

METODOLOGÍA DE ESTUDIO DE ARTEFACTOS FERROSOS CORROÍDOS EN UN MEDIO SUBACUÁTICO. UN CASO DE ESTUDIO: LAS CONCRECIONES DEL SITIO HOORN

Nicolás C. Ciarlo*

RESUMEN

En el presente informe realizamos una aproximación a los procesos de deterioro de artefactos arqueológicos de hierro en ambientes marinos y fluviomarinos. Su estudio nos permitirá entender los procesos de formación del registro subacuático y estimar el potencial arqueológico del sitio de acuerdo con sus características particulares, así como la metodología que debería utilizarse en cada caso durante la planificación de la conservación preventiva de las piezas y su posterior tratamiento y estudio en el laboratorio.

Durante el curso del trabajo analizamos un conjunto de concreciones formadas alrededor de artefactos de hierro pertenecientes a un naufragio holandés del siglo XVII en Puerto Deseado, provincia de Santa Cruz. Presentamos los resultados de la metodología aplicada en el sitio y durante el tratamiento de las piezas, sometidas a un proceso de replicado con resinas para su posterior estudio.

Palabras clave: Arqueología subacuática - Corrosión - Hierro - Conservación - Naufragio

ABSTRACT

In this report we address the deterioration processes of iron archaeological artifacts in marine and fluvial-marine environments. Said study will allow us to understand the formation processes of the underwater record and to consider the archaeological potential of the site in relation to its particular characteristics, as well as the methodology that should be used in each case during the planning of the preventive conservation of pieces and their later treatment and study in the laboratory.

During the course of the work we analyze a set of concretions formed around iron artifacts recovered from a Dutch shipwreck of 17th century in Puerto Deseado, Province of Santa Cruz. We present the results of the methodology applied in the site and during the treatment of the pieces, which were subject of a casting process with resins for its later study.

Key words: Underwater archaeology - Corrosion - Iron - Conservation - Shipwreck

* Programa de Arqueología Subacuática, Instituto Nacional de Antropología y Pensamiento Latinoamericano. Laboratorio de Materiales. Departamento de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería, UBA - nciarlo@yahoo.com.ar

INTRODUCCIÓN

Salvo casos excepcionales, la mayoría de los metales se presentan en la naturaleza en su estado oxidado, en combinación con otros elementos e impurezas. El hombre ha aprendido a extraerlos del terreno y a reducirlos a su estado metálico. El conocimiento de las propiedades les permitió manufacturarlos de formas muy variadas y para diversos fines. En el caso del hierro, debido a su abundancia en la naturaleza y a sus excelentes propiedades mecánicas, su producción fue ampliamente difundida y perfeccionada y se convirtió en un material preciado para la fabricación de armas, herramientas y otros instrumentos relacionados con la subsistencia y la vida cotidiana (Tylecote 1984). Particularmente en la construcción naval, aunque su aplicación en la estructura de las embarcaciones no se desarrolló hasta mediados del siglo XIX, fue ampliamente utilizado en las naves de madera para la clavazón del casco (mediante clavos y pernos), la jarcia, el armamento y algunos de los objetos utilizados abordo por la tripulación. Sin embargo, a pesar de la abundancia de los artefactos de hierro presentes en muchos sitios subacuáticos, debido a las propiedades electroquímicas de los mismos, se encuentran muy deteriorados y para poder ser estudiados es necesario que sean conservados correctamente.

A partir del estudio de la composición, la estructura y las propiedades de los materiales ferrosos, y de su interacción con el medio en que se encuentran, podremos entender las transformaciones que sufren luego de ser depositados, hasta el momento que son recuperados por el arqueólogo. Mediante el análisis de cada situación es posible planificar y aplicar correctamente las tareas de conservación, tanto en el sitio como en el laboratorio; ello nos permitirá preservar la integridad de los artefactos y desarrollar posteriormente estudios arqueológicos.

En la primera parte del trabajo realizamos

una aproximación a los procesos de corrosión que afectan a dichos materiales en un medio subacuático, fundamentalmente marítimos. Nos centramos en la importancia que tiene su estudio para entender las transformaciones de los artefactos, parte de los procesos naturales de formación de sitio. A continuación desarrollamos los aspectos relacionados con la planificación y aplicación de una metodología sistemática; y a partir de los estudios previos de diversos autores, exponemos las distintas técnicas utilizadas actualmente, resaltando la aplicación de las mismas en la conservación de las piezas.

Tomamos como caso de estudio las concreciones de hierro recuperadas de un naufragio holandés de 1615 en Puerto Deseado, provincia de Santa Cruz, proyecto a cargo del Programa de Arqueología Subacuática (PROAS), del Instituto Nacional de Antropología y Pensamiento Latinoamericano (INAPL) y financiado principalmente por el Ministerio de Relaciones Exteriores de Holanda. Los trabajos en el sitio, en curso desde 2004, se encuentran bajo la dirección del arqueólogo Damián Vainstub y del arquitecto Cristian Murray, en conjunto con el arqueólogo marítimo holandés Martijn Manders. A lo largo del informe presentamos los resultados de los estudios realizados en el sitio y en el laboratorio hasta la fecha.

DETERIORO DE METALES

Los metales en general tienden a su estado estable (Hamilton 1996), en combinación con otro elemento, como ser oxígeno, hidrógeno, azufre, etc. Este proceso, denominado corrosión, es el resultado de la reacción del material con el medio y da lugar a la formación de un óxido u otro compuesto a partir del metal original, produciendo la transformación del mismo, tanto a nivel de su composición como de su estructura física (Piñeyro 2001; Nimmo y Hinds 2003; Rothwell 2005). El fenómeno de

la corrosión depende principalmente de las propiedades físico-químicas del metal o aleación metálica, de la naturaleza del entorno adyacente con el cual interactúa y de la relación con otros elementos metálicos próximos al mismo (North y MacLeod 1987).

Nosotros nos centraremos en la forma más común de ataque a los metales, la corrosión electroquímica (Askeland 1998) y su desarrollo en el caso particular del hierro. Durante dicho proceso se generan dos semi-reacciones de óxido-reducción, durante las cuales uno de los elementos en contacto cede electrones (reacción de oxidación), que son tomados por otro elemento (reacción de reducción). El primero, denominado ánodo, hace que el otro se reduzca; mientras que el segundo, el cátodo, produce la oxidación del donante (Chang 1995). Cada semirreacción dependerá del potencial de reducción del elemento con referencia al hidrógeno, considerado neutro; los metales electronegativos (potencial de oxidación positivo), son denominados reactivos y tienden a oxidarse más rápido que aquéllos electropositivos (potencial de oxidación negativo), denominados nobles, los cuales son menos susceptibles de hacerlo (North y MacLeod 1987).

Según Askeland (1998) y Callister (1996) los distintos tipos de corrosión se clasifican como:

- corrosión uniforme: el ataque se extiende de forma uniforme por toda la superficie;
- corrosión por composición: producto de una diferencia de potencial entre dos piezas metálicas o dos fases microestructurales de la misma pieza, lo cual genera diferentes velocidades de corrosión;
- corrosión por concentración o aireación diferencial: se produce cuando distintas regiones de la misma pieza están sometidas a diferentes concentraciones iónicas del medio;
- corrosión intergranular: la corrosión se extiende a lo largo de los bordes de grano

de la estructura metálica;

- corrosión microbiológica: debida a la acción del metabolismo de microorganismos que alteran las condiciones del medio donde se producen las reacciones anódicas y catódicas, muy comunes en condiciones de anoxia;
- corrosión bajo tensión: tiene lugar cuando se produce una situación simultánea de corrosión y tensión mecánica sobre la pieza;
- corrosión localizada: se produce de forma puntual sobre la superficie y se propaga hacia el interior.

Hay que tener en cuenta que el proceso de deterioro es muy complejo y son muy diversos los factores que interactúan sobre un objeto, sobre todo en un sitio arqueológico, por lo cual su estudio deberá realizarse de acuerdo a las características de cada situación. Al respecto, los estudios experimentales controlados en el laboratorio, simulando determinadas condiciones naturales de depositación de materiales metálicos, aportan información para entender el comportamiento de los objetos arqueológicos en un medio particular (ver Piñeyro 2001). Otra forma de estudiar estos procesos, como veremos más adelante, es a través del monitoreo *in situ* de las condiciones de corrosión de piezas arqueológicas durante un tiempo establecido.

CORROSIÓN DE ARTEFACTOS FERROSOS SUMERGIDOS

Los bienes culturales subacuáticos son cualquier evidencia material producto de la acción del ser humano en el pasado que se encuentran actualmente en el lecho o subsuelo de cualquier espacio acuático (Elkin et al. 1997). Como mencionamos anteriormente, en este apartado nos centraremos sólo en los restos de naturaleza ferrosa y en los procesos de corrosión que tienen lugar en dicho medio, con especial interés en aquéllos que se encuentran en agua salada.

En un medio acuoso la mayoría de los metales son susceptibles de ser deteriorados por procesos corrosivos en los que intervienen el agua, las sales y los gases en disolución (en especial el oxígeno). En este medio los electrones que ceden los metales (reacción anódica) son consumidos por la reducción del oxígeno presente en el medio (reacción catódica), dando lugar a una celda electroquímica. Este oxígeno que está presente en el agua de mar, aún a grandes profundidades, es la fuente principal de la reacción catódica que promueve la reacción de corrosión por disolución del metal en el ánodo. La reducción de oxígeno produce iones oxhidrilos (OH^-) que aumentan el pH en el cátodo; en ausencia de oxígeno, la otra reacción catódica posible es la reducción del catión hidrógeno (H^+). Los iones ferrosos de carga positiva disueltos en el ánodo reaccionan con los iones oxhidrilos (OH^-) en un fenómeno de hidratación, depositándose sobre la superficie de la pieza, dando como resultado un óxido hidratado denominado herrumbre (Askeland 1998). En el caso del agua salada, el deterioro del hierro es mayor que en agua dulce, ello se debe principalmente a la mayor conductividad iónica de la solución entre la zona anódica (el metal, en este caso el hierro) y la catódica (North y MacLeod 1987), así como a la presencia de cloruros en los productos de corrosión y el metal remanente de los artefactos, lo cual acelera el proceso de corrosión de los mismos una vez extraídos del sitio (North 1987).

Entre los factores que intervienen en la corrosión de artefactos metálicos en un medio

subacuático se destacan la composición y estructura del metal, el potencial de corrosión del mismo, la características de la solución acuosa (temperatura, pH , salinidad, turbidez, oxígeno en disolución), la vegetación marina, la composición del lecho marino, la potencia del sedimento y la posición de los objetos con relación a otros artefactos metálicos del sitio. Debido a la compleja relación entre ellos y sus efectos, cada objeto debe ser considerado individualmente (North y MacLeod 1987; MacLeod 1995).

Podemos establecer dos modos generales de corrosión del hierro a partir del tipo de manufactura. Las formas características de trabajarlo en la historia fueron por forjado y por fundido, técnicas a partir de las cuales se obtienen artefactos de una composición y estructura bien diferenciadas (Tylecote 1984; Henderson 2000). Debido a ello encontramos grandes diferencias en la corrosión de los mismos. En el caso del hierro forjado (el cual posee un bajo contenido de carbono y la presencia de inclusiones alineadas en el sentido del martillado de la pieza), la corrosión no sólo se produce en la superficie sino también de forma intergranular, donde se encuentran dispuestas las inclusiones, dando a la pieza el aspecto similar a las vetas de la madera (UNESCO 1981; North y MacLeod 1987; Pearson 1987; Cronyn 1990) (Figura 1). Por otro lado, al corroerse el hierro fundido (el cual posee un alto contenido de carbono), el grafito permanece como una red tridimensional que conserva la forma y los

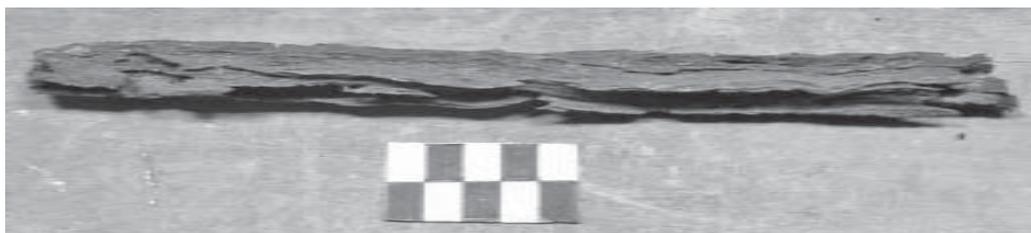


Figura 1. Restos de un perno metálico del naufragio del *Hoorn* recuperado de la concreción 05PDH - 003. Nótese el veteado característico de la corrosión en el hierro forjado.

detalles de la superficie de la pieza (UNESCO 1981; North 1987; North y MacLeod 1987; Pearson 1987; Cronyn 1990; Askeland 1998).

En la mayoría de los casos los artefactos se encuentran cubiertos por una concreción que se forma durante su interacción con el medio circundante. Cuando los objetos de hierro son corroídos, se producen cambios localizados en el *pH* que generan un desequilibrio entre las concentraciones de carbonato de calcio y dióxido de carbono que se encuentran disueltos en el agua. Esto genera precipitados insolubles de carbonato de calcio $\text{-Ca(CO)}_3\text{-}$ e hidróxido de magnesio $\text{-Mg(OH)}_3\text{-}$ que, junto con otros productos de la corrosión (especialmente el hidróxido ferroso $\text{-Fe(OH)}_2\text{-}$ el sulfuro ferroso -FeS- el cloruro ferroso $\text{-FeCl}_2\text{-}$, la siderita $\text{-Fe(CO)}_3\text{-}$ y la magnetita $\text{-Fe}_3\text{O}_4\text{-}$, interactúan con el sedimento y los

organismos marinos presentes en la superficie de la pieza para formar una densa concreción alrededor del metal (North y MacLeod 1987; Cronyn 1990; MacLeod 1995; Hamilton 1996) (Figura 2). Entre la superficie del metal y la concreción que lo rodea se crea un microambiente corrosivo (disminuye el *pH* y aumenta la concentración de cloruros en el interior de la concreción), con una acidez y un potencial de oxidación mayores que en la solución del entorno. Entre el interior y el exterior se produce un intercambio de iones, lo cual mantiene la neutralidad de la reacción. Hacia el exterior se produce la difusión de cationes de hierro e hidrógeno e ingresan aniones (predominantemente cloruros) del exterior (Figura 3) (MacLeod 1989). Cronyn (1990) realiza una clasificación de los diversos estados progresivos de corrosión por los que pasa una pieza de hierro, hasta deteriorarse por

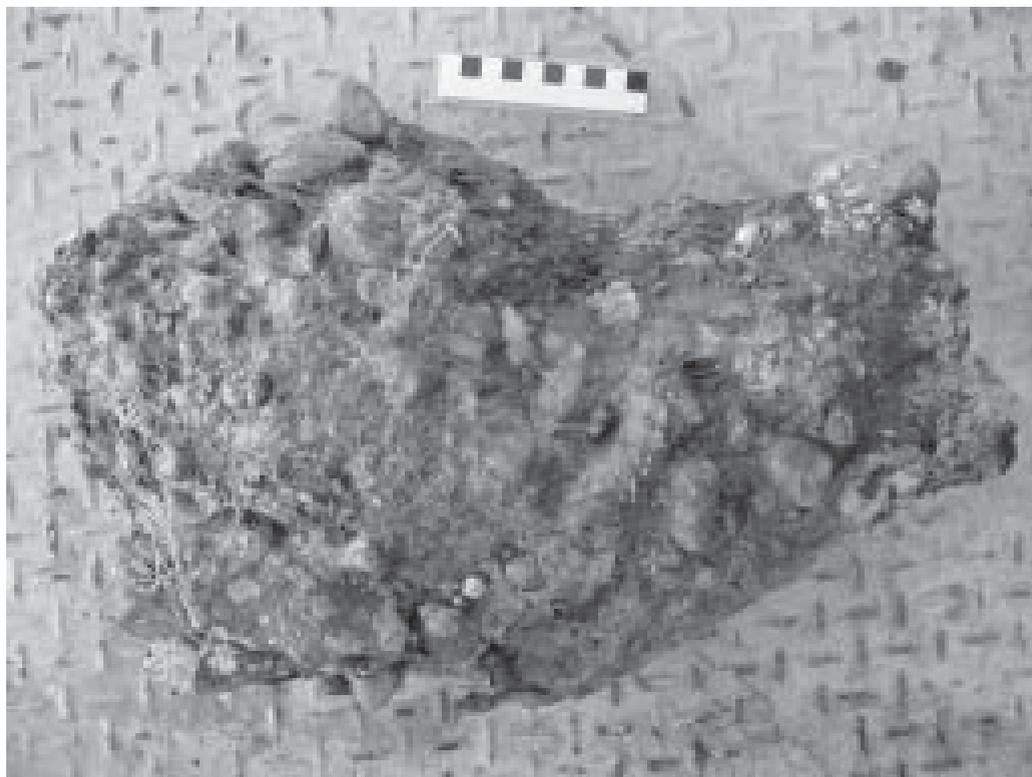


Figura 2. Concreción ferrosa (05 PDH – 002 b) del sitio *Hoorn*.

completo. Una de las particularidades de las concreciones ferrosas es que conservan la impronta de los objetos originales deteriorados, a partir de la cual pueden hacerse fieles reconstrucciones de los artefactos, mediante el replicado con resinas sintéticas (Pearson 1977; UNESCO 1981; Luna Erreguerena 1982; North 1987; Cronyn 1990; Hamilton 1996) (Figura 4).

Sin embargo, las concreciones que rodean a los artefactos no son exclusivamente de origen ferroso, otros metales y aleaciones como la plata y el bronce generan concreciones a su alrededor (MacLeod y North 1979; North 1987; Pearson 1987; Hamilton 1998a). A su vez, tanto éstas como aquellas muchas veces poseen en su interior otros restos no metálicos, como

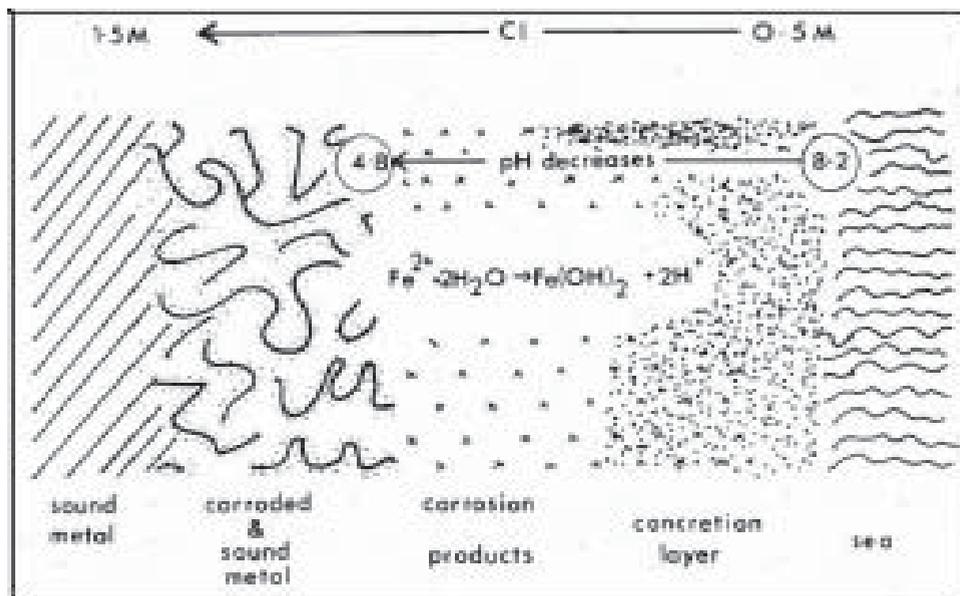


Figura 3. Esquema del micro-ambiente formado en objetos de hierro rodeados por una concreción luego de varios años bajo el agua (Extraído de MacLeod 1989:Figura 1).



Figura 4. Molde que forma una pieza dentro de la concreción: *izquierda*, impronta de la silueta de la pieza original de la concreción 05 PDH - 002 b; *derecha*, detalle de uno de los extremos de la otra mitad de la pieza (fotografía: Cristian Murray).

madera, cuero, cerámica, etc. (North 1987; Hamilton 1996), los cuales pueden ser parte de artefactos compuestos o haber estado originalmente próximos unos de otros. Un caso característico es la combinación entre el hierro y la madera (Pearson 1987). Ante esta situación, todas las piezas deberán ser separadas y sometidas a un tratamiento de forma individual (North 1987).

Por último, debe tenerse en cuenta que la corrosión de artefactos similares en un sitio puede ser muy distinta, dependiendo de su disposición y las condiciones del entorno. Un caso característico es el de las piezas que se encuentran enterradas con respecto a aquellas que están semienterradas o expuestas en su totalidad en el lecho. Estas últimas, por ejemplo, se verán afectadas por la colonización de organismos marinos, la acción de las corrientes y otras propiedades del medio, como la concentración de iones en solución. Por ejemplo, dos balas de cañón de hierro fundido se deteriorarán diferencialmente en distintos medioambientes, la que se encuentre sobre el lecho estará rodeada por una concreción y preservará la forma original de la pieza debido al grafito, mientras que la depositada en un medio anaeróbico mantendrá igualmente su superficie original pero la misma no estará cubierta (Cronyn 1990:Figura 5.5b). Estos y otros factores, mencionados anteriormente, afectarán de forma diferencial la velocidad y el grado de deterioro de las piezas, así como el aspecto de las mismas al momento de su extracción.

CONCRECIONES DEL NAUFRAGIO DEL HOORN (1615)

En abril de 2005 se realizó la segunda campaña arqueológica al sitio *Hoorn*, en la ría de Puerto Deseado (Santa Cruz), ubicado sobre la margen norte a 12 km al oeste del Puerto homónimo. El objetivo de la misma fue la prospección con sensores remotos del lecho

de la ría, en busca de restos estructurales de la embarcación holandesa *Hoorn*, parte de la expedición de Jacob Le Maire y Cornelisz Schouten, que naufragó allí en 1615 (Vainstub y Murray 2005).

En la primera campaña se obtuvo un conjunto de materiales metálicos de la zona intermareal, parte de los cuales fueron analizados en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires por el Ing. Horacio De Rosa, Director del Grupo de Arqueometalurgia. La mayoría son fragmentos de plomo fundido (como resultado del incendio de la nave), aunque también se encontraron algunas muestras de hierro, peltre, plata y latón, y algunos objetos de cobre (ver De Rosa 2004; Vainstub y Murray 2004).

Durante el relevamiento del sitio en la segunda campaña, frente a la playa donde habría naufragado la nave, fue recuperado del lecho de la ría un conjunto de concreciones, todas ellas ferrosas (una de las cuales había sido extraída durante la primera campaña), también estudiadas en el Laboratorio de Materiales, trabajo a cargo de Cristian Murray y Horacio De Rosa. Como anticipamos anteriormente, en este informe nos ocuparemos del estudio de las mismas.

La mayoría de los artefactos que se encontraban dentro de las concreciones se corroyeron por completo y sólo quedó el molde de los mismos, a partir de los cuales fueron replicados. A continuación se describen las piezas originales:

- dos clavos con cabeza redonda y fuste de sección cuadrada, con dos lados paralelos y dos convergentes hacia la punta (concreciones 04 PDH – 083 y 05 PDH – 001);
- dos pernos de sección circular; el más grande de cabeza plana (concreción 05 PDH – 003) y el chico de cabeza convexa y con un orificio pasante en la punta para

fijación con chaveta (concreción 05 PDH – 002 a);

- un herraje con forma de omega, de sección rectangular y dos orificios circulares para fijarlo, uno en cada extremo (concreción 05 PDH – 002 b);

- una bisagra (concreción 05 PDH – 002 c);

- un artefacto indeterminado (concreción 05 PDH – 004).

Sólo las concreciones 05 PDH – 003 y 05 PDH – 004 contenían restos metálicos en su interior; sin embargo los mismos estaban muy deteriorados y no presentaban marcas diagnósticas.

Con respecto a la sedimentación del sitio (la cual tuvo gran importancia en la formación de las concreciones), la zona intermareal (donde se recuperó la concreción 04 PDH – 083) se caracteriza por una predominancia de clastos de gran tamaño redondeados por la erosión (*pséfitas*, clastos de tamaño mayor a 2 mm). Las *pelitas* (limo y arcilla) están poco representadas, siempre por debajo del 1% (Bastida y Trassens 2004). En el caso de la muestra submareal, dentro del área donde se extrajo el resto de las concreciones, la composición del sedimento es diferente. Una muestra representativa del lecho de la ría nos indica que está caracterizado por la ausencia de *pséfitas*, predominancia de *psamitas* (aproximadamente 65%) y alrededor del 35% de *pelitas* (Bastida y Trassens 2004). Las características anteriores pertenecen a la capa superior del sedimento del lecho, de unos 10 cm de espesor. Debajo de ésta predominan los guijarros, los cuales también están presentes en las concreciones. Hay que destacar que en la zona donde éstas fueron halladas había cúmulos dispersos de guijarros que afloraban en la superficie del lecho, ausentes en el resto del canal.

Análisis macroscópicos revelaron escaso *macrofouling*, con presencia de poliquetos de tubo blando y varias especies de algas, las cuales

se encontraban fijadas a las concreciones de la zona submareal (Grosso 2005).

METODOLOGÍA DE ESTUDIO DE CONCRECIONES FERROSAS EN ARQUEOLOGÍA SUBACUÁTICA

Entendemos a las transformaciones que sufren los artefactos una vez depositados en un sitio como "...aquellos procesos bióticos y no bióticos que afectan espacial, física y/o químicamente a los restos materiales una vez que ingresan al contexto arqueológico" (Elkin 2000:195). Los procesos de formación de sitio que operan en medios subacuáticos para el caso de los naufragios pueden ser producto de la acción natural o del hombre, y son muy distintos a los que ocurren en tierra (Muckelroy 1978). En un sitio subacuático los factores naturales tienen que ver principalmente con la dinámica de las corrientes y la acción de las olas sobre el lecho. Estas últimas son responsables en muchos casos de la distribución final de los restos arqueológicos. Con respecto a la acción del hombre, generalmente la dificultad de acceso a los sitios sin la utilización de técnicas modernas de buceo facilitó la protección de los mismos a lo largo de la historia.

En el caso del naufragio del *Hoorn*, parecen haber actuado sobre el sitio factores tanto naturales como de origen antrópico, estos últimos relacionados con la recuperación y reutilización de muchos de los materiales del naufragio por los tripulantes de la expedición, especialmente los metales y la madera (Vainstubb y Murray 2004). Sin embargo, con respecto a los artefactos ferrosos encontrados en la zona submareal, su ubicación nos permite inferir que habrían sido afectados exclusivamente por procesos naturales. Dentro de éstos podemos destacar, con relación a su distribución espacial, la dinámica y el lecho de la ría, y con respecto a su preservación, las propiedades de los materiales y del medio ambiente en el cual se depositaron.

La posibilidad de estudiar los objetos recuperados y de obtener información a partir de ellos dependerá de la correcta aplicación de una metodología sistemática centrada en los siguientes puntos:

- 1) la prospección del registro arqueológico,
- 2) la conservación del mismo en el sitio antes y después de su extracción, y su posterior tratamiento, y
- 3) estudio en el laboratorio.

Para el desarrollo de los mismos consideramos los trabajos realizados con las concreciones referidas anteriormente y estudios previos de distintos autores sobre diversos artefactos ferrosos en otros naufragios. Debe aclararse que, por un lado, las siguientes consideraciones no tienen aplicación en cualquier ambiente y para cualquier artefacto metálico; y por el otro, tampoco intentamos establecer una metodología estricta para todas las piezas de hierro en medios húmedos, debido a que cada caso presenta características específicas que deben considerarse de forma particular.

Prospección del registro arqueológico subacuático

En un lecho marino donde se presentan condiciones de buena visibilidad y el mismo es evidentemente distinto de objetos ajenos al sedimento, los mismos no pasan inadvertidos durante un reconocimiento subacuático. Pero en otros casos, como sucede en la ría de Deseado, la actividad del medio, principalmente la acción de las corrientes, produce una gran cantidad de sedimentos en suspensión (lantanos 2004), lo cual dificulta el reconocimiento visual de los objetos. Debido a la mala visibilidad en la zona del sitio, no mayor a 80 cm (Vainstub y Murray 2004), se optó por realizar prospecciones en círculos concéntricos, consistente en realizar recorridos de un radio cada vez mayor (a medida que se completan las vueltas) alrededor de un punto de referencia, el cual estará boyado en superficie y

georeferenciado con GPS (*Global Positioning System*) (Museo Nacional de Arqueología Marítima, Centro Nacional de Investigaciones Arqueológicas Submarinas 1990; Dean et al. 1991).

Con respecto a las concreciones ferrosas se sumó la dificultad que el lecho estaba formado por cúmulos de canto rodado similares al aspecto exterior de aquellas, dado que en consecuencia en un ambiente como el descrito, las concreciones pueden mimetizarse y pasar inadvertidas. En otros casos pueden presentarse conglomerados rocosos, rocas sedimentarias formadas principalmente por cantos redondeados de grava y una matriz de arena, limo y/o arcilla, que puede estar ligada a su vez por la precipitación de materia mineral (ver González Bonorino y Teruggi 1952; Pettijohn 1980; Tarbuck y Lutgens 1999) (Figura 5). La necesidad de identificación de los artefactos, además de los costos que generalmente implica el transporte de las concreciones al laboratorio son las razones principales por las que se recomienda en muchos casos remover las mismas en el sitio (Pearson 1977; UNESCO 1981; North 1987). El caso de los conglomerados es sólo un ejemplo de los factores naturales que pueden dificultar la prospección arqueológica. Otro de ellos son las formaciones de especies coralinas en zonas de aguas cálidas poco profundas, cercanas al Ecuador, algunas de las cuales pueden extenderse grandes extensiones en muy pocos años (Morales 1988); de esta forma pueden perturbar y cubrir los restos de un naufragio, dificultando los trabajos de prospección, excavación y conservación de los mismos.

Durante la campaña se utilizaron detectores de metales subacuáticos de tipo VLF (*Very Low Frequency*) con sistema de discriminación y opción para materiales ferrosos. Sin embargo éstos sólo acusaron tres de las concreciones recuperadas, dos de las cuales conservaban partes metálicas en el interior. Otro de los

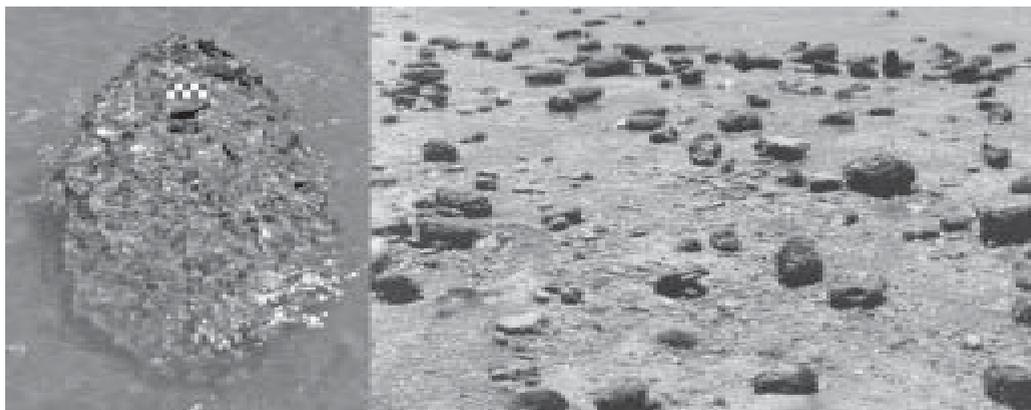


Figura 5. Conglomerados marinos de la zona del Golfo San Matías, Río Negro: *izquierda*, conglomerado de apariencia similar a las concreciones de artefactos ferrosos; *derecha*, conjunto de conglomerados sobre el lecho en zona intermareal.

instrumentos disponibles para la búsqueda de restos ferrosos en el lecho subacuático e implementado durante la segunda campaña en el sitio, es el magnetómetro de protones (se dispuso de un equipo *Aqua Scan AX 2000 DET/60*), instrumento que mide la alteración del campo magnético terrestre producida por la presencia de metales ferrosos, incluso por aquellos que se encuentran enterrados. Sin embargo éste no es un método confiable cuando se trata de objetos pequeños o en el caso que la cantidad de metal preservada es despreciable. Las concreciones donde la pieza se ha corroído por completo no son acusadas por este sistema. A pesar de ello, es una técnica con que se obtienen muy buenos resultados, sobre todo en casos de artefactos de mayores dimensiones, como ser cañones, anclas o acumulaciones de otros objetos de hierro. Existen muchas otras técnicas de relevamiento utilizadas en arqueología subacuática, tanto geofísicas como desarrolladas por los buzos (ver Luna Erreguerena 1982; Museo Nacional de Arqueología Marítima, Centro Nacional de Investigaciones Arqueológicas Submarinas 1990; Dean *et al.* 1991; Elkin *et al.* 1997), que no comentaremos aquí, y cuya aplicación depende de las características del sitio, el registro arqueológico y las necesidades particulares de cada caso.

Estas y otras consideraciones con respecto a los artefactos, como sus dimensiones y probable estado de conservación, deben tenerse en cuenta al momento de planificar una prospección del lecho subacuático. En el caso del *Hoorn*, donde no han perdurado otros restos estructurales de la nave (como la madera), los artefactos metálicos, particularmente las concreciones ferrosas, son los únicos vestigios que se han recuperado hasta el momento que están probablemente relacionados con la estructura de la embarcación y que pueden aportar información acerca de la misma.

Conservación preventiva *in situ* y acondicionamiento post-extracción

La preservación de los artefactos es una de las consideraciones más importantes cuando se planea o implementa cualquier acción que resulte en la recuperación de material de un sitio arqueológico marino (Hamilton 1998a); debe planificarse en una instancia previa a la excavación o recuperación de las piezas (Cronyn 1990; Piñeyro 2001) y realizarse desde el momento en que el medio donde se encuentra un objeto es modificado de la forma que sea (Pearson 1977). La extracción de objetos de hierro sin el adecuado tratamiento

de estabilización y conservación, conduce al deterioro de los mismos y a la pérdida de la potencial información que puede obtenerse a través de ellos, sobre todo en el caso de los objetos de hierro fundido, cuyos productos de corrosión son muy reactivos a las condiciones aeróbicas. Si bien las concreciones metálicas se encuentran en un relativo estado de equilibrio mientras están sumergidas, se deterioran rápidamente una vez extraídas del agua (North 1987). En nuestro país, por ejemplo, la extracción de dos cañones del golfo San José (Península Valdés, Chubut), sin las medidas de conservación correspondientes, produjo el completo deterioro de las marcas superficiales de los mismos, las cuales habrían sido visibles al momento de su extracción hace dos décadas (Dolores Elkin, com. pers. 2005).

Por otra parte, a partir de las tareas de conservación previas a la extracción de los artefactos, se pueden reducir los productos de corrosión de los mismos y adelantar los trabajos posteriores en el laboratorio (Pearson 1977; MacLeod 1996). Es fundamental que previamente, para interpretar los cambios a los que están sometidos los artefactos, se conozcan y analicen las condiciones del medio ambiente marino y sus efectos sobre la evidencia arqueológica, así como las características de los materiales (Florian 1987; Corfield 1996), en este caso de naturaleza ferrosa. Con relación a ello, a través del monitoreo *in situ* de las condiciones de los artefactos de hierro (como el espesor de la concreción, el *pH* y el potencial de corrosión dentro de la misma) durante un período de tiempo, se pueden realizar estudios sobre la tasa de corrosión y reconocer si un sitio se encuentra en peligro y qué artefactos deben ser extraídos del mismo (MacLeod 1989; 1995).

Consideramos dos instancias en la conservación preventiva:

- 1) la conservación *in situ* de los objetos, previa a su extracción, y
- 2) la conservación desde que los mismos salen a la superficie, durante el tiempo

transcurrido hasta que son llevados al laboratorio.

Las tareas de conservación *in situ*, se realizan sin alterar la posición de los objetos en el sitio y se limitan generalmente a los casos donde las piezas poseen un alto grado de integridad estructural y cuyas dimensiones dificultan su extracción y transporte hasta el laboratorio. Se han obtenido excelentes resultados sobre objetos de hierro como anclas y cañones, mediante la implementación de un tratamiento de electrólisis con ánodos de sacrificio monitoreados periódicamente, a partir del cual se logró reducir las condiciones de corrosión (se incrementó el *pH*, redujo el potencial de oxidación y disminuyó la presencia de iones cloruro) entre el metal y la concreción y se transformaron los productos de corrosión a su estado estable (magnetita $-Fe_3O_4-$) (MacLeod 1989, 1995, 1996; Gregory 1999). Este método, denominado protección catódica, consiste en conectar la pieza que se quiere conservar (que hace de cátodo), a través de un conductor (generalmente un cable de cobre), a un ánodo de sacrificio (aleación de magnesio, zinc, aluminio o cadmio); este último, al estar fabricado por un metal altamente reactivo (con un potencial de oxidación mayor al del hierro), concentra los productos de corrosión y cede electrones que protegen al otro metal, reduciendo de esta forma el ataque sobre el artefacto arqueológico (Piñeyro 2001).

No vamos a discutir técnicas de excavación y extracción de materiales; sólo mencionamos que las mismas deben preservar la integridad de los artefactos, los cuales tienen que ser previamente documentados. Una vez que se extraen restos metálicos del sitio, es necesario un inmediato reconocimiento de los mismos, para proceder con una correcta conservación. Si bien el arqueólogo debe conocer las propiedades de los materiales con los que trabaja y cómo realizar una conservación preventiva de los mismos, es recomendable que un conservador acompañe en todo momento

al equipo durante los trabajos de campo, el cual estará a cargo del almacenaje de los objetos en condiciones estables. Leskard (1987) desarrolla el procedimiento de embalaje en el sitio y el transporte hasta el laboratorio de diversos artefactos, entre ellos los de hierro, de acuerdo a su tamaño y condiciones, priorizando salvaguardar la integridad de los mismos, aislándolos de las condiciones mecánicas y químicas del medio ambiente nocivas para los mismos.

En el caso de las piezas de hierro, sobre todo cuando el metal está expuesto al ambiente, se recomienda que permanezcan en un medio alcalino, con un *pH* entre 10 y 13, en una solución de carbonato de sodio $\text{Na}_2(\text{CO})_3$ - al 5%, de hidróxido de sodio $\text{Na}(\text{OH})$ - al 2% o de sesquicarbonato de sodio $\text{Na}_2(\text{CO})_3 \cdot \text{Na}(\text{HCO})_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ - al 5%, utilizando agua dulce o, en su defecto, salada (Pearson 1977; Pearson 1987). Cuando la concreción no ha sido removida de la superficie de la pieza, aquella le provee una protección contra el deterioro mecánico y químico, por lo cual es suficiente con mantenerlas húmedas luego de recuperarlas.

Una opción alternativa es redepositar los artefactos en su ubicación original (la efectividad de la técnica depende en última instancia de remedar las condiciones iniciales de depositación), luego de realizar un apropiado registro de los mismos (Oxley 1998). Si bien este sistema es muy útil para objetos de grandes dimensiones, a diferencia de otros materiales (como la madera), las concreciones que presentan los objetos de hierro impiden un correcto examen de los mismos en el sitio.

Las concreciones del sitio *Hoorn*, debido a la escasa cantidad y pequeñas dimensiones de las mismas y por ser la única evidencia encontrada del naufragio en esta zona del sitio, fueron extraídas y transportadas al laboratorio. Desde el momento de su extracción y durante la campaña, luego de realizarse una limpieza

mecánica de los organismos adheridos, fueron colocadas en recipientes colmados de agua salobre. El transporte hasta el laboratorio se realizó por tierra en el vehículo del equipo, manteniendo las condiciones de humedad de las mismas dentro de recipientes rígidos.

Métodos de conservación en el laboratorio

Como mencionamos en el punto anterior, cuando un objeto de hierro que ha alcanzado cierto equilibrio en un medio determinado se lo extrae y coloca en un ambiente diferente, las consecuencias para la pieza son muy graves. Por lo tanto, la estabilización de los artefactos luego de su extracción es una medida temporaria que no debe exceder los dos o tres años como máximo (en algunos casos menos) (Pearson 1987), y con ella no se logra suprimir por completo los cloruros presentes en los artefactos ni retener y estabilizar los productos de la corrosión, principales objetivos de la conservación de los mismos (North 1987). Es importante aclarar que no deben eliminarse todos los productos de corrosión ya que, como en el caso del hierro fundido, los mismos mantienen las marcas originales de la pieza. Por ello no se recomienda el uso de ácidos cuando se remueve la concreción de los artefactos, trabajo previo al tratamiento de conservación. Conviene que el mismo se realice de forma mecánica y con mucho cuidado, para evitar dañar tanto los restos de la pieza como los posibles artefactos adheridos a la concreción.

Un método muy utilizado en la reducción de los productos de corrosión y eliminación de cloruros en el laboratorio es la reducción electrolítica. Esta técnica ha sido bien desarrollada por Hamilton (1996) y consiste, básicamente, en una celda electrolítica donde el artefacto es el cátodo. Dentro de una cuba se colocan dos electrodos (el ánodo y el cátodo) y una solución electrolítica que funciona como medio conductor entre ambos. Se hace circular una corriente, colocando el

borne positivo de la fuente al ánodo, el cual recibe los iones cargados negativamente, de forma que en el artefacto de hierro, conectado al polo positivo, se produce la reducción de los productos de corrosión a su estado estable. La correcta eliminación de los cloruros y la estabilización de la pieza dependerán principalmente de la corriente y el voltaje aplicados y de la solución utilizada, los cuales a su vez dependen de otros parámetros como el tamaño y estado de deterioro del artefacto (Hamilton 1996). Hamilton (1996; 1998a) también recomienda el uso de dos soluciones básicas: 5% de carbonato de sodio $\text{-Na}_2(\text{CO})_3\text{-}$ o 2% de hidróxido de sodio $\text{-Na}(\text{OH})\text{-}$, las cuales son suficientes para realizar una limpieza electrolítica en la mayoría de los artefactos de hierro, siendo conveniente el uso de la segunda si se busca reducir los productos de corrosión de las piezas provenientes de sitios marinos. Cabe destacar que artefactos sometidos a electrólisis con soluciones no acuosas no presentan signos de corrosión luego de varios años de finalizada su conservación (Oddy 1987). Durante el proceso debe monitorearse la concentración de cloruros y de ser necesario cambiar las soluciones, hasta llegar a valores seguros (por debajo de 100 ppm $\text{-partes por millón-}$). Finalmente la pieza es lavada con agua destilada, deshidratada con alcohol (isopropílico), secada y cubierta por completo con cera microcristalina para protegerla del ambiente. No obstante, si bien esta forma de proteger a los artefactos luego del tratamiento ha sido muy utilizada, luego de muchos años la corrosión comienza a actuar nuevamente. Carlin y Keith (1996) recomiendan un método en base a soluciones de ácido tánico que aplicadas sobre la superficie de la pieza actúan efectivamente como inhibidoras de la corrosión.

Por otro lado, debemos aclarar que el método de conservación electroquímico también ha sido utilizado en piezas de hierro provenientes de sitios arqueológicos terrestres (ver Pifferetti 1996; Traversa et al. 2002).

Existen otros sistemas de limpieza y reducción de óxidos, pero están limitados por el tipo de manufactura del hierro y el ambiente en que se encontraba la pieza. Los tratamientos a altas temperaturas (superiores a los 750°C) actualmente no son utilizados, dado que alteran la estructura interna del metal e imposibilitan posteriores estudios metalográficos (Oddy 1987; Hamilton 1996). La limpieza de las piezas por lavado en soluciones acuosas tampoco son recomendables para objetos recuperados del agua marina, puesto que los cloruros no son eliminados y la corrosión continúa con los años (Oddy 1987).

En muchos casos las concreciones contienen en su interior gran parte de la pieza original, que sólo ha sido afectada superficialmente. Es el caso de los artefactos de hierro fundido de grandes dimensiones. Al respecto se han realizado estudios de deterioro y trabajos de estabilización y conservación (tanto *in situ* como en el laboratorio) sobre objetos metálicos corroídos de diversos naufragios, como anclas y cañones (MacLeod 1995, 1996; Carlin y Keith 1996; Gregory 1999; Australian National Maritime Museum 2000) o sobre otros más pequeños, como balas de cañón (Oddy 1987; Bethencourt et al. 2004), aplicando diferentes técnicas de acuerdo a las características de cada una de las piezas. En otros casos, en cambio, los objetos metálicos cubiertos por las concreciones continúan deteriorándose hasta que las piezas se corroen en un alto porcentaje o totalmente; en estas situaciones la superficie original de las mismas y las marcas o detalles que tuvieran, incluso sus formas, se pierden por completo (Hamilton 1998a). Sin embargo, como vimos anteriormente, pueden realizarse réplicas con resinas sintéticas a partir del molde de la pieza original, procedimiento que desarrollamos a continuación.

Estudio de las concreciones ferrosas. Proceso de replicado de piezas

En este apartado nos centraremos en el caso de los objetos de hierro que se encuentran dentro de una concreción y que se han deteriorado por completo o cuyos restos residuales no son diagnósticos debido al avanzado estado de corrosión. En estos casos el proceso de moldeo es la manera más efectiva de recuperar la forma de los artefactos y generalmente brinda mejores resultados que intentar conservar la pieza original por otros métodos. Una gran diversidad de objetos han sido recuperados mediante este proceso, desde clavos y pernos de tamaños y formas varias (Campbell y Gesner 2000), hasta artefactos más complejos como un candado (North 1987:Lámina 56), una punta de lanza (Hamilton 1998b), o un gorjal de armadura (Pearson 1977).

Consideramos a esta sección por separado del resto debido a la importancia que tuvo en el caso de las concreciones del sitio *Hoorn*.

En una primera instancia es necesario reconocer el o los artefactos presentes dentro de la concreción, lo cual facilitará posteriormente el replicado de los mismos, para lo cual se realizan análisis de Rayos X (ver

UNESCO 1981; North 1987; Pearson 1987). Además de estos estudios, realizamos una Tomografía Computada (técnica más precisa en cuanto a la ubicación de la pieza dentro de la concreción), debido a la complejidad que presentó uno de los objetos (Figura 6).

Una vez reconocida la silueta del objeto original, es necesario saber la condición de preservación del mismo. Una pauta de ello se obtiene a través de las radiografías; en el caso que las mismas muestren una figura de color blanco, esto nos indica que esa parte del objeto se ha conservado en el interior; por otro lado, una imagen negra denota que la pieza se ha deteriorado por completo. Sin embargo, estas apreciaciones no son diagnósticas de la composición del material. Una posibilidad de abordar el problema es realizar análisis químicos, como Difracción de Rayos X (XRD), a los restos de óxidos y otros productos de corrosión presentes en la matriz de la concreción y en la cavidad formada en su interior.

Debido a que ninguna de las concreciones poseía restos diagnósticos de las piezas originales (evaluación realizada en una primera instancia a partir de las radiografías de las piezas), se optó por hacer réplicas de las mismas, utilizando una resina epoxy de baja viscosidad

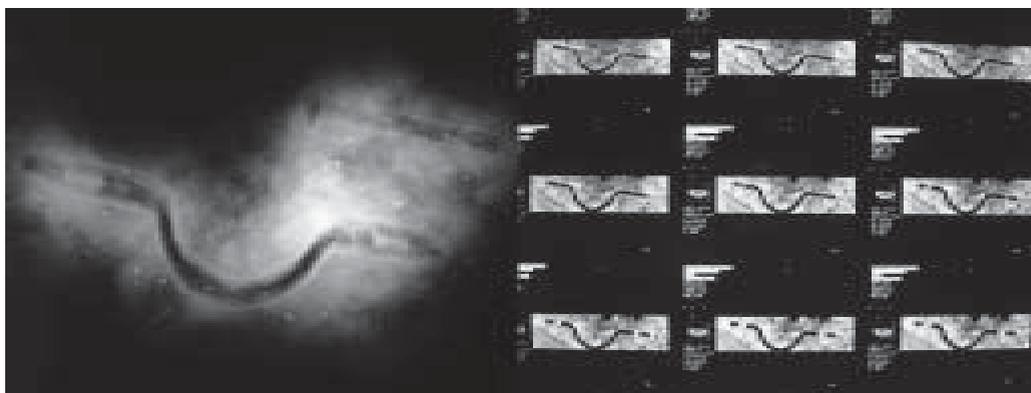


Figura 6. Reconocimiento de las piezas dentro de la concreción 05 PDH - 002 b: *izquierda*, por medio de una radiografía; *derecha*, a través de una tomografía computada (fotografía: Cristian Murray).

2:1 (dos partes de resina y una de endurecedor) de la empresa Delta Glass. Sólo una de las piezas, que aún no ha sido identificada (concreción 05 PDH - 004), no fue replicada, por presentar una superficie interna irregular, lo cual imposibilitaría una correcta reproducción.

El procedimiento que se siguió se puede resumir en tres etapas: 1) la apertura de la concreción, 2) la limpieza de la cavidad, y finalmente 3) el moldeo (North 1987). La simplicidad de la forma de las piezas permitió efectuar un corte alrededor de las concreciones, próximo al perímetro de los artefactos, con el fin de abrirlas en dos mitades. Para realizar la acanaladura se utilizó principalmente una amoladora con un disco de widia, ya que debían cortarse los guijarros que formaban parte de la concreción (también puede utilizarse un cincel neumático en el caso de concreciones más friables), y luego se introdujeron a lo largo del canal destornilladores de punta plana para hacer palanca y abrir la pieza. La limpieza de los residuos de corrosión en el interior de la cavidad se realizó con agua corriente y un cepillo de cerdas blandas; en las partes de difícil acceso se usó un *water pick* (instrumento surtidor de agua a presión). No es recomendable la utilización de ácidos, los cuales pueden destruir el molde (Hamilton 1998a). La superficie se secó durante un tiempo y se juntaron y sellaron las mitades, dejando dos conductos en los extremos por donde colar la resina (Figura 7). Durante la preparación de la mezcla se bajó la viscosidad de la misma para que pueda fluir correctamente, calentándola en un horno a una temperatura de 60° C. Si bien en algunos casos se utilizan resinas que no se adhieren al molde, en otros, como en el presente, se realiza lo contrario; la razón es buscar que la fina capa de óxido que forma el molde quede cubriendo a la réplica, dándole la apariencia de una pieza metálica. Otra posibilidad de lograr esto es mediante el agregado de grafito en polvo o de polvo de hierro; este último puede oxidarse y junto con el primero, dar el aspecto



Figura 7. Proceso de colada de la resina epoxy en la concreción 05 PDH - 002 b.

buscado a la pieza (North 1987). En nuestro caso, al quedar adherida la réplica al molde, la concreción no pudo abrirse luego de fraguar la resina y debió fragmentarse mecánicamente, utilizando un torno manual con una mecha cónica con punta de diamante.

La pieza de mayor dificultad en replicar fue la concreción que contenía un herraje en forma de omega (Figura 8), la cual debió ser abierta en cuatro partes. En ciertas ocasiones se ha utilizado en arqueología una técnica llamada Estereolitografía, surgida a partir del desarrollo experimental de piezas en la industria. Este método, que se combina con tomografías computadas o imágenes de Rayos X en 3-D, puede utilizarse para piezas con formas muy complejas (las cuales no pueden ser replicadas por el método anterior) y es no destructiva, de forma que pueden realizarse las copias que sean necesarias (ver Barto Arnold III y McAllister 1998). Sin embargo la principal dificultad es el elevado costo operativo, razón por la cual su uso aún no ha sido generalizado.

Por otro lado, a través de los análisis metalográficos de la estructura de los restos metálicos remanentes (los cuales no se corroyeron por completo), se pueden estudiar las aleaciones utilizadas en los diferentes artefactos y los métodos de fabricación de los



Figura 8. Réplica con resina epoxy de la pieza de la concreción 05 PDH - 002 b. Herraje en omega con dos orificios pasantes en los extremos; posiblemente utilizado para asegurar los muñones de un cañón a la cureña (fotografía: Cristian Murray).

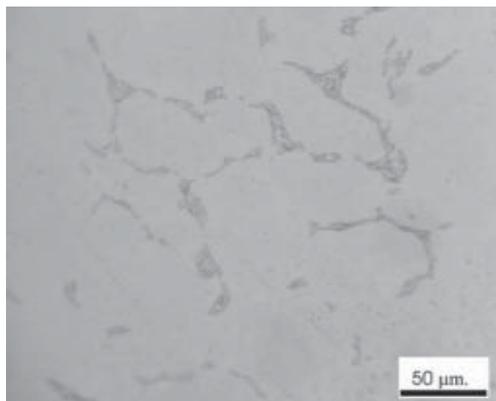


Figura 9. Metalografía de los restos metálicos del perno de hierro de la Figura 1. Estructura formada por ferrita y perlita globulizada en los bordes de grano, característica de un calentamiento prolongado o enfriamiento lento.

mismos (Scott 1991; Henderson 2000), aspectos importantes de las técnicas constructivas navales de la época. En una metalografía realizada al perno de la concreción 05PDH - 003 (Figura 9) se aprecia una estructura formada por ferrita y perlita, el estado de esta última (distribuida en los bordes de grano y globalizada), junto con la presencia de inclusiones de óxidos y silicatos, que son indicativos de los objetos de hierro manufacturados por forjado y sometidos a calentamientos prolongados o enfriados lentos (Horacio De Rosa, com. pers. 2005).

Finalizando, es importante resaltar que en la actualidad no se poseen datos documentales como planos sobre las técnicas constructivas holandesas del siglo XVII, sobre todo del tipo de embarcación en cuestión, los estudios realizados hasta la fecha se basan principalmente en la iconografía y documentos históricos (Burningham 2001; De Winter y Burningham 2001). Es debido a esto que artefactos aislados que tengan que ver con la construcción del barco, como los que se encontraron en el sitio *Hoorn*, pueden proporcionar información importante acerca de los detalles de las técnicas implementadas en esa época.

CONCLUSIÓN

El conocimiento de las propiedades de los metales y su interacción con un medio marinos permitirá conocer parte importante de los procesos de formación que afectan a las piezas de hierro en un medio subacuático. El proceso de corrosión de los metales ferrosos es muy complejo y es necesario analizar las características particulares de cada caso para poder planificar correctamente las tareas en el sitio. A partir de ello podremos hacer frente a una serie de dificultades y necesidades presentes en un proyecto arqueológico de dichas características.

Con respecto a la metodología a implementar durante una prospección, existe la dificultad del reconocimiento de las piezas en el sitio cuando la naturaleza del sedimento puede oficiar de camuflaje o cuando las condiciones de visibilidad son muy reducidas, siendo necesario en estos casos –si bien no se restringe a los mismos– optar por la utilización de sensores remotos como el magnetómetro o de detector de metales manual.

Debemos planificar una correcta aplicación

de las técnicas abocadas a la conservación del registro arqueológico, tanto *in situ* como inmediatamente luego de su extracción, de acuerdo a las expectativas de preservación que las características particulares del sitio y de los artefactos denoten. Los tratamientos de conservación utilizados serán seleccionados de acuerdo al estado de deterioro de las piezas y a las posibilidades de preservación de las mismas.

Luego de los trabajos de excavación y documentación pertinentes, y con la infraestructura necesaria para el estudio de las piezas en el laboratorio, se podrán recuperar los restos arqueológicos del sitio. Si bien actualmente no existe un acuerdo acerca de qué técnicas utilizar en la preservación de las piezas de hierro extraídas de un medio subacuático, se han desarrollado métodos que han tenido muy buenos resultados. Particularmente, en aquellos casos que no queden restos metálicos de las piezas se pueden realizar réplicas de las mismas, que nos faciliten su posterior estudio y aprovechamiento como material de exposición y aprendizaje.

Debido a las características del naufragio del *Hoorn*, el registro que quedó del mismo es muy escaso, especialmente con relación a su estructura, por lo que las concreciones ferrosas recuperadas son una fuente importante para su estudio. Gracias a la metodología aplicada fue posible recuperar la forma de las piezas originales, a través de réplicas de excelente fidelidad.

Las embarcaciones de esta clase son poco conocidas y no existen planos de las mismas con datos precisos con respecto a las técnicas constructivas; es por ello que la posibilidad de acceder a los materiales utilizados en su construcción, nos permite conocer más acerca de los medios tecnológicos utilizados en la época del descubrimiento. Este es un ejemplo de la importancia de conocer la naturaleza del registro arqueológico para acceder a la

información que puede brindarnos y para realizar las tareas adecuadas con el fin de preservarlo.

Recibido en Marzo de 2006
Aceptado en Agosto de 2006

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Cristian Murray por la oportunidad de trabajar en el tema y sus comentarios; a Horacio De Rosa por el asesoramiento técnico en los análisis metalográficos y en el estudio de materiales metálicos; a Dolores Elkin por la revisión y corrección del presente; a los evaluadores del informe y a los editores de la revista por sus correcciones y comentarios finales. A todos ellos, por hacer posible esta presentación, gracias.

BIBLIOGRAFIA

- Askeland, D. R.
1998. *Ciencia e ingeniería de los materiales*. 3ra ed. Internacional Thomson Editores, México.
- Australian National Maritime Museum
2000. *The Vernon Anchors & HMB Endeavour Cannon*.
<http://www.anmm.gov.au/anchors&cannon.htm>
(Acceso septiembre de 2005).
- Barto Arnold III, J. y M. L. MacAllister
1998. *Artefact replication by stereolithography*. *The International Journal of Nautical Archaeology* 27 (2):160-165.
- Bastida, R. y M. Trassens
2004. Informe sobre sedimentos. En *Proyecto Un naufragio holandés en la Patagonia; búsqueda e investigación de los restos del Hoorn (1615). Informe del trabajo de campo (1ª campaña)*, editado por D. Vainstuy y C. Murria, 2ª parte, pp. 4-16. Ms. en archivo, Programa de Arqueología Subacuática, Instituto Nacional de Antropología y Pensamiento Latinoamericano. Presentado al Ministerio de Relaciones Exteriores de Holanda. Copias disponibles en el INAPL, Buenos Aires.

- Bethencourt, M., M. L. A. Gil, C. Fernández-Lorenzo y A. Santos
2004. Aplicación de tratamiento electroquímico a baja intensidad de corriente para la extracción de cloruros en objetos arqueológicos de hierro de procedencia subacuática. Observación de la evolución de fases mineralógicas mediante XRD-Rietveld. *Revista de Metalurgia* 40:420-425.
- Burningham, N.
2001. Learning to sail the Duyfken replica. *The International Journal of Nautical Archaeology* 30 (1):74-85.
- Callister, W. D. Jr.
1996. *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*, vol. II. Reverté, S. A., España.
- Campbell, J. y P. Gesner
2000. Illustrated catalogue of artefacts from the HMS Pandora wrecksite excavations 1977-1995. En *Memoirs of the Queensland Museum, Cultural Heritage Series*, editado por Queensland Museum, (2)1:53-159. Brisbane, Australia.
- Carlin, W. y D. H. Keith
1996. An improved tanning-based corrosion inhibitor-coating system for ferrous artefacts. *The International Journal of Nautical Archaeology* 25 (1):38-45.
- Chang, R.
1995. *Química*. McGraw - Hill Interamericana de México, S. A. de C. V., México D. F.
- Corfield, M.
1996. Preventive conservation for archaeological sites. I "IIC - Preprintings of the Contributions to the Copenhagen Congress, 26-30 August. *Archaeological conservation and its consequences*", pp. 32-37, Londres.
- Cronyn, J. M.
1990. *The elements of archaeological conservation*. Routledge, Londres.
- Dean, M., B. Ferrari, I. Oxley, M. Redknap y K. Watson (editores)
1991. *Archaeology Underwater - The NAS Guide to Principles and Practice*. Nautical Archaeology Society (NAS), Institute of Archaeology, Londres.
- De Rosa, H. M.
2004. Caracterización de materiales metálicos. En *Proyecto Un naufragio holandés en la Patagonia; búsqueda e investigación de los restos del Hoorn (1615)*. Informe del trabajo de campo (1ª campaña), D. Vainstub y C. Murria, 2º parte, pp. 22-33. Ms. en archivo, Programa de Arqueología Subacuática, Instituto Nacional de Antropología y Pensamiento Latinoamericano. Presentado al Ministerio de Relaciones Exteriores de Holanda. Copias disponibles en el INAPL, Buenos Aires.
- De Winter, W. y N. Burningham
2001. Distinguishing different types of early 17th-century Dutch Jacht and Ship through multivariate morphometric analysis of contemporary art. *The International Journal of Nautical Archaeology* 30 (1):57-73.
- Elkin, D.
2000. Procesos de formación del registro arqueológico subacuático: una propuesta metodológica para el sitio Swift (Puerto Deseado, Santa Cruz). *Desde el País de los Gigantes. Perspectivas arqueológicas en Patagonia*. Actas de las IV Jornadas de Arqueología de la Patagonia, Río Gallegos, 2 al 6 de noviembre de 1998, vol. I:195-202. Universidad Nacional de la Patagonia Austral, Río Gallegos.
- Elkin, D, M. L. Endere, E. Kremer, C. Murray y A. Orsetti
1997. *El Patrimonio cultural subacuático. Una introducción a su estudio y preservación*. Ms. en archivo, Escuela Nacional Superior de Salvamento y Buceo. Prefectura Naval Argentina, Buenos Aires.
- Florian, M. L. E.
1987. The underwater environment. En *Conservation of Marine Archaeological Objects*, editado por C. Pearson, pp. 1-20. Butterworth, Londres.
- González Bonorino, F. y M. E. Teruggi
1952. *Léxico sedimentológico*. Instituto Nacional de Investigación de las Ciencias Naturales, Museo Argentino de Ciencias Naturales "Bernardino Rivadavia" Coni, Buenos Aires.
- Gregory, D.
1999. Monitoring the effect of sacrificial anodes on the large iron artefacts on the Duart Point wreck. *The International Journal of Nautical Archaeology* 28 (2):164-173.
- Grosso, M.
2005. Descripción del biofouling presente en el sitio. En *Proyecto Un naufragio holandés en la Patagonia; búsqueda e investigación de los restos del Hoorn (1615)*. Informe del trabajo de campo (2ª campaña), editado por D. Vainstub y C. Murria, pp. 23-24. Ms. en archivo, Programa de Arqueología Subacuática, Instituto Nacional de Antropología y Pensamiento Latinoamericano. Presentado al Ministerio de Relaciones Exteriores de Holanda. Copias disponibles en el INAPL, Buenos Aires.
- Hamilton, D. L.
1996. *Basic Methods of Conserving Underwater*

- Archaeological Material Culture. Legacy Resource Management Program. U.S. Department of Defense, Washington D.C.
- 1998a. Methods of Conserving Underwater Archaeological Material Culture. *Conservation Files ANTH 605, Conservation of Cultural Resources I*. Nautical Archaeology Program, Texas A&M University, <http://nautarch.tamu.edu/class/ANTH605> (Acceso mayo de 2005).
- 1998b. Composite Wood/Iron Artifacts: Pole Arms - Partisans, Iron Blade Conservation. *Conservation Research Laboratory Reports*, N° 2, La Salle Shipwreck Project, Texas Historical Commission. Nautical Archaeology Program, Texas A&M University, <http://nautarch.tamu.edu/crl/Report2/polearm1.htm> (Acceso mayo de 2005).
- Henderson, J.
2000. *The Science and Archaeology of Materials. An investigation of inorganic materials*. Routledge, Londres y New York.
- Iantanos, N.
2004. *Dinámica sedimentaria de la Ría del Deseado, Provincia de Santa Cruz*. Tesis Doctoral no publicada. Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Comodoro Rivadavia. Copias en el Instituto Nacional de Antropología y Pensamiento Latinoamericano.
- Leskard, M.
1987. The packing and transportation of marine archaeological objects. En *Conservation of Marine Archaeological Objects*, editado por C. Pearson, pp. 117-121. Butterworth, Londres.
- Luna Erreguerena, M. del P.
1982. *La Arqueología Subacuática*. Tesis Profesional no publicada. Escuela Nacional de Antropología e Historia, Universidad Nacional Autónoma de México, INAH, SEP, México. Copia en el Instituto Nacional de Antropología y Pensamiento Latinoamericano.
- MacLeod, I. D.
1989. The application of corrosion science to the management of maritime archaeological sites. *Bulletin of the Australian Institute for Maritime Archaeology* 13 (2):7-16.
1995. In situ corrosion studies on the Duart Point wreck, 1994. *The International Journal of Nautical Archaeology* 24 (1):53-59.
1996. In situ conservation of cannon and anchors on shipwrecks sites. En *Archaeological conservation and its consequences*, editado por R. Ashok y P. Smith, pp. 111-114. Copenhagen.
- MacLeod, I. D. y N. A. North
1979. Conservation of corroded silver. *Studies in Conservation* 24:165-170.
- Morales, G. A.
1988. Organismos formadores de rocas. *Memoria de la séptima semana de la ciencia y las actividades subacuáticas (23 al 27 de mayo)*, pp. 55-63. Secretaría de Pesca, México D. F.
- Muckelroy, K.
1978. *Maritime archaeology*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Museo Nacional de Arqueología Marítima. Centro Nacional de Investigaciones Arqueológicas Submarinas
1990. *La Arqueología Subacuática en España*. Ministerio de Cultura, Dirección General de Bellas Artes y Archivos. A. G. Novograf, S. A., Madrid.
- Nimmo, B. y G. Hinds
2003. *Beginners guide to corrosion*. National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, UK www.npl.co.uk/materials/programmes/dme/csow.html (Acceso agosto de 2005).
- North, N. A.
1987. Conservation of metals. En *Conservation of Marine Archaeological Objects*, editado por C. Pearson, pp. 207-252. Butterworth, London.
- North, N. A. y I. D. MacLeod
1987. Corrosion of metals. En *Conservation of Marine Archaeological Objects*, editado por C. Pearson, pp. 68-98. Butterworth, London.
- Oddy, W. A.
1987. A New Method for the Conservation of Iron: Ionophoresis in a Non-Aqueous Electrolyte. En *Recent Advances in the Conservation and Analysis of Artefacts*, editado por J. Black, pp. 155-159. Summer School Press, Institute of Archaeology, UCL.
- Oxley, I.
1998. The Investigation of the Factors That Affect the Preservation of Underwater Archaeological Sites. En *Maritime Archaeology. A Reader of Substantive and Theoretical Contributions*, editado por L. E. Babits y H. Van Tilburg, pp. 523-529. The Plenum Series in Underwater Archaeology. Plenum Press, New York and London.
- Pearson, C.
1977. On-site conservation requirements for marine archaeological excavations. *The International Journal of*

- Nautical Archaeology and Underwater Exploration* 6 (1):37-46.
1987. On-site storage and conservation. En *Conservation of Marine Archaeological Objects*, editado por C. Pearson, pp. 105-116. Butterworth, London.
- Pettijohn, F. J.
1980. *Rocas Sedimentarias*. Manuales Eudeba. Editorial Universitaria de Buenos Aires, Buenos Aires.
- Pifferetti, A. A.
1996. Limpieza y Conservación de Materiales Metálicos de Santa Fe La Vieja. Actas de la 2ª Conferencia Internacional de Arqueología Histórica Americana. *Historical Archaeology in Latin America* 15:119-124. University of South Carolina, Columbia.
- Piñeyro, M. E.
2001. *Los procesos de formación del registro arqueológico subacuático. Un estudio experimental sobre corrosión de metales*. Tesis de Licenciatura en Antropología con orientación Arqueológica, no publicada. Facultad de Ciencias Sociales, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Olavarria. Copias en el Instituto Nacional de Antropología y Pensamiento Latinoamericano.
- Rothwell, G. P.
2005. Corrosion phenomena. An introduction. National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, UK www.npl.co.uk/materials/programmes/dme/csw.html (Acceso agosto de 2005).
- Scott, D. A.
1991. *Metallography and Microstructure of Ancient and Historic Metals*. The Getty Conservation Institute. The J. Paul Getty Museum, Singapore.
- Tarback, E. J. y Lutgens, F. K.
1999. *Ciencias de la Tierra*. Prentice Hall, Madrid.
- Traversa L. P., F. Vetere y N. H. Russo
2002. Limpieza mediante técnicas electroquímicas de piezas arqueológicas metálicas corroídas. *Arqueología Histórica Argentina. Actas del 1º Congreso Nacional de Arqueología Histórica*, pp. 533-538. Corregidor, Buenos Aires.
- Tylecote, R. F.
1984. *A History of Metallurgy*. The Metals Society, Londres.
- UNESCO
1981. *Conservation of the underwater heritage*. pp. 84-126, UNESCO, Paris.
- Vainstub, D. y C. Murray
2004. *Proyecto Un naufragio holandés en la Patagonia; búsqueda e investigación de los restos del Hoorn (1615). Informe del trabajo de campo (1ª campaña)*. Ms. en archivo, Programa de Arqueología Subacuática, Instituto Nacional de Antropología y Pensamiento Latinoamericano (INAPL). Presentado al Ministerio de Relaciones Exteriores de Holanda. Copias disponibles en el INAPL, Buenos Aires.
2005. *Proyecto Un naufragio holandés en la Patagonia; búsqueda e investigación de los restos del Hoorn (1615). Informe del trabajo de campo (2ª campaña)*. Ms. en archivo, Programa de Arqueología Subacuática, Instituto Nacional de Antropología y Pensamiento Latinoamericano (INAPL). Presentado al Ministerio de Relaciones Exteriores de Holanda. Copias disponibles en el INAPL, Buenos Aires.

* **Nicolás C. Ciarlo** es estudiante de la carrera de Ciencias Antropológicas de la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad de Buenos Aires. Este trabajo forma parte del proyecto "Un naufragio holandés en la Patagonia; búsqueda e investigación de los restos del Hoorn (1615)", realizado por el Programa de Arqueología Subacuática (PROAS) del Instituto Nacional de Antropología y Pensamiento Latinoamericano, con la colaboración en los estudios metalúrgicos del Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires. Actualmente es participante del PROAS y del Laboratorio de Materiales, investigando las tecnologías metalúrgicas de los siglos XVII y XVIII.