

METALURGIA DE CRISOL: LA OBTENCIÓN DE COBRE EN LA PREHISTORIA DE LA PENÍNSULA IBÉRICA

Salvador Rovira

Museo Arqueológico Nacional
Serrano, 13. E-28001 Madrid

RESUMEN

El hallazgo de numerosos fragmentos de vasijas de cerámica de medio y gran tamaño mostrando por su cara interna formaciones de escoria relacionadas con la metalurgia del cobre ha dado lugar a una serie de estudios como consecuencia de los cuales se ha podido establecer que tales vasijas son los contenedores usados para reducir, con la ayuda de carbón vegetal como combustible, los minerales de cobre y obtener el metal. Se describe esa peculiar tecnología de fundición que no requiere de verdaderos hornos, y que en la Península Ibérica fue utilizada desde los inicios de la metalurgia hasta la Edad del Hierro.

PALABRAS CLAVE: Calcolítico, Edad del Bronce, escorias, metalurgia del cobre, vasijas de reducción.

ABSTRACT

The finds of numerous fragments of medium and large size ceramic crucibles exhibiting slag formation in the inner side related to copper metallurgy were the starting point for a research, the consequence of which has been to establish that such crucibles were used to smelt copper ore to get the metal with the help of charcoal as fuel. This peculiar smelting technology, which does not need true furnaces, is described pointing out that it was in use in the Iberian Peninsula from early Chalcolithic time up to the Iron Age.

KEY WORDS: Bronze Age, Chalcolithic, copper metallurgy, slags, smelting crucibles.

INTRODUCCIÓN

No es una casualidad que fuera el cobre el primer metal de interés "industrial" para los artesanos prehistóricos. A su disponibilidad en estado nativo en todas las regiones en las que se han encontrado manifestaciones de su temprano empleo hay que sumar las cualidades físicas de ser un metal dúctil, maleable y relativamente blando, es decir, que se podía trabajar y darle forma con unos medios técnicos nada complejos: bastarían un simple yunque o durmiente de piedra y unos percutores también de material lítico, instrumentos ambos a los que estaba muy habituado el artífice neolítico, hábil tallador de la piedra.

Entre las primeras manifestaciones del empleo de cobre nativo en la fabricación de objetos de adorno personal tales como cuentecillas de collar, colgantes y anillos, y de algunos instrumentos como punzones y anzuelos, en localidades del Oriente Próximo como Tell Halula (Siria) y Çayönü Tepesi (Turquía), corriendo el VIII

milenio AC, en pleno Neolítico precerámico, y las primeras evidencias de la práctica de una verdadera metalurgia proporcionadas por los hallazgos de escorias resultantes de la obtención de cobre en el VI-V milenio AC en la misma región median cientos de años de experimentación que culminaron con el descubrimiento y aplicación de las reacciones químicas de reducción de los carbonatos y óxidos de cobre para extraer el metal. También en este punto la madre Naturaleza se mostró una gran aliada del metalúrgico pues, como es sabido, de todos los metales de interés que se obtienen por reducción de sus óxidos el cobre es el que requiere la energía libre de formación más baja, según expresa el diagrama de Ellingham. No es, pues, una casualidad que fuera el cobre el metal que diera origen a la verdadera metalurgia.

Durante muchos años se tuvo la creencia de que la metalurgia implicaba ya una tecnología compleja en la que el horno de reducción, entendiéndose por tal una cavidad más o menos cerrada de ambiente controlable,

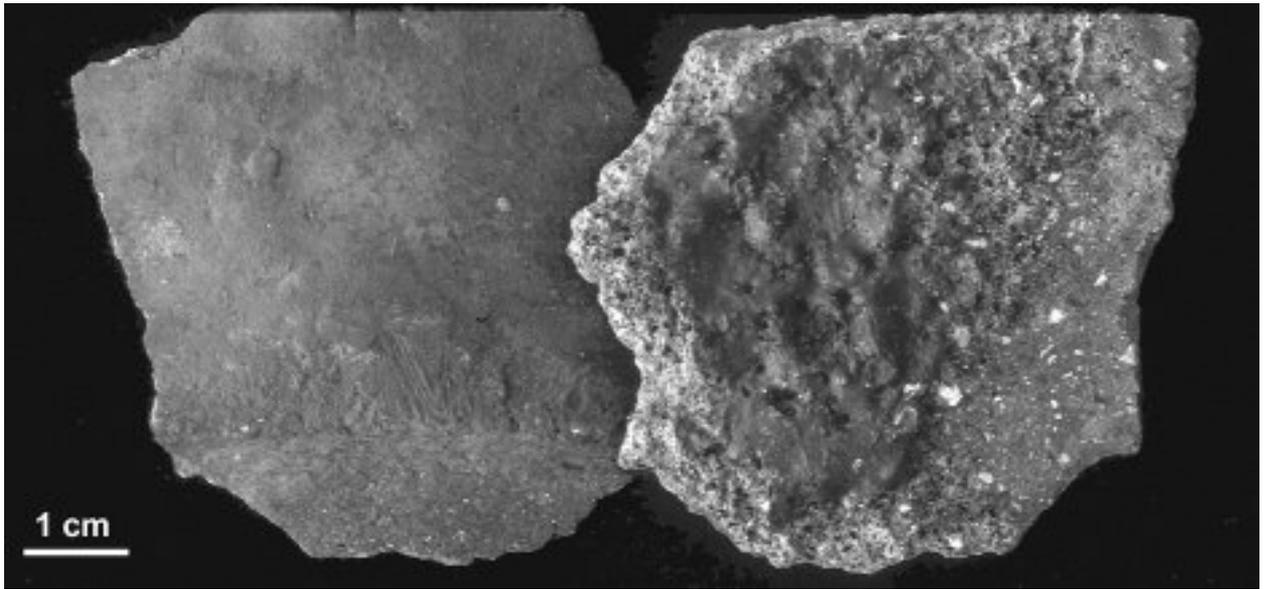


Figura 1. Fragmento de vasija de reducción calcólica vista por la cara externa (izquierda) e interna (derecha).

era la pieza clave. Sin embargo numerosos descubrimientos de los últimos años referidos a las primeras etapas metalúrgicas calcólicas tempranas están modificando sustancialmente esa visión de la metalurgia del cobre y es de justicia decir que las investigaciones realizadas en España a través de las distintas fases del Proyecto de Arqueometalurgia de la Península Ibérica, iniciado en 1982, han influido decisivamente en ese cambio de posiciones, al menos por lo que se refiere a los primeros pasos de la industria del metal.

LAS PRIMERAS EVIDENCIAS DE FUNDICIÓN DE MINERALES DE COBRE

Durante muchos años se dedicó un gran esfuerzo investigador a la identificación de restos de posibles hornos de fundición asociados a contextos arqueológicos calcólicos de la Península Ibérica, datables en el III milenio AC, con resultados infructuosos. En yacimientos que habían proporcionado una buena colección de material que evidenciaba prácticas metalúrgicas como por ejemplo Almizaraque (Cuevas del Almanzora, Almería) no se había encontrado ninguna estructura de fuego asimilable a un horno. En cambio abundaban los fragmentos de vasijas cerámicas de tamaño mediano y grande con la peculiaridad de poseer una gruesa capa de material escoriáceo adherido a su cara interna mientras que la externa no mostraba signos perceptibles de afectación térmica (Figura 1). Tras efectuar unas primeras analíticas de las escorificaciones y comprobar que en ellas se encontraban los mismos elementos que en los fragmentos de mineral de cobre hallados en el propio

yacimiento comenzó a tomar cuerpo la idea de que tales vasijas no eran crisoles para la fundición de metal sino los recipientes en los que tenía lugar la reducción propiamente dicha (Delibes *et al.* 1991). Estudios posteriores han ido confirmando esta hipótesis (Rovira y Ambert 2002; Rovira 2002).

Al mismo tiempo que se iba configurando esta nueva visión de una metalurgia sin verdaderos hornos se registraba otro hecho sorprendente: la cantidad de escorias de cobre encontradas era realmente exigua en yacimientos con una actividad metalúrgica continuada a lo largo de más de 500 años, algo ciertamente desconcertante pues se daba por supuesto que las fundiciones de mineral debían dejar como subproducto un volumen notable de escoria. Ante esta situación que parecía general en todas partes, Craddock y Meeks (1987) habían propuesto como explicación plausible la reducción

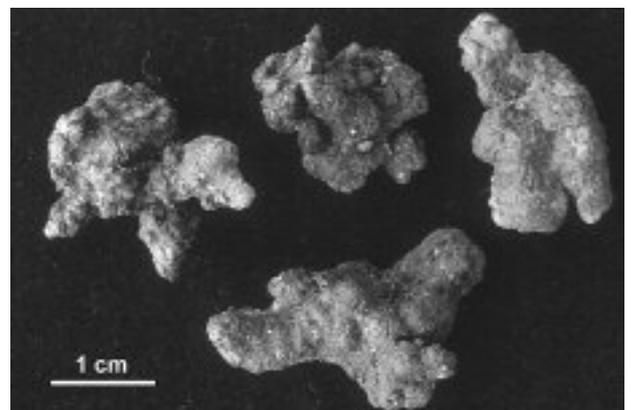


Figura 2. Agregados de mineral de cobre parcialmente reducido.

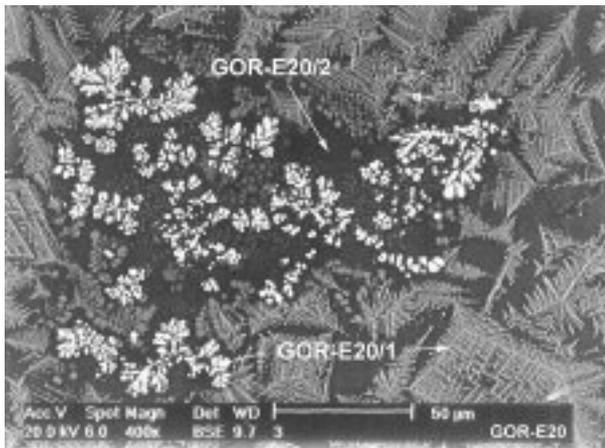


Figura 3. Cuprita dendrítica en un nódulo de mineral de cobre parcialmente reducido. Imagen obtenida en el microscopio electrónico de barrido con electrones retrodispersados.

MINERALES USADOS POR LOS FUNDIDORES CALCOLÍTICOS

Se han analizado muchas muestras de minerales de cobre hallados en yacimientos del III milenio AC pero el método analítico empleado, si bien proporcionó buena información sobre la composición en elementos pesados, no permitía una buena identificación de la ganga y de la riqueza en cobre (Rovira *et al.* 1997). A pesar de ello, el aspecto de los minerales y su densidad aparente hacían suponer que se trataba de menas oxídicas con poca ganga y, lo más sorprendente, caracterizadas generalmente por un acusado polimetallismo. Junto al cobre, siempre el elemento principal, se detectaban a menudo cantidades importantes de arsénico, antimonio, hierro y otros elementos cuantitativamente menos importantes.

directa de minerales de cobre con poca ganga según un proceso que no implicaba la formación de escoria. En los apartados siguientes trataremos de ir mostrando los avances de la investigación.

Con el fin de confirmar el predominio del aprovechamiento de minerales oxídicos se analizaron por difracción de rayos X algunas muestras tomadas de yacimientos arqueológicos o de minas de cobre situadas en las proximidades de yacimientos cuya explotación en tiem-

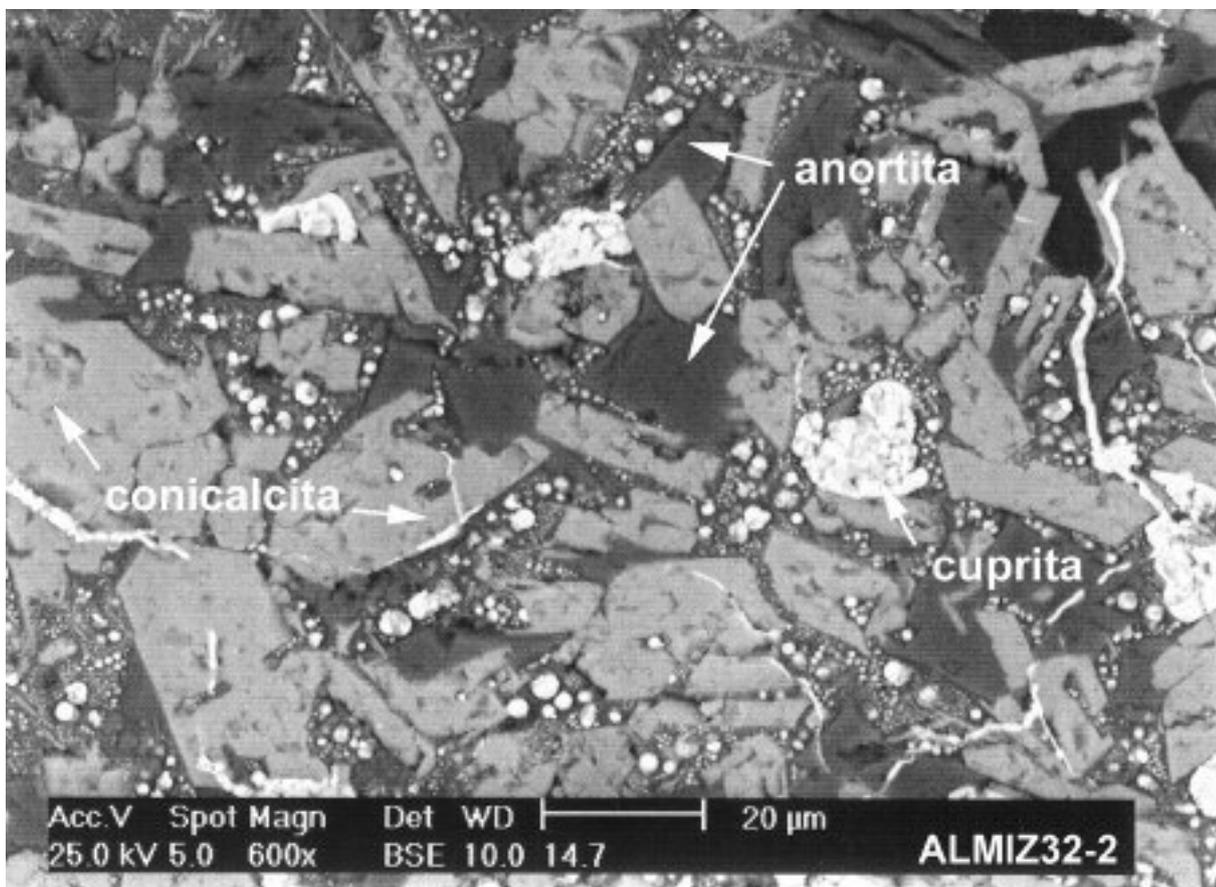


Figura 4. Estructura compleja de una escoria calcolítica. Imagen obtenida en el microscopio electrónico de barrido con electrones retrodispersados.

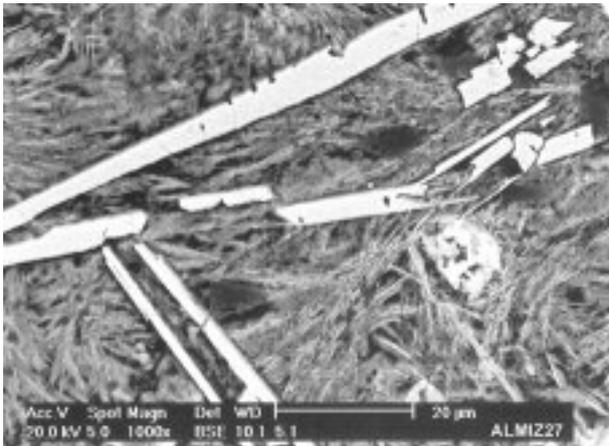


Figura 5. Agujas de delafosita en una matriz piroxénica en una escoria calcólica. Imagen obtenida en el microscopio electrónico de barrido con electrones retrodispersados.

pos prehistóricos no es improbable, aunque la minería moderna hubiera borrado las débiles trazas de posibles trabajos antiguos. La Tabla 1 ofrece algunos resultados que ponen en evidencia la complejidad de los minerales

y subraya la presencia de algunos compuestos como la olivenita y la clinoclasa de enorme importancia para interpretar la producción de cobres arsenicales en la Prehistoria.

Otra serie de muestras fueron analizadas en el microscopio electrónico de barrido (MEB) para así aproximarnos más a una valoración cuantitativa de la ganga. Como muestra la Tabla 2, el porcentaje acompañante de rocas silíceas o de calizas de la caja es, en general, pequeño pero la presencia de compuestos de hierro en algunos minerales es importante. Otras muestras, efectivamente, son minerales de elevada pureza. De la reducción directa de estos últimos cabría esperar poca escoria residual, pero los otros debieron dejar una cantidad de residuos apreciable que no ha sido localizada.

Es habitual encontrar en los lugares en los que se practicó la metalurgia extractiva unos curiosos fragmentos de mineral de superficies redondeadas, signo evidente de haber estado sometidos a los efectos de las altas temperaturas de un horno (Figura 2). Aunque exteriormente ofrecen el aspecto de la malaquita, al corte fresco aparece un material rojizo, cuprita. Con frecuencia se aprecian al microscopio reacciones más complejas, dependiendo de la composición inicial. A veces la cuprita

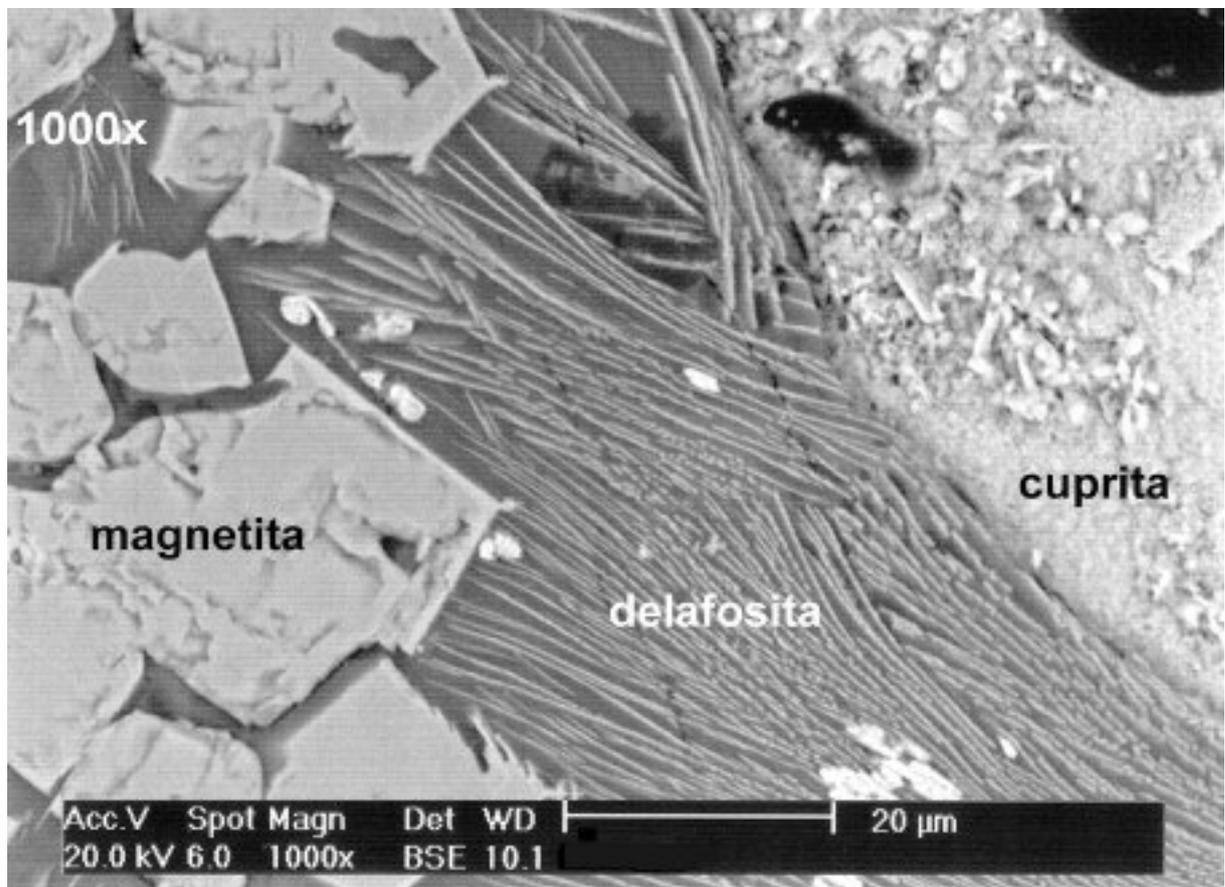


Figura 6. Magnetita y delafosita en una escoria calcólica. Imagen obtenida en el microscopio electrónico de barrido con electrones retrodispersados.

presenta estructura dendrítica indicando que se han alcanzado temperaturas en torno a los 1.200° C y con frecuencia hay formaciones globulares microscópicas de cobre (Figura 3). Esta última circunstancia dificulta a menudo su clasificación como mineral o como escoria.

LAS ESCORIAS

Los estudios analíticos de estas escorias son recientes, de los últimos diez o quince años. Con anterioridad se prestaba poca atención por parte de los arqueometalúrgicos a estos residuos tan poco parecidos a las verdaderas escorias estudiadas en los manuales de metalurgia. De hecho, en un libro de enorme influencia en la especialidad como el de Bachmann (1982) no fueron recogidas salvo con vagas referencias.

Los análisis sistemáticos en el laboratorio nos permiten conocer ya con precisión las condiciones de trabajo en las que tiene lugar la reducción del mineral (Rovira 2002; Sáez *et al.* 2003). La composición mineralógica y la disposición de sus fases en estas escorias son muy heterogéneas. En realidad tienen poco que ver con las típicas escorias fayalíticas producidas en los procesos intencionados de escorificación mediante la adición de fundentes para facilitar la separación y mejorar el rendimiento en metal de la reducción. Suelen ser escorias ricas en sílice en las que no siempre todos los materiales han llegado a fundir. En los fundidos predominan componentes tales como piroxeno, akermanita, anortita, melilita, monticellita y otros silicatos complejos. Se forman por reacción a alta temperatura entre los componentes de la ganga, de las cenizas y de los compuestos silicatados del entorno. Raramente se forma fayalita. La figura 4 muestra un ejemplo de la estructura compleja de estas escorias.

Debido a que son silicatos de alto punto de fusión, constituyen una escoria muy viscosa que impide o dificulta la separación de las gotas de cobre que se van formando en su seno. Como, además, suelen retener bastante mineral sin reducir (véase la Figura 4), es muy probable que fueran molidas por los antiguos metalúrgicos para separarles el metal y reaprovecharan el polvo resultante para añadirlo a mineral fresco en una nueva fundición. Esta parece ser la forma de aprovechamiento de las escorias calcolíticas, lo que contribuiría a mermar la cantidad global de escoria remanente a lo largo del tiempo pero, a su vez, como contiene silicatos, ocasionaría la formación de más escoria en las fundiciones sucesivas aunque en las nuevas cargas predominase el mineral puro. Las evidencias arqueológicas apuntan hacia una cadena operativa de ese tipo.

Un compuesto hallado frecuentemente en estas escorias primitivas cuando hay hierro en la ganga es la delafosita, un óxido de hierro y cobre que se identifica fácil-

mente al microscopio por su morfología en placas o agujas (Figura 5). La delafosita tiene un ambiente de formación muy concreto: necesita una atmósfera oxidante para transformar el hierro divalente en trivalente a una temperatura del orden de 1.100° C. Ello nos da dos pistas importantes: que la temperatura en el hogar superaba en bastantes momentos los 1.100° y que la atmósfera no era estrictamente reductora siempre. Un ambiente con estas características es el propio de una estructura de fuego abierta como la vasija de reducción, con aporte de oxígeno en exceso (ventilación forzada). Los trabajos experimentales demuestran que, cuando se



Figura 7. Vasija de reducción de La Ceñuela (Murcia), reconstruida a partir de varios fragmentos significativos. El diámetro máximo es de unos 45 cm. Se encuentra expuesta en el Museo Arqueológico Nacional.

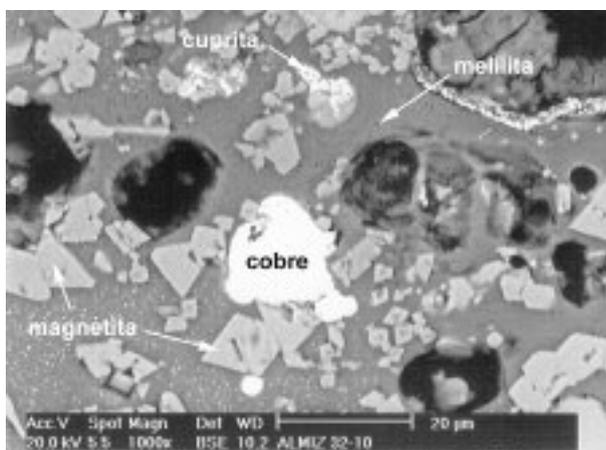


Figura 8. Escorificación en una vasija de reducción calcolítica. Imagen obtenida en el microscopio electrónico de barrido con electrones retrodispersados.



Figura 9. Experimento de fundición de malaquita encajada en arenisca, en el coto minero prehistórico de Kargaly (Orenburg, Rusia). La cubeta utilizada tiene 20 cm de diámetro y 15 cm de profundidad.

está inyectando aire al sistema, la temperatura supera incluso los 1.200° (color blanco amarillento en las brasas), descendiendo rápidamente hasta los 800° (color rojo) cuando cesa el chorro de aire. Este efecto pulsante lo produce el accionamiento del fuelle: eleva la temperatura mientras expulsa el aire y la hace caer de modo drástico mientras se llena. En la primera fase el ambiente es netamente oxidante y se puede formar delafosita y en la segunda es reductor y el óxido se convierte en cobre metálico. La situación es la misma cuando se sopla a pulmón a través de un tubo.

Otro compuesto que es un claro indicador de condiciones oxidantes en el seno de la vasija de reducción es la magnetita o, más genéricamente, los óxidos de hierro trivalente, cuya presencia es también frecuente en las escorias calcolíticas (Figura 6).

Con todos estos datos es posible establecer las condiciones de fugacidad del oxígeno en la zona de reducción, que oscilarán entre las correspondientes al *buffer* QFM (cuarzo-fayalita-magnetita) y las del *buffer* HM (hematite-magnetita) en el rango de temperaturas de trabajo de $1.000-1.200^{\circ}$ C. En el primero las condiciones son suficientemente reductoras para que llegue a formarse fayalita en aquellos casos en los que hay hierro en

la ganga (de hecho se ha observado la formación de fayalita en algunas escorias calcolíticas). En el segundo las condiciones son oxidantes y se produce la transformación de Fe^{+2} a Fe^{+3} y la formación de delafosita. Entre ambas curvas discurre la de reducción de la cuprita a cobre, posibilitando la obtención del metal durante las transiciones de un extremo al otro.

LAS VASIJAS DE REDUCCIÓN

Tras muchos años de trabajos de campo no se había conseguido descubrir ninguna estructura de fuego a la que pudiera asignársele con propiedad la denominación de horno metalúrgico, aunque en la literatura de la primera mitad del siglo XX hay algunas referencias e incluso intentos de reconstrucción, como las efectuadas por F. Motos y L. Siret. Lo que recoge el registro arqueológico, en particular el de los últimos décadas, es la existencia hogares circulares de en torno a un metro de diámetro, más o menos elaborados, con abundantes capas de cenizas y restos de actividades metalúrgicas relacionadas con la transformación del mineral en metal. Tal sería el caso del hogar anular encontrado en una caba-

Yacimiento	Composición mineralógica
Almizaraque (Cuevas del Almanzora, Almería) (1)	Malaquita, azurita, cuprita
Almizaraque (Cuevas del Almanzora, Almería) (1)	Malaquita, olivenita, chenevixita, alstonita?, cuarzo
Almizaraque (Cuevas del Almanzora, Almería) (1)	Azurita, malaquita, olivenita, chenevixita, digenita?, alstonita?, cuarzo
Almizaraque (Cuevas del Almanzora, Almería) (2)	Olivenita
Mina Cerro Minado (Huércal Overa, Almería) (1)	Azurita, dolomita
Mina Sierra Cabrera 1 (Turre, Almería) (1)	Malaquita, caoilinita, mica moscovita, cuarzo
Mina Cabezo de los Hilos (Mojácar, Almería) (1)	Malaquita, mica moscovita, cuarzo
Mina Los Pinares 4 (Los Gallardos, Almería) (1)	Malaquita, azurita, hematites, mica moscovita, cuarzo
Mina Los Pinares 4 (Los Gallardos, Almería) (1)	Malaquita, azurita, hematites, mica moscovita, feldespato
Mina Loma de la Tejería (Albarracín, Teruel) (2)	Tenorita, cervantita, senamonita, paxita, sílice (arenisca)
Mina La Ferrera (Rocabruna, Girona) (3)	Tenorita, paramelaconita, espertinita, hidroromarchita, valentinita, senamonita, clinoclasa, lammerita, discrasita
Mina Can Manera (Manera, Girona) (3)	Cuprita, casiterita, bronce (Cu6Sn%), enargita, eschafarzikita, hematites, magnetita
Amarguillo (Los Molares, Sevilla) (4)	Malaquita
Amarguillo (Los Molares, Sevilla) (4)	Pseudomalaquita, gohetita
Amarguillo (Los Molares, Sevilla) (4)	Pseudomalaquita, mica moscovita, cuarzo

Tabla 1. Análisis por difracción de rayos X de minerales de cobre. Nota: (1) Montero (1991), (2) Montero, inédito, (3) Alcalde et al. (1998), (4) Hunt, inédito.

Análisis	Yacimiento	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	FeO	NiO	CuO	ZnO	As ₂ O ₃	SO	Cl ₂ O
ALMIZ5-2	Almizaraque	2,58	1,81	6,00	0	0,74	1,73	56,2	0	21,3	2,65	2,77	0	4,20
ALMIZ3-2	Almizaraque	2,17	4,64	2,53	0	0,33	1,14	54,3	0	31,3	1,95	0	0	0,76
ALMIZ6-2	Almizaraque	0	1,55	11,7	0	0,50	1,92	20,8	0	60,5	0	0	0	3,10
ALMIZ6-3a	Almizaraque	0	2,21	6,09	2,34	0,42	4,40	31,4	1,36	36,6	1,88	9,42	0	3,84
ALMIZ6-3b	Almizaraque	0	5,37	31,3	13,7	1,79	7,63	1,63	0	33,6	0	2,36	0	2,59
ALMIZ6-4	Almizaraque	0	1,40	3,28	0	0,70	3,38	10,8	0,46	61,1	2,81	9,13	0	6,98
ALMIZ31-1	Almizaraque	0	3,24	2,10	0	0,34	1,30	30,6	0	40,2	2,27	12,6		7,42
CAR10-1	C/ Dolores Quintanilla	0	1,87	2,80	0	0	0	1,11	0	94,2	0	0	0	0
CAR9-2	C/ Dolores Quintanilla	0	4,62	2,50	0	0	0	3,00	0	89,9	0	0	0	0
CÑ-11	La Cefuella	0	1,77	6,86	0	0	0,49	4,26	0	86,1	0	0	0,49	0

Tabla 2. Análisis de minerales de cobre de yacimientos calcólicos (XRF-ED microsonda MEB, % en peso).

ña de Los Millares (Almería), publicado por Craddock (1995: 133), al que obviamente no se le asigna la categoría de horno, o a los encontrados más recientemente en Cabezo Juré (Huelva). Estos últimos, parecidos al de Los Millares aunque con el anillo más grueso y de mayor altura, fueron calificados de hornos por su descubridor (Nocete 2001: lám. 15 y 16; Nocete *et al.* 2004: 280-281) y así se las sigue denominando en sucesivas publicaciones. En nuestra opinión, sin embargo, no se trataría de verdaderos hornos cerrados. Su tamaño es descomunal para la época, aparte de otras consideraciones.

Unos residuos particulares asociados a estas estructuras son los fragmentos de grandes recipientes muy abiertos correspondientes a formas de bandejas y cuencos, frecuentemente similares por su forma y tipo de pasta a las cerámicas de cocina y otras vasijas comunes de los ajuares domésticos. En otras ocasiones se trata de recipientes planos de paredes gruesas, de diseño más o menos oblongo, cuya finalidad parece más específicamente metalúrgica. El hallazgo de fragmentos significativos suficientes ha permitido reconstruir algunas formas, como la que se representa en la figura 7.

La reacción entre los minerales, las cenizas y la cerámica genera una capa escorificada cuya naturaleza es similar a la de las escorias ya comentadas, en cuyos fundidos encontramos la misma serie de compuestos minerales (Figura 8).

La replicación experimental demuestra que la obtención de cobre en una vasija de cerámica o en una pequeña cubeta excavada en el suelo es un procedimiento sencillo y rentable (Rovira, 1999). Basta disponer de mineral machacado no necesariamente de buena ley, carbón vegetal y un sistema de aireación forzada, bien por tiro natural de un día ventoso, mediante fuelles y toberas o utilizando tubos de soplado (Figura 9). El resultado de la fundición suele ser una masa de escoria en la que han quedado atrapadas numerosas bolitas de cobre que se recuperan fácilmente por selección a mano moliendo dicha escoria. Como el rendimiento en metal suele oscilar entre el 25% y el 50% en peso del contenido en la mena, según se deduce de los experimentos (Rovira 1999: 108), es probable que el metalúrgico prehistórico reaprovechara la escoria rica todavía en cuprita en sucesivas fundiciones.

CONCLUSIONES

Las evidencias arqueológicas indican que el uso de vasijas de reducción se encontraba ampliamente difundido por toda la Península Ibérica, abarcando el largo periodo que comprende el Calcolítico y la Edad del Bronce (Rovira y Ambert 2002: 108, Figura 4), documentándose también en la Edad del Hierro y quizás en épocas más recientes.

Se puede pensar, basándonos en los resultados analíticos, que nos hallamos ante un método rudimentario de fundición mediante el cual el cobre se obtenía directamente del mineral, sin añadir fundentes a la carga de los sencillos recipientes. No obstante, algunas escorias de Cabezo Juré indican, por su composición, que se añadieron rocas básicas con mineralizaciones de bario y manganeso en proporciones de hasta un 50% de la carga (Sáez *et al.* 2003: 630). Este proceder no parece que representara ventaja metalúrgica alguna a tenor del tipo de escorias obtenidas, pero es un hecho que no se debe ocultar y habrá que esperar a que nuevos hallazgos confirmen si era habitual o no el empleo de fundentes.

Las vasijas de reducción usadas en el Calcolítico son habitualmente cuencos o bandejas con diámetros de boca más frecuentes entre 15 y 30 cm, aunque hay algún ejemplo de mayor tamaño. Pero no sólo se usaron contenedores circulares: se han publicado algunos ejemplos de bandejas o platos de formas oblongas como los mencionados antes e incluso rectangulares de esquinas redondeadas (Soares *et al.* 1985).

La presencia sistemática en la escoria de magnetita o hamatite, cuprita y a menudo delafosita es una clara indicación de que las condiciones red-ox en el hogar eran con frecuencia oxidantes, lo cual concuerda con el hecho de que las vasijas son estructuras abiertas en las que no es fácil controlar y mantener un ambiente reductor. Pero como también se obtenía cobre debemos suponer que las atmósferas alternadamente oxidantes y reductoras eran estimuladas por la cadencia del sistema de ventilación forzada mediante fuelles o soplando a pulmón a través de tubos (cañas o varas huecas).

Esta sencilla tecnología de fundición usada en la metalurgia prehistórica de la Península Ibérica es en muchos aspectos similar a la descrita por Hauptmann *et al.* (1996) en la fase calcolítica antigua de Wadi Fidan (Jordania), fechada en la segunda mitad del IV milenio AC. Asimismo, nuestras escorias son también parecidas a las estudiadas del Sitio 2 de Timna (Israel), datadas por el contexto cerámico en el VI-V milenio AC (Merkel y Rothenberg 1999). El estadio inicial de la producción de cobre basada en crisoles y vasijas de reducción parece ser muy común en otros lugares de Europa en los que se ha investigado (Craddock 1999). ☉

BIBLIOGRAFÍA

- Alcalde, G., Molist, M., Montero, I., Planagumà, L., Saña, M. y Toledo, A. 1998. Producciones metalúrgicas en el Nordeste de la Península Ibérica durante el III milenio cal. AC: el taller de la Bauma del Serrat del Pont (Tortellà, Girona). *Trabajos de Prehistoria*, 55 (1), 81-100.
- Bachmann, H.G. 1982. *The Identification of Slags from Archaeological Sites*. Institute of Archaeology, University of London, Londres.
- Craddock, P.T. 1995. *Early Metal Mining and Production*. Edinburgh University Press, Edinburgo.
- Craddock, P.T. 1999. Paradigms of metallurgical innovation in prehistoric Europe. En A. Hauptmann, E. Pernicka, T. Rehren y Ü. Yalçin (Ed.), *The Beginnings of Metallurgy*. Der Anschnitt, Beiheft 9, Bochum, 175-192.
- Craddock, P.T. y Meeks, N.D. 1987. Iron in ancient copper. *Archaeometry*, 29 (2), 187-204.
- Delibes, G., Fernández-Miranda, M., Fernández-Posse, M.D., Martín, M.C., Montero, I. y Rovira, S. 1991. Almazaraque (Almería, Spain): archaeometallurgy during the Chalcolithic in the Southeast of the Iberian Peninsula. En J.P. Mohen Ch. Éluière (Ed.), *Découverte du Métal*. Picard, Paris, 303-315.
- 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, 3-10.
- Merkel, J. y Rothenberg, B. 1999. The earliest steps to copper metallurgy in the western Arabah. En A. Hauptmann, E. Pernicka, T. Rehren y Ü. Yalçin (Ed.), *The Beginnings of Metallurgy*. Der Anschnitt, Beiheft 9, Bochum, 149-165.
- Nocete, F. 2001. *Tercer milenio antes de nuestra era. Relaciones y contradicciones centro/periferia en el Valle del Guadalquivir*. Bellaterra, Barcelona.
- Nocete, F., Sáez, R. y Nieto, J.M. 2004. La producción de cobre en Cabezo Juré: estudio químico, mineralógico y contextual de escorias. En F. Nocete (Coord.), *Odiel. Proyecto de Investigación Arqueológica para el Análisis del Origen de la Desigualdad Social en el Sureste de la Península Ibérica*. Junta de Andalucía, Sevilla, 273-295.
- 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. 2002. Early slags and smelting by-products of copper metallurgy in Spain. En M. Bartelheim, E. Pernicka y R. Krause (Ed.), *Die Anfänge der Metallurgie in der Alten Welt / The Beginnings of Metallurgy in the Old World*. Marie Leidorf GmbH, Rahden/Westfalia, 83-98.
- Rovira, S. y Ambert, P. 2002. Les céramiques à réduire le minerai de cuivre: une technique métallurgique utilisée en Ibérie, son extension en France méridionale. *Bulletin de la Société Préhistorique Française*, 99 (1), 105-126.
- Rovira, S., Montero, I. y Consuegra, S., 1997. *Las Primeras Etapas Metalúrgicas en la Península Ibérica, I. Análisis de Materiales*. Instituto Universitario Ortega y Gasset y Ministerio de Cultura, Madrid.
- Sáez, R., Nocete, F., Nieto, J.M., Capitán, M.A. y Rovira, S. 2003. The extractive metallurgy of copper from Cabezo Juré, Huelva, Spain: Chemical and mineralogical study of slags dated to the third millennium BC. *The Canadian Mineralogist*, 41, 627-638.
- Soares, A.M., Araújo, M.F. y Cabral, J.M.P. 1985. O Castelo Velho de Safara: vestígios da prática de metalurgia. *Arqueologia*, 11, 87-94.