

**Arqueología //****Tratamiento de posliofilización para la prevención de la acidificación en madera arqueológica saturada de agua. El caso del barco galorromano LSG4**

El barco galorromano Lyon Saint-Georges 4 (LSG4) se caracteriza por tener gran cantidad de sulfuros de hierro en su interior que, en unas condiciones ambientales inadecuadas, pueden llevar a una fuerte acidificación de la madera que lo compone y por lo tanto a su destrucción. Esta problemática tan específica y el tratamiento preventivo que se está llevando a cabo en la empresa ARC-Nucléart de Grenoble fueron la temática desarrollada en el trabajo final de los estudios de conservación y restauración, a partir del cual se ha extraído este artículo.

**Xavier Martínez Carballal.** Título Superior en Conservación y Restauración de Bienes Culturales en la especialidad de Bienes Arqueológicos y Licenciatura en Historia. Conservador-restaurador de bienes culturales en ARC-Nucléart. xavipica@hotmail.com

**Palabras Clave:** LSG4, acidificación, sebacato de disodio, sulfuros de hierro, madera saturada de agua.

**Fecha de recepción:** 12-10-2017 > **Fecha de aceptación:** 23-10-2017



Excavación arqueológica del LSG4 (Fotografía: Marc Guyon, Inrap)

**INTRODUCCIÓN<sup>1</sup>**

En el año 2003 se realizaron las obras de un parking bajo el actual Parc Saint-Georges en la ciudad de Lyon. Durante las excavaciones empezaron a surgir restos de barcos antiguos a la superficie. Un equipo de arqueólogos del Inrap<sup>2</sup> realizó la excavación del terreno y, en total, se encontraron 16 barcos de diferentes épocas. De estos, 6 eran galorromanos y 3 fueron extraídos para su posterior exposición en un museo. Entre ellos estaba el LSG4,<sup>3</sup> un barco poligonal de tipo octogonal, cuyas maderas datan de entre el año 158 y el 185 d. C. **1** [pág. 79]

Se calcula que originalmente medía unos 28 m de eslora, pero no se pudo excavar en su totalidad. La parte de popa sigue aún bajo las edificaciones del barrio medieval de Lyon y es por eso por lo que no se ha podido documentar ni extraer. La otra mitad se conserva actualmente en las instalaciones de la empresa ARC-Nucléart y mide unos 15 m de largo por 4,67 m de ancho y 1,35 m de alto. Posteriormente, una vez realizado

el tratamiento de conservación-restauración, será expuesto en el museo Lyon-Fourvière. **2** [pág. 80]

La empresa ARC-Nucléart, especializada en la conservación y restauración de material arqueológico orgánico, recibió el barco en 2014, diez años después de su excavación. La conservadora-restauradora Laure Meunier-Salinas asumió la gestión de la intervención del barco como jefa de proyecto. Se realizaron análisis de diversas muestras de madera y la gran cantidad de sulfuros de hierro que se encontró en su interior demostró que había un gran riesgo de acidificación.<sup>4</sup> Por tanto, se determinó que en el caso del LSG4 se daban dos grandes problemáticas a tratar:

1. El derrumbamiento de la estructura celular interna de la madera.
2. La acidificación de la madera.

**EL DERRUMBAMIENTO DE LA ESTRUCTURA CELULAR INTERNA DE LA MADERA****PROBLEMÁTICA**

La madera del LSG4 ha estado expuesta a un medio húmedo durante siglos. El agua ha penetrado en el interior de la madera a lo largo del tiempo, sustituyendo la celulosa y convirtiéndose en una parte importante de su constitución. Si el agua se evaporara, la estructura interna de la madera se derrumbaría, como puede verse en la imagen. **3** [pág. 80]

**TRATAMIENTO**

Para exponer el barco en un museo es necesario un tratamiento de consolidación para poder mantener la madera en un ambiente seco sin que pierda su forma. En este caso se ha tratado por inmersión en un baño de polietilenglicol (PEG), que permite consolidar la estructura de la madera reemplazando el agua. **4** [pág. 80]

Una vez la madera está impregnada de PEG se pasa a la siguiente fase, el secado por liofilización. El tratamiento consiste en colocar las maderas ya consolidadas en los liofilizadores donde la madera pasa por dos fases distintas:

1. Congelación.
2. Sublimación.

Este sistema de secado permite extraer el agua con menos riesgo de deformaciones, mientras el PEG continúa en el interior de la madera consolidando su estructura. La presión atmosférica permite al hielo transformarse directamente en vapor de agua. Si la expulsión del agua se diese en fase líquida, podría provocar la ruptura de las estructuras celulares por

<sup>1</sup> Este artículo ha sido traducido del original en catalán al castellano por Aina Estevan Serrano, alumna de tercer curso de la especialidad de Conservación y Restauración de Escultura de la ESCRBC.

<sup>2</sup> Institut national de recherches archéologiques préventives.

<sup>3</sup> GUYON, M. "Méthodologie d'une fouille d'épaves en milieu terrestre" En: RIETH, E. [dir.] *Archaeonautica*. Vol. 16 (2010), Les épaves de Saint-Georges-Lyon – 1<sup>er</sup>-XVIII<sup>e</sup> siècles, p. 25-33.

fenómenos de tensión superficial. El proceso de liofilización dura entre tres y seis semanas según el volumen de madera a tratar. **5** [pág. 81]

El tratamiento de PEG y liofilización es muy utilizado en el mundo de la conservación y restauración de madera empapada de agua porque soluciona la primera problemática planteada en este artículo. En cambio, para la segunda problemática, todos los tratamientos son relativamente nuevos y están en proceso de desarrollo.

## ACIDIFICACIÓN DE LA MADERA

### PROBLEMÁTICA

La acidificación de la madera es un problema muy generalizado que se da en madera arqueológica procedente de un medio húmedo, que ha estado en contacto con hierro y en condiciones de anoxia. Durante la fase de entierro se forman los sulfuros de hierro que posteriormente, durante su almacenamiento o exhibición en museos, se desarrollan con la aparición de concreciones minerales en la superficie de la madera. El incremento de volumen provocado por las concreciones genera grietas en la madera. De forma simultánea el ácido sulfúrico se produce dentro de la materia orgánica, provocando la acidificación de la madera. La hidrólisis ácida de las macromoléculas orgánicas y los procesos de corrosión conducen rápidamente a la desintegración de la madera; así se pierden sus propiedades mecánicas y los objetos empiezan a ser quebradizos. **6** [pág. 81]

El desarrollo de esta problemática se podría evitar si la temperatura se mantuviese constante entre 18 y 20 °C y la humedad relativa, también constante, alrededor del 50%. **6** Pero mantener estas condiciones puede resultar extremadamente caro, sobre todo en aquellas salas en las que se da un movimiento continuo de visitantes. El caso más representativo es el del barco del siglo XVII *Vasa*, expuesto en el *Vasamuseet* de Estocolmo. Este museo se construyó expresamente para conservar el navío en las condiciones ideales, en este caso 20 °C de temperatura y 60% de humedad relativa. **7** Pese a ser uno de los museos mejor preparados del mundo en cuanto a control climático, el barco *Vasa* ha sufrido la acidificación progresiva de la madera. Posteriormente, una de las medidas preventivas que se ha tomado es la inversión de 7 millones de euros para la instalación de un sistema de control climático para mantener estos parámetros constantes. **8** Estos costes tan elevados no pueden ser asumidos por otros museos que conservan en su interior maderas procedentes de un medio húmedo en riesgo de acidificación y es por eso por lo que hay que buscar otro sistema preventivo como, por ejemplo, el que plantea este artículo.

### TRATAMIENTO

Para prevenir esta problemática en el barco *LSG4*, se está realizando un tratamiento que supone una innovación en el campo específico de la conservación-restauración de madera arqueológica saturada de agua. Para evitar que la corrosión de las partes metálicas continúe impregnando la madera de sales de hierro y azufre, o piritita, y que estos compuestos lleven a una acidificación violenta de la madera, se extraen todos los clavos de hierro antes de la liofilización, documentándolos y conservándolos por separado. Unas reproducciones hechas en resina los reemplazarán. Cabe mencionar que durante esta etapa en que la madera está húmeda no todos los clavos son visibles y, por lo tanto, permanecerán dentro de la madera hasta después de su secado. Una vez realizada la liofilización, se hace un raspado dentro de los orificios dejados por los clavos con el objetivo de retirar la madera contaminada por los sulfuros de hierro, a la vez que se aprovecha para

acabar de retirar los clavos o restos metálicos residuales. A continuación, se lleva a cabo un raspado de las superficies que presentaban concreciones metálicas. Desgraciadamente, en muchas zonas la madera contiene una carga de partículas ferrosulfúricas en su interior, repartidas de forma difusa, que no se puede retirar sin eliminar la mayor parte de la pieza o su totalidad. Por este motivo el ingeniero químico de ARC-Nucléart, Gilles Chaumat, ha desarrollado la utilización de un producto químico llamado sebacato de disodio que se está usando en la aplicación local para neutralizar los sulfuros y evitar que estos se transformen en ácido sulfúrico en contacto con la humedad del aire. **9**

### CONTROL AMBIENTAL

Paralelamente, se realiza un control climático de los espacios de trabajo donde se controla la humedad relativa (alrededor del 50%) y la temperatura (sobre los 20 °C), tal como se hará en los futuros espacios de exposición para garantizar las mejores condiciones de conservación y evitar que esta problemática se pueda acelerar con la humedad ambiental. Las sondas de control de la humedad relativa se colocan cerca de la madera para verificar la tasa de humedad del aire y tomar las medidas necesarias en caso de desequilibrio del medio. Por último, la iluminación se controla en las zonas de almacenamiento ( $\leq 50$  luxes), que son los espacios en los que las maderas arqueológicas pasan más tiempo durante su estancia en ARC-Nucléart.

## PROTOCOLO DEL TRATAMIENTO

Después de una estancia de seis meses en ARC-Nucléart, he realizado un protocolo en el cual se explica el procedimiento a seguir para acabar el tratamiento de una pieza de madera después de la liofilización, previniendo también la acidificación. No siempre se puede seguir el protocolo completamente puesto que cada pieza es diferente y, por tanto, se deberá adecuar a las problemáticas específicas de cada una, hecho que puede conllevar cambios en el siguiente orden, sumar apartados o restarlos.

### PROTOCOLO:

1. Preparación.
2. Limpieza superficial en seco.
3. Raspado de los agujeros de los clavos.
4. Raspado de la superficie.
5. Limpieza química.
6. Adhesiones.
7. Aplicación de sebacato de disodio con Tylose® MH 300 P.
8. Registro gráfico del proceso con cartografías de intervención.

De este protocolo, los puntos 3, 4 y 7 están destinados a la prevención de la acidificación. El raspado de los agujeros de los clavos consiste en retirar la madera contaminada por los sulfuros de hierro que se encuentra alrededor de los agujeros dejados por los clavos de hierro, que son la fuente del problema. A su vez, con la madera seca, se localizarán también todos aquellos clavos de hierro que no se hayan localizado antes de la liofilización y se retirarán. Para ello, si la madera es resistente, nos podremos ayudar con un taladro; si se considera demasiado débil o el clavo no sigue una dirección recta, deberemos proceder a trabajar con un bisturí o una gubia. **7** [pág. 82]

A continuación se debe valorar si es necesario realizar un raspado de la pared del agujero del clavo. Para hacer esta valoración usaremos un bisturí y rascaremos las paredes haciendo saltar pequeños trozos de madera. Durante este proceso se deberá prestar atención al sonido del raspado y al tacto, si

<sup>4</sup> BERTRAND, F. "Étude de la contamination en sulfures de fer de l'épave Lyon Saint-Georges 4". *Rapport d'activité 2013/2014*. Grenoble, 2014, p. 89-91.

<sup>5</sup> RÉMAZEILLES, C. [et al.] "Study of Fe(II) sulphides in waterlogged archeological wood". *Studies in Conservation*. Vol. 58 (2013), p. 297-307.

<sup>6</sup> AGUERO, C. "La liofilització". En: NIETO, X.; CAU, M.A. [eds.]. *Arqueologia Nàutica Mediterrània (Monografies del CASC, 8)*. Gerona: Centre d'Arqueologia Subaquàtica de Catalunya, 2009, p. 636. ISBN 978-84-393-8082-5

<sup>7</sup> DUCHÊNE, J. "La conservation des bois archéologiques humides: historique et développements récents". En: BERNARD-MAUGIRON, H. [et al.] [dirs.] *Sauvé des eaux. Le patrimoine archéologique en bois, histoires de fouilles et de restaurations*. Grenoble: ARC-Nucléart, 2007, p. 28. ISBN 978-2-9529035

<sup>8</sup> HOCKER, E. "Maintaining a Stable Environment: Vasa's New Climate-Control System". *APT Bulletin: The Journal of Preservation Technology*. Vol. 41 (2010), n° 2/3, p. 3-9.

<sup>9</sup> CHAUMAT, G.; CAILLIET, B.; BOCHATON, T. "Use of sodium sebacate salts to consolidate and stabilise composite archaeological artefacts". En: GRANT, T.; COOK, C. [eds.] *Proceedings of the 12th ICOM-CC Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference Istanbul 2013*. ICCOM-CC, 2016, p. 161-167. ISBN 9781365065194

se escucha un sonido o se nota un tacto metálico o mineralizado, deberemos continuar con el raspado; si no se aprecia, deberemos pasar un imán por encima de los trozos de madera que han saltado. Si la madera contiene greigita (sulfuro de hierro), se pegará al imán y, por tanto, se deberá continuar con el procedimiento. <sup>8</sup> [pág. 83]

Cuando estos indicadores ya no se den, el raspado se detendrá. El taladro también se puede usar para realizar el raspado de las paredes de los agujeros de los clavos que, en muchos casos, resulta menos agresivo que trabajar con el bisturí o la gubia dado que realiza un agujero más limpio, a la vez que resulta más práctico y rápido.

Nos podemos encontrar con que un clavo de hierro haya provocado una difusión de sulfuros que afecte a toda una madera o un radio muy grande; será decisión del conservador-restaurador valorar en qué momento detener el raspado. Un límite usado en estos casos es la valoración del nivel magnético de la madera que se está raspando. Hay que tener en cuenta que, si siempre se realizase el raspado de toda la madera contaminada, el porcentaje que se eliminaría en el caso del LSG4 sería demasiado elevado; se eliminarían piezas de madera enteras y, por lo tanto, gran parte del barco. <sup>9</sup> [pág. 83]

El raspado de la superficie consiste en retirar las concreciones minerales y los sulfuros de hierro que se han acumulado en la parte exterior de la pieza de madera tras desplazarse a través de las fibras por efecto de la gravedad.<sup>10</sup> Para el raspado de la superficie se tendrán en cuenta las mismas valoraciones que en el raspado de los clavos: el ruido o tacto metálico o mineralizado y el magnetismo, pero además podremos hacer una valoración rápida a simple vista por aspecto o coloración. Las zonas que debemos buscar para el raspado serán de color gris, negro o amarillo. La madera no contaminada normalmente tendrá una coloración marrón, pero en algunos casos será también negra y puede dar lugar a confusiones; en estos casos se deben utilizar los otros indicadores para determinar la constitución de la madera. <sup>10</sup> [pág. 83]

Por último, realizaremos la aplicación del sebacato de disodio con un éter de celulosa (Tylose® MH 300 P) para neutralizar la posible acidificación de la madera alrededor de las zonas que estaban en contacto con el hierro. Para la preparación de la pasta, en primer lugar se mezclará la Tylose® MH 300 P y el sebacato. La proporción será de una parte de Tylose® MH 300 P por cuatro de sebacato.

TS4 = Tylose® MH 300 P y Sebacato de disodio (1:4)

A continuación se mezclará con agua desionizada en una proporción del 30%, para que la pasta se pueda trabajar en vertical sin riesgo de que se esparza y manche la madera.

TS4 al 30% en agua desionizada

Es importante hacer una mezcla homogénea y dejarla reposar durante por lo menos una hora. Transcurrido este tiempo, se aplicará con espátula por toda la superficie de la madera raspada del agujero del clavo, creando una fina capa superficial blanca de entre 2 y 5 mm de grueso aproximadamente. Se pueden usar otros utensilios para asegurarse de que toda la zona queda bien impregnada. <sup>11</sup> [pág. 83]

Una vez seca esta capa de color blanco aplicada en el interior de los agujeros, se llevará a cabo una reintegración de cada orificio para integrar la intervención matérica y cromáticamente.

## CONCLUSIONES

El principal problema a resolver que plantea este artículo es la acidificación de la madera arqueológica procedente de un medio húmedo, provocada por el contacto del material con el hierro durante su fase de enterramiento en condiciones de anoxia. La imposibilidad de mantener constantes los parámetros de temperatura (20 °C) y de humedad relativa (50%) en las salas de exposición de los museos provoca el paso de sulfuro de hierro a ácido sulfúrico. Resolver esta problemática controlando la humedad relativa y la temperatura conlleva unas instalaciones que para la mayoría de museos son inviables económicamente. Por tanto, se deben buscar otras soluciones.

El raspado de la madera es un método efectivo para la eliminación de los sulfuros de hierro, pero se debe controlar por su agresividad. En el caso de que los sulfuros de hierro se hayan difundido hacia el interior de la pieza y el raspado sea insuficiente para su eliminación, se deberán usar otros métodos para llegar a neutralizarlos.

En el caso del LSG4 se han combinado el raspado con la aplicación de sebacato de disodio para intentar neutralizar los sulfuros de hierro y evitar su posterior acidificación. La concentración usada de la "pasta preventiva" de sebacato de disodio (TS4) y Tylose® MH 300 P en relación al agua es del 30%. Esta concentración es ideal para su aplicación en superficies verticales, pero a su vez la pasta parece quedarse en superficie y no penetrar suficientemente en el interior de las maderas y, por lo tanto, no llega a neutralizar los sulfuros de hierro difundidos más en el interior.

Durante mi estancia en el centro de conservación y restauración de ARC-Nucléart, he comprobado la importancia de la combinación del trabajo con la investigación para buscar nuevos métodos y productos que faciliten el trabajo y la conservación de los bienes culturales. Las experimentaciones desarrolladas a partir de las dudas surgidas en el trabajo del día a día con las piezas del LSG4 y el apoyo de un equipo interdisciplinario han permitido desarrollar un nuevo sistema y un nuevo producto para el tratamiento de la madera empapada de agua en riesgo de acidificación.

## AGRADECIMIENTOS

A todo el personal de ARC-Nucléart, por tener la oportunidad de compartir seis meses muy instructivos y por su trato amistoso y simpático que nunca olvidaré. Me gustaría dar las gracias especialmente a la directora del proyecto del barco LSG4, a la conservadora-restauradora Laure Meunier-Salinas, y al ingeniero químico Gilles Chaumat, por valorar mi trabajo y guiarme en la química y la experimentación. También querría dar las gracias al arqueólogo del Inrap, Marc Guyon, por facilitarme todo el material y resolver todas mis dudas en el ámbito arqueológico.

También agradezco toda la ayuda de los profesores de la ES-CRBC, Júlia Chinchilla y Marcel Pujol, por ayudarme a realizar mi trabajo.

## IMÁGENES

<sup>1</sup> El LSG4 en el yacimiento (Fotografía: Inrap).

<sup>2</sup> Representación teórica del barco LSG4 completo (arriba) y fotografía superior de la parte extraída para su posterior exposición (abajo) (Imagen: Marc Guyon, Inrap).

<sup>3</sup> Imágenes obtenidas con microscopio electrónico de barrido de la estructura de una madera arqueológica antes

<sup>10</sup> Normalmente encontraremos una acumulación mucho mayor de concreciones minerales y sulfuros de hierro en la zona superficial de la pieza que en el yacimiento estaba situada en la parte inferior.

y después del derrumbamiento celular debido a un secado incontrolado al aire libre (Imagen: <<http://archeofluviale.e-monsite.com/pages/la-navigation/operation-lyon-saint-georges-4/le-traitement-du-bois.html>> [Consulta: 26 febrero 2016]).

4 Impregnación de PEG por inmersión (Fotografía: Marc Guyon, Inrap).

5 Liofilizador (Fotografía: Marc Guyon, Inrap).


6 Esquema de la evolución de los sulfuros de hierro (Fuente: RÉMAZEILLES, C. [et al.] "Study of Fe(II) sulphides in waterlogged archeological wood". *Studies in Conservation*. Vol. 58 (2013), p. 297-307).

7 Extracción de un clavo de hierro de VP21 (LSG4) (Fotografía: Xavier Martínez).

8 Proceso de comprobación del magnetismo (Fotografía: Xavier Martínez).

9 Capa superficial de sulfuros de hierro en VP21 (LSG4) (Fotografía: Xavier Martínez).

10 Raspado de la superficie (Fotografía: Xavier Martínez).

11  Aplicación de sebacato de sodio con Tylose® MH 300 P (Fotografía: Xavier Martínez).

## BIBLIOGRAFÍA

ALMKVIST, G. [et al.] "Extraction of iron compounds from archaeological wood – results and experiences from the Vasa Museum". *Holzforschung*. Vol. 60 (2006), nº 6, p. 678-684.

ARCHÉOFLUVIALE. Lyon Saint-Georges 4. [En línea] <<http://archeofluviale.e-monsite.com/pages/la-navigation/operation-lyon-saint-georges-4/le-traitement-du-bois.html>> [Consulta: 30 noviembre 2016].

BERTRAND, F. "Collections en cours ou terminées". *Rapport d'activité 2013/2014*. Grenoble, 2014, p. 16-48.

CAILLAT, L.; MEUNIER-SALINAS, L.; COIGNARD, M. "Régénération continue des bains de PEG utilisés pour la consolidation des bois archéologiques gorgés d'eau". *Technè* (2015), nº 42, p. 115-120.

CHAUMAT, G.; TRAN, K.; BOUMLIL, N. "Les techniques actuelles de conservation mises en œuvre par ARC-Nucléart". En: BERNARD-MAUGIRON, H. [et al.] [dirs.] *Sauvé des eaux. Le patrimoine archéologique en bois, histoires de fouilles et de restaurations*. Grenoble: ARC-Nucléart, 2007, p. 169-178. ISBN 978-2-9529035

JOVER, A. "Els materials orgànics: de l'excavació al laboratori. Conservació amb PEG a saturació". En: NIETO, X.; CAU, M.A. [eds.]. *Arqueologia Nàutica Mediterrània* (Monografies del CASC, 8). Gerona: Centre d'Arqueologia Subaquàtica de Catalunya, 2009, p. 627-630. ISBN 978-84-393-8082-5

MEUNIER-SALINAS L.; Guyon, M. "Un chaland galloromain du Ile ap. J". *Antiquité Magazine* (2016), nº 6, p. 68-75.

PUJOL, M. "Terminologia de construcció naval". En: NIETO, X.; CAU, M.A. [eds.]. *Arqueologia Nàutica Mediterrània* (Monografies del CASC, 8). Gerona: Centre d'Arqueologia Subaquàtica de Catalunya, 2009, p. 627-630. ISBN 978-84-393-8082-5

SAN ANDRÉS, M.; DE LA VIÑA, S. *Fundamentos de química y física para la conservación y restauración*. Madrid: Síntesis, 2004, p. 289-309. ISBN 9788497561624.

SIERRA, J. L. "La conservación de la madera en arqueología subacuática. Museo y Centro Nacional de Investigaciones Arqueológicas Submarinas". En: FERNÁNDEZ, C.; PALACIO, R. [eds.] *Monte Buciero 9. La Conservación del Material Arqueológico Subacuático*. Santoña: Ayuntamiento de Santoña, 2003, p. 225-266.