

EXPERIMENTACIÓN, TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA Y CONSERVADURISMO: NOTAS SOBRE LA INTRODUCCIÓN DEL AFORRO DE COBRE EN LOS BARCOS DE MADERA DEL SIGLO XVIII

Nicolás C. Ciarlo *

Resumen

En este artículo se expone un análisis del proceso que condujo hacia el último tercio del siglo XVIII a la introducción del aforro de cobre, principal sistema del que se valieron las Armadas europeas para proteger el casco de sus barcos de guerra de la acción de la broma y otros organismos marinos. Sobre la base del estudio de información histórica y arqueológica, se discuten aspectos significativos de la dinámica de innovación, con foco en la interrelación de los procesos de experimentación, transferencia tecnológica y conservadurismo.

Palabras clave: Arqueología naval – aforro de cobre – elementos de sujeción estructurales – innovación tecnológica

Abstract

This article presents an analysis of the process that led to the introduction of the copper sheathing in the last third of the 18th century, which was the main system used by the European navies to protect their warships' hull from the action of shipworms and other marine organisms. Based on the study of historical and archaeological data, significant aspects of the innovation dynamic are discussed, focusing on the interrelation of the processes of experimentation, technology transfer and conservatism.

Keywords: Naval archaeology – copper sheathing – structural fastenings – technological innovation

Introducción

Este artículo está dedicado a analizar la dinámica tecnológica en torno a la introducción del aforro de cobre de los barcos de madera hacia la segunda mitad del siglo XVIII. Asimismo se tendrán presentes los cambios que afectaron a los elementos de sujeción estructurales, dada la estrecha relación que mantenían entre sí. Estos componentes navales eran fundamentales: el primero servía para proteger el casco de la acción de organismos marinos que atentaban contra la integridad física e hidrodinámica del barco, mientras que los segundos mantenían en su lugar los componentes que formaban

* Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Instituto de Arqueología, Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad de Buenos Aires. Área de Estudios en Arqueología Subacuática, Departamento de Ciencias Sociales, Universidad Nacional de Luján. nciarlo@yahoo.com.ar

el casco (quilla, cuadernas, curvas, baos, etc.). En el caso de los barcos de guerra, el revestimiento metálico les otorgaba ciertas ventajas operativas, puntualmente mayor velocidad y maniobrabilidad. A lo largo del período referido se asistió a la introducción y rápida extensión del revestimiento de cobre en las principales Armadas europeas. Además, se produjeron importantes cambios técnicos, que estuvieron relacionados fundamentalmente con las aleaciones y los métodos de producción empleados. Por caso, los efectos perjudiciales que ocasionaban las chapas de cobre sobre los elementos de hierro del casco, exigieron la búsqueda de soluciones prácticas. Luego, esta cuestión suscitó una serie de estudios científicos sobre los procesos electroquímicos que afectan a los diferentes metales en el medio marítimo. En la actualidad, los artefactos que suelen encontrarse en naufragios de la época y constituyen una fuente de información singular para el análisis de los procesos de innovación. Merecen atención especial los estudios de caracterización de materiales procedentes de sitios cuyas coordenadas espaciales y temporales han sido delimitadas de forma precisa.

La presentación está estructurada en cinco secciones. La primera parte contiene una breve reseña histórica sobre el empleo del aforro para la protección de los barcos de madera. La segunda, centrada en el período de interés, describe el proceso que llevó a la introducción del revestimiento de cobre en las Armadas europeas, incluyendo los ritmos de implementación en cada región, la continuidad de técnicas previas, los problemas suscitados y las soluciones prácticas adoptadas. La tercera se enfoca en cuestiones técnicas del aforro tales como las especificaciones de tamaño, forma y peso de las planchas, y su colocación. La cuarta versa sobre los cambios operados en torno a la producción de chapas y tachuelas, con énfasis en los materiales y métodos empleados. Por último, en la quinta parte se discuten los principales aspectos vinculados con la dinámica del cambio tecnológico.

Breve reseña histórica sobre el revestimiento de los cascos de madera

La porción sumergida del casco de los barcos (fondos u obra viva) estaba expuesta al biodeterioro ocasionado por la acción organismos perforantes¹ e incrustantes de la madera. Ello significó un serio problema a lo largo de la historia, tanto para la operatividad como para la durabilidad de las naves, que en ocasiones llegó a ocasionar naufragios (Staniforth, 1985:21). Frente a esta situación, desde antaño se implementaron diversos métodos de protección. En tiempos de los navegantes griegos y latinos, por caso, para mitigar el problema de la broma y otros organismos se emplearon chapas de plomo. Varios naufragios de la época atestiguan los hondos antecedentes e importancia de esta práctica naval (e.g. Kahanov y Ashkenazi, 2011).

En época Moderna, el sistema anterior no gozó de la misma aceptación, aunque algunos barcos españoles utilizaron planchas de plomo hacia el siglo XV. En el resto de las Armadas, la práctica usual consistía en carenar los cascos². Esta modalidad fue efectiva mientras las naves se mantuvieron fuera del alcance de los perforantes de madera más nocivos. No obstante, el crecimiento de las actividades navales -reflejado por un incremento de la extensión de los viajes- demandó la aplicación de medidas más adecuadas para la protección de los barcos. Así, se inició un período de experimentación y uso de diversos revestimientos: el forro de sacrificio y (nuevamente) el de plomo (Glasgow, 1967).

El forro de sacrificio fue propuesto a comienzos del reinado de Elizabeth I por John Hawkins. Este método, barato y sencillo, sería aprovechado por casi dos centurias en su nación y en el resto de las Armadas europeas. La novedad consistía en utilizar delgadas planchas de madera que copiaban el contorno del casco, con alquitrán y pelo en la cara interna, y fijadas mediante tachuelas de hierro. Aunque se desconoce con qué rapidez se incorporó este sistema, fue ampliamente utilizado (Glasgow, 1967). Paralelamente, durante los siglos XVII y XVIII se experimentó con otros compuestos resistentes al ataque de perforantes y fueron patentadas varias propuestas (ver Staniforth, 1985, pp.22-23).

El forro de plomo, ya conocido en España, se habría introducido en Inglaterra como novedad hacia mediados del siglo XVI, aunque no se le consideró satisfactorio por varias razones, e.g. el peso

y elevado coste (Glasgow, 1967). Años más tarde se realizó el primer intento serio de implementar este revestimiento, gracias a las pruebas desarrolladas por Philip Howard y Francis Watson, que en 1670 patentaron un método de aforro con chapas laminadas. Pese al visto favorable del Rey Carlos II, el Consejo Naval mostró su preocupación frente al avanzado deterioro de los pernos y el codaste de los barcos forrados. Luego de este llamado de atención se realizaron otras pruebas, pero el sistema quedó discontinuado en 1770, luego de que el Marlborough perdiera casi todas las planchas debido a los problemas ocasionados sobre los elementos de sujeción de hierro del casco (Staniforth, 1985)³. De allí en adelante, los ojos estarían puestos en las experimentaciones con el aforro de cobre.

La introducción del aforro de cobre en los barcos de guerra

Las experimentaciones británicas

Desde comienzos del siglo XVIII se realizaron varios intentos por implementar el forro de cobre en los barcos de guerra y mercantes, que por diversas razones no prosperaron (Staniforth, 1985). Los costos representaban una parte considerable del importe total de un barco. La propuesta realizada en 1708 al Primer Lord del Almirantazgo y al Consejo Naval para utilizar planchas de cobre fue en parte rechazada debido al elevado coste (Cock, 2001). Hubo que esperar algo más de medio siglo para que el método ideado por Hawkins fuera puesto en jaque. La necesidad de contar con una fuerza estable en aguas tropicales, así como la eficacia de esta protección frente a los métodos usuales, a la postre justificaron la inversión.

Como parte de la tendencia por mejorar los revestimientos y luego de algunas pruebas parciales (e.g. la quilla del HMS Invincible), en 1761 la Real Armada británica mandó forrar toda la obra viva de la fragata de 32 cañones HMS Alarm con finas planchas de cobre. Al cabo de dos años de servicio en las Indias Occidentales, se redactó un informe con los resultados de la experiencia (ver U.S. Naval Institute, 1952, pp.220-221). La ausencia de organismos nocivos adonde las planchas habían permanecido intactas dio cuenta de la efectividad del cobre. En Inglaterra, estos resultados convencieron a las autoridades de continuar aplicando, a modo experimental, este tipo de protección (Cock, 2001). Las ventajas eran innegables: le confería a las naves una mayor velocidad y maniobrabilidad, extendían su vida útil y requerían menos mantenimiento (McCarthy, 2005). En la figura 1 se ilustra el modelo del HMS Bellona, que supuestamente le fue enseñado al Rey Jorge III para transmitirle los beneficios de esta novedad.

Las experiencias reportadas durante varios años sentaron las bases para su adopción definitiva en los barcos de guerra y, un tiempo más tarde, en los mercantes (ver Harris 1966 y Harland 1976). No obstante, pese a su efectividad como repelente de los organismos perniciosos, el cobre trajo aparejados inconvenientes que debieron subsanarse antes de continuar el programa de revestimiento de los barcos de guerra.

El deterioro de los elementos de sujeción de hierro

El principal problema fue el deterioro de los elementos de sujeción estructurales de hierro, que se encontraban en contacto con las planchas de cobre por debajo de la línea de flotación⁴. La acción galvánica generada entre estos fue advertida entre los armadores de la Real Armada británica, que desde temprano se percataron de los daños ocasionados. En el reporte sobre el Alarm se llamó la atención sobre este asunto. Los efectos de este tipo de corrosión ocasionaron importantes pérdidas, tanto materiales como humanas. Por tal motivo, antes de extender el uso de este revestimiento a los barcos de mayor porte (primer a tercer orden), fue necesario remediar el referido problema. Durante los primeros años se propusieron diversas soluciones, aunque las medidas adoptadas demostraron



Figura 1. Modelo a escala (1:38,4) del casco del navío de 74 cañones HMS Bellona, dispuesto sobre una rampa de lanzamiento (ca. 1770). Este barco fue botado en 1760 y sirvió a las órdenes de Nelson en la batalla de Copenhague (1801). Está revestido con cobre por debajo de la línea de flotación. Dimensiones del modelo: 56 x 160 x 37 cm. Fuente: National Maritime Museum, Greenwich, Londres. Reproducción autorizada, cortesía de la institución.

el desconocimiento imperante acerca de las condiciones de ocurrencia del fenómeno corrosivo en cuestión (ver Staniforth, 1985).

La clave se encontraba en reemplazar los elementos de hierro de la obra viva por otros de cobre. Aunque en los primeros barcos que se forraron se realizaron algunas pruebas, los pernos utilizados carecían de las prestaciones mecánicas necesarias⁵. En su afán por resolver el problema, la Real Armada británica les encargó a James Keir y Matthew Boulton desarrollar pernos de cobre de mejor calidad. Estos fabricaron pernos con una aleación que tenía 100 partes de cobre, 75 de zinc y 10 de hierro, conocida como metal Keir, pero en 1781 se concluyó que no eran satisfactorios. La necesidad de mantener la flota en aguas lejanas durante extensos períodos, dentro de un escenario de conflicto con Francia, España y las colonias americanas, motivó seriamente la introducción del revestimiento en la flota⁶. Esta tarea se emprendió antes de resolver de modo efectivo el problema vigente, lo que

produjo varias pérdidas y exacerbó la controversia sobre la continuidad o el abandono del sistema (Staniforth, 1985).

En 1784, Forbes, inspirado en la máquina de rodillos ranurados (grooved rollers) que utilizó Cort como parte del proceso de afino del hierro, obtuvo por primera vez pernos de cobre ‘endurecido’ adecuados para el trabajo. En 1786, el Consejo Naval estipuló que toda la flota tuviera estos nuevos pernos: por un lado se reemplazaron los pernos de numerosos barcos que se encontraban operativos; y por el otro, los nuevos barcos que llevarían forro metálico se mandaron a construir con clavazón y pernos de cobre (Knight 1973). Aún así, las opiniones sobre las cualidades de los pernos de hierro y de cobre eran dispares, en especial con respecto a sus propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión, adhesión a los maderos y coste. La principal ventaja de estos últimos era su mejor comportamiento frente a la corrosión y durabilidad. Los de hierro, en cambio, eran considerados más tenaces, livianos y -aquí no había dudas- baratos que los de cobre. Por ello, los pernos y clavos de hierro continuaron empleándose de modo parcial, puntualmente en la obra muerta y otros sectores del barco que no estaban sujetos al deterioro ocasionado por contacto con el cobre (McCarthy 2005)⁷.

También se tomaron recaudos para evitar el menoscabo de otras piezas (e.g. los goznes del timón y las marcas de calado) que tenían contacto con las chapas de cobre. Varios sitios arqueológicos de la época así lo atestiguan (e.g. Stanbury, 1994; von Arnim, 1998; Campbell y Gesner, 2000). En la figura 2 puede apreciarse el timón del sitio Deltebre I (1813), un transporte británico que operó durante las Guerras Napoleónicas (Vivar et al., 2014). La pieza, como era habitual, estaba revestida con planchas de cobre. Los pinzotes que se encontraban en contacto con el agua eran de aleación de cobre y el superior, que no iba sumergido, de hierro.

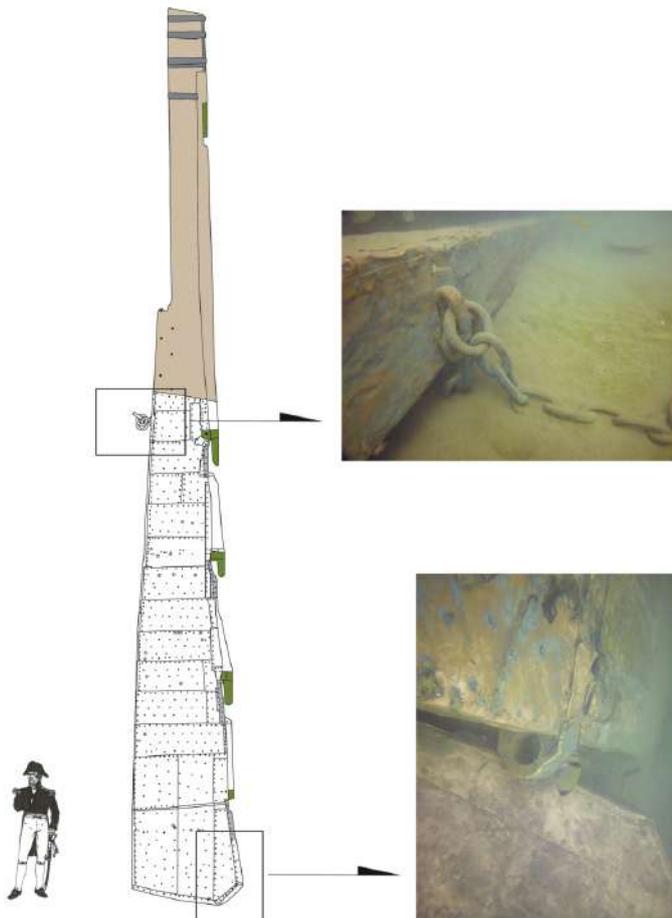


Figura 2. Plano del timón del sitio Deltebre I (1813), en el que se aprecia el revestimiento metálico (alzado: 9,5 m). A la derecha, fotos subacuáticas de las cadenas que aseguraban la pieza al casco (a los lados de la limera) y del pie del timón, junto a una de las hembras de aleación de cobre que iban sujetas al codaste. Gráfico: R. Geli Mauri 2009. Fotos: CASC-MAC. Reproducción autorizada, cortesía de la institución.

Estas experiencias dentro del ámbito naval anticiparon y promovieron las investigaciones científicas realizadas para explicar el deterioro que sufría el aforro en un medio marítimo, que ulteriormente posibilitaron aplicar medios más eficaces para amortiguar sus efectos. Merecen destacarse los resultados obtenidos tempranamente por los químicos Joseph L. Proust, 1754-1826, y Sir Humphry Davy, 1778-1829 (e.g. Proust, 1795; Davy, 1824a, 1824b).

Las Armadas continentales

Luego de las experiencias británicas, el nuevo sistema no tardó en hacer eco en Francia. Allí se habían utilizado otros medios para proteger los cascos: forro de sacrificio, pinturas y revestimiento con tachuelas de hierro (ver Wilkinson 1844, sobre este último sistema)⁸. Fue el oficial Henri de Fulque d'Oraison quien reportó el novedoso sistema, luego de su visita a Inglaterra en 1764 y 1765 (Ferreiro, 2007 y Bradley, 2010). Primeramente se lo empleó en 1767 en la goleta La Gorée, destinada a las colonias de ultramar. También se hicieron algunas pruebas en el Expérience y el Belle-Poule, en 1771. Pero no fue sino hasta 1773, cuando se apresó un cúter británico forrado en cobre, que se consideraron seriamente las ventajas de este sistema. El primer experimento formal se llevó a cabo con la Iphigénie, cuyos resultados reportó en 1786 Pierre-Alexandre Forfait. La experiencia mostró que las planchas se desgastaban rápidamente, por lo que se buscó mejorar la calidad del material y optó por usar chapas laminadas en lugar de forjadas (Boudriot, 1993, citado en Breen y Forsythe, 2007, p.45-46).

Una vez probadas las planchas, fue necesario afrontar el problema que ocasionaban los pernos de hierro. Ello se resolvió a partir de un proceso de transferencia tecnológica, que incluyó el espionaje industrial. En 1784, François I. de Wendel y Amiable M. Givry viajaron a las islas británicas para estudiar, entre otros avances, el aforro de los barcos. Y un año más tarde, Armand-Guy-Simon de Coethempren (Conde de Kersaint) observó y dio cuenta de la solución alcanzada por los británicos, hecho que promovió el interés de la Marina de Guerra por el tema. Además, varios industriales británicos cumplieron un rol significativo a través de la venta de sus productos en el extranjero. Matthew Boulton, contratista de Real Armada británica, proveyó asistencia técnica a otras potencias en tiempos de paz. Puntualmente, agentes de su empresa viajaron a Rochefort en 1785 para mostrar los pernos de cobre, que resultaron muy superiores a los utilizados en Francia (Ferreiro, 2007 y Bradley, 2010). De resultas, salvo por una breve reintroducción de la pernería de hierro debido a una suba de precios y escasez de cobre en 1792, Francia siguió los pasos de Inglaterra (Harris, 1966).

En España, el revestimiento de cobre se introdujo por primera vez en 1782. No obstante, hacia fines del reinado de Carlos III (1759-1788) eran pocas las fragatas españolas que lo tenían. Los restos de un barco español de finales del siglo XVIII que fue hallado en el arsenal de la Carraca aún preservan parte del aforro de cobre. Este método de protección fue visto con recelo por numerosos oficiales de crédito de España y otras potencias continentales, que lo consideraron perjudicial porque impedía reconocer las uniones de las tablas del forro exterior y, por ende, tornaba difícil actuar sobre cualquier vía de agua que fuera necesario enmendar. Por ello, se prefería el uso de betunes o pinturas, que no suponían semejante inconveniente (Fernández Duro, [1895] 1972-1973).

Durante un tiempo, el forro de cobre se empleó de modo combinado con las planchas de madera, como medida preventiva para reducir los efectos del deterioro de los elementos de sujeción de hierro. Los restos del navío de 74 cañones Triunfante (1756-1795) dan cuenta de ello. Este barco, que sirvió a la Real Armada española durante casi cuatro décadas, fue forrado con cobre en 1782. Al momento del naufragio, llevaba además un forro de sacrificio, con planchas de pino, que estaba fijado mediante clavos de aleación de cobre (habitualmente se usaban estoperoles de hierro) (Figura 3)⁹. En la popa, además, los herrajes del timón fueron reemplazados por machos y hembras de bronce (Pujol i Hamelink et al., 2011).

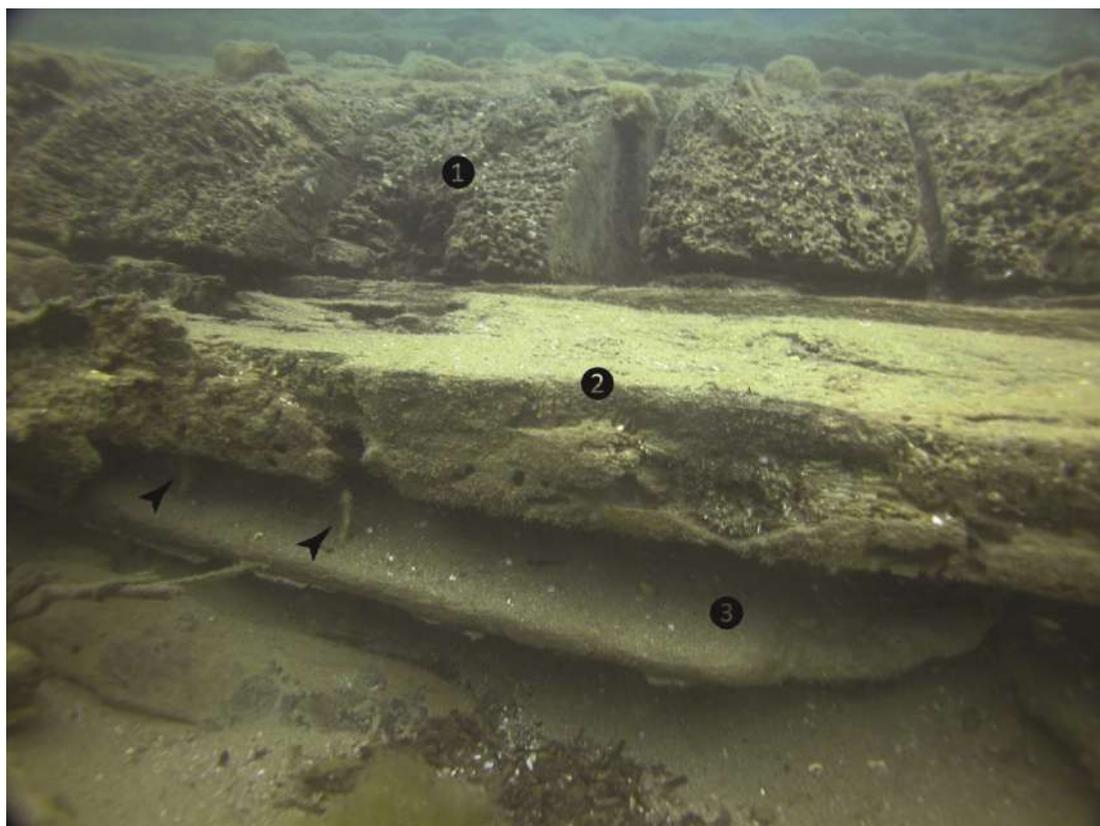


Figura 3. Vista de una de las bandas del navío español Triunfante, en la que se aprecian: (1) las ligazones (cuadernas); (2) las tablas del forro exterior; y (3) el aforro de sacrificio. Las flechas indican los clavos de aleación de cobre empleados para fijar las placas de madera. Encima de estas últimas iban clavadas las planchas de cobre. Foto: CASC-MAC 2010. Reproducción autorizada, cortesía de la institución.

Esta combinación de rasgos no fue exclusiva de la construcción naval ibérica. El Sydney Cove (1797), un barco mercante adquirido por los británicos en Calcuta para abastecer a Port Jackson (Sydney), fue calafateado con resinas típicas de la India y finas placas de madera, junto con el forro de cobre introducido recientemente en Europa (Nash, 2001).

Especificaciones técnicas

En líneas generales, el aforro cubría la porción sumergida de los cascos, incluso superaba ligeramente la línea de flotación¹⁰. En el caso de las Armadas, las planchas utilizadas debían cumplir ciertas especificaciones de tamaño, forma y peso, variable según el sector del casco (Staniforth, 1985 y Bingeman et al., 2000). En la figura 4 se exponen las características de piezas de la fragata La Vénus (1782-1788).

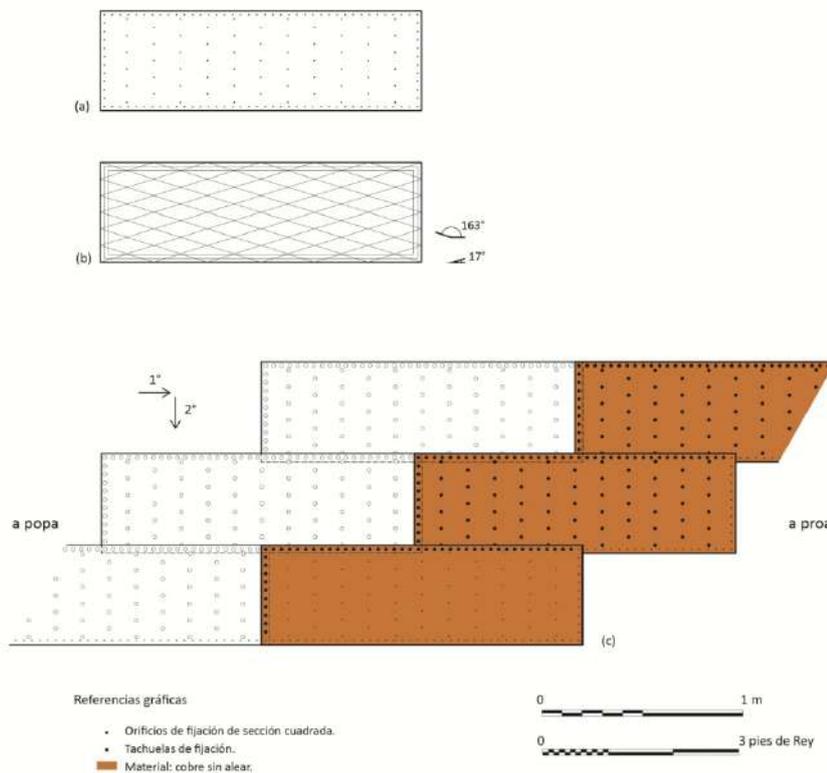


Figura 4. Diseño de las planchas de cobre de la fragata francesa La Vénus: (a) distribución de los orificios de fijación; (b) patrón de clavado; y (c) modalidad de colocación de las planchas de forro. Dimensiones de las piezas (altura x longitud): 50 cm x 160 cm. Gráfico: N. Ciarlo 2014 (en base a Boudriot y Bertí, 2004:14,15).

Las planchas utilizadas para forrar al HMS Alarm en su primer viaje tenían un peso de 12 onzas por pie cuadrado. Teniendo en cuenta el peso específico del cobre, estas planchas tendrían un espesor (grueso) de ca. 0,4 mm. Debido al desgaste sufrido por este revestimiento, ulteriormente los barcos se forraron con piezas de mayor espesor. El estándar dentro de la Real Armada británica en 1779, en el caso de las fragatas, era utilizar chapas de tres grosores: 32, 28 y 22 onzas por pie cuadrado. Las primeras se colocaron en la proa, adonde el desgaste producido durante la navegación era más severo, mientras que las más livianas iban en la popa, por ser la zona menos perjudicada (Cock, 2001). El aforro del HMS Sirius (1780-1790) tenía tres espesores diferentes, que coinciden de forma aproximada con las medidas anteriores (Stanbury, 1998). El largo (longitud, en el sentido de la eslora) y alto (anchura, en el sentido del puntal) también estaban bien estipulados. En los barcos británicos, las primeras planchas medían 4 x 2 pies (ca. 122 x 61 cm), aunque más adelante el alto se redujo a 14 pulgadas (ca. 36 cm). En el sitio Sirius (1797-1810) se localizaron dos planchas íntegras, con las iniciales del fabricante y el año 1808, cuyas dimensiones son 120 x 35,5 cm (von Arnim, 1998). Comparativamente, los barcos franceses estaban forrados con planchas de mayor tamaño. Los valores expuestos por Forfait en 1786 son 5 x 1 2/3 pies, ca. 54 x 162 cm, considerando el pie de Rey (Breen y Forsythe, 2007). Las cifras de La Vénus son consistentes con las anteriores: 160 x 50 cm (Boudriot y Bertí, 2004). El espesor, por otro lado, se encontraba dentro de los límites del rango de las piezas británicas (ca. 0,75 mm). En el caso de España, las planchas utilizadas para forrar un navío de 70 a 74 cañones en 1795 tenían las siguientes dimensiones: 72 3/4 x 22 1/2 pulgadas y media línea de espesor, ca. 169 x 52 x 0,1 cm (Artiñano y de Galdácano, 1920). El alto es similar al de las chapas del navío Triunfante, aunque estas son más cortas (ver Nieto et al., 2016).

Antes de colocar el forro, se calafateaba la tablazón del casco para impermeabilizar las juntas y proteger las maderas. Las chapas, una vez perforadas, se fijaban a la estructura con tachuelas de cobre o aleación de cobre, superponiendo sus bordes, de acuerdo a un orden estipulado. En el caso de

los barcos de guerra británicos y franceses, la secuencia iniciaba en la popa y a la altura de la línea de flotación. A partir de allí, se cubría el forro de madera con una hilera de planchas, hasta la proa. De este modo, las uniones verticales de las planchas miraban hacia atrás, lo que contribuía a evitar que estas se desprendieran por la acción del agua. La operación se repetía hasta llegar a la quilla. Así, las uniones horizontales quedaban de cara hacia arriba (ver Figura 4) (Staniforth, 1985). La forma de clavado de cada chapa también se definía de antemano. En líneas generales, estas planchas se perforaban perimetralmente (una línea de tachuelas) y en su interior (dos diagonales, que formaban un patrón tipo damero).

En la medida de lo posible, los barcos debían forrarse con planchas de cobre de una misma fuente. No obstante, debido a la creciente demanda experimentada durante ciertos años, no fue inusual que las chapas fueran proporcionadas por varios contratistas (Stanbury, 1998). En este punto es preciso mencionar que el aforro de los barcos solía estar sujeto a revisiones y reparaciones periódicas, en astilleros nacionales o extranjeros, debido al deterioro que sufrían las planchas. En consecuencia, con el transcurso del tiempo, las naves solían quedar revestidas con chapas de diversa procedencia. La vida media del forro de cobre era de unos cinco años (Boudriot y Berti, 1995)¹¹. A lo largo de su circunnavegación de dos años, el fondo del HMS Dolphin no requirió de ninguna atención, mientras que una nave con forro de sacrificio habría requerido entre dos o tres instancias de calafateo y forrado para mantenerse en similares condiciones de navegabilidad (Cock, 2001).

Manufactura y materiales

Métodos de fabricación de chapas y tachuelas

La premura por revestir con cobre un número creciente de barcos de guerra demandó significativos volúmenes de chapas y tachuelas, así como de pernos y clavos para la estructura. La cantidad de materiales necesarios para forrar la fragata de 50 cañones Hannibal es ilustrativa: 2.010 planchas de cobre (peso total: 6 toneladas y 12 quintales, ca. 6.700 kg) y 40,5 quintales de tachuelas (ca. 2.050 kg) (Winfield, 2005). Con relación a estas últimas, a unas 90 unidades por libra, resulta que un barco británico de 4^{to} orden requería alrededor de 400 mil tachuelas. La cifra es sugerente, si se tiene en cuenta que entre los navíos de línea (1er. a 3er. orden) y las fragatas, hacia la primera década de 1800 la flota británica estaba constituida por más de 250 efectivos (ver Gardiner, 2011). Para brindar una idea de la cantidad de chapas y tachuelas que requería un navío de 1er. orden, durante las reparaciones del HMS Victory (1765 – presente) en la década de 1960 se removieron alrededor de 17 toneladas de aforro (Bingeman et al., 2000). A modo comparativo, a principios del siglo XIX un navío español de tres puentes (130 cañones) demandaba 2.128 planchas (peso total: ca. 340 quintales, i.e. 17 toneladas) y ca. 50 quintales de clavos (tachuelas) (Artiñano y de Galdácano, 1920).

La producción de chapas de cobre (o aleación de cobre) se llevó a cabo por medio de forjado o laminado. En el primer caso se partía de un tocho, que era calentado en un horno abierto y golpeado por medio de martillos mecánicos (martinetes). Así se obtenían placas relativamente gruesas, que se apilaban y volvían a martillar, afinándolas hasta el espesor deseado. El proceso podía ser realizado en caliente o en frío, en este último caso mediante sucesivas instancias de recocido. Esta modalidad fue típica hasta principios del siglo XVIII, momento en que empezaron a utilizarse rodillos de laminación. En Europa, fuera de Gran Bretaña, el reemplazo de un método por el otro fue paulatino. El caso de España es sugerente: a mediados del siglo XVIII, este reino estaba obligado a importar latón batido (martillado) y tirado en planchas (laminado) del exterior, debido a la escasez que había en sus territorios (Dominguez Vicente, 1770). El grueso del cobre provino de Suecia y Hungría, hasta que en 1784 abrieron (a manos del Estado) las minas de Riotinto, en Huelva. En cuanto a las operaciones de manufactura, el primer laminador se instaló en Algeciras en 1793 (Rodger, 2006). En un informe

oficial de principios del siglo XIX constan las siguientes fábricas de tirado y batido de planchas para los barcos de guerra: 1) Puerto Real y Algeciras, para el Departamento de Cádiz; 2) Alcaráz, para el de Cartagena y 3) Jubia, para el de Ferrol (Artiñano y de Galdácano, 1920). En Francia, durante gran parte del siglo XVIII los productos de manufactura local fueron de cobre batido. Allí, los primeros laminadores para chapas de cobre se instalaron en Romilly, Normandía, a partir de 1780 (Boudriot y Berti, 1995). Para la construcción y funcionamiento del taller, además de seguir el patrón británico, el industrial Michel L. Le Camus de Limare contó con maquinaria importada y numerosos operarios de aquella región. Estas instalaciones se convirtieron en la principal fuente de abastecimiento de la Marina de Guerra francesa hasta principios del siglo XIX, aunque durante este tiempo también se importaron chapas de Gran Bretaña, Suecia y los Países Bajos (Ferreiro, 2007 y Bradley, 2010). Samuels resaltó la dificultad que supone discriminar estos métodos a partir de un análisis microestructural (Samuels, 1992)¹².

El material empleado hasta fines del siglo XVIII fue el cobre sin alear, aunque hubo algunos intentos aislados por utilizar aforro de aleación de cobre. A partir del 1800, con la patente de M. Collins (ver Ure 1853, p.596), la Real Armada británica comenzó a emplear chapas de base cobre con ciertas cantidades de zinc en la aleación (latón). En líneas generales, los tenores de este aleante fueron incrementándose en forma paulatina a lo largo de los años¹³. En 1832, luego de numerosas experimentaciones, George Muntz patentó una aleación de ca. cobre 60 % y zinc 40 %, denominada *yellow metal* (metal amarillo, más tarde conocida como metal Muntz), cuyo uso se generalizó a partir de la década siguiente¹⁴. Con esta aleación se logró minimizar los costos de producción y, dada su mayor resistencia al desgaste, aumentar la eficacia y vida útil de las chapas. Por ello, pronto se convirtió en una solución técnica de gran aceptación en el mercado, y su uso se extendió a los elementos de sujeción estructurales. El metal Muntz tenía una ventaja adicional con respecto a otros latones, ya que podía ser laminado en caliente. Debido a ello, la producción de chapas de esta aleación demandaba menos energía y tiempo (McCarthy 2005). A nivel analítico, los datos de composición química de los restos de un naufragio pueden aportar valiosa información para realizar una adscripción temporal aproximada (e.g. Lorusso et al., 2003; Gainsford, 2004 y McAllister, 2012)¹⁵.

Los minerales utilizados y el estado de la técnica con relación a la obtención del cobre presentaban algunas diferencias, según el lugar. Por ello, el grado de refinamiento (o pureza) del cobre con que se hicieron las chapas de aforro hasta comienzos del siglo XIX era heterogéneo. En el caso del cobre sin alear, su efectividad en el medio marino dependía en parte de las impurezas presentes. Aunque era tolerable cierto grado de impurezas, se sabía que existían cobres “buenos” y “malos” para su empleo como aforro. Las inclusiones de hierro, por ejemplo, tornaban al cobre menos efectivo como inhibidor del crecimiento de los organismos marinos sobre la superficie (Stanbury, 1998). En este caso, sobre la base de muestras de referencia, los análisis químicos también pueden aportar información significativa para evaluar la procedencia de los restos de un sitio arqueológico. A modo de ejemplo, la composición de las chapas de cobre pertenecientes a los barcos franceses Fougueux y Bucentaure es consistente con la nacionalidad de los navíos (ver Bethencourt, 2008/2009, 2010).

En cuanto a los elementos empleados para fijar las planchas, existen relativamente escasas referencias históricas sobre el proceso de manufactura de estos pequeños clavos. Augustin G. L. Lentin, en su libro sobre la producción del cobre en Anglesey, relató de forma sucinta cómo se fabricaban las tachuelas para el revestimiento de los barcos en Holywell (Flint, Gales). Según este autor, se utilizaba una aleación de cobre y zinc, con agregado de estaño, que se colaba en moldes de ceniza y arcilla. Luego, las cabezas de las piezas se torneaban una por una, actividad que demandaba el trabajo de numerosos operarios (Lentin, 1800). En la obra de Steel (1805) también se hace alusión a la fabricación por medio de colada en molde. Otros, en cambio, bregaban por el uso de tachuelas de cobre sin alear. En una publicidad de 1806 sobre clavos para las planchas de forro, Samuel Guppy hizo hincapié en los perjuicios ocasionados por la fragilidad de los clavos fundidos en aleación de cobre (Jones, 2004).

No obstante, dada su eficacia, las piezas con cabeza avellanada, hechas en aleación de cobre, estaño y zinc (mixed metal) en general tuvieron mayor aceptación que las tachuelas de cobre sin alear (McCarthy, 2005).

Los restos arqueológicos constituyen una fuente relevante para profundizar en el conocimiento sobre el proceso de producción. En particular, son de interés los datos de la composición química de un conjunto de tachuelas de naufragios que cubren un rango temporal entre 1780 y 1820. Estos elementos sugieren que existía una variabilidad considerable en torno a las aleaciones utilizadas por las potencias marítimas de la época. Las tachuelas de bronce reportadas por Samuels exhiben gran diversidad en los elementos mayoritarios de la aleación, tanto al interior de un sitio como entre diferentes naufragios. Ello podría estar relacionado con un control irregular al interior de los talleres, así como con las discrepancias de opinión de los especialistas acerca de la composición óptima de las piezas (Samuels, 1992)¹⁶. MacLeod analizó, entre otros elementos, las tachuelas y chapas del sitio HMS Sirius (1790). Los análisis químicos de las primeras muestran leves discrepancias en la concentración de los dos elementos principales, i.e. cobre y estaño (MacLeod, 1994, p.273, tablas 1 y 2). En su investigación sobre los materiales asociados al HMAV Bounty (1790) y al campamento de los amotinados en la Isla Pitcairn, en el Pacífico Sur, Viduka y Ness analizaron diversos artefactos de aleación de cobre. En el caso de las tachuelas, manufacturadas por medio de moldeo, el estaño es el único elemento de la aleación que se encuentra en una proporción mayor al 1 %. La variación en las relaciones de cobre-estaño y estaño-arsénico de las muestras puede relacionarse con el uso de minerales de distinta procedencia, el nivel técnico del momento y/o los estándares de producción (Viduka y Ness, 2004, p.163, tabla 2). En el caso del navío español Triunfante (1795), tanto los elementos de sujeción del forro de sacrificio como los del aforro de cobre fueron hechos en moldes y con una aleación base cobre, aunque esta presenta diferencias significativas en uno y otro caso. Es probable que esta variabilidad se relacione con los recorridos efectuados durante los últimos años de servicio del barco (Ciarlo et al., 2016a).

La variabilidad en la composición química que suelen presentar las tachuelas de los naufragios, por lo expresado anteriormente, no se relaciona necesariamente con la calidad de la manufactura. En este sentido, cobran especial interés los estudios sobre piezas llevadas a bordo como parte de la carga. Al respecto, cabe mencionar las tachuelas del sitio Deltebre I (1813). Estas piezas, que no presentan indicios de uso, fueron realizadas en bronce por medio de fundición y colada. Aunque existen ligeras variaciones en la composición química de las tachuelas, que pueden atribuirse a diferentes lotes de producción, la regularidad que muestra el conjunto con relación a este aspecto y al método de manufactura, denota que las piezas estuvieron sujetas a un estricto control de calidad durante su producción (Ciarlo et al., 2016b).

El empleo generalizado de las tachuelas fabricadas mediante moldeo desde al menos el siglo XVIII hasta la segunda mitad del siglo XIX puede considerarse como prueba de la efectividad del método y de los productos obtenidos. Lo anterior cobra notoriedad si se presta atención a las innovaciones propuestas durante este tiempo (e.g. el uso de rodillos) y la paulatina incorporación de maquinaria en el proceso de producción de clavazón. Pese a estas novedades, las tachuelas utilizadas tradicionalmente fueron la opción predominante.

Estudios de caracterización del aforro de cobre de naufragios

Existen varios trabajos que reportan los resultados obtenidos del análisis de naufragios que cubren el período comprendido entre la introducción del aforro de cobre y los años en que se comenzó a experimentar con diversas aleaciones. En la tabla 1 se exponen los datos obtenidos por diferentes investigadores a partir del análisis de naufragios de diferente procedencia. Dadas las características del presente estudio, no se tuvieron en consideración los análisis efectuados sobre piezas procedentes

de sitios indeterminados. Las investigaciones referidas a continuación testimonian que desde su introducción hasta finales del siglo XVIII, e incluso la primera década de la siguiente centuria, el aforo metálico de los barcos de guerra de las principales potencias europeas era de cobre sin alcar.

Tabla 1.

Composición química de las chapas de cobre de naufragios británicos, franceses y españoles, ordenados cronológicamente.

Naufragios	Composición química ¹										Análisis ²	Referencias ³
	Cu	Sn	Zn	Pb	Bi	As	Sb	Fe	Ni	Ag		
Británicos												
HMS Sirius (1790)⁴	99,4	0,003	0,005	0,175	0,050	0,241	0,030	0,004	0,019	0,018	AAS	MacLeod, 1994: 268; Stanbury, 1994: 103.
	99,4	0,002	0,002	0,171	0,053	0,255	0,030	0,008	0,019	0,067		
	98,9	0,008	0,003	0,010	0,113	0,826	0,019	0,010	0,035	0,005		
HMAV Bounty (1790)⁵	70,2	<0,005	0,002	0,150	0,080	0,363	0,013	5,190	0,015	0,020	ICP-MS	Viduka y Ness, 2004: tabla 1.
	88,6	<0,005	<0,005	0,069	0,131	0,882	0,021	<0,010	0,025	0,025		
	74,3	<0,005	0,091	0,283	0,039	0,620	0,017	0,137	0,018	0,009		
HMS Colossus (1798)	99,1	0,01	0,00	0,09	0,04	0,55	0,03	0,00	0,03	0,08	—	Northover, com. pers. 2016.
	99,4	0,00	0,01	0,11	0,03	0,26	0,02	0,01	0,09	0,02		
	99,2	0,00	0,07	0,03	s/d	0,48	s/d	0,00	0,02	s/d		
HMS Primrose (1809)	99,1	0,02	0,00	0,09	0,03	0,43	0,07	0,00	0,16	0,05	—	Northover, com. pers. 2016.
HMS Amethyst (1811)	99,2	0,00	0,01	0,01	0,14	0,38	0,04	0,00	0,03	0,08	—	Northover, com. pers. 2016.
	99,2	0,00	0,00	0,01	0,04	0,42	0,02	0,00	0,06	0,08		
	99,3	0,00	0,00	0,02	0,07	0,37	0,02	0,01	0,03	0,08	—	Northover, com. pers. 2016.
HMS Pomone (1811)	99,2	0,00	0,00	0,04	0,13	0,46	0,01	0,01	0,03	0,08	—	Northover, com. pers. 2016.
Deltebre I (1813)	99,3	0,009	<0,003	0,007	0,201	0,363	0,018	0,004	0,003	0,085	OES, AAS	Ciarlo, 2015.
HMS Success (1829)	99,4	0,220	0,016	0,090	s/d	0,060	s/d	s/d	s/d	s/d	—	MacLeod y Pitrun, 1986: tabla 2.
Franceses												
Fougueux (1805)	Cu	Sn	Zn	Pb	As	Fe	Ni	P	Mn	Si	OES	Bethencourt, 2010.
	99,8	0,009	0,001	0,025	0,063	0,004	0,047	0,004	0,011	0,004		
Bucentaure (1805)	99,8	0,004	0,001	0,013	0,104	<0,001	0,012	0,011	0,006	0,008	OES	Bethencourt, 2010.
Espanoles												
Triunfante (1795)	99,4	s/d	s/d	0,142	0,421	s/d	s/d	s/d	s/d	s/d	OES	Bethencourt, 2008/9, 2010.
Magdalena (1810)	99,4	0,006	0,002	0,315	0,234	<0,001	0,028	0,004	0,009	0,001	OES	Bethencourt, 2010.

1. Los valores están expresados hasta la tercera cifra de la parte decimal. Junto a los datos referentes a las técnicas instrumentales empleadas, se consigna la fuente bibliográfica de donde se obtuvo la información. 2. AAS (espectrometría de absorción atómica); ICP-MS (espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente); OES (espectroscopia de emisión óptica). 3. La información sobre los naufragios HMS Colossus (1798), HMS Primrose (1809), HMS Amethyst (1811) y HMS Pomone (1805), fue gentilmente suministrada por el Dr. Peter Northover. 4. Las diferencias de composición registradas entre las dos primeras muestras y la tercera (en particular el contenido de arsénico) estarían relacionadas o bien con alguno de los recorridos que se le realizaron al barco o bien con el uso simultáneo de planchas provistas por diferentes contratistas (Stanbury, 1998:225). 5. Los valores de cobre por debajo del 90 % deben estar subestimados (la suma de los porcentajes parciales no da cuenta de la composición global). Por otro lado, la última muestra procede del campamento de los amotinados.

Dentro de este contexto, merece la pena mencionar el trabajo de Craddock y Hook (2012). Estos autores realizaron un estudio de caracterización por medio de AAS (en algunos casos se utilizó ICP-AES) de lingotes de cobre y estaño procedentes de naufragios del siglo XVIII y principios del siglo XIX (entre otros) pertenecientes a la Compañía Británica de las Indias Orientales (East India Company, EIC). Este singular trabajo reviste interés para analizar la posible procedencia de algunas de las chapas, pernos y clavos, en función de su composición química. Al respecto, los elevados contenidos de bismuto y arsénico que muestran los lingotes de cobre rectangulares y planos (battery plate ingots) hallados en los sitios EIC Albion (1765), EIC Admiral Gardner (1809) y EIC Carnbrae Castle (1829), son consistentes con los valores registrados en varias piezas de cobre y aleación de cobre mencionadas en la tabla 1. El tenor de plomo también puede ser un indicador a tener en cuenta, sobre todo cuando se comparan varios objetos de cobre británicos y franceses de principios del siglo XIX (ver Craddock y Hook, 2012, tabla 6; Ciarlo, 2015, tablas 2 y 3).

Consideraciones finales

La dinámica del cambio

En este artículo se expuso el proceso que condujo a la introducción del aforro de cobre, sistema de suma importancia para proteger los fondos de los barcos y mejorar su velocidad, maniobrabilidad y durabilidad. Los británicos lideraron el proceso de experimentación e implementación de la novedad, que hundía sus raíces en conceptos y propuestas de comienzos del siglo XVIII. Aunque las chapas probaron ser eficaces para resolver el problema de los organismos perforantes (broma) e incrustantes, tuvo consecuencias nefastas para los elementos de sujeción del casco y otros componentes de hierro. La solución al problema de la corrosión se determinó hacia el último cuarto de la centuria sobre bases empíricas, y consistió en reemplazar los elementos de hierro por pernería y clavazón de cobre (o aleación de cobre). La posibilidad de concretar este cambio vino de la mano de un avance colateral. Nuevos métodos de producción permitieron mejorar las prestaciones mecánicas de las piezas, que debían soportar los esfuerzos a los que estaba sometida la estructura de los barcos. Francia siguió de cerca a Inglaterra, gracias a su habitual política de obtención de información mediante el espionaje militar e industrial. Comprobadas las ventajas del aforro de cobre, los franceses se pusieron en marcha para proveer a sus barcos con este sistema de protección. Los españoles obraron en este sentido un poco más tarde, si bien durante varios años continuaron utilizando otras soluciones técnicas, que incluyeron el empleo combinado del forro de sacrificio y de cobre.

El caso del aforro de cobre da cuenta de una dinámica que, no siendo exclusiva del ámbito naval, se expresó en este de forma cabal en este período: la experimentación seguida de una evaluación

pautada fue la senda típica que condujo a la introducción de diferentes novedades, que permitieron en el corto plazo la resolución de desafíos que supusieron la navegación y la guerra. Dada la trayectoria histórica y circunstancias internacionales, las políticas de los Estados de cara a posibles enfrentamientos fueron de suma importancia a la hora de decidir por adoptar un recurso que reportó notables ventajas operativas para las flotas que operaban en el exterior, durante períodos de tiempo prolongados. No obstante, cabe resaltar que el conservadurismo y escaso dinamismo vigente en ciertos sectores, sumado a experiencias poco satisfactorias, en ocasiones postergó la introducción de mejoras o llevó a que se aplicaran soluciones técnicas intermedias, que combinaban diferentes rasgos. Esta innovación tuvo implicaciones más allá del ámbito naval, sobre todo en el crecimiento de la industria del cobre. Varios fabricantes mantuvieron una relación fluida con el ámbito de las Armadas, realizaron numerosos aportes técnicos y se beneficiaron de los contratos para la producción de manufacturas. Finalmente, las investigaciones llevadas a cabo para brindar una explicación acerca de los fenómenos electroquímicos implicados durante el uso del aforro ocurrieron en estrecha relación con el ámbito práctico, y a la postre obraron en beneficio de las innovaciones.

Notas

¹ Los más conocidos son los moluscos bivalvos de la familia Teredinidae, compuesta por alrededor de una docena de géneros (Bastida et al., 2010). El más comúnmente citado en la bibliografía es el *Teredo*, en particular el *T. navalis* (conocido vulgarmente como broma).

² Básicamente, el carenado consistía en tumbar el barco sobre un costado (se descubría o enseñaba la quilla), raspar los organismos, algas y podredumbre seca adherida sobre el fondo descubierto, y untar las tablas del forro exterior con el residuo obtenido del hervor de una mezcla de sebo y resina.

³ Para mayor información sobre el uso del plomo como aforro, ver Marr (2012). Las planchas de este material continuaron usándose para revestir ciertos compartimentos internos de los barcos (e.g. la cocina y el almacén de pólvora). En ocasiones, además, sirvieron para forrar sectores específicos de los cascos.

⁴ Un leve grado de corrosión podía ser beneficioso, dado que aumentaba el poder de sujeción de los pernos. No obstante, la progresión de este deterioro resultaba en la pérdida de sus cualidades mecánicas y, además, tenía consecuencias perniciosas sobre la madera circundante (McCarthy, 2005).

⁵ Uno de los metales con que se experimentó fue la aleación de cobre, estaño y zinc conocida como mixed metal o compound metal. Según Knowles, este consistía en cuatro partes de cobre, una de estaño y, en ocasiones, una proporción minoritaria de zinc. Los pernos manufacturados con este material fueron considerados demasiado quebradizos para ser usados como elementos estructurales (Knowles, 1821).

⁶ A principios de 1782, los fondos de 82 navíos de 1er a 3er orden, 14 barcos de 50 cañones (4to orden), 115 fragatas y 102 corbetas -muchos aún tenían pernos y clavos de hierro bajo la línea de flotación- estaban forrados con cobre (Knight, 1973).

⁷ A partir del siglo XIX, también se emplearon pernos y clavos de aleación de cobre. Los objetos recuperados de naufragios de la primera mitad del siglo XIX, en especial de las primeras décadas, dan cuenta del uso de latones (cobre-zinc) y bronce (cobre-estaño) con contenidos variables de zinc y plomo en menor proporción. Estos elementos reportaron varias ventajas técnicas con relación a la producción (e.g. mejorar la colabilidad y bajar el punto de fusión) y el uso (e.g. aumentar la resistencia a la tracción y a la corrosión) de las piezas (ver Ciarlo, 2016).

⁸ Las tachuelas de hierro se claveteaban sobre unas placas de madera y muy próximas unas de otras (ca. 2.700 por metro cuadrado, entre 1 y 2 millones por barco). Este sistema de protección estuvo en uso hasta 1784 y fue efectivo contra los organismos perforantes de madera, aunque proveía a los otros de una superficie ideal para que se adhirieran (Boudriot, 1993, citado en Breen y Forsythe, 2007, p.45).

⁹ Los resultados del examen metalúrgico de estos elementos (chapas, clavos y tachuelas) pueden consultarse en otros trabajos (Bethencourt, 2008/9; 2010; Ciarlo et al., 2016).

¹⁰ En el caso de los barcos de guerra británicos, por ejemplo, en un principio se forraron hasta 12 pulgadas por debajo de la línea de flotación. En 1783, por órdenes del Consejo de la Marina, el aforro se extendió hasta cubrir 16 pulgadas por encima de aquella línea (McKay y Coleman, 2010).

¹¹ En una lista de materiales, efectos y pertrechos elaborada en 1805 y 1806 en el arsenal de la Carraca, figura la siguiente especificación para un navío de tres puentes y 130 cañones: duración total del forro de cobre, 7 años (armado) y 9 años (desarmado) (Artiñano y de Galdácano, 1920).

¹² MacLeod y Pitrun (1986) analizaron la composición química y microestructura de un conjunto de chapas de cobre de los naufragios Batavia (1629), Zeewijk (1727), Rapid (1811) y HMS Success (1829). Contrario a lo esperado, las piezas no muestran variaciones significativas atribuibles a uno u otro método (martillado y laminado). Aun así, el estudio comparativo de este tipo de piezas puede aportar información de interés acerca de los cambios en torno a las operaciones de obtención y refinado de los metales. El menor contenido de inclusiones de óxido de cobre (cuprita) y plomo de la chapa del Rapid con respecto al que presentan las muestras de los barcos neerlandeses, puede considerarse como indicio del mejoramiento de las prácticas de fundición (MacLeod y Pitrun, 1986).

¹³ Las propuestas en torno a los materiales empleados para la manufactura de las chapas fueron diversas, aunque no todas tuvieron aplicación en las Armadas (ver Jones, 2004). Mushet, por ejemplo, hizo hincapié en las ventajas de alear el cobre con pequeñas concentraciones de otros elementos; por cada 100 libras de cobre: 2 onzas de zinc (0,125 %) o 4 onzas de antimonio (0,25 %) o 8 onzas de arsénico (0,5 %) o 2 onzas de estaño (0,125 %) (Mushet, 1825). Otros prescindieron del cobre, como en el caso de la patente de Pope sobre chapas de aleación de estaño y zinc, o estaño, plomo y zinc (Pope, 1825).

¹⁴ La proporción de cobre y zinc, en la práctica, era variable. Debido a la volatilidad del zinc, era muy difícil obtener una formulación precisa (McAllister, 2012).

¹⁵ Pese a la utilidad de este tipo de información como indicador cronológico (*terminus post quem*), es preciso considerar las posibles instancias de experimentación que precedieron la adopción efectiva (i.e. innovación) de cierto material u objeto novedosos, así como la continuidad de aquellos empleados previamente. Asimismo, deben tenerse en cuenta las dificultades que suelen presentar las muestras de latón arqueológicas para determinar su composición original debido al deterioro por descincificación (ver MacLeod y Pitrun, 1986; MacLeod, 1994, sobre esta última cuestión).

¹⁶ Las variaciones registradas no habrían tenido implicaciones serias con respecto al comportamiento frente a la corrosión; en definitiva, todos los ejemplares analizados perduraron largo tiempo en el ambiente al que estuvieron expuestos durante su uso (Samuels, 1992).

Agradecimientos

El autor agradece a Ana María Rocchietti y Mónica Valentini, por su invitación al VI Simposio Nacional e Internacional “Teoría y Práctica de la Arqueología Histórica”. El contenido de este artículo fue uno de los ejes temáticos en torno a los que se estructuró la conferencia titulada “Cambio y continuidad en la tecnología naval moderna: aportes de las investigaciones arqueometalúrgicas de naufragios”.

Referencias

ARTIÑANO y DE GALDÁCANO, G. (1920). *La arquitectura naval española (en madera)*. Barcelona: Oliva de Vilanova.

- BASTIDA, R.; ELKIN, D. y GROSSO, M. (2010). Enfoques interdisciplinarios para el estudio de procesos naturales de formación de sitios arqueológicos subacuáticos: investigaciones en el marco del proyecto Swift (Provincia de Santa Cruz, Argentina). En F. Oliva; N. De Grandis, y J. Rodríguez (comps.), *Arqueología argentina en los inicios de un nuevo siglo*, Tomo III, (pp. 269-283). Rosario, Argentina: Laborde Editor.
- BETHENCOURT, M. (2008/9). Adaptation of Archaeometry Techniques to the Study of 18th- to 20th-century Copper Sheathing in Ships. *HMS News* (70), 3-4.
- BETHENCOURT, M. (2010). *Caracterización de forro, pecio de Camposoto*. Laboratorio de Ensayos, Corrosión y Protección, Dpto. Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química Inorgánica. Andalucía, España: Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales. San Fernando, Ms.
- BINGEMAN, J. M.; BETHELL, J. P.; GOODWIN, P. y MACK, A. T. (2000). Copper and other sheathing in the Royal Navy. *The International Journal of Nautical Archaeology* 29 (2), 218-229.
- BOUDRIOT, J. y BERTI, H. (1995). *Les Vaisseaux de 74 à 120 canons: étude historique, 1650-1850*. Collection Archéologie Navale Française, Paris, Francia: ANCRE.
- BOUDRIOT, J. y BERTI, H. (2004). *18-pdr Frigate La Vénus (1782)*. Niza, Francia: ANCRE.
- BRADLEY, M. (2010). Examples of industrial and military technology transfer in the eighteenth century. *Documents pour l'histoire des techniques* (19), 87-95.
- BREEN, C. y FORSYTHE, W. (2007). The French Shipwreck *La Surveillante*, Lost in Bantry Bay, Ireland, in 1797. *Historical Archaeology* 41(3), 39-50.
- CAMPBELL, J. y GESNER, P. (2000). Illustrated catalogue of artefacts from the HMS *Pandora* wrecksite excavations 1977-1995. *Memoirs of the Queensland Museum, Cultural Heritage Series* 2(1), 53-159.
- CIARLO, N. C. (2015). Naval metals from mid 18th- to early 19th-century European shipwrecks: a first analytical approach. *Historical Metallurgy* 47(2), 146-152.
- CIARLO, N. C. (2016). *Innovación tecnológica y conflicto naval en Europa Occidental, 1751-1815: aportes arqueológicos e históricos al conocimiento de la metalurgia y sus aplicaciones en los barcos de guerra*. (Tesis de Doctorado). Universidad de Buenos Aires, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.
- CIARLO, N. C., Lucchetta, M. C. y De Rosa, H. (2016a). Análisis metalográfico y químico de un conjunto de artefactos recuperados del naufragio *Triunfante* (1756-1795), Golfo de Rosas (Cataluña, España). En: X. Nieto, M. Pujol i Hamelink y G. Vivar (eds.), *El vaixell Triunfante: Una fita de la ciència i de la tècnica del segle XVIII*, (pp. 159-171). Monografies del Centre d'Arqueologia Subaquàtica de Catalunya No.12, Girona, España: Museu d'Arqueologia de Catalunya.
- CIARLO, N. C.; MAXIA, G.; RAÑI, M.; DE ROSA, H.; GELI, R. y VIVAR, G. (2016b). Craft production of large quantities of metal artifacts at the beginnings of industrialization: application of SEM-EDS and multivariate analysis on sheathing tacks from a British transport sunk in 1813. *Journal of Archaeological Sciences: Reports* (5), 263-275.
- COCK, R. (2001). 'The finest invention in the world': the Royal Navy's early trials of copper sheathing, 1708-1770. *The Mariner's Mirror* 87(4):446-459.

CRADDOCK, P. y HOOK, D. (2012). An economic history of the post-Medieval world in 50 ingots: the British Museum collection of ingots from dated wrecks. *The British Museum Technical Research Bulletin* (6), 55-68.

DAVY, H. (1824a.). On the corrosion of copper sheathing by sea water, and on methods of preventing this effect; and on their application to ships of war and other ships. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* (114), 151-158.

DAVY, H. (1824b). Additional Experiments and Observations on the Application of Electrical Combinations to the Preservation of the Copper Sheathing of Ships, and to other purposes. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* (114), 242-246.

DOMINGUEZ VICENTE, J. M. (1770). *Ilustración y continuación a la Curia Philipica, y corrección de las citas que en ella se hallan erradas: trátase del comercio marítimo*. Valencia, España: Imprenta de Francisco Berton.

FERNÁNDEZ DURO, C. ([1895] 1972-1973). *Armada Española, desde la unión de los Reinos de Castilla y de Aragón*, 9 tomos. Madrid: Museo Naval.

FERREIRO, L. D. (2007). Spies versus prize: technology transfer between navies in the Age of Trafalgar. *Mariner's Mirror* 93(1):16-27.

GAINSFORD, M.; GREEN, J.; MCCARTHY, M. y SOUTER C. (2004). Wreck inspection report: Ningaloo mid-19th century unidentified. *Western Australian Maritime Museum*, No. 186. Australia. Ms.

GARDINER, R. (2011). *Warships of the Napoleonic Era: Design, Development and Deployment*. Reino Unido: Seaforth Publishing.

GLASGOW, T. (1967). Sixteen-Century English Seamen Meet a New Enemy – The Ship Worm. *American Neptune* 27(3), 177-185.

HARLAND, J. H. (1976). Piet Heyn and the early use of copper sheathing. *Mariner's Mirror* 62(1), 1-2.

HARRIS, J. R. (1966). Copper and Shipping in the Eighteenth Century. *The Economic History Review* (19), 550-568.

JONES, T. N. (2004). *The Mica Shipwreck: Deepwater Nautical Archaeology in the Gulf of Mexico*. (Tesis de Maestría) Texas A&M University, College Station, EE.UU. Ms.

KAHANOV, Y. y ASHKENAZI, D. (2011). Lead sheathing of ship hulls in the Roman period: Archaeometallurgical characterisation. *Materials Characterization* (62), 768-774.

KNIGHT, R. J. B. (1973). The introduction of copper sheathing into the Royal Navy, 1779-1786. *The Mariner's Mirror* 59(3), 299-309.

KNOWLES, J. (1821). *An inquiry into the means which have been taken to preserve the British Navy, from the earliest period to the present time*. Londres: Winchester & Varnham.

LENTIN, A. G. L. (1800). *Briefe über die Insel Anglesea, vorzüglich über das dasige Kupfer-Bergwerk und die dazu gehörigen Schmelzwerke und Fabriken*. Lipsia, Alemania: Siegfried Lebrecht Crusius.

LORUSSO, H.; SVOBODA, H. G. y DE ROSA, H. (2003). Caracterización microestructural de componentes metálicos hallados en el pecio de Reta. Bariloche, Río Negro, Argentina: Actas de las *Jornadas SAM/CONAMET*, (pp. 1103-1106).

MACLEOD, I. (1994). Conservation of corroded metals – a study of ships' fastenings from the wreck of HMS *Sirius*. En: D. A. Scott, J. Podany y B. B. Considine (eds.), *Ancient and Historic Metals Conservation and Scientific Research*, (pp. 265-278). Los Ángeles, EE.UU: Getty Conservation Institute.

MACLEOD, I. D. y PITRUN, M. (1986). The effects of microstructure on long-term corrosion. *Australasian Corrosion Association, Proceedings Conference 2*(26), 1-14.

MARR, A. (2012). *A comprehensive investigation of lead sheathing from the Emanuel Point shipwrecks in Pensacola Bay, Florida*. (Tesis de Maestría). The University of West Florida, EE.UU. Ms.

MCALLISTER, M. (2012). Preliminary analysis of copper alloy fastenings from an unidentified shipwreck in Koombana Bay, Western Australia. *AIMA Bulletin* (36), 36-43.

MCCARTHY, M. (2005). *Ships' Fastenings. From Sewn Boat to Steamship*. Texas: A&M University Press. EE.UU.

MCKAY, J. y COLEMAN, R. (2010). *The 24-Gun Frigate Pandora, 1779. Anatomy of the ship*. Londres: Conway Maritime Press, Ltd.

MUSHET, R. (1825). Patent alloyed copper for sheathing ships. *Register of the Arts and Sciences*, 2, 99.

NASH, M. (2001). The *Sydney Cove* historic shipwreck (1797). En: M. Staniforth y M. Hyde (eds.), *Maritime Archaeology in Australia: A Reader*, (pp. 108-110). Blackwood: Australia Southern Archaeology.

NIETO, X.; PUJOL I HAMELINK, M. y VIVAR, G. (eds.) (2016). *El vaixell Triunfante: Una fita de la ciència i de la tècnica del segle XVIII*. Monografies del Centre d'Arqueologia Subaquàtica de Catalunya No.12. Girona, España: Museu d'Arqueologia de Catalunya.

POPE, C. (1825). Pope's patent metallic sheathing. *Register of the Arts and Sciences*, 2, 213-214.

PROUST, J. L. (1795). *Anales del Real Laboratorio de Química de Segovia*, Tomo 2. D. Antonio Espinosa, Segovia, España.

PUJOL I HAMELINK, M., DE LA FUENTE, P. y VIVAR, G. (2011). El navío *Triunfante*: Jorge Juan y la construcción a la inglesa. *Actas de las Jornadas de ARQUA 2011*, (pp. 124-130). Cartagena, España: Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.

RODGER, N. A. M. (2006). *The Command of the Ocean. A Naval History of Britain, 1649-1815*. Londres: Penguin Books.

SAMUELS, L. E. (1992). Australia's Contribution to Archaeometallurgy. *Materials Characterization* (29), 69-109.

STANBURY, M. (1994). *HMS Sirius 1790: an illustrated catalogue of artefacts recovered from the wreck site at Norfolk Island*. Adelaide, Australia: Australian Institute for Maritime Archaeology, No.7.

STANBURY, M. (1998). HMS *Sirius*: 'reconstructed... pygmy battle ship' or 'appropriate' 6th Rate vessel? En: M. Bound (ed.), *Excavating Ships of War*, (pp. 217-229). The International Maritime Archaeology Series, vol. 2, University of Oxford. Shropshire, Reino Unido: Anthony Nelson Publishers.

STANFORTH, M. (1985). The introduction and use of Copper Sheathing – A history. *The Bulletin of the Australian Institute for Maritime Archaeology* 9(1-2), 21-48.

STEEL, D. (1805). *The Shipwright's Vade-Mecum: A Clear and Familiar Introduction to the Principles and Practice of Ship-Building*. Londres: P. Steel.

URE, A. (1853). *A Dictionary of Arts, Manufactures, and Mines*. Little, Boston, EE.UU: Brown and Co.

U.S. NAVAL INSTITUTE (1952). *The History of the Prevention of Fouling. Marine Fouling and its Prevention*, pp. 211-223. Woods Hole Oceanographic Institute, No.580. Menasha, EE.UU: George Banta Publishing Co.

VIDUKA, A. y NESS, S. (2004). Analysis of some copper-alloy items from HMAV *Bounty* wrecked at Pitcairn Island in 1790. *Proceedings of Metal*, (pp. 160-172). Canberra, Australia: National Museum of Australia.

VIVAR LOMBARTE, G.; GELI, R. y NIETO PRIETO, X. (2014). Deltebre I. Un barco hundido en la desembocadura del Ebro durante la Guerra del Francés. En: X. Nieto Prieto y M. Bethencourt (coords.), *Arqueología subacuática española, 1*, (pp. 221-227). Cádiz, España: Editorial UCA

VON ARNIM, Y. (1998). The wreck of the 5th rated British frigate HMS *Sirius* (1797) in Mauritius. *The Bulletin of the Australian Institute for Maritime Archaeology* (22), 35-44.

WILKINSON, J. J. (1844). On Iron Sheathing, broad-headed Nails, and Inner Sheathing for Ships. *Institution of Civil Engineers Minutes of Proceedings*, 2, (pp. 168-170). Londres: Longman & Co.

WINFIELD, R. (2005). *The 50-Gun Ship. A Complete History*. Londres: Mercury Books.

Recibido: 14/05/2017

Aceptado: 15/06/2017