

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).

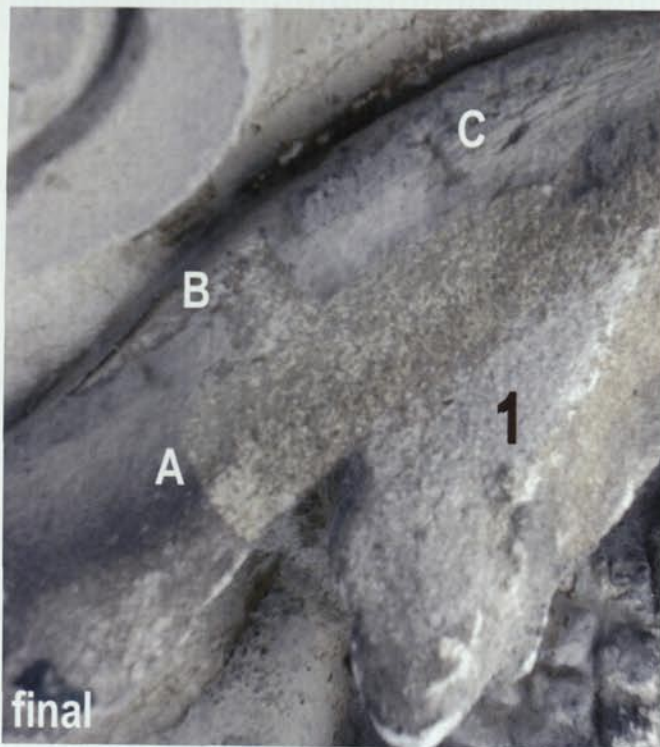
Tipos de láser para limpieza en restauración

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



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



itrio y aluminio (Y_3AlO_5) dopado con un 1% de ión Nd^{3+} . El sistema de bombeo puede ser por lámpara o por diodos y llevan un sistema de refrigeración externo o interno. La salida es pulsada y la transmisión del haz hacia el exterior se puede realizar por brazo o por fibra óptica, pudiendo realizar la proyección de la radiación por pistola o por puntero (véase la fotografía 2).

Parámetros de la emisión láser para trabajos de limpieza de materiales constructivos

Los parámetros principales que definen la emisión láser determinan también la interacción láser-materia y serán característicos del tipo de láser que se utilice. Estos parámetros son:

- longitud de onda: influye en la energía y determina el color de la radiación. Como se ha comentado, para la limpieza de materiales constructivos se utilizan habitualmente láseres de estado sólido cuya longitud de onda está en el infrarrojo 1064 nm (y sus armónicos conseguidos por subdivisión de esta longitud).
- duración del pulso: tiempo de la emisión en cada pulso expresada en nanosegundos (ns) o microsegundos (ms). Habitualmente se utilizan láseres pulsados; el efecto de los láseres de pulsos largos (mayores a microsegundos) es el de evaporar el material, mientras que los de pulsos cortos (nanosegundos) producen ondas de choque y fenómenos mecánicos que hacen que las capas adheridas a la superficie se desprendan.
- frecuencia de repetición: número de pulsos contenido en un segundo expresado en hercios (Hz) en un láser pulsado. Si la frecuencia es lo suficientemente alta, los disparos del láser se superponen entre sí, mientras que si la frecuencia es baja, los pulsos no se solapan.
- diámetro del haz: tamaño del spot a la salida del haz láser.
- superficie iluminada: superficie de actuación sobre el material.
- energía por pulso: energía emitida por el láser en un solo pulso, expresada en milijulios (mJ). La energía liberada en cada pulso de luz es una magnitud variable. Los láseres Nd:YAG que se emplean para este tipo de aplicaciones no tienen mucha energía por pulso, aunque esta poca energía se asocia a una elevada potencia, ya que es emitida en un intervalo de tiempo muy corto.
- densidad de energía o fluencia: cantidad de energía sobre unidad de superficie, expresada en julios por centímetro cuadrado (J/cm^2).

Estos parámetros deben de ser controlados a fin de que la limpieza se realice de la forma más correcta sin dañar al material, pero que también se haga de la forma más rápida y efectiva posible.

LIMPIEZA DE MATERIALES CONSTRUCTIVOS MEDIANTE LÁSER Nd:YAG

La limpieza con láser se produce por una onda infrarroja —en el caso de 1064 nm u otras, según la longitud de onda— de alta energía que es absorbida por las capas de suciedad en un proceso de fotoablación, lo que supone una pérdida de materia superficial —suciedad— por paso del estado sólido a gas (sublimación) [véase la fotografía 3].

La limpieza tiene lugar por la combinación de varios efectos, entre ellos:

- los efectos fototérmicos: la radiación incidente en la superficie es absorbida por la capa de suciedad y el material, aumentando la temperatura de la superficie de forma localizada y provocando su fusión y vaporización con formación de plasma.
- los efectos fotomecánicos y fotoacústicos: tras la formación de plasma se producen ondas de choque mecánicas y acústicas que se propagan por la suciedad y provocan la eliminación de las partículas.

Como consecuencia de estos efectos, durante el proceso de limpieza, se ponen de manifiesto dos fenómenos característicos: la formación de plasma en las inmediaciones de la zona de impacto y la generación de una onda de choque provocada por el plasma que se transporta a través del medio en forma de sonido peculiar, que cesa al término de la interacción.

Los mecanismos que nos permiten realizar una limpieza láser pueden llegar a ser muy diferentes pero también muy selectivos, en función de los parámetros que empleemos en la misma, del material y de la suciedad que deseamos eliminar (véase la fotografía 4).

El proceso físico de interacción usando láseres pulsados se clasifica según la densidad de energía y su absorción por la materia, produciéndose distintos regímenes en función de la cantidad de energía absorbida. En un *régimen termoelástico*, en el que se trabaja con bajas densidades de energía, la mayoría de la radiación se absorbe por la suciedad y el material recibe muy poca; en un *régimen de vaporización explosiva*, donde la densidad de energía es mayor, se pueden producir cambios mineralógicos en los materiales que serán apreciados como cambios cromáticos; y en un *régimen de choque láser*, con mayores densidades de energía, se puede llegar a causar daño en el sustrato con pérdidas de material.

El mecanismo o combinación de mecanismos dependerá de una serie de factores como la densidad de energía incidente, el tipo de depósitos y la fortaleza de las uniones entre las partículas de suciedad y entre éstas y el sustrato. Se debe pretender siempre emplear el mecanismo que proporcione la limpieza más selectiva posible, reduciendo al máximo el riesgo de causar daño (véase la fotografía 5).

La limpieza con láser se basa en la diferencia de absorción de la energía luminosa o fotónica de los distintos materiales teniendo, por lo tanto, una alta dependencia de los colores. Las capas de color oscuro, normalmente suciedad, absorben prácticamente toda la energía, mientras que las capas claras absorben una menor radiación, ya que la mayoría es reflejada. Lógicamente esto nos está señalando que los mejores resultados se obtendrán en limpiezas sobre un sustrato de color claro, por ejemplo de carbonato cálcico, con una suciedad de color oscuro, costra negra. Sobre otros materiales constructivos de coloración oscura los resultados serán diferentes pudiendo, por una parte, no eliminarse totalmente la suciedad, o bien producir una absorción importante de energía por parte del sustrato y favorecer alteraciones o pérdidas de materia en el mismo.

La diferencia de absorción hace que, en un principio, el proceso de limpieza se autointerrumpa. Al haber eliminado las capas de suciedad, los siguientes pulsos láser emitidos sobre la zona limpia, con la densidad de energía apropiada, son reflejados por la superficie evitando daño al sustrato. Es en este sentido por lo que se habla de la técnica láser como técnica de limpieza autolimitativa.

Otro factor a tener en cuenta en este tipo de limpiezas es el umbral de ablación de los materiales, tanto de la suciedad como del sustrato. Si el umbral de ablación de la suciedad es más bajo que el del sustrato, la limpieza será selectiva, aumentando esta selectividad cuanto mayor sea la diferencia. Del mismo modo, si el umbral de ablación de la capa de suciedad es igual o mayor que el del material pétreo, el proceso de limpieza no será selectivo; es decir, existirá el riesgo de dañar el soporte, encontrándonos con la misma problemática que con otros métodos tradicionales.

Es necesario, también, tener presente que los materiales no tienen un único componente, sino que son diversos los elementos que lo constituyen; la acción de la radiación será, por lo tanto, diferente sobre cada uno de los minerales que forman el material a limpiar, y será necesario determinar la densidad de energía que no afecte a ninguno de ellos.

Todos estos aspectos nos están indicando que, para poder hablar realmente de la inocuidad de la técnica láser, se precisa la realización de ensayos para



caracterizar los materiales y valorar la acción de la limpieza, pudiendo así determinar de forma concreta los parámetros a utilizar en los trabajos.

Habitualmente, al hablar de limpieza con láser, se está hablando de la acción del rayo sobre la suciedad en seco, pero se ha podido comprobar que humedeciendo la superficie a limpiar con agua nebulizada, o aplicada con pincel, la limpieza se realiza de forma más rápida y genera una superficie más uniforme en la eliminación de la suciedad. El agua es absorbida por las partículas que componen la suciedad y penetra entre sus poros aumentando el proceso de la ablación. Esto puede estar producido por un aumento de la diferencia de coloración entre suciedad y sustrato, al haberse humedecido estas capas, o por el aumento del efecto mecánico y térmico al agitar la molécula de agua en el espacio poroso de la suciedad. De todos modos, el agua actúa como un refrigerante, por lo que los efectos que se puedan inducir por el calor, quedan minimizados. El uso del agua es recomendable cuando la suciedad presenta una fuerte adherencia con el sustrato y la limpieza con el láser en seco no termina de eliminar todos los residuos.

La limpieza, en todo momento, puede ser controlada por el restaurador, variando algunos de los parámetros de la emisión como son la potencia, la frecuencia de repetición y la focalización-desfocalización del haz, con lo que se pueden conseguir diferentes densidades de energía, incidiendo sobre la superficie a tratar (véase la fotografía 6).

CONCLUSIÓN

Las diferencias entre la limpieza láser y la limpieza mediante las técnicas tradicionales son evidentes. Las técnicas tradicionales incorporan a la limpieza un agente extraño a la superficie del material para realizar su función. Son capaces de eliminar capas de suciedad, pero su actuación se prolonga también en el soporte. Así, por ejemplo, los métodos basados en agua o químicos pueden producir solubilización de componentes del material, cambios de coloraciones, eflorescencias..., y los métodos mecánicos pueden producir pérdidas de fragmentos, abrasión..., si no se realizan con los parámetros precisos.

En la limpieza láser no actúa ni agua (de la forma tradicional), ni productos químicos, ni abrasivos; son fotones que interactúan con la suciedad y el material. Se trata de una técnica más respetuosa con el soporte que las técnicas tradicionales (véase la fotografía 7).

La existencia de la técnica láser no anula en absoluto el empleo de las técnicas tradicionales. Se trata de una herramienta más, a disposición de los restauradores, que deberá usarse cuando las condiciones lo requieran, de forma individual o en combinación con otras técnicas.

UN EJEMPLO DE APLICACIÓN: CATAS DE LIMPIEZA EN LA TORRE DE LA CATEDRAL DE MURCIA

Una de las experiencias realizadas es la limpieza de diferentes elementos decorativos en la torre de la catedral de Murcia (véase la fotografía 8).

Esta torre fue mandada edificar en 1519 y está formada por diferentes cuerpos que corresponden a distintos periodos cronológicos. Los dos primeros constituyen dos fases de un mismo estilo. El primer cuerpo, muy decorado (véase la fotografía 9), es obra de Francisco y Jacobo Florentino. En él encontramos pilastras corintias pareadas en los extremos, con numerosos grutescos, hornacinas de diversas tipologías y con una gran ventana central de marco muy decorado. El segundo cuerpo, obra de Jerónimo Quijano (1526), sigue el mismo esquema, adaptado a su época, con pilastras jónicas estriadas mucho más sobrias aunque, en cambio, es mucho más rico en el doble ventanal central. En 1546 se interrumpen las obras hasta 1765, cuando Juan de Gea y José López inician el cuerpo de los cuatro templos angulares y el de las campanas que, pese a los detalles barrocos, concuerdan con los cuerpos bajos. En 1782 se remata finalmente la torre con otro cuerpo y una cúpula elevada de tipología neoclásica, según modelo de Ventura Rodríguez y ejecutada por un arquitecto local que la acaba en 1793.

En el momento de realizar los ensayos, se estaba actuando en el primer y segundo cuerpo, ya que los superiores se habían restaurado en etapas de intervención anteriores.

El material constructivo empleado en la torre es una calcarenita de grano fino y de color ocre claro, sobre la que se había aplicado una pátina realizada con cera y pigmentos, según datos aportados por la Dirección Facultativa del proyecto, con tonalidades siena.

El estado de conservación del material y de su pátina era diferente según su ubicación, y las alteraciones eran diversas. Centrándonos únicamente en las relacionadas con la actuación de limpieza a realizar, hay que remarcar los diferentes tipos de fijaciones de depósitos superficiales y la arenización del material en algunas zonas decorativas.

Los depósitos superficiales de escasa adherencia habían sido eliminados en un tratamiento previo de limpieza mediante pincelado y cepillado, con adición de agua nebulizada según los casos, por lo que, en el momento de hacer las catas de limpieza, éstos no son observables.

En relación con la fijación de los depósitos, hay que señalar que el grado de suciedad y compactación era diverso; desde depósitos de escaso grosor pero con gran adherencia al material, a depósitos compactados y costras negras. La fijación y ubicación de los mismos estaba directamente relacionada con los volúmenes de los diferentes motivos decorativos y según su exposición al lavado de las aguas pluviales; así, en las zonas más profundas y rehundidas de la decoración, es donde presentaban un mayor grosor, compactación y adherencia con el sustrato. En estas zonas de depósitos de cierto grosor, la pátina presentaba pérdidas puntuales y no se conservaba de manera uniforme en buena parte de la superficie.

También se detectó otra zona de pérdida de pátina original en áreas en las que, por la configuración de la decoración y el efecto de la precolación del agua de la lluvia, se habían generado pátinas de decoloración por lavado, que habían dejado un rebaje en el material pétreo y una superficie ligeramente arenizada.

Por lo tanto, el objetivo de los ensayos, en la fase en que se encontraban los trabajos, era el de eliminar los depósitos de suciedad compactada con gran adherencia al material pétreo y zonas de costra negra recubierta con depósitos de suciedad compactada. Todo esto, evidentemente, sin alterar la pátina aplicada.

Previamente al planteamiento de utilización del láser en la obra, se habían realizado catas de limpieza con métodos mecánicos (microtorno, bisturí...) y diferentes apósitos, para ver la posibilidad de realizar este tipo de tratamientos de limpieza, pero sin obtener un resultado satisfactorio con relación a la eliminación de los depósitos con los sistemas mecánicos, y al mantenimiento de la pátina con los sistemas químicos.

Los ensayos se realizaron con el equipo *Maestro IV* de MPA, S.L. (véase la fotografía 10). Antes de realizar las pruebas en el andamio, se procedió a la realización de muestras con pequeños fragmentos desprendidos de las decoraciones y sin ubicación localizada, para tener una primera apreciación de los parámetros óptimos para poder realizar la limpieza sin dañar el material. Se partió de energías bajas para realizar estas primeras pruebas debido a que, por las características y composición de la pátina, la podían hacer muy alterable a la radiación. En estos primeros ensayos se pudo comprobar visualmente que no era conveniente superar los 5.5-6 mJ de energía en la limpieza (ya que si no, la pátina era eliminada) y que estos mismos varesos resultaban óptimos con relación a la velocidad de limpieza. También se pudo comprobar que la utilización de agua para humectar la suciedad antes de recibir la radiación, generaba una superficie más uniforme en la limpieza y que ésta se realizaba de forma más rápida, por lo que en las catas se nebulizaba previamente la superficie con agua destilada, dejando que ésta fuera absorbida por la suciedad e iniciar la proyección con el haz láser (véase la fotografía 11).



A partir de los ensayos, y tras la observación visual del área tratada, se pudo concluir que las energías óptimas para esta limpieza mediante el equipo *Maestro IV* no debían superar los 6,3 mJ de energía. Las variaciones realizadas en la frecuencia influyen en la rapidez de la eliminación de los depósitos.

En la fotografía 12 se muestran tres de las catas referenciadas en la siguiente tabla:

CATA	ALTERACIÓN	FRECUENCIA (Hz)	POSICIÓN (Width)	P(W)	E(mJ) (1)	RESULTADO
A	SUCIEDAD COMPACTADA DE ESCASO GROSOR	200	3	1.1	5.5	Bueno
B	SUCIEDAD COMPACTADA DE MAYOR GROSOR	200	4	1.25	6.3	Bueno
C	SUCIEDAD COMPACTADA + COSTRA NEGRA	100	3	0.88	8.8	Regular, elimina puntualmente zonas de pátina
--	SUCIEDAD COMPACTADA	150	2	0.85	5.7	Bueno
--	SUCIEDAD COMPACTADA	10	3	0.066	6.6	Bueno

(1) datos por medición puntual de la energía

- en la cata A, zona que correspondía a depósitos superficiales de suciedad de escaso grosor pero con gran adherencia al material, se utilizaron los parámetros indicados con un buen resultado visual. Tal y como se observa, se mantiene la tonalidad de la pátina ocre-siena, en contraste con la zona 1 que presenta la textura y coloración de la piedra, tras haber perdido la pátina y el material pétreo superficial, por lavado de esa zona decorativa.

- en la cata B, correspondiente a la zona con depósitos compactados de suciedad por encima de una costra negra de escaso grosor, los parámetros fueron los señalados en la tabla con un buen resultado visual. En el momento de realizar la limpieza parecía como si, en zonas puntuales, la pátina fuese eliminada, aunque después se pudo comprobar que se trataba de zonas en las que ya estaba alterada y no se conservaba.

- en la zona C, donde se hizo una muy pequeña cata a fin de confirmar o no los resultados obtenidos con los fragmentos sueltos con los que se había ensayado previamente, debido al grosor total de los diferentes depósitos, fue necesario aumentar la energía para poder conseguir el efecto de limpieza aunque, como se había comprobado, con esa energía se eliminaba la pátina.

De las pruebas realizadas se pudo determinar que, con los parámetros de energía ensayados, la limpieza se podía realizar de una forma correcta. Los problemas aparecían en las zonas de mayor grosor de suciedad y costra negra con gran adherencia al sustrato, donde las energías propuestas daban unos rendimientos muy bajos y, si se aumentaban, se dañaba la pátina. Se optó por hacer pruebas con energías elevadas para rebajar los grosores de las capas superiores y, en el momento en que se observaba que se estaba llegando a la capa de suciedad en contacto con la pátina, se des-focalizaba el haz para disminuir la energía, pudiendo apreciar que no se producía daño. De todos modos, con la finalidad de optimizar el rendimiento del láser, en estas zonas de espesor y adherencia importantes, era aconsejable una reducción previa del grueso de la suciedad mediante microproyección u otro sistema mecánico, sin llegar a la pátina, y finalizar la limpieza con el láser.

Actualmente el proyecto está en fase de revisión para determinar la forma de ejecución de los trabajos.

BIBLIOGRAFÍA

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 pollutes 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*. Valencia, 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. Florencia: 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.

FOTOGRAFÍAS

1. Estructura básica de un equipo láser: A) fuente de bombeo. B) medio activo. C) cavidad resonante (Fotografía: Agustín García).

2. Equipo láser Nd:YAG Maestro IV de MPA, SL. Sistema de bombeo por diodos, refrigeración interna, guiado del haz por fibra óptica y puntero (Fotografía: Agustín García).

3. Incidencia del haz láser sobre suciedad en material pétreo (Fotografía: Agustín García).

4. Limpieza de costra negra en material calcáreo. Restauración de la cruz de Santa Ana de Les Escaldes de Andorra (Fotografía: Mireia Garcia Garcia-Cairó).

5. Restauración de la cruz de Santa Ana de Les Escaldes de Andorra (Fotografía: Mireia Garcia-Garcia-Cairó).

6. Panel de control del equipo Maestro IV (Fotografía: Agustín García).

7. Ensayos para propuesta de intervención en el pórtico de la catedral de Santa María de Vitoria-Gasteiz (Fotografía: Restauración de Patrimonio Petra, SL).

8. Vista de la torre de la catedral de Murcia desde el ábside (Fotografía: Manuel Iglesias).

9. Detalle de la decoración de una de las zonas del ensayo en el primer cuerpo de la torre de la catedral de Murcia (Fotografía: Manuel Iglesias).

10. Proceso de limpieza en zonas con costra negra en la torre de la catedral de Murcia (Fotografía: Manuel Iglesias).

11. Detalle de la limpieza en la torre de la catedral de Murcia (Fotografía: Manuel Iglesias).

12. Detalle de una de las catas realizadas en la torre de la catedral de Murcia (Fotografía: Manuel Iglesias).