

Estudio comparativo de la técnica de restauración láser con otros métodos de intervención en objetos de hierro arqueológico

Comparative study of laser technology and other intervention techniques in the conservation of archaeological iron objects

Ana Isabel Pardo Naranjo

Joaquín Barrio Martín

María Cruz Medina Sánchez.

Universidad autónoma de Madrid (UAM)

joaquin.barrio@uam.es

Resumen

La finalidad de este trabajo es poner de relieve que las nuevas tecnologías como el LASER, que nos están llegando al sector de los bienes patrimoniales arqueológicos, pueden aportar soluciones a problemas de restauración de los metales afectados por procesos de corrosión muy avanzados, que otros procedimientos no habían conseguido resolver con suficientes garantías o bien que el resultado obtenido no era el más adecuado para una correcta conservación de estas piezas procedentes de los yacimientos arqueológicos.

Pero en modo alguno, la implantación de estos métodos innovadores debe hacerse de manera aislada, sino en estrecha colaboración y complementación con las técnicas ya conocidas. No deben ser nunca considerados un sustituto sino un apoyo importante, a veces imprescindible, en la tarea común de conservar el vulnerable Patrimonio Arqueológico Metálico.

Para hacer una valoración de manera más clara de la eficacia de la técnica LASER frente a las tradicionales, realizamos la presentación en comparativa de dos casos prácticos. Esto es, la restauración mediante técnicas distintas de dos peines cardadores de hierro de muy similares características tipológicas y ambos de cronología prerromana: el primero procedente del poblado carpetano de Santorcaz (Madrid) y el segundo del hábitat vacceo de Montealegre de Campos (Valladolid).

Palabras clave: Conservación, restauración, láser, microabrasímetro, hierro arqueológico.

Abstract

The aim of this paper is to show the effectiveness of LASER technology, recently used in conservation of archaeological heritage. It is a valuable tool during the cleaning process of metals that suffer an advanced corrosion state, which is very difficult to treat with other procedures that offer few guarantees of success, or entail unsatisfying results.

Nevertheless, this new methodology should not be employed isolated from the traditional techniques; on the contrary they should complement one another. Hence they cannot be considered a substitute but a support, sometimes indispensable, in the conservation of metallic archaeological heritage.

In order to explain the efficacy of LASER in contrast to traditional techniques, we present the conservation-restoration procedures of two carding combs made of iron, both of similar typology and belonging to Pre-Roman chronology. One of them was excavated in the Carpetanian town of Santorcaz (Madrid) and the other one in the Vaccean habitat of Montealegre de Campos (Valladolid).

Key words: Conservation, restoration, laser, microsandblaster, archaeological iron.

1. INTRODUCCIÓN:

OBJETIVOS Y CRITERIOS DE RESTAURACIÓN

Al día de hoy se puede afirmar que la aplicación de la tecnología LASER en conservación-restauración de metales arqueológicos es una opción muy relevante en el proceso de intervención en objetos de hierro cuyo estado de conservación es muy deficiente, pudiendo incluso haber llegado a perder por completo su núcleo metálico, con lo que ello supone para enfrentarse a una restauración eficiente. En estos casos, no es posible garantizar su futuro sólo con técnicas de conservación preventiva o una intervención mínima, sino que resulta imprescindible realizar un proceso exhaustivo de restauración (Barrio 2010).

En piezas en situación muy parecida, como sucedió con el peine de Santorcaz que presentamos en este trabajo, el proceso generalmente de restauración, se ha llevado a cabo con variados métodos mecánicos, que aun siendo válidos, no han resultado efectivos en muchos casos para preservar con detalle las superficies originales, cuando éstas se han transformado en capas de magnetita y otros productos de corrosión del hierro generados en condiciones de enterramiento prolongado.

La metodología de intervención en piezas de hierro muy mineralizadas ha venido pivotando durante los últimos años en los procedimientos mecánicos de diversa naturaleza: manuales, por microabrasión, con equipos de ultrasonidos... Su capacidad de ser controlados en todo momento por el restaurador les concedía un plus de ventaja a la hora de la elección; sólo muy esporádicamente se echaba mano de métodos químicos puntuales por el temor a poder perder cualquier rastro de las películas originales. Éstos quedan subordinados a la aplicación de inhibidores de la corrosión o protectores de la superficie activa frente a las condiciones ambientales.

Lejos de restar importancia a los métodos mecánicos o químicos tradicionales, el LASER debe ser entendido como una herramienta más, que puede y debe ser utilizada en relación con aquellos, especialmente en las fases del trabajo restaurador en que sus resultados sean mejores. Una combinación de técnicas que debe articularse y compensarse según la situación de cada pieza que se interviene. De cualquier forma, es importante resaltar que el resultado positivo de los tratamientos con técnicas LASER depende del equipo utilizado, de la naturaleza compositiva del objeto, su tecnología, su estado de conservación y la topografía de su superficie (Koh y Sárady 2003; Barrio *et al.* 2006; Chamón *et al.* 2007).

Desde un primer momento fue intención del grupo de investigación del Proyecto (Nota 1) no sólo aplicar la técnica LASER con las condiciones conocidas y derivadas de la dilatada experiencia en otros campos de los bienes patrimoniales (Asmus 1978; Cooper 1998; Siano 2007), como en los materiales pétreos,

sino también evaluar el método sobre los distintos materiales metálicos que se documentan en los registros arqueológicos: hierro y decoraciones de otro metal sobre el hierro, cobre, bronzes, dorados, plata o plomo. Para ello nos marcamos unos objetivos muy claros de la aplicación del láser en nuestros objetos metálicos: capacidad de eliminación progresiva; comprobación de resultados estéticos en comparación con otras técnicas; incidencia sobre la estructura externa de la materia por comprobada en secuencia metalográfica; caracterización y evaluación analítica sobre los cambios de la estructura mineralógica (especies minerales generadas, fusiones, microfusiones, etc...). Esta oportunidad nos la brindaba a la perfección contar con por los dos peines de cardar que nos ocupan y así poder comprobar los resultados obtenidos con técnicas de restauración distinta sobre dos objetos de similares características técnicas, compositivas y de estado de conservación del metal.

Criterios de restauración

Tampoco hemos querido dejar de tener en cuenta algunos principios que sustenten la intervención en objetos patrimoniales de las características de estos dos peines cardadores; sería a modo de una "ética de restauración". Estos principios tienen la ventaja de servir de guía mientras se desarrolla el trabajo; de ahí su importancia y utilidad. Enumerados brevemente éstos serían los criterios que hemos seguido: mantenimiento de la autenticidad, respeto de la pátina y superficie original, intervención mínima ajustada a las necesidades de la pieza, multidisciplinariedad en la investigación exhaustiva de los problemas y causas de deterioro, conservación preventiva que garantice su seguridad física durante y después de la restauración, evaluación constante de las técnicas de vanguardia usadas en su restauración (Barrio 2013: 148-152).

2. CONTEXTO ARQUEOLÓGICO, DESCRIPCIÓN Y ESTADO DE CONSERVACIÓN PEINE CARDADOR DE EL LLANO DE LA HORCA, (SANTORCAZ, MADRID)

Este peine de cardar fue recuperado en el yacimiento carpetano de El Llano de la Horca (Santorcaz, Madrid), durante las excavaciones sistemáticas que desde el año 2000 lleva a cabo el Museo Arqueológico Regional de Madrid (Nota 2). Responde a la signatura del MAR: LLH'05, 26-8-05, Recinto 4, U.E. 1408, peine B. Su hallazgo es del 2005 y fue restaurado en el 2006, por uno de nosotros (Ana Isabel Pardo Naranjo) en el taller de Conservación y Restauración del Museo Arqueológico Regional de Madrid.

El estado actual de su investigación permite considerar este hábitat como un verdadero *oppidum* de la Carpetania, con una intensa vida que se desarrolla entre los siglos III-I a.C., pudiendo acreditar que su

momento de mayor intensidad de ocupación estaría entorno al siglo II a.C. (Ruiz Zapatero *et al.* 2012: 85-125; 137-142).

Este poblado carpetano ha deparado una estructura urbana bien articulada. Las casas son de dimensiones notables (70-90 m²), con planta rectangular, adosadas unas a otras por medianeras y traseras, formando manzanas compactas que se abren a unas calles anchas, orientadas conforme dos ejes de orientación NO-SE y NE-SO. Son viviendas compartimentadas conforme el modelo habitual en estos poblados del final de la Segunda Edad del Hierro en el centro de la P. Ibérica. Así pues, disponían de porche, zaguán, habitación central con hogar, espacio lateral de “talleres” y una habitación última como espacio de almacén o despensa.

Los utensilios metálicos propios de la economía doméstica son muy abundantes en este hábitat y entre ellos se recogen algunos propios de la actividad de textil, que tendría como materia prima la lana y tal vez el lino. Vinculados a esta producción artesanal estarían varios peines de cardar, entre lo que se encuentra el tratado en este trabajo, incluido con el nº 197 en el Catálogo (*op.cit.* 341).

La pieza presentaba una composición con material inorgánico y orgánico. El peine estaba formado por una serie de púas (48) forjadas en hierro y dispuestas en una fila en zig-zags. Para su sujeción disponía de una doble estructura transversal formada por dos chapas; la superior era de una aleación de base cobre y a

ella se soldaban las púas de hierro mientras que la inferior, de hierro, estaba perforada para servir como guía, sujeción y pasante de las púas. El empaque de este peine de cardar, dispuesto entre las dos chapas, era de madera y estaría rematado a ambos lados por abrazaderas de cobre; de las que apenas han quedado algunos restos.

Estado de conservación

La técnica de forja aplicada a las púas puede haber incidido notablemente en el estado de conservación, así como en la formación de los productos de corrosión sobre la superficie del hierro como la magnetita.

El metal presenta una mineralización completa y tenía adherida por corrosión una punta de lanza de hierro que se detectó en el examen radiológico; una inspección que fue básica para determinar el estado y diferenciar ambas piezas. La extracción en bloque que se aplicó a la pieza in situ durante la excavación permitió recibirla en el taller en condiciones aceptables para proceder a su estudio y conservación. Lo que confirma que las medidas de conservación preventiva adoptadas en el yacimiento son determinantes para garantizar la mayor recuperación posible de objetos afectados por una intensa mineralización (fig. 1). De manera complementaria la imagen de RX nos permitió conocer su morfología y tomar medidas desde el principio para una buena manipulación durante la intervención restauradora.



Figura 1: Aspecto inicial del peine cardador de Santorcaz en su embalaje de transporte, donde apreciamos el paquete de concreciones y tierras que presentaba. Foto M.A.R. (Museo Arqueológico Regional de Madrid).

En la zona del enmangue conservaba restos de madera y de cobre metálico (fig. 2), que podría haberse beneficiado de la pila galvánica formada con el hierro que componía el resto de la pieza, éste, sin embargo se ha mineralizado por completo. La humedad aportada por la madera original también habría favorecido la acción de las sales y por tanto la evolución de la corrosión que ha sido prácticamente completa en el caso del hierro. De tal manera que pudimos determinar una situación de máxima fragilidad.

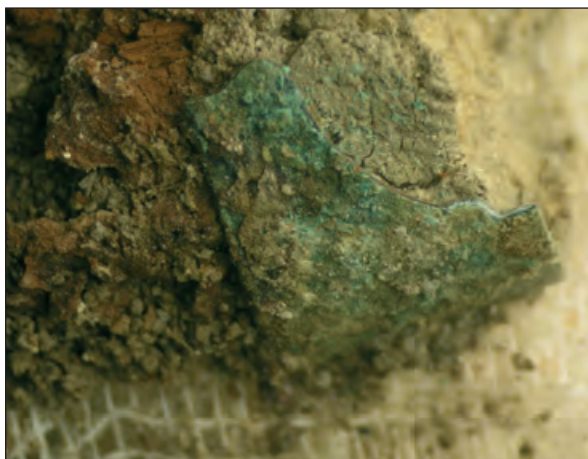


Figura 2: Detalle de los restos de la lámina de aleación de base cobre en las abrazaderas laterales del peine.
Foto M.A.R.

Peine de cardar de Montealegre de Campos

Entre los años 2008 y 2010 se realizaron en Montealegre de Campos (Valladolid) una serie de sondeos y excavaciones arqueológicas que propiciaron la exhumación de un barrio de la ciudad vaccea y parte de las construcciones romanas que estaban sellando a aquella (Nota 3). En el nivel de ocupación vacceo se pudieron documentar dos calles empedradas con sus respectivas aceras y los restos de once viviendas cuyos muros, de adobe y tapial, se conservaban en bastante mal estado, hasta una altura no superior a los . Este barrio sabemos que fue destruido por causa de un incendio, pero cuando este se produjo o bien ya estaba deshabitado, o a los residentes en el mismo les dio tiempo suficiente para retirar de sus casas los enseres domésticos, pues se han podido recuperar relativamente pocos en el interior de las casas (Blanco García *et al.*, 2011).

Uno de los escasos utensilios metálicos recuperados es un peine cardador. Se halló de forma aislada, es decir, sin otros elementos muebles con los que hubiera formado contexto, en el referido nivel de abandono de esta zona del poblado, sobre el suelo y bajo las cenizas del incendio que

acabó por destruir las casas. Es más, durante los trabajos de limpieza y restauración tuvieron que ser extraídos varios nódulos de carbón adheridos a las púas de hierro.

Analizando los materiales muebles vacceos más modernos que han sido recuperados, se puede decir que ese incendio acaeció bien en tiempos de las Guerras Sertorianas (82-. C.), bien durante las revueltas que sacuden toda esta zona del centro del Duero a mediados del siglo I a. C., por lo que el cardador estuvo plenamente en uso en las primeras décadas del ese siglo.

Este segundo peine de cardar está realizado completamente en hierro forjado, tanto las púas como las chapas de sujeción. Responde a una estructura básica similar a la anterior pero con algunas diferencias. Llevaba una chapa superior a la que se soldaron las púas (aproximadamente 37, ya que ha perdido algunas) y una chapa inferior perforada que sirve de pasante y guía. En este caso no se observa que la fila de púas estuviese dispuesta en zig-zags si no que siguen una línea continua y los dos lados se rematan con dos pletinas de hierro más anchas, que servirían, como en los peines actuales, de refuerzo evitando la rotura y deformación de las púas de los extremos. El enmangue de este peine también conserva restos de madera pero no se han observado elementos propios de las abrazaderas laterales de este mango.

Estado de conservación

El peine de cardar de Montealegre de Campos nos llega al SECYR incompleto, fragmentado y con pérdidas materiales (fig. 3). La falta de medidas de intervención *in situ* puede haber determinado un estado más deficiente que el de la pieza anterior. Al igual que en el peine de El Llano de la Horca la mineralización es total, aunque se observa una mayor dureza de las páti-



Figura 3: Estado inicial del peine de cardar de Montealegre de Campos. Foto SECYR UAM.

nas y la manipulación de los fragmentos es más fácil. El exterior de la pieza estaba recubierto de una amalgama de tierras y productos de corrosión del hierro (carbonatos y óxidos de forma mayoritaria) mientras que la superficie original se conservaba en forma de coraza externa y en su interior el metal se había transformado en hidróxidos pulverulentos (fig. 4) sin ninguna consistencia. Por poner un símil a modo de explicación podemos decir que el objeto sería como una *nuez* cuya cáscara es más resistente que su interior. Los restos de madera se limitan a improntas pulverulentas con falta de cohesión observables en la zona del empaque (fig. 5).

Para documentar su composición y descartar la presencia de otros metales, como en el caso del peine carpetano de Santorcaz, realizamos un análisis mediante LIBS (fig. 6). Los resultados nos confirmaron su composición de hierro en toda su estructura (Nota 4).

3. PROCESOS DE RESTAURACIÓN Y RESULTADOS

La restauración de hierros arqueológicos tiene como principal objetivo devolver la forma y dimensiones originales a la pieza para que, entre otras cosas, el estudio arqueológico de la misma pueda realizarse. Este objetivo es difícil de alcanzar ya que los productos de corrosión del hierro son especialmente deformantes y resistentes a la limpieza manual, siendo al mismo tiempo frágiles y con mucha tendencia a la ruptura. Es por esto que la limpieza de hierros arqueológicos requiere casi siempre la combinación de varios sistemas mecánicos, ya sean manuales o asistidos que nos permitan retirar la corrosión deformante para poder devolver a la pieza parte de su aspecto original, recordando siempre que la naturaleza material del objeto nunca volverá a ser lo que fue. Esta valoración es intrínseca a los metales y su capacidad de oxidarse y transformarse en el medio en el que se encuentren, especialmente en contextos arqueológicos.

Hasta la aplicación del láser en objetos metálicos arqueológicos, han sido las técnicas mecánicas de diversa naturaleza las que han monopolizado las intervenciones sobre las piezas de hierro. Pero la posibilidad actual y los buenos resultados que se van obteniendo con esta nueva técnica hacen posible que se puedan modificar los protocolos de intervención habituales en tratamientos de restauración de este tipo, con las ventajas que esto supone.

Peine cardador de El Llano de la Horca

La intervención del peine del Llano de la Horca se realizó en el Taller de Conservación y Restauración del Museo Arqueológico Regional de Madrid, con los equipos y los medios necesarios disponibles en ese momento para la restauración de objetos arqueológicos de hierro.

Una vez superado el proceso de observación y examen, se desarrolló en el taller una propuesta de intervención basada principalmente en la combinación de métodos mecánicos manuales con una limpieza más profunda con microabrasímetro, que nos permitiese retirar los productos de corrosión más duros y deformantes que impedían estudiar la tipología de la pieza.

El principal problema que nos planteaba la limpieza mecánica de la pieza es, como en todos los hierros arqueológicos, la dureza de los productos de corrosión



Figura 4: Detalle de la mineralización sufrida por el peine cardador del Montealegre de Campos; obsérvese los hidróxidos que rellenan el interior de las púas. Foto SECYR UAM.

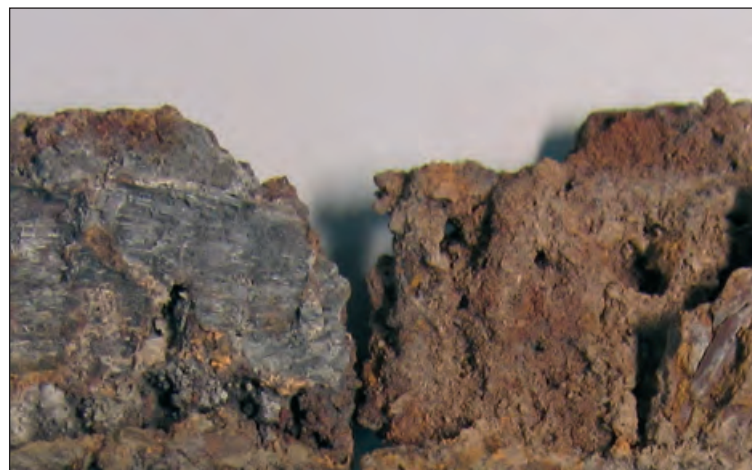


Figura 5: Detalle de los restos orgánicos del empaque. Se aprecia la dirección de la veta de la madera. Foto SECYR UAM.

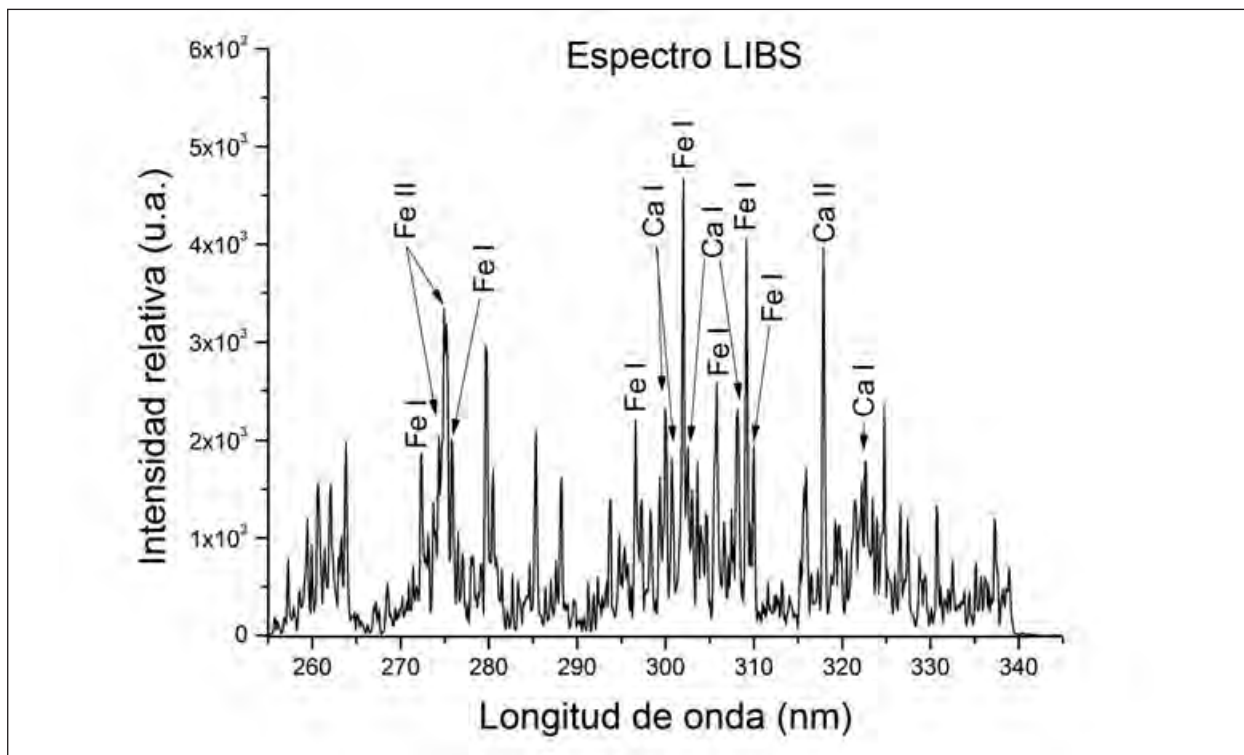


Figura 6: Gráfica con resultado del espectro de análisis LIBS para descartar la presencia de compuestos de cobre en el peine de Montealegre de Campos. SECYR UAM.

a retirar que es similar o mayor en algunos casos a la superficie original, por lo que ésta y el objeto en general sufren bastante durante los procesos mecánicos; la vibración y la presión con estos métodos durante los procesos de limpieza son difícilmente evitables.

La particularidad del objeto, formado por púas muy frágiles de hierro mineralizado completamente, complicaba mucho más las cosas de lo necesario para garantizar su integridad en el proceso, por lo que en todo momento, debido al inevitable desprendimiento y rotura de fragmentos durante el tratamiento mecánico, fue imprescindible simultanear la ejecución de la limpieza con trabajos de consolidación, adhesión y reintegración. Sin duda, este es uno de los inconvenientes de las técnicas mecánicas cuando se aplican sobre objetos en un estado de conservación de extrema fragilidad.

Protocolo de intervención

- Eliminación de protección temporal (engasado) aplicada *in situ*. A la hora de limpiar el otro lado sustituimos el engasado temporal por una lámina de cera dental para proteger en todo momento la estabilidad estructural de la pieza. (fig. 7)
- Limpieza mecánica manual (bisturíes, pinzas y pinceles) bajo lupa binocular, observando con todo detalle la superficie para documentar cualquier resto o impronta que nos pueda aportar información.
- Limpieza mecánica asistida con microabrasímetro cargado con microesferas de vidrio.

- Consolidación simultánea con Araldit® rápido y pigmentos inorgánicos para entonar la resina transparente.
- Consolidación, también simultánea, de los restos de madera con Paraloid B-72® al 7% en acetona. Esto se debe a que a medida que avanzábamos en la limpieza de los productos de corrosión del hierro, la vulnerabilidad de los restos orgánicos era cada vez mayor.
- Reintegración estructural con Araldit® Madera entonada con pigmentos inorgánicos. Este paso fue necesario en las pérdidas o lagunas producidas en las púas para dar consistencia al objeto.
- Inhibición por impregnación en ácido tánico al 5% en etanol, secado en cámara durante 24 horas.
- Consolidación por impregnación en Paraloid B-48S® al 5% en Xileno. (fig.8)

Peine cardador de Montealegre de Campos.

La experiencia de nuestro grupo en objetos de hierro afectados por un estado de conservación muy similar a la de este peine (Barrio *et al.* 2012; 2013a, 2013b), y la posibilidad de disponer de los equipos láser propios del SECYR de la UAM, nos permitió plantearnos un tratamiento más preciso con esta técnica para este objeto, vistos los inconvenientes encontrados en el caso anterior expuesto. La realización de la restauración de este peine se llevó a cabo en el año 2013.

Es habitual hacer una mínima indicación a las características de esta técnica, recordando que se trata de una radiación luminosa que responde a esta descripción de su acrónimo (LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Los rasgos que se desprenden de esta descripción de su propio nombre son éstos:

- Monocromaticidad (una longitud de onda)
- Coherencia espacial
- Emisión de alta potencia
- Luz fácilmente focalizable
- Capacidad de generar procesos de transformación

Su utilidad en restauración de obras arqueológicas de metal deriva de estas propiedades, pero especialmente aprovechando la última. La ablación o fotoablación es el principal fenómeno por el cual limpia el láser. Por tanto, los productos de corrosión que se pre-

sentan sobre las piezas metálicas arqueológicas, se van a poder eliminar al generarse durante la ablación estos tres procesos diferentes:

- Vaporización rápida e ionización.
- *Spallation*.
- Tensiones de dilatación y contracción, que pueden ser potenciadas por cavitación (sólo en el caso de inmersión en medio líquido).

Estos fenómenos no se suelen dar de forma aislada, sino que en muchos casos se producen cooperativamente y no es raro que se produzcan varios de ellos simultáneamente, aunque la ablación no implica por necesidad que se den todos en conjunto. En definitiva, la aplicación de un haz láser genera un proceso fotomecánico o fototérmico que permite eliminar los estratos formados por productos de deterioro en la superficie del metal arqueológico corroído, en este caso de hierro (Chamón, Barrio y Criado 2008).



Figura 7: Desarrollo del proceso de limpieza del peine de Santorcaz. Foto M.A.R.



Figura 8: Aspecto final de la pieza de Santorcaz tras su restauración. Foto Mario Torquemada. M.A.R.

¿Cuáles son las ventajas que nos ofrece la técnica láser como opción para abordar la restauración de un objeto en un estado de conservación tan extremo?

A lo largo de estos últimos años (Dickmann, Hildenhagen y Studer 2001; Dickmann *et al.* 2005); se han puesto en relieve en numerosas intervenciones los rasgos de de la técnica láser aprovechables en la restauración de metales arqueológicos, y muy especialmente aplicables a piezas de hierro afectadas por intensos procesos o completamente mineralizadas.

De manera sucinta podríamos apuntar los siguientes:

1. Es una técnica de mínima invasividad que no requiere el uso de sustancias químicas ni materiales abrasivos ni presiones, ni vibraciones que pongan en peligro la seguridad de piezas. Evita las manipulaciones en objetos tan frágiles.
2. Elevado grado de control puesto que la limpieza se efectúa de modo muy progresivo (pocos micrones por pulso), de esta manera el restaurador puede determinar el nivel de limpieza.
3. Elevada precisión ya que las fibras ópticas usadas para transmitir la luz láser permiten actuar sobre superficies de topografías muy complejas.
4. Selectividad en los productos a eliminar, determinada por la distinta absorción óptica en los diversos materiales y sustratos.
4. Sistema inocuo, si se establecen protocolos de empleo seguros para el objeto y para el restaurador.

También el trabajo con láser tiene inconvenientes que es necesario reconocer y poner de manifiesto:

1. Riesgos de microfusiones en las capas superficiales del metal debido al calentamiento por el haz láser.
2. Riesgos de transformación en productos más resistentes que los originales.
3. Riesgos para el operador si no se siguen estrictamente protocolos de trabajo seguros.
4. Necesidad de una amplia experiencia de manejo del equipo por el restaurador.
5. Lentitud relativa en comparación con ciertas técnicas manuales o mecánicas de limpieza

Así pues, las técnicas LASER, complementadas con análisis científicos apropiados, pueden ser hoy una alternativa innovadora y eficaz para resolver estos problemas de conservación y restauración de metales de procedencia arqueológica, especialmente cuando estos objetos, como suele ser bastante habitual, presentan procesos de alteración y paquetes de corrosión superficial muy resistentes; incluso de mayor dureza que la de los productos en los que se ha transformado el interior del peine.

Protocolo de intervención

Después de la fase de observación y análisis para conocer bien el estado de la pieza, la propuesta de intervención se basó principalmente en simultanear los procesos manuales de limpieza con el uso del láser de ablación; considerando esta última como la técnica preferente para tratar la superficie original sin presiones ni vibraciones que pudiesen provocar fracturas y pérdidas (fig. 9).



Figura 9: Proceso de restauración con láser del peine cardador de Montealegre de Campos. Foto SECYR UAM.

- Limpieza mecánica manual para eliminar las tierras y óxidos de las capas más externas.
- Ablación con láser de los productos de corrosión más resistentes con eliminación mecánica de residuos.
- Estabilización con láser de la superficie original (mayoritariamente magnetita)
- Adhesión y consolidación con epoxy y pigmentos inorgánicos.
- Consolidación final por inmersión en Paraloid B-72® al 5% en acetona y sileno.

Para llevar a cabo esta intervención con técnica LASER, contamos con dos equipos de Nd:YAG (equipos comerciales), con los que nuestro Laboratorio SECYR lleva varios años trabajando en la restauración de piezas metálicas arqueológicas. Ambos equipos responden a las siguientes características técnicas:

1. Eos 1000® SFR (Short free running) λ : 1064 nm (nanómetros). Duración del pulso: 60-120 μ s (microsegundos) Energía por pulso: 50-1000 mJ (E). Frecuencia de disparo: 1-20 Hz (hercios de repetición)(f). Spot: 1.5-6 mm (S).
2. Eos 1000® LQS (Long Q-Switched). λ : 1064 nm (nanómetros). Duración del pulso: 120 a 300 ns (nanosegundos). (E) 400 mJ. (f) de 1 a 20 hercios de repetición. (S) 1.5-6 mm.

En el caso de los hierros arqueológicos, teniendo en cuenta nuestra experiencia hasta la fecha con ambos equipos, el Láser más recomendado es el SFR.

Para la intervención restauradora del peine cardador de Montealegre de Campos establecimos los parámetros que aparecen recogidos en la figura 10, aplicando el láser directamente sobre la pieza, sin el uso de geles o refrigerantes líquidos. Los procesos fotomecánicos y fototérmicos generados por el haz láser ha permitido eliminar la costra formada por los productos de deterioro del hierro amalgamados con tierras del contenedor geológico del yacimiento.

El resultado final ha sido muy satisfactorio (fig. 11),

puesto que no sólo ha permitido esta técnica la eliminación sin riesgos añadidos de las capas de corrosión duras y deformantes, sino que además ha hecho posible la recuperación de la superficie original, a la vez que se genera una estabilización de los productos de corrosión del hierro más activos transformándolos en magnetita (Chamón et al. 2007).

4. CONCLUSIONES

Con años de antelación hemos visto la eficaz aplicación del LASER en campos como el Patrimonio Arquitectónico, obteniendo muy buenos resultados en la limpieza de los materiales pétreos que conforman la naturaleza de estos edificios y estructuras construidas. Desde esta perspectiva, el uso de esta técnica en la restauración de los diversos objetos arqueológicos puede considerarse de llegada bien reciente.

A partir de estos dos casos prácticos y comparativos llevados a cabo sobre piezas de casi idéntica tipología, datación, tecnología y composición, podemos afirmar que la técnica LASER ofrece una serie de posibilidades que mejoran notablemente los protocolos en la restauración de objetos de hierro arqueológicos muy mineralizados.

Equipo láser	Fluencia	Energía	Frecuencia	Spot	Efectos
SFR	28 J/cm ²	500 mJ	2Hz	1.7 mm	Eliminación de concreciones y productos resistentes.
SFR	26 J/cm ²	400 mJ	2 Hz	1.5 mm	Acabado final superficie original de magnetita.

Figura 10: Tabla de parámetros utilizados durante el proceso de limpieza con láser del peine de Montealegre de Campos.



Figura 11: Estado final de la pieza de Montealegre de Campos tras su restauración. Foto SECYR UAM.

Como hemos expuesto en el caso de la pieza de Santorcaz, la limpieza mecánica manual y con abrasímetro, muy válida en muchos casos, tiene una serie de inconvenientes en piezas extremadamente frágiles por su mineralización, como son fracturas, pérdidas de la superficie original, grietas..... Esta técnica mecánica resulta más difícil de controlar durante el proceso, ya que puede ser necesario por criterio de intervención dejar en ciertas áreas productos de corrosión que hagan posible mantener la forma del peine. Estos problemas se pueden evitar con el uso de la técnica LASER, mucho más controlable a la hora de determinar las capas o productos a eliminar, además, de contar con otras ventajas ya expuestas a lo largo del texto.

La restauración del peine de Montealegre de Campos, articulada en torno al láser como técnica principal, ha mejorado mucho los resultados obtenidos en el caso anterior. Esta metodología hace posible adecuarse a un criterio más conservativo y menos intervencionista, en línea con la deontología más actual. En primer lugar, se ha evitado cualquier nueva fractura del objeto, que en una pieza tan mineralizada hubiera sido inevitable haciendo uso sólo de los sistemas mecánicos más tradicionales. Así mismo, también ha hecho posible conservar al máximo la superficie original de magnetita que nos había llegado, empaquetada bajo capas de corrosión muy resistentes. Incluso las improntas de la madera del empuñador, un dato importante para su estudio, se han podido respetar, retirando los óxidos e hidróxidos que las ocultaban; ahora incluso pueden distinguirse las propias fibras y la dirección de la veta. Finalmente, la técnica LASER ha permitido estabilizar la superficie final, sin tener que acudir a la aplicación de productos de inhibición extraños al propio hierro.

Notas y agradecimientos:

- (1) La investigación y restauración del peine de Montealegre de Campos se hizo dentro de las actividades del Proyecto de Investigación Multidisciplinar: *El Láser como Instrumento de Innovación para la Conservación y Restauración del Patrimonio Arqueológico*. Universidad Autónoma de Madrid REF. CEMU-2012-003.
- (2) Queremos agradecer a E. Baquedano, A. Dávila y Javier Casado del MAR por aportarnos la información y documentación gráfica del proceso de restauración del peine cardador de El Llano de la Horca, Santorcaz.
- (3) Así mismo nuestro agradecimiento a J.F. Blanco (UAM) y a M. Retuerce (UCM) por la información del contexto arqueológico del peine cardador de Montealegre de Campos.
- (4) Nuestro sincero agradecimiento también a Inmaculada Donate Carretero (Universidad de Bolonia) y Carolina Gutiérrez Neira (CSIC) por la interpretación de los análisis de LIBS.

BIBLIOGRAFÍA

- ASMUS, J. F. (1978): "Light cleaning: Laser technology for surface preparation in the Arts" *Technological Conservation* 3, 14-18.
- BARRIO, J. (2013): "Principios de conservación de una tecnología de restauración innovadora en el Patrimonio Arqueológico. Aplicación en el Proyecto ARQUEOLÁSER". *Rev. Ge-Conservación* 4, 146-164.
- BARRIO, J., (2010) "La tecnología láser aplicada a los procesos de conservación y restauración de objetos metálicos arqueológicos" *Rev. Patrimonio Cultural de España* 4, 79-97.
- BARRIO, J.; ARROYO, M.; CHAMÓN, J.; PARDO, A. I., y CRIADO, A. (2006): «Laser cleaning of archaeological metal objects» en *Heritage, Weathering and Conservation*, vol. II. London: Ed. Taylor y Francis Group, 699-707.
- BARRIO, J.; CATALÁN, E.; GUTIÉRREZ, P. C.; MEDINA, M.^a C., y SANZ, C. (2012): "Reexcavar la tumba 158 de la necrópolis vaccea de Las Ruedas de Pintia (Peñañiel, VA): Aplicaciones de técnicas láser en la restauración de la panoplia", en *Vaccea Anuario*, 5, 70-74.
- BARRIO, J., MEDINA, M.C., CID, J.P., PARDO A.I. y TURÉGANO, M. (2013a) "Possibilities of LASER conservation of metal objects from archaeological context", *Technoheritage: Int. Congress Science and Technology for the Conservation of Cultural Heritage*. Edt. Taylor & Francis Group, London, 2013, 363-366.
- BARRIO, J.; MEDINA, M.^a C.; PARDO, A.I., GUTIÉRREZ, P.C., CID, J.P., y ESCUDERO, C. (2013b) "Conservation of archaeological metal objects with laser technology" en *Atti Aplar* 4. Edición de A. Brunnetto. Roma, 123-135.
- BLANCO GARCÍA, J. F., LUCENDO DÍAZ, D., RETUERCE VELASCO, M. y TORRES GONZÁLEZ, T., 2011: "El oppidum vacceo de Montealegre de Campos (Valladolid) a la luz de las recientes excavaciones arqueológicas", *Vaccea Anuario* 2010 (nº 4), 78-82.
- COOPER, M. (1998). *Laser cleaning in conservation, an introduction*" Ed. Butterworth-Heinemann. Oxford.
- CHAMÓN, J.; BARRIO, J.; ARROYO, M.; PARDO, A. I., Y CATALÁN, E. (2007): «Nd:YAG laser cleaning of heavily corroded archaeological iron objects and evaluation of its effects», en Congreso *LACONA VII*. Madrid, 297-302.
- CHAMÓN, J., BARRIO, J., Y CRIADO, A. (2008): "El láser de ablación como herramienta de limpieza en el Patrimonio Arqueológico", *Anales de Química*, 2008, 104 (4), 265-269.

- DICKMANN, K., HILDENHAGEN, J. y STUDER, J. (2001): "Laser removal of corroded layers from archaeological ironwork". In LACONA IV, 71-74. Paris: ICOMOS- France.
- DICKMANN, K. HILDENHAGEN, J. STUDER, J. y MUSH E. (2005). "Archeological ironwork: removal corrosion layers by Nd:YAG laser ". In LACONA V, 34-39, Berlin.
- KOH, Y. y SÁRADY, I. (2003): "Cleaning of corroded iron artefacts using pulsed TEA CO₂ and Nd:YAG-laser", Journal of Cultural Heritage 4, 129-133.
- RUIZ ZAPATERO, G., MÄRTENS, G., CONTRERAS, M. y BAQUEDANO, E. (2012): "Los últimos carpetanos. El *oppidum* de El Llano de la Horca (Santorcaz, Madrid)". Catálogo de la Exposición. MAR. Alcalá de Henares. Madrid.
- SIANO, S. (2007): "Principles of Laser Cleaning in Conservation», en Handbook on The Use of Lasers" in *Conservation and Conservation Science*. Edición de M. Schreiner y M. Strli. COST G7. UE.