

LA ARQUEOMETRÍA EN LA CONSERVACIÓN PREVENTIVA DE OBJETOS METÁLICOS DEL MUSEO NAVAL DE MADRID

ARCHEOMETRY IN PREVENTIVE CONSERVATION OF METAL OBJECTS FROM THE NAVAL MUSEUM OF MADRID

F. Agua

Instituto de Historia, CCHS-CSIC. Calle Albasanz, 26-28.
28037 Madrid, España

J.M. Gálvez Farfán

Museo Naval, Ministerio de Defensa. Paseo del Prado, 5.
28014 Madrid, España

J. Peña

Instituto de Historia, CCHS-CSIC. Calle Albasanz, 26-28.
28037 Madrid, España

J.F. Conde

Instituto de Historia, CCHS-CSIC. Calle Albasanz, 26-28.
28037 Madrid, España

M. González Rodrigo

Museo Naval, Ministerio de Defensa. Paseo del Prado, 5.
28014 Madrid, España

S. García Ramírez

Museo Naval, Ministerio de Defensa. Paseo del Prado, 5.
28014 Madrid, España

M. García Heras

Instituto de Historia, CCHS-CSIC. Calle Albasanz, 26-28.
28037 Madrid, España

M.A. Villegas*

Instituto de Historia, CCHS-CSIC. Calle Albasanz, 26-28.
28037 Madrid, España

RESUMEN

La evaluación de las condiciones ambientales, tanto en sala como en vitrinas, realizada en el Museo Naval de Madrid a partir de un protocolo de seguimiento de la acidez ambiental que utiliza sensores ópticos basados en la tecnología sol-gel, sirvió para constatar que las condiciones de conservación eran adecuadas en la mayoría de los espacios expositivos. Sin embargo, en algunas vitrinas en las que se habían observado problemas de conservación de objetos metálicos procedentes de pecios, los valores de pH ambiental detectados fueron ácidos (valores promedio inferiores a pH = 6,5). Esta contribución presenta los resultados de la investigación llevada a cabo para determinar las causas de los problemas de conservación observados en una vitrina que expone balas de plomo, con el propósito de establecer pautas de conservación preventiva. Las balas de plomo desarrollaban una capa blanquecina poco consistente tras su limpieza y posterior protección contra la corrosión con una resina acrílica comercial. Se realizaron diferentes ensayos en el laboratorio con los objetos tratados y sin tratar dentro de recipientes cerrados, y con los soportes y contenedores de polimetilmetacrilato del interior de las vitrinas, utilizando en ambos casos los

ABSTRACT

The evaluation of the environmental conditions, both in the room and in the showcases, carried out in the Naval Museum of Madrid from a protocol of monitoring the environmental acidity using optical sensors based on the sol-gel technology, served to confirm that the conditions were adequate in most exhibition spaces. However, in some showcases where conservation problems of metallic objects from wrecks had been observed, the environmental pH values detected were acid (mean values lower than pH = 6.5). This contribution presents the results of the investigation carried out to determine the causes of the conservation problems observed in a showcase that exposes lead bullets, in order to establish preventive conservation guidelines. The lead bullets develop a poorly consistent whitish coating after their cleaning and subsequent corrosion protection with a commercial acrylic resin. Different tests were carried out in the laboratory with the treated and untreated objects inside closed containers, and with the polymethylmethacrylate supports and containers from inside the showcases, using in both cases the mentioned optical sensors. The results indicated that a layer of lead formate was formed in the lead objects produced by

* mariangeles.villegas@cchs.csic.es

sensores ópticos mencionados. Los resultados indicaron que en los objetos de plomo se formaba una capa de formiato de plomo producida por la presencia de especies ácidas cuyo origen se debe, muy probablemente, al efecto combinado del empleo de la resina acrílica y la presencia de materiales de polimetilmetacrilato en un ambiente cerrado. La determinación del pH en el ambiente de dicha vitrina y su seguimiento en los ensayos de laboratorio ha permitido alertar sobre el medio ácido generado, lo cual ha servido para establecer acciones correctoras de conservación preventiva en el museo.

Palabras Clave: conservación, plomo, acidez ambiental, sensor, protección.

the presence of acidic species, the origin of which is most probably due to the combined effect of the use of the acrylic resin and the presence of polymethylmethacrylate materials in a closed environment. The determination of the pH in the environment of the showcase and its follow-up in the laboratory tests allowed to alert to the acid medium generated, which has served to establish corrective actions of preventive conservation in the museum.

Keywords: Conservation, lead, environmental acidity, sensor, protection

1. INTRODUCCIÓN

Los objetos metálicos depositados y/o expuestos en los museos pertenecen al grupo de materiales con mayor tendencia a la degradación y corrosión, especialmente si proceden de entornos o ambientes de alto riesgo con elevados porcentajes de humedad relativa. La conservación de bienes culturales metálicos rescatados del fondo marino es uno de los retos más complicados, ya que el contacto prolongado con el agua marina y sus sales deteriora profundamente los metales y aleaciones hasta el extremo de que puede hacer desaparecer el cuerpo metálico completamente. En el Museo Naval de Madrid se exponen muy diversos bienes culturales procedentes de pecios entre los que es frecuente encontrar objetos o piezas de objetos realizados con metales y aleaciones de distinta y variada naturaleza. Dichos bienes culturales, debido a su precario estado de conservación, se someten a procesos de desincrustación y limpieza, así como a tratamientos de preservación y protección, sobre todo si han de ser expuestos en las vitrinas y salas del museo. Muy frecuentemente en un mismo espacio expositivo o vitrina coexisten bienes culturales de distintos materiales, no siempre absolutamente compatibles

desde el punto de vista fisicoquímico en cuanto a interacciones, reactividad o sinergias que afectan su grado de deterioro y su estado de conservación. Por otro lado, en la mayoría de las ocasiones no es posible evitar dicha coexistencia de materiales, ya que el propio discurso del museo lo requiere. El origen del presente estudio fue un problema de conservación de las balas de plomo procedentes de la Nao San Diego, expuestas en una vitrina de la sala dedicada a dicho galeón en el Museo Naval de Madrid. El galeón español San Diego (1585) realizaba la ruta comercial entre Filipinas y Nueva España (México) para el intercambio de mercancías propias de ambas colonias. En 1600, ante el ataque alentado por la Armada Británica de tres navíos piratas holandeses (Mauritius, Eendracht y Hope) para conquistar Manila, el galeón San Diego fue armado urgentemente con 14 cañones y, junto con otros tres navíos españoles, defendió con éxito la bahía de Manila. La Nao San Diego se hundió durante el combate y su pecio fue descubierto en 1991 a 52 m de profundidad a unos 1200 km de Manila. La excavación fue realizada por el arqueólogo submarino francés Frank Goddio. El pecio contenía monedas, armas, cañones, municiones, joyas de oro, porcelanas de la dinastía

Ming, vasijas de cerámica, etc. El 70 % de los objetos rescatados se conservan en el Museo Naval de Madrid y el resto en el Museo Nacional de Filipinas. Puesto que las balas de plomo expuestas en el Museo Naval presentaban recurrentemente, después de intervenciones periódicas de limpieza y tratamientos de protección, una capa blanquecina de escasa adherencia, los objetivos del estudio se centraron en llevar a cabo una caracterización arqueométrica de los materiales (plomo y diversos materiales auxiliares presentes en la vitrina), así como una evaluación ambiental dentro de la vitrina. Para ello los objetivos concretos se desglosan en los siguientes puntos: determinar la composición química de las balas de plomo; caracterizar la estructura metálica de la aleación de plomo; determinar la composición química de la capa de corrosión; evaluar el ambiente en el interior de la vitrina; revisar el procedimiento de intervención curativa de las balas; reproducir en el laboratorio las condiciones de corrosión de las balas; establecer recomendaciones de intervención y conservación preventiva.

2. EQUIPOS EXPERIMENTALES

La evaluación ambiental previa llevada a cabo tanto en el exterior del Museo Naval como en el interior (espacios expositivos en las salas visitables y vitrinas) se realizó con sensores químicos de respuesta óptica desarrollados por el equipo de investigación del Instituto de Historia (Villegas Broncano *et al.*, 2010). Los detalles experimentales sobre la preparación, calibración, validación y uso de los sensores en operaciones de evaluación ambiental se recogen en trabajos anteriores (Peña-Poza *et al.*, 2011, 2013; Llorente-Alonso *et al.*, 2013; García-Heras *et al.*, 2005). El análisis químico cuantitativo de las balas se realizó de acuerdo con la norma UNE 37201-89 (Plomo. Designación y composición, 7 febrero 1989) y consistió en las siguientes etapas: extracción de viruta de una bala, puesta en disolución ácida de la viruta de la muestra y determinación

analítica mediante espectrometría de absorción atómica de llama. Se utilizó un equipo Varian modelo Spectr AA-220 Fs. Para el análisis morfológico se usó un microscopio óptico digital Olympus modelo GX51 y para el análisis metalográfico un microscopio Olympus modelo PME3. El polvo blanquecino procedente de la superficie deteriorada de las balas se caracterizó mediante difracción de rayos X (DRX) con un equipo PANalytical X'Pert MPD (radiación $K\alpha$ del cobre, 45 kV, 40 mA, $2\theta=5-60^\circ$). La microestructura de la capa de alteración en la superficie exterior de las balas se observó con un microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (MEBEC) Hitachi S-4800 de cátodo frío con tensión de aceleración de 15 kV, acoplado a un sistema analizador de dispersión de energía de rayos X (EDS) Oxford Inca. Para la observación de MEBEC se cortó transversalmente un fragmento de la muestra, no siendo necesaria la metalización de la superficie. Los ensayos de meteorización inducida en el laboratorio se realizaron con reactivos de grado para análisis. Asimismo, se utilizaron fragmentos de polimetilmetacrilato (PMMA) comercial, serrín de aglomerado común y la resina comercial Inrcal44® (Ficha técnica de Inrcal 44®. Material safety data sheet NPCA 1-84. For coatings, resins and related materials, 21 marzo 2001).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Evaluación ambiental con sensores de acidez.

La evaluación ambiental con sensores de acidez, que se llevó a cabo en el exterior e interior (salas expositivas y vitrinas) del Museo Naval durante 7 días consecutivos, demostró que el pH del aire depende de la localización y zonas evaluadas. La tabla 1 resume los resultados promedio registrados en el interior de la vitrina que contiene las balas procedentes del pecio del galeón San Diego, así como los datos promedio registrados en el ambiente de diversas salas expositivas de la exposición permanente y en el exterior del museo (Peña-Poza *et al.*, 2014).

Tabla 1- Datos promedio de acidez ambiental registrados en diversas zonas interiores y en el exterior del Museo Naval.

Ubicación	pH promedio	Desviación típica (\pm)
Interior vitrina	6,33	0,10
Salas	6,97	0,12
Exterior	5,68	1,22

La notable acidez (pH=5,68) que se detecta en el exterior se explica fácilmente por las características del intenso tráfico rodado y contaminación del Paseo del Prado de Madrid donde se ubica el Museo Naval. La acidez registrada en el ambiente de las salas expositivas es, sin embargo, muy próxima a la neutralidad (pH=6,97), mientras que en la vitrina donde se conservan y exponen las balas del galeón San Diego el pH es apreciablemente ácido (pH=6,33). Por lo tanto, a la vista de estos resultados se puede deducir, por un lado, que la contaminación urbana exterior no penetra indiscriminadamente en las salas expositivas del museo donde la ventilación controlada preserva un pH muy próximo a la neutralidad; y, por otro lado, que en el interior de la vitrina que contiene las balas existe un microambiente lo suficientemente ácido para haber favorecido la corrosión que se observa recurrentemente en la superficie de las balas. Si bien los sensores de acidez informan de la presencia de especies ácidas/básicas que modifican el pH inicialmente neutro del aire de las salas expositivas y vitrinas, sin embargo no ofrecen información sobre el origen de dichas especies. Por lo tanto, es necesario realizar un estudio arqueométrico más profundo para esclarecer los

procesos de degradación que tienen lugar en la superficie de las balas.

3.2. Composición química y estructura cristalina de las balas.

La tabla 2 muestra los resultados del análisis químico de un fragmento del cuerpo interno de una bala exento de corrosión. Teniendo en cuenta el contenido total de impurezas (de 0,026 a 0,031 % en peso), el porcentaje mínimo de plomo en la muestra es de 99,97 %, lo que correspondería a la designación numérica de calidad Pb-3. En cuanto a los contenidos máximos de impurezas de arsénico y estaño, el porcentaje mínimo de plomo en la muestra es de 99,95 %, que corresponde a la designación numérica de calidad Pb-4. Respecto a los contenidos máximos de impurezas de plata, el porcentaje mínimo de plomo en la muestra es de 99,91 %. En general la designación numérica de una determinada calidad de plomo atendiendo a la norma UNE 37201-89 se realiza según lo que determina la impureza que aparece en mayor proporción. En este caso son las impurezas de plata y, por lo tanto, el plomo del cuerpo de la bala es de calidad Pb-5. El análisis morfológico de una bala que presentaba una oquedad interna (fig. 1) puso de manifiesto que la superficie de la misma se halla totalmente cubierta de una capa de corrosión que también aparece en la superficie de la oquedad. Las imágenes de la fig. 1 indican que la formación de la capa de corrosión probablemente se debe a un proceso de degradación originado por contaminantes gaseosos, ya que toda la superficie de la bala incluida la zona de la oquedad aparecen deterioradas por igual. Asimismo, en la fig. 1c se pueden distinguir dos tipos de capa de corrosión: una debida al deterioro del cuerpo del plomo (capa amarillenta), y otra debida a los depósitos superficiales (capa blanquecina).

Tabla 2- Resultados del análisis químico del cuerpo inalterado de una bala.

Elemento	Bi	Ag	Cu	As	Sb	Sn	Fe	Zn
% peso \pm DT (n=3)	<0,002	0,0102 \pm 0,0001	0,0059 \pm 0,0002	0,0036 \pm 0,0003	<0,002	0,005 \pm 0,001	0,0015 \pm 0,0002	<0,0005

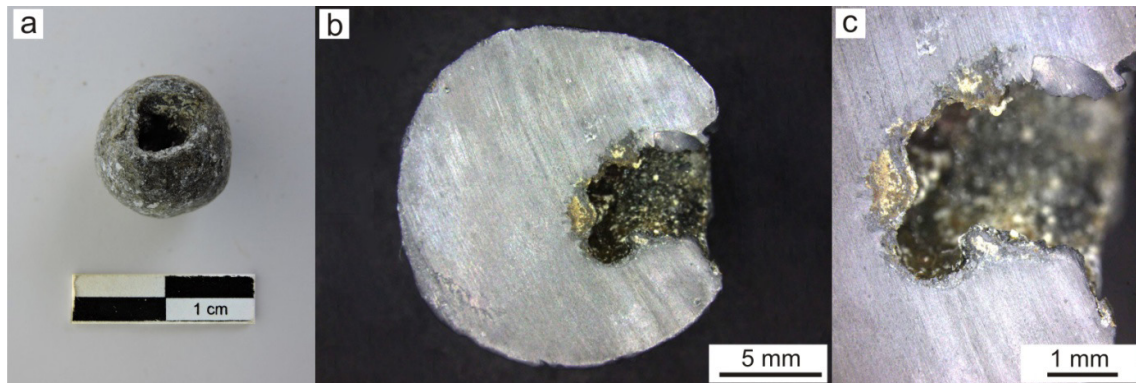


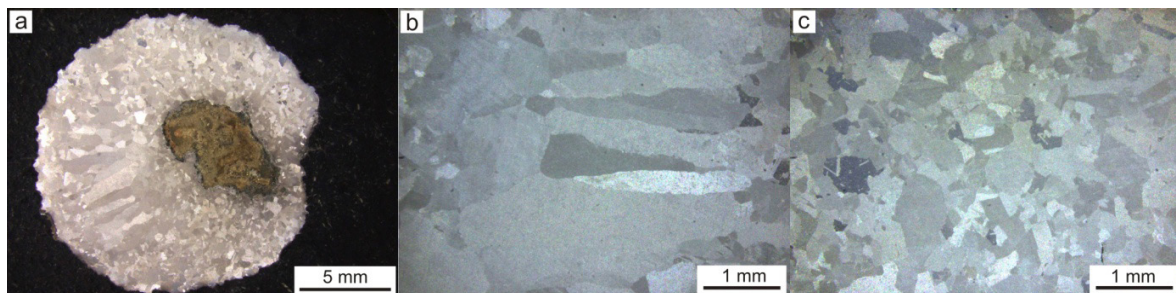
Figura 1- Fotografía e imágenes de microscopía óptica de la bala de la que se extrajeron fragmentos para diferentes análisis: a) bala antes del corte, b) sección de la bala después del corte, c) detalle de las capas de corrosión de la superficie externa de la bala y de la superficie de la oquedad.

Hay que precisar que la presencia de defectos macroscópicos de tamaño considerable, como la oquedad que presenta la bala analizada, es bastante frecuente en balas producidas por colado de la aleación de plomo en un molde, como consecuencia de defectos del molde, impurezas de la propia aleación, inclusiones de gases o de óxidos, etc. Para el estudio metalográfico la superficie de la sección de corte de la bala se atacó con una disolución de una parte de H₂O₂ y cinco partes de ácido acético glacial. La fig. 2 muestra la estructura cristalina monofásica del plomo que consiste en granos de crecimiento columnar de gran tamaño, junto con otros de desarrollo equiáxico. También puede observarse que en la zona de falta de material (oquedad de la bala), los granos equiáxicos se

concentran próximos a esa superficie y que los granos columnares solo han crecido incipientemente en dicha zona.

Los resultados metalográficos indican que, durante la solidificación, el material en contacto con las paredes del molde es el primero en enfriarse y se desarrolla una capa sólida de superficie aproximadamente uniforme constituida por granos equiáxicos de igual dimensión. La bajada de temperatura del metal restante en estado líquido es más lenta que en la superficie, y esto provoca que la solidificación progrese por crecimiento de granos alargados perpendiculares a la superficie exterior con estructura columnar. La presencia de granos de crecimiento equiáxico en las zonas próximas a la oquedad permite

Figura 2- Imágenes metalográficas del plomo de una bala: a) campo general, b) detalle de los granos columnares, c) detalle de los granos equiáxicos.



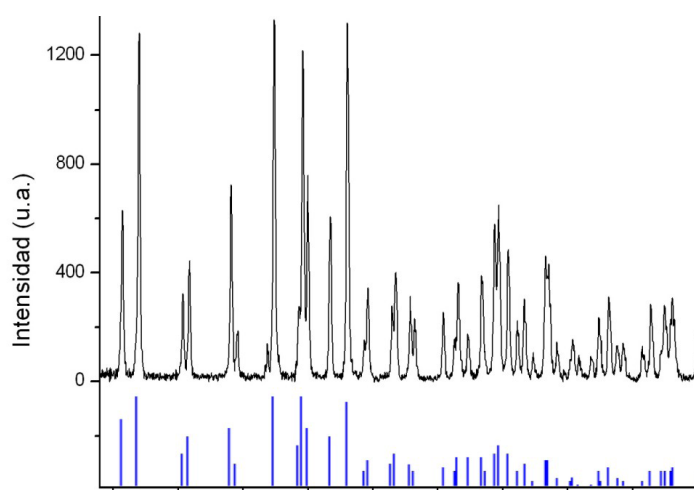


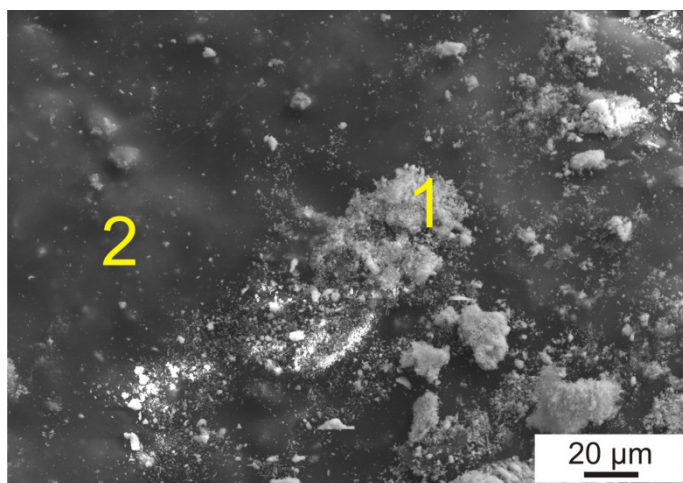
Figura 3- Difractograma de rayos X de la capa de corrosión blanquecina. Las líneas azules representan el patrón de formiato de plomo según la ficha ICDD 00-014-0825.

deducir que el plomo se enfrió más rápidamente en esas zonas durante la solidificación. Por lo tanto, la estructura cristalina metálica que se ha identificado es coherente con la de un proceso de colado correcto de aleación de plomo en un molde, posiblemente de arena.

3.3. Caracterización de la capa de corrosión de las balas.

El polvo blanquecino de la superficie de las balas se analizó por DRX. En el difractograma correspondiente (fig. 3) se detectó formiato de plomo como fase cristalina mayoritaria y carbonato de plomo como secundaria.

La microestructura de la superficie de la capa de corrosión en la superficie exterior de la bala se puede observar en las imágenes de MEBC de la fig. 4. Se aprecia una microestructura heterogénea con depósitos superpuestos, cuyo microanálisis EDS (zona 1) indica porcentajes elevados de carbono y oxígeno que pueden asimilarse a la presencia de sustancias orgánicas (por ejemplo, formiato de plomo), y/o carbonato de plomo. También se detectan pequeños contenidos de cloruros, probablemente residuales del entorno marino, y arsénico procedente de la aleación de plomo. En las zonas menos heterogéneas (zona 2) el contenido de plomo es más elevado, lo que sería



(% peso atómico)	C	O	Cl	As	Pb
Zona 1	25,0	67,2	0,2	0,1	7,4
Zona 2	16,1	45,7	n.d	n.d	38,2

Figura 4- Imágenes de MEBC de la capa de corrosión de la superficie de la bala y resultados de microanálisis EDS de algunas zonas (n.d. no detectado).

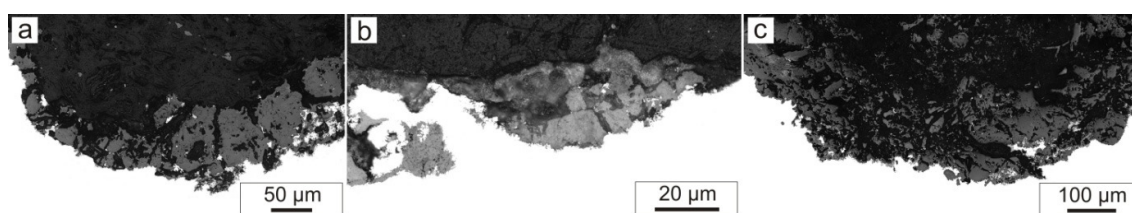


Figura 5- Imágenes de MEBEC de la capa de corrosión en sección: a y b) superficie exterior de la bala, c) superficie de la zona de falta de material de la bala.

coherente con la formación de una capa de corrosión más incipiente. El aspecto en sección de la capa de corrosión más externa en la superficie exterior de la bala y en la superficie de la falta de material (oquedad de la bala) se muestra en las imágenes de la fig. 5. En la superficie exterior de la bala se detectan plomo y oxígeno como elementos mayoritarios (fig. 5a) y, en algunas zonas, además se detecta cloro y arsénico (fig. 5b). En todas las observaciones de las distintas zonas de la bala se apreció una microestructura semejante de la capa de corrosión, tanto en la superficie más externa como en la superficie de la oquedad.

3.4. Revisión del procedimiento de intervención curativa y ensayos de meteorización inducida.

El procedimiento de intervención curativa de las balas llevado a cabo en el Museo Naval consistió en las siguientes operaciones:

- cepillado en seco con una brocha de pelo suave hasta eliminar el material no adherido (limpieza física)
- inmersión en HCl hasta cese de burbujeo (limpieza química, por decapado)
- lavados sucesivos por inmersión en abundante agua corriente
- inmersión en acetona, extracción,

- secado al aire y secado con chorro de aire caliente
- tras 24 h de secado al aire, aplicación de un recubrimiento protector de Incral 44®.

Puesto que se observó que la aparición sucesiva de la capa blanquecina en la superficie de las balas se producía al cabo de unos pocos meses tras la intervención curativa, se planteó una posible relación entre el recubrimiento protector y el ambiente ácido detectado en la vitrina que contiene las balas. Con el fin de clarificar este punto se llevaron a cabo varios ensayos de meteorización inducida en el laboratorio. Dichos ensayos se diseñaron teniendo en cuenta que la capa blanquecina de la superficie de las balas estaba formada mayoritariamente por formiato de plomo y que dicha sal puede proceder de la combinación de una humedad relativa y temperatura considerables con los diversos materiales con los que está constituida la vitrina (molduras, aglomerados, sellantes, pinturas, soportes plásticos, tejidos, etc.), o bien de los propios bienes culturales expuestos en la vitrina, por ejemplo de los recubrimientos de las propias balas. A continuación se describen los ensayos realizados.

Ensayo 1: consistió en introducir en un recipiente cerrado de vidrio de

laboratorio una muestra de plomo no recubierta junto con serrín de aglomerado común y un sensor de acidez. Después de un mes se comprobó, mediante la respuesta del sensor, que el ambiente dentro del recipiente era sensiblemente ácido, aunque no se detectó corrosión ni formación de capa blanquecina de formiato de plomo en la superficie de la muestra de plomo. Por lo tanto se puede deducir que, en ausencia del recubrimiento protector, el plomo no se corroe y que existe una relación directa entre el recubrimiento y la formación de la capa de corrosión de formiato de plomo. Esto se puede explicar porque el Inrcral 44® contiene, entre otros componentes, tolueno y etanol que, junto con los residuos procedentes de la limpieza de las balas, pueden favorecer la formación de formiato de plomo, incluso después del secado durante varios días. Hay que tener en cuenta que las balas están contenidas en un recipiente de PMMA (fig. 6a) y que dicho polímero es sensible a algunos disolventes orgánicos, entre otros, tolueno y acetona. Por ello es posible que los productos de alteración que se generan puedan dar lugar a ácido fórmico, que atacaría las balas de plomo y otros materiales sensibles presentes en la vitrina.

Ensayo 2: consistió en preparar tres recipientes cerrados de vidrio conteniendo cada uno por separado:

- una muestra de PMMA, unos mililitros de Inrcral 44® y un sensor de acidez
- una muestra de polietileno (PE), unos mililitros de Inrcral 44® y un sensor de acidez
- unos mililitros de Inrcral 44® y un sensor de acidez (control o blanco, sin muestras de polímero).

El resultado de la respuesta de los sensores de acidez se presenta en la fig. 6b, e indica que en el recipiente sin muestra de polímero (control o blanco) el microambiente es prácticamente neutro, mientras que en presencia de muestras de polímeros el pH del ambiente es sensiblemente ácido, siendo más acusado en el caso del PE. Esto significa que el PE es el polímero que, en presencia de las emisiones de Inrcral 44®, produce más especies ácidas, seguido del PMMA.

Ensayo 3: este ensayo de confirmación consistió en sumergir una muestra de PMMA en Inrcral 44®. Como puede observarse en la fig. 6c, la superficie del PMMA quedó totalmente atacada, lo que indica que la degradación del PMMA, favorecida por los disolventes del Inrcral 44®, origina compuestos que crean un ambiente ácido dentro de la vitrina. Dicho entorno ácido, favorecido por la humedad relativa y la temperatura, es el responsable de los fenómenos de corrosión detectados en las balas de plomo.

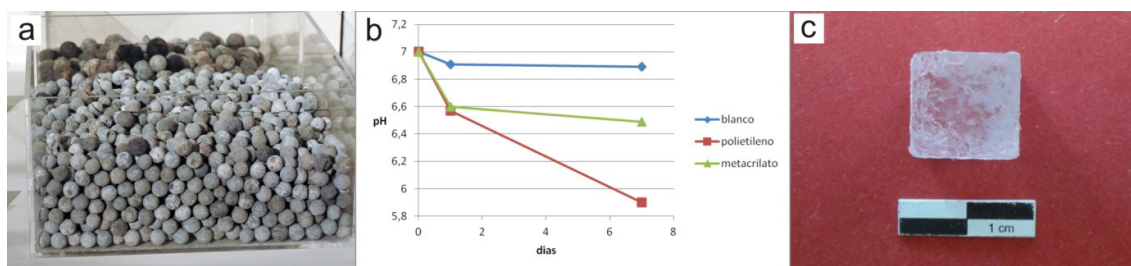


Figura 6 a) Balas de plomo en el contenedor de PMMA dentro de la vitrina en la que se exponen, b) resultados de acidez ambiental del ensayo 2 de meteorización inducida, c) aspecto de una muestra de PMMA después de su inmersión en Inrcral 44®.

4. CONCLUSIONES

Las balas de plomo procedentes del pecio del galeón San Diego están constituidas por una aleación de plomo de calidad Pb-5 (99,91 % Pb), según la Norma UNE 37201-89. Su estructura metálica es monofásica y consiste en granos columnares y equiaxiales de plomo. Su capa de alteración/corrosión natural está compuesta por óxido, cloruro y carbonato de plomo. Los depósitos de formiato de plomo detectados son consecuencia de un efecto sinérgico de los materiales de la vitrina en que se exponen y de los productos utilizados para su limpieza y conservación.

El uso de sensores de acidez ambiental para la determinación del pH dentro de la vitrina del museo alertó de un ambiente ácido y, asimismo, la utilización de sensores en los experimentos de meteorización inducida demostró la versatilidad del uso de los mismos a la hora de investigar el origen de los problemas de restauración y/o conservación preventiva de bienes culturales.

Sería aconsejable no utilizar la resina protectora Inrcral 44® en las piezas de plomo. Dicha resina está especialmente indicada para aleaciones de cobre en exteriores. Es conveniente airear las vitrinas que han albergado piezas tratadas con la resina e incorporar algún absorbente (carbón activado) y/o practicar una pequeña perforación en los vidrios de las vitrinas para permitir su ventilación.

Es recomendable utilizar un tratamiento de limpieza química de los objetos de plomo procedentes de ambientes marinos menos agresivo (decapantes diluidos, microabrasivos suaves); permitir que generen una capa de pasivación natural en un ambiente neutro antes de ser expuestas en el museo; regular en el museo/vitrina la temperatura <25°C y la humedad relativa <30-50 %; y realizar controles periódicos de la acidez ambiental en los espacios expositivos y en el interior de las vitrinas. Estas recomendaciones ya se han implementado en el Museo Naval y los controles posteriores han confirmado que los problemas se han corregido.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación parcial de los proyectos: Nuevas metodologías en la gestión museológica (MINECO ref. HAR2012-30769) y Programa Geomateriales 2 Tecnologías y conservación de geomateriales del patrimonio (Comunidad de Madrid y Fondos estructurales de la Unión Europea ref. S2013/MIT-2914). Asimismo, agradecen el apoyo profesional de la Red TECHNOHERITAGE de Ciencia y Tecnología para la Conservación del Patrimonio Cultural. J. Peña agradece un contrato al Programa Geomateriales 2.

BIBLIOGRAFÍA

- García-Heras, M., Kromka, K., Faber, J., Karaszkiwicz, P. & Villegas, M.A. 2005. "Evaluation of air acidity through optical sensors". *Environmental Science and Technology*, 39 (10): 3743-3747.
- Llorente-Alonso, A., Pena-Poza, J., de Arcas, G., García-Heras, M., López, J.M. & Villegas, M.A. 2013. "Interface electronic system for measuring air acidity with optical sensors". *Sensors and Actuators A-Physical*, 194: 67-74.
- Peña-Poza, J., García-Heras, M., Palomar, T., Laudy, A., Modzelewska, E. & Villegas, M.A. 2011. "Environmental evaluation with chemical sensors in the Palace Museum of Wilanów". *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 59 (3): 247- 252.
- Peña-Poza, J., Conde, J.F., Agua, F., García-Heras, M. & Villegas, M.A. 2013. "Application of sol-gel based sensors to environmental monitoring of Mauméjean stained glass windows housed in two different buildings at downtown Madrid". *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 52 (6): 268-276.
- Peña-Poza, J., Agua, F., Conde, J.F., de San Pío, P., García Ramírez, S., Gálvez Farfán, J.M., Moreno Martín, J.M., González Rodrigo, M., García-Heras, M. & Villegas, M.A. 2014. "Air quality assessment and protection treatments impact on the collection of the Museo Naval (Madrid, Spain)". En *Science, Technology and Cultural Heritage* (Ed. M.A. Rogerio-Candelera), A.A. Balkema Publishers, London, pp. 47-52.
- Villegas Broncano, M.A., García Heras, M., Peña Poza, J., de Arcas Castro, G., Barrera López de Turiso, E., López Navarro, J.M. & Llorente Alonso, A. 2010. *Sistema para la determinación de acidez ambiental y método que hace uso del mismo*. Patente P201031071, 14 julio 2010.