí misma, presenta un conjunto de limitantes que deben ser estudiados y evaluados previamente a cualquier trabajo de campo a desarrollar, ya que la selección del equipo y tecnología a emplear determinarán el éxito del archivo escaneado a obtener. El desconocimiento de todos los equipos existentes, así como la imposibilidad de encontrar empresas capaces de disponer de todas ellas, da pie en muchos casos, a ser desarrollados con técnicas no apropiadas.

Si además de esta problemática se incluye el parámetro patrimonio, el problema aumenta de complejidad, ya que en este campo se introducen verdaderas complejidades que para ser salvadas se requiere no solo de un gran equipamiento, sino de verdadero ingenio.

A continuación se enumeran los grandes limitantes que rodean a este tipo de técnicas:

- 1- Tecnología y equipo a emplear en el trabajo de campo.
- 2- Peculiaridades impuestas por la pieza a desarrollar.

El equipo debe siempre seleccionarse en función de la pieza a escanear así como del entorno en el que se encuentra la misma, ya que todos los factores afectaran al correcto desarrollo del proceso.

Los factores que determinan la elección del equipo son:

- Material (brillos)

El material que conforme la pieza a digitalizar es determinante, ya que en función de él se tendrán referencias de la textura a obtener en la superficie digitalizada.

El primer factor a esclarecer será saber si la pieza está realizada en algún material brillante del tipo metales reflectantes, etc. Este tipo de superficies son las más complejas de estudiar, ya que en el caso de la tecnología láser una superficie brillante impide al láser realizar el barrido, reflectándolo y generando una superficie llena de ruido o picos que no son una representación de la superficie, sino un texturizado defectuoso. En estos casos se pueden disponer de dos alternativas:

- a. Cubrir la pieza con sprays especializados que recubran los brillos y poder emplear la tecnología láser pero con ciertos limitantes.



b. Luz estructurada. Sin duda esta tecnología aportará mejores resultados en este tipo de casos.

- Ubicación (int, ext, en altura)

Es muy importante considerar que para el digitalizado de cualquier pieza se deberá disponer como mínimo de un espacio de trabajo circular alrededor, que cubra un radio de 1m de distancia a la pieza, de forma que pueda capturarse imágenes alrededor de la misma. (Factor 1 ubicación_ radio 1m libres alrededor). Esta distancia puede ser menor en función del equipo, pero para un trabajo óptimo no debe disponerse de menos de 1m como distancia mínima de movilidad del técnico y el equipo. (Los equipos de pistola transportables son capaces de digitalizar a 20-30cm de la pieza).

La ubicación incorpora dos parámetros más a tener en cuenta, si la pieza se encuentra en el interior o en el exterior al aire libre. Este factor es muy importante porque no todas las tecnologías láser son capaces de escanear con un índice de luminosidad elevado, por lo que en ocasiones existen dos soluciones si la pieza está en el exterior, sustituir la tecnología por una válida para exteriores o construir una cámara oscura que aisle la pieza en el exterior. (Factor 2 ubicación_ exteriores)

Por otro lado, se deberá conocer previamente que posición ocupa y si la pieza puede o no ser manipulada. Si la pieza se encuentra en altura y no puede ser manipulada, se deberá disponer de una estructura de elevación o sistema que permita elevar todo el equipo. Una vez se conoce que la pieza está ubicada en altura, se deberá conocer si alrededor de la misma existe un espacio de trabajo circular que cubra 1m libres alrededor de todos sus puntos (en todas las tecnologías salvo en el equipo de pistola), de no ser así, o la pieza se manipula o solo podrá digitalizarse la superficie vista de la misma. (Factor 3 ubicación_ altura).

- Protección (se puede tocar)

Cuando se trabaja con piezas pertenecientes al patrimonio histórico, es importante considerar si la pieza puede o no ser manipulada o simplemente tocada, principalmente porque algunas tecnología pueden requerir el uso de target de posicionamiento (son pegatinas adhesivas referenciadas) que deber ser colocadas sobre las piezas y que en ocasiones no está permitido. Este factor suele guiarse principalmente por lo muy importante que sea la pieza, o por el material en el que está realizada, ya que si se trata de materiales naturales como por ejemplo la madera, el



riesgo de ubicar target es muy alto porque el adhesivo que emplea puede arrastrar parte del acabado de la pieza y por tanto ser deteriorada.

Es muy importante asegurar en patrimonio la inocuidad tanto del equipo como de las técnicas empleadas sobre las piezas, cualquier error o daño, supone un alto coste.

- Geometría

La geometría es el factor menos limitante, sobre todo porque en general todas las tecnologías están preparadas para cualquier forma geométrica, si bien, un aspecto a tener en cuenta son los ángulos de 90° o bordes de 90° que requieren de giros muy grandes para ser capturados. En estos casos los equipos tipo pistola libre suelen tener ciertos limitantes y provoca la captura de superficies erróneas.

- Estilo artístico (huecos)

El estilo artístico es importante no por el estilo en sí mismo, sino porque indica el nivel de huecos o grandes relieves que puede poseer la pieza. Los equipos tanto de luz estructurada como láser, tienen el gran inconveniente de disponer de una longitud de penetración en los huecos de las piezas, a partir de la cual no toma la captura o no puede acceder a ellos. Además hay que tener en cuenta que la tecnología se articula en base a dos zonas de captura, la lente y el barrido láser o de luz, por lo que cuando una de las dos (pueden ser tres dependiendo de los equipos) se ve interrumpida por superficie la captura no se lleva a cabo.

Por tanto los huecos y geometrías complejas con relieves ocasionan uno de los grandes limitantes de esta tecnología que además no pueden ser salvados por medio de ninguna técnica, ya que el barrido es inexistente, quedando solo la alternativa de la reconstrucción mediante software, dando lugar a una superficie que no es fidedigna con respecto a la original.

- Tamaño.

Aunque el tamaño no es un limitante a priori de ninguna de las tecnologías, si es un factor a tener en cuenta a la hora de la ejecución o de las técnicas empleadas, ya que a grandes superficies a capturar hay que tener en cuenta que los ficheros alcanzarán grandes pesos y la manipulación de estos datos resultará compleja con ciertos equipos. En el caso de piezas grandes, suelen ganar las tecnologías más estacionarias del tipo trípodes o brazos articulados que los equipos tipo pistola libre que se suelen apoyar en equipos portátiles, sobre todo porque alcanzado un nivel de procesamiento es imposible llevar a cabo la pieza en un solo documento inicial.



Este factor no se toma como muy limitante para ninguna tecnología sobre todo porque siempre existe la posibilidad de dividir la pieza en secciones de captura y proceder con su digitalización.

Como se ha mencionado al inicio de este trabajo, el equipo seleccionado para desarrollar la investigación de campo ha sido un **equipo láser de tipología transportable tipo pistola** que requiere de target de apoyo para referenciar la pieza en el espacio y auto montar las vistas. Se ha seleccionado este equipo en particular por las premisas impuestas en este tipo de piezas, como son la imposibilidad de poder tocar las piezas, estar situadas en ubicaciones complejas y por el propio estilo artístico de las piezas que invalida el resto de tecnologías a usarse.

En consecuencia a la elección, se hace necesario cumplir con la premisa de no tocar las piezas (el equipo pistola se apoya en el uso de target), para lo que se lleva a cabo el desarrollo de un nuevo sistema que permita saltar estos limitantes y generar un nuevo sistema de escaneado. La nueva técnica de escaneado consiste en un sistema de malla flexible que ofrece soporte a los target de posicionamiento durante el escaneado y por tanto el uso de este tipo de equipos.

2. Materiales y métodos.

2.1. Equipo de digitalización 3D (escáner 3D +PC)

Teniendo en cuenta la variedad de equipos a emplear, se selecciona el equipo de topología pistola libre, por ser el único que ofrece libre movimiento para la captura de los huecos presentes en este tipo de piezas, ya que cualquier otra técnica requeriría del empleo de multitud de capturas desde todas las perspectivas pero seguiría sin optimizar los resultados.

La tecnología de pistola libre apoyada en el software de post-procesado puede arrojar unos óptimos resultados, ya que el software tiene la capacidad de rellenar los posibles agujeros que puedan quedar en los huecos por medio de un recalculado automático.

Se descarta la luz estructurada y el láser en trípode por falta de movilidad y adaptación a las ubicaciones de las piezas que en ocasiones están a ras de suelo y donde los equipos con trípode son incapaces de acceder y de capturar zonas como los cantos exteriores.



Se descarta el empleo del brazo articulado, porque al tener que ser acoplado a una superficie fija y plana en zonas donde haya que moverse en curva por grandes superficies resultaría complejo o imposible.

De las opciones tecnológicas quedarían la luz estructurada portable y las pistolas láser, la luz estructurada tipo pistola de momento no ha sido desarrollada con éxito para trabajos de alto detalle, encontrándose en el mercado equipos que se emplean en capturas de piezas más sencillas y uniformes como puede ser en sector de los astilleros y navíos, si bien, el resultado arrojado para patrimonio es poco preciso y de baja resolución.

Se selecciona por tanto el tipo pistola libre con tecnología láser. La tecnología a testear en la investigación es de la casa Creaform, esta marca ofrece dentro de la línea portátil de láser un grupo de equipos en los que varía el nivel de precisión. Las opciones disponibles son:



Imagen 5. Tipologías de equipos de Creaform.

A continuación se muestra una comparativa entre los equipos disponibles:

	REVscan	EXAscan	MAXscan	VIUscan
Peso	980 g (2.1 lbs.)	1.25 kg (2.75 lbs.)	1.27 kg (2.80 lbs.)	1.3 kg (2.85 lbs.)
Dimensiones	160 x 260 x 210 mm (6.25 x 10.2 x 8.2 in.)	172 x 260 x 216 mm (6.75 x 10.2 x 8.5 in.)	172 x 260 x 216 mm (6.75 x 10.2 x 8.5 in.)	172 x 260 x 216 mm (6.75 x 10.2 x 8.5 in.)
Velocidad de medición	18,000 medidas/s	25,000 medidas/s	18,000 medidas/s	18,000 medidas/s
Tipo de láser	II (seguro para la vista)			
Resolución	0.100 mm (0.004 in.)	0.050 mm (0.002 in.)	0.100 mm (0.004 in.)	0.100 mm (0.004 in.)
Precisión	Hasta 0.050 mm (0.002 in.)	Hasta 0.040 mm (0.0016 in.)	Hasta 0.050 mm (0.002 in.)	Hasta 0.050 mm (0.002 in.)
Exactitud volumétrica⁽¹⁾	0.020 mm + 0.200 mm/m (0.0008 in. + 0.0024 in./ft)	0.020 mm + 0.100 mm/m (0.0008 in. + 0.0012 in./ft)	0.020 mm + 0.025 mm/m (0.0008 in. + 0.0003 in./ft)	0.020 mm + 0.200 mm/m (0.0008 in. + 0.0024 in./ft)
Precisión volumétrica⁽¹⁾ (con MaxSHOT 3D)	0.020 mm + 0.025 mm/m (0.0008 in. 0.0003 in./ft)	0.020 mm + 0.025 mm/m (0.0008 in. 0.0003 in./ft)	N/A	0.020 mm + 0.025 mm/m (0.0008 in. 0.0003 in./ft)



	REVscan	EXAscan	MAXscan	VIUscan
Distancia de seguridad	300 mm (12 in.)	300 mm (12 in.)	300 mm (12 in.) (Scan)	300 mm (12 in.)
Profundidad de campo	± 150 mm (±6 in.)	± 150 mm (±6 in.)	± 150 mm (±6 in.) (Scan)	± 150 mm (±6 in.)
Área transversal del láser	210 mm x 210 mm (8.2 x 8.2 in.)	210 mm x 210 mm (8.2 x 8.2 in.) 60 mm x 60 mm (hi-res) (2.4 in. x 2.4 in.)	210 mm x 210 mm (8.2 x 8.2 in.)	210 mm x 210 mm (8.2 x 8.2 in.)
Resolución de la textura	N/C	N/C	N/C	50 to 250 DPI
Textura de los colores	N/C	N/C	N/C	24 bits, calibración SRGB
Software	VXelements			
Formatos de salida	.dae, .fbx, .ma, .obj, .ply, .stl, .txt, .wrl, .x3d, .x3dz, .zpr			

Tabla 1. Tabla comparativa de tecnologías disponibles en handyscan 3D.



A la vista de las especificaciones técnicas de cada equipo, el seleccionado fue el modelo EXAscan por destacar sobre el resto en sus parámetros precisión y resolución, los cuales lo hacen más adecuado para el trabajo con piezas de patrimonio que requieren una réplica 3D de alta precisión capaz de capturar los pequeños detalles.

Este equipo permite además disminuir la distancia circundante necesaria para proceder al escaneo, siendo suficiente una distancia a la pieza de 30cm.

El software específico utilizado por este escáner es el VXelements. Como se explicaba anteriormente estos programas, aunque distintos de unas marcas comerciales a otras, el resultado y el proceso de trabajo es muy similar. Estos programas permiten adquirir los datos y optimizarlos.

Las características específicas de VXelements se indican a continuación:

- Algoritmo de optimización de superficie que evita la creación de varias capas de digitalización y garantiza una retícula más precisa sin necesidad de un tratamiento posterior.
- La salida es una retícula optimizada que se puede exportar a todos los formatos estándar.
- No hay limitaciones en la resolución de digitalización: sólo tiene que introducir un valor de resolución, con independencia del tamaño del objeto escaneado. La resolución se puede cambiar en cualquier momento antes y después de la digitalización. El programa puede recrear una retícula a partir de los datos sin procesar previamente adquiridos.
- La superficie se representa en tiempo real (el usuario puede ver la superficie 3D conforme el objeto se está escaneando).
- Creación de entidades geométricas a partir de la retícula.
- Incorpora otras funciones como la optimización de la retícula, el rellenado de huecos, la eliminación inteligente (sin pérdida de definición en la retícula) o los filtros de contorno.

Es compatible con los Softwares como geomagic (Studio and Qualify), rapidform (XOS, XOR and XOY), InnovMetric Software (PolyWorks), Dassault (CATIA V5, Solidworks), PTC (Pro/ENGINEER), Siemens (NX and Solid Edge) y Autodesk (Inventor, Alias 3ds Max, Maya, Softimage).



Este equipo se emplea en el proceso de digitalizado en el museo de Medina Azahara en Córdoba.

Para el desarrollo de la investigación de campo en Alhambra de Granada, se selecciona un equipo similar al EXAscan pero en su versión "marca blanca", se trata de la misma tecnología con las mismas especificaciones técnicas y funcionamiento pero comercializado por Z Corporation, el modelo seleccionado es el ZScanner 700, el cual se muestra a continuación:



Imagen 6. Equipo de escaneo 3D tipología de mano MOD. ZScanner 700 de ZCorp.

Ambos equipos requieren del empleo de target o pegatinas de referencia para poder trabajar y automontar las vistas capturadas.



Imagen 7. Target de posicionamiento tipo black contour

El software utilizado por el Zscanner800 es el Zscan, el funcionamiento y entorno son idénticos respecto al VXelements y el proceso de trabajo es el mismo.

El equipo Pc con el que se ha trabajado es el WS portátil HP8560W con 8Gb de Ram.



Imagen 8. Equipo PC utilizado en el escaneo 3D en la Alhambra y Madinat al-Zhara.

Con este equipo seleccionado, se sopesan los inconvenientes a los que habrá que hacer frente durante la ejecución de los trabajos de campo, a continuación se enumeran:

- Empleo de target o pegatinas de posicionamiento.
- Procesado de piezas de gran tamaño.
- Piezas en diversos materiales.

Software de post-procesado o reconstrucción utilizado ha sido rapidform XOS, a continuación se muestra una imagen con el entorno del mismo:

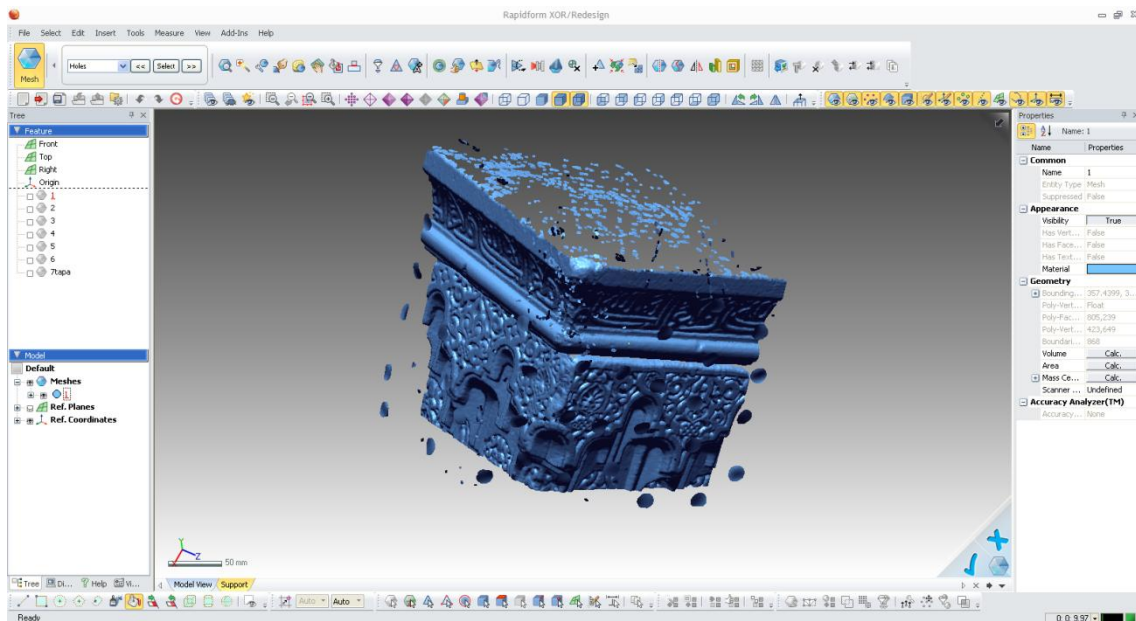


Imagen 9. Entorno de trabajo de rapidform XOS.

2.2. Desarrollo sistema de escaneado sin contacto. Malla flexible.

Desarrollado mediante malla flexible plastificada de 1x 5m. Esta malla se suministra en rollo y puede ser cortada a petición de la pieza a desarrollar. Además la estructura interna es de alambre flexible, lo que permite su modelado en las formas deseadas y no pierde la forma una vez deformada sin ejercer nuevamente presión. Se adquiere plastificada para impedir el reflejo del alambre brillante con el láser del equipo de escaneo.

Para desarrollar la técnica de escaneado sin contacto es necesario el desarrollo de un sistema mallado sobre el que ubicar las target del equipo de escaneo. El proceso o metodología a seguir para su desarrollo es:



- 1- Medición de pieza a digitalizar y análisis de peculiaridades de forma.
- 2- Corte y modelado de malla flexible para que cubra la superficie a una distancia mínima de 1 cm.
- 3- Colocación de target según tamaño de la pieza.

Materiales necesarios para su desarrollo:

Malla flexible. El tamaño de rejilla es de 1x1cm, permitiendo ubicar los target desde 1cm de distancia hasta la máxima de 5cm en piezas de mayor tamaño.

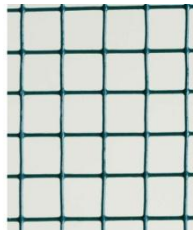


Imagen 10. Sistema de malla flexible plastificada.

Alicates. Alicates de punta larga para auxiliar al doblado de la malla y modelar la forma de la pieza:



Imagen 11. Alicates de punta larga para la flexión y dobles de la malla.

Alicates 2. Sistema de alicates cortos para permitir la sección de la malla en las zonas deseadas:



Imagen 12. Alicates para corte y flexión de malla en punta corta.

Tijeras. Tijeras especiales para corte de metal para practicar la sección de la malla en las zonas deseadas:



Imagen 13. Tijeras para metal.

Metro. Utilizado para la medición de la malla y transponer las medidas al sistema de malla a desarrollar.



Imagen 14. Metro para medición de piezas y sistema de malla.

Sistema de referenciación del equipo de escaneado. **Target**

Existen de dos tipos, pero la más eficiente es la de tipología black contour que es la más fácil de identificar por el escáner, si bien existen las simples porque en ocasiones si el detalle de la pieza es muy pequeño para perder menor superficie bajo las pegatinas, se usan sin el contorno negro. Para la técnica experimental desarrollada en este proyecto se usan por tanto las black contour.










Imagen 15. Pegatina con contorno negro.

La tipología simple se diferencia en la eliminación del contorno negro.


2.3. Selección de piezas a digitalizar.

Se seleccionan las siguientes piezas para poder poner en práctica la nueva técnica desarrollada mediante malla flexible. Se seleccionan estas por ser aquellas que cumplen con la no posibilidad de ser tocadas y la necesidad de un equipo portable tipo pistola.

REF	MEDINA AZAHARA (CÓRDOBA)
CAPITEL 42.24077	
TABLERO CE00487	
PILASTRA 46.25707	
CAPITEL 42.25684	

BASA 42.24079	
BASA 4624080	
BASA CE30150	
CAPITEL CE030149	
PILASTRA 46.25706	
REF	ALHAMBRA (GRANADA)
R.4491	
R.2874+2875 Y R.2872+2873	



R. 4005	
R. 3764	
R.237, R.236 Y R.238	
R.7106+2780+4593+4594	
R. 256	


R.10.218 Y R.10.217	
----------------------------	--

Tabla 2. Selección de piezas a digitalizar en Median Azahara y Alhambra que requieren de la técnica especial de mallado sin contacto.

* Dentro del proyecto desarrollado por CTAP se ha llevado a cabo un trabajo mucho más extenso en el que se han digitalizado un total de 45 piezas entre ambas entidades. La propiedad de estos archivos es íntegra de cada entidad y no puede ser transferida a ningún tercero para asegurar la protección frente a réplica.

2.4. Método de escaneado 3D. Ejecución del proceso de digitalización 3D mediante sistema de malla flexible.

El proceso a seguir para desarrollar el escaneado de las piezas seleccionada será la siguiente metodología de actuación:

- 1- Estudio del alcance a la pieza
- 2- Medición para el desarrollo del sistema de mallado
- 3- Desarrollo sistema de mallado
- 4- Colocación de target en mallado
- 5- Colocación de malla cubriendo la pieza.
- 6- Calibración del equipo
- 7- Digitalización inicial de material
- 8- Captura de superficie y Ajuste del volumen de trabajo. Ajuste en software de captura.
- 9- Digitalizado mediante cubos de trabajo hasta completar la pieza.
- 10- Post- procesado mediante rapidform XOS (versión empleada de prueba)
- 11- Obtención de archivo digitalizado en extensión .stl

A continuación se detalla la metodología elaborada:

1- Estudio del alcance a la pieza

El primer paso es analizar cómo está ubicada la pieza, a qué altura se encuentra que recursos auxiliares serán necesarios, etc., de forma que se pueda proceder sin complicaciones a realizar la medición necesaria en función del tipo de pieza.

2- Medición para el desarrollo del sistema de mallado

Una vez se puede acceder a la pieza se procede a la medición de las longitudes globales básicas y se anotan las peculiaridades de forma que pueda tener la pieza a modo de poder trasponer después a la malla flexible.

3- Desarrollo sistema de mallado

Con las dimensiones tomadas se desarrolla un sistema de caja mallada que recubre toda la pieza y que reproduzca la geometría de la pieza a una distancia que puede oscilar entre 1cm y un máximo de 10cm. Se han comprobado que en dimensiones por encima de los 6cm el sistema comienza a no capturar de forma óptima y por debajo del cm la malla es capturada por el escáner introduciendo ruido en la superficie de la pieza. En el caso de piezas uniformes de un tamaño considerable, es posible digitalizar con la malla a una distancia de entre 6cm y 10 cm, pero es menos recomendable.

4- Colocación de target en mallado

Los target deben ser colocados sobre la malla siguiendo la técnica general de triangulación, es decir, que formen siempre triángulos cuanto más irregulares mejor y manteniendo una distancia ideal que oscila entre los 3cm y los 5cm. Si bien la distancia entre ellos debe determinarse en función de la propia pieza, cuando la pieza tiene mucho detalle y este está en cambios de giro de la superficie los target es recomendable que sean colocados más cercanos, si bien, si la pieza dispone de una geometría uniforme y con un detalle grabado claro y de mayor tamaño, los target pueden ser alejados entre ellos para agilizar el trabajo. La premisa más importante a la hora de colocarlos es estudiar la fórmula de colocación que impida que el equipo nunca realice un giro y que no disponga de la vista de 3 target como mínimo, si las lentes del escáner no ven al menos estos 3 puntos, el equipo se perderá en el espacio y dará alertas para parar. Estas situaciones deben ser evitadas sobre todo porque dan pie a errores de creación de dobles caras o dobles superficies que si no son identificadas darán como resultado una pieza errónea. El software del escaneo avisa de este tipo de errores marcando los target en coloración negra o incluso alertando



de una doble posición para que el ejecutor del escaneo pueda darse cuenta y parar el proceso antes de que se produzcan estos errores.

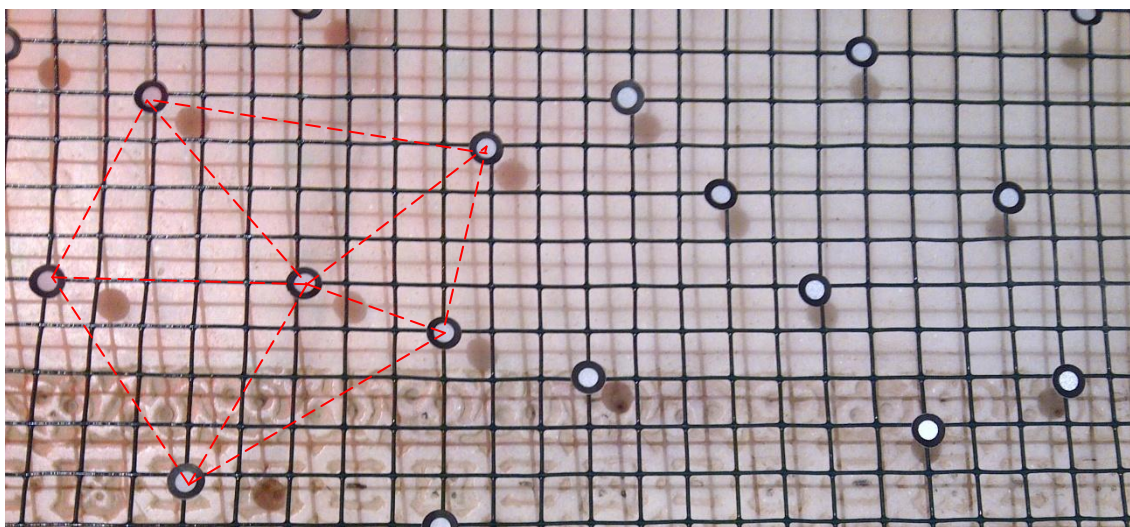


Imagen 16. Colocación correcta target mediante formación de triángulos irregulares.

5- Colocación de malla cubriendo la pieza

Este proceso debe hacerse con mucha precisión y cautela, ya que no debe rozarse ni tocarse la pieza original, en ocasiones es necesario dejar el sistema de malla semiabierto para terminar de cerrarlo una vez ubicado sobre la pieza.



Imagen 17. Colocación de malla en altura para escaneo 3D.

6- Calibración del equipo

Antes de iniciar un trabajo de escaneo 3D con este tipo de escáner es recomendable realizar una calibración del equipo para asegurar la precisión de las tomas. Para ello el equipo dispone de una plantilla de referencia sobre la que se desarrolla un conjunto de movimientos hasta que el software valida la optimización.



Imagen 18. Tabla de calibración del equipo.

El entorno de trabajo del software específico se muestra a continuación:

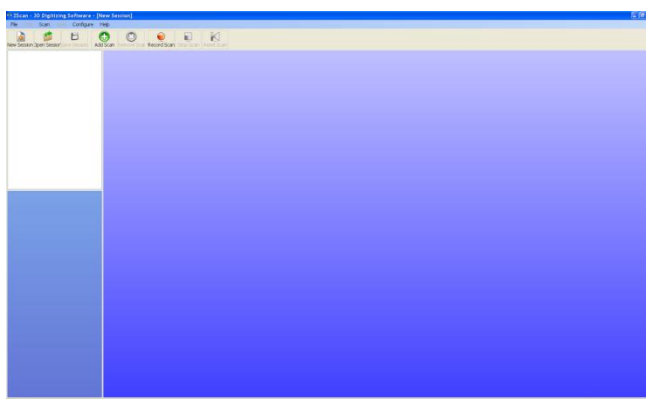


Imagen 19. Entorno de trabajo de ZScan.

Para proceder a la calibración del equipo se realiza el comando:

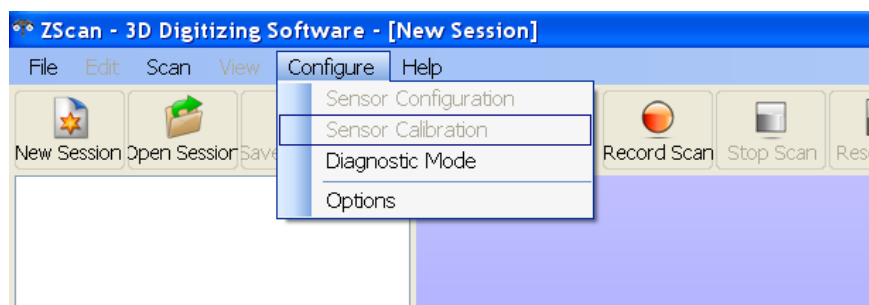


Imagen 20. Comando calibración del sensor.

7- Digitalización inicial de material

Una vez calibrado el equipo el software de captura requiere de la identificación del material y la luminosidad que rodea a la pieza para asegurar su captura, para ello se selecciona el proceso de calibrado de material en el software y se recoge y guarda con el nombre del material capturado.

Este proceso se realiza simplemente enfocando sobre la pieza con el escáner hasta que la barra de medición del color aparece en amarillo.



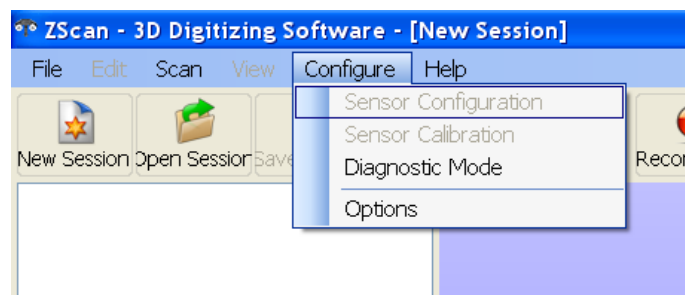


Imagen 21. Comando de configuración del sensor para captura del material.

8- Captura de target

Antes de iniciar el escaneado de la superficie es necesario introducirle al equipo la ubicación de las target de referencia, para ello el software tiene una pestaña de digitalizado en lugar de superficie de target.

Se realiza un barrido por toda la superficie capturando las target, se conocerá que han sido detectadas cuando se coloren en rojo sobre la pantalla de visualización, cuando se aprecie que el volumen de target está capturado y se observe en la pantalla, se procede a ejecutar la optimización de las mismas, donde el programa reajusta cualquier posible fallo, elimina las target que no identifica bien ubicadas, etc.

Este archivo se carga en el proceso de escaneo para poder digitalizar la superficie.

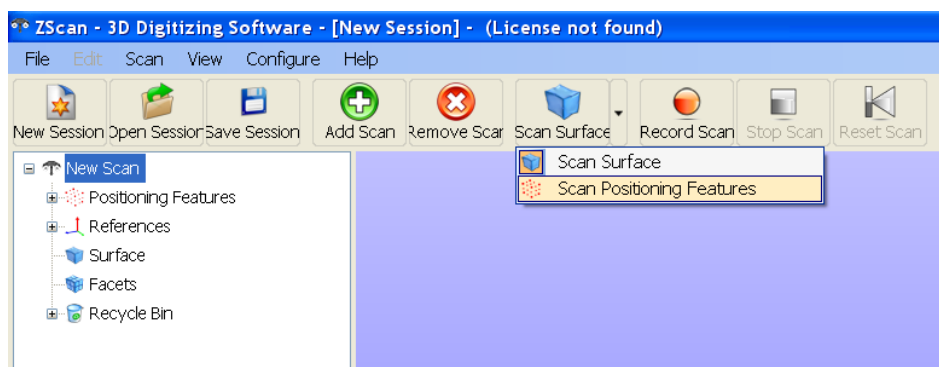


Imagen 22. Escaneado inicial de target de posición.

9- Captura de superficie, Ajuste del volumen de trabajo mediante ajuste en software de captura y digitalizado mediante cubos de trabajo.

Se inicia el proceso de escaneado sobre la pieza con un pequeño barrido previo en el lugar donde se quiere comenzar con el escaneo. Este barrido se realizará en cualquier precisión, ya que una vez definido el cubo de trabajo es cuando se ajustan los parámetros de captura.



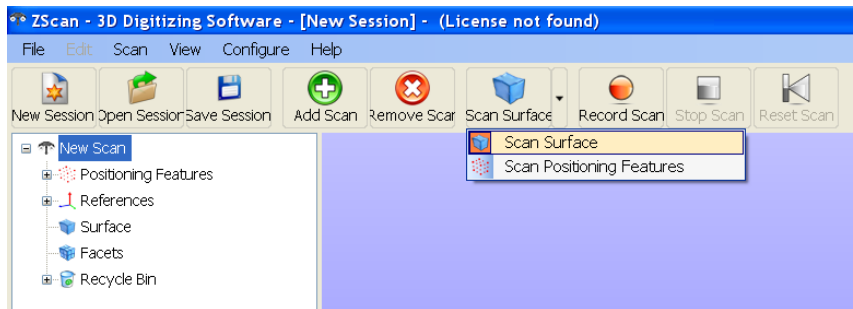


Imagen 23. Escaneado de superficies.

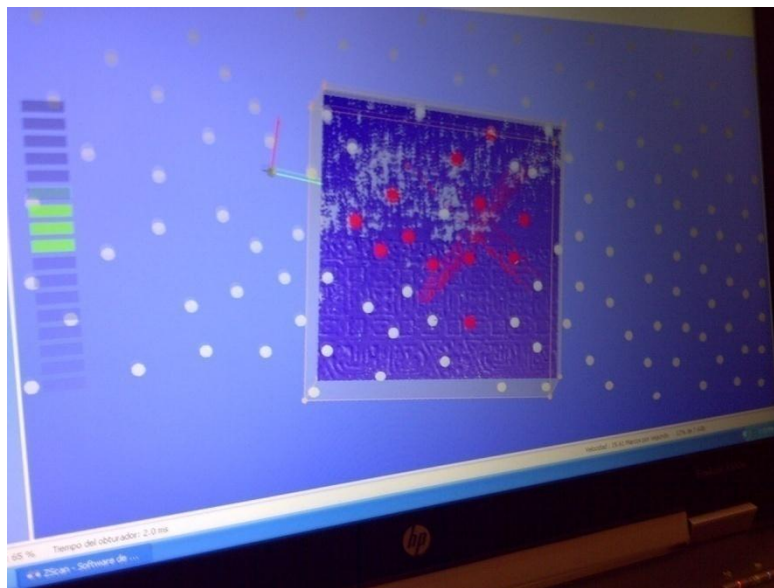


Imagen 24. Captura de superficie dentro del espacio de trabajo.

En la imagen puede verse como los target de la zona donde se está escaneando se colorean en rojo, estos son los que el equipo está utilizando en ese momento. Además se dispone de una barra de orientación de captura que aparece en color verde (parte izquierda de la imagen) cuando la distancia al objeto de captura es la idónea, ésta avisa cuando la captura se realiza tanto muy cerca como muy lejos coloreándose en rojo y amarillo en función del nivel de error. El escáner proyecta un marcador rojo con los haces de láser que indican donde se está enfocando en la pieza.

El programa se auxilia de un cubo de trabajo, que es el volumen donde captura superficie, fuera de él también es capturado pero no se visualiza en la escena actual del trabajo. Se seleccionan los parámetros de máxima resolución y precisión, el tipo de target que se está empleando y se procede a realizar pasadas sobre la superficie hasta que se visualice en la pantalla del equipo que se dispone de toda la información. El proceso se repetirá con grupos de trabajo cúbicos hasta disponer de



toda la superficie de la pieza. Cada cubo de trabajo deberá ser guardado tanto como sesión para conservar los puntos de captura como superficie en formato stl.

10- Post- procesamiento mediante rapidform XOS (versión empleada de prueba) y obtención de archivo stl final.

Una vez concluida la captura de estos stl podrán ser abiertos y reconstruidos en el software específico seleccionado. En el caso del proyecto rapidform XOS.

Cada stl independiente es abierto en el espacio de trabajo de rapidform para proceder a la unión con el resto de archivos. Si no se hubiera empleado este tipo de equipo, cada stl tendría una posición distinta en el espacio y el trabajo de reconstrucción y modelo sería mucho más extenso, ya que cada superficie se tendría que referenciar a la anterior mediante un proceso de picado de puntos comunes. En el caso del proyecto, este proceso es automático del escáner gracias a los target y las vistas aparecen ya unidas a falta de ser pegadas.

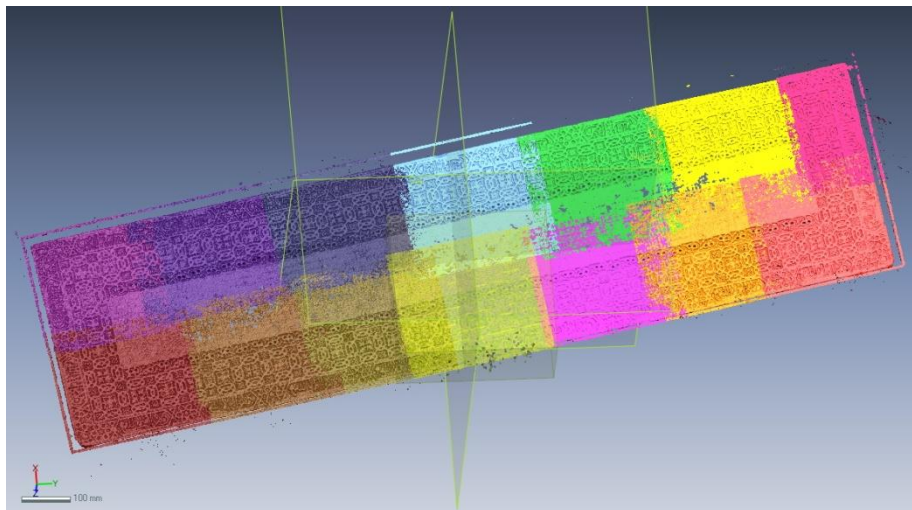


Imagen 25. Vista de los diferentes stl en rapidform.

Las vistas se unen y pegan formando un conjunto completo, se procede a su proceso de limpieza, y reparación de pequeños defectos como agujeros, etc. y se exporta en un archivo .stl final. Los archivos .stl pueden ser generados con diferentes pesos y calidades de forma que en función del uso se pueden realizar en menor calidad decimando la superficie inicial generada. Esta extensión de archivo es compatible con multitud de software en los que se podrá trabajar posteriormente con la pieza.

3. Resultados.

Se procede a realizar el proceso sobre las piezas seleccionadas, todas las piezas se ejecutan de la misma forma, difiriendo en la forma a adoptar por el sistema de mallado, pero frente a la selección de parámetros, se realiza de la misma forma. Como se ha mencionado en Mediana Azahara se emplea un sistema de escáner modelo EXAScan y en la Alhambra un modelo ZScanner, ambos son idénticos en precisión y resolución y son fabricados por la misma empresa bajo diferentes marcas de comercialización según indica el proveedor de la tecnología.

3.1. Proceso de digitalización llevado a cabo

Se toman las medidas y se recorta la malla con las dimensiones adecuadas. Se colocan los target a una distancia menor de 5cm y se inicia el proceso descrito en el apartado 2.4 anterior.



Imagen 26. Primera pieza digitalizada en Madinat al-Zhara, colocación de la malla flexible con las target tipo black contour.

Se realizan todas las pasadas necesarias por la pieza hasta obtener toda la nube de puntos:

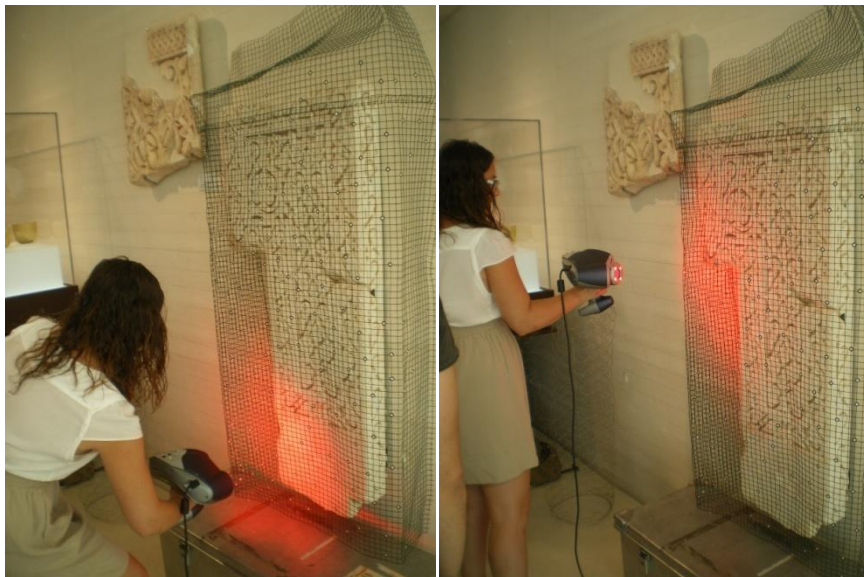


Imagen 27. Captura de superficie de puntos de la pieza mediante equipo portable.

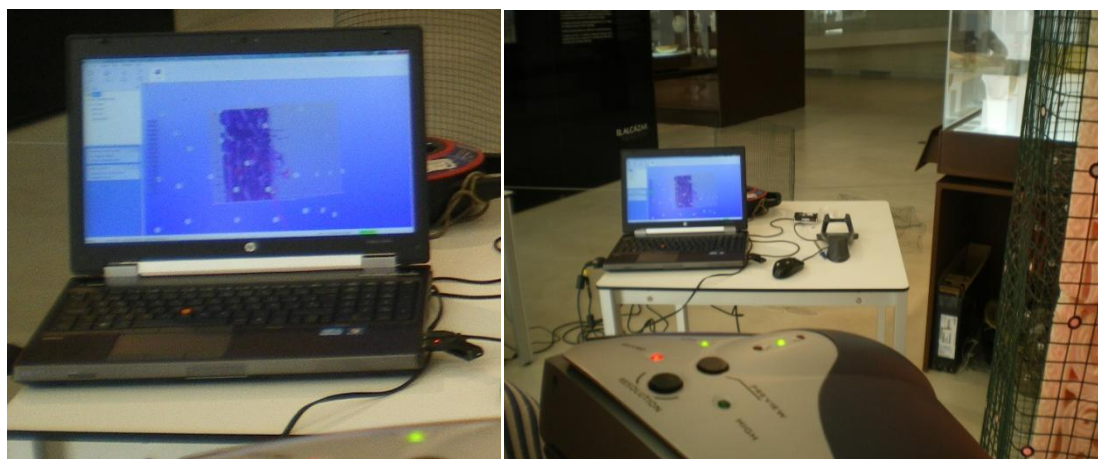
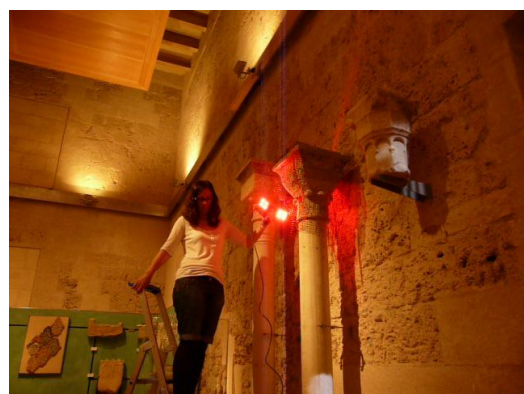
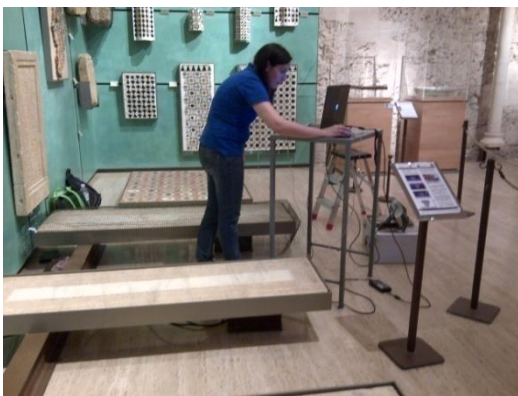


Imagen 28. Captura y visualización de la superficie en el software VXelements.

Como puede verse en la imagen 28 de la izquierda, los puntos blancos que flotan alrededor de la pieza en el pantalla son las posiciones de los target introducidos inicialmente. Además puede verse en color amarillo el área denominada cubo de trabajo.

A continuación se muestran algunas de las imágenes tomadas durante el proceso de escaneado de todas las piezas:



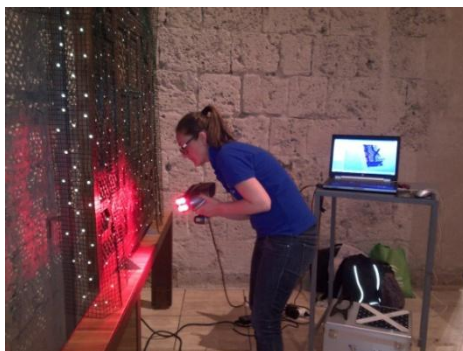


Imagen 29. Imágenes de los procesos de escaneado 3D mediante sistema de malla flexible en Medina Azahara y la Alhambra.

Una vez capturadas las tomas de cada una de las piezas se procedió a su montaje y reconstrucción mediante rapidform, a continuación se muestran los resultados del proceso:

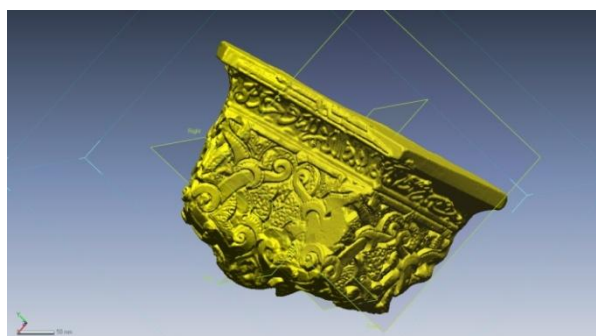
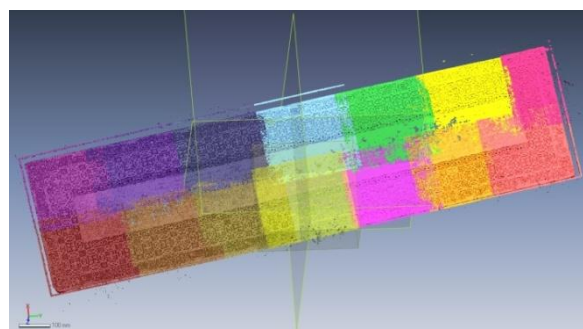
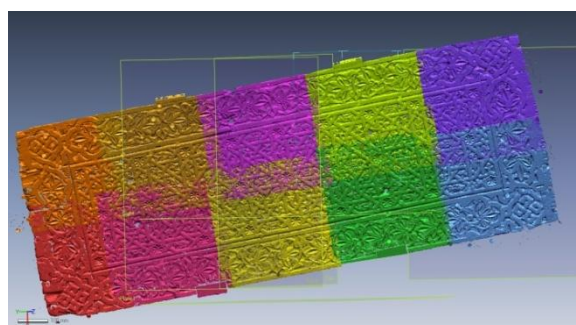


Imagen 30. Reconstrucción y modelado en rapidform de las capturas de las piezas.

Los resultados obtenidos con esta técnica son excelentes, obteniendo una pieza digitalizada perfectamente en la que la única peculiaridad es que se aumenta el tiempo de preparación del escaneo.

Como puede verse en las capturas realizadas en las imágenes anteriores de rapidform, la malla no ocasiona ningún tipo de interferencia en las piezas final, si no que las imperfecciones denominadas ruido son eliminadas con facilidad mediante el software de reconstrucción y modelado.

A continuación se muestran las tomas procedentes del escaneo una vez se abren e rapidform:

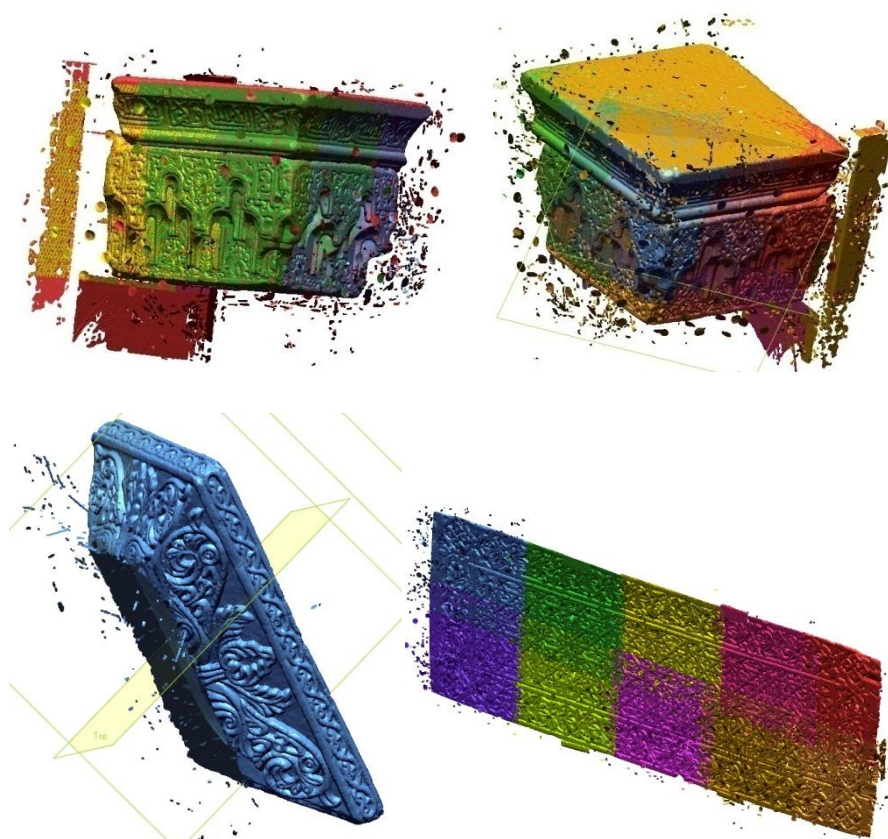


Imagen 31. Piezas con defecto de ruido procedente del escaneo con malla flexible.

Para eliminar los residuos que son capturados debidos al sistema de mallado, se procede a seguir el siguiente proceso en rapidform:

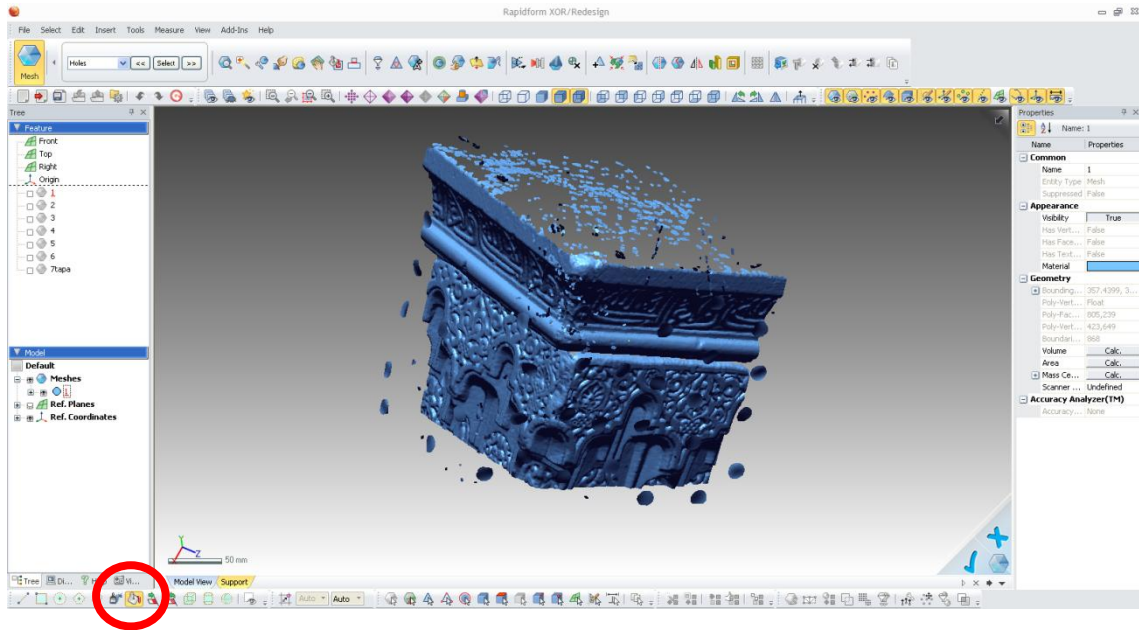


Imagen 32. Selección de comando seleccionador de superficies.

Se selecciona el comando selector de superficie para que identifique inicialmente la superficie de la pieza y proceder a la selección inversa para que detecte las superficies defectuosas sueltas:

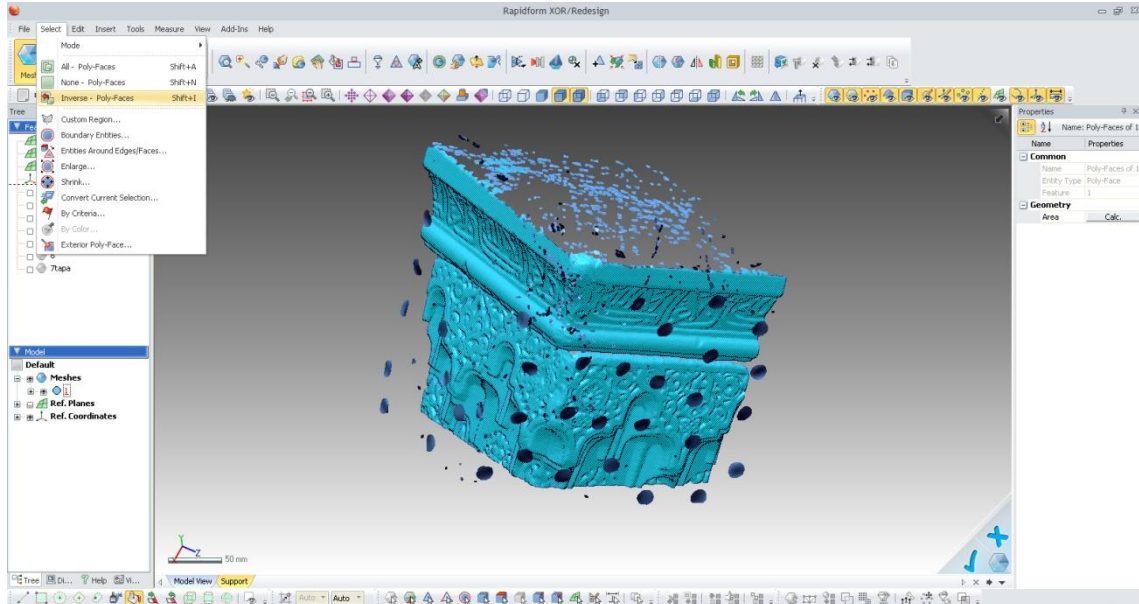


Imagen 33. Selección de superficie principal para seleccionar el inverso.

Seleccionadas las superficies sueltas se borran todas ellas dando lugar a la siguiente superficie resultante mostrada en la imagen 34:





Imagen 34. Superficie sin ruido

Una vez se dispone de la superficie limpia, se procede a la unión con todas las caras individuales restantes una vez limpiadas de ruido todas. Se procede entonces a la identificación de agujeros o imperfecciones para cerrarlos y que quede una superficie perfectamente cerrada.

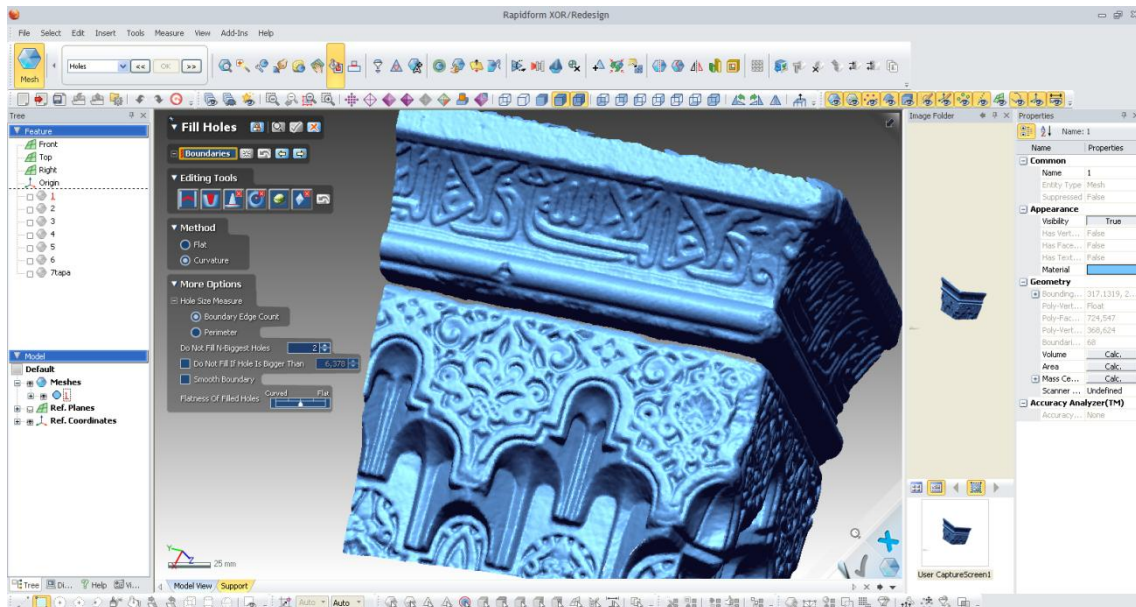


Imagen 35. Comando encontrar agujeros para completar la reconstrucción de la pieza.

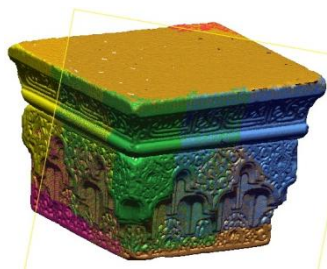
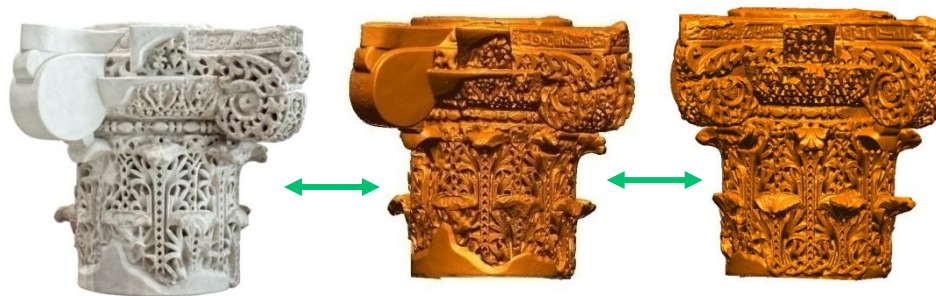


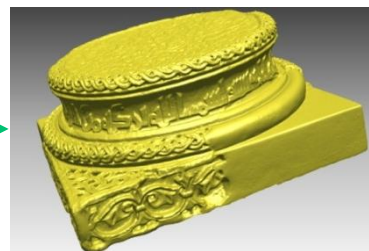
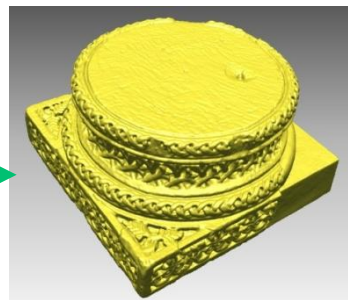
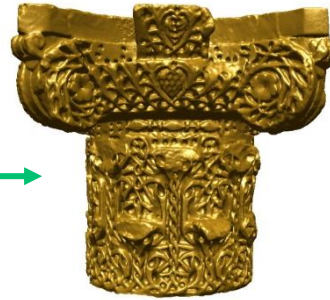
Imagen 36. Pieza limpia de impurezas lista para procesar el comando unión.



Una vez la pieza es procesada por completo en rapidform y por tanto limpia de agujeros e imperfecciones, se procede a exportar la superficie en extensión .stl exportando el archivo.

Los resultados obtenidos finales han sido los archivos .stl de todas las piezas correctas. A continuación se muestran algunas de las imágenes capturadas de las piezas finales:





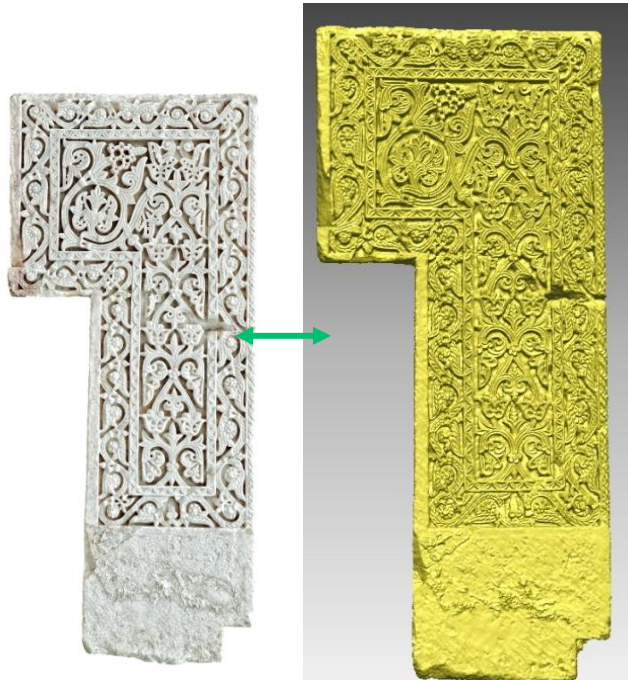
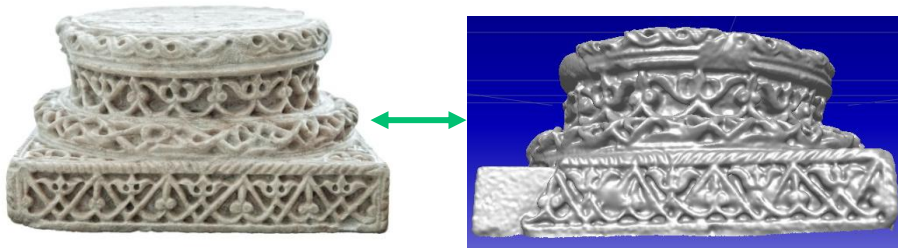




Imagen 37. Resultados obtenidos con el escaneo 3D mediante malla flexible.

4. Discusión.

Los resultados obtenidos son muy buenos, teniendo que hacer frente únicamente a los siguientes procesos adicionales frente a la técnica general de escaneo:

- Desarrollo de sistema flexible malla y modelado.
- Colocación de target en malla
- Eliminación de ruido en el sistema de post- procesado

El resto de acciones llevadas a cabo son idénticas para este proceso y el general de escaneo con escáneres de pistola de mano.

Se contrasta en los trabajos desarrollados que la colocación de los target sobre la malla en muchas ocasiones se realiza más ágilmente que sobre la pieza en el proceso general, por lo que puede hablarse de una reducción del tiempo de preparación.

La captura de la pieza con el sistema de malla es un poco más lento y requiere en ocasiones mayores pasadas, pero casi es inapreciable con respecto al proceso general.

La eliminación del ruido generado por la malla se realiza de forma automática mediante un software de post- procesado y solo requiere de una acción a añadir en el proceso de reconstrucción.

Con el sistema de malla se gana tiempo en la fase de retirada de los target de la pieza original, ya que el sistema de malla puede ser desechado en cada pieza y no requiere

de la eliminación paso a paso de pegatinas, por lo que en este aspecto es más ventajoso que el sistema tradicional. Además puede hablarse de un sistema con capacidad de reutilización adaptando la forma a la nueva pieza, por lo que se ahorran tiempos de colocación y retirada de target que en casos como el desarrollado en el proyecto permiten avanzar más rápidamente. En el caso en el que se trabaja con piezas muy similares o idéntica geometría, como puede ser el caso de las tumbas y algunos capiteles y gorroneas, la técnica del empleo de malla flexible es muy cómoda y ágil.

A la vista de los resultados obtenidos y de los argumentos presentados en esta discusión, puede afirmarse que la técnica desarrollada tiene unos resultados óptimos y arroja la posibilidad de trabajar con equipos portátiles y versátiles sin tener que entrar en contacto con la pieza ni colocar ningún tipo de pegatina auxiliar sobre ella.

5. Conclusiones.

- Se consigue desarrollar un sistema que permite el empleo de equipos de escaneado portátil de tipo pistola manual dentro del campo del patrimonio sin necesidad de entrar en contacto con la pieza. (aprovechamiento de las ventajas de varias técnicas de escaneado)
- Generación de un sistema económico y sencillo de desarrollar que permite resultados óptimos.
- Los tiempos de ejecución se ven aumentados y disminuidos en determinadas ocasiones. Encontrando un aumento del tiempo de escaneo en la elaboración de la malla pero una disminución del mismo en la acción de eliminación de target. Puede hablarse de que en general el tiempo solo se ve aumentado ligeramente en el uso de esta técnica en el escaneo aislado pieza a pieza, ya que si se realizan un conjunto de ellas, el computo total de tiempo puede verse incluso reducido respecto de la técnica general.
- Se consigue desarrollar el sistema gracias a una malla que no refleja el láser del equipo, no interfiere en la captura de la superficie principal de la pieza, es flexible para modelarse y tiene la capacidad de mantener la forma.
- Con el método propuesto se puede volver a modelar y por tanto reutilizar piezas de geometría similar lo que resulta de un mejor aprovechamiento sostenible de materiales, ahorro de costes y tiempos de ejecución.
- El sistema permite la colocación de los target tanto a pequeña distancia hasta de 1cm como a mayores distancias.



Por tanto se considera la investigación desarrollada un éxito porque ha permitido:

- El escaneo bajo técnicas inexistentes sin contacto con piezas de patrimonio.
- El desarrollo de una metodología de escaneado 3D de piezas patrimoniales de acabado artístico complejo de forma que de ahora en adelante puedan ser desarrolladas sin problemas.

6. Agradecimientos.

El proyecto de investigación no podría haberse llevado a cabo de no ser por la participación y colaboración de las siguientes entidades:

CTAP (FUNDACIÓN CENTRO TECNOLÓGICO ANDALUZ DE LA PIEDRA) como organismo que ha solicitado y desarrollado el proyecto ReTCETEC del Programa Cooperación Transfronteriza España-Fronteras Exteriores (POCTEFEX) del Objetivo de Cooperación Territorial Europea 2007-2013 y está cofinanciada en un 75% por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), el cual ha permitido la financiación de todas las acciones y los permisos para digitalizar en los entornos de trabajo del proyecto.

PATRONATO DE LA ALHAMBRA Y EL GENERALIFE y MADINAT. COMPLEJO HISTÓRICO MEDINA AZAHARA, por permitir el desarrollo de los trabajos de escaneo en el museo de Carlos V de la Alhambra así como en los jardines exteriores de dicho complejo y en el museo de Madinat y zonas exteriores.

UNIVERSIDAD DE ALMERÍA por asesorar en las técnicas y desarrollo de investigaciones.

Expresar especial agradecimiento a mis tutores de proyecto fin de máster Fernando Carvajal y Francisco Agüera Vega por su interés, asesoramiento y formación.

7. Referencias.

- C. Teutsch, "Model-based Analysis and Evaluation of Point Sets from Optical 3D Laser Scanners", volume 1. Shaker Verlag, 2007. ISBN: 978-3-8322-6775-9
- François Blais, Michel Picard, Guy Godin, "Accurate 3D acquisition of freely moving objects," Proceedings. 2nd International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission, 2004, pp.422-429.
- Qian Chen, Toshikazu Wada, "A light Modulation/Demodulation Method for Real-Time 3D Imaging," Fifth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, 2005, pp.15-21.



- Brian Curless, "From Range Scans to 3D Models," ACM SIGGRAPH Computer Graphics, Vol. 33, Issue 4, Nov 2000, pp.38-41.
- Joseph P. Lavelle, Stefan R. Schuet, Daniel J. Schuet, "High Speed 3D Scanner with Real-Time 3D Processing," 2004 IEEE International Workshop on Imaging Systems and Techniques, 2004, pp.13-17.
- Katsushi Lkeuchi, "Modeling from Reality," Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, 2001, pp.117-124.
- Fausto Bernardini, Holly E. Rushmeier: The 3D Model Acquisition Pipeline. Comput. Graph. Forum 21(2): 149-172 (2002).
- Roy Mayer, Scientific Canadian: Invention and Innovation From Canada's National Research Council, Vancouver: Raincoast Books, 1999.
- Song Zhang, Peisen Huang, "High-resolution, real-time 3-D shape measurement," Optical Engineering, 2006, pp.123601.
- Marc Levoy, Jeremy Ginsberg, Jonathan Shade, Duane Fulk, Kari Pulli, Brian Curless, Szymon Rusinkiewicz, David Koller, Lucas Pereira, Matt Ginzton, Sean Anderson, James Davis, "The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues," Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 2000, pp.131-144.
- David Luebke, Christopher Lutz, Rui Wang, and Cliff Woolley, "Scanning Monticello," 2002, <http://www.cs.virginia.edu/Monticello>.

