

La tecnología láser aplicada a la conservación y restauración

Begoña Sáiz *



Portada del Museo Municipal de Madrid limpiada con la técnica láser

A lo largo de este artículo se describe el recorrido desde los primeros momentos de la investigación con láser en el campo de la conservación y la restauración hasta nuestros días, para conocer su alcance, limitaciones y técnica, y se revisan los distintos resultados obtenidos no sólo sobre materiales pétreos, sino también sobre obras de arte de distintas características.

Laser technology applied to the conservation and restoration. In this article we shall have a look at laser research in the field of conservation and restoration from its infancy until today, examining its reach, limits and techniques and reviewing different results obtained not only on stone materials but also on other works of art with different characteristics.

*Begoña Sáiz es Licenciada en Bellas Artes en la especialidad de Conservación y Restauración de Bienes Culturales



1



2



3

Desde la década de los años 80 la tecnología láser se viene presentando como el método de limpieza más fiable y eficaz para superficies pétreas alteradas, sobre las que se ha formado una costra negra debida a los contaminantes atmosféricos y la lluvia ácida.

La innecesaria preconsolidación del material alterado y la posibilidad de limpiar superficies muy deterioradas sin pérdida de material, auguran a esta técnica de limpieza *non-contact* un futuro prometedor en el campo de la restauración.

Estudios realizados a través de microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido (SEM/EDX) y difracción de rayos-X, parecen demostrar que la suciedad queda perfectamente eliminada, conservándose la pátina de la piedra y por tanto el valor histórico de la obra de arte.

RECORRIDO HISTÓRICO

El primer láser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) fue construido en julio de 1960 por el físico americano Maiman. Desde ese momento la tecnología láser se ha desarrollado de forma espectacular en diversos campos como son la medicina y la industria, entre otros.

Los primeros estudios en el campo de la restauración datan de 1972 cuando Asmus, Lazzarini y Marchesini presentaron los primeros resultados sobre limpiezas de estatuas utilizando láseres de rubí. El desarrollo de una tecnología láser fiable en las aplicaciones industriales a partir de la década de los 80, fue paralelo a la investigación asociada a la interacción láser-materia que a nosotros nos concierne.

En 1989 se realiza una primera comunicación científica sobre la interacción láser-materia (Coloquio AFTPV-SFIIC "*Technologie Industrielle Conservation-Restoration du Patrimoine Culturelle*", Niza, Francia), derivada de los estudios llevados a cabo conjuntamente por el *Laboratoire de Recherche de Monuments Historiques (LRMH)* y el *Institut Régional pour la Promotion de la Recherche Appliquée (IREPA)* de Estrasburgo (Francia).

En 1992 la empresa francesa BM Iber diseña el primer prototipo móvil para la limpieza in situ de obras arquitectónicas de interés histórico-artístico.

Posteriormente otras empresas han desarrollado sus propios láseres, todos ellos con la misma finalidad. Algunas de estas

4



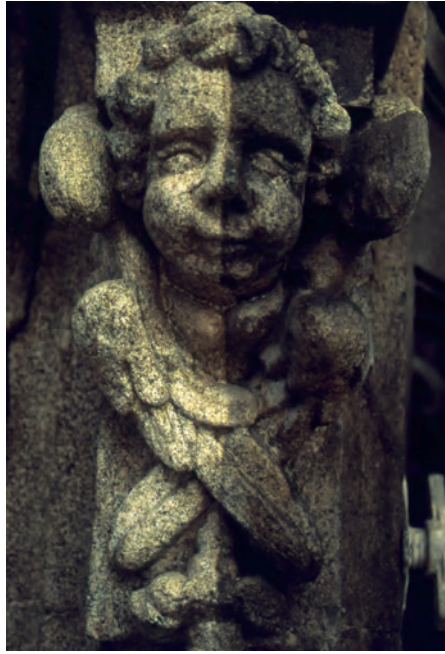
1. Láser aplicado in situ en el edificio de Telefónica de Madrid

2. Antes y después de la desincrustación fotónica de uno de los detalles de la portada del Museo Municipal de Madrid

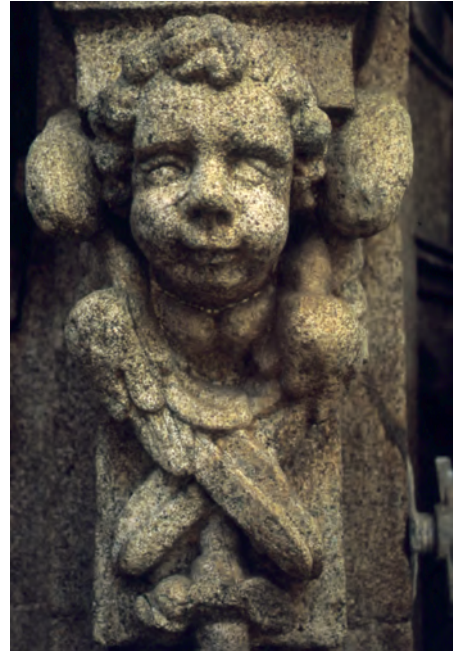
3 y 4. Antes y después de la limpieza fotónica. Detalle de la portada del Museo Municipal de Madrid



5



6



7

empresas son: LSI (Láser Sistemas Integrados), de España, Laserblast, del grupo Quantel, de Francia, Linton Lasers, de Inglaterra, y Quanta System y CTS, ambas de procedencia italiana.

Desde esas primeras experiencias realizadas con láseres de rubí, hasta el empleo en nuestros días del láser Q-Switched Nd:YAG, la posibilidad de emplear tecnología láser para la limpieza de costras negras, que residen sobre materiales pétreos alterados, se convierte día a día en la opción más segura para una correcta intervención de entre todos los sistemas de limpieza empleados hasta el momento.

Las técnicas tradicionales de limpieza (químicas, mecánicas, acuosas ...) empleadas para la eliminación de costras negras producidas por la contaminación físico-química (derivada de las condiciones medioambientales), y la lluvia ácida (derivada de emisiones agresivas de los procesos de combustión), han ocasionado un contacto directo y mecánico sobre la piedra, incorporando en la mayoría de los casos un agente extraño y erosionando la superficie.

La limpieza, que representa uno de los momentos más delicados del proceso de restauración, ha de tener como objetivo

recuperar, en la medida que sea posible, el color, la textura y el aspecto original de la piedra.

Los principios físicos del láser ofrecen resultados prometedores en materia de limpieza; el láser y su haz de fotones inmatenales, suponen un sistema de limpieza *non-contact*, es decir, cuando el rayo láser interacciona con la capa de suciedad, ésta absorbe tal cantidad de radiación que los lazos que unen las partículas de suciedad se rompen entre sí, desprendiéndose a la vez del sustrato pétreo. Cuando a continuación, el rayo interacciona con la superficie pétreo ya limpia, gran parte de la radiación incidente es reflejada, siendo mínima la cantidad absorbida, que dependerá de la longitud de onda de la radiación y de las propiedades físicas y químicas del material pétreo, determinando ambos elementos la capacidad de absorción del material lapídeo.

En función de dicha absorción podrían caracterizarse posibles alteraciones sobre la epidermis de la piedra o pátina en caso de existir, por lo que será necesario el análisis de la composición mineralógica del material pétreo para determinar posibles alteraciones, tanto antes como después de la limpieza.

Ésta, por otro lado, es controlada por el

conservador mediante la energía contenida en un pulso, el número de pulsos por segundo y la distancia entre el aparato y la superficie. Si se aspira a realizar una limpieza inocua para el sustrato pétreo, resulta absolutamente imprescindible que se seleccionen adecuadamente los parámetros del láser (según un riguroso estudio previo del material a limpiar), y un profesional altamente cualificado emplee correctamente del láser. De lo contrario, un empleo erróneo de la técnica podría dañar irreparablemente el material pétreo causando hoyuelos en la superficie y cambiando las propiedades mecánicas en la epidermis.

Investigaciones realizadas por M.I. Cooper, D.C. Emmony y J. Larson (NMG), sobre terracotas, calizas y pátinas de mármoles, demuestran que la radiación láser, empleada con los parámetros apropiados y siempre en manos de un profesional, es capaz de eliminar costra negra de superficies pétreas alteradas sin causar daño a la epidermis de la piedra y conservando la pátina en caso de existir.

Empleando un láser Q-Switched Nd:YAG, las conclusiones derivadas de un estudio a través de microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido (SEM/EDX), difracción de rayos-X, y

fotografía de alta velocidad, entre otros, han demostrado la viabilidad de esta técnica para eliminar costra negra de calizas y terracotas alteradas sin dañar el substrato lapídeo, y sin dañar la pátina en el caso de mármoles. Los autores afirman que una costra negra resultante de la polución atmosférica absorbe aproximadamente el 90% de la radiación incidente, mientras que la superficie de una caliza limpia, solamente absorbe un 30% de dicha radiación, cantidad insuficiente para dañar el substrato de la piedra una vez la suciedad ha sido eliminada.

El Instituto Canadiense de Conservación (CCI) bajo la supervisión de Tom Stone, *Chief of the Ethnology and Furniture Division*, ha llevado a cabo una serie de experimentos sobre materiales etnográficos. Aunque pendientes de una investigación microscópica en profundidad, los resultados que a simple vista se produjeron son los siguientes: costras negras y lápiz negro fueron limpiados de un soporte marmóreo sin evidenciar ningún cambio sobre el substrato.

La superficie deslustrada de un objeto de plata se consiguió eliminar pero se creó a la vez una incontrolada reoxidación sobre la superficie.

Por otro lado, la corrosión del hierro se eliminó fácilmente, aunque se produjo un efecto ligeramente azulado cuando el haz se mantuvo por un tiempo prolongado sobre algunas zonas.

Respecto al cobre, sobre algunas piezas el haz de fotones produjo un virado de la corrosión, de verde claro a verde oscuro.

Otro tipo de objetos como cestos, un collar de dientes o la red de tripa de una raqueta de nieve, fueron limpiados rápidamente sin, aparentemente, causar ningún daño sobre los materiales.

Sin embargo, al dirigir el haz sobre plumas, la desincrustación fotónica produjo un resultado adverso, eliminando la suciedad pero originando a la vez un resultado grisáceo sobre la superficie.

El problema incontrolado de la reoxida-

ción, hizo que la limpieza con láser no tuviera éxito al intentar limpiar hilo metálico empleado en textiles.

Sobre papeles y textiles diversos pudo ser eliminada la suciedad superficial, pero no se obtuvieron buenos resultados sobre manchas o partículas de suciedad que se encontraban entre las fibras.

El láser se aplicó también sobre matrículas de coches, consiguiendo distintos resultados. Los números negros impresos fueron fácilmente limpiados, en cambio, a la hora de eliminar las capas claras de laca asociadas a los números aparecieron problemas, especialmente si el substrato de la capa anterior era de color claro. Dichas capas permanecieron intactas, mientras que las de los números en negro fueron perfectamente eliminadas.

A la espera de un examen científico mucho más profundo de los resultados, la impresión que la limpieza con láser produjo es que tiene una alta dependencia de los colores. Las capas oscuras, que absorben una gran cantidad de radiación, son mucho más fácilmente eliminables que aquellas claras, que absorben una menor radiación.

El láser Q-Switched Nd:YAG trabaja dentro de la franja infrarroja del espectro electromagnético, con una longitud de onda de 1.064 nm. Sus características lo convierten en un aparato útil sobre muchos materiales, pero otros que por su sensibilidad a dicha radiación ofrecen resultados adversos necesitarían ser tratados con distintas longitudes de onda y estudiar entonces sus resultados.

La posibilidad de duplicar, triplicar o incluso cuadruplicar la longitud de onda, ofrece grandes posibilidades en el campo de la restauración.

La investigación está abierta, no sólo sobre los materiales del tipo que acabamos de ver, sino también sobre algunos materiales pétreos como granitos y areniscas, donde se están obteniendo resultados diversos en función de la cantidad de composición férrica de sus minerales.



8



9



10



11

5, 6 y 7. Estado original, proceso intermedio y resultado final de la limpieza láser de uno de los detalles de la portada del Museo Municipal de Madrid

8. Limpieza in situ de la portada del Museo Municipal de Madrid

9. Detalle de costra negra y resultado de la limpieza láser. Portada del Museo Municipal de Madrid

10 y 11. Antes y después de la desincrustación fotónica. Detalle de la portada del Museo Municipal de Madrid



12 y 13

12. Proceso intermedio de limpieza. Edificio de Telefónica de Madrid

13. Detalle de suciedad y resultado de la limpieza fotónica. Edificio de Telefónica de Madrid

14. Proceso intermedio de la limpieza de uno de los medallones de la Iglesia de Monserrat de Madrid

15. Demostración in situ en la Basílica de la Virgen de los Desamparados de Valencia realizada por CLAR Rehabilitación. Mayo 1996

14 y 15



El análisis de la interacción láser-pátina es igualmente importante tanto para mantenerla, como para eliminarla en caso de que no se trate de una pátina original.

Sería erróneo generalizar el empleo del láser sobre todo tipo de materiales, puesto que para muchos de ellos, en los que el resultado es adverso, sería necesario perfeccionar el aparato para seguir experimentando y poder avanzar en la investigación, y de esta forma determinar y justificar o no el empleo de un sistema de limpieza de dichas características. La investigación será la encargada de evaluar en cada caso concreto los resultados obtenidos, contrastándolos con otras técnicas empleadas hasta el momento y determinando la viabilidad de su empleo sobre materiales determinados y casos concretos.

La tecnología láser no reduce su campo de actuación a la limpieza de materiales pétreos. Está siendo empleado para analizar pigmentos, detectar repintes y diagnosticar el estado de superficies y defectos estructurales, además de limpiar vidrieras y pergaminos, entre otros.

LACONA III, la tercera conferencia internacional sobre el empleo del láser para la conservación y restauración de obras de arte, cuya celebración está prevista en Florencia en un plazo no superior a dos años, será la cita perfecta para conocer los últimos avances sobre el empleo de esta técnica en el mundo de la restauración.

INTERVENCIONES REALIZADAS EN ESPAÑA

En nuestro país se está introduciendo el empleo del láser como instrumento de limpieza, aunque con reservas de muy distinta índole. Algunas de las intervenciones llevadas a cabo son, la portada del Museo Municipal, el edificio de Telefónica y los medallones de la Iglesia de Monserrat, todos ellos en Madrid, realizadas por la empresa CLAR Rehabilitación. Podemos observar a lo largo del artículo imágenes de ello. La misma empresa hizo una demostración in situ en la Basílica de la

Virgen de los Desamparados de Valencia, cuyo resultado se aprecia en la figura 15.

En el Banco de España de Madrid, y en los capiteles de las portadas góticas Norte-Sur y Oeste de la Iglesia de Santa María, en Castellón, también se ha aplicado dicha técnica de la mano de CPA, que próximamente tiene previsto iniciar una limpieza en el Museo de La Rioja.

Otros edificios beneficiados por dicha limpieza han sido la portada de San Jerónimo de la Catedral de Calahorra, en la Rioja, realizada por CORESAL, diez estatuas procedentes del Palacio de Fabio Nelli en Valladolid limpiadas por el Centro de Restauración de Simancas y la Casa del Almirante de Tudela, en Navarra.

En el campo industrial, la empresa española LSI (Láser Sistemas Integrados) ha desarrollado un láser móvil para limpieza de obras de arte in situ. Se trata del único láser español en el mercado creado con este fin. Actualmente en España las instituciones o empresas que cuentan con un láser disponible para trabajar in situ son: el IPHE (Instituto del Patrimonio Histórico Español) y antiguo ICRBC, con un láser de procedencia italiana, el Centro de Restauración de Simancas y la empresa de Castellón Limpiezas a Presión, que cuentan con el láser de origen español, además de CPA de Burgos y CLAR de Madrid, ambas con un láser de procedencia francesa.

EXPLICACIÓN TÉCNICA Y PRINCIPIO FÍSICO

La luz láser, como toda luz, está constituida por ondas electromagnéticas. Se caracteriza porque todas sus ondas oscilan sincrónicamente en fase, frecuencia y dirección. Por consiguiente, la luz láser tiene una longitud de onda definida con precisión, es fácilmente focalizable y es de alta intensidad.

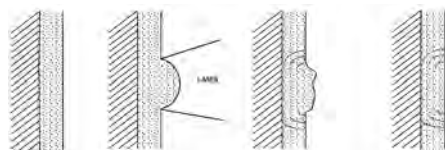
La fuente láser empleada actualmente es un Q-Switched Nd:YAG 420 mJ/6ns con una longitud de onda de emisión de 1064 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). La potencia o energía del haz es de 420 mJ ($1 \text{ mJ} =$

10^{-3} J) y la duración del pulso de 6 nanosegundos (aunque los parámetros pueden variar ligeramente de un fabricante a otro). Basa sus cualidades ópticas en la excitación, mediante una lámpara de destello, de una barra de granate de ytrio y aluminio dopada con neodimio. El haz láser resultante, es amplificado dentro de una cavidad resonante formada por dos espejos reflectantes y es concentrado sobre la zona a limpiar por medio de una lente óptica. El láser libera en cada disparo un pulso luminoso extremadamente corto, 6 nanosegundos ($1 \text{ ns} = 10^{-9}$ sg), en donde la energía liberada es limitada. El impacto no provoca así ningún calentamiento del material. La energía transportada por el pulso genera una microrresonancia mecánica que desincrusta, en forma de aerosoles, los elementos extraños depositados sobre la superficie. La suciedad por tanto no es carbonizada por el rayo de luz, sino que la onda de choque de los fotones levanta las partículas depositadas dando lugar a la desincrustación fotónica. La onda de choque, de muy débil amplitud, se propaga a continuación en el material. Los procesos físicos de interacción utilizando láseres pulsados se clasifican según la intensidad del flujo luminoso y su absorción por la materia.

La interacción láser-materia se explica en base a los siguientes términos.

RÉGIMEN DE TERMO-ELASTICIDAD

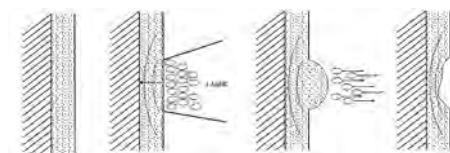
La intensidad luminosa empleada oscila entre 10^5 y 10^7 w/cm². El impacto láser provoca un calentamiento local muy breve. La materia absorbe la energía luminosa, se dilata localmente y la relajación térmica de la zona crea ondas acústicas en el material. La energía luminosa es insuficiente para modificar el estado de la superficie que reacciona de forma elástica.



COSTRA NIGRA
SUBSTRATO PÉTRICO

RÉGIMEN DE FOTO-ABLACIÓN

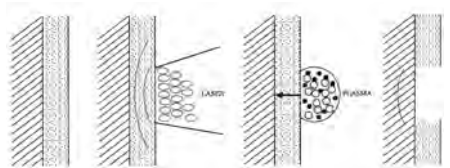
La intensidad luminosa depositada sobre el material oscila entre 10^7 y 10^8 w/cm². El impacto láser provoca la vaporización de una parte de los depósitos en la superficie del material soporte. Sobre la capa de suciedad se crea un campo de tensiones mecánicas que generan ondas acústicas propagándose por aire y ocasionando la audición de un ruido similar a un chasquido.



RÉGIMEN DE CHOQUE LÁSER

La intensidad luminosa sobre la muestra es superior a 10^8 w/cm². El impacto láser genera una vaporización seguida inmediatamente de una ionización. El plasma inducido al enfriarse ejerce una fuerte presión local. Cuanto más confinado se encuentre el plasma, más eficaz será la limpieza, efecto que se puede conseguir pulverizando agua sobre la superficie inmediatamente antes de limpiar con el láser. Esta presión genera una onda de choque que se propaga dentro de la suciedad, expulsando las partículas incrustadas. La presión se localiza en la interfase entre la piedra y los depósitos de suciedad, siendo máximo el efecto de expulsión. Una vez estos han sido desincrustados la radiación emitida sobre el soporte será mayoritariamente reflejada. La cantidad absorbida dependerá de la longitud de onda de la radiación y de las propiedades físicas y químicas del soporte.

El régimen de limpieza se enmarca dentro de los regímenes de foto-ablación y de choque láser.



NOTA: La autora agradece la cesión desinteresada de toda la documentación gráfica a CLAR Rehabilitación.

BIBLIOGRAFIA

- AMOROSO, G.G. Y FASSINA, V. "Stone decay and conservation" Materials Science Monographs, 11
- BM Industries. "Laser e Interacción" Febrero 1993
- COOPER M. and LARSON J. "The use of laser cleaning to preserve patina on marble sculpture". The Conservator. No 20. 1996
- COOPER, M. "Recent developments in laser cleaning". The Building Conservation Directory 1997
- COOPER M.I., EMMONY D.C. and LARSON J. "Characterization of laser cleaning of limestone". Optics & Laser Technology. Vol 27 No1 1995
- ESBERT ALEMANY, ROSA M. "Métodos tradicionales de limpieza de la piedra versus limpieza láser". Jornadas sobre restauración del patrimonio arquitectónico organizadas por EDILICIA, Mayo 1997.
- FABIENNE LEMARCHAND. "El láser en ayuda de las viejas piedras". Mundo Científico. No 131 Enero 1993.
- GRENET, S. "Limpieza de materiales pétreos por emisión láser". BM Industries, Madrid. Noviembre 1993.
- LARSON J., COOPER M. and FOSTER C. "The use of Laser energy for cleaning architectural terracotta decoration"
- LSI. "El láser y la restauración". - Natural Stone Specialist. "Lasers at the ready"
- STONE, T. "Laser Cleaning Demonstration". CCI Newsletter. No 17, March 1996.
- Stone, T. Nd-Yag Laser Cleaning at CCI: An Update. CCI Newsletter. No 19, March 1997
- VVAA. "Light years ahead?". Natural Stone Specialist. December 1994



16

16. Antes y después de la intervención en la Basílica de la Virgen de los Desamparados de Valencia.