

Arqueometalurgia experimental en el departamento de Prehistoria y Arqueología de la U.A.M.

Salvador ROVIRA

Universidad Autónoma de Madrid / Museo Arqueológico Nacional (Madrid)

Resumen

El presente artículo expone los principales resultados de una serie de experimentos de Arqueometalurgia realizados entre los años 2005 y 2009, desarrollando el contenido de la asignatura Tecnología. Dichos experimentos se han centrado en la producción primaria de cobre y bronce por procedimientos sencillos, asequibles a los metalúrgicos prehistóricos, buscando respuesta a determinadas propuestas teóricas y sirviendo para introducir al alumnado en el campo de la Arqueología experimental.

Palabras clave: Arqueometalurgia, experimentación, co-reducción, cementación, cobre, bronce.

Summary

This paper presents the main results of a series of experiments on Archaeometallurgy conducted between 2005 and 2009, to develop the content of the subject Technology. These experiments have focused on primary production of copper and bronze by simple procedures, accessible to prehistoric metallurgists, seeking answers to certain theoretical proposals, and serve to introduce students to the field of experimental Archaeology.

Keywords: Archaeometallurgy, experimentation, co-smelting, cementation, copper, bronze.

1. INTRODUCCIÓN

La Arqueología Experimental ya no es, afortunadamente, una disciplina novedosa en los programas de estudios de Prehistoria y Arqueología. Desde hace muchos años los investigadores han sido conscientes del interés de las replicas experimentales para lograr una mejor comprensión de los procesos de manufactura y función de los objetos obtenidos del registro arqueológico. Antes, la tantas veces denostada analogía etnográfica proporcionaba no pocas pistas de índole tecnológica a quienes manifestaban interés por ir

más allá del puro análisis del objeto en sí mismo. Si bien los aspectos formales han servido siempre para elaborar tipologías con las que caracterizar complejos culturales y establecer comparaciones, cada objeto encierra mucha más información que la derivada de la tipología. Así, a finales de la década de los años 1950 comenzó un desarrollo espectacular de la Arqueometría buscando la respuesta a preguntas que surgían de nuevos planteamientos metodológicos (Watson *et al.*, 1974; Chang, 1976; Clarke, 1978)¹. Los métodos científicos, especialmente los procedentes de la Ciencia

¹ Véanse las fechas de las primeras ediciones de estas obras en su lengua original para contextualizar adecuadamente la idea

expresada en el texto. Las ediciones en español llegaban siempre varios años después.

de los Materiales encontraron nuevas aplicaciones en el terreno de la Arqueología y era necesario proporcionar al arqueólogo información acerca de sus posibilidades (Brothwell y Higgs, 1980).

En el terreno concreto de la Arqueometalurgia, proyectos de envergadura como el llevado a cabo por el llamado Grupo de Stuttgart (Junghans, Sangmeister y Schröder) publicado en varios volúmenes de *Studien zu den Anfängen der Metallurgie* (Berlín) en la década de 1960 y comienzos de los 70 animó la formación de otros grupos de investigación arqueometalúrgica en diversos países, entre ellos el nuestro con el inicio en 1982, bajo el liderazgo de Manuel Fernández Miranda, del Proyecto de Arqueometalurgia de la P. Ibérica que, desde entonces hasta la actualidad, con diversos subproyectos dirigidos sucesivamente por Germán Delibes de Castro e Ignacio Montero Ruiz, y de los que ha formado parte siempre quien esto escribe, ha realizado una continua labor de análisis de materiales.

Si en un principio la investigación arqueometalúrgica se centró en los objetos metálicos siguiendo los pasos del Grupo de Stuttgart, a mediados de la década de los años 1980 se hacía patente que la comprensión detallada de los procesos metalúrgicos requería ampliar las analíticas a otros materiales que integraban dichos procesos. Mediante los estudios composicionales y metalográficos de los objetos acabados podíamos dar respuesta a dos preguntas clave: de qué estaban hechos y cómo se fabricaron; es decir, de los metales y aleaciones que se utilizaron en tiempo pretérito y de las cadenas operatorias productivas. Pero desconocíamos algo que es el fundamento de la metalurgia: la obtención del metal. Había, pues, que ampliar los estudios analíticos a los restos arqueológicos de hornos de fundición, a las escorias metalúrgicas y a los minerales metalíferos.

De pronto se había abierto una puerta a un paisaje desconocido que las analogías etnográficas no conseguían ilustrar adecuadamente. Era necesaria la experimentación.

Los experimentos para reproducir la obtención de cobre en la Prehistoria no eran una novedad absoluta, como recogen Tylecote y Merkel (1985) en un breve pero interesante artículo en el que revisan los logros de la vía experimental hasta ese momento. Pero a partir de entonces (mediados de los años 80) asistimos a su intensificación.

En estrecha relación con la actividad experimental aparecen los arqueódromos, algunos muy activos como el localizado cerca de Beaune (Francia), en cuyas instalaciones todos los veranos de la década de los 90 tenían lugar series de experimentos relacionados con la obtención de cobre y hierro (Rovira, 2003). Actualmente se celebran periódicamente talleres experimentales en varios países europeos, con frecuencia acompañados de sesiones teóricas y de discusión de resultados. España no es ajena a este movimiento europeo: en los últimos años se anuncian actividades experimentales realizadas por grupos especializados en estas actividades.

En este marco general, y propiciado por la feliz circunstancia de un contrato como profesor asociado de la asignatura Tecnología, tuvimos la oportunidad de enfocar el desarrollo de la materia desde una perspectiva eminentemente experimental. El Departamento de Prehistoria y Arqueología dispone de la infraestructura adecuada para este cometido, que ya venía siendo utilizada por la profesora Carmen Gutiérrez para desarrollar un programa de experimentación con réplicas de herramientas y armas de metal, con resultados de gran interés (Gutiérrez Sáez y Soriano, 2008; Gutiérrez Sáez *et al.*, 2010).

Este número especial de la revista *CuPAUAM* dedicado al profesor D. Manuel Bendala Galán, querido amigo y colega en varias actividades desde hace mucho tiempo, nos brinda la oportunidad de resumir los trabajos experimentales que hemos desarrollado entre los años 2005 y 2009.

2. JUSTIFICACIÓN DE LA VÍA EXPERIMENTAL

La realización de experimentos relacionados con la tecnología prehistórica tiene un atractivo indudable para el alumnado. En primer lugar, el desarrollo experimental permite una mejor comprensión de los procesos tecnológicos previamente estudiados en sus aspectos teórico-descriptivos. En segundo lugar, la experimentación es participativa; los alumnos realizan físicamente los trabajos necesarios para el buen fin del experimento. Finalmente, la experiencia adquirida permite una mejor valoración de los posibles diagramas de flujo de las labores efectuadas por los artesanos prehistóricos, refuerza la idea de cadena operato-

ria y sirve de introducción en el complejo sistema interaccionante de las relaciones entre conocimientos tecnológicos, organización social, economía, etc. (Dobres, 2000).

Por otro lado, en relación con la metalurgia prehistórica se han instalado en la literatura científica unos cuantos tópicos que deben ser desterrados o, al menos, contrastados. Uno de ellos, quizás el más arraigado, es considerar la metalurgia como una actividad difícil, compleja y por tanto especializada. Pero no es cierto que así sea, al menos en sus orígenes. La metalurgia del cobre, la más antigua, hizo su debut como una actividad de carácter marcadamente doméstico en algunas sociedades del Neolítico avanzado en las que coincidieron ciertas circunstancias favorables: a) el reconocimiento de los minerales cupríferos (malaquita, azurita, cuprita), algunos de ellos ya viejos conocidos como piedras duras ornamentales, b) la disponibilidad de una tecnología del fuego ampliamente experimentada en la cocción de cerámica, y c) la complejidad social suficiente para poder valorar y apreciar el cobre como nuevo material². El resto es obra de la Naturaleza y de las leyes de la Física y de la Química que nada tiene que ver con cuestiones culturales. El metalurgo prehistórico sólo tuvo que encontrar aplicación empírica a dichas leyes, lo cual, desde luego, no es poco. Porque, efectivamente, de todos los metales de interés industrial que se obtienen a partir de sus minerales, el cobre es el que requiere menor consumo de energía en el proceso de reducción y unas condiciones termoquímicas poco exigentes. No es, por tanto, una casualidad que fuera el cobre el metal que diera lugar a la primera metalurgia (Rovira y Ambert, 2002; Rovira, 2004; Hauptmann, 2007).

Otro concepto erróneo que se viene arrastrando es que no hay metalurgia sin horno metalúrgico. Falso. Un horno metalúrgico *stricto sensu* es una cavidad cerrada cuyo ambiente interior se puede controlar a voluntad para optimizar la reducción de los minerales, cuyo principal subproducto es escoria de bajo punto de fusión que apenas arrastra metal. Los restos arqueológicos de

un horno son a menudo difíciles de identificar y esa dificultad hace que con harta frecuencia se llame hornos a ciertas estructuras con afectación térmica que realmente no lo son aunque se encuentren vinculadas a actividades metalúrgicas. Las características de las escorias, fácilmente determinables mediante su análisis químico y mineralógico, proporcionan los argumentos decisivos para decidir si han sido producidas en un horno metalúrgico o en otras estructuras de fuego usadas para reducir mineral, con independencia de si el registro arqueológico ha proporcionado información sobre tales estructuras o no. En otras palabras: las escorias son los materiales necesarios e imprescindibles que, tras su estudio, permitirán asignar la categoría y función a las estructuras pirometalúrgicas. Sobre hornos y escorias, véase una detallada descripción en Rovira y Renzi (2010).

Otro problema arqueometalúrgico que hasta hace poco no tenía una adecuada respuesta es el de los primeros bronce, las primeras aleaciones de cobre con estaño. Determinados hallazgos arqueológicos españoles y su consiguiente estudio en el laboratorio del Proyecto de Arqueometalurgia de la Península Ibérica nos hizo ser conscientes de que el capítulo de la tecnología de la obtención del bronce no había sido abordado por la investigación arqueometalúrgica hasta entonces (Rovira, 2007). Algunas escorias y escorificaciones en vasijas de reducción apuntaban a la co-reducción de minerales de cobre y estaño como método de producción de bronce. Convenía comprobarlo experimentalmente.

Aunque la experimentación es aparentemente una actividad práctica, manual, si no dotamos el experimento de un adecuado marco teórico su desarrollo acaba siendo más una actividad lúdica que un verdadero experimento arqueometalúrgico. Había que proporcionar a los alumnos, previamente, los conocimientos de metalurgia imprescindibles para que pudieran entender cada paso del proceso. A ello se dedicó la mayor parte del tiempo asignado a la materia Tecnología.

² El cobre no sustituyó de forma inmediata a otros materiales como la piedra y el hueso. Hay una convivencia milenaria del metal con esos otros materiales de probada eficacia fren-

te a un nuevo material que compitió en desventaja durante mucho tiempo.

2. ELABORACIÓN DE CERÁMICAS METALÚRGICAS

Los materiales pirometalúrgicos cerámicos hallados en yacimientos arqueológicos representativos de la metalurgia calcolítica se reducen a tres tipos básicos: vasijas, toberas y boquillas protectoras de tubos de soplado. En nuestros experimentos decidimos utilizar fuelles y toberas para ventilar la estructura de fuego. Había, pues, que fabricar vasijas y toberas cilíndricas (las más sencillas).

Hay prehistoriadores que tienden a presuponer que la cerámica para una actividad tan “especial” como la metalurgia, que ha de resistir elevadas temperaturas, ha de ser también especial. Nada más lejos de la realidad. Las cerámicas metalúrgicas no se diferencian en nada de las comunes por lo que respecta a sus propiedades refractarias (Freestone, 1989). Esto no debe sorprendernos, pues en las condiciones habituales de trabajo de un crisol o una tobera prehistórica no se sobrepasan temperaturas del orden de los 1.200° C, y la cerámica común resiste sin deformarse o fundir formando burbujas (*bloating*) hasta temperaturas cercanas a los 1.300° C. No era, pues, necesario mejorar la calidad de la cerámica. Hasta época romana no parece haber interés en mejorar la refractariedad de los crisoles y revestimientos, coincidiendo con el uso de hornos y fraguas en las que se alcanzaban temperaturas más elevadas. Tampoco los desgrasantes empleados ni su tamaño de grano influyen significativamente en la resistencia térmica del barro cocido. La función del desgrasante es principalmente mecánica, para dar al barro la plasticidad necesaria para modelarlo cómodamente. Una vez cocido, el desgrasante mejora hasta cierto punto la resistencia al impacto de la cerámica; pero ésta sigue siendo una función mecánica, no térmica.

Sabedores de estos principios, los alumnos elaboraron crisoles y toberas utilizando inicialmente barro industrial para modelar cargado con cuarzo machacado como desgrasante, y luego las arcillas ricas en granito alterado del propio suelo del entorno de la Facultad. Tras un largo periodo de secado a la sombra, vasijas y toberas eran sometidas a una cocción rápida entre los carbones de la fragua (Fig. 1).



Figura 1. Proceso de cocción de la cerámica utilizada en los experimentos.

4. EXPERIMENTOS PARA LA OBTENCIÓN DE COBRE

Tras muchos años de analizar los restos de actividades metalúrgicas recuperados en los yacimientos calcolíticos, resultaba evidente que la obtención de cobre se basaba en la reducción directa de minerales de naturaleza oxídica (malaquita, cuprita y azurita principalmente) con carbón vegetal, en estructuras de fuego abiertas hiperventiladas con la ayuda de fuelles y toberas, o mediante tubos de soplado a pulmón o aprovechando el flujo natural del viento. En la fase más antigua de esta metalurgia incipiente se solían utilizar recipientes de cerámica como reactores-contenedores, a juzgar por los numerosos fragmentos de vasijas con gruesas capas de escorificación por su cara interna halladas recurrentemente en yacimientos representativos de este periodo (Rovira y Ambert, 2002; Hauptmann *et al.*, 2006). La cantidad de escoria recuperada es, en general, muy pequeña y su naturaleza es la de una escoria estructuralmente heterogénea, parcialmente fundida, muy viscosa, que retiene mucho metal atrapado así como mineral sin reducir (Rovira, 2002a; Hauptmann, 2007: 157-179). Cuando hay escoria es porque el mineral utilizado tiene una cierta cantidad de ganga. La composición de la escoria resultante viene determinada por la mineralogía de dicha ganga, de ahí que encontremos escorias con composiciones cuantitativa y cualitativamente variables. En cambio, si se trabaja con minerales de cobre puros no hay formación de escoria porque todos los componentes no metálicos de la mena son volátiles y se pierden en los humos a lo largo del proceso reductor.

Muestra	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Ag	Sn	Sb	Pb	Bi
PA12799	1,66	nd	16,0	nd	nd	0,121	1,33	0,020	1,33	10,5
PA12799A	7,10	nd	1,84	nd	2,06	0,083	0,284	0,016	4,85	2,71
PA12800	1,55	nd	23,8	nd	0,42	0,127	1,87	0,001	0,25	3,17
PA12801	0,80	nd	30,7	nd	nd	0,079	2,12	0,027	1,61	2,42
PA12802	0,52	nd	8,54	nd	0,74	0,013	0,893	0,017	0,29	4,85
PA12803	1,53	nd	34,1	nd	0,38	0,180	0,932	0,112	2,34	2,41
PA12804	0,80	nd	15,5	nd	1,01	0,024	0,775	0,002	0,42	6,30
PA12805	0,13	nd	35,1	nd	0,19	0,055	0,042	0,012	0,30	nd
PA12806	1,50	nd	38,4	nd	0,25	0,109	0,459	0,079	2,15	2,45
PA12807	0,21	nd	26,9	nd	0,10	0,022	0,509	0,024	0,52	2,34
PA12808	0,29	nd	31,5	nd	nd	0,067	0,420	0,002	0,46	4,00
PA12809	1,07	nd	44,8	nd	0,26	0,093	1,88	0,031	0,19	0,40
PA12810	0,75	nd	39,5	nd	nd	0,101	0,525	0,021	0,82	2,41

Figura 2. Análisis semicuantitativo de muestras de mineral de la mina de Lozoyuela (Madrid) (XRF-ED, % en peso).
Nota: nd elemento no detectado.

Para los experimentos de reducción se ha utilizado mineral procedente de la escombrera de una mina de cobre abandonada que se localiza en las cercanías de Lozoyuela (Madrid). Es un mineral de naturaleza polimetálica cuya composición media aproximada es la siguiente (% en peso): Cu 25%; Fe 4,5%; Bi 6%; Pb 3,7%; Sn 1,0%; As 0,4%; Sb 0,3%; Ag 0,02%. La ganga es cuarzo y feldespato. Es, por tanto, un mineral con más del 50% de ganga, del que cabe esperar la formación de escoria. La figura 2 muestra los resultados del análisis de varias muestras.

Se realizaron cuatro experimentos de reducción, uno cada año, con resultados similares en todos ellos. Para el primero se preparó una infraestructura de fuego muy simple: una cubeta excavada en la tierra, de unos 30 cm de diámetro y 20 cm de profundidad, y dos toberas enfrentadas con perforación de 25 mm de diámetro, a ras del suelo, calzadas con piedras, conectadas cada una a un fuelle de accionamiento manual de unos 40 l de capacidad (Fig. 3). En los siguientes experimentos se mejoró ligeramente la estructura de

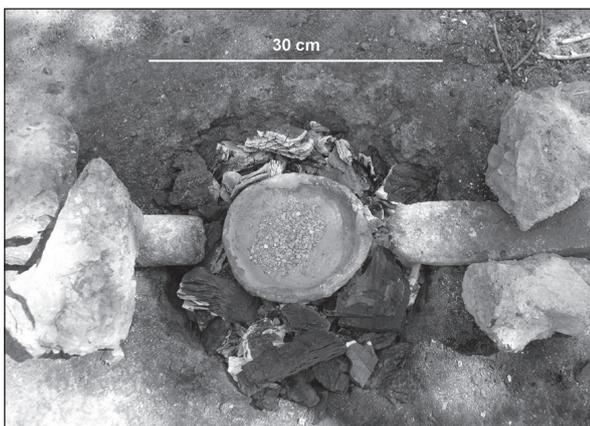


Figura 3. Infraestructura de fuego de los experimentos 1 y 2.

fuego sin dejar de ser un fuego abierto, construyendo dos muretes de 30 cm de altura con una perforación en la base para albergar las toberas (Fig. 4). En cada experimento se utilizaron 400 g de mineral machacado por los alumnos hasta porciones de tamaño milimétrico.



Figura 4. Infraestructura de fuego de los experimentos siguientes.

El procedimiento seguido fue:

1. Pre calentamiento del sistema durante 45 minutos, con las brasas de carbón llenando casi por completo la cubeta, accionando suavemente los fuelles hasta los últimos 15 minutos, en los que se aumentó la presión y el ritmo. El crisol se fue pre calentando al mismo ritmo para evitar un choque térmico que pudiera agrietarlo o hacerlo estallar, quedando al final enterrado entre las brasas. La temperatura en la zona del crisol en el momento de iniciar la carga de mineral era de 890° C medidos con pirómetro electrónico.

2. Comienza la carga de mineral, añadiendo un puñado sobre las brasas que cubren el crisol. Inmediatamente se recubre el mineral con carbón fresco. Estas cargas se repiten cada 15 minutos aproximadamente hasta agotar el mineral. A las dos horas contadas desde el inicio, la temperatura en el crisol era de 1.000° C; a las 2:20 horas 1.116° C; a las 2:50 horas 1.200° C.
3. A las 2:10 horas de iniciado el proceso se retiraron las toberas y se dejó enfriar el sistema. La reducción propiamente dicha había durado 1:25 horas hasta que cesó la ventilación forzada.

El producto final obtenido fue una masa de material escoriáceo solidificada en el interior del crisol (Fig. 5), en cuya superficie se distinguían numerosas bolitas de metal. Hubo que romper el crisol para separar la escoria en la que se encontraba embebido el metal obtenido y machacarla para seleccionar a mano los nodulillos de cobre. Se extrajeron varias muestras de escoria y de cobre para su estudio en el laboratorio.



Figura 5. Crisol conteniendo el resultado del experimento de reducción.

La composición de algunos nódulos metálicos (Fig. 6) subraya el carácter polimetálico del producto obtenido, como era de esperar: cobre con impurezas de otros elementos químicos pre-

sente en la mena (véase la Fig. 2). A primera vista podría sorprender la presencia en el metal de un poco de níquel, que no se detectó en ninguna de las muestras de mineral de la figura 2. Sin embargo sabemos que los minerales de Lozoyuela contienen níquel, como se demostró con los análisis de una amplia serie de muestras de dicha mina realizados hace tiempo (Rovira y Montero, 1994: 157-158). El níquel, además, es un metal que tiende a ligarse en su mayor parte al cobre reducido.

Como sucede en los nódulos de las escorias arqueológicas (Rovira, 2002a: 97, tab.10), también en los experimentales se observan tasa de hierro relativamente elevadas. Pero lo más interesante a destacar es que todos los elementos metálicos presentes en el mineral original tienden a alearse con el cobre reducido en mayor o menor medida. Este mecanismo es de capital importancia para comprender la composición de los cobres arqueológicos más antiguos, en particular los arsenicales, entono a los cuales se elaboró hace años el concepto de aleación intencionada, y por tanto un signo de progreso tecnológico, contra el cual venimos argumentando (Rovira, 2002b: 9; Rovira 2004: 16-19).

Una primera aproximación a la composición de la escoria experimental indica que una importante cantidad de cobre ha quedado retenida (Fig. 6). Este es un dato que coincide plenamente con las escorias arqueológicas más antiguas y que caracteriza las que hemos denominado “escorias inmaduras” (Rovira y Renzi, 2010: 107) o escorias resultantes de una tecnología primitiva (Hauptmann, 2003: 460).

Un estudio más detallado de las escorias con el microscopio electrónico de barrido

Muestra	Tipo	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Ag	Sn	Sb	Pb	Bi
PA11938	Nódulo experimental	0,54	0,21	95,0	nd	0,66	0,202	0,867	0,025	1,32	1,16
PA11939	Nódulo experimental	2,29	0,21	90,4	nd	1,77	0,114	0,935	0,031	0,21	4,05
PA11940	Nódulo experimental	0,81	nd	93,0	nd	1,94	0,194	0,810	tr	0,81	2,43
PA11941	Nódulo experimental	2,62	nd	83,9	nd	2,88	0,131	1,57	tr	0,52	8,39
PA11942	Escoria experimental	1,63	0,05	11,8	nd	0,29	0,033	0,73	0,017	0,41	2,10
PA11943	Escorificación crisol	2,02	0,08	15,2	nd	0,42	0,030	0,40	nd	0,28	1,94
PA11944	Escoria experimental	1,62	0,05	13,8	nd	0,31	0,045	0,75	0,019	0,61	3,43
PA11945	Nódulo experimental	3,18	0,11	89,3	nd	0,93	0,153	0,748	0,045	0,52	5,01

Figura 6. Análisis semicuantitativo de material experimental: nódulos de metal y escorias (XRF-ED, % en peso).

Nota: nd elemento no detectado; tr trazas.

Muestra	Fase	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	TiO ₂	CaO	FeO	NiO	CuO	SnO ₂	Bi ₂ O ₃
PA11942/4	Matriz	2,30	5,90	55,7	1,20	nd	12,6	9,80	nd	6,50	2,00	3,90
PA11942/5	Matriz	2,70	5,40	55,3	1,50	nd	12,8	9,60	nd	7,70	1,80	3,30
PA11942/7	Matriz	1,88	6,35	54,7	1,36	nd	9,68	9,65	nd	11,1	1,91	3,38
PA11943/5	Matriz	2,23	16,2	57,7	4,32	nd	15,8	3,78	nd	nd	nd	nd
PA11943/6	Matriz	nd	30,8	52,6	10,3	nd	6,34	nd	nd	nd	nd	nd
PA11944/1	Delafosita	nd	nd	nd	nd	nd	nd	39,9	nd	60,1	nd	nd
PA11944/2	Matriz	1,75	6,07	58,2	1,08	nd	11,2	8,95	nd	8,51	nd	4,22
PA11944/3	Delafosita	0,54	0,79	2,12	nd	nd	0,42	35,5	1,62	50,3	8,69	nd
PA11944/4	Delafosita	nd	nd	nd	nd	nd	nd	39,6	nd	53,3	7,06	nd
PA11944/5	Matriz	1,77	7,10	56,8	1,37	0,83	9,36	8,04	nd	9,75	nd	5,03

Figura 7. Análisis de fases minerales en las escorias experimentales (Microsonda SEM-EDAX, % en peso como óxidos). Nota: nd compuesto no detectado.

(SEM)³ lleva a la identificación de las fases constituyentes (Fig. 7). El material fundido está constituido por un vidrio silicatado que forma la matriz envolvente de minerales no fundidos, principalmente cuarzo en estado libre y relictos de mineral no reducido (Fig. 8). Se ha formado delafosita acicular, un óxido de hierro trivalente y cobre que crece cuando hay óxido de hierro en la ganga y las condiciones ambientales en el reactor son ligeramente oxidantes. Es también un indicador térmico pues la delafosita es estable a unos 1.150° C. Entre las agujas de delafosita hay también dendritas de magnetita, corroborando tanto el ambiente oxidante como la elevada temperatura alcanzada en el entorno del

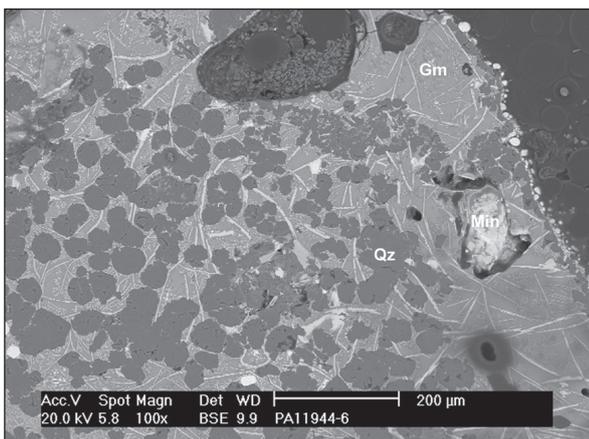


Figura 8. Fases estructurales de la escoria experimental. Qz cuarzo libre; Gm matriz silicatada;

Min relicto de mineral de cobre sin reducir. En la matriz han crecido agujas de delafosita. Los puntos blancos son bolitas de metal. Imagen obtenida en el SEM, electrones retrodispersados.

crisol (Fig. 9). En algunas zonas de la escoria suficientemente ricas en óxido de hierro se ha formado fayalita, un silicato de hierro de bajo punto de fusión (~1.150 C) que será el componente principal de las escorias de horno pero que en las



Figura 9. Detalle estructural de la escoria experimental. Df delafosita; Mt magnetita dendrítica; Gm matriz silicatada. Imagen obtenida en el SEM, electrones retrodispersados.

escorias más primitivas es una rareza (Fig. 10). La presencia de minerales no fundidos dispersos en la matriz hace que la viscosidad global del material sea excesiva, impidiendo la separación del cobre por diferencia de densidad. El cobre que se va formando queda así embebido en la escoria.

Todas estas características las hemos encontrados sistemáticamente en las escorias arqueológicas inmaduras (Rovira, 2002a), de lo que cabe deducir que el procedimiento seguido en el experimento es muy aproximadamente similar al que

³ Análisis realizados en el Servicio Interdepartamental de Investigación de la UAM, con microscopio electrónico

operado por Esperanza Salvador.

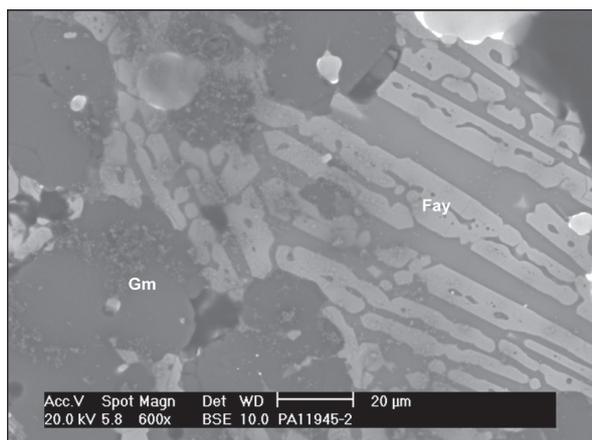


Figura 10. Detalle estructural de la escoria experimental. Gm matriz silicatada; Fay fayalita. Imagen obtenida en el SEM, electrones retrodispersados.

utilizaron los primeros metalúrgicos, al menos desde el punto de vista termoquímico. En todo caso lo que resulta evidente es que obtener cobre no es difícil disponiendo de una infraestructura nada complicada, mineral no necesariamente exento de ganga y carbón vegetal. De hecho obtuvimos cobre en otros experimentos anteriores partiendo de minerales con menos del 10% de cobre (Rovira, 1999: 104-109).

Como hemos mencionado antes, la escoria inmadura producida aplicando una tecnología primitiva depende de la cantidad y naturaleza de la ganga que acompaña al mineral metalífero. Si no hay ganga, no hay escoria. Pudimos comprobarlo con otro experimento realizado en 2006 usando 525 g de malaquita pura del Zaire. Conseguimos la reducción completa sin que se produjera nada de escoria en el crisol.

5. EXPERIMENTOS DE CO-REDUCCIÓN PARA OBTENER BRONCE

La abundancia de objetos fabricados con la aleación cobre-estaño en la Edad del Bronce contrasta dramáticamente con la escasez de objetos de estaño en ese mismo periodo, un hecho que al parecer ha movido a la reflexión a muy pocos estudiosos. Si el estaño es el aleado principal del bronce, ¿por qué no lo encontramos en el registro arqueológico hasta momentos tardíos del Bronce y no en todas partes? ¿Por qué, si en la Península

Ibérica hay importantes afloramientos de casiterita en toda la banda occidental desde Extremadura hasta Galicia, supuestamente explotados en la Prehistoria reciente (Merideth, 1998), no conocemos objetos de estaño metálico hasta bien entrada la Edad del Hierro y éstos hallados en un pecio griego arcaico de dudosa singladura? (Rovira Hortalà *et al.*, 2009). Estas y otras preguntas nos venían inquietando desde hacía tiempo, en particular desde que comenzaron a llegar al laboratorio del Proyecto de Arqueometalurgia escorias y escorificaciones en crisoles en cuya composición elemental se detectaban cobre y estaño. Aquellos primeros estudios de laboratorio, pioneros en esta parcela de la investigación arqueometalúrgica, nos llevaron a la conclusión de que la fabricación de bronce en la Prehistoria metalúrgica no se hacía con estaño metálico sino con su mineral, la casiterita, mediante dos procedimientos distintos: a) por co-reducción en un crisol de minerales de cobre y casiterita, y b) por cementación de cobre metálico con casiterita, también en un crisol. En Rovira (2007 y 2008-2009) se encuentra desarrollado nuestro planteamiento teórico y una primera discusión de los estudios analíticos efectuados hasta entonces.

Había llegado el momento de experimentar si la co-reducción era un método factible usando una instalación metalúrgica tan sencilla como la utilizada en los experimentos descritos en el apartado anterior⁴.

En este experimento se utilizó un kg de mineral de cobre de la mina de Lozoyuela (Véase Fig. 2) con un contenido estimado de metal de 250 a 300 g, y 200 g de casiterita prácticamente pura (157 g de estaño) procedente de la escombrera de una mina de la provincia de Ourense. Ambos minerales fueron machacados hasta un tamaño de grano milimétrico y mezclados convenientemente.

Tras 30 minutos de precalentamiento de la instalación, cuando la temperatura en el crisol rondaba los 1.000° C (color rojo amarillento)⁵ comenzamos a añadir puñados de mineral siguiendo el mismo ritmo que en el experimento anterior, hasta agotar la carga (Fig. 11). Treinta minutos después de añadir el último puñado se detuvo el proceso y se dejó enfriar el sistema.

⁴ Este experimento, realizado en marzo de 2007, ya ha sido publicado detalladamente en Rovira *et al.* (2009).

⁵ El color de las brasas y del crisol es un indicador suficientemente preciso de la temperatura del entorno. Existen tablas pirométricas basadas en el color, fáciles de utilizar.



Figura 11. Cargando un puñado de mineral sobre las brasas.

El producto final fue una masa de escoria llenando el crisol, de la que se extrajeron bolitas de metal totalizando un peso de 124 g (Fig. 12). Asumiendo que los minerales contenían un total de unos 457 g de metal, el rendimiento aproximado de la extracción es de un 27%, cifra acorde con los resultados experimentales obtenidos por otros investigadores (Véase Rovira *et al.*, 2009: 409).



Figura 12. Metal obtenido tras machacar la escoria. Escala en mm.

Varias muestras de escoria y algunas bolitas de metal han sido investigadas utilizando el microscopio electrónico de barrido⁶ y el microscopio óptico. En el caso de las escorias, los análisis realizados a distintas fases minerales han proporcionado los resultados que se exponen en la figura 13. Se trata de un material de estructura heterogénea en la que encontramos fases fundidas entre

Muestra	Fase	FeO	MnO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	BaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	CuO	SnO ₂
PA12855/3	Matriz	4.51	0.80	43.0	4.49	32.3	2.77	nd	6.70	nd	2.02	3.38
PA12855/4	Matriz	4.21	0.75	52.1	4.97	18.9	2.15	nd	4.60	nd	5.76	6.58
PA12857/13	Matriz	3.89	1.35	57.6	3.79	11.1	1.17	nd	6.24	6.14	6.00	2.80
PA12857/14	Matriz	4.82	0.78	61.6	4.22	8.10	nd	nd	3.80	nd	1.11	15.6
PA12857/15	Cristales negros	6.84	0.66	53.6	9.88	5.46	1.02	1.53	1.23	nd	1.26	16.7
PA12857/16	Casiterita (mineral)	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	98.5
PA12857/17	Casiterita (cristal)	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	100
PA12858/6	Matriz	5.08	0.57	44.1	7.30	26.2	2.89	nd	4.49	nd	3.84	5.60
PA12858/7	Wollastonita	nd	nd	51.4	nd	48.6	nd	nd	nd	nd	nd	nd
PA12858/8	Silicato (Ca,Sn)	nd	nd	23.1	nd	20.5	nd	nd	nd	nd	nd	56.4
PA12869/07	Wollastonita	nd	1.40	50.0	nd	47.8	0.78	nd	nd	nd	nd	nd
PA12869/08	Óxido de hierro	89.7	3.22	nd	nd	0.50	nd	nd	nd	nd	3.06	2.16
PA12869/09	Matriz	18.3	1.46	32.3	6.38	22.7	5.16	nd	nd	nd	nd	13.7
PA12869/10	Wollastonita	3.62	2.79	50.2	nd	40.0	3.35	nd	nd	nd	nd	nd
PA12869/11	Silicato (Ca,Sn)	2.90	nd	30.6	1.42	18.7	nd	nd	nd	nd	3.91	42.4
PA12869/12	Wollastonita	nd	nd	51.1	nd	48.9	nd	nd	nd	nd	nd	nd
PA12869/13	Matriz	11.1	1.04	49.5	4.85	9.24	3.76	2.01	11.3	nd	1.50	5.68
PA12869/14	Piroxeno	24.0	1.00	40.6	1.99	8.42	0.70	4.49	15.3	3.51	nd	nd
PA12869/15	Piroxeno	6.68	nd	43.1	1.71	39.4	8.00	nd	1.08	nd	nd	nd
PA12870/01	Casiterita (mineral)	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	98.8
PA12870/09	Matriz	7.48	nd	58.6	5.35	6.11	nd	nd	4.89	nd	nd	17.6
PA12870/10	Matriz	5.66	2.51	47.1	5.28	5.14	nd	nd	1.74	nd	32.6	nd
PA12870/11	Matriz	12.6	5.12	56.9	4.78	8.22	nd	nd	2.52	nd	3.61	5.17
PA12871/03	Matriz	7.80	4.67	59.5	6.18	8.04	0.89	nd	2.22	nd	0.87	9.78

Figura 13. Análisis de fases minerales en las escorias experimentales (SEM-EDAX, % en peso como óxidos).

Nota: nd compuesto no detectado.

⁶ Análisis realizados en la unidad de microscopía del Museo de Ciencias Naturales (CSIC) de Madrid. Microscopio ope-

rado por las microscopistas Laura Tormo y Marta Furió.

minerales sin reaccionar. La matriz fundida es un vidrio silicatado complejo en cuyo seno se ha formado wollastonita y piroxeno. Dado que la ganga no contiene calcio, el piroxeno y la wollastonita formados indican que ha tenido lugar una fuerte reacción entre los silicatos y el calcio de las cenizas de la combustión del carbón. La casiterita idiomorfa es también abundante, frecuentemente exhibiendo núcleo metálico (Fig. 14).

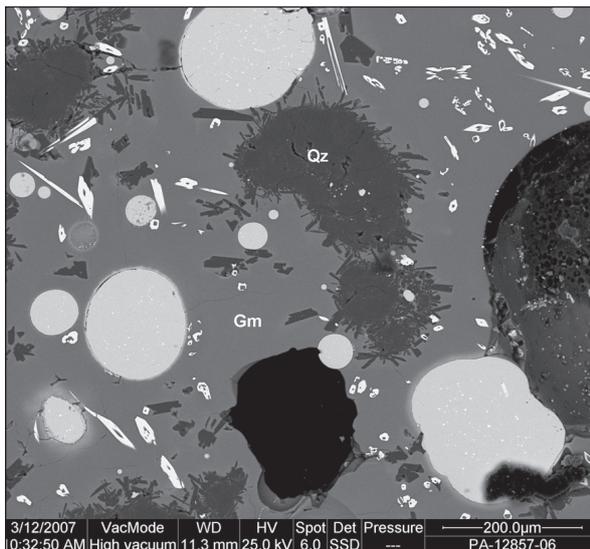


Figura 14. Escoria experimental de co-reducción. Gm matriz silicatada; Qz cuarzo. Numerosos cristales de casiterita idiomorfa nucleada (formas blancas de aguja de brújula) y bolas metálicas (círculos gris claro moteado) se han formado. El cuarzo muestra signos evidentes de disolución en la matriz en forma de tridimita tabular. Imagen obtenida en el SEM, electrones retrodispersados.

En algunas muestras se ha encontrado un silicato de calcio y estaño que parece formarse por reacción entre la casiterita y la wollastonita o, en general, con piroxenos ricos en calcio, ya que siempre la hemos detectado en regiones de la escoria donde abundan estos silicatos. En la figura 15 puede apreciarse cómo algunas masas de este peculiar silicato conservan su núcleo blanco de casiterita. No es de naturaleza cristalina porque hemos intentado su identificación cristalográfica mediante difracción de rayos X sin resultado. El interés particular de este compuesto reside en que ha sido identificado en varias escorias cobre-estaño procedentes de yacimientos arqueológicos españoles de la Edad del Bronce y de la Edad del Hierro (Rovira 2007: 27, 30) y es posible que su presencia sea un indicador del empleo de la técnica de co-reducción.

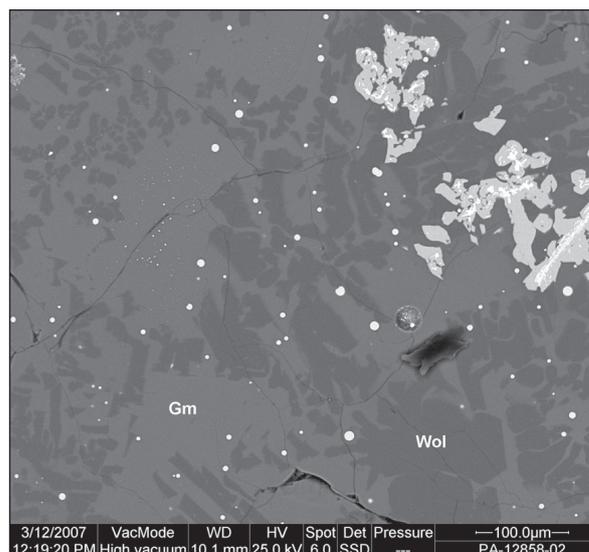


Figura 15. Escoria experimental de co-reducción. Gm matriz silicatada; Wol wollastonita. Obsérvese en el ángulo superior derecho la presencia de masas grises de silicato de calcio y estaño, algunas conservando un núcleo blanco de casiterita. Imagen obtenida en el SEM, electrones retrodispersados. Nota: nd elemento no detectado.

Numerosas inclusiones metálicas en la escoria también han sido analizadas, pudiendo constatar que sus composiciones son enormemente variables (Fig. 16). El acusado polimetalismo de la mena de cobre empleada (véase la Fig. 2) se manifiesta por la presencia de bismuto en casi todas las bolitas. A pesar de que los minerales triturados fueron mezclados cuidadosamente, hay muestras de escoria en las que las inclusiones metálicas no contienen prácticamente estaño. En otras muestras, en cambio, se han medido porcentajes de estaño superiores al 80%. No se ha encontrado ninguna inclusión de estaño puro lo cual podría estar indicando que el cobre que se va formando capta rápidamente el estaño pero, al mismo tiempo, las variables condiciones redox en el sistema hacen que en unas áreas de la escoria se forme la aleación y en otras no. De hecho, y como cabía esperar, la escoria retiene mucho cobre y estaño, bien como mineral, bien como bolitas microscópicas de metal. Los análisis globales de las muestras de escoria casan bien con el balance de pérdidas observado en las escorias calcólicas producidas en vasijas de reducción o en procesos sin escorificación voluntaria (Bourgarit *et al.*, 2003: 437; Hauptmann, 2003: 461).

Muestra	Cu	Sn	As	Bi	Fe	S	O	Si
PA12855/1	94.4	0.91	nd	4.71	nd	nd	nd	nd
PA12855/2	96.2	nd	nd	3.78	nd	nd	nd	nd
PA12856/1	98.5	nd	nd	1.46	nd	nd	nd	nd
PA12856/2	99.8	nd	nd	0.20	nd	nd	nd	nd
PA12856/3	99.4	nd	nd	nd	0.54	nd	nd	nd
PA12856/4	99.3	nd	nd	nd	0.64	nd	nd	nd
PA12856/5	99.5	nd	nd	nd	0.50	nd	nd	nd
PA12856/6	99.9	nd	nd	0.10	nd	nd	nd	nd
PA12857/01	74.8	23.5	nd	0.88	nd	nd	nd	nd
PA12857/02	76.2	22.1	nd	1.68	nd	nd	nd	nd
PA12857/03	17.1	81.3	nd	1.59	nd	nd	nd	nd
PA12857/04	67.0	28.3	2.1	2.57	nd	nd	nd	nd
PA12857/05	99.4	nd	nd	0.60	nd	nd	nd	nd
PA12857/06	99.5	nd	nd	0.49	nd	nd	nd	nd
PA12857/07	99.0	nd	nd	0.98	nd	nd	nd	nd
PA12857/08	89.6	7.37	nd	2.99	nd	nd	nd	nd
PA12857/09	79.0	nd	nd	nd	nd	21.0	nd	nd
PA12857/10	82.5	14.0	nd	3.47	nd	nd	nd	nd
PA12857/11	79.8	nd	nd	nd	nd	20.2	nd	nd
PA12858/1	99.8	nd	nd	0.19	nd	nd	nd	nd
PA12858/2	98.0	nd	nd	1.96	nd	nd	nd	nd
PA12858/3	97.5	1.20	nd	1.30	nd	nd	nd	nd
PA12858/4	97.6	nd	nd	1.48	nd	nd	nd	0.94
PA12858/5	99.2	nd	nd	0.76	nd	nd	nd	nd
PA12858/9	99.4	0.16	nd	nd	0.39	nd	nd	nd
PA12869/01	93.0	nd	nd	nd	nd	nd	5.75	1.25
PA12869/02	93.3	nd	nd	nd	nd	nd	5.63	1.04
PA12869/03	91.3	nd	nd	2.23	nd	nd	5.73	0.76
PA12869/04	94.2	nd	nd	0.55	nd	nd	4.47	0.77
PA12869/05	94.8	nd	nd	0.96	nd	nd	4.21	nd
PA12869/06	93.5	nd	nd	2.69	nd	nd	3.81	nd
PA12870/02	92.5	6.41	nd	nd	nd	nd	nd	1.08
PA12870/04	92.0	1.88	nd	6.11	nd	nd	nd	nd
PA12870/05	92.0	4.08	nd	2.38	nd	nd	nd	1.52
PA12870/06	95.2	3.54	nd	nd	nd	nd	nd	1.26
PA12870/07	91.4	1.44	nd	5.86	nd	nd	nd	1.31
PA12870/08	92.0	0.80	nd	5.65	nd	nd	nd	1.57
PA12871/01	90.6	7.99	nd	1.39	nd	nd	nd	nd
PA12871/02	88.9	8.24	nd	2.82	nd	nd	nd	nd
PA12871/04	84.6	9.90	nd	4.28	nd	nd	nd	0.37
PA12871/05	83.7	10.1	nd	5.14	nd	nd	nd	1.12
PA12871/06	83.8	12.7	nd	3.55	nd	nd	nd	nd
PA12871/07	95.4	2.89	nd	1.66	nd	nd	nd	nd
PA12871/08	85.0	11.3	nd	2.54	nd	nd	nd	1.23
PA12871/09	85.1	14.9	nd	0.01	nd	nd	nd	nd
PA12871/10	80.6	14.7	nd	4.74	nd	nd	nd	nd

Figura 16. Análisis de inclusiones metálicas en las escorias de co-reducción experimentales (microsonda SEM, % en peso como elementos).

El último capítulo del experimento ha consistido en la obtención de un pequeño lingote fundiendo 69 g de bolitas de metal en un pequeño crisol de fondo plano. El lingote obtenido pesa 53,88 g, quedando 9,08g de metal disperso entre el carbón del crisol. En total, después de la operación

teníamos 62,96g de metal, lo cual supone una pérdida de 5,97g, es decir, del 8,65%. En el crisol no se formó escoria, por lo que cabe deducir que la diferencia en peso se debe a su vaporización y pérdida en los humos o a salpicaduras fuera del crisol. La composición del lingote es: 0,61% Fe; 79,4% Cu; 0,70% As; 0,081% Ag; 15,7% Sn; 0,001% Sb; 0,69% Pb y 2.81% Bi. Esta composición refleja fielmente el polimetalismo de la mena de cobre utilizada. El lingote, una vez limpio, mostraba su superficie de color plateado debido a un fenómeno de segregación inversa del estaño, fenómeno que también se aprecia en algunas piezas arqueológicas y que ha sido estudiando, entre otros, por Meeks (1993).

La composición teórica del bronce, si el mineral se hubiera reducido completamente a metal, hubiera sido de algo más de 30% de estaño. En cambio el lingote sólo contiene el 15,7 %. Eso significa que una parte importante se ha perdido, retenida por la escoria en sus distintas fases (matriz, casiterita no reducida y otros compuestos). En esto también coincide el experimento con la realidad arqueológica, pues en general las escorias estudiadas retienen mucho estaño (Rovira, 2007).

6. EXPERIMENTO DE LA CEMENTACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE BRONCE

La segunda opción que tenía el metalúrgico prehistórico para producir bronce sin recurrir al estaño metálico era la cementación de cobre con casiterita. En teoría, si calentamos un crisol conteniendo cobre y casiterita hasta las condiciones de reducción del óxido, el estaño se ligará al cobre formando una aleación cobre-estaño. Si la temperatura es suficiente para licuar el cobre (>1.083° C) habrá una mezcla de ambos líquidos, ya que el estaño funde a una temperatura mucho más baja y la solubilidad mutua en el caldo es perfecta. Si el cobre está en estado sólido también hay posibilidad de aleación porque el cobre tiene la propiedad de adsorber estaño, aunque en este caso, presumiblemente, la cementación afectaría a la superficie del cobre hasta una cierta profundidad que es función del tiempo y la temperatura. Como la cementación es un fenómeno superficial, cuanto mayor sea la superficie de contacto cobre-estaño, mejor es el pronóstico de conseguir bronce. Dicho de otro modo, el cobre debe estar desmenuzado en pequeñas porciones para que haya una cementación más eficaz. Hasta aquí lo que dice la teoría.

El experimento se efectuó en la instalación descrita anteriormente, utilizando un crisol fabricado con tierra del suelo del entorno que contenía 300 g de cobre electrolítico de cable eléctrico y 30 g de casiterita. Como la casiterita contiene 78,6% de estaño, la aleación teórica sería un bronce con 7,86% de estaño. El cable eléctrico se cortó en pequeñas porciones y se mezcló con la casiterita machacada.

El crisol con el material a cementar se situó sobre las brasas cuando la cubeta con carbón alcanzó una temperatura de unos 900° C, procurando que estuviera rodeado y cubierto en todo momento por las brasas, colocándolo de modo que el flujo de las toberas produjera el máximo efecto en su interior. A lo largo de la operación la temperatura osciló entre 1.000 y más de 1.200° C. Transcurridos unos 40 minutos desde que se introdujo el crisol, cuando el metal llevaba en estado líquido unos 10 minutos, se

detuvo el proceso, dejando enfriar lentamente el sistema.

El resultado final fue un lingote de forma irregular solidificado en el fondo del crisol (Fig. 17). A su alrededor se había formado un poco de escoria y el borde del crisol mostraba evidentes signos de vidriado, con numerosas burbujas (*bloating*). Al separar el lingote pudimos observar que su parte inferior apoyaba sobre una cierta cantidad de casiterita sin reaccionar.

La escoria en realidad no es tal: su composición y estructura corresponde a una excrecencia del crisol provocada por deformación térmica o a un terrón caído al interior del crisol. Su núcleo es de naturaleza cerámica, y se ha formado en superficie una fina capa de escorificación constituida por una matriz silicatada de composición variable que en unas zonas es un vidrio con cobre y estaño y en otras un vidrio rico en estaño (Fig. 18 y 19).



Figura 17. Lingote experimental de bronce obtenido por cementación, en el interior del crisol.

Muestra	Fase	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	CaO	MnO	FeO	CuO	SnO ₂
EXUAM0509-1/01	Matriz	0,85	11,1	69,0	nd	0,57	1,41	2,87	0,26	9,31	4,62	nd
EXUAM0509-1/05	Núcleo cerámico	nd	9,95	84,3	nd	0,98	1,00	nd	nd	3,47	0,26	nd
EXUAM0509-1/06	Matriz	1,56	4,74	60,1	0,59	5,94	0,73	18,5	0,43	3,23	1,64	2,55
EXUAM0509-1/12	Matriz	0,62	4,00	54,8	nd	1,18	0,61	3,01	nd	2,57	nd	33,2

Figura 18. Análisis de la matriz fundida en una escoria experimental de cementación (SEM-EDAX, % en peso como óxidos). Nota: nd compuesto no detectado.

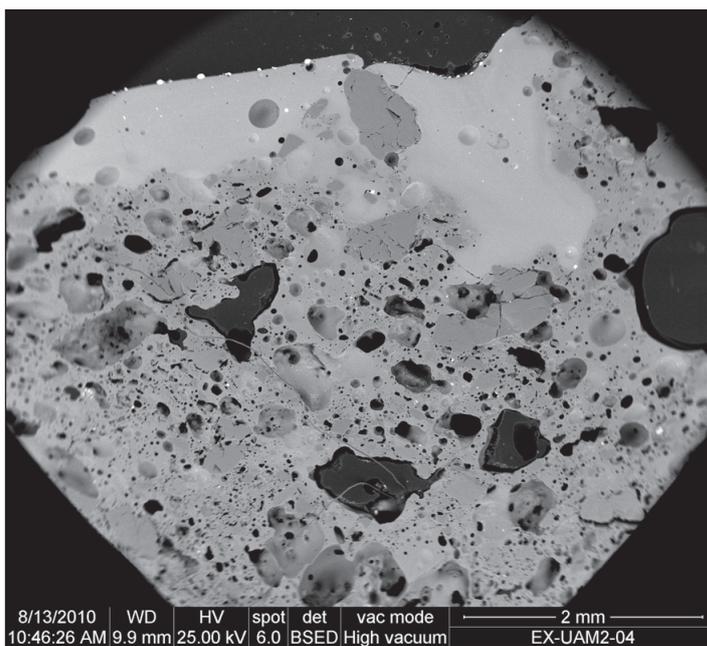


Figura 19. Macroestructura de una escoria experimental de cementación. Obsérvese la formación de una capa de vidriado en la parte superficial del núcleo cerámico. Los puntos blancos son inclusiones metálicas. Imagen obtenida en el SEM, electrones retrodispersados.

También se ha analizado un fragmento de la pared del crisol con gruesa escorificación. La escoria esta compuesta por una matriz vítrea en la que se dispersan abundante casiterita y masas de metal (Fig. 20). En unos casos son bolitas de cobre; en otros, masas nodulares de bronce, de composición variable (Fig. 21).

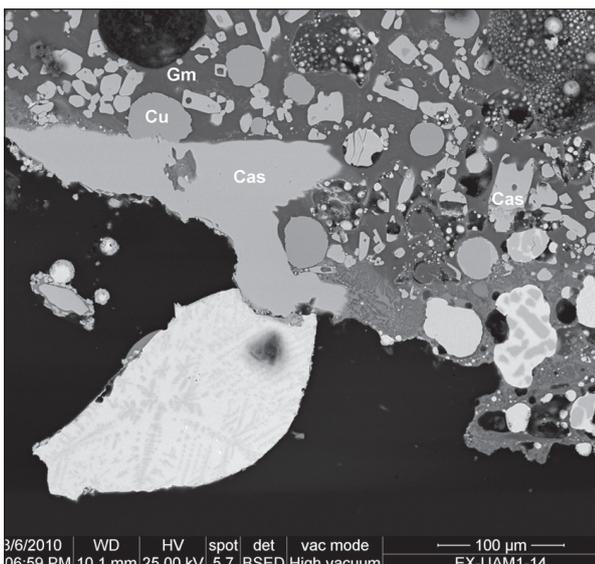


Figura 20. Fases minerales presentes en la escorificación del crisol del experimento de cementación. Gm matriz vítrea; Cas casiterita; Cu cobre. Las masas blancuecinas moteadas son bronce. Imagen obtenida en el SEM, electrones retrodispersados.

ANALISIS	O	Fe	Cu	Sn
EXUAM0509-2/06	21,1	0,37	43,2	34,4
EXUAM0509-2/07	nd	0,20	88,6	11,2
EXUAM0509-2/08	nd	nd	64,8	35,2
EXUAM0509-2/10	nd	1,84	55,3	42,9
EXUAM0509-2/11	nd	93,9	3,02	2,07
EXUAM0509-2/12	5,75	6,58	50,7	37,0
EXUAM0509-2/13	nd	0,44	26,9	59,0
EXUAM0509-2/15	nd	nd	90,2	9,83

Figura 21. Análisis de algunas inclusiones metálicas ricas en estaño de la escorificación del crisol usado en el experimento de cementación (SEM-EDAX, % en peso del elemento). Nota: nd elemento no detectado.

El lingote muestra un microestructura curiosa. La cara superior es bronce pobre de textura homogénea y una composición de estaño de 3,11%. En cambio la parte inferior solidificada en contacto con la casiterita sin reducir contiene más estaño (11,8%), pero es estaño que no forma parte de la aleación; se encuentra casi todo en forma de agujas euedrales de casiterita con núcleo metálico (Fig. 22). En realidad, la matriz metálica en la que se encuentra dispersa la casiterita sólo contiene un 4,26% de estaño.

Como es sabido, la formación de agujas de casiterita nucleada se debe a un ambiente en exceso oxidante en la fundición (Dungworth, 2000). El mecanismo consiste en que el estaño se oxida formando agujas. Cuando hay cobre en el entor-

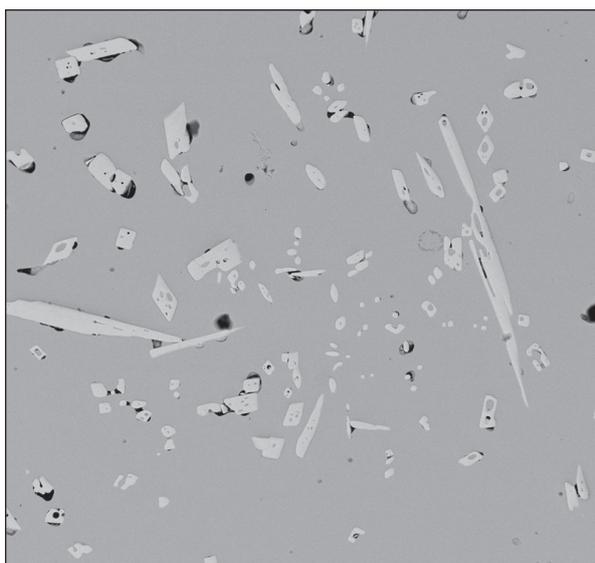


Figura 22. Parte inferior del lingote experimental. Obsérvese la abundancia de casiterita eudral nucleada. Imagen obtenida en el SEM, electrones retrodispersados.

no, el estaño actúa como desoxidante protector del cobre, envolviendo algunos granos mientras se oxida, de ahí la casiterita nucleada.

En un fuego abierto como el utilizado en el experimento, la reducción se consigue a expensas de disponer de una cobertura de carbón suficiente envolviendo el núcleo del reactor. Si el ambiente no es suficientemente reductor o no lo es durante el tiempo necesario para que se completen las reacciones química, parte de la casiterita no se reducirá (recordemos que el crisol tenía casiterita sin reducir en el fondo) y parte del estaño producido se re-oxidará. Eso es lo que sucedió en este caso.

El corolario es que el resultado, aun siendo positivo, hubiera mejorado si en la fase final de la cementación se hubiera removido el caldo de

cuando en cuando para evitar el depósito de casiterita en el fondo del crisol, manteniendo una mejor cobertura de carbón. Hubiera sido necesario prolongar el proceso durante más tiempo.

7. A MANERA DE REMATE

La vía experimental es un camino que no tiene fin. Conforme se avanza aparecen nuevos retos, nuevas incógnitas, nuevas posibilidades de mejora. En este caso, las sesiones experimentales sirvieron para mejorar nuestra tarea docente e investigadora, ayudando a encontrar posibles respuestas a algunas hipótesis sobre tecnología metalúrgica prehistórica que se venían planteando desde presupuestos teóricos. Pero esa vertiente, aun siendo importante, no es la única: la vertiente docente debía compartir espacio y tiempo con ella para que el alumnado, participando, asimilara mejor los conceptos de la tecnología del metal en la Prehistoria. Parafraseando el título de un excelente artículo de una joven investigadora, la teoría sin su refrendo práctico es algo vacío y, al contrario, la experimentación sin una teoría que la encauce es actuar a ciegas (Jackson, 2009).

Agradecimientos: A todos mis alumnos/as que, desde 2005 a 2009 asistieron a mis clases de la asignatura Tecnología y a otros muchos que se incorporaban voluntariamente a las sesiones experimentales y a no pocas teóricas (Fig. 23). Gracias por su entusiasmo en el trabajo práctico y por su paciencia en el aula cuando insistentemente les obligaba a refrescar conocimientos casi olvidados de Física y de Química para que entendieran mejor la Arqueometalurgia. Pienso que todos acabaron comprendiendo que la separación entre Ciencias Experimentales y Ciencias Humanas no es tan neta como se suele creer.



Figura 23. Grupo de alumnos/as del curso 2008-2009 que realizaron el experimento de cementación referido en el texto.

BIBLIOGRAFIA

- BOURGARIT, D., MILLE, B., PRANGE, M., AMBERT, P. y HAUPTMANN, A. (2003): "Chalcolithic falhore smelting at Cabrières: reconstruction of smelting processes by archaeometallurgical finds", *Archaeometallurgy in Europe, 14-26 September 2003, Milan, Proceedings, Vol. 1*, Milan, 431-440.
- BROTHWELL, D. y HIGGS, E. (Comp.) (1980): *Ciencia en Arqueología*, Madrid.
- CHANG, K.C. (1976): *Nuevas perspectivas en arqueología*, Madrid.
- CLARKE, D.L. (1978): *Analytical Archaeology*, London.
- DOBRES, M.-A. (2000): *Technology and Social Agency*, Oxford.
- DUNGWORTH, D. (2000): "Serendipity in the foundry? Tin oxide inclusions in copper and copper alloys as an indicator of production process", *Bulletin of the Metals Museum (Japan)*, 32, 1-5.
- FREESTONE, I.C. (1989): "Refractory materials and their procurement", A. Hauptmann, E. Pernicka y G.A. Wagner (eds.), *Old World Archaeometallurgy. Proceedings of the International Symposium*, Heidelberg, 156-162.
- GUTIÉRREZ SÁEZ, C., LÓPEZ DEL ESTAL, A., SIMÓN, A., MUÑOZ, P., BASHORE, Ch., MARTÍN LERMA, I., CHAMÓN, J., SANZ, E., PARDO, A.I. y MARÍN, J.A. (2010): "Puntas de Palmela: procesos tecnológicos y experimentación", *Trabajos de Prehistoria*, 67 (2), 405-418.
- GUTIÉRREZ SÁEZ, C. y SORIANO, I. (2008): "La funcionalidad sobre material metálico. Bases y aplicaciones de estudio", S. Rovira, M. García Heras, M. Gener e I. Montero (eds.), *Actas del VII Congreso Ibérico de Arqueometría*, Madrid, 432-447.
- HAUPTMANN, A. (2003): "Rationales of liquefaction and metal separation in earliest copper smelting: Basics for reconstructing Chalcolithic and Early Bronze Age smelting processes", *Archaeometallurgy in Europe, 24-26 September 2003, Milan, Italy, Proceedings, Vol. 1*, Milán, 459-468.
- HAUPTMANN, A. (2007): *The Archaeometallurgy of Copper*, Berlín.
- HAUPTMANN, A., BACHMANN, H.G. y MADDIN, R. (1996): "Chalcolithic copper smelting: new evidence from excavations at Feinan, Jordan", *Archaeometry 1994, Ankara. The Proceedings of the 29th International Symposium on Archaeometry, Ankara, 9-14 May 1994*, Ankara, 3-10.
- JACKSON, C. (2009): "Experimental Archaeology and education: Theory without practice is empty; practice without theory is blind", T.L. Kienlin y B.W. Roberts (eds.), *Metals and Societies, Studies in Honour of Barbara S. Ottaway*, Bonn, 400-406.
- MEEKS, N. (1993): "Surface characterization of tinned bronze, high-tin bronze, tinned iron and arsenical bronze", S. La Niece y P.T. Craddock (eds.), *Metal Plating and Patination. Cultural, technical and historical developments*, Oxford: 247-275.
- MERIDETH, C. (1998): *An Archaeometallurgical Survey for Ancient Tin Mines and Smelting Sites in Spain and Portugal*, Oxford.
- ROVIRA HORTALÀ, M.C., ROVIRA, S., MONTERO, I. y PERNICKA, E. (2009): "Anexe 7. Caracterització analítica dels materials metàl·lics", X. Nieto y M. Santos, *El vaixell grec arcaic de Cala Sant Vicenç*, Barcelona, 403-411.
- ROVIRA, S. (1999): "Una propuesta metodológica para el estudio de la metalurgia prehistórica: El caso de Gorny en la región de Kargaly (Orenburg, Rusia)", *Trabajos de Prehistoria*, 56 (2), 85-113.
- ROVIRA, S. (2002a): "Early slags and smelting by-products of copper metallurgy in Spain", M. Bartelheim, E. Pernicka y R. Krause (eds.), *Die Anfänge der Metallurgie in der Alten Welt/The Beginnings of Metallurgy in the Old World*, Rahden/Westf., 83-98.
- ROVIRA, S. (2002b): "Metallurgy and society in Prehistoric Spain", B.S. Ottaway y E.C. Wager (eds.), *Metals and Society, Papers from a Session Held at the European Association of Archaeologists Sixth Annual Meeting in Lisbon 2000*, Oxford, 5-20.
- ROVIRA, S. (2003): "Resultados de un primer experimento de fundición de minerales de cobre en el Arqueódromo de Borgoña", J. Fernández Manzano y J.I. Herrán (eds.), *Mineros y fundidores en el inicio de la Edad de los Metales, El Midi francés y el Norte de la Península Ibérica*, León: 75-81.
- ROVIRA, S. (2004): "Tecnología metalúrgica y cambio cultural en la Prehistoria de la Península Ibérica", *Norba. Revista de Historia*, 17, 9-40.

- ROVIRA, S. (2007): "La producción de bronce en la Prehistoria", J. Molera, J. Farjas, P. Roura y T. Pradell (eds.), *Avances en Arqueometría 2005, Actas del VI Congreso Ibérico de Arqueometría*, Girona, 21-31.
- ROVIRA, S. (2007-2008): "El bronce de la Edad del Hierro. Algunos aspectos de su tecnología y sus antecedentes", *Boletín de la Asociación Española de Amigos de la Arqueología, Homenaje al Dr. Michael Blech*, 45, 35-49.
- ROVIRA, S. y AMBERT, P. (2002): "Vasijas cerámicas para reducir minerales de cobre en la Península Ibérica y en la Francia meridional", *Trabajos de Prehistoria*, 59 (1), 89-105.
- ROVIRA, S. y MONTERO, I. (1994): "La metalurgia", M.C. Blasco (ed.), *El horizonte campaniforme de la región de Madrid en el centenario de Ciempozuelos*, Madrid, 137-172.
- ROVIRA, S., MONTERO, I. y RENZI, M. (2009): "Experimental co-smelting to copper-tin alloys", T.L. Kienlin y B.W. Roberts (eds.), *Metals and Societies, Studies in Honour of Barbara S. Ottaway*, Bonn, 407-414.
- ROVIRA, S. y RENZI, M. (2010): "Las operaciones pirometalúrgicas y sus subproductos", I. Montero Ruiz (coord.), *Manual de Arqueometalurgia*, Madrid, 87-122.
- TYLECOTE, R.F. y MERKEL, J. (1985): "Experimental smelting technique: achievements and future", P.T. Craddock y M.J. Hughes (eds.), *Furnaces and Smelting Technology in Antiquity*, London, 3-20.
- WATSON, P.J., LE BLANC, S.A. y REDMAN, Ch.L. (1974): *El método científico en arqueología*, Madrid.