



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Conservación y Restauración de Bienes
Culturales

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE LIMPIEZA EN OLEOS
MURALES QUEMADOS. APLICACIÓN DE LA LIMPIEZA
LÁSER A LAS PINTURAS MURALES DEL CAMARÍN DE
LA CAPILLA DE LA VIRGEN DE LOS DESAMPARADOS
DE LA IGLESIA DE LOS SANTOS JUANES DE
VALENCIA.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Conservación y Restauración de Bienes
Culturales

AUTOR/A: Saenz Pajares, Mara

Tutor/a: Regidor Ros, Jose Luis

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



UNIVERSITAT
POLITÀCNICA
DE VALÈNCIA



departament
Conservació
Restauració
Bens
Culturals

TRABAJO FINAL DE MÁSTER EN CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN DE BIENES CULTURALES

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE LIMPIEZA EN ÓLEOS MURALES QUEMADOS.

APLICACIÓN DE LA LIMPIEZA LÁSER A LAS
PINTURAS MURALES DEL CAMARÍN DE LA
CAPILLA DE LA VIRGEN DE LOS
DESAMPARADOS DE LA IGLESIA DE LOS
SANTOS JUANES DE VALENCIA.



MARA SÁENZ PAJARES

Tutor: Dr. Jose Luis Regidor Ros

2021/2022

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE LIMPIEZA EN ÓLEOS MURALES QUEMADOS.

APLICACIÓN DE LIMPIEZA LÁSER A LAS PINTURAS MURALES DEL
CAMARÍN DE LA CAPILLA DE LA VIRGEN DE LOS DESAMPARADOS DE
LA IGLESIA DE LOS SANTOS JUANES DE VALENCIA.

RESUMEN

Los incendios que ha sufrido el patrimonio cultural durante los años han sido una gran amenaza y han ocasionado daños. Estos no son solo modificaciones visuales de la obra como un simple ahumamiento, sino que en muchos de los casos son transformaciones químicas como la carbonización, llegando a una pérdida irreversible.

Este estudio se centra en la búsqueda de alternativas de intervención para la decoración pictórica del Camarín de la Capilla de la Virgen de los Desamparados de los Santos Juanes. Oleo mural realizado por José Camarón Bonanat que se incendió en 1936 al inicio de la Guerra Civil española. La pintura mural al óleo, ubicada en el Camarín, experimentó tanto deterioros extrínsecos como intrínsecos.

Ante este problema, el estudio plantea una investigación comparada de obras con similares casuísticas y la experimentación de alternativas técnicas que abarquen tanto sistemas físico-químicos específicos como la tecnología láser para actuar sobre óleos murales que han sido sometidos a altas temperaturas.

El grado de efectividad de la combinación de los sistemas de limpieza más adecuados se comprobará *in-situ*. Por consiguiente, será necesaria la realización de un protocolo de catas en aquellas zonas donde el estado de conservación sea bueno y que contengan diversas tonalidades, evitando elementos figurativos relevantes de la obra, con el fin que los resultados sean útiles de cara a una restauración futura.

PALABRAS CLAVES

José Camarón Bonanat; pintura quemada; oleos murales; Laser; Camarín

RESUM

Els incendis que ha patit el patrimoni cultural durant els anys han sigut una gran amenaça i han ocasionat danys. Aquests no són només modificacions visuals de l'obra com un simple ahumamiento, sinó que en molts dels casos són transformacions químiques com la carbonització, arribant a una pèrdua irreversible.

Aquest estudi se centra en la cerca d'alternatives d'intervenció per a la decoració pictòrica del Cambril de la Capella de la Verge dels Desemparats dels Sants Joans. Oleo mural realitzat per José Camarón Bonanat que es va incendiar en 1936 a l'inici de la Guerra Civil espanyola. La pintura mural a l'oli, situada en el Cambril, va experimentar tant deterioracions extrínseques com intrínsecs.

Davant aquest problema, l'estudi planteja una investigació comparada d'obres amb similars casuístiques i l'experimentació d'alternatives tècniques que abasten tant sistemes físic-químics específics com la tecnologia làser per a actuar sobre olis murals que han sigut sotmesos a altes temperatures.

El grau d'efectivitat de la combinació dels sistemes de neteja més adequats es comprovarà in-situ. Per consegüent, serà necessària la realització d'un protocol de tastos en aquelles zones on l'estat de conservació siga bo i que continguen diverses tonalitats, evitant elements figuratius rellevants de l'obra, amb la fi que els resultats siguen útils de cara a una restauració futura.

PARAULES CLAU

José Camarón Bonanat; pintura cremada; feu-vos olor murals; Laser; Cambril

ABSTRACT

The fires that cultural heritage has suffered over the years have been a great threat and have caused damage. These are not just visual modifications of the work as a simple smoking, but in many of the cases are chemical transformations such as carbonization, reaching an irreversible loss.

This study focuses on the search for intervention alternatives for pictorial decoration of the Camarín of the Chapel of the Virgen of the Desamparados of the Santos Juanes. Wall oil made by José Camarón Bonanat that burned down in 1936 at the beginning of the Spanish Civil War. The oil mural painting, located in the Camarín, experienced both extrinsic and intrinsic deterioration.

Faced with this problem, the study proposes a comparative investigation of works with similar casuistries and the experimentation of technical alternatives that cover both physico-chemical systems such as laser technology to act on wall oils paintings that have been subjected to high temperatures.

The degree of effectiveness of the combination of the most appropriate cleaning systems shall be checked on-site. Therefore, it will be necessary to carry out a tasting protocol in those areas where the conservation status is good and contains different shades, avoiding relevant figurative elements of the work, so that the results are useful in the face in order for the results to be useful for future restoration.

KEY WORDS

José Camarón Bonanat; burnt paint; oils mural paintings; Laser; Camarín

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	06
2. OBJETIVOS.....	07
3. METODOLOGÍA.....	08
4. LAS PINTURAS MURALES DEL CAMARÍN DE LA CAPILLA DE LA VIRGEN DE LOS DESAMPARADOS DE LA IGLESIA DE LOS SANTOS JUANES DE VALENCIA.....	09
4.1 Contexto artístico.....	09
4.2 Autoría.....	14
4.3 Estado de conservación.....	16
5. LIMPIEZA DE POLICROMÍAS MEDIANTE LASER.....	20
5.1 Láseres UV, Er:YAG y Nd:YAG.....	20
5.2 Efectos del láser en pigmentos y aglutinantes.....	25
6. FASE EXPERIMENTAL.....	27
6.1 Pruebas de limpieza y resultados.....	33
6.2 Resultados de los parámetros monitorizados durante las pruebas.....	43
6.3 Discusión de los resultados.....	55
7. CONCLUSIONES.....	57
8. BIBLIOGRAFÍA.....	60
9. AGRADECIMIENTOS.....	65
10. ÍNDICE DE IMÁGENES.....	66
11. ANEXOS.....	69

INTRODUCCIÓN

Los incendios han sido y serán unos de los principales causantes de daños en los Bienes Culturales. La iglesia de los Santos Juanes, donde se ubica el camarín objeto de este estudio, se incendió durante la Guerra Civil en 1936, esto ha marcado significativamente el estado de conservación de todo el conjunto arquitectónico, incluyendo todas las pinturas murales y el resto de elementos escultóricos y ornamentales. Aunque hay zonas de la iglesia que no fueron afectadas directamente por el calor de las llamas, el fuego provocó deterioros intrínsecos en todas las obras, entre ellas, la pintura mural al óleo que decoraba el camarín. La obra se atribuye a Jose Camarón i Bonanat (1731-1803) y se realizó a finales del siglo XVIII.

Dentro de los procesos de restauración necesarios para la recuperación de esta decoración mural, la eliminación de la estratificación de las diversas capas de diferente composición química, que se superponen en una pintura mural tras un incendio, un proceso de ocultación parcial y su práctico abandono en más de 80 años, exige unos procedimientos previos que deben arrojar datos sobre su valor histórico-artístico, las condiciones en las que se encuentran las pinturas, así como la extensión que ocupan, para que resulte posible un proceso de limpieza, lo más seguro y controlado posible.

El propósito de este trabajo final de master es confrontar las posibilidades de la limpieza láser frente a la limpieza con procedimientos acuosos. Teniendo en cuenta los factores de compatibilidad desde su estado de conservación, así como la técnica utilizada incluidos los pigmentos que componen esta obra. Para llevar a cabo este propósito se debe realizar un protocolo de actuación, ya que los procesos de limpieza son acciones irreversibles.

La tecnología láser se utiliza cada vez más en la práctica para la limpieza de películas pictóricas. La aplicación de la tecnología láser al campo de la conservación de pinturas comenzó a principios de la década de 1990. El uso de láseres para la limpieza de obras de arte proporciona un método para eliminar capas que no se pueden eliminar de forma segura con métodos convencionales. Además, el láser permite la eliminación controlada de una capa delgada o parte de una capa, y el restaurador puede elegir cuándo detenerse. Aunque, los beneficios indiscutibles de la limpieza con láser, se ven contrarrestados por la alta sensibilidad de la mayoría de los pigmentos a la radiación láser, que se puede causar daños irreversibles en los materiales de la obra.

La investigación actual sobre el uso de láseres como herramientas de limpieza en la conservación de obras de arte, concretamente en obras con casuísticas similares, se enfoca en el efecto de decoloración que puede llegar a producir la radiación láser en algunos pigmentos y así configurar un protocolo adecuado que necesite cada obra.

Las técnicas tradicionales de limpieza más utilizadas son las de limpieza mecánica o química. El uso de solventes aplicados sobre la superficie puede afectar a los pigmentos y al medio de una manera no deseable y no reversible porque es difícil controlar la penetración e interacción en las distintas capas de pintura.

OBJETIVOS

El objetivo general de este Trabajo Final de Máster es la evaluación de la idoneidad del proceso de limpieza de unas pinturas murales al óleo mediante la técnica de foto ablación láser, confrontándola como parámetro de control con pruebas de limpiezas físico químicas acuosas. La aplicación de este trabajo se ha realizado en la pintura mural de la cúpula del camarín de la capilla de la Virgen de los Desamparados de la iglesia de los Santos Juanes de Valencia, atribuido a Jose Camarón Bonanat. Para conseguirlo ha sido necesario establecer una serie de objetivos específicos:

- Contextualizar la pintura mural del camarín de la capilla de la Virgen de los Desamparados, analizando iconográficamente, históricamente, estilísticamente y técnicamente la representación de la obra en su conjunto.
- Identificar los daños y deterioros de la obra para indagar sobre las posibles causas y factores de deterioro que han ocasionado el estado actual de la pintura mural. Sobre todo centrándose en las patologías que se hayan producido tras el incendio.
- Conocer el funcionamiento de un sistema láser, así como las tipologías que hay en el mercado para el proceso de limpieza en el Patrimonio Cultural.
- Entender los avances y panorama actual de la limpieza de policromías mediante láser principalmente en casuísticas de pintura mural al óleo afectadas por altas temperaturas.
- Poner en práctica un protocolo de evaluación de un sistema de limpieza láser.
- Valorar si los sistemas que se proponen contienen un criterio de desarrollo sostenible.

METODOLOGÍA

Para lograr los objetivos de este trabajo final de master y determinar las conclusiones, se ha llevado a cabo diferentes etapas fundamentales:

1. Fase documental:

- Estudios previos de la obra en cuestión; para ello se han consultado diferentes fuentes bibliográficas y documentación científica. Lo que ayudó a dar un contexto historico-artístico, en dichas fuentes de información han aportado información para poder conformar hipótesis acerca del método de ejecución, la autoría y el estado de conservación en el que está actualmente.
- Búsqueda de la historia láser en el mundo de la conservación y restauración y el funcionamiento del sistema. Y la información de los tipos de láseres y casos en los que se han utilizado.
- Recopilación de los efectos que pueden producir la utilización de unos parámetros erróneos en la obra.
- Organización de un protocolo de acciones que se realizarían in-situ.

2. Fase experimental:

- Estudio in-situ, en el que se ha visitado varias veces el camarín, para poder realizar las catas y pruebas pertinentes, las cuales ayudan a dar con el sistema de limpieza más adecuado para la pintura.
- Realización de una documentación fotográfica detallada con una Nikon® D5600 y un microscopio digital USB Dino-Lite Special Lighting, para documentar todos los resultados de las pruebas como los daños que presenta la pintura. Para ello fue necesario el montaje de un andamio y así tener la posibilidad de estar cerca de la película pictórica.
- Experimentación de los sistemas de limpieza. En las pruebas se ha utilizado sistemas del test acuso de solubilidad de Cremonesi. Y un láser de mochila CL 20 de fibra y Nd:YAG bombeado con una linterna con Q—Switch, que se usa comúnmente en la conservación. Este láser de fibra está alimentado por una batería. Se ha consultado la norma UNE- EN 16782:2018 y se ha adaptado a la casuística de la obra.
- Monitorización de los parámetros de la conductividad con un equipo Horiba LAQUATwin EC-11®, el pH con un equipo metro portátil PH 25 + de la marca CRISON®, la colorimetría con Espectrofotómetro X-Rite i1, junto al software Measure Tool®.

3. Elaboración de fichas e informes para la discusión de resultados:

- Extracción de conclusiones mediante las pruebas realizadas, los parámetros monitorizados y los datos recabados a lo largo de todos los procesos anteriores.

4. LAS PINTURAS MURALES DEL CAMARÍN DE LA CAPILLA DE LA VIRGEN DE LOS DESAMPARADOS DE LA IGLESIA DE LOS SANTOS JUANES DE VALENCIA.

4. 1 CONTEXTO ARTÍSTICO

En España se comienzan las construcciones devocionales de camarines a partir del siglo XVII en Andalucía y Levante, exportándose al resto de España. Estos se solían situar en la capilla de la Virgen, dedicados al culto de María, situándose más altos del suelo de las iglesias y detrás de los retablos, en relación directa con la imagen del mismo¹, en una sala a la que se accedía por una escalera construida al exterior del altar. En la basílica de la Virgen de los Desamparados (1652-1667) de la comunidad Valenciana se localiza uno de los más primigenios.²

La investigación se centra en las pinturas de la cúpula del Camarín de la Capilla de la Virgen de los Desamparados, situada en la segunda capilla desde los pies del Evangelio en la iglesia de los Santos Juanes en Valencia (fig. 1). Es la única capilla de la iglesia que contiene un camarín, al cual se accede a través de una escalera acaracolada, por una puerta situada a la derecha del retablo.³ El camarín es de planta octogonal, también denominada ochavado, con una cúpula, de unos 14,5 m², donde se ubica la pintura. Gracias al documento de los estudios previos para la restauración de la iglesia de los Santos Juanes de Valencia se puede determinar que en 1718 ya estaba construida, es decir que probablemente se realizó finalizando la reforma barroca.⁴

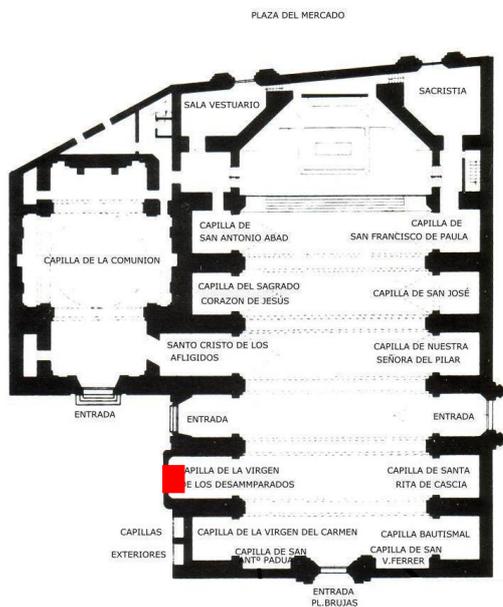


Fig. 1. Localización del Camarín.



Fig. 2. Pintura mural al óleo del Camarín.

¹ CAMPAL, Rosa del Carmen Álvarez. Las pinturas murales del camarín de Bendueños: Una primera aproximación a su estudio. *Vindonnus: revista de patrimonio cultural de Lena*, 2017, no 1, p. 36-37.

² GARZÓN ALONSO, R. Camarines antequeranos. Madrid, 2000. [Consulta: 19-05-22] Disponible en <https://sites.google.com/23site/camerinosenantequera/5-el-camarin-como-elemento-arquitectonico-religioso-con-entidad-propia>.

³ *Idem*.

⁴ AAVV. Decoración mural de las capillas laterales. *Estudios previos para la restauración de las pinturas murales, esculturas y estucos de la iglesia de los Santos Juanes de Valencia.*, 2020, inédito. p.338.

La pintura mural de la bóveda (fig. 2), actualmente presenta un estrato de ocultación parcial y las paredes del camarín que también cuentan con restos de decoración mural, presentan ocultación total.

La pintura de la cúpula se realizó a finales del siglo XVIII atribuida a José Camarón Boronat (1731-1803), el cual, también pintó el lienzo bocaporte con la Virgen de los Desamparados.

El camarín se abría al exterior mediante una ventana octogonal que permitía iluminar la escena pictórica desde atrás sin que se apreciara el origen de la claridad, haciendo que la obra tuviera un carácter teatral y plenamente barroco, con su foco de luz dirigida. Gracias a la combinación de la escultura, pintura y la luz se consigue un espacio espectacular con un efecto escenográfico en el interior de los Santos Juanes, convirtiendo a la capilla de la Virgen de los Desamparados en contener uno de los primeros transparentes de la Península Ibérica.

El artista realizó la pintura de la cúpula y paredes laterales con la técnica al óleo, el aglutinante es aceite de linaza. Las propiedades más destacables que aporta la técnica al óleo, son su flexibilidad y facilidad de manipulación, puesto que es una técnica simple y directa con la que se pueden obtener efectos plásticos, como opacidades o transparencias. Además, los colores no varían apenas en el proceso de secado. El secado mucho más lento hace que el pintor cuente con más tiempo para hacer las correcciones que considere pertinentes y, además, puede aplicar diferentes capas de pintura.⁵

La pintura al óleo se ejecutó siguiendo un procedimiento habitual en la práctica de la pintura mural de la época tal y como se refleja en la tratadística contemporánea por delante del fresco que no volvería a tener protagonismo hasta la irrupción de José Vergara. Algunos ejemplos de obras de estas características técnicas encontradas;

La capilla de San Francisco de la iglesia de San Miguel y San Sebastián de Valencia, de José Llácer, realizada en 1741, Capilla del Cristo de Iglesia San Roque de Paula de Oliva 1748 y *El Lavatorio* y *La Comunión de los Apóstoles* de Joaquín Pérez de la Capilla de la Comunión de la Iglesia Parroquial de san Nicolás de Bari y de san Pedro Mártir en la ciudad de Valencia⁶. La creación de esta obra fue en el año 1766, período próximo al que se realizó posiblemente la pintura del camarín, por eso tiene las características muy similares en cuanto a la técnica.

Aunque haya un beneficio en cuestión del manejo de la técnica, en contrapartida, hay que adecuar el muro de manera específica para recibir la pintura al óleo. Esta preparación se empieza con un encalado previo de cal o yeso que debe fraguar al menos medio año y que haya permanecido duro y neutro. Tras esto se superponía una imprimación grasa en varias capas a base de yeso y algunas recetas incluían aceite de linaza caliente.⁷ Por último, se recomienda partir de un fondo coloreado por medio de aceite de linaza, albayalde, azarcón^{8,9}.

⁵ NORTE, Juan Avellano. *La pintura mural y su didáctica*. 2015. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.

⁶ ROIG PICAZO, Pilar, et al. Contextualización iconográfica e intervención en las pinturas murales de la Capilla de la Comunión de la Iglesia Parroquial de san Nicolás de Bari y de san Pedro Mártir en la ciudad de Valencia. 2018., p. 202.

⁷ VASARI, Giorgio. *Vasari on technique*. Courier Corporation, 2012. p. 232

⁸ Pigmento mineral sintético que, tradicionalmente, se obtenía a partir de la calcinación del albayalde, formando un óxido de plomo. Su color es anaranjado o anaranjado oscuro con buen poder cubriente. Es poco estable a la luz y el aire y se suele oscurecer cuando se emplea en la técnica de la acuarela y de la témpera. Tampoco es estable a la pintura mural al fresco porque se puede transformar en dióxido de plomo negro. Es más estable a la pintura al óleo donde también fue empleado como secante. A lo largo de la Edad Media fue muy empleado en la miniatura de los manuscritos y se considera que de este uso derivan precisamente los términos de "miniar" y "miniatura".

⁹ ARJONILLA-ÁLVAREZ, María. El conocimiento de los materiales y técnicas antiguas a través de la intervención en el patrimonio: La pintura mural de San Cristóbal del convento de Santa Paula de Sevilla. *Cuadernos de restauración*, 2004, no 5, p. 79.

El estudio estratigráfico realizado para los estudios previos del proyecto de restauración integral de la iglesia, describe los siguientes datos sobre la técnica de ejecución.¹⁰

Las superficies murales del camarín están enlucidas con yeso y preparadas con una capa homogénea y fina (12-30 μm), compuestas principalmente de minio (Pb_3O_4), tierras rojas y calcita (CaCO_3). Este estrato puede ser rojo o anaranjado estas variaciones de tonalidad pueden ser fortuitas o aplicadas según los efectos pictóricos que el artista quiere obtener. La presencia del minio y otros pigmentos de plomo en estas preparaciones, garantizan películas pictóricas sólidas y estables.

Sobre la capa de preparación las masas generales están pintadas con tonos de base pardos y ocre conformados por la mezcla de distintos pigmentos. Este estrato es relativamente grueso y corpóreo (50-100 135-215 /120-150 μm), aunque muchas de ellas en su origen serían seguramente blancos.

Finalmente se aplican en películas más finas (15-40 μm) las tonalidades principales, las luces y sombreados. La calcita y barita suelen aparecer a modo de carga. Estas películas se localizan sobre todo en las nubes y en las alas de los ángeles, en los ropajes de los ángeles predominan los rojos, naranjas y azules, todos ellos son como se visualizan actualmente, algunos de ellos habrán virado debido al incendio y los daños que presenta la obra.

No se dispone la identificación completa de la paleta cromática general empleada, pero si una muestra representativa, fundamentalmente de la zona de ensayos.

Los pigmentos que se han identificado en los análisis han sido: En la tonalidad blanca, blanco de plomo (PbCO_3)- $\text{Pb}(\text{OH})_2$ que funcionaba muy bien en óleos, formando con el aceite una mezcla suave y untuosa¹¹. En las tonalidades rojas, tierras rojas, minio (Pb_3O_4), Bermellón (HgS) y colorante indeterminado precipitado sobre alumbre. En las tonalidades amarillas, amarillo de Nápoles (antimoniato de plomo $\text{Pb}_2\text{Sb}_2\text{O}_7$) que se obtiene calcinando litargirio con trióxido de antimonio. Es un amarillo fuerte y semiopaco que se fabrica comercialmente en cantidades limitadas y en unas seis tonalidades, desde un amarillo verdoso al más rosado o anaranjado, se fabrica artificialmente al menos desde el siglo XV¹², Litargirio (PbO) que se solía emplear como secador en la preparación del barniz¹³. En las tonalidades negras, negro de huesos ($\text{C} + \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$), en óleo seca muy despacio; resiste bastante bien.

La obra en cuestión es una *gloria celeste con ángeles músicos*. Es una representación de Dios Padre en Gloria, ubicado en el centro del arranque de la cúpula, cuyo objetivo es enmarcar escenográficamente la imagen de la Virgen de los Desamparados vista desde la hornacina del altar. En primer plano se disponen los ángeles músicos, cada uno de ellos lleva instrumentos diferentes, algunos de ellos no se pueden distinguir debido a las patologías que contiene la pintura. Los personajes situados en los primeros planos están representados con vestimentas amplias, voluminosas y detalladas.

El ángel músico ubicado a la derecha de Dios Padre, está realizando dos funciones características, la de cantor y la de instrumentista. Camarón lo pintó mirando hacia la figura de Dios Padre, para realzar su importancia en la escena. En la mano izquierda sostiene un instrumento, concretamente una chirimía soprano en Fa¹⁴ y su mano derecha señala con su dedo índice una partitura. Lleva una túnica de tonos granates y un manto con tonalidades amarillas. El siguiente ángel situado arriba del primero está representando de espaldas, el instrumento que sostiene es un tipo de guitarra barroca (fig. 3). La

¹⁰ IRP-UPV. Decoración mural de las capillas laterales. *Estudios previos para la restauración de las pinturas murales, esculturas y estucos de la iglesia de los Santos Juanes de Valencia.*, 2020, inédito.

¹¹ MAYER, Ralph. *Materiales y técnicas del arte*. Ediciones Akal, 2005. P.42

¹² MAYER, Ralph. *Op.Cit.*. P.34

¹³ MAYER, Ralph. *Op.Cit.* P.49

¹⁴ La chirimía es el antecesor directo del oboe, instrumento de viento-madera que se desarrolla en el Barroco.

vestimenta se compone de una túnica blanca y un manto verde. El ultimo ángel músico que se puede reconocer, está tocando una guitarra barroca, sentado sobre una nube. Su vestimenta consta de una túnica blanca y un manto azul (fig. 4).



Fig. 3. Representación de los ángeles músicos.



Fig. 4. Representación del ángel músico.

En el arranque de la cúpula en el lateral del fondo del camarín situándose visualmente en el eje de la imagen de la Virgen de los Desamparados se ubica el personaje principal, Dios Padre, vestido por una túnica con tonalidades azules, sentado sobre unas nubes (fig. 5), llevado por unos querubines. En su mano izquierda sostiene un cetro apoyada en una bola del mundo y su mano derecha está bendiciendo. Sobre la cabeza lleva un nimbo triangular¹⁵. Esta representación de Dios Padre es similar al dibujo *Dios Padre en Gloria de ángeles* de Maria Giuseppe Rolli realizado cerca 1700 (fig. 6).¹⁶



Fig. 5. Representación de Dios Padre en la pintura.



Fig. 6. Dibujo de Dios Padre de Maria Giuseppe Rolli.

¹⁵ Referencia a las tres figuras de la Trinidad, y también a la figura de Dios Padre, de forma individual.

¹⁶ Dios Padre en Gloria de ángeles - Colección - Museo Nacional del Prado [en línea]. [S. f.] [consulta 1-5-22]. Disponible en: <URL : <https://www.museodelprado.es/coleccion/obra-de-arte/dios-padre-en-gloria-de-angeles/9d54790a-ac18-4023-82a3-cf522bdc00f0>>.

En último plano se representa un cielo abierto, donde se pueden observar diferentes grupos de querubines y *puttis* que giran alrededor de la escena (fig. 7). Y en el centro de este cielo está ubicado el Espíritu Santo representado como una paloma blanca, sobresaliendo un haz de luz hacia Dios Padre (fig. 8)



Fig. 7. Cielo abierto con representaciones de querubines y *puttis*.



Fig. 8. Representación del Espíritu Santo.

4. 2 AUTORÍA

La pintura mural al óleo se le atribuye a José Camarón i Bonanat (1731-1803), por evidencias cronológicas, formales y una vinculación directa con el espacio ya que es el autor documentado del desaparecido lienzo bocaporte con la *Virgen de los Desamparados* que cubría una estatua del retablo del camarín de la capilla de la Virgen de los Desamparados de la iglesia de los Santos Juanes de Valencia. A finales del siglo XVIII se renovó la bóveda del camarín, y se deduce que es cuando se le encarga la pintura mural a José Camarón i Bonanat.¹⁷

Como se nombra en el libro *Historia de la pintura Valenciana*, Camarón fue uno de los artistas más valorados en su tiempo, de su producción artística se conserva sobre todo pinturas al óleo y dibujos. En cuestión de la atribución de la pintura, se aprecia que el personaje Dios Padre es similar en el dibujo de “La purísima Concepción”¹⁸ (fig. 9), la pintura “Inmaculada coronada por la Santísima Trinidad”¹⁹ (fig. 10) y la obra en cuestión (fig. 11). De estas dos últimas se ven más similitudes, primero el modo de representar el ropaje del personaje y su rostro, en ambos tiene una expresión seria y autoritaria.



Fig. 9. Representación de Dios Padre en un dibujo.



Fig. 10. Representación de Dios Padre en una pintura al óleo.



Fig. 11. Representación de Dios Padre en la pintura mural.

Como los demás personajes de la pintura del ábside son ángeles, algunos ángeles músicos, se ha podido comparar alguno de ellos con personajes similares en otras obras del mismo. Una de ellas es en *San Francisco reconfortado por ángeles*, un dibujo a pluma (fig. 12) y en otra obra, en que más ángeles se han localizado para la comparativa es el fresco de la catedral de Segorbe²⁰ (fig. 13), esta obra fue terminada por su hijo Manuel Camarón y Luis Planes y la de la obra en cuestión (fig. 14).

¹⁷ ROIG PICAZO, Pilar, et al. Estudios previos y propuesta de intervención en las pinturas murales, esculturas y ornamentos de la Real Parroquia de los Santos Juanes de Valencia. *Archivo de arte valenciano*, 2020, p 338.

¹⁸ *La Inmaculada Concepción...* - Pelegrer - Camarón (palauantiguitats.com)

¹⁹ *Imachen: Inmaculada coronada por la Santísima Trinidad.jpg - Wikipedia, a enciclopedia libre* [en línea]. [S. f.] [consulta 30 mayo de 2022]. Disponible a : <URL: https://an.m.wikipedia.org/wiki/Imachen:Inmaculada_coronada_por_la_Santísima_Trinidad.jpg>.

²⁰ *Catedral Basílica de Santa María de la Asunción - Comunitat Valenciana* [en línea]. [S. f.] [consulta 30 mayo de 2022]. Disponible a : <URL: <https://www.comunitatvalenciana.com/es/castello-castellon/segorbe/monumentos/catedral-basilica-de-santa-maria-de-la-asuncion>>.



Fig. 12. Representación de Ángeles Músicos en un dibujo.



Fig. 13. Representación de Ángel en una pintura mural.



Fig. 14. Representación de Ángeles Músicos en una pintura mural.

José Camarón, pintor, grabador e ilustrador, nació en Segorbe, Castellón, el 18 de mayo de 1731. Procede de una familia de artistas, cuya formación se inició en el taller de su padre, el escultor Nicolás Camarón, de su tío, el pintor de miniaturas Eliseu Bonanat, y del pintor rococó Miguel Posadas. En 1752, se traslada a Madrid para completar su formación.²¹ En 1754 regresa a Valencia, en donde la academia de Santa Bárbara lo nombró como profesor de pintura. Es en esta etapa cuando Camarón Bonanat experimenta en sus pinturas todos los géneros y técnicas. Además, estuvo en constante relación con el mundo académico: en 1762 fue nombrado miembro de mérito de la Academia de San Fernando de Madrid y en 1768 figuró entre los fundadores de la Real Academia de Bellas Artes de San Carlos. En 1790 se ocupó de la dirección de la clase de pintura y más tarde en 1796 fue el director general hasta su muerte. Murió en Valencia el 14 de julio de 1803.²²

En cuestión de obra, Camarón con José Vergara, fueron los dos pintores más destacados en el mundo setecentista de la pintura. Los dos pintores llenaron con sus cuadros todas las iglesias nuevas y también algunas antiguas del Reino de Valencia.²³ Jose Camarón consta de una gran versatilidad para la pintura y el dibujo, desarrolla un arte caracterizado por el buen gusto neoclásico y un cierto recuerdo rococó en el colorido y la composición. Durante su carrera artística dominó la pintura de caballete, la miniatura y las técnicas del fresco y del pastel.

De su amplísima producción destaca veinte retablos localizados en la catedral de Valencia, así como el San Francisco confortado por los ángeles (1788), ubicado actualmente en el museo del Prado. Además, también llevó a cabo obras murales, como es el caso de la decoración mural de la iglesia de Santo Tomás de Villanueva, Benicasim realizadas con la técnica al fresco en 1776, que representan al Ángel Custodio y a los tres arcángeles, a Santo Tomás de Villanueva, a San Francisco de Asís, a San José y a San Pedro. También participó en el ciclo de pinturas con que se embelleció el nuevo templo de San Francisco el Grande de Madrid. De entre sus obras cabe destacar los frescos de la Catedral de Segorbe en 1800, la obra fue continuada como se ha dicho por su hijo Manuel Camarón Meliá y Luis Planes que la finalizaron en 1806.²⁴

²¹ MUSEO DEL PRADO. Disponible en: <https://www.museodelprado.es/aprende/enciclopedia/voz/camaron-bonanat-jose/> 25 5b539bdc-b733-4100-9665-d0813f51f34a. [Consulta 29-4-22]

²² TORÁN, David Montolío. José Camarón Bonanat (Segorbe, 1731-1803) y algunas nuevas obras en el camino de Aragón. Del valle del Palancia a Teruel. *Maestro de Rubielos*, P. 53.

²³ SANCHIS GUARNER, Manuel. Don Joseph Camarón y Boronat. Un buen pintor del XVIII. Notas para su biografía. 1930. P 228

²⁴ José Camarón y Bonanat-Inmaculada - *Artfecit pintura y dibujo* [en línea]. [S. f.] [consulta 22 de marzo de 2022]. Disponible en: <URL : <https://artfecit.com/producto/jose-camaron-y-bonanat-inmaculada/>>.

4. 3 ESTADO DE CONSERVACIÓN

La pintura mural al óleo de José Camarón Boronat, cubría toda la superficie del camarín. La cúpula tiene unos 14,5 m², aunque en la actualidad, se encuentra parcialmente oculta, solo son visibles dos tercios de la cúpula, en los que se puede percibir todo tipo de deterioros como diversas pérdidas y descohesiones. Se estima que en los 20m² de superficie de las paredes del Camarín bajo la capa de ocultación se conserve un 40% de decoración pictórica.

El repinte o estrato de ocultación antes comentado se ha podido identificar como un compuesto a base de blanco de plomo y calcita. Este repinte es sensible a tratamientos acuosos, por lo que es previsible que se pueda realizar su retirada de manera controlada sin dañar la pintura original. Las catas de eliminación realizadas en los estudios previos de dichos repintes han dejado al descubierto fragmentos del óleo mural en los paramentos laterales, así como una serie de guirnaldas y molduras doradas en su cornisa.²⁵

En cuanto a las principales patologías que se pueden apreciar y que muestran un alarmante estado de conservación, se puede resaltar junto a un oscurecimiento generalizado, cuatro representadas en el siguiente mapa de daños (fig. 15). La mencionada capa de ocultación que cubre parte de original, pero sobre todo la pérdida total de la película pictórica. Un importante cuadro fisurativo con grietas direccionales radiales de asentamiento. Dos amplias zonas blanqueadas por precipitaciones salinas que ha ido produciendo desprendimientos y pérdidas.

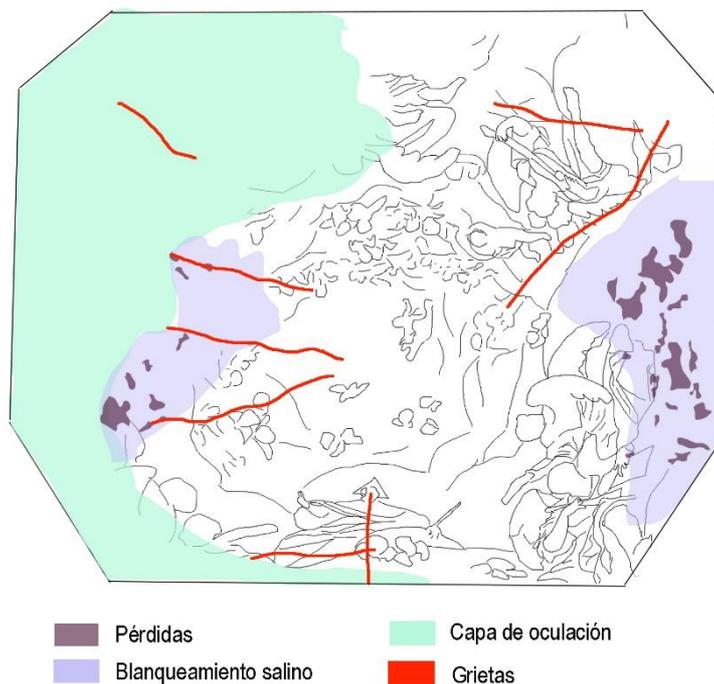


Fig. 15. Mapa de daños de la pintura mural de la cúpula.

²⁵ AAVV. *Op Cit*

La mayoría de los daños que presenta la obra en la actualidad, directamente o indirectamente fueron por efecto del incendio de 1936. Otro factor que influye en su estado de conservación son, las numerosas filtraciones de agua, los repintados parciales, los movimientos estructurales y los contaminantes medioambientales.

Los efectos del incendio, concretamente en la sección del camarín generaron graves daños estructurales, produciendo filtraciones que permiten que entre el agua directamente de la cubierta por lo que las humedades han afectado a la obra, lo que han provocado pérdidas de policromía y eflorescencias. Esto ha generado una gran contaminación salina (fig. 16), cuyos análisis han indicado la presencia de cloruros, en capas de preparación y superficiales y también de nitratos en superficie.

Actualmente se sostiene el lado sur de la cúpula gracias a una viga de hierro, colocada seguramente al renovarse el altar perdido. En la cúpula se puede apreciar un agrietamiento radial (fig. 17) y de asentamiento que recorre la estructura y se extiende por cada lado del camarín, se cree que esta fue la causa de que se procediera al tapiado del ventanal.



Fig. 16. Contaminación salina.



Fig. 17. Agrietamiento radial.

Estos problemas estructurales y la consiguiente presencia de contaminación salina es una causa directa de la importante alteración de la película pictórica. Existe abundante bibliografía científica acerca de la degradación de los pigmentos a base de plomo en presencia de soluciones salinas precisamente esta familia de pigmentos muy representativos en la paleta de esta pintura.

En un artículo publicado en la revista *Journal of Cultural Heritage* se experimentó con los pigmentos blanco de plomo, massicot y plomo rojo, todos ellos utilizados en la pintura del camarín. Las pruebas concluyeron que el plomo rojo tendía a oscurecerse en todas las soluciones salinas de CO_2 y el massicot se convierte en

cerusita si está en estado húmedo reaccionando con el CO_2 . Y por último el blanco de plomo reaccionaba con sulfatos, carbonatos y cloruros.²⁶

En cuanto a los efectos del incendio en la pintura, se superpuso en la pintura mural original un sutil estrato de diferente composición química. Este sutil estrato es una mezcla integrada en la superficie de exudaciones y migraciones propias del óleo y partículas de combustión y oscurece de manera generalizada la obra

Existen variados estudios que explican los efectos de las altas temperaturas en materiales pictóricos. De ellas se han extraído diferentes datos, se explica que normalmente los materiales orgánicos tienen una resistencia térmica de entre 30 y 100°C, mientras que los polímeros tienden a resistir entre 150 y 200°C.²⁷

Varios de los pigmentos que componen la obra, podrían ser viraciones del blanco de plomo por estar expuesto a altas temperaturas. El blanco de plomo se transforma por el calentamiento en massicot ($\beta\text{-PbO}$, ortorrómbico, amarillo-naranja), litarge ($\alpha\text{-PbO}$, tetragonal, anaranjado-rojizo) y plomo rojo (Pb_3O_4 , naranja brillante) (fig. 18).²⁸

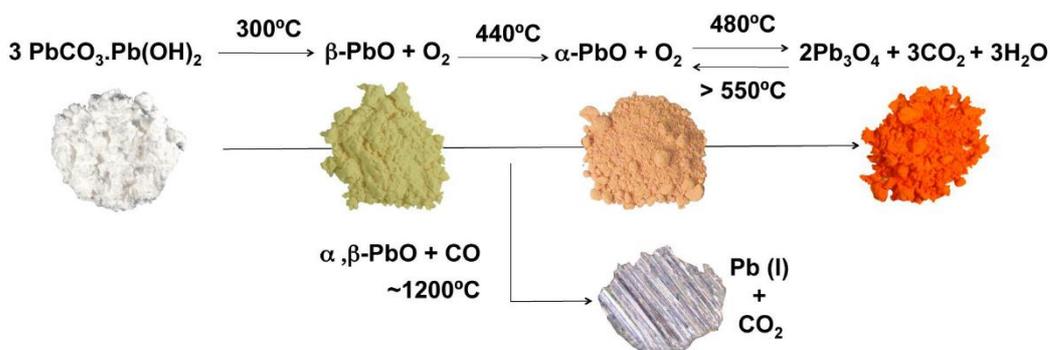


Fig. 18. Proceso que experimenta el blanco de plomo expuesto a altas

En frescos, como los de Santos Juanes, se confirma que el blanco de plomo se transforma cuando la temperatura llega a 260°C.²⁹ Pero en cambio en otro artículo se recopilan varios ejemplos de pinturas murales que han sufrido incendios desde la antigüedad hasta todo el siglo XVIII, ejecutadas como “buen fresco” utilizando ligantes orgánicos, proteico o aceitoso, aplicados sobre yeso húmedo o seco, se determina que el pigmento blanco de plomo pierde el agua cuando la temperatura está a 155°C, la siguiente transformación la realiza a partir de 183°C que se descompone perdiendo en CO_2 y se transforma en plomo amarillo y posteriormente en minio.³⁰

²⁶ KOTULANOVÁ, Eva, et al. Degradation of lead-based pigments by salt solutions. *Journal of Cultural Heritage*, 2009, vol. 10, no 3, p. 368.

²⁷ ROBLES ANDREU, ADRIÁN et al. Evaluación de métodos de consolidación de estratos pictóricos afectados por procesos exotérmicos extremos: estudio comparativo y testado de materiales. *PH investigación*. Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, 2014, n° 2, p. 99

²⁸ MIGUEL, Catarina et al. Meant to be Discovered: The Study by Microscopic Analysis of Lead-Based Pigments Alteration by a Fire. In *Microscopy and Microanalysis*. 2015, vol. 21, no. S5, s. 28.

²⁹ DOMENECH CARBO, Antonio, et al. *Op Cit*. P.171.

³⁰ BARALDI, Pietro, et al. Alterazioni delle materie coloranti nelle pitture murali prodotte dalle alte temperature: fonti storiche ed indagini scientifiche. *Gli interventi su edifici e oggetti d'arte danneggiati dal fuoco*, 2006, p. 15

El fuego generalmente no destruye completamente el estrato pictórico, sino que tiende a transformarlo en una obra monocroma, debido a la transformación que experimentan los pigmentos tierras entre los 230 y 600°C se transforman, tendiendo al rojo-bruno.³¹

También mencionan las transformaciones que experimentan los pigmentos como los utilizados en la pintura, como el amarillo de plomo que se ennegrece con altas temperaturas, formando sulfuro o dióxido, aunque también puede convertirse en plomo rojo cuando la temperatura sube a unos 400°C. En los pigmentos negros, provengan de animal o de vegetal la combustión de la fracción carbonosa se desencadena alrededor de 150-200°C. Los ocre amarillos están formados por silicatos arcillosos que contienen oxihidróxidos de hierro trivalentes como la goethita y la lepidocrocita, son térmicamente inestables: alrededor de 250 °C los dos oxihidróxidos de hierro se descomponen en hematita. Incluso la parte arcillosa puede sufrir alteraciones en función de la temperatura máxima de calentamiento, los silicatos tienden a descomponerse, liberando silicatos más simples. Unos procesos similares suelen sufrir los ocre rojos, la única variación es que el tono del pigmento no suele cambiar mucho. Y las lacas rojas como alizarina se carbonizan a 290°C y se subliman a 430°C y el ácido carmínico carboniza a 250°C.³²

Los colorantes orgánicos y las lacas expuestas al calor se calcinan. Algunos pigmentos pueden llegar a fundirse, y en otros casos se observan variaciones cromáticas, como los pigmentos tierras derivados del hierro: el ocre amarillo (limonita- hidróxido de hierro- se transforma en la tierra roja- óxido de hierro- al perder la molécula de agua).³³

En óleos, el aglutinante suele deteriorarse de manera natural, con el aumento de las temperaturas, concretamente a partir de los 100-300°C, el aceite de linaza se degrada haciendo que a su vez el pigmento esté más expuesto al fuego y su capacidad de resistencia sea inferior.

A los efectos de las altas temperaturas y contaminación salina se suman los procesos químicos intrínsecos de envejecimiento de este tipo de películas pictóricas. La combinación de los ácidos grasos del aceite, que forman una red polimérica cuando se exponen al oxígeno del aire y los iones metálicos de los pigmentos que reaccionan con el aceite se produce el proceso químico, formando carboxilato (R-COOH), los cuales han sido identificados en la analíticas de los estudios previos.³⁴

La importancia de la técnica de ejecución de cada obra es para saber cómo puede comportarse el aglutinante. Hay que tener en cuenta que el contacto entre las partículas de los pigmentos y el aglutinante pueden tener alteraciones debido al efecto de la temperatura. El aceite secante de la mezcla de éteres, tienen un punto de ebullición de 343°C y de inflamación de 222°C.³⁵

³¹ DOMENECH CARBO, Antonio, et al. Analysis of earth pigments in Palomino's frescoes in the Santos Juanes Church in Valencia (Spain) by solid state voltammetry and FTIR spectroscopy. *Arche*, 2006, no 1, p. 172.

³² BARALDI, Pietro, et al. *Op Cit* p. 15.

³³ DOMÍNGUEZ, Guadalupe Durán, et al. La interdisciplinariedad en la Conservación de los Bienes Culturales: análisis de muestras de pigmentos afectados de cambios degenerativos. En *La conservación infalible: De la teoría a la realidad*. 2007. P.389

³⁴ GALÁN CERRILLO, Juan José. Síntesis de carboxilatos metálicos. 2009. P.10

³⁵ *Íbid.*

5. LIMPIEZA DE POLICROMÍAS MEDIANTE LÁSER

5.1 LÁSERES UV, ER:YAG Y ND:YAG

El sistema de limpieza con láser en la conservación y restauración de obras de arte comenzó gracias a John Asmus, en una serie de pruebas prácticas realizadas en superficies pétreas de la ciudad de Venecia a principios de la década de 1970. Según científicos involucrados en la conservación y restauración, el nuevo enfoque no pasó de la etapa experimental durante varios años, principalmente debido a las limitaciones técnicas de las fuentes de luz de láser pulsado disponibles en ese momento, además, tenían una baja tasa de repetición de pulsos, sin sistema de entrega de haz universal, muy baja fiabilidad para largas horas de operación y un alto costo.³⁶

El término LASER es el acrónimo de "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" (Luz amplificada por emisión estimulada de radiación). El término luz hace referencia a la zona del espectro electromagnético que se extiende desde el ultravioleta al infrarrojo, pasando por el visible. El término radiación se refiere a la radiación electromagnética. El término amplificación por emisión estimulada, se refiere al proceso por el cual se genera esta forma tan especial de luz. Un láser es un dispositivo óptico que genera un haz de luz como consecuencia de una emisión estimulada de radiación. Este haz luminoso es monocromático, coherente y muy intenso, propagado en una dirección mínimamente divergente.³⁷

La limpieza láser se basa en los diferentes umbrales de absorción de energía del sustrato y de la suciedad a eliminar. La situación ideal para que esta limpieza sea más óptima que las demás, es que la suciedad a eliminar absorba toda la energía y no el sustrato, pero en pocos casos ocurre esto. Dependiendo de la longitud de onda, puede emitir una radiación láser que la absorba la suciedad y no la superficie del objeto.

Para el funcionamiento de un equipo generador de láser se debe de disponer de tres partes importantes: un medio láser, que proporciona el sistema atómico, una fuente de bombeo que proporciona suficiente energía y una cavidad óptica formando un sistema de retroalimentación. El medio proporciona diversas propiedades a causa de estos materiales (en estado gaseoso, líquido o sólido) son características únicas de cada tipología de láser (fig. 19).³⁸

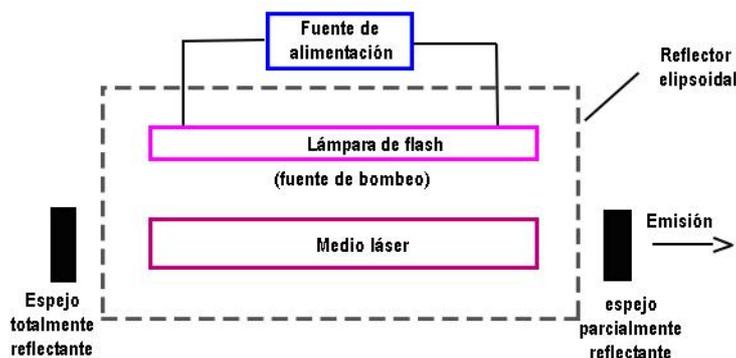


Fig. 19. Elementos fundamentales de un láser³⁹

³⁶ SIANO, Salvatore. Principles of laser cleaning in conservation. *Handbook on the Use of Lasers in Conservation and Conservation Science*, COST G, 2007, vol. 7, p. 2

³⁷ GAVIÑO, María. Alteración cromática de monumentos tras la limpieza con láser: origen, naturaleza y eliminación del amarilleamiento de las piedras. 2004. P. 35

³⁸ YANG, Xinhui. An Evaluation of Laser Ablation Cleaning on Surficial Black Crust on Pennsylvania Marble: A Case Study of the Hood Cemetery Gate, Germantown, Philadelphia, PA. 2016. p.26.

³⁹ BRODARD, Valentine. Le laser comme moyen de dégagement de produits de corrosion sur un objet archéologique: le cas de la dorure sur alliage cuivreux. En *CeROArt. Conservation, exposition, Restauration d'Objets d'Art*. Association CeROArt asbl, 2012. p.4

Actualmente, en el mercado se pueden encontrar una gran variedad de láseres de distinta tipología, que pueden ser de baja y alta energía, de corto y largo pulso, también hay láseres en continuo y un amplio rango de aplicaciones, desde industriales hasta médicas. Dependiendo de la problemática de la obra, se necesitan unas características distintas y por lo tanto un tipo de láser diferente. Aunque lo importante es poder controlar la precisión de dónde, cuándo y cuanta luz pura y concentrada se deposita en la superficie. En el mundo de la restauración y conservación del patrimonio cultural, en específico en la limpieza de policromías, se han utilizado principalmente tres tipos de láseres, el láser de excimeros de UV, los láseres IR de ER: YAG y de ND: YAG.

El tipo de láser que se use tendrá una manera de absorción y, a su vez, la longitud de onda, la fluencia, la duración de cada impulso, y la frecuencia de repetición, generarán una sucesión de efectos físicos, químicos y mecánicos que pueden variar según las diferentes propiedades físico-químicas de la superficie tratada.

Cada tipo de láser está asociado a emisiones de distintas longitudes de onda que producen distintos tipos de ablación (fig. 20). Los de onda corta, en la banda de los ultravioletas, transportan la energía por los fotones de la materia, lo que hace que los enlaces químicos de las moléculas se rompan de la materia en la que incide el rayo láser, este proceso se conoce como efecto de ablación fotoquímica.

Otra opción es, que el láser posea una longitud de onda más larga, en la banda de la longitud del visible o del infrarrojo. Este láser transporta la energía por los fotones de manera más baja, haciendo que solo transfiera la energía a la materia, esto provoca un proceso de calentamiento, este proceso se conoce como ablación fototérmica.⁴⁰

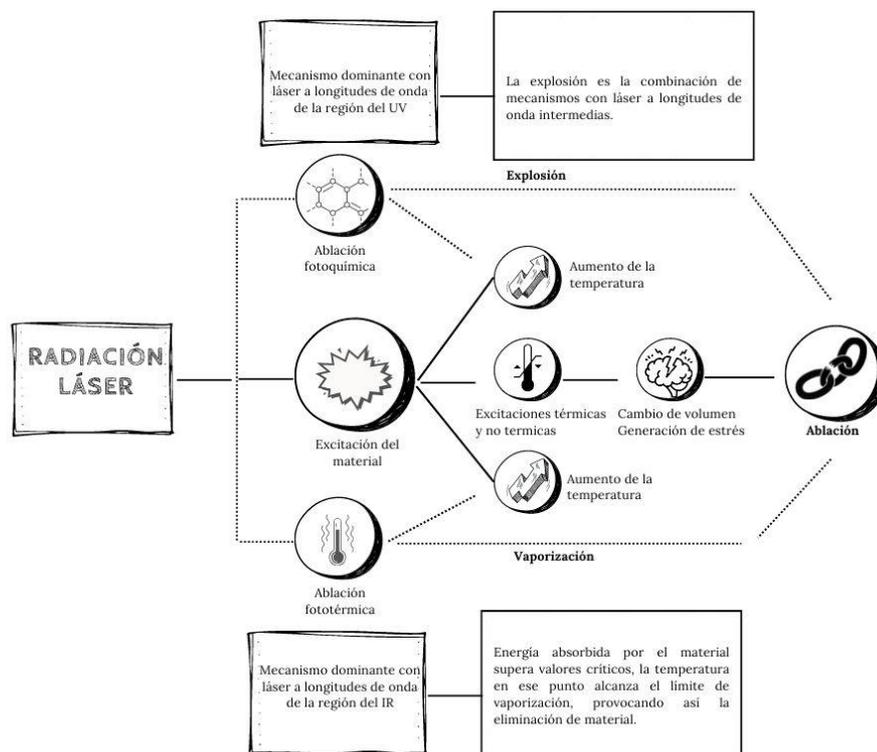


Fig. 20. Esquema de los efectos de la radiación láser.

⁴⁰ PÉREZ, María Monreal. *La técnica láser como método de restauración en pinturas romanas al fresco de la península ibérica*. 2017. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid. p.102

El láser excimeros de UV tiene las duraciones de pulso muy cortos, entre 10 ns- 20 ns y su funcionamiento se genera por la excitación de la mezcla de gases, normalmente gases haluros, como KrF (fluoruro de criptón) y XeCl (xenón monocloruro), por la descarga de alta tensión.⁴¹ Estos láseres consiguen eliminar las sustancias por un efecto fotoquímico, concretamente se realiza una foto activación, es decir una reacción química. Los láseres excimeros son efectivos sobre barnices porque éstos absorben la energía de la longitud de onda de estos láseres y minimizan la transmisión de luz a través de las capas. Aunque la longitud de onda de 248 nm es la más prometedora para eliminar capas de barniz y pintura, también puede emitir en $\lambda = 193$ nm (ArF), $\lambda = 308$ nm (XeCl) y $\lambda = 351$ nm (XeF). Los UV son fuertemente absorbidos por los grupos funcionales del barniz y sus productos de descomposición. La limpieza con láser de excimeros controla la eliminación parcial de la capa exterior del barniz, dejando aún una capa protectora y evitar la decoloración y otros efectos químicos nocivos.⁴²

Información del uso de este tipo de láser en casuísticas similares a las que nos enfrentamos en este estudio la encontramos por ejemplo en una experiencia realizada en 2002 sobre un óleo sobre masonita, de artista desconocido. Un paisaje de 1942, 53x 37 cm, obra que fue gravemente dañada en un incendio, decolorándose y oscureciéndose gran parte de su superficie por la combinación de altas temperaturas y el hollín. Para eliminar la capa oscurecida, el láser se ajustó a una cantidad moderada de energía (0,38 J/cm²) el punto de 3,5 mm. Usando cuatro pulsos, se limpió haciendo aparecer colores brillantes de la de pintura original (fig. 21)⁴³



Fig. 21. Pruebas realizadas con un láser de excimeros en un óleo sobre masonita.

El láser IR ER: YAG tiene un sistema de láser infrarrojo producido por un cristal sintético que consta de (Y) itrio, (A) aluminio, (Er) impurezas de erbio y una estructura de granate (G). La longitud de onda es de 2940 nm.⁴⁴ Este sistema láser produce rayos infrarrojos que son fuertemente absorbidos por enlaces OH con

⁴¹ SCHREINER, M.; STRLIC, M.; SALIMBENI, R. Handbook on the Use of Lasers in Conservation and Conservation Science (COST Office, Brussels, 2008). p. 1.1.4.1

⁴² PÉREZ, María Monreal. *Op Cit.* P 114.

⁴³ TEULE, J. M., et al. Controlled laser cleaning of fire-damaged paintings. En *ICOM Committee for Conservation, ICOM-CC: 13th Triennial Meeting, Rio de Janeiro, 22-27 September 2002: preprints.* 2002. p

⁴⁴ TEPPPO, Ed. Introduction: Er: YAG lasers in the conservation of artworks. *Journal of the Institute of Conservation*, 2020, vol. 43, no 1, p. 8. DOI 10.1080/19455224.2019.1706597.

poca profundidad de penetración (un requisito importante para la limpieza de pintura). El primer estudio de la capacidad de los láseres Er:YAG en el arte se remonta al año 2000. Trabajos recientes han publicado la eliminación de una capa de barniz que se aplicó sobre la capa de pintura altamente frágil de lapislázuli. Para sustancias que no tienen este grupo funcional, es necesario utilizar una solución acuosa rica en grupos hidroxilo como agua, alcohol isopropílico o acetona. Estas soluciones se hinchan debido a la absorción de la radiación láser, destruyendo el material removido. Sin embargo, este pico de absorción característico del grupo hidroxilo puede causar daños no deseados.⁴⁵

Este tipo de láser se utilizó en la pintura sobre una tabla del siglo XV Cristo ante Pilato atribuida al artista catalán Lluís Borrassà. Se realizaron diferentes pruebas variando la energía por pulso (10–45 mJ, correspondiente a fluencias de 1.3–5.8 J/cm², siendo 1 mm el diámetro del spot) y el agente humectante. Los agentes humectantes utilizados principalmente fueron una mezcla de etanol al 50 % o alcohol isopropílico, 50 % agua con white spirit. Los niveles de energía para la eliminación de la incrustación reticulada de las túnicas azules oscilaron entre 15 y 25 mJ (2–3.2 J / cm²) por pulso en función del grosor de la capa que se estaba tratando. En la mayoría de los casos, se utilizó una técnica de adelgazamiento con menores cantidades de energía con el paso del pulso sobre la superficie 2 o 3 veces hasta que se eliminó la incrustación y el azul ultramarino fue claramente visible (Fig. 22). El proceso de ablación también seca o evapora el agente humectante para que se minimice la saturación acumulada de la superficie subyacente.⁴⁶



Fig. 22. Antes y después de la limpieza realizada con un láser de ER: YAG de *Cristo ante Pilato* por Lluís Borrassà .

⁴⁵ PÉREZ, María Monreal. *Op Cit.* P 115

⁴⁶ ANDREOTTI, Alessia, et al. Diagnosis of materials and effectiveness of Er: YAG laser cleaning as complementary treatment in a panel painting attributed to Lluís Borrassà (fifteenth century). *Applied Physics A*, 2016, vol. 122, no 6, p. 9

El láser ND: YAG es el más conocido y utilizado para la limpieza de soportes pétreos. Nd: YAG es una abreviatura de granate de itrio y aluminio dopado con neodimio (Nd: Y3Al5O12), que generalmente emite luz en la región del infrarrojo cercano (NIR) de $\lambda = 1064 \text{ nm}$ (ω). Estos tipos de láseres se calientan durante su uso, por ello deben tener un sistema de refrigeración alrededor del cristal amplificador. El uso de este tipo de fuente de luz láser para limpiar superficies policromadas es el área de aplicación más delicada. En los materiales orgánicos es menos efectivo porque no hay suficiente energía para romper el enlace covalente. Los rayos infrarrojos tienden a causar un efecto fototérmico que puede romper los enlaces de los materiales inorgánicos, vaporizando la suciedad. Por el contrario, no actúa sobre la materia orgánica, pues no tiene suficiente energía. Todo ello, en teoría, implica una limpieza más selectiva de igual manera que las del ultravioleta (que ejerce una acción fotoquímica, rompiendo los enlaces químicos de la materia sin generar calor, eliminando así capas desde 0'1 a 1 micra por pulso) y con mayor posibilidad de control.⁴⁷ Este tipo de láser fue desarrollado recientemente para emitir radiación con longitudes de onda $\lambda = 532 \text{ nm}$ (2ω), $\lambda = 355 \text{ nm}$ (3ω), $\lambda = 266 \text{ nm}$ (4ω) y $\lambda = 213 \text{ nm}$ (5ω), dando excelentes resultados de limpieza.

Se obtienen buenos resultados gracias a la universalidad de la duración de sus impulsos. La duración del pulso en el láser Nd: YAG puede ser: Normal Mode, duración de pulso largo (0,2-1 ms), Normal Free Running de pulso largo de 200-1000 μs , Q-Switching (1-10 ns), de duración de pulso corto y elevada potencia de pico de energía, produce efectos mecánicos que inciden en la superficie de forma compleja. Pueden llegar a generar efectos secundarios sobre la superficie, ocasionando microfracturas y alteraciones cromáticas de la superficie. LQS, de duración de pulso de 80-100ns y Short Free Running, de pulso intermedio (60-120 μs)

Uno de los ejemplos más característicos de la utilización de esta tipología de láser, fue el empleado para la limpieza de la tumba de Neferhotep (fig. 23). La cual se incendió en la primera mitad del siglo XIX, haciendo que las pinturas murales que decoraban la tumba se cubrieran con costras de hollín muy gruesas. Debido a esto las pinturas y jeroglíficos eran irreconocibles a simple vista.

El láser utilizado para la limpieza fue CL 20 BACKPACK, con una potencia media del láser (2,5- 20 watt), una duración del pulso (>10 ns), una frecuencia de exploración (50- 300 Hz), un ancho de lectura (0- 63 mm) y una fluencia (0,5-6,30 J/cm²).⁴⁸



Fig.23. Antes y después de la limpieza realizada con un láser de ND: YAG de la tumba de Neferhotep.

⁴⁷ PÉREZ, María Monreal. *Op Cit.* P117

⁴⁸ GRAUE, B.; BRINKMANN, S.; VERBEEK, C. PROCON TT 49: Laser cleaning of ancient Egyptian wall paintings and painted stone surfaces. En *Lasers in the Conservation of Artworks VIII*. CRC Press, 2010., p. 55

5. 2 EFECTOS DEL LÁSER EN PIGMENTOS Y AGLUTINANTES

La utilización del láser para el proceso de la limpieza puede conllevar riesgos importantes para la obra. La incidencia directa de la radiación láser en la capa de la pintura puede ocasionar cambios químicos, morfológicos y cromáticos en los materiales originales que se desean conservar.⁴⁹ Uno de los problemas más destacables es la decoloración de los pigmentos, las policromías pueden sufrir después de la irradiación láser dependiendo de cómo es la naturaleza del material, el aglutinante, el soporte, la técnica y el tipo e intensidad del láser utilizado.

En varias investigaciones se comprobó que algunos pigmentos podrían sufrir modificaciones a partir de cierto umbral de absorción de energía. Durante la irradiación la mayor energía debe absorberla la capa a eliminar, parte se refleja y parte la absorbe el material a limpiar. La cantidad de energía que absorbe el pigmento o estrato a conservar no debe sobrepasar los umbrales a los que resiste. Se ha consultado la literatura correspondiente de los efectos que puede producir la limpieza láser a los pigmentos de los que se compone la obra por la limpieza láser, si se sobrepasan los parámetros de energía adecuados.

Existen algunos textos en los que se ponen a prueba los pigmentos con metodología diversa. Principalmente para limpieza realizadas con láser de nd:YAG y sobre probetas de pigmentos puros con o sin aglutinante.

En uno de ellos el tratamiento de limpieza fue efectuado en probetas con una duración de pulso de 6ns, una frecuencia de disparo de 20Hz, una energía máxima de salida y con posibilidad de trabajar en haz colimado o convergente se comprobó las transformaciones de varios pigmentos. El blanco de plomo (PbCO_3 $\text{Pb}(\text{OH})_2$) se transformó en $\text{PbO} + \text{PbO}_2$ virando hacia un tono grisáceo.⁵⁰

Se explica que el oscurecimiento del blanco de plomo se debe a la oxidación y a la formación de plattnerita (PbO_2)⁵¹. Aunque también se ha demostrado que este pigmento se ennegreció temporalmente, puesto que, después de la irradiación láser, este contiene más cantidad de plomo en relación de oxígeno.⁵² Un estudio de Cooper⁵³ sugirió que la presencia de aglutinantes afecta al grado de decoloración del pigmento, que se atribuyó a la conversión de plomo básico carbonato en plomo elemental en la superficie.

Los resultados del plomo amarillo massicot (PbO) concluyeron que tiene una temperatura de descomposición muy alta (más de 1 000 °C). La radiación láser provocó un ennegrecimiento definitivo y radical de la superficie indicando un cambio brusco en la química de su superficie. Una explicación puede ser la reducción de PbO a plomo metálico.⁵⁴

El bermellón (sulfuro mercuríco) se produce naturalmente como cinabrio y ha sido considerado uno de los pigmentos rojos más populares entre los artistas. Este pigmento es muy sensible a la radiación infrarroja incluso cuando las fluencias aplicadas son muy bajas, concretamente a 0,3–0,5 J/cm².⁵⁵

⁴⁹ ORTIZ, Alicia Sánchez. *Restauración de obras de arte: pintura de caballete*. Ediciones AKAL, 2012. p.209

⁵⁰ GONZÁLEZ, Cristina Gómez; DEL BARRIO, Mercedes Barrera. La utilización del láser NdYAG en la limpieza de capas de policromía. En *Conservación del Patrimonio, evolución y nuevas perspectivas: actas del I Congreso del GEIC Valencia, España 25, 26 y 27 de Noviembre de 2002*. EL Grupo Español del IIC (International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works), 2002. P. 112

⁵¹ La Plattnerita es un mineral de la clase de los minerales óxidos. Es un óxido simple anhídrido de plomo (IV) de fórmula química PbO_2 . Tiene color negro azabache, negro hierro o negro parduzco, con un aspecto subtranslúcido u opaco.

⁵² POULI, Paraskevi; EMMONY, D. C. The effect of Nd: YAG laser radiation on medieval pigments. *Journal of Cultural Heritage*, 2000, vol. 1, p. S185.

⁵³ COOPER, M. I.; FOWLES, P. S.; TANG, C. C. Analysis of the laser-induced discoloration of lead white pigment. *Applied surface science*, 2002, vol. 201, no 1-4, p. 76

⁵⁴ POULI, Paraskevi; EMMONY, D. C. *Op Cit* S187.

⁵⁵ *Ibid.*

En otro de los artículos de las pruebas de limpieza con láser se realizaron en todos los pigmentos en polvo, así como en las muestras de piedra policromada simuladas. El láser funcionaba en un modo Q-switched a 5-10 Hz, la duración de cada pulso fue de 30 ns y la fluencia estuvo entre 300 y 500 mJ/cm².⁵⁶

En el cual habla del pigmento Bermellón o cinabrio (HgS). Este pigmento está en un equilibrio metaestable de dos isométricas fases, cinabrio hexagonal rojo ($\ddot{\gamma}$ -HgS) y cúbico negro ($\ddot{\gamma}'$ - HgS) metacinabrio. Cambia su color rojo a negro por un fenómeno inducido por la luz, probablemente debido a una interacción fotoquímica.⁵⁷

La metodología de otra investigación fue preparar muestras que consistían en píldoras de 13 mm de diámetro y un grosor de 5 mm de pigmento puro. A los cuales se sometieron a la frecuencia de pulso desde 1 hasta 10 Hz y la duración de pulso fue de 6-8 ns.⁵⁸

En las pruebas del láser del plomo rojo, se mostró que este se transforma en amarillo Plomo. Bajo la irradiación el cambio de color torna primero a gris metálico y con el aumento de la densidad de energía cambia de nuevo en naranja, probablemente debido a una interacción fotoquímica. También se comprobó que después de 1 semana de exposición en condiciones ambientales, el pigmento recuperó su color por oxidación de PbO con O₂ de la atmósfera.⁵⁹ La decoloración del pigmento con diferentes medios de unión y longitudes de onda, podría atribuirse a la formación de óxidos de plomo.⁶⁰

El amarillo de Nápoles (BiVO₄, Pb (SbO₃)₂ o Pb (SbO₄)₂) (antimoniato de plomo) mostrando que la decoloración es más evidente a 355 nm y el cambio de color probablemente se deba a una interacción fotoquímica. Este pigmento suele reducir.⁶¹

Por último, otro el enfoque fue preparar probetas de diferentes capas de colores, dispersando pigmentos en diferentes medios de unión; las probetas se caracterizaron analítica, morfológica y cromáticamente antes y después de la irradiación láser, realizada mediante un láser Nd:YAG a diferentes fluencias.⁶²

El pigmento Hueso negro (C) con la irradiación láser Nd:YAG de menor fluencia (0.1 J / cm²) no resultó en cualquier alteración morfológica o cromática, mientras la fluencia intermedia (1 J / cm²) provocó una variación notable de los parámetros de *Lab* y la morfología de la superficie.⁶³

⁵⁶ PLESTERS, Joyce; ROY, Ashok; BOMFORD, David. Interpretation of the magnified image of paint surfaces and samples in terms of condition and appearance of the picture. *Studies in Conservation*, 1982, vol. 27, no sup1, p. 169.

⁵⁷ PLESTERS, Joyce; ROY, Ashok; BOMFORD, David. *Ibid.*

⁵⁸ CHAPPÉ, M., et al. Laser irradiation of medieval pigments at IR, VIS and UV wavelengths. *Journal of Cultural Heritage*, 2003, vol. 4, p. 265.

⁵⁹ CHAPPÉ, M., et al. *Ibid.*

⁶⁰ SOBOTT, Robert J. Gordon, et al. Laser interaction with polychromy: laboratory investigations and on-site observations. *Journal of Cultural Heritage*, 2003, vol. 4, p. 279.

⁶¹ CHAPPÉ, M., et al. *Op Cit.* 267.

⁶² SANSONETTI, Antonio; REALINI, Marco. Nd: YAG laser effects on inorganic pigments. *Journal of Cultural Heritage*, 2000, vol. 1, p. S190.

⁶³ SANSONETTI, Antonio; REALINI, Marco. *Op Cit.*, p. S193.

6. FASE EXPERIMENTAL

Acotadas las características técnicas y conservativas de la obra, la fase de experimentación tiene su punto de partida en la información recabada sobre sus alternativas de limpieza en el periodo de estudios previos del proyecto de intervención (fig. 24 y 25).

La obra fue sometida a pruebas de limpieza mediante medios acuosos obteniéndose resultados favorables no exentos de mejoras y riesgos. Las mezclas testadas que obtuvieron resultados positivos fueron soluciones acuosas tamponadas a un pH controlado con tensoactivos y quelantes.

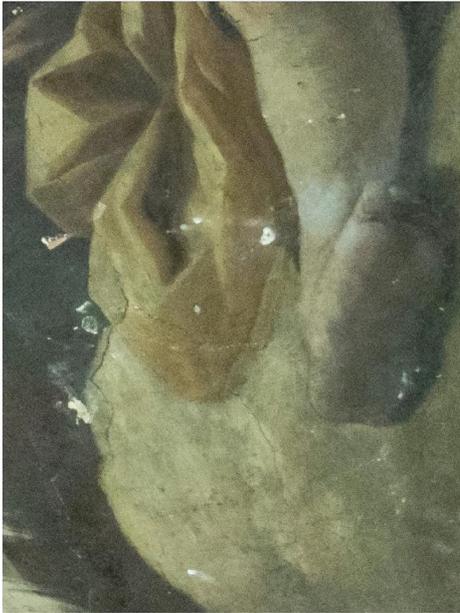


Fig. 24. Zona donde se realizaron las pruebas.



Fig. 25. Pruebas con soluciones acuosas.

Debido a los precedentes de las pruebas que se habían realizado y las características de la obra y su deterioro, se decidió confrontar las posibilidades de la limpieza láser con estos procedimientos acuosos.

En las pruebas con test acuoso se probaron primero tres soluciones, cada una de ellas tenía diferente pH, una de ellas era ligeramente ácida (pH 5,5), otra neutra (pH 7) y por último la ligeramente alcalina (pH 8,5).

Partiendo de estas tres soluciones se añadió un quelante a la solución. El quelante proporciona una acción de neutralización electroestática, gracias a ella permite eliminar suciedad superficial fijada por las fuerzas de atracción. Se debe tener precaución si hay pigmentos con iones metálicos, aunque todos los pigmentos de la obra tienen iones metálicos, estos están encapsulados en la película de aceite. En el PH 7 y 8'5 se añadieron 0,1 gramos de amonio citrato tribásico (TAC) y en el PH 5'5 se añadieron 0,2 gramos de amonio citrato tribásico (TAC), dado que no dio resultados se mezcló con un quelante más fuerte, ácido etilendiaminotetraacético (EDTA).

Las pruebas se testaron en la tonalidad ocre de una de las nubes, se sigló SA. (fig. 26). Cada una de ellas tendrá un tamaño aproximado de 1 cm x 1 cm.

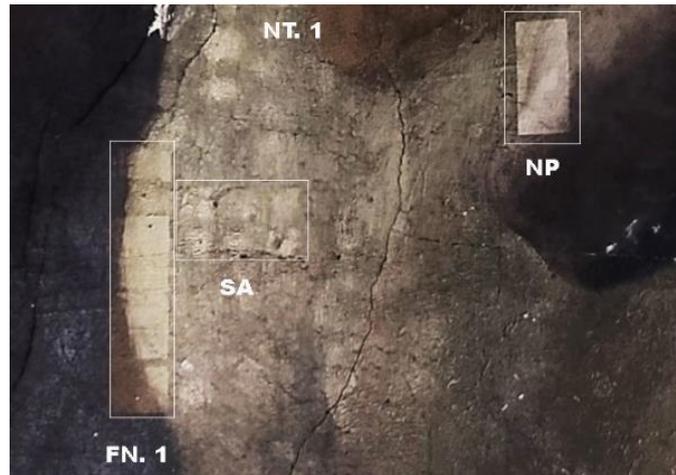


Fig. 26. Zona donde se realizaron las pruebas.

Tras las pruebas de test acuosos se procedió a las pruebas de ablación en diversas zonas con diferentes tonalidades, con el fin de evaluar la eficacia de la técnica de limpieza y posiblemente definir la fluencia operativa óptima.

El láser utilizado fue CL 20 BACKPACK (fig. 27), un láser con mochila de unos 12 kg de peso, con una fibra óptica de 2 a 4 metros. Este láser de sistema Nd: YAG, es un láser de fibra de iterbio, Q-switched, bombeado por diodos, que emite radiación infrarroja de aproximadamente 1062 nm de longitud de onda. La potencia, frecuencia de pulso, escaneo frecuencia y ancho de barrido son parámetros ajustables.⁶⁴

El sistema opera con una entrada de 115 V a una potencia máxima de 20 W (potencia media), que se puede calibrar de 10% a full, el funcionamiento es mediante suministro eléctrico o con baterías recargables, y posee un sistema de refrigeración por aire. El láser está equipado con un cabezal de escaneo OSH 20L. El enfoque de la lente es de 160 mm, que determinan la distancia de trabajo. Produce un haz lineal (en lugar del punto redondo de los sistemas típicos de Nd: YAG). La frecuencia de pulso (PF), la frecuencia de exploración (SF) y el ancho de exploración (SW) son ajustables a través de tres perillas en el cabezal de escaneo. Las perillas están marcadas con escala, de 0 a 10, pero en realidad el ajuste es continuo.⁶⁵

⁶⁴ YANG, Xinhui. *An Op Cit.* P 73

⁶⁵ *Íbid.* P74



Fig. 27. CL 20 BACKPACK CLEAN láser.

En todos los casos, la fluencia se incrementó gradualmente, hasta obtener una eliminación satisfactoria de la suciedad. Los resultados de esta optimización se resumen en tablas, enumerando las fluencias operativas efectivas para eliminar los depósitos de hollín y polvo y de las distintas exudaciones que cubren la película pictórica.

El tratamiento con láser se aplicó en las zonas de la pintura que estaban en un buen estado de conservación, una nube, una tela, una carnación, un fondo oscuro y en una fina capa de ocultación. (Fig. 28 y 29)



Fig. 28. Pintura antes de las pruebas.

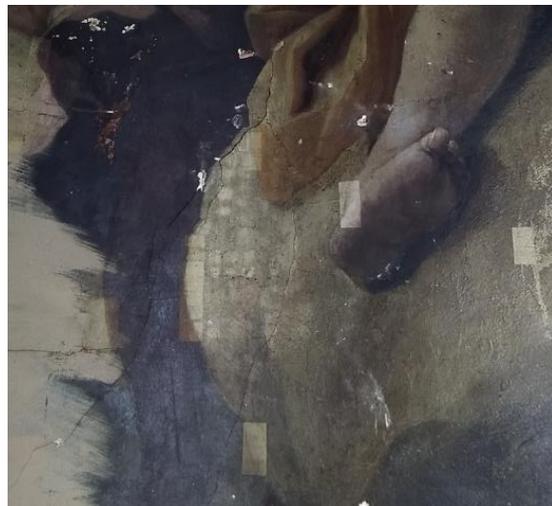


Fig. 29. Pintura después de las pruebas.

En todas las pruebas realizadas se comprobó su impacto en la obra, con mediciones de conductividad, PH, colorimetría y fotografías macro y así saber el grado de efectividad del sistema de limpieza.

El pH y la conductividad específica han sido monitoreados para seguir los efectos de la descomposición de cualquier sustancia orgánica presente. Tras las pruebas de limpieza, se comprobaron estos parámetros

debido a que son controles esenciales para la elección de un sistema de limpieza idóneo e inocuo para la obra. Estos parámetros se medirán en todas las tonalidades sucias y tras su limpieza.⁶⁶

Para la medición de la conductividad se utilizó el equipo Horiba LAQUATwin EC-11 (fig. 30) junto con discos de agarosa de 1,6 mm de diámetro y entre 1,6 y 1,8 mm de altura. La agarosa utilizada es la Agarosa E de Condolab® (fig. 31), debido a su carácter no iónico que proporciona una baja conductividad y un pH casi neutral, preparada al 2% en agua destilada.



Fig. 30. Horiba LAQUATwin EC-11



Fig. 31. Agarosa E de Condolab®

El proceso de la medición se realiza a través de los discos de agarosa, hechos con un cilindro de polietileno de 1,6 mm de diámetro. Los discos se han mantenido en contacto con la superficie durante un tiempo predeterminado, unos dos minutos. Con ayuda de unas pinzas el disco se ha insertado en la celda del sensor de conductímetro y añadiendo tres gotas de agua destilada para que haga un contacto óptimo con los electrodos (fig. 32). Después de cada medición se debe enjuagar con agua desmineralizada la celda y extraer los restos del disco de agar.



Fig. 32. Proceso de la medición de conductividad.

⁶⁶ GAETANI, Carolina; SANTAMARIA, Ulderico. The laser cleaning of wall paintings. *Journal of Cultural Heritage*, 2000, vol. 1, p. S200.

⁶⁷ CREMONESI, Paolo. AGAROSIO E AGAR: AGGIORNAMENTO E NUOVI SVILUPPI. [S. l.] : [s. n.], [s. f.].

Para la medición del PH se utilizó el equipo metro portátil PH 25 + de la marca CRISON® (fig. 33), con un electrodo de contacto, junto con placas de agarosa para la humectación superficial. El procedimiento es el mismo utilizado para la conductividad.



Fig. 33. pHmetro portátil PH 25 + de la marca CRISON®,

En el proceso de medición del PH primero se ha puesto en contacto sobre la película pictórica una placa de agarosa durante unos tres minutos, para dar humedad a la superficie (fig. 34). Tras esto se ha medido el PH con el electrodo de contacto en zonas sucias y limpias y luego se ha medido la cara de la placa de agarosa que ha estado en contacto para comparar si el resultado indirecto por absorción es similar.



Fig. 34. Zonas donde se midió el pH.

Tras la evaluación visual preliminar de la limpieza en los pigmentos, también se realizaron pruebas colorimétricas.

Para la medición de la colorimetría se utilizó el Espectrofotómetro X-Rite i1, junto al software Measure Tool® que procesa los datos, para poder estudiar el comportamiento de los tonos después de haber realizado las pruebas de limpieza, tanto con el láser como con los test acuosos.

Se midieron todas las tonalidades en las que iban a ser realizadas las pruebas de limpieza y después de la limpieza por el nivel 2 de energía, esta medición no fue instantánea, sino días después tras su secado.

Tras tener todos los resultados facilitados por el software, se pasaron a una tabla Excel y se comprobó la cambios de cada parámetro de Lab⁶⁸ (anexos). Para comprender visualmente la modificación que habían sufrido los tonos, se representó en gráficos de CIELAB de GretagMacbeth⁶⁹, para poder reproducirlo se calcularon las medias de las mediciones de cada parámetro y se localizaron en la recta de luminancia y en el gráfico de tonalidad.

Por último, se realizaron fotografías con microscopio digital USB Dino-Lite Special Lighting a 50 aumentos, para poder observar la textura de un inicio y tras la prueba de limpieza y detectar posibles cambios superficiales y restos de materiales.

⁶⁸ El espacio de color L*a*b*, también referido como CIELAB, es actualmente uno de los espacios de color más populares y uniformes usado para evaluar el color de un objeto. Este espacio de color es ampliamente usado porque correlaciona los valores numéricos de color consistentemente con la percepción visual humana.

⁶⁹ VARIŞ, Serhat. *Synthesis and electrochromic properties of conducting polymers of 1-(4-nitrophenyl)-2, 5-di (2-thienyl)-1H-pyrrole and their use in eletctrochromic devices*. 2006. Tesis de Maestría. Middle East Technical University. P 27

6. 1 PRUEBAS DE LIMPIEZA Y RESULTADOS

Las pruebas de limpieza se ubicaron en zonas donde la obra tenía un buen estado de conservación y en varias tonalidades para ver la resistencia que tienen los pigmentos. Las pruebas se siglaron (fig. 35.) y en cada una de ellas se efectuaron limpiezas con diferentes sustancias acuosas y varios niveles de energía que nos proporcionaba el láser. Las medidas de las catas aproximadamente son de unos 2 cm de ancho y entre 5 o 7 cm de alto, en cada una de ellas la prueba con cada nivel del láser ocupa 2 cm x 1,5 cm más o menos.

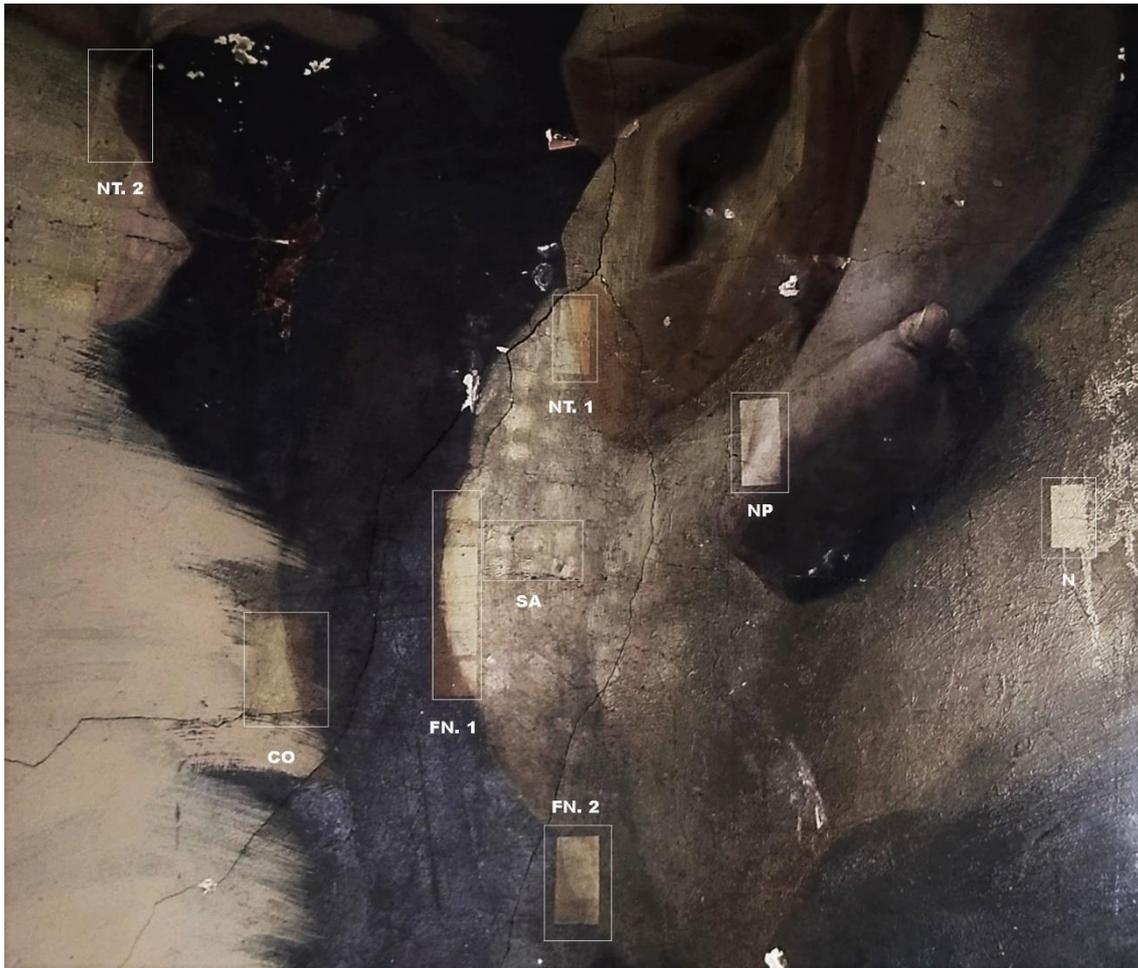


Fig. 35. Ubicación de las pruebas sigladas.

En las pruebas que se han realizado con las soluciones acuosas, se aprecia un resultado positivo en la retirada del depósito de polvo y hollín. En la realización de las soluciones acuosas se siguió parte del test acuoso de Cremonesi, comenzado con las soluciones madre, resultando con la solución con pH 8,5 hay una mayor retirada de la suciedad superficial. Con las soluciones madre con quelantes se han obtenido mejores resultados que sin los quelantes. La solución PH 8.5 con amonio citrato tribásico (TAC), ha tenido mayor grado de limpieza que las soluciones PH 7 con amonio citrato tribásico (TAC) y PH 5'5 con ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) (Tabla. 1)

En las pruebas con el láser se realizaron las limpiezas con los tres niveles más bajos de densidad de energía con el incremento gradual de la potencia del pulso de 100Hz. El nivel 1 de energía actúa con 2,5 W y una fluencia de 0,5 J/cm², el nivel 2 de energía actúa con 3,5 W y una fluencia de 0,7 J/cm² y el nivel 3 de energía actúa con 5 W y una fluencia de 0,99 J/cm².

La primera prueba FN. 1 (tabla. 2) se efectuó sobre el lateral de una de las nubes incluyendo una sección del fondo. Las dos tonalidades tenían un aspecto ennegrecido, concretamente, la tonalidad del fondo no se aprecia con exactitud, aunque gracias a la prueba con el láser se observa una tonalidad rojiza. Los pigmentos que componen estas tonalidades son, blanco de plomo (PbCO₃)₂·Pb(OH)₂, Litargirio (PbO) Plomo amarillo y tierras rojas.

Se comenzó probando el menor nivel de potencia del láser, puesto que no se sabía con certeza como podía reaccionar la película pictórica. El nivel 1 de energía consigue eliminar un mínimo de suciedad, pero no la suficiente. Debido a la ausencia de resultados con la primera prueba se probó directamente con el nivel 3 de energía, la limpieza experimenta un cambio considerable, a pesar de que en algunas zonas la tonalidad es diferente. Por último, se probó con el nivel 2 de energía, y aunque en este nivel sea necesario insistir con el láser, es una limpieza más respetuosa con los pigmentos y no hay peligro de superar el umbral de absorción y dañarlos.

La segunda prueba NT. 1 (tabla. 3) se realizó sobre el lateral de una tela con un poco de nube. Las tonalidades que se aprecian en esta zona son un naranja y un ocre. Con la primera prueba se descartó el nivel 1 de energía. Por lo que el primer nivel de energía empleado fue el 3, puesto que su resultado es el más favorable y no se percibe el cambio de tonalidad que se aprecia en la primera prueba. Aunque el nivel 3 de energía tuvo una limpieza adecuada, se probó también con el nivel 2 de energía, cuyo resultado fue similar al 3 pero la suciedad localizada en zonas rugosas no se consiguió eliminar.

Estos dos niveles de energía se probaron en otra zona de nube N (tabla. 4), en el lateral de un pie NP (tabla. 5) y en el lateral inferior de la nube FN. 2 (tabla. 6). En todas estas pruebas los resultados fueron similares a la segunda prueba, es decir el nivel 3 de energía llega a un nivel más alto de limpieza que el 2, pero se sopesa que el nivel 2 de energía es más respetuoso con los posibles riesgos de alteración del pigmento, aunque deje un mínimo de suciedad.

Por último, se efectuaron dos pruebas en zonas más complejas, la primera fue en un ropaje de una tonalidad granate NT. 2 (tabla. 7), la cual pueda contener pigmento orgánico rojo que probablemente sea laca de granza. La laca de granza puede resultar más sensible al proceso del láser, por ello se probó solo el nivel 2 de energía, cuyo resultado ha sido óptimo y no ha dañado a simple vista la tonalidad granate.

La segunda prueba CO (tabla. 8) se realizó en una zona que contenía una fina capa de ocultación, sabiendo que el nivel 2 de energía es el más respetuoso se ha decidido probar únicamente este nivel, obteniendo como resultado la eliminación del repinte además de la capa de suciedad de hollín y polvo.

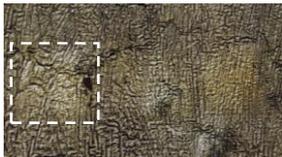
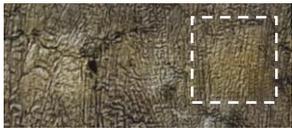
P.1. SA OCRE (NUBE)						
PH	TENSOACTIVO	QUELANTE	GELIFICANTE	DISOLVENTE	IMAGEN	LIMPIEZA
7	-	-	-	-		Baja-Media
5'5	-	-	-	-		Baja
8'4	-	-	-	-		Media
7	-	AMONIO CITRATO TRIBÁSICO (TAC) – 0'1g	-	-		Medio- Alto
5'5	-	EDTA – 0'2g	-	-		Medio
8'5	-	AMONIO CITRATO TRIBÁSICO (TAC) – 0'1g	-	-		Alto

Tabla. 1. Pruebas en la zona SA.

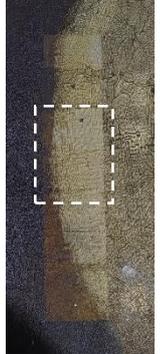
P1. FN.1 OCRE / NEGRO ROJIZO (NUBE)							
Pigmento	Nivel	Energía	Frecuencia de pulso	Fluencia (J/cm ²)	Imagen	Detalle	Limpieza
Blanco de plomo (PbCO ₃) ₂ ·Pb(OH) ₂ / Litargirio (PbO) Plomo amarillo o massicot / Tierras rojas	1	2,5W	100KHz	0,5			Baja-Media
Blanco de plomo (PbCO ₃) ₂ ·Pb(OH) ₂ / Litargirio (PbO) Plomo amarillo o massicot / Tierras rojas	3	5W	100KHz	0,99			Medio- alta (Hay zonas que el resultado es diferente)
Blanco de plomo (PbCO ₃) ₂ ·Pb(OH) ₂ / Litargirio (PbO) Plomo amarillo o massicot / Tierras rojas	2	3,5W	100KHz	0,7			Media (es la más respetuosa con el pigmento)

Tabla. 2. Pruebas en la zona FN.1.

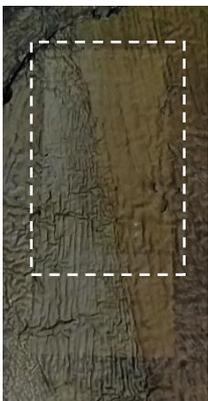
P2. NT.1 OCRE / NARANJA (NUBE/ ROPAJE)							
Pigmento	Nivel	Energía	Frecuencia de pulso	Fluencia (J/cm ²)	Imagen	Detalle	Limpieza
Blanco de plomo (PbCO ₃) ₂ ·Pb(OH) ₂ / Litargirio (PbO) Plomo amarillo o massicot / Tierras rojas	3	5W	100KHz	0,99			Media- alta
Blanco de plomo (PbCO ₃) ₂ ·Pb(OH) ₂ / Litargirio (PbO) Plomo amarillo o massicot / Tierras rojas	2	3,5W	100KHz	0,7			Medio (Muy similar que en nivel 3)

Tabla. 3. Pruebas en la zona NT.1.

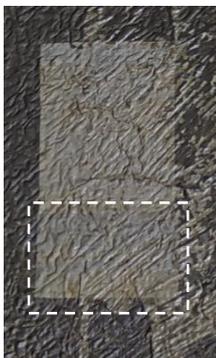
P3. N OCRE (zona mancha) (NUBE)							
Pigmento	Nivel	Energía	Frecuencia	Fluencia (J/cm ²)	Imagen	Detalle	Limpieza
Blanco de plomo (PbCO ₃) ₂ ·Pb(OH) ₂ / Litargirio (PbO) Plomo amarillo o massicot	3	5W	100KHz	0,99			Media- alta
Blanco de plomo (PbCO ₃) ₂ ·Pb(OH) ₂ / Litargirio (PbO) Plomo amarillo o massicot / Tierras rojas	2	3,5W	100Kz	0,7			Medio (Muy similar que en nivel 3, con una tonalidad más grisácea)

Tabla. 4. Pruebas en la zona N.

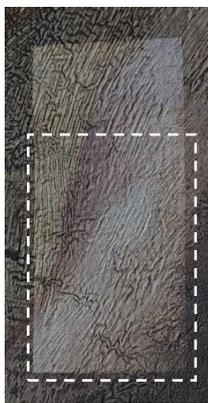
P4. NP OCRE/ CARNACIÓN (NUBE/ PIE)							
Pigmento	Nivel	Energía	Frecuencia	Fluencia (J/cm ²)	Imagen	Detalle	Limpieza
Blanco de plomo (PbCO ₃) ₂ ·Pb(OH) ₂ / Litargirio (PbO) Plomo amarillo o massicot	3	5W	100KHz	0,99			Media- alta
Blanco de plomo (PbCO ₃) ₂ ·Pb(OH) ₂ / Litargirio (PbO) Plomo amarillo o massicot / Tierras rojas	2	3,5W	100KHz	0,7			Medio

Tabla. 5. Pruebas en la zona NP.

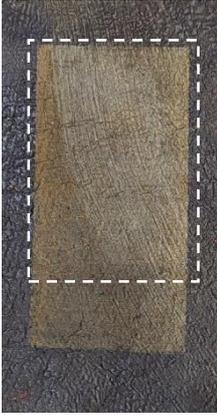
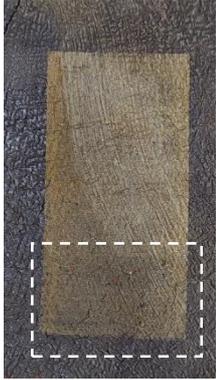
P5. FN. 2 NEGRO ROJIZO/ OCRE (FONDO/ NUBE)							
Pigmento	Nivel	Energía	Frecuencia	Fluencia (J/cm ²)	Imagen	Detalle	Limpieza
Blanco de plomo (PbCO ₃) ₂ ·Pb(OH) ₂ / Litargirio (PbO) Plomo amarillo o massicot	3	5W	100KHz	0,99			Media- alta
Blanco de plomo (PbCO ₃) ₂ ·Pb(OH) ₂ / Litargirio (PbO) Plomo amarillo o massicot / Tierras rojas	2	3,5W	100KHz	0,7			Medio

Tabla. 6. Pruebas en la zona FN.2.

P6. NT. 2 OCRE/ GRANATE (NUBE/ ROPAJE)							
Pigmento	Nivel	Energía	Frecuencia	Fluencia (J/cm ²)	Imagen	Detalle	Limpieza
Blanco de plomo (PbCO ₃) ₂ ·Pb(OH) ₂ / Litargirio (PbO) Plomo amarillo o massicot/ Tierras rojas/ Pigmento orgánico rojo probablemente laca de granza	2	3,5W	100KHz	0,7			Media (solo se ha probado este parametro, dado que ha sido el más respetuoso y que la laca de granza podría resultar más sensible a este proceso)

Tabla. 7. Pruebas en la zona NT.2.

MARA SÁENZ PAJARES

P6. CO OCRE/ NEGRO ROJIZO (FONDO)							
Pigmento	Nivel	Energía	Frecuencia	Fluencia (J/cm ²)	Imagen	Detalle	Limpieza
Blanco de plomo (PbCO ₃) ₂ ·Pb(OH) ₂ / Litargirio (PbO) Plomo amarillo o massicot/ Tierras rojas/ Pigmento orgánico rojo probablemente laca de granza	2	3,5W	100KHz	0,7			Media (solo se ha probado este parametro, dado que ha sido el más respetuoso. Comprobando que ha eliminado el repinte.)

Tabla. 8. Pruebas en la zona CO.

6. 2 RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS MONITORIZADOS DURANTE LAS PRUEBAS

Conductividad

Se procedió primero a comprobar con que conductividad se partía de base, para ello se realizaron varias mediciones a discos de agarosa, la media de conductividad 58 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (tabla. 9). Esta medida se resta de la cifra final obtenida en las distintas superficies.

Pastilla de agarosa+ tres gotas de agua destilada	Conductividad
	59 $\mu\text{S}/\text{cm}$
	61 $\mu\text{S}/\text{cm}$
	55 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Tabla. 9. Resultados de la conductividad de base.

Tras tener la conductividad de los discos, se midieron varias zonas de la pintura en las que no se había realizado ningún tipo de proceso (fig. 36). El rango de conductividad de las diferentes zonas es de 22 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 152 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (tabla. 10).

Medición en zonas sucias	Conductividad
	42 $\mu\text{S}/\text{cm}$
	22 $\mu\text{S}/\text{cm}$
	139 $\mu\text{S}/\text{cm}$
	61 $\mu\text{S}/\text{cm}$
152 $\mu\text{S}/\text{cm}$	

Tabla. 10. Resultados de la conductividad de zonas sucias.



Fig. 36. Ubicación de la medición en zonas sucias.

Después se midieron varias zonas de la pintura en las que se habían realizado las pruebas de limpieza con el láser (fig. 37). El rango de conductividad de las diferentes zonas es de 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 105 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (tabla. 11).

	Conductividad
Medición en zonas limpias por el láser	84 $\mu\text{S}/\text{cm}$
	50 $\mu\text{S}/\text{cm}$
	105 $\mu\text{S}/\text{cm}$
	58 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Tabla. 11. Resultados de la conductividad de zonas limpias con láser.



Fig. 37. Ubicación de la medición en zonas limpias por el láser.

Por último, se midieron varias zonas de la pintura en las que se habían realizado las pruebas de limpieza con el test acuoso (fig. 38). El rango de conductividad de las diferentes zonas es de 62 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 322 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (tabla. 12).

	Conductividad
Medición en zonas limpias por sistemas acuosos	62 $\mu\text{S}/\text{cm}$
	104 $\mu\text{S}/\text{cm}$
	322 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Tabla. 12. Resultados de la conductividad de zonas limpias con sistema acuoso.



Fig. 38. Ubicación de la medición en zonas limpias por sistemas acuosos.

pH

Se procedió primero a comprobar con qué pH se partía de las mediciones control de las placas y el agua, y para ello se realizaron mediciones a las placas de agarosa y al agua destilada, la media del pH es 6.3 (tabla. 13).

	pH
Placa de agarosa	6.01
Agua destilada	6.36
Placa de agarosa	6.26

Tabla. 13. Resultados del pH de base.

Se midieron el pH de las zonas de la prueba FN.1 de la pintura y sus zonas próximas sin limpiar (fig. 39). En las zonas sucias la media de pH es de 3.7 y en las zonas que se realizaron las pruebas con el láser la media del pH es de 4, siendo más alta la limpieza con el nivel 3 de energía (tabla. 14).

	pH
Placa de agarosa en contacto	4.17
Zona sucia	3.92
Zona limpia con N3	4.55
Zona sucia	3.49
Zona limpia con N1	3.51
Zona sucia	3.76

Tabla. 14. Resultados del pH de una de las

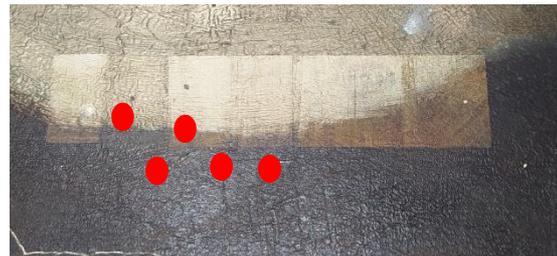


Fig. 39. Ubicación de la medición del pH.

Después se midieron el pH en otras zonas de la pintura en las que no se había realizado ningún tipo de proceso y en las que se habían realizado las pruebas de limpieza (fig. 40). El pH en las dos zonas de medición tanto en la zona sucia como en la prueba de limpieza con el láser y en la placa de agarosa ha salido un pH 4.7 (tabla. 15).

	pH
Placa de agarosa en contacto	4.65
Zona sucia	4.68
Zona limpia N3	4.67

Tabla. 15. Resultados del pH de una de las

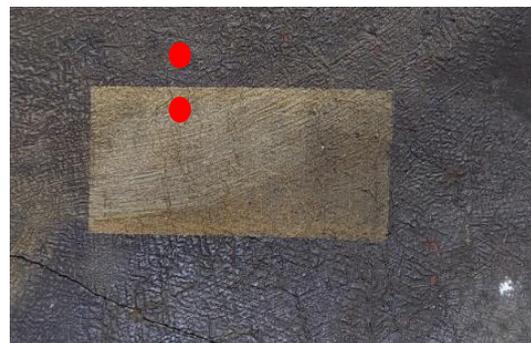


Fig. 40. Ubicación de la medición del pH.

Por último, se midieron zonas de la pintura en las que no se había realizado ningún tipo de proceso y en las que se habían realizado las pruebas de limpieza con el test acuoso (fig. 41). El pH en las zonas de medición tanto en la zona sucia como en la prueba de limpieza con los test acuosos y en la placa de agarosa ha salido un pH 5 (tabla. 16).

	PH
Placa de agarosa en contacto	4.84
Zona sucia	5.04
Zona limpia con solución acuosa PH 8.5	4.88
Zona sucia	4.87
Zona limpia con solución acuosa+quelante PH 8.5	4.80

Tabla. 16. Resultados del pH de una de las zonas.

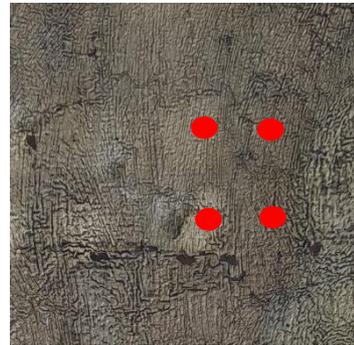


Fig. 41. Ubicación de la medición del pH.

COLORIMETRÍA

La primera medición se efectuó en la prueba FN.1 en la que se hizo la limpieza láser, como esta prueba se compone de dos tonalidades, se referenciaron por separado los cambios del tono ocre y del tono negro rojizo. En el tono ocre (fig. 42) se aprecia que ha ganado 8 de luminancia y un mayor grado de saturación en la tonalidad amarilla.

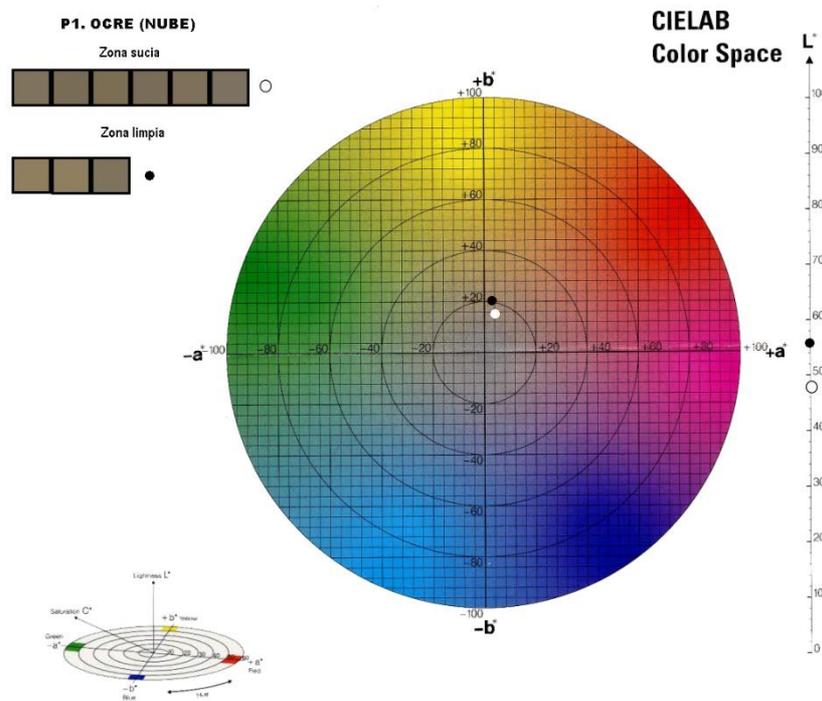


Fig. 42. Gráfico tono ocre.

El tono negro rojizo (fig. 43), el cual pertenece al fondo, se aprecia que ha ganado 5 de luminancia y un mayor grado de saturación en la tonalidad roja.

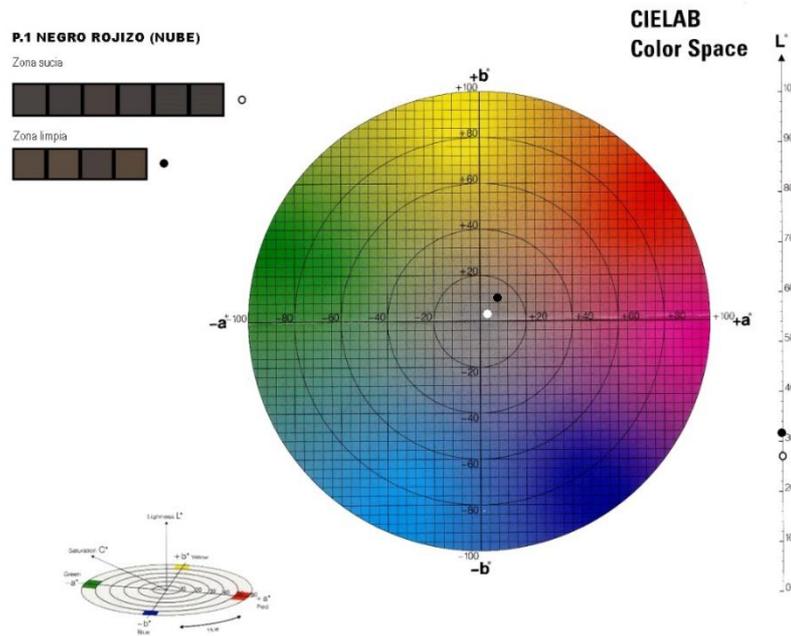


Fig. 43. Gráfico tono negro rojizo.

La siguiente medición se efectuó en la prueba N en la que se hizo la limpieza láser, como esta prueba solo se compone de una tonalidad. En el tono ocre (fig. 44) se aprecia que ha ganado 19 de luminancia y un mayor grado de saturación, pero en la misma tonalidad.

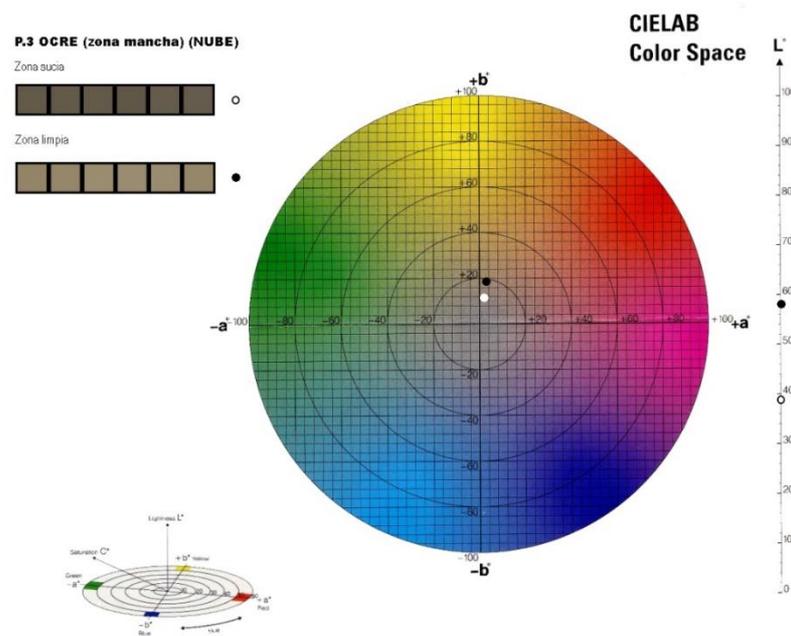


Fig. 44. Gráfico tono ocre.

La tercera medición se efectuó en la prueba NT. 1 en la que se hizo la limpieza láser, como esta prueba se compone de dos tonalidades se referenciaron por separado los cambios del tono ocre y del tono naranja. En el tono ocre (fig. 45) se aprecia que ha ganado 15 de luminancia y un mayor grado de saturación, pero en la misma tonalidad. El tono naranja (fig. 46), el cual pertenece al ropaje de ángel músico, se aprecia que ha ganado 11 de luminancia y un mayor grado de saturación en la tonalidad roja.

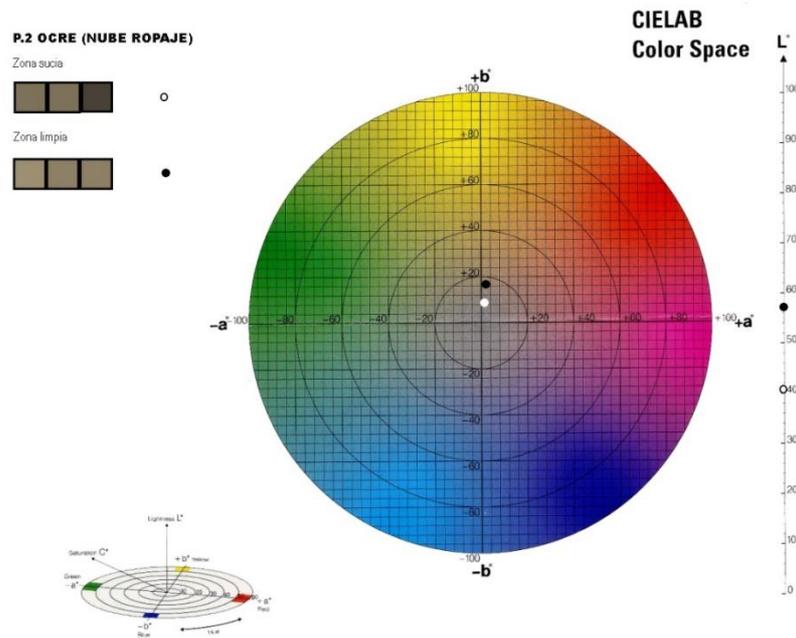


Fig. 45. Gráfico tono ocre.

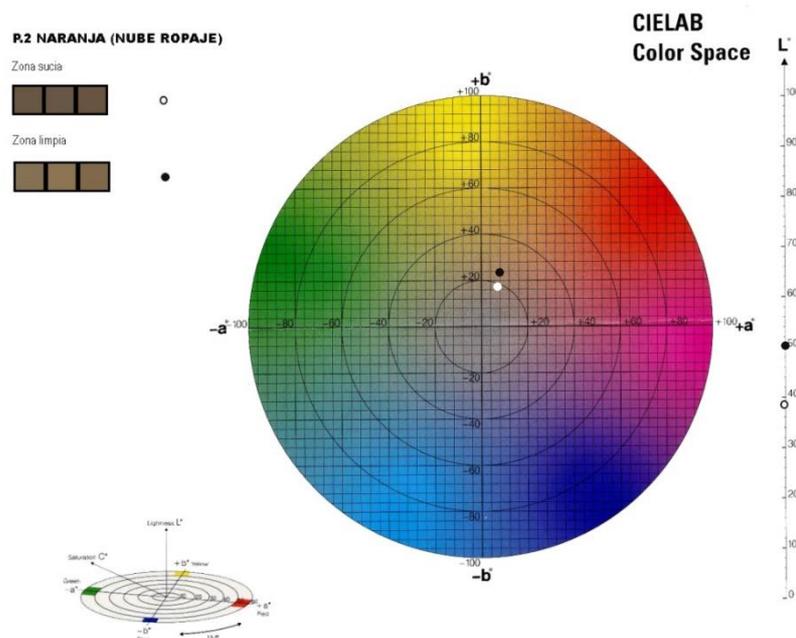


Fig. 46. Gráfico tono naranja.

La cuarta medición se efectuó en la prueba NP en la que se hizo la limpieza láser, como esta prueba se compone de dos tonalidades se referenciaron por separado los cambios del tono carnación clara y del tono carnación oscura. En el tono carnación clara (fig. 47) se aprecia que ha ganado 9 de luminancia y un mayor grado de saturación, hacia el rojo. El tono carnación oscura (fig. 48), se aprecia que ha ganado 30 de luminancia, más que la zona clara y un mayor grado de saturación en la tonalidad roja.

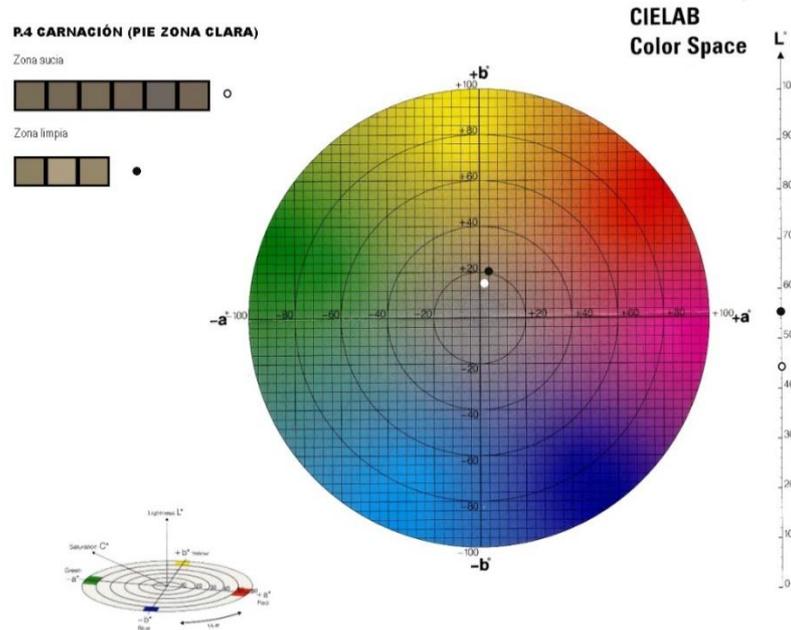


Fig. 47. Gráfico tono carnación clara.

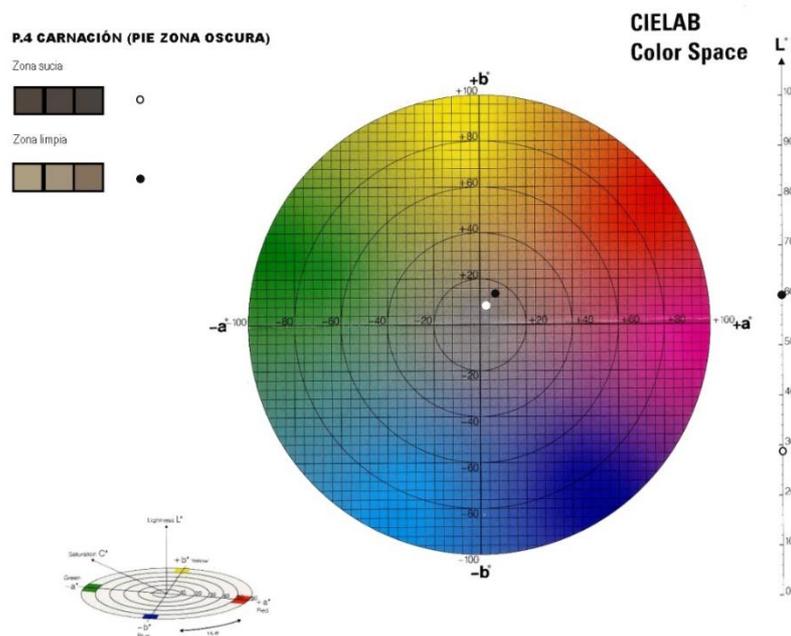


Fig. 48. Gráfico tono carnación oscura.

La quinta medición se efectuó en la prueba NT. 2 en la que se hizo la limpieza láser, como esta prueba se compone de dos tonalidades se referenciaron por separado los cambios del tono granate y del tono ocre. En el tono granate (fig. 49) se aprecia que ha ganado 3 de luminancia, es el tono que menos ha ganado, y un mayor grado de saturación, hacia el rojo. El tono ocre (fig. 50), se aprecia que ha ganado 3 de luminancia y un mayor grado de saturación en la tonalidad roja.

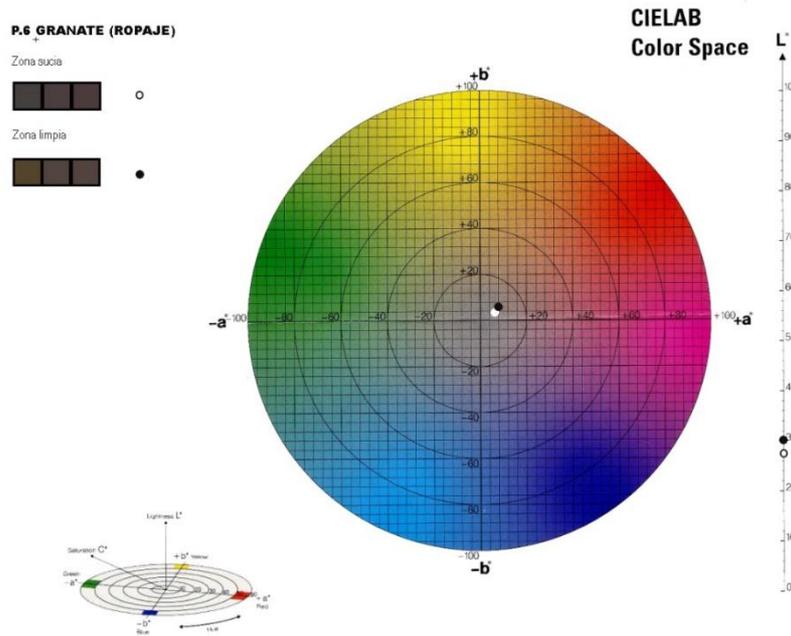


Fig. 49. Gráfico tono granate.

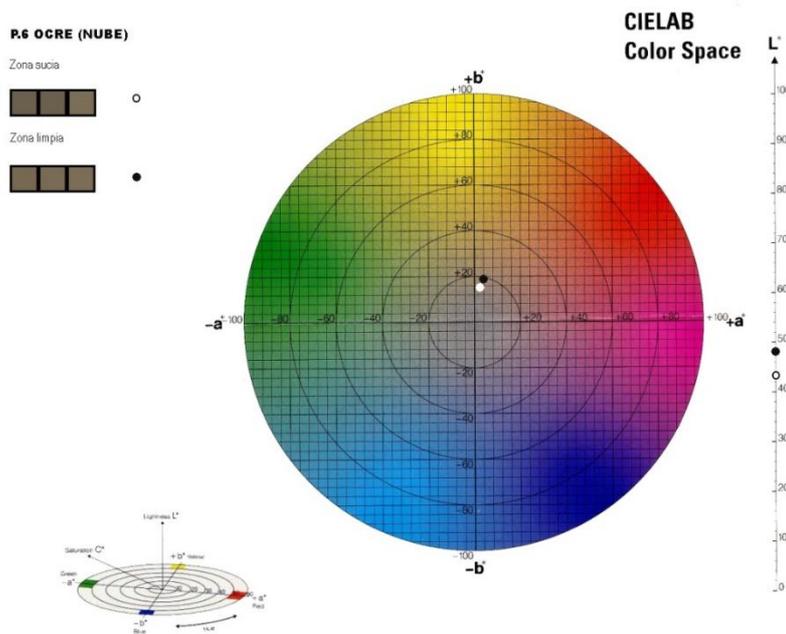


Fig. 50. Gráfico tono ocre.

Por último, la medición se efectuó en las pruebas SA (fig. 51) en la que se hicieron la limpieza con soluciones acuosas, estas pruebas se comparan en el mismo grafico las mediciones de las soluciones con pH controlado y de las soluciones con pH controlado con quelantes, que se realizaron en una tonalidad ocre. Las pruebas con la solución madre, han ganado muy poca luminancia y poca saturación. Y las pruebas con solución madre con quelantes sí que han ganado luminancia, pero menos que las pruebas con limpieza laser y también poca saturación.

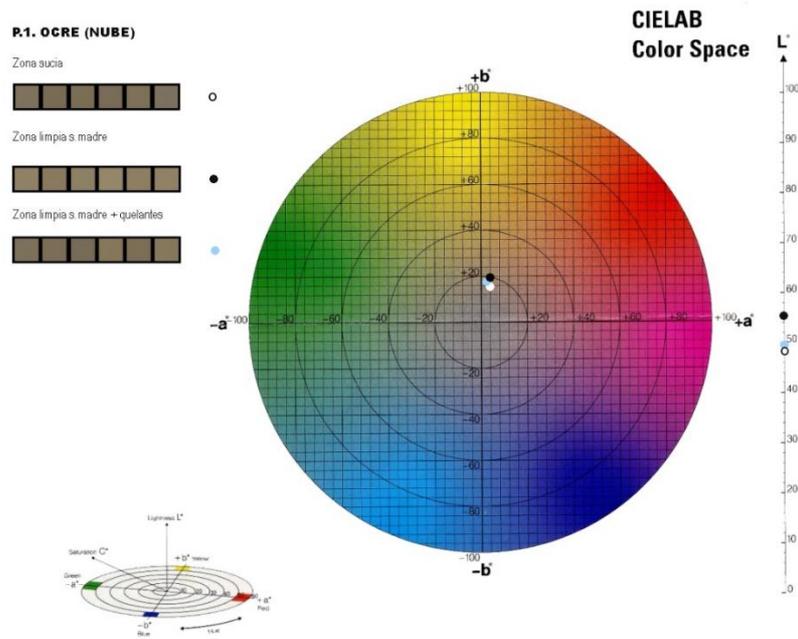


Fig. 51. Gráfico de las pruebas de solución acuosa.

MICROSCOPIA USB

Se tomó varias fotomicrografías de diversas tonalidades para poder comprobar las variaciones que han podido experimentar en cuanto a su textura y detectar posibles cambios superficiales y restos de materiales, todas ellas fueron tomadas en la limpieza efectuada con el nivel 2 de energía del láser y en la limpieza con sustancias acuosas, se efectuó en la limpieza con la solución con pH 8,5 y el quelante.

En las imágenes tomadas de las zonas sucias colindantes a las pruebas de limpieza se aprecia la suciedad localizada en mayor medida en las zonas de las depresiones de la rugosidad de la superficie. Destacar que en la imagen tomada de la tonalidad naranja se observan craqueladuras (fig. 52), marcadas por la suciedad depositada en los márgenes de cada isla. También se pueden observar en la tonalidad granate (fig. 53), aunque aquí son micro craqueladuras, casi inapreciables.



Fig. 52. Zona sucia de la tonalidad naranja.

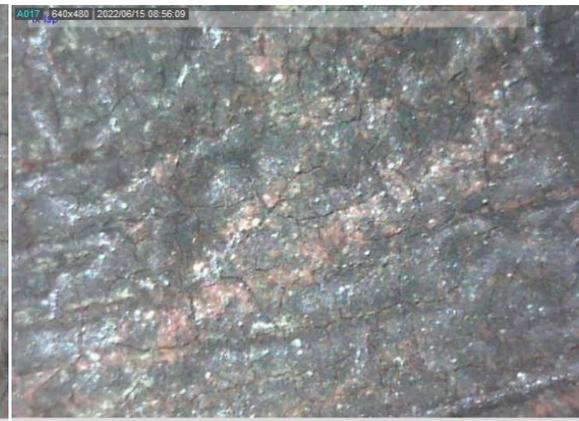


Fig. 53. Zona sucia de la tonalidad granate.

Tras la limpieza con láser se observa que en todas las tonalidades se ha eliminado correctamente la suciedad que estaba sobre la película pictórica, sin modificar la textura original, sin aplanarla ni erosionarla. En algunos casos ha llegado a quitar casi la totalidad de la suciedad, incluida la localizada en las zonas cóncavas de la rugosidad. La foto donde se aprecia mejores resultados es en la tonalidad ocre de la prueba FN.1 (fig. 54). Y la prueba en la que más suciedad se ha mantenido es la realizada en la tonalidad granate de la prueba NT.2 (fig. 55), aunque no se distinguen las micro craqueladuras que se veían en la zona sucia.

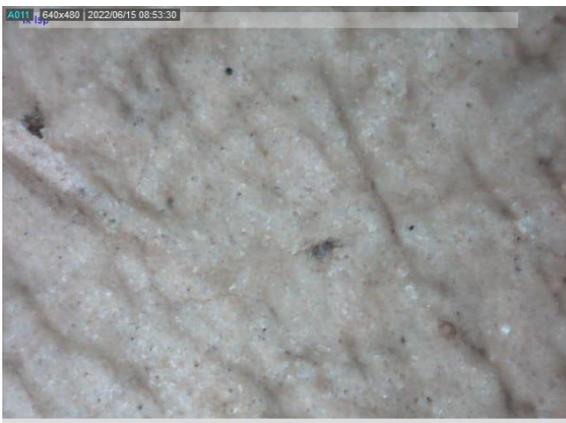


Fig. 54. Zona de la tonalidad ocre de la prueba FN.1.

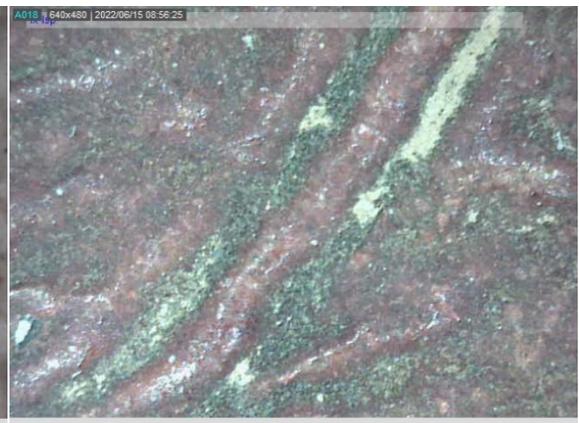


Fig. 55. Zona de la tonalidad granate de la prueba NT.2.

Las craqueladuras se siguen observando en menor medida después de la limpieza en la tonalidad naranja de la prueba NT. 1 (fig. 56). También se aprecian en la limpieza del tono carnación de la prueba NP (fig. 57), las cuales no se observan en la zona sucia. En las imágenes de la zona sucia y limpia se visualiza una textura bastante diferente, esto puede ser por que son zonas diversas y tengan una textura diferente, aunque sean colindantes.



Fig. 56. Zona de la tonalidad naranja de la prueba NT.1.



Fig. 57. Zona del tono carnación de la prueba NP.

Por último, mencionar que en la imagen de la limpieza de la tonalidad negra de la prueba FN.1 (fig. 58) se aprecian zonas donde tiene faltante del estrato de película pictórica pudiendo apreciar la preparación, la cual tiene una tonalidad rojiza. Estos faltantes son anteriores a la limpieza, esto se deduce por la suciedad que se visualiza sobre esta preparación.



Fig. 58. Zona de la tonalidad negra de la prueba FN.1.

En las fotos tomadas a la limpieza con sistemas acuosos SA (fig. 59) se observa un menor grado de eliminación de la suciedad que en las fotografiadas con la limpieza el láser. Se aprecia que parte de la suciedad que se ha quedado en superficie, está situada en las zonas cóncavas de la rugosidad, dando una sensación de mayor contraste entre las zonas limpias y sucias.



Fig. 59. Zona de la tonalidad ocre de la prueba SA.

6. 3 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Para la valoración de la efectividad de las limpiezas empleadas en esta investigación y así establecer una comparativa entre la limpieza láser y la limpieza con sistemas acuosos, se ha planteado básicamente la evaluación de cuatro parámetros. Teniendo en cuenta las exigencias y limitaciones de este tipo de trabajos de investigación, se han centrado las primeras evaluaciones en parámetros que se consideran más relevantes: la conductividad, el PH, el control visual de cambios superficiales mediante registro de fotomicrografías obtenidas con el microscopio USB Dini-Lite y la colorimetría.

Ya realizadas las limpiezas con sus respectivas mediciones de parámetros monitorizados, se han obtenido datos relevantes que han ayudado a evaluar y determinar cuál de las limpiezas ha sido la más efectiva y respetuosa.

Según las pruebas de conductividad y asumiendo el nivel de fiabilidad del procedimiento se puede decir que la superficie sucia tiene unos niveles de conductividad bastante heterogéneos, pero no muy elevados.

Tras la limpieza láser el rango de las medidas se reduce y la conductividad máxima también. La diferencia según los datos recopilados, la conductividad tuvo un rango de 22 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 152 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y después del láser de 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 105 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Estos resultados se deben a que con la limpieza láser se ha eliminado materiales iónicos que aumentaban la conductividad superficial de la obra. A nivel endógeno esta conductividad se produce en la pintura, porque en el óleo hay ácidos grasos que suben poco a poco a la superficie con el tiempo. También puede haber iones de calcio de la preparación que no migran a través del óleo que es hidrófobo, pero suben si hay grietas y puede juntarse con las sales de cobre, plomo y con los ácidos grasos en superficie.

La limpieza acuosa parece provocar un aumento de la conductividad superficial hasta llegar en una de las mediciones a 322 $\mu\text{S}/\text{cm}$ lo que podría asociarse a la migración por difusión de alguno de los compuestos salinos que afectan a la pintura.

Respecto al pH la superficie del óleo es intrínsecamente de naturaleza ácida, característica que no se ve alterada significativamente por los procesos de limpieza experimentados.

En cuanto a la colorimetría muestra que todas las tonalidades han sufrido variaciones, todos ellos notablemente positivos con el resultado obtenido. La fiabilidad de este parámetro es relativa, debido a si la lente está midiendo zona de la rugosidad que mantiene suciedad o no, por ello se han realizado una media de varias mediciones para que tenga mayor garantía de valoración.

Las tonalidades limpiadas con el nivel 2 de energía del láser. El valor que más se ha variado en los parámetros Lab, el parámetro que más se ha modificado es la luminosidad (L). La tonalidad de carnación oscura de la prueba NP es la que más ha aumentado de luminancia, concretamente 30 puntos y las tonalidades granate y ocre de la prueba NT.2 son las que menos han aumentado de luminancia, concretamente 3 puntos. En cuestión de los valores ab se observa que todas las tonalidades han obtenido mayor saturación y todos han cambiado hacia el rojo o el amarillo.

En La tonalidad ocre de la prueba SA limpiada con soluciones acuosas, se percibe que el parámetro que ha variado ha sido el de luminancia ya que los parámetros ab se han mantenido casi en la misma zona. En la gráfica (fig. 51) muestra que las medias de solo la solución alcalina han ganado más luminosidad que con quelantes, aunque visualmente se aprecia que esto no es así, esto puede ser que las mediciones del colorímetro de las soluciones con quelante sean en zonas donde no se haya eliminado la suciedad.

Por último, se realizaron las fotomicrografías USB, en las que se confirma que hay una eliminación de suciedad en todas las pruebas de limpieza independientemente del sistema utilizado y han sido muy respetuosas con la textura sin producir ningún cambio. Se puede determinar que la superficie tiene una textura característica de pinceladas marcadas, aunque dependiendo de la zona y la tonalidad esta varía. Se ha podido observar craqueladuras que a simple vista no se observan en la tonalidad naranja de la prueba NT.1 y en el tono carnación de la prueba NP, la causa podría deberse de gradientes térmicos o por el incendio, pérdidas de elasticidad del polímero en relación de la absorción pigmento y aglutinante. La fotografía de la tonalidad negra de la prueba FN.1. (fig. 58) ha permitido visualizar la preparación de una tonalidad rojiza debido a un faltante de estrato de película pictórica.

Con la limpieza láser se ha conseguido llegar a las zonas más profundas formadas por la textura de la superficie y con la limpieza con soluciones acuosas se ve claramente que la eliminación ha sido de manera superficial sin llegar a las zonas cóncavas de la rugosidad.

Teniendo claro todos los resultados obtenidos por todos los parámetros monitorizados se puede llegar a concluir que los dos sistemas de limpieza son óptimos y respetuosos con la pintura mural al óleo del camarín.

Con la limpieza láser se ha conseguido un grado positivo de eliminación del sutil estrato de diferente composición química, existente sobre la pintura original con el nivel 2 de energía. Aunque con el nivel 3 de energía se conseguía mayor grado de limpieza, se prefirió emplear un nivel menos sabiendo que algunos de los pigmentos que componen la obra son sensibles a una incidencia directa de la radiación láser.

Con la limpieza con los sistemas acuosos también se han conseguido unos resultados positivos. Se llevó a cabo la comprobación del hecho de que empleando unas soluciones acuosas con un determinado pH y después añadiéndoles quelantes, es suficiente para conseguir una limpieza óptima.

Todo este proceso se ha llevado a cabo sin olvidar de que los sistemas de limpieza conllevan un riesgo para la obra, puesto que es una acción irreversible. La diversidad de los riesgos debe de ser tomados en cuenta en el momento de decidir qué pruebas se realizan. Los riesgos que hay en una limpieza acuosa son; que la suciedad disuelta penetre más en la porosidad de la obra, que los estratos internos se relacionen con la humedad llevada y que haya una activación de las sales u otros materiales solubles contenidos en su origen. Los riesgos que hay en una limpieza con láser son; que los pigmentos y la película pictórica sufran transformaciones químicas y físicas irreversibles, decoloración y carbonización. El aumento de temperatura puede suponer la microfusión de materiales mientras que los shocks de expansión mecánica podrían generar fisuras y rugosidades en las superficies.

CONCLUSIONES

En este último apartado, se detallan las conclusiones obtenidas durante todo el proceso de realización de este trabajo de investigación, en el que se ha podido evaluar la idoneidad de los dos procesos de limpieza, en una obra con variedad de casuísticas.

Partiendo de la fase documental se ha logrado contextualizar histórica y artísticamente, las características principales que componen la arquitectura de un camarín, concretamente en el Camarín de la Capilla de la Virgen de los Desamparados de los Santos Juanes de Valencia, que es uno de los pocos que se abría hacia al exterior mediante una ventana octogonal.

El estudio se ha centrado en la pintura de la cúpula de este camarín. Gracias a las fuentes bibliográficas recopiladas se ha alcanzado conformar una hipótesis del método de ejecución, partiendo del conocimiento de que es una pintura mural al óleo. Además de no encontrarle ninguna discrepancia a la atribución de la obra a José Camarón Bonanat, por las evidencias cronológicas, formales, comparando variedad de obras y sacando similitudes con la pintura en cuestión, y una vinculación directa con el espacio.

Por otro lado, se identificaron los daños y deterioros y fueron representados y ubicados en un mapa, averiguando principalmente cuáles son derivados del incendio, para tener el conocimiento de cuales transformaciones pueden haber llegado al aglutinante y los pigmentos por estar expuestos a altas temperaturas.

En esta fase, gracias a la documentación científica se ha revisado sobre la historia del láser en el mundo de la conservación y restauración y el funcionamiento del sistema. Para poder comprender que toda la estructura y parámetros del equipo son importantes para que haya una correcta limpieza, es necesario conocer que este tipo de técnica se basa en los umbrales de absorción de energía del sustrato y de la suciedad a eliminar. La situación idónea es que la materia a eliminar absorba toda la energía y no la obra.

Partiendo de la casuística de la obra se han investigado los efectos que pueden provocar cada uno de los láseres dependiendo de sus características. Posteriormente se ha constatado el estado actual de los avances de esta tecnología utilizados en la profesión de restauración y conservación en la fase de limpieza y se han seleccionado casos en los que los resultados hayan sido óptimos con casuísticas similares a la pintura del camarín. Por último, se han recopilado y documentado los efectos tanto visuales como químicos que puede tener la utilización del láser con unos parámetros incorrectos en la obra, concretamente en los pigmentos.

Ya desarrollada la primera fase se pudo continuar con la fase experimental, en la cual se han llevado a cabo diferentes procedimientos in-situ. Se partió de la investigación anterior y de los resultados de las pruebas de limpieza mediante medios acuosos realizadas en el proceso de los estudios previos para la restauración de las pinturas murales, estructuras y estucos de la iglesia de los Santos Juanes de Valencia. Conociendo los resultados positivos que se obtuvieron entonces se decidió confrontar la limpieza láser con estos procedimientos acuosos. Para tener conclusiones objetivas y no solo de manera sensorial y visual se determinó llevar a cabo un seguimiento con diversos parámetros. El seguimiento en cuestión para comprobar el impacto de las limpiezas en la obra fue con mediciones de conductividad, pH, colorimetría y fotografías macro. Se realizaron diversas pruebas con variedad de niveles de potencia con el láser y con

varias soluciones acuosas en diferentes zonas para comprobar la efectividad en múltiples tonalidades de la película pictórica.

En la discusión de los resultados se ha comprobado que, en el sistema de limpieza con láser, el nivel con el que se obtienen buenos resultados para las tonalidades de la película pictórica del ensayo, sin poner en riesgo la obra ha sido con el nivel 2 de energía correspondiente a $0,7 \text{ J/cm}^2$. Se ha tomado esta decisión partiendo y sopesando el hecho de que algunos pigmentos que compone la obra son sensibles a una degradación a una determinada incidencia directa de la radiación láser. El nivel podría ser modificado si alguna zona requiere ese cambio, esta modificación tendría que ser analizada, tanto su eficacia como sus efectos con las investigaciones adecuadas. Además, que, con los seguimientos de los parámetros, se concluye los resultados positivos en cuanto al grado de limpieza, causando que las tonalidades ganen luminosidad y saturación.

En cuanto a la limpieza con sistemas acuosos del mismo modo se han conseguido resultados satisfactorios, concretamente con la solución acuosa de pH 8,5 y con el quelante. El aumento de la conductividad detectada ha dado a entender que la difusión del agua puede haber movilizado nitratos y cloruros presentes entre los contaminantes del mural o que se han aportado compuestos iónicos de las soluciones de limpieza, podría ser causado por una escasez del aclarado de la sustancia acuosa.

Con todo el trabajo desarrollado y teniendo las discusiones de las limpiezas se puede demostrar que las dos metodologías tienen un grado de efectividad positivo y que, gracias a los parámetros motorizados, se ha podido realizar una limpieza óptima y sin riesgo para la obra. Con esta investigación se ha comprendido que los dos sistemas tienen limitaciones. En cuanto al láser, puede producir transformaciones en algunos pigmentos, aparte de poder modificar la textura de la superficie y en cuanto a limpieza acuosa, puede producir una difusión de los materiales solubilizados por su acción, haciendo que los estratos reaccionen con la humedad llevada y que haya una activación de sales.

Teniendo en cuenta las limitaciones que tienen los sistemas, se podría diseñar una actuación de limpieza combinando los dos procedimientos, para así poder abarcar una limpieza que no contenga las limitaciones que poseen por individual. Este diseño tendría que estar acompañado con una investigación más profunda del proceso en cuestión, aunque los realizados en este trabajo han sido suficientes para evaluar la efectividad de la limpieza. Los diferentes comportamientos bajo tratamiento láser de materiales originales también debería que estar reforzado, si es posible, por el control de los experimentos de laboratorio, como tomografía de coherencia óptica (OCT), espectroscopia de reflexión FT-IR y espectroscopia de fluorescencia inducida por láser (LIF).⁷⁰

Con la utilización de los materiales que se poseía para esta investigación se han obtenido conclusiones satisfactorias, pero para la obtención de una mejora del sistema de limpieza se debería ampliar la investigación con otras metodologías de aplicación como las experimentadas con la combinación de emisiones láser de ER:YAG y microemulsiones descritas en el capítulo del libro *Lasers in the Conservation of Artworks*.⁷¹

⁷⁰ MORETTI, Patrizia, et al. Laser cleaning of paintings: in situ optimization of operative parameters through non-invasive assessment by optical coherence tomography (OCT), reflection FT-IR spectroscopy and laser induced fluorescence spectroscopy (LIF). *Heritage Science*, 2019, vol. 7, no 1, p. 1-12.

⁷¹ ANDREOTTI, Alessia, et al. Novel applications of the Er: YAG laser cleaning of old paintings. En *Lasers in the Conservation of Artworks*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007. p. 239-247.

Otra característica destacable de este trabajo final de máster es el compromiso con los objetivos de desarrollo sostenible, en concreto con el medioambiente. Los dos sistemas escogidos desde su eficiencia son eco compatibles y respetuosos con la superficie artística, los cuales tienen un mínimo de residuos de partida, no se utilizan reactivos tóxicos, son materiales renovables, no se usa sistemas con disolvente y son benignos para el medioambiente. Es primordial que hoy en día se busquen procesos de limpieza llamados “green synthesis”, en los que se persigue una menor contaminación contra el medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

AAVV. Decoración mural de las capillas laterales. *Estudios previos para la restauración de las pinturas murales, esculturas y estucos de la iglesia de los Santos Juanes de Valencia*. 2020, inédito. p. 238-349.

ANDREOTTI, Alessia, et al. Diagnosis of materials and effectiveness of Er: YAG laser cleaning as complementary treatment in a panel painting attributed to Lluís Borrassà (fifteenth century). *Applied Physics A*, 2016, vol. 122, no 6, p. 1-12.

ANDREOTTI, Alessia, et al. Novel applications of the Er: YAG laser cleaning of old paintings. En *Lasers in the Conservation of Artworks*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007. p. 239-247.

ARJONILLA-ÁLVAREZ, María. El conocimiento de los materiales y técnicas antiguas a través de la intervención en el patrimonio: La pintura mural de San Cristóbal del convento de Santa Paula de Sevilla. *Cuadernos de restauración*, 2004, no 5, p. 72-82.

BARALDI, Pietro, et al. Alterazioni delle materie coloranti nelle pitture murali prodotte dalle alte temperature: fonti storiche ed indagini scientifiche. *Gli interventi su edifici e oggetti d'arte danneggiati dal fuoco*, 2006, p. 15.

BRODARD, Valentine. Le laser comme moyen de dégagement de produits de corrosion sur un objet archéologique: le cas de la dorure sur alliage cuivreux. En *CeROArt. Conservation, exposition, Restauration d'Objets d'Art*. Association CeROArt asbl, 2012.

CAMPAL, Rosa del Carmen Álvarez. Las pinturas murales del camarín de Bendueños: Una primera aproximación a su estudio. *Vindonnus: revista de patrimonio cultural de Lena*, 2017, no 1, p. 32-43.

CHAPPÉ, M., et al. Laser irradiation of medieval pigments at IR, VIS and UV wavelengths. *Journal of Cultural Heritage*, 2003, vol. 4, p. 264-270.

CREMONESI, Paolo. AGAROSIO E AGAR: AGGIORNAMENTO E NUOVI SVILUPPI. [S. l.] : [s. n.], [S. f.].

CREMONESI, Paolo. *L'ambiente acquoso per il trattamento di opere policrome*. il prato publishing house srl, 2012.

COOPER, M. I.; FOWLES, P. S.; TANG, C. C. Analysis of the laser-induced discoloration of lead white pigment. *Applied surface science*, 2002, vol. 201, no 1-4, p. 75-84.

DOMENECH CARBO, Antonio, et al. Analysis of earth pigments in Palomino's frescoes in the Santos Juanes Church in Valencia (Spain) by solid state voltammetry and FTIR spectroscopy. *Arche*, 2006, no 1, p. 171-176.

DOMÍNGUEZ, Guadalupe Durán, et al. La interdisciplinariedad en la Conservación de los Bienes Culturales: análisis de muestras de pigmentos afectados de cambios degenerativos. En *La conservación infalible: De la teoría a la realidad*. 2007. p. 387-396.

GAETANI, Carolina; SANTAMARIA, Ulderico. The laser cleaning of wall paintings. *Journal of Cultural Heritage*, 2000, vol. 1, p. S199-S207.

GALÁN CERRILLO, Juan José. Síntesis de carboxilatos metálicos. 2009.

GAVIÑO, María. Alteración cromática de monumentos tras la limpieza con láser: origen, naturaleza y eliminación del amarilleamiento de las piedras. 2004.

GONZÁLEZ, Cristina Gómez; DEL BARRIO, Mercedes Barrera. La utilización del láser NdYAG en la limpieza de capas de policromía. En *Conservación del Patrimonio, evolución y nuevas perspectivas: actas del I Congreso del GEIIC Valencia, España 25, 26 y 27 de Noviembre de 2002*. EL Grupo Español del IIC (International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works), 2002. p. 411-415.

GRAUE, B.; BRINKMANN, S.; VERBEEK, C. PROCON TT 49: Laser cleaning of ancient Egyptian wall paintings and painted stone surfaces. En *Lasers in the Conservation of Artworks VIII*. CRC Press, 2010. p. 65-70.

NORTE, Juan Avellano. *La pintura mural y su didáctica*. 2015. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.

KOTULANOVÁ, Eva, et al. Degradation of lead-based pigments by salt solutions. *Journal of Cultural Heritage*, 2009, vol. 10, no 3, p. 367-378.

MAYER, Ralph. *Materiales y técnicas del arte*. Ediciones Akal, 2005.

MIGUEL, Catarina, et al. Meant to be discovered: the study by microscopic analysis of lead-based pigments alteration by a fire. *Microscopy and Microanalysis*, 2015, vol. 21, no S5, p. 29-30.

MORETTI, Patrizia, et al. Laser cleaning of paintings: in situ optimization of operative parameters through non-invasive assessment by optical coherence tomography (OCT), reflection FT-IR spectroscopy and laser induced fluorescence spectroscopy (LIF). *Heritage Science*, 2019, vol. 7, no 1, p. 1-12.

ORTIZ, Alicia Sánchez. *Restauración de obras de arte: pintura de caballete*. Ediciones AKAL, 2012.

PÉREZ, María Monreal. *La técnica láser como método de restauración en pinturas romanas al fresco de la península ibérica*. 2017. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid.

PLESTERS, Joyce; ROY, Ashok; BOMFORD, David. Interpretation of the magnified image of paint surfaces and samples in terms of condition and appearance of the picture. *Studies in Conservation*, 1982, vol. 27, no sup1, p. 169-176.

POULI, Paraskevi; EMMONY, D. C. The effect of Nd: YAG laser radiation on medieval pigments. *Journal of Cultural Heritage*, 2000, vol. 1, p. S181-S188.

ROBLES ANDREU, ADRIÁN et al. Evaluación de métodos de consolidación de estratos pictóricos afectados por procesos exotérmicos extremos: estudio comparativo y testado de materiales. *PH investigación*. Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, 2014, n° 2, p. 97-111.

ROIG PICAZO, Pilar, et al. Contextualización iconográfica e intervención en las pinturas murales de la Capilla de la Comunión de la Iglesia Parroquial de san Nicolás de Bari y de san Pedro Mártir en la ciudad de Valencia. 2018.

SANCHIS GUARNER, Manuel. Don Joseph Camarón y Boronat. Un buen pintor del XVIII. Notas para su biografía. 1930.

SANSONETTI, Antonio; REALINI, Marco. Nd: YAG laser effects on inorganic pigments. *Journal of Cultural Heritage*, 2000, vol. 1, p. S189-S198.

SCHREINER, M.; STRLIC, M.; SALIMBENI, R. Handbook on the Use of Lasers in Conservation and Conservation Science (COST Office, Brussels, 2008).

SIANO, Salvatore. Principles of laser cleaning in conservation. *Handbook on the Use of Lasers in Conservation and Conservation Science, COST G*, 2007, vol. 7, p. 1-26.

SOBOTT, Robert J. Gordon, et al. Laser interaction with polychromy: laboratory investigations and on-site observations. *Journal of Cultural Heritage*, 2003, vol. 4, p. 276-286.

TEULE, J. M., et al. Controlled laser cleaning of fire-damaged paintings. En *ICOM Committee for Conservation, ICOM-CC: 13th Triennial Meeting, Rio de Janeiro, 22-27 September 2002: preprints*. 2002. p. 252-256.

TEPPO, Ed. Introduction: Er: YAG lasers in the conservation of artworks. *Journal of the Institute of Conservation*, 2020, vol. 43, no 1, p. 2-11.

TORÁN, David Montolío. José Camarón Bonanat (Segorbe, 1731-1803) y algunas nuevas obras en el camino de Aragón. Del valle del Palancia a Teruel. *Maestro de Rubielos*, p. 85.

VARIŞ, Serhat. *Synthesis and electrochromic properties of conducting polymers of 1-(4-nitrophenyl)-2, 5-di (2-thienyl)-1H-pyrrole and their use in electrochromic devices*. 2006. Tesis de Maestría. Middle East Technical University.

VASARI, Giorgio. *Vasari on technique*. Courier Corporation, 2012.

YANG, Xinhui. An Evaluation of Laser Ablation Cleaning on Surficial Black Crust on Pennsylvania Marble: A Case Study of the Hood Cemetery Gate, Germantown, Philadelphia, PA. 2016.

RECURSOS EN LINEA

Catedral Basílica de Santa María de la Asunción - Comunitat Valenciana [en línea]. [S. f.] [consulté le 30.a de mayo de 2022]. Disponible à : <URL : <https://www.comunitatvalenciana.com/es/castello-castellon/segorbe/monumentos/catedral-basilica-de-santa-maria-de-la-asuncion>>.

Dios Padre en Gloria de ángeles - Colección - Museo Nacional del Prado [en línea]. [S. f.] [consulta 1-5-22]. Disponible en: <URL : <https://www.museodelprado.es/coleccion/obra-de-arte/dios-padre-en-gloria-de-angeles/9d54790a-ac18-4023-82a3-cf522bdc00f0>>.

GARZÓN ALONSO, R. Camarines antequeranos. Madrid, 2000. [Consulta: 19-05-22] Disponible en <https://sites.google.com/23site/camerinosenantequera/5-el-camarin-como-elemento-arquitectonicoreligioso-con-entidad-propia>.

Holy Cathedral Basilica Church Of The Virgin Mary Of The Assumption - Comunitat Valenciana [en línea]. [S. f.] [consulta 30 de mayo de 2022]. Disponible en: <URL : <https://www.comunitatvalenciana.com/en/castello-castellon/segorbe/monuments/holy-cathedral-basilica-church-of-the-virgin-mary-of-the-assumption>>.

Imachen: Inmaculada coronada por la Santísima Trinidad.jpg - Wiquipedia, a enciclopedia libre [en línea]. [S. f.] [consulta 30 mayo de 2022]. Disponible a : <URL: https://an.m.wikipedia.org/wiki/Imachen:Inmaculada_coronada_por_la_Santísima_Trinidad.jpg>.

José Camarón y Bonanat-Inmaculada - *Artfecit pintura y dibujo* [en línea]. [S. f.] [consulta 22 de marzo de 2022]. Disponible en: <URL : <https://artfecit.com/producto/jose-camaron-y-bonanat-inmaculada/>>.

José Camarón Bonanat - Galería Martínez & Avezuela [en línea]. [S. f.] [consulta 30 de mayo de 2022]. Disponible en: <URL : <https://martinezavezuela.com/Jose-Camaron-Bonanat>>.

La Inmaculada Concepción... - Peleguer - Camarón (palauantiguitats.com)

MUSEO DEL PRADO. Disponible en: <https://www.museodelprado.es/aprende/enciclopedia/voz/camaron-bonanat-jose/> 25 5b539bdc-b733-4100-9665-d0813f51f34a. [Consulta 29-4-22]

AGRADECIMIENTOS

A Jose Luis Regidor Ros por acompañarme en todo el proceso de este trabajo, animarme a seguir y ayudarme a dar forma a mis ideas. Y sobre todo por su valioso tiempo.

Al departamento de conservación y restauración de bienes culturales que se han interesado en este trabajo, me han dado ánimos para seguir y me han proporcionado material para la elaboración de este trabajo final de Master.

Al gran equipo del proyecto de restauración de Santos Juanes que me han acompañado y aconsejado durante los largos meses del proceso de investigación.

A mi familia y amigos por aguantarme en este largo proceso y estar ahí incondicionalmente.

A Andrea, Isabel y Javier que no me han dejado sola en todo este tiempo, consiguiendo que no tirara la toalla.

Y por último a mis padres, que han puesto todo su interés y su tiempo para que yo lograra este proyecto.

Gracias.

ÍNDICE DE IMÁGENES

Todas las imágenes empleadas en el presente trabajo de investigación, salvo las que se procede a referenciar a continuación, han sido realizadas y son propiedad de la autora de este estudio.

Fig. 1. Localización del Camarín.

Fig. 2. Pintura mural al óleo del Camarín.

Fig. 3. Representación de los ángeles músicos.

Fig. 4. Representación del ángel músico.

Fig. 5. Representación de Dios Padre en la pintura.

Fig. 6. Dibujo de Dios Padre de Maria Giuseppe Rolli. Extraída de: Dios Padre en Gloria de ángeles - Colección - Museo Nacional del Prado [en línea]. [S. f.] [consulta 1-5-22]. Disponible en: <URL : <https://www.museodelprado.es/coleccion/obra-de-arte/dios-padre-en-gloria-de-angeles/9d54790a-ac18-4023-82a3-cf522bdc00f0>>.

Fig. 7. Cielo abierto con representaciones de querubines y puttis.

Fig. 8. Representación del Espíritu Santo.

Fig. 9. Representación de Dios Padre en un dibujo. Extraída de: La Inmaculada Concepción... - Peleguer - Camarón (palauantiguitats.com)

Fig. 10. Representación de Dios Padre en una pintura al óleo. Extraída de: Imachen: Inmaculada coronada por la Santísima Trinidad.jpg - Wikipedia, a enciclopedia libre [en línea]. [S. f.] [consulta 30 mayo de 2022]. Disponible en: <URL: [https://an.m.wikipedia.org/wiki/Imachen:Inmaculada coronada por la Santísima Trinidad.jpg](https://an.m.wikipedia.org/wiki/Imachen:Inmaculada_coronada_por_la_Santísima_Trinidad.jpg)>.

Fig. 11. Representación de Dios Padre en la pintura mural.

Fig. 12. Representación de Ángeles Músicos en un dibujo. Extraída de: José Camarón Bonanat - Galería Martínez & Avezuela [en línea]. [S. f.] [consulta 30 de mayo de 2022]. Disponible en: <URL : <https://martinezavezuela.com/Jose-Camaron-Bonanat>>.

Fig. 13. Representación de Ángel en una pintura mural. Extraída de: Holy Cathedral Basilica Church Of The Virgin Mary Of The Assumption - Comunitat Valenciana [en línea]. [S. f.] [consulta 30 de mayo de 2022]. Disponible en: <URL : <https://www.comunitatvalenciana.com/en/castello-castellon/segorbe/monuments/holy-cathedral-basilica-church-of-the-virgin-mary-of-the-assumption>>.

Fig. 14. Representación de Ángeles Músicos en una pintura mural.

Fig. 15. Mapa de daños de la pintura mural de la cúpula.

Fig. 16. Contaminación salina.

Fig. 17. Agrietamiento radial.

Fig. 18. Proceso que experimenta el blanco de plomo expuesto a altas. Extraído de:

Fig. 19. Elementos fundamentales de un láser

Fig. 20. Esquema de los efectos de la radiación láser.

Fig. 21. Pruebas realizadas con un láser de excímeros en un óleo sobre masonita. Extraída de: TEULE, J. M., et al. Controlled laser cleaning of fire-damaged paintings. En *ICOM Committee for Conservation, ICOM-CC: 13th Triennial Meeting, Rio de Janeiro, 22-27 September 2002: preprints*. 2002.

Fig. 22. Antes y después de la limpieza realizada con un láser de ER: YAG de Cristo ante Pilato por Lluís Borrassà . Extraída de: ANDREOTTI, Alessia, et al. Diagnosis of materials and effectiveness of Er: YAG laser cleaning as complementary treatment in a panel painting attributed to Lluís Borrassà (fifteenth century). *Applied Physics A*, 2016, vol. 122, no 6, p. 9

Fig.23. Antes y después de la limpieza realizada con un láser de ND: YAG de la tumba de Neferhotep. Extraída de: GRAUE, B.; BRINKMANN, S.; VERBEEK, C. PROCON TT 49: Laser cleaning of ancient Egyptian wall paintings and painted stone surfaces. En *Lasers in the Conservation of Artworks VIII*. CRC Press, 2010., p. 55

Fig. 24. Zona donde se realizaron las pruebas. Extraídas de: AAVV. Decoración mural de las capillas laterales. *Estudios previos para la restauración de las pinturas murales, esculturas y estucos de la iglesia de los Santos Juanes de Valencia*. 2020, inédito. p. 238-349.

Fig. 25. Pruebas con soluciones acuosas. Extraídas de: AAVV. Decoración mural de las capillas laterales. *Estudios previos para la restauración de las pinturas murales, esculturas y estucos de la iglesia de los Santos Juanes de Valencia*. 2020, inédito. p. 238-349.

Fig. 26. Zona donde se realizaron las pruebas.

Fig. 27. CL 20 BACKPACK CLEAN láser.

Fig. 28. Pintura antes de las pruebas.

Fig. 29. Pintura después de las pruebas.

Fig. 30. Horiba LAQUATwin EC-11

Fig. 31. Agarosa E de Condolab®

Fig. 32. Proceso de la medición de conductividad.

Fig. 33. pHmetro portátil PH 25 + de la marca CRISON®,

Fig. 34. Zonas donde se midió el pH.

Fig. 35. Ubicación de las pruebas sigladas.

Fig. 36. Ubicación de la medición en zonas sucias.

Fig. 37. Ubicación de la medición en zonas limpias por el láser.

Fig. 38. Ubicación de la medición en zonas limpias por sistemas acuosos.

Fig. 39. Ubicación de la medición del pH.

Fig. 40. Ubicación de la medición del pH.

Fig. 41. Ubicación de la medición del pH.

Fig. 42. Gráfico tono ocre.

Fig. 43. Gráfico tono negro rojizo.

Fig. 44. Gráfico tono ocre.

Fig. 45. Gráfico tono ocre.

Fig. 46. Gráfico tono naranja.

Fig. 47. Gráfico tono carnación clara.

Fig. 48. Gráfico tono carnación oscura.

Fig. 49. Gráfico tono granate.

Fig. 50. Gráfico tono ocre.

Fig. 51. Gráfico de las pruebas de solución acuosa.

Fig. 52. Zona sucia de la tonalidad naranja.

Fig. 53. Zona sucia de la tonalidad granate.

Fig. 54. Zona de la tonalidad ocre de la prueba FN.1.

Fig. 55. Zona de la tonalidad granate de la prueba NT.2.

Fig. 56. Zona de la tonalidad naranja de la prueba NT.1.

Fig. 57. Zona del tono carnación de la prueba NP.

Fig. 58. Zona de la tonalidad negra de la prueba FN.1.

Fig. 59. Zona de la tonalidad ocre de la prueba SA.

Anexos

DIFERENCIAS COORDENADAS L*a*b* TRAS LIMPIEZA LASER											
PROBETA	DISPARO	REFERENCIA	L*1	L*5	$\Delta(L*5-L*1)$	a*1	a*5	$\Delta(a*5-a*1)$	b*1	b*5	$\Delta(b*5-b*1)$
FN.1	1	Ocre	49,55	55,26	5,71	4,31	5,03	0,72	16,74	23,31	6,57
	2	Ocre	47,42	63,11	15,69	5,78	4,34	-1,44	16,39	22,45	6,06
	3	Ocre	48,63	55,42	6,79	5	5,66	0,66	16,82	22,51	5,69
	4	Ocre	47,57	50,1	2,53	5,7	4,3	-1,4	15,56	16,25	0,69
	5	Ocre	49,59	55,26	5,67	5,3	5,03	-0,27	17,16	23,31	6,15
	6	Ocre	49,6	63,11	13,51	5,55	4,34	-1,21	12,06	22,45	10,39
					8,31666667			-0,49			5,925

DIFERENCIAS COORDENADAS L*a*b* TRAS LIMPIEZA LASER											
PROBETA	DISPARO	REFERENCIA	L*1	L*5	$\Delta(L*5-L*1)$	a*1	a*5	$\Delta(a*5-a*1)$	b*1	b*5	$\Delta(b*5-b*1)$
FN.1	1	Negro	29,04	33,77	4,73	3,12	7,22	4,1	2,47	11,01	8,54
	2	Negro	27,06	34,78	7,72	2,87	6,86	3,99	2,18	13,33	11,15
	3	Negro	28,17	28,51	0,34	3,92	4,84	0,92	3,58	6,16	2,58
	4	Negro	28,16	32,76	4,6	2,9	9,2	6,3	2,45	12,86	10,41
	5	Negro	27,53	33,77	6,24	3,28	7,22	3,94	2,44	11,01	8,57
	6	Negro	27,2	34,78	7,58	3,71	6,86	3,15	3,39	13,33	9,94
					5,20166667			3,73333333			8,53166667

DIFERENCIAS COORDENADAS L*a*b* TRAS LIMPIEZA LASER											
PROBETA	DISPARO	REFERENCIA	L*1	L*5	$\Delta(L*5-L*1)$	a*1	a*5	$\Delta(a*5-a*1)$	b*1	b*5	$\Delta(b*5-b*1)$
N	1	Ocre	39,52	57,35	17,83	4,06	4,99	0,93	12,55	19,88	7,33
	2	ocre	39,41	58,35	17,83	3,93	4,98	1,05	11,75	20,07	8,32
	3	ocre	39,45	60,24	17,83	4,11	4,82	0,71	12,1	19,82	7,72
	4	ocre	38,1	60,35	22,25	4,1	4,54	0,44	11,82	19,22	7,4
	5	ocre	40,22	60,17	19,95	4,01	4,62	0,61	12,6	19,31	6,71
	6	ocre	40,52	58,22	17,7	4,06	5,08	1,02	12,46	20,11	7,65
					18,8983333			0,79333333			7,52166667

DIFERENCIAS COORDENADAS L*a*b* TRAS LIMPIEZA LASER											
PROBETA	DISPARO	REFERENCIA	L*1	L*5	$\Delta(L^*5-L^*1)$	a*1	a*5	$\Delta(a^*5-a^*1)$	b*1	b*5	$\Delta(b^*5-b^*1)$
NT.1	1	Ocre	49,2	61,41	12,21	3,94	3,54	-0,4	16,91	20,26	3,35
	2	ocre	48,78	55,07	6,29	4,08	3,64	-0,44	16,99	17,83	0,84
	3	ocre	27,95	54,86	26,91	2,66	4,21	1,55	9,27	19,38	10,11
					15,1366667			0,23666667			4,76666667

DIFERENCIAS COORDENADAS L*a*b* TRAS LIMPIEZA LASER											
PROBETA	DISPARO	REFERENCIA	L*1	L*5	$\Delta(L^*5-L^*1)$	a*1	a*5	$\Delta(a^*5-a^*1)$	b*1	b*5	$\Delta(b^*5-b^*1)$
NT.1	1	Naranja	38,91	50,32	11,41	8,06	8,52	0,46	16,92	22,97	6,05
	2	Naranja	39,38	52,57	13,19	8,13	10,27	2,14	15,27	26,35	11,08
	3	Naranja	37,71	47,21	9,5	10,05	9,9	-0,15	17,67	23,73	6,06
					11,3666667			0,81666667			7,73

DIFERENCIAS COORDENADAS L*a*b* TRAS LIMPIEZA LASER											
PROBETA	DISPARO	REFERENCIA	L*1	L*5	$\Delta(L^*5-L^*1)$	a*1	a*5	$\Delta(a^*5-a^*1)$	b*1	b*5	$\Delta(b^*5-b^*1)$
NP	1	Carnación C	47,4	55,36	7,96	3,82	5,11	1,29	16,57	20,5	3,93
	2	Carnación C	46,13	52,46	6,33	4,95	5,47	0,52	14,88	19,31	4,43
	3	Carnación C	46,86	58,1	11,24	4,09	4,46	0,37	16,22	20,85	4,63
	4	Carnación C	46,16	55,36	9,2	6,04	5,11	-0,93	14,44	20,5	6,06
	5	Carnación C	44,09	52,46	8,37	3,99	5,47	1,48	15,02	19,31	4,29
	6	Carnación C	45,05	58,1	13,05	5,93	4,46	-1,47	14,31	20,85	6,54
					9,35833333			0,21			4,98

DIFERENCIAS COORDENADAS L*a*b* TRAS LIMPIEZA LASER											
PROBETA	DISPARO	REFERENCIA	L*1	L*5	$\Delta(L^*5-L^*1)$	a*1	a*5	$\Delta(a^*5-a^*1)$	b*1	b*5	$\Delta(b^*5-b^*1)$
NP	1	Carnación O	31,23	66,76	35,53	6,22	3,71	-2,51	8,33	16,99	8,66
	2	Carnación O	30,31	63,45	33,14	5,14	5,93	0,79	6,44	16,72	10,28
	3	Carnación O	28,38	50,25	21,87	4,43	9,51	5,08	4,43	16,11	11,68
					30,18			1,12			10,2066667

DIFERENCIAS COORDENADAS L*a*b* TRAS LIMPIEZA LASER											
PROBETA	DISPARO	REFERENCIA	L*1	L*5	$\Delta(L^*5-L^*1)$	a*1	a*5	$\Delta(a^*5-a^*1)$	b*1	b*5	$\Delta(b^*5-b^*1)$
NT.2	1	Granate	27,08	30,96	3,88	3,83	8,37	4,54	3,58	7,57	3,99
	2	Granate	28,84	30,76	1,92	7,34	7,57	0,23	4,41	7,13	2,72
	3	Granate	27,32	30,21	2,89	9	9,82	0,82	4,32	6,14	1,82
					2,89666667			1,86333333			2,84333333

DIFERENCIAS COORDENADAS L*a*b* TRAS LIMPIEZA LASER											
PROBETA	DISPARO	REFERENCIA	L*1	L*5	$\Delta(L^*5-L^*1)$	a*1	a*5	$\Delta(a^*5-a^*1)$	b*1	b*5	$\Delta(b^*5-b^*1)$
NT.2	1	Ocre	42,32	46,94	4,62	3,68	5,24	1,56	14,05	18,25	4,2
	2	Ocre	42,68	47,35	4,67	3,94	5,57	1,63	14,45	17,88	3,43
	3	Ocre	48,3	48,13	-0,17	4,45	5,2	0,75	16,73	18,39	1,66
					3,04			1,31333333			3,09666667