

## Neteja de materials constructius amb làser Nd:YAG. Un exemple d'aplicació

En aquest article es comenten els principis generals de la tècnica làser en la neteja de materials constructius i s'exposa una de les experiències de neteja realitzades amb l'equip Maestro IV sobre material petri.

**Manuel Iglesias Campos.** Restaurador. *Materias Primas Abrasivas, SL.* miglesias@mpa.es

### INTRODUCCIÓ

El desenvolupament que han tingut els equips làser per a la neteja de materials en el camp de la restauració, ha afavorit que el seu ús en algunes intervencions, principalment sobre materials constructius, hagi anat en augment. Malgrat això existeix, de moment, un desconeixement sobre les possibilitats d'aquesta tècnica i les seves limitacions.

### Elements que componen un equip làser

Un làser és un aparell o dispositiu que produeix una radiació electromagnètica com la llum natural, formada per fotons; però no és una llum normal ja que està amplificada, té una major energia, les seves ones vibren en el mateix període i es monocromàtica, atès que produeix i transmet una única longitud d'ona o un interval molt estret.

En línies generals, i amb les diferències lògiques entre models, els làsers consten de diferents parts per poder generar la llum o energia que ens permet realitzar la neteja. El làser pròpiament dit està compost per:

- font de bombeig: per descàrrega elèctrica, reacció química o absorció de llum.
- medi amplificador o medi actiu: que pot ser un gas, sòlid, líquid o semiconductor, i és on es produeix una emissió estimulada de la llum.

- cavitat ressonant: formada per dos miralls enfrontats que obliguen la llum a travessar successives vegades el medi actiu (vegeu la fotografia 1).

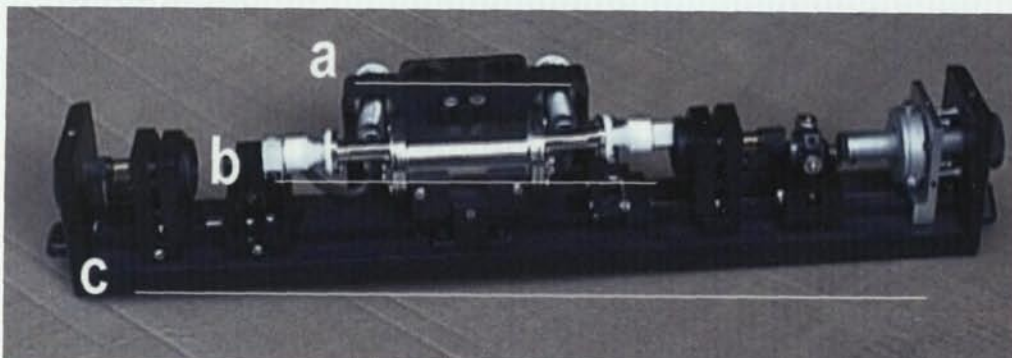
### Tipus de làser per a neteja en restauració

Depenent del medi actiu que el generi, podem distingir diferents tipus de làsers. Cadascun d'ells presenta uns paràmetres d'emissió diferents que són els que el defineixen i determinen la seva aplicació sobre els diferents materials o alteracions. En el camp de la neteja en restauració, les longituds d'ona que tenen un major interès o aplicació fins ara són les següents:

MEDI ACTIU	LONGITUD D'ONA	APLICACIONS
Ar KrF XeCl	196 nm(UV) 278 nm(UV) 308 nm(UV)	Làsers d'excímers, amb els que s'estan netejant obres d'art policromades, respectant pigments i aglutinants, eliminant vernissos envellits o bruts.
Nd:YAG	1064 nm(IR)	Neteja de materials constructius.
Er:YAG	2940 nm(IR)	Eliminació de vernissos de diferents superfícies sobre tela i fusta.

### EL LÀSER DE Nd:YAG

Els làsers que s'estan emprant principalment per a la neteja de materials constructius són làsers d'estat sòlid, que produeixen una longitud d'ona de 1064 nm (infraroig), i els seus harmònics en alguns equips, essent el seu medi actiu un cristall de YAG, barra de cristall de granat d'itri i alumini ( $Y_3Al_5O_{12}$ ) dopat amb un 1% d'ió  $Nd^{3+}$ . El sistema de bombeig pot ser per làmpada o per diodes i porten un sistema de refrigeració extern o intern.



1. Estructura bàsica d'un equip làser:  
a) font de bombeig.  
b) medi actiu.  
c) cavitat ressonant  
(Fotografia: Agustín García).





La sortida és polsada i la transmissió del feix cap a l'exterior es pot realitzar per braç o per fibra òptica, i la projecció de la radiació per pistola o punter (vegeu la fotografia 2).

## Paràmetres de l'emissió làser per a treballs de neteja de materials constructius

Els paràmetres principals que defineixen l'emissió làser determinen també la interacció làser-matèria i seran característics del tipus de làser que s'utilitzi. Aquests paràmetres són:

- longitud d'ona: influeix en l'energia i determina el color de la radiació. Com ja s'ha comentat, per a la neteja de materials constructius s'utilitza habitualment làsers d'estat sòlid, la longitud d'ona dels quals està a l'infraroig 1064 nm (i els seus harmònics aconseguits per subdivisió d'aquesta longitud).
- durada del pols: temps de l'emissió en cada pols expressada en nanosegons (ns) o microsegons (ms). Habitualment s'utilitzen làsers polsats; l'efecte dels làsers de polsos llargs (majors a microsegons) és el d'evaporar el material, mentre que els de polsos curts (nanosegons) produeixen ones de xoc i fenòmens mecànics que fan que les capes adherides a la superfície es desprenguin.
- freqüència de repetició: nombre de polsos contingut en un segon expressat en hertzis (Hz) en un làser polsat. Si la freqüència és suficientment alta, els trets del làser es superposen entre sí, mentre que si la freqüència es baixa, els polsos no es solapen.
- diàmetre del feix: mida de l'espota a la sortida del feix làser.
- superfície il·luminada: superfície d'actuació sobre el material.
- energia per pols: energia emesa pel làser en un sol pols, expressada en milijulis (mJ). L'energia alliberada en cada pols de llum és una magnitud variable. Els làsers Nd:YAG que es fan servir per a aquest tipus d'aplicacions no tenen molta energia per pols, encara que aquesta poca energia s'associa a una elevada potència, ja que és emesa en un interval de temps molt curt.
- densitat d'energia o fluència: quantitat d'energia sobre una unitat de superfície, expressada en julis per centímetre quadrat ( $J/cm^2$ ).

Aquests paràmetres han de ser controlats amb la finalitat que la neteja es realitzi de la forma més correcta sense malmetre el material, però que també es faci de la forma més ràpida i efectiva possible.

## NETEJA DE MATERIALS CONSTRUCTIUS MITJANÇANT LÀSER Nd:YAG

La neteja amb làser es produeix per una ona infraroja –en el cas del 1064 nm o d'altres, segons la longitud d'ona– d'alta energia que s'absorbeix per les capes de brutícia en un procés de fotoblació, la qual cosa suposa una pèrdua de matèria superficial –brutícia– per pas de l'estat sòlid a gas (sublimació) [vegeu la fotografia 3].



2. Equip làser Nd:YAG Maestro IV de MPA, SL. Sistema de bombeig per diodes, refrigeració interna, guiat del feix per fibra òptica i punter (Fotografia: Agustín García).



3. Incidència del feix làser sobre brutícia en material petri (Fotografia: Agustín García).





4. Neteja de crosta negra en material calcari arenitzat. Restauració de la creu de Santa Anna de Les Escaldes d'Andorra (Fotografia: Mireia Garcia Garcia-Cairó).

La neteja té lloc per la combinació de diversos efectes, entre els quals hi ha:

- els efectes fototèrmics: la radiació incident en la superfície és absorbida per la capa de brutícia i el material, augmentant la temperatura de la superfície de forma localitzada i provocant la seva fusió i vaporització amb formació de plasma.
- els efectes fotomecànics i fotoacústics: després de la formació del plasma es produeixen ones de xoc mecàniques i acústiques que es propaguen per la brutícia i provoquen l'eliminació de les partícules.

A causa d'aquests efectes, durant el procés de neteja, es posen de manifest dos fenòmens característics: la formació de plasma al voltant de la zona d'impacte i la generació d'una ona de xoc provocada pel plasma que es transporta a través del medi en forma de so peculiar, que acaba al final de la interacció.

Els mecanismes que ens permeten realitzar una neteja làser poden arribar a ser molt diferents però també molt selectius, en funció dels paràmetres que fem servir, del material i de la brutícia que desitgem eliminar (vegeu la fotografia 4).

El procés físic d'interacció usant làsers polsats es classifica segons la densitat d'energia i la seva absorció per la matèria, produint-se diferents règims en funció de la quantitat d'energia

absorbida. En un *règim termoelàstic*, en el que es treballa amb baixes densitats d'energia, la majoria de la radiació s'absorbeix per la brutícia i el material en rep molt poca; en un *règim de vaporització explosiva*, on la densitat d'energia és major, es poden produir canvis mineralògics en els materials que apreciarem com a canvis cromàtics; i en un *règim de xoc làser*, amb majors densitats d'energia, es pot arribar a malmetre el substrat amb pèrdues de material.

El mecanisme o combinació de mecanismes dependrà d'una sèrie de factors com la densitat d'energia incident, el tipus de dipòsits i la fortalesa de les unions entre les partícules de brutícia i entre aquestes i el substrat. Sempre s'ha d'intentar emprar el mecanisme que proporcioni la neteja més selectiva possible, reduint al màxim el risc de malmetre l'original (vegeu la fotografia 5).

La neteja amb làser es basa en la diferència d'absorció de l'energia lluminosa o fotònica dels diferents materials tenint, per tant, una gran dependència dels colors. Les capes de color fosc, normalment brutícia, absorbeixen pràcticament tota l'energia, mentre que les capes clares absorbeixen una menor radiació, ja que la majoria és reflectida. Lògicament això ens està assenyalant que els millors resultats s'obtingran en neteges sobre un substrat de color clar, per exemple de carbonat càlcic, amb una brutícia de color fosc, crosta negra. Sobre d'altres materials constructius de coloració més fosca els resultats





seran diferents podent, d'una banda, no eliminar-se totalment la brutícia, o bé produir una absorció important d'energia per part del substrat i afavorir alteracions físiques o pèrdues de matèria en el mateix.

La diferència d'absorció fa que, en un principi, el procés de neteja s'autointerrompi. Quan s'han eliminat les capes de brutícia, els següents polsos làser emesos sobre la zona netejada, amb la densitat d'energia apropiada, són reflectits per la superfície evitant malmetre el substrat. És en aquest sentit que es parla de la tècnica làser com a tècnica de neteja autolimitativa.

Un altre factor a tenir en compte en aquest tipus de neteges és el llindar d'ablació dels materials, tant de la brutícia com del substrat. Si el llindar d'ablació de la brutícia és més baix que el del substrat, la neteja serà selectiva, augmentant aquesta selectivitat quan la diferència és major. De la mateixa manera, si el llindar d'ablació de la capa de brutícia és igual o major que el del material petri, el procés de neteja no serà selectiu; és a dir, existirà el risc de malmetre el suport, trobant-nos amb la mateixa problemàtica que amb els altres mètodes tradicionals.

També cal tenir present que el materials no tenen un únic component, sinó que són diversos els elements que el constitueixen; l'acció de la radiació serà, per tant, diferent sobre cada un dels minerals que formen el material que s'ha de netejar, i serà necessari determinar la densitat d'energia que no afecti a cap d'ells.

Tots aquests aspectes ens estan indicant que, per poder parlar realment de la innocuïtat de la tècnica làser, cal la realització d'assaigs per caracteritzar els materials i valorar l'acció de neteja, podent així determinar de forma concreta els paràmetres que s'han d'utilitzar en els treballs.

Habitualment, quan es parla de neteja amb làser, s'està parlant d'acció del raig sobre la brutícia en sec, però s'ha pogut comprovar que humitejant la superfície que s'ha de netejar amb aigua nebulitzada, o aplicada a pinzell, la neteja es realitza de forma més ràpida i genera una superfície més uniforme en l'eliminació de la brutícia. L'aigua és absorbida per les partícules que componen la brutícia i penetra en els seus porus augmentant el procés d'ablació. Això pot estar produït per l'augment de la diferència de coloració entre brutícia i substrat en haver-se humitejat aquestes capes, o per l'augment de l'efecte mecànic i tèrmic en agitar la molècula d'aigua en l'espai porós de la brutícia. De totes maneres, l'aigua actua com a refrigerant, per la qual cosa els efectes que es poden produir per la calor, queden minimitzats. L'ús de l'aigua és recomanable quan la brutícia presenta una forta adheència amb el substrat i la neteja amb el làser en sec no acaba de treure tots els residus.

En qualsevol moment la neteja pot ser controlada pel restaurador, variant alguns dels paràmetres de l'emissió com la potència, la freqüència de repetició i la focalització-desfocalització



5. Restauració de la creu de Santa Anna de Les Escaldes d'Andorra (Fotografia: Mireia Garcia Garcia-Cairó).



6. Plafó de control de l'equip Maestro IV (Fotografia: Agustín García).





7. Assaigs per a proposta d'intervenció al pòrtic de la catedral de Santa Maria de Vitòria-Gasteiz (Fotografia: Restauración de Patrimonio Petra, SL).

del feix, amb el que es pot aconseguir diferents densitats d'energia, incidint sobre la superfície que s'ha de tractar (vegeu la fotografia 6).

### CONCLUSIÓ

Les diferències entre la neteja làser i la neteja amb tècniques tradicionals són evidents. Les tècniques tradicionals incorporen a la neteja un agent extern a la superfície del material per realitzar la seva funció. Poden eliminar capes de brutícia, però la seva actuació es prolonga també en el suport. Així, per exemple, els mètodes basats en aigua o químics poden produir solubilització de components dels materials, canvis de coloració, eflorescències..., i els mètodes mecànics poden produir pèrdues de fragments, abrasió..., si no es realitzen amb els paràmetres precisos.

En la neteja làser no actua ni aigua (de la forma tradicional), ni productes químics, ni abrasius; són fotons que interaccionen amb la brutícia i el material. Es tracta d'una tècnica més respectuosa amb el suport que les tècniques tradicionals (vegeu la fotografia 7).

L'existència de la tècnica làser no anul·la en absolut l'ús de les tècniques tradicionals. Es tracta d'una eina més, a disposició dels restauradors, que caldrà fer servir quan les condicions ho requereixin, de forma individual o en combinació amb d'altres tècniques.

### UN EXEMPLE D'APLICACIÓ: CALES DE NETEJA A LA TORRE DE LA CATEDRAL DE MÚRCIA

Una de les experiències realitzades és la neteja de diferents elements decoratius de la torre de la catedral de Múrcia (vegeu la fotografia 8).

Aquesta torre es va fer edificar l'any 1519 i està formada per diferents cossos que corresponen a distints períodes cronològics. Els dos primers constitueixen dues fases d'un mateix estil. El primer cos, molt decorat (vegeu la fotografia 9), és obra de Francisco i Jacobo Florentino. Hi trobem pilastres corínties aparellades als extrems, amb nombrosos grotescos, fornícules de diverses tipologies i amb una gran finestra central d'emmarcament molt decorat. El segon cos, obra de Jerónimo Quijano (1526), segueix el mateix esquema, adaptat a la seva època, amb pilastres jòniques estriades molt més sòbries mentre que, en canvi, és molt més ric en el doble finestral central. L'any 1546 s'interromperen les obres fins al 1765, quan Juan de Gea i José López iniciaren el cos dels quatre temples angulars i el de les campanes que, malgrat els detalls barrocs, concorden amb els cossos baixos. El 1782 es rematà finalment la torre amb un altre cos i una cúpula elevada de tipologia neoclàssica, segons el model de Ventura Rodríguez i executada per un arquitecte local que l'acabà el 1793.

Quan es realitzaren els assaigs, s'estava actuant en el primer i segon cos, ja que els superiors s'havien restaurat en etapes d'intervenció anteriors.

El material constructiu emprat en la torre és una calcarenita de gra fi i de color ocre clar, a sobre de la qual s'havia aplicat una



pàtina realitzada amb cera i pigments, segons dades aportades per la Direcció Facultativa del projecte, amb tonalitats siena.

L'estat de conservació del material i de la seva pàtina era diferent segons la seva ubicació, i les alteracions eren diverses. Centrant-nos únicament en les relacionades amb l'actuació de neteja que calia realitzar, s'han de remarcar els diferents tipus de fixacions de dipòsits superficials i l'arenització del material en algunes zones decoratives.

Els dipòsits superficials d'escassa adherència havien estat eliminats en un tractament previ de neteja mitjançant pinzell i raspall, amb addició d'aigua nebulitzada segons els casos, per la qual cosa, al moment de fer les cales de neteja, aquests no eren observables.

En relació amb la fixació dels dipòsits, cal assenyalar que el grau de brutícia i compactació era divers, des de dipòsits de poc gruix però amb gran adherència al material, a dipòsits compactats i crostes negres. La fixació i ubicació dels mateixos estava directament relacionada amb els volums dels diferents motius decoratius i segons la seva exposició al rentat de les aigua pluvials; així, a les zones més profundes i fondes de la decoració, és on presentaven un major gruix, compactació i adherència amb el substrat. En aquestes zones de dipòsits de cert gruix, la pàtina presentava pèrdues puntuals i no es conservava de manera uniforme en bona part de la superfície.

També es detectà una altra zona de pèrdua de pàtina original en àrees en les que, per la configuració de la decoració i l'efecte de la precolació de l'aigua de pluja, s'havien generat pàtines de decoloració per rentat, que havien deixat un rebaix en el material petri i una superfície lleugerament arenitzada.

Per tant, l'objectiu dels assaigs, en la fase en què es trobaven els treballs, era la d'eliminar els dipòsits de brutícia compactada amb gran adherència al material petri i zones de crosta negra recoberta amb dipòsits de brutícia compactada. Tot això, evidentment, sense alterar la pàtina aplicada.

Prèviament al plantejament de la utilització del làser a l'obra, s'havien realitzat cales de neteja amb mètodes mecànics (microtorn, bisturí...) i diferents apòsits, per tal de veure la possibilitat de realitzar aquest tipus de tractaments de neteja, però sense obtenir un resultat satisfactori en relació a l'eliminació dels dipòsits amb els sistemes mecànics, i al manteniment de la pàtina amb els sistemes químics.

Els assaigs es van realitzar amb l'equip *Maestro IV* de MPA, S.L. (vegeu la fotografia 10). Abans de realitzar les proves a la bastida, es va procedir a la realització de mostres amb petits fragments despresos de les decoracions i sense ubicació localitzada, per tal de tenir una primera impressió dels paràmetres òptims per poder realitzar la neteja sense malmetre el material. Es va partir d'energies baixes per realitzar aquestes primeres proves ja que, per les característiques i composició de la pàtina, la podien fer molt alterable a la



8. Vista de la torre de la catedral de Múrcia des de l'absis  
(Fotografia: Manuel Iglesias).





9. Detall de la decoració d'una de les zones de l'assaig al primer cos de la torre de la catedral de Múrcia (Fotografia: Manuel Iglesias).



10. Procés de neteja en zones amb crosta negra a la torre de la catedral de Múrcia (Fotografia: Manuel Iglesias).

radiació. En aquests primers assaigs es va poder comprovar visualment que no era convenient superar els 5.5–6 mJ d'energia en la neteja (perquè si no, la pàtina era eliminada), i que aquests mateixos barems resultaven òptims en relació a la velocitat de la neteja. També es va poder comprovar que l'ús d'aigua per humitejar la brutícia abans de rebre la radiació, generava una superfície més uniforme en la neteja i que aquesta es realitzava de forma més ràpida, per la qual cosa a les cales es nebulitzava prèviament la superfície amb aigua destil·lada, deixant que aquesta fos absorbida per la brutícia i iniciar la projecció amb el làser (vegeu la fotografia 11).

A partir dels assaigs, i després de l'observació visual de l'àrea tractada, es va poder concloure que les energies òptimes per a aquesta neteja amb l'equip *Maestro IV* no havien de superar els 6,3 mJ d'energia. Les variacions realitzades a la freqüència influeixen en la rapidesa de l'eliminació dels dipòsits.

En la fotografia 12 es mostren tres de les cales referenciades en la següent taula:

CALA	ALTERACIÓ	FREQÜÈNCIA (Hz)	POSICIÓ (Width)	P(W)	E(mJ) (1)	RESULTAT
A	BRUTÍCIA COMPACTADA DE POC GRUIX	200	3	1.1	5.5	Bo
B	BRUTÍCIA COMPACTADA DE GRUIX MAJOR	200	4	1.25	6.3	Bo
C	BRUTÍCIA COMPACTADA + CROSTA NEGRA	100	3	0.88	8.8	Regular, elimina puntualment zones de pàtina
--	BRUTÍCIA COMPACTADA	150	2	0.85	5.7	Bo
--	BRUTÍCIA COMPACTADA	10	3	0.066	6.6	Bo

(1) dades per mesura puntual d'energia

- a la cala A, zona que corresponia amb dipòsits superficials de brutícia de poc gruix però amb gran adherència al material, es van fer servir els paràmetres assenyalats amb un bon resultat visual. Tal i com s'observa, es manté la tonalitat de la pàtina ocre-siena, en contrast amb la zona 1 que presenta la textura i coloració de la pedra, després d'haver perdut la pàtina i el material petri superficial per rentat d'aquesta zona decorativa.
- a la cala B, corresponent a la zona amb dipòsits compactats de brutícia per sobre d'una crosta negra de poc gruix, els paràmetres van ser els assenyalats en la taula amb un bon resultat visual. En el moment de realitzar la neteja semblava, com si en zones puntuals, la pàtina fos eliminada, encara que després es va poder comprovar que es tractava de zones en les que ja estava alterada i no es conservava.
- a la zona C, on es va fer una petita cala per confirmar o no els resultats obtinguts amb els fragments despresos amb els que s'havia assajat prèviament, a causa del gruix total dels diferents dipòsits, va ser necessari augmentar l'energia per poder aconseguir l'efecte de neteja encara que, com s'havia comprovat, amb aquesta energia s'eliminava la pàtina.





11. Detall de la neteja a la torre de la catedral de Múrcia  
(Fotografia: Manuel Iglesias).

De les proves realitzades es va poder determinar que, amb el paràmetres d'energia assenyalats, la neteja es podia realitzar d'una forma correcta. Els problemes apareixien en les zones de major gruix de brutícia i crosta negra amb gran adherència al substrat, on les energies proposades donaven uns rendiments molt baixos i, si s'augmentava, es malmetia la pàtina. Es va optar per fer proves amb energies elevades per reduir els gruixos de les capes superiors i, en el moment en què s'observava que s'estava arribant a la capa de brutícia en contacte amb la pàtina, es desfocalitzava el feix per disminuir l'energia, podent apreciar que no es produïa cap lesió. Així i tot, amb la finalitat d'optimitzar el rendiment del làser, en aquestes zones de gruix i adherència importants, era aconsellable una reducció prèvia de la brutícia mitjançant microprojectió o algun altre sistema mecànic, sense arribar a la pàtina, i finalitzar la neteja amb el làser.

Actualment, el projecte està en fase de revisió per determinar la forma definitiva d'execució dels treballs.

## BIBLIOGRAFIA

M. I. COOPER, *Laser cleaning in Conservation: An Introduction*. Oxford: Butterworth Heinemann, 1998.

M. I. COOPER, J.H. LARSON, "The use of laser cleaning to preserve patina on marble sculpture". *The Conservator*, 20 (1996).

M. I. COOPER et al., "The use of laser energy to clean pollutants stone sculpture". *Journal of Photographic Science*, 40 (1992), p. 55-57.

M. I. COOPER et al., "Characterization of laser cleaning of limestone". *Optics and Laser Technology*, 27 (1995), p. 69-73.

R. M. ESBERT et al., "Características de la piedra que permiten valorar los efectos de la limpieza con láser". *I Congreso del GEHC*. València, 2002, p. 363-367.

C. RODRÍGUEZ-NAVARRO et al., "Laser cleaning of stone materials: an overview of current research". *Reviews in Conservation*, 4. Londres: IIC, 2003, p. 65-82.

B. SÁIZ, "La tecnología láser aplicada a la conservación y restauración". *Loggia*, 4 (1997), p. 76-81.

*Tecniche e sistemi laser per il restauro dei beni culturali*. Kermesquaderni. Florència: Nardini, 1998.

C. WEEKS, "The Portail de la Mère de Dieu of Amiens Cathedral : Its Polychromy and Conservation". *Studies in Conservation*, 43, p. 101-108.





12. Detall d'una de les cales realitzades a la torre de la catedral de Múrcia (Fotografia: Manuel Iglesias).

## Limpieza de materiales constructivos con láser Nd:YAG. Un ejemplo de aplicación

En el siguiente artículo se comentan los principios generales de la técnica láser en la limpieza de materiales constructivos y se expone una de las experiencias de limpieza realizadas con el equipo Maestro IV sobre material pétreo.

**Manuel Iglesias Campos.** Restaurador. Materias Primas Abrasivas, SL. miglesias@mpa.es

### INTRODUCCIÓN

El desarrollo que han tenido los equipos láser para la limpieza de materiales en el campo de la restauración, ha favorecido que su uso en algunas intervenciones, principalmente sobre materiales constructivos, haya ido en aumento. A pesar de todo existe, por el momento, un desconocimiento sobre las posibilidades de esta técnica y sus limitaciones.

### Elementos que componen un equipo láser

Un láser es un aparato o dispositivo que produce una radiación electromagnética como la luz natural, formada por fotones; pero no es una luz normal ya que está amplificada, tiene una mayor energía, sus ondas vibran en el mismo periodo y es monocromática, puesto que produce y transmite una única longitud de onda o un intervalo muy estrecho.

En líneas generales, y con las diferencias lógicas entre modelos, los láseres constan de distintas partes para poder generar la luz o energía que nos permite realizar la limpieza. El láser propiamente dicho está compuesto por:

- fuente de bombeo: por descarga eléctrica, reacción química o absorción de luz.
- medio amplificador o medio activo: puede ser un gas, sólido, líquido o semiconductores, y es donde se produce una emisión estimulada de la luz.
- cavidad resonante: formada por dos espejos enfrentados que obligan a la luz a atravesar sucesivas veces el medio activo (véase la fotografía 1).

### Tipos de láser para limpieza en restauración

Dependiendo del medio activo que lo genere, podemos distinguir diferentes tipos de láseres. Cada uno de ellos presenta unos parámetros de emisión diferentes que son los que lo definen y determinan su aplicación sobre los diferentes materiales o alteraciones. En el campo de la limpieza en restauración, las longitudes de onda que tienen un mayor interés o aplicación hasta el momento son las siguientes:

MEDIO ACTIVO	LONGITUD DE ONDA	APLICACIONES
Ar KrF XeCl	196 nm (UV) 278 nm (UV) 308 nm (UV)	Láseres de excímeros, con los que se están limpiando obras de arte policromadas, respetando pigmentos y aglutinantes, eliminando barnices envejecidos o sucios.
Nd:YAG	1064 nm (IR)	Limpieza de materiales constructivos.
Er:YAG	2940 nm (IR)	Eliminación de barnices de diferentes superficies sobre lienzo y madera.

### EL LÁSER DE Nd:YAG

Los láseres que se están empleando principalmente para la limpieza de materiales constructivos son láseres de estado sólido, que producen una longitud de onda de 1064 nm (infrarrojo), y sus armónicos en algunos equipos, cuyo medio activo es un cristal de YAG, barra de cristal de granate de