

INVESTIGACIONES CIENTIFICAS DE LA METALURGIA DE EL MALAGON Y LOS MILLARES, EN EL SURESTE DE ESPAÑA *

Scientific surveys about metallurgy from “El Malagón” and “Los Millares” in the
Southeastern Spain

INGO KEESMANN **, AUXILIO MORENO ONORATO *** y ANDREAS KRONZ **
En colaboración con Peter Maier ** y Zahra Hezarkhani-Zolgharnian **.

BIBLID [0211-3228(1991-92); 16-17; 247-302]

RESUMEN El objetivo de este trabajo consiste fundamentalmente en la determinación del estadio tecnológico de la producción metalúrgica de las sociedades calcolíticas del Sureste peninsular. Para ello se han realizado una serie de análisis químicos y de difracción de Rayos X sobre diversos restos arqueometalúrgicos (menas, escorias, cerámica) que completan la información obtenida sobre los resultados proporcionados por los objetos manufacturados procedentes de los yacimientos de Los Millares y El Malagón. Todo este conjunto material esta implicado en las diferentes fases del proceso metalúrgico (cantería/minería, calcinación, reducción, fundición y manufactura).

Palabras clave: Arqueometalurgia, Edad del Cobre, Sureste peninsular, menas, cerámica, análisis microscópicos, análisis macroscópicos, aleación Cu-As.

ABSTRACT This paper's main goal is to determine the technological stage of the metallurgical production achieved by the Iberian Southeast chalcolithic societies of the Iberian Southeast. To complete the information on this issue given by the study of manufactured metallic objects from Los Millares and El Malagón sites, several chemical analysis, and X Ray Diffraction phase determinations on different archaeometallurgical remains (ore, slag and ceramics) have been made. All these remains are involved in different phases of the metallurgical process (quarring/mining, calcination, smelting, melting and manufacturing).

Key words: Archaeometallurgy, Copper Age, Iberian Southeast, Ores, Ceramics, Microscopic Analysis, Macroscopic Analysis, Cu-As Alloy.

* La traducción preliminar de las notas de trabajo del equipo alemán ha sido realizada por Annegret Cullmann. Esta traducción ha sido revisada y corregida por Trinidad Nájera, profesora del Departamento de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada. Queremos agradecer también la ayuda prestada por Josefa Capel y José Antonio Peña, también profesores de dicho Departamento, por su aportación en aspectos puntuales sobre tecnología cerámica y procesos químicos respectivamente.

** Arbeitsgruppe Archäometallurgie, Institut für Geowissenschaften, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, D-55099 Mainz.

*** Departamento de Prehistoria y Arqueología, Universidad de Granada. Grupo de Investigación 5.100 (GEPRAN).

1. PERSPECTIVAS ACTUALES DE LA INVESTIGACION ARQUEOLOGICA EN EL SURESTE DE LA PENINSULA IBERICA

El Sureste de la Península Ibérica se ha constituido en las últimas décadas del siglo xx como el marco ideal para intentar explicar el proceso de transformación de las sociedades igualitarias del Neolítico Final en las sociedades jerarquizadas de la Edad del Bronce. Pocas áreas geográficas de la Península han visto el crecimiento, desarrollo y caída de tantos y tan variados modelos teóricos: desde el colonial-difusionista hasta los evolucionistas (materialista dialéctico, materialismo cultural, funcionalista). Las alternativas que se han propuesto han reducido en su mayor parte a un solo factor principal la explicación del proceso: capitalización o control de una economía subsistencial, desarrollo de la metalurgia, competencia intercomunal...

Uno de los aspectos más destacados de estas primeras culturas calcolíticas ha sido la metalurgia. En la interpretación de esta actividad económica ha jugado un papel fundamental el yacimiento almeriense de Los Millares.

El yacimiento calcolítico de Los Millares, situado en un espolón amesetado en el Bajo Andarax, fue dado a conocer por L. Siret tras los trabajos llevados a cabo, fundamentalmente por su capataz, tanto en el poblado como en la necrópolis (Siret, L. y E., 1890). A pesar de la minuciosa documentación que L. Siret realizó que incluía planos topográficos tanto del lugar en que se ubicaba el asentamiento con referencias a posibles murallas, acueductos, cisterna como de los posibles fortines exteriores que rodeaban al poblado (Almagro y Arribas, 1963; Arribas, 1976), Los Millares permanecieron inéditos durante la primera mitad de este siglo a excepción del corpus de los Leisner (1943). Este hecho facilitó que la trascendencia fundamental del yacimiento estuviera durante este periodo de tiempo relacionada con el presunto origen oriental de las sepulturas de falsa cúpula, desarrollada, por ejemplo, en la hipótesis clásica de Childe (1963) sobre los misioneros megalíticos aportando el conocimiento oriental, incluyendo la metalurgia, en una relación dialéctica con las sociedades bárbaras de occidente (Gilman, 1993).

Esta visión orientalista, sólo contestada desde presupuestos también difusionistas (Hernando, 1987-88) por Bosch (Bosch, 1920; 1932; 1969), fue la que prevaleció en la Península tras la Guerra Civil (Mergelina, 1941-42) como muestra el trabajo de los Leisner (1943) sobre los megalitos del sur de la Península Ibérica. El arraigo de esas concepciones era tal que, tras la nueva fase de excavaciones iniciadas en los años 50, la publicación de los resultados por parte de los responsables fue acompañada de una dura crítica (Almagro y Arribas, 1963) a los nuevos planteamientos de los Leisner que consideraban dos tradiciones megalíticas independientes, fundamentadas en sus trabajos en Portugal (Leisner, 1949): una oriental constituida por las sepulturas de falsa cúpula y otra occidental y megalítica que arrancaba de las cámaras simples, y ello pese a la buena acogida que a estas teorías se le estaba dispensando en Europa (Piggott, 1965) y a las fechas de C_{14} que se iban conociendo.

La importancia primordial de estas nuevas excavaciones, sin embargo, viene dada por la documentación definitiva de los sistemas de fortificación de Los Millares (Almagro y Arribas, 1963) coincidentes con aquellos de Vila Nova de São Pedro (Sangmeister, 1960; Savory, 1977) que habían empezado a excavar con problemas en años anteriores, y que abrieron una nueva vía para el establecimiento de paralelos orientales (Arribas,

1976), vía que será completada años más tarde tras las excavaciones en el Cerro de la Virgen de Orce (Schüle y Pellicer, 1966) con el estudio de las casas con cubierta al parecer cupuliforme y que se intentaron también correlacionar con oriente (Kalb, 1969 y 1975). Esto venía a indicar que existían más elementos que se podían comparar con las culturas orientales que los meramente funerarios y que por tanto la publicación de las fechas de C_{14} que parecían contradecir las teorías al uso no era condición suficiente para su abandono pese al fulminante ataque de Renfrew (1967).

La aparición de la metalurgia es un fenómeno que se intenta explicar desde los primeros momentos en relación a la presencia de tumbas megalíticas y de poblados más o menos complejos y como resultado de ello se la consideraba como una importación oriental, conectada en los años 60-70 a la denominada “teoría de las colonias” (Blance, 1961), que consideraba que determinados contingentes poblacionales de oriente se establecerían en el sureste de la Península Ibérica a la búsqueda de metales. Desde sus centros fortificados costeros, como era considerado Los Millares, emprendían un avance posterior hacia el interior. Esta hipótesis, matizada sin embargo de sus aspectos ultradifusionistas, pareció ganar adeptos cuando se dio a conocer el yacimiento de El Malagón (Cúllar, Granada), situado en una loma al pie de un macizo calizo en el Altiplano de Cúllar-Chirivel, bastante alejado del mar. En él se realizó una primera campaña de excavación en 1975 que puso de manifiesto la importancia de la actividad metalúrgica en el mismo y la asociación a ésta de importantes fortificaciones (Arribas *et al.*, 1983).

Es a partir de 1978 cuando se reinician las excavaciones en Los Millares dentro de un nuevo Proyecto de Investigación denominado “Los inicios de la metalurgia y el desarrollo de las comunidades del sureste de la Península Ibérica durante la Edad del Cobre”.

No será hasta el inicio de una nueva fase de investigación, en 1985, cuando se valore en su justa medida la importancia de las fortificaciones del yacimiento de Los Millares, y seguidamente de todos aquellos poblados que las mostraban. Se presta nueva atención ahora a la compleja ordenación del territorio que supone no sólo la existencia de diversas líneas de muralla en un asentamiento central de gran tamaño, sino la disposición alrededor de él de numerosos fortines (Arribas *et al.*, 1987), que revelaban una complejidad social anclada en el propio sistema productivo indígena como habían puesto de manifiesto diferentes autores (Gilman, 1976, 1987a y 1987b; Chapman, 1982 y 1991; Ramos, 1981; Lull, 1983; Mathers, 1984; Molina, 1983). Al mismo tiempo, en esta fase comenzó la excavación de diversos espacios interiores tanto del Fortín n.º 1 (Molina *et al.*, 1986) como de algunas zonas del interior del poblado que permitieron determinar áreas con funciones específicas dedicadas, por ejemplo, a la talla de puntas de flecha en sílex o, en el caso que nos ocupa, a la metalurgia (Arribas y Molina, 1987, 1991), que habían sido intuitas en campañas anteriores, dándose el caso de que algunos bastiones fueron utilizados para estas actividades existiendo además estructuras totalmente especializadas (talleres). El proyecto se completaba con estudios analíticos de diversos componentes de la cultura material mueble en colaboración con diversas instituciones científicas relevantes, siendo necesario citar en relación a los estudios arqueometalúrgicos la colaboración establecida con el Laboratorio de Investigaciones Científicas del Museo Británico, el Instituto Arqueológico de Londres a través del IAMS, y el Servicio de Arqueometalurgia de la Universidad de Maguncia, cuyos resultados iniciales se pueden rastrear en diversas

publicaciones (Molina, 1988; Rothenberg *et al.*, 1988; Arribas *et al.*, 1989; Arribas y Molina, 1987 y 1991; Hook *et al.*, 1991). En este nuevo marco la relación de Los Millares con el *hinterland* cobra un nuevo significado, de ahí que se desarrollen programas de prospección sistemática en los pasillos de Tabernas, Fiñana y Cúllar-Chirivel (Alcaraz *et al.*, 1987, Maldonado *et al.*, 1991, Moreno *et al.*, 1987; Ramos *et al.*, 1991; Molina, 1988; Arribas y Molina, 1991) y dentro de éste, tras reiniciarse las excavaciones en el poblado de El Malagón en 1983 (Torre *et al.*, 1984) y 1986, se acometa el estudio de su cultura material (Moreno, 1993).

De tal forma, las hipótesis desarrolladas para explicar la evolución social durante el Calcolítico tienden a señalar la importancia de los mecanismos ideológicos para justificar el dominio y la coerción que Los Millares ejercía sobre su periferia consiguiendo tributos y fuerza de trabajo a cambio de dudosos beneficios, como la distribución de bienes de prestigio, necesarios para las elites exógenas entre los que se incluirían el metal y el campaniforme (Molina, 1988).

2. INTRODUCCION A LA INVESTIGACION ARQUEOMETALURGICA

Hasta la fecha existen algunos trabajos de investigación acerca de la arqueometalurgia de El Malagón (CB) y Los Millares (LM). En 1985 Arribas *et al.* expusieron en Madrid un informe sobre los respectivos proyectos en el Sur de España (Arribas *et al.*, 1989). Especialistas en arqueometalurgia del Museo Británico y del Departamento de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada presentaron una primera síntesis de sus resultados en 1990 en Heidelberg, basándose parcialmente en sus anteriores investigaciones (Hook *et al.*, 1991) en donde se presentaban fundamentalmente los resultados obtenidos de las analíticas practicadas sobre objetos manufacturados y sobre algunos fragmentos cerámicos pertenecientes a crisoles y vasijas-horno. La prospección arqueometalúrgica realizada en la Provincia de Almería (integrada por miembros de tres de las instituciones que colaboran en temas de metalurgia antigua dentro del Proyecto de Investigación Los Millares: IAMS, grupo de Arqueometalurgia de la Universidad de Maguncia (1) y diversos miembros del Departamento de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada), incluida dentro de los objetivos previstos en el ya citado Proyecto de Investigación, constituyó la base para futuras investigaciones más ambiciosas en este campo de la arqueometalurgia. Los resultados parciales obtenidos hasta el momento de las diferentes analíticas practicadas sobre muestras de Los Millares y de El Malagón estimulan la continuación de las investigaciones planteándose algunas cuestiones aún no resueltas (Hook *et al.*, 1991), en esencia las relativas a la procedencia del mineral localizado en Los Millares, aspecto que ha dado lugar a propuestas contradictorias (Rothenberg, 1988, 1989).

(1) Las analíticas practicadas por el Grupo de Arqueometalurgia de la Universidad de Maguncia están realizadas fundamentalmente sobre muestras de menas, escorias y partes escoriadas de fragmentos cerámicos de fundición.

3. METODOS DE TRABAJO

3.1. Investigación óptica

Nuestro trabajo se basa en observaciones con el microscopio de polarización. De las piezas que ofrecían un mayor tamaño se hicieron láminas delgadas. Estas, en general, corresponden a las muestras de escoria compactas ricas en hierro y a minerales de CB. El tamaño y el estado de conservación de las demás menas, escorias y muestras de "metal" sugirieron que se hicieran solamente preparados para la investigación microscópica bajo luz reflejada. En varias ocasiones durante este proceso se consiguió producir también preparados dobles, con los cuales las observaciones aisladas podían ser comprobadas y complementadas. Para las investigaciones ópticas y para la documentación microscópica se utilizaron diversos aparatos, durante la fase final e incluso de la digitalización directa y la evaluación del análisis de colores. La microscopía electrónica se utilizó muy pocas veces durante esta investigación, aunque proporcionó información adicional acerca de diversos restos microscópicos y la distribución de los elementos en determinadas muestras.

3.2. Investigación química

El tamaño, el nivel de conservación y también el resultado de las observaciones bajo el microscopio prácticamente excluyeron el poder realizar analíticas químicas globales. Solamente algunas muestras de escorias, ricas en hierro y de mayor tamaño, procedentes de CB, hubieran justificado un análisis químico global. Sin embargo, es obvio que no caben dentro del marco de la tecnología antigua del cobre, como veremos más adelante. De esta manera, el análisis químico lógicamente se limitó a llevar a cabo analíticas puntuales de las fases más importantes con la microsonda de haces electrónicos (SEM). Este método se empleó intensamente tanto a nivel cualitativo, para la reacción química de observaciones particulares (espectroscopía de dispersión energética, EDS), como a nivel cuantitativo, especialmente para la definición de fases individuales (espectroscopía de dispersión de ondas, WDS) (2). Se dio gran importancia a la visualización del

(2) Las definiciones de SEM se llevaron a cabo con un aparato CAMEC CAMEBAX microrrayo (condiciones de trabajo: 15 kV de tensión de aceleración, 12 nA de corriente de rayos, corrección de matriz según el modelo PAP). Midiendo áreas de fases metálicas diminutas junto con niveles elevados de Cu, Ag y As. Muchas veces se produjo un efecto ya observado en las muestras de Monte Romero (Río Tinto, Huelva; ver KEESMANN, 1993), que incluso con una calibración muy exacta de los instrumentos, para medir cada uno de los elementos individuales, en casos extremos resultaron sumas excedentes de $\geq 10\%$. Explicamos estas sumas como resultados bien de una fluorescencia secundaria o bien de absorción. En la medición es posible un estímulo secundario de elementos fuera de la zona actual de medición. Este porcentaje no se toma en consideración en la corrección de la fluorescencia. El modelo de corrección PAP también toma en consideración los efectos de la absorción parcial de la radiación emitida. Se toma el espectrómetro desde un ángulo de 40° . Sin embargo, en caso de que la radiación pase por un área de una absorción de rayos X diferente, ocurre también un fallo considerable de corrección. El As demuestra hacia Cu(K_α), Ag(L_α) una absorción especialmente alta o bien una alta autoabsorción hacia As(L_α). Las pequeñas áreas de medición de Cu-As-Ag normalmente están rodeadas de cobre metálico que absorbe en menor grado estos elementos.

desarrollo de fases individuales en el curso de la cristalización (desarrollo por zonas en el grano individual) y también a los contextos químicos en zonas puntuales (secuencia de cristalización, relación con la masa intermedia de granos, relaciones de equilibrio-desequilibrio).

3.3. Difracción de Rayos X

La experiencia demuestra que la investigación radiodifractométrica de muestras arqueometalúrgicas es bastante infructuosa y por ende ésta no se aplicó a las escorias ni a las muestras metálicas de ambos yacimientos investigados. Sin embargo resultó muy útil para una definición más aproximada de la composición de las menas o de los productos de descomposición de menas dando resultados que complementaron nuestras observaciones previas con el microscopio.

3.4. Evaluación numérica

Los datos analíticos en sistemas multivariantes por regla general no son muy expresivos, ya que muchas veces es imposible ver el contexto general. Por esta razón se emplearon programas de cálculo especialmente desarrollados en nuestro grupo de trabajo para interpretar los numerosos análisis de espinela y silicatos. Estos cálculos se completaron con programas de recuperación gráfica en sistemas de tres o cuatro elementos con muchos puntos gráficos al objeto de hacer más comprensibles los resultados analíticos. En aquellos casos en que no ha sido posible establecer fehacientemente la naturaleza de los compuestos presentes en las muestras, se ha optado por indicarlos con interrogantes entre paréntesis.

4. RESULTADOS DE LA INVESTIGACION

4.1. Descripción de las muestras

El material de los dos yacimientos, El Malagón (CB) y Los Millares (LM), utilizados para esta investigación, abarca una amplia gama de diferentes grupos de materiales (tabla 1). La elección de las muestras se ha realizado con criterios selectivos con el fin de completar datos obtenidos en anteriores investigaciones realizadas sobre los objetos manufacturados para resolver cuestiones ya planteadas sobre la tecnología del cobre y el desarrollo de cada una de las fases implicadas en este proceso. Según estos materiales, se podría suponer que en los dos yacimientos se pueden encontrar menas, escorias y metales parecidos, todos correspondientes a la tecnología del cobre. Sin embargo, en CB se encuentran además escorias de hierro —con toda seguridad de épocas más recientes— que no existen en LM.

Hemos hecho una distribución de muestras en varias categorías de acuerdo con criterios de campo. Dichas categorías son: menas, escorias, cerámica y productos manufacturados (tabla 2).

TABLA 1

<i>N.º</i>	<i>N.º Pp</i>	<i>N.º</i>	<i>Tipo</i>	<i>Zona</i>	<i>Sector</i>	<i>Fase cronológica</i>
<i>Excavación</i>		<i>Inventario</i>				
CB-13009	1096	860713/2	escoria Fe	sur	exterior poblado	Precampaniforme/Fase Superf.
CB-5068_1	1097	860713/2	roca	centro-sur	entre cabañas	Precampaniforme/Cobre Pleno
CB-13007_1	1098	860713/1	escoria Fe	sur	exterior poblado	Precampaniforme/Fase Superf.
CB-13007_2	1099	860713/1	escoria Fe	sur	exterior poblado	Precampaniforme/Fase Superf.
CB-7154_12	1143	900920/10	cer. fundición	noreste	entre muralla	Precampaniforme/Fase Superf.
CB-13040	1144	900920/1	cer. fundida	sur	exterior poblado	Precampaniforme/fase Superf.
CB-12280_18	1145	900920/8	cer. fundida	suroeste	entre cabañas y muralla	Precampaniforme/ Fase I-II
CB-11275	1146	900920/6	escoria Fe	sureste	exterior poblado	Precampaniforme/ Fase Superf.
CB-683	1147	900920/9	escoria Cu	centro-sur	inter. cabaña C	Precampaniforme/ Fase III
CB-9297	1148	900920/4	escoria Fe	noroste	exterior muralla	Precampaniforme/Fase Superf.
CB-10027	1149	900920/5	escoria Fe	suroeste	exterior cabañas	Precamp./Fase Superf./III
CB-8083_b	1150	900920/3	bola metal cobre	sur	exterior cabañas	Precampaniforme/ Fase II
CB-12267	1151	900920/11	escoria Fe	centro-sur	entre cabañas y muralla	Precampaniforme/Cobre Pleno
CB-4338	1152	900920/2	cer. fundida	centro-oeste	inter. cabaña F	Precampaniforme/ Fase II
LM-89343	1153	900917/15	cer. fundida	línea III. Suroeste	Estructura rectangular	Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-76083	1154	900917/23	cer. fundida	línea I. Norte. Ampliación A	Estructura E	Precampaniforme/Cobre pleno
LM-89407	1155	900917/19	cer. fundida	línea III. Sector suroeste	Estructura rectangular	Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-89377	1156	900917/5	cer. fundida	línea III. Sector suroeste	Estructura rectangular	Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-89418	1157	900917/16	cer. fundida	línea III. Sector suroeste	Estructura rectangular	Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-89342	1158	900917/11	cer. fundida	línea III. Sector suroeste	Estructura rectangular	Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-89239	1159	900917/7	cer. fundida	línea III. Sector noroeste	Estructura rectangular	Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-89381	1160	900917/18	cer. fundida	línea III. Sector suroeste	Estructura rectangular	Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-6034	1216	900917/32	escoria Cu	línea II. Sectores norte y noroeste	Estructura G	Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-33067	1217	900917/33	metal	línea I. Sector norte		Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-33093	1218	900917/27	mena	línea I. Sector norte		Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-33119	1219	900917/35	escoria+metal Cu descomp.	línea I. Sector norte		Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-34024	1220	900917/36	mena	línea I. Sector norte	Estructura XI	Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-34248	1221	900917/37	escoria Cu	línea I. Sector norte	Estructura XI	Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-36035	1222	900917/38	mena fundida+escoria	línea I. Sector norte	Estructura X	Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-48153	1223	900917/28	mena	línea I. Sector sur	Estructura XIX	Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-61261	1224	900917/40	metal+escoria Cu descomp.	fortín I	Estructura IV	Precampaniforme/Cobre Pleno

TABLA 1 (Continuación)

<i>N.º</i>	<i>N.º Pp</i>	<i>N.º</i>	<i>Tipo</i>	<i>Zona</i>	<i>Sector</i>	<i>Fase cronológica</i>
<i>Excavación</i>		<i>Inventario</i>				
LM-61286	1225	900917/41	metal descomp.	fortín 1	Estructura IV	Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-61304	1226	900917/41	metal+escoria Cu descomp.	fortín 1	Estructura IV	Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-61313	1227	900917/41	metal	fortín 1	Estructura IV	Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-61465	1228	900917/43	metal	fortín 1	Estructura IV	Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-61497	1229	900917/29	metal descomp.	fortín 1	Estructura IV	Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-61598	1230	900917/45	metal+escoria Cu descomp.	fortín 1	Estructura IV	Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-61614	1231	900917/30	metal	fortín 1	Estructura IV	Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-76121	1232	900917/42	escoria+metal Cu descomp.	línea I. Sector norte. Ampliación A	Estructura E	Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-76122	1233	900917/31	mena	línea I. Sector norte. Ampliación A	Estructura E	Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-76143	1234	900917/42	mena	línea I. Sector norte. Ampliación A	Estructura E	Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-76236	1235	900917/42	mena	línea I. Sector norte. Ampliación A		Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-24111	1281	900917/1	metal	línea II. Sector norte y noroeste		Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-33118	1282	900917/2	metal descomp.	línea I. Sector norte		Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-36015	1283	900917/25	escoria Cu	línea I. Sector norte		Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-36016	1284	900917/8	escoria Cu	línea I. Sector norte		Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-36050	1285	900917/22	mena	línea I. Sector norte	Estructura X	Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-36101	1286	900917/20	producto fundición	línea I. Sector norte	Estructura X	Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-61025	1287	900917/10	metal	fortín 1		Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-61511	1288	900917/21	metal	fortín 1	Estructura IV	Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-76165	1289	900917/6	producto fundición	línea I. Sector norte. Ampliación A	Estructura E	Precampaniforme/Cobre Pleno
LM-89413	1290	900917/17	escoria Cu	línea III. Sector suroeste	Estructura rectangular	Precampaniforme/Cobre Pleno

4.1.1. Menas, rocas

Entendemos por menas:

1) Mezclas de mena y minerales, tal como se puede esperar de minerales de cobre con una fuerte transformación secundaria (sulfúricos).

TABLA 2
ADSCRIPCION AL GRUPO DE MATERIAS DE LOS HALLAZGOS ARQUEOMETALURGICOS
INVESTIGADOS

<i>Menas, rocas</i>	<i>Cerámica</i>		<i>Escorias</i>		<i>Metal</i>	
	<i>reducida</i>	<i>oxidante</i>	<i>hierro</i>	<i>cobre</i>	<i>“metal bruto”</i>	<i>objetos</i>
El Malagón 1097	1145 {1147} 1152	1143 1144	1096 1098 1099 1146 1148 1149 1151	1147		1150
Los Millares 1218 1220 {1222} 1223 1233 1234 1235 1285	1153 1154 1155 1156 1157 1160	1158 1159		1216 1219 1221 1222 1232 1283 1284 1286 1289	{1222} 1224 1225 1226 1229 1230 1282 1287 1288 1290	1217 1227 1228 1231 1281

2) Productos con la composición de menas naturales de los cuales, sin embargo, hay que suponer que habían sido sometidos a un proceso de fundición. Estas “menas” están parcialmente adheridas a productos que igualmente tienen la composición mineralógica de menas primarias pero que, sin embargo, son el resultado de la descomposición de metales o de aleaciones metálicas (3).

3) Productos con la composición de menas naturales que probablemente son el resultado de la descomposición prácticamente total de metal. Los productos de esta categoría, en los cuales todavía existen claros residuos o restos de estructuras del metal original, se tratarán en el apartado de “metal”.

También las muestras de los demás grupos de materiales revelan a primera vista aparentes diferencias básicas entre los dos yacimientos. Por ejemplo, no se investigaron

(3) La adjudicación de las distintas muestras a “grupos de elementos” se hace con criterios de campo, los cuales pueden originar que haya una cierta arbitrariedad en la adscripción a un grupo u otro: corresponde al carácter predominante de la muestra. Muchas veces las “escorias” tienen transiciones literalmente fluidas de la cerámica a la escoria propiamente dicha. Además contienen cantidades diversas de metal(es), que a su vez están transformados más o menos completamente en productos con la composición de menas. Por otra parte, las escorias contienen una y otra vez indudables restos de las muestras que aquí hemos calificado de “mena”, en el sentido de menas originalmente usadas para la reducción. La complejidad del contexto se hace especialmente evidente en *LM-36035 (Pp. 1222)*: hay menas sulfúricas con todas las características de un proceso térmico muy intenso, inclusiones semejantes a las escorias y cobre bruto totalmente corroído.

menas de CB que hubieran podido producir cobre por reducción. En su lugar se investigó una roca que, según nuestra experiencia como arqueólogos, siempre se encuentra junto a otros restos pirometalúrgicos. Se trata de una roca de tamaño de grano mediano a grueso con mucho cuarzo adherido a una clorita pleocroica, rica en hierro, de color verde claro a amarillo claro, del grosor de una lámina delgada. La roca encajante contiene depósitos de siderita y también una pequeña cantidad de talco. Obviamente deriva del contacto con esquisto metamórfico, rico en mineral de hierro (*CB-5068_1 (Pp. 1097)*). En LM no había material similar para la investigación. Sin embargo, después del resultado de la investigación de la cerámica no cabe duda de que ésta o una roca de composición parecida se utilizó también en LM para la producción de la cerámica.

Por otra parte, se puede dar por sentado que en CB también existen minerales de cobre propiamente dicho, parecidos a los minerales de cobre de LM. Las “menas” investigadas de LM ascienden a un total de 13 muestras. De éstas, 5 muestras se determinaron por radiodifracción y de 8 muestras distintas se hicieron preparados ópticos.

El resultado de la investigación por radiodifracción está resumido en la tabla 3. En los hallazgos ópticos de las menas del grupo 1 es típica de una mena porosa con formaciones de goethita en forma de gel, malaquita en forma de células (4) y azurita encima de la malaquita (*LM-33093 (Pp. 1218)*). Se trata de una mena con un elevado nivel de descomposición, donde los restos de la mena primaria se pueden discernir sólo a través de los residuos de la estructura, parcialmente conservados. En otros casos, la malaquita como producto de desecho de una fase primaria propensa a disociación, mezclada con goethita, a veces está sustituida por fases azules verdosas claras e incoloras (*LM-34024 (Pp. 1220)*). La muestra *LM-76236 (Pp. 1235)* presenta capas superpuestas de goethita con residuos de pirita, malaquita colocada encima de éstas y después azurita que a veces es sólida. Esta muestra con su pirita residual forma la transición al grupo de las menas sulfúricas dentro del material recuperado. Se trata de calcosina laminar, con distintos grados bien de transformación, bien de descomposición.

LM-76143 (Pp. 1234): Representa una mezcla de minerales porosos, compuesta por diversos sulfuros de Cu, pobre en hierro, malaquita, hidratos de óxido ferroso y pequeñas cantidades de sulfuro de Fe (ζ ?). Se puede interpretar como producto de transformación de un mineral de cobre sulfurado, en el cual el sistema de grietas se ha mantenido, aunque se ha extendido de manera considerable con inclusiones de malaquita. La calcosina original se ha descompuesto por completo. La covellina se ha mantenido, aunque en la superficie se observa que está en proceso de transformación a cuprita. A la vez se está formando una masa de relleno, de color marrón verde oliva, reemplazada en algunos

(4) Tal como demuestra el resultado de la radiodifracción, la composición de las menas es muy compleja. En la mayoría de los casos las fases aparecen como adherencias en granos finos. En el marco de esta investigación no se hizo una determinación óptica exacta de las fases de los productos de descomposición. Por esta razón fue necesario simplificar el análisis microscópico. De aquí en adelante se llamará “malaquita” a todos los productos secundarios de transformación, tanto en menas como los que son de metal, que tienen un color de verde a verde azulado más o menos claro o intenso. Igualmente el término “azurita”, usado aquí solo de manera general, incluye todas las fases que tienen una apariencia azul más o menos intensa. Sin embargo, en ocasiones se trata de adherencias a otros productos de transformación, en parte también de fases de una composición química inequívocamente distinta. Los productos de descomposición ricos en hierro se resumen aquí con el término de “goethita” o “hidratos de óxido ferroso”.

TABLA 3
DETERMINACION DE XRD DE LA COMPOSICION DE LAS MENAS

		ICPDS- Referencia	LM-11/81ZS	LM-81228/1	LM-81228/2	LM-81248	LM 85/81538
Malaquita	$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$	10-399	100	100	15	15	100
Brocancita	$\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$	13-398	70	—	100	25	—
Azurita	$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$	11-682	15	—	—	—	—
Atacamita	$\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$	25-269	—	—	60	—	—
Mimetesita	$\text{Pb}_5(\text{AsO}_4)_3\text{Cl}$	19-683	70	—	—	—	—
Cuprita	Cu_2O	5-667	—	100	30	100	—
Goetita	$\text{FeO}(\text{OH})$	29-713	50	10	20	5	30
Hematite	Fe_2O_3	33-664	—	—	—	—	5
Calcopirita	CuFeS_2	35-752	30	—	—	—	—
Cuarzo	SiO_2	33-1161	—	25	—	—	—

Punto máximo de los reflejos más acusados (I_{100})

Aparato: PHILIPS APD-15

Programa de medición: SMX20

Zona de medición 2θ : 10 — 70°, CuK_α

Realización: P. Maier

puntos por una capa en forma sinuosa de hidratos de óxido-Fe desarrollados en forma acicular. Se pueden encontrar nuevas formaciones de sulfuro de hierro, en forma de granitos, en agrupaciones de hidrato de óxido de Fe. La superficie de la muestra está formada por productos de transformación de color verde claro o azul claro. Sobre la superficie existen adherencias que contienen arena con minerales pesados ricos en Fe.

La muestra *LM-76122* (*Pp. 1233*) está un poco menos descompuesta. Se trata de un fragmento de sulfuro de Cu, de forma \pm rectangular con muchas fisuras, disgregadas, con un contenido abundante en covellina (covellina normal), pero todavía sin cuprita. Contiene numerosas inclusiones redondeadas, rellenas en su mayoría probablemente con hidratos de óxido ferroso. El sulfuro tiene fuertes transformaciones a malaquita, junto a productos de descomposición de color verde oliva a claro o azul claro e hidratos de óxido ferroso. En la superficie en torno a la muestra que se ha formado a partir de los productos secundarios de descomposición, se puede encontrar restos de carbón vegetal.

La muestra *LM-76122* (*Pp. 1223*) es calcosina ($\pm \text{Cu}_2\text{S}$) laminar con una cantidad considerable de partículas capaces de alterarse y con una orientación clara, a excepción de las zonas de fisuras y rajadas producidas por el sulfuro. Las fisuras están rellenas, posiblemente, con hidratos de óxido ferroso. El sulfuro masivo contiene numerosas inclusiones pequeñas y redondeadas de una fase altamente reflectante que van de blanca amarillenta a blanca azulada, en parte en proceso de oxidación de color rosa oscuro. En algunas zonas podemos observar inclusiones de cobre metálico. Existen otras inclusiones redondas de mayor tamaño de Cu_2O o de malaquita.

El preparado *LM-36050* (*Pp. 1285*) es un fragmento compacto de sulfuro de Cu (calcosina laminar), sin formación de covellina. Se observan inclusiones redondeadas o cuerdas con mezcla de malaquita y goethita que se encuentran aisladas o formando fisuras convergentes. En el contorno se mezcla en el sulfuro una masa casi opaca de

color marrón-oscuro de varillas y tablas anisótropas de ferrito dicálcico (C2F), traslúcidas, de color marrón oscuro. Existen cristales aislados de C2F contenidos en las estructuras cotécticas del nivel laminar, a veces con escoria vitrificada como fase de inclusión. En estas zonas están presentes concentraciones de granitos de color crema claro, muy reflectantes, situadas en el borde de guirnalda de magnetita desarrolladas por zonas. Estas concentraciones evolucionan directamente de los filetes de ferrito de Ca. En la mayoría de los casos se transforman en óxido. A veces se puede encontrar pirrotina, con un reborde amarillento de calcopirrotina.

La zona más externa de la sección de la muestra contiene además escoria silicatada y fase de Fe-As, muy anisótropa, altamente reflectante, de color blanco, parcialmente descompuesta. La misma fase aparece constantemente también en otras muestras y a veces en cantidades considerables y en algunas de las muestras de escoria está asociada con sulfuro de Cu (por ejp., en la muestra *LM-36013 (Pp. 1283)*).

4.1.2. *Cerámica*

La cerámica aquí investigada está formada por fragmentos de crisoles, vasijas-horno o moldes que, según la observación macroscópica, se utilizaron durante el proceso pirometalúrgico. La selección de muestras entre todo el material recuperado, basado en una escorificación claramente perceptible, es, en parte, arbitraria, como ya se ha indicado anteriormente. En su mayoría, se trata de fragmentos de borde o de muestras cerámicas, con un grosor de hasta cerca de un centímetro y una curvatura claramente reconocible. Por lo que se puede demostrar claramente a través de la curvatura del fragmento en la muestra, la capa de escoria cubre la parte interior del mismo. En algunas muestras la escoria se extiende también sobre el borde hasta la parte exterior, sin embargo, esta capa de escoria suele ser delgada hasta llegar a perder su carácter de escoria metalúrgica. En las muestras investigadas la capa de escoria llega en algunos puntos a tener un grosor de hasta 5 mm., aunque en su gran mayoría consiste sólo en una capa delgada o bien en una capa de colada formada *in situ* de <1 mm. de grosor. De los dos yacimientos investigados provienen tanto fragmentos grises, en donde se aprecia una cocción muy reductora, como también otros, que son los que predominan, con una cocción oxidante y de color marrón-rojizo. Los dos tipos presentan una capa de escoria. También los fragmentos de color marrón-rojizo que denotan la existencia de una atmósfera oxidante se han fundido bajo la escoria hasta dar lugar a un vidrio incoloro. Se puede apreciar que la zona fundida de transición en esta cerámica marrón ha sufrido claramente un proceso de reducción hasta adquirir un color gris o gris negruzco.

CB-7154_12 (Pp. 1143): es un fragmento de aproximadamente un centímetro de grosor, en su parte exterior de color marrón rojizo oscuro y en su parte interior negra, en proceso de fundición con numerosas burbujas. La colada llega más o menos hasta la mitad del grosor del fragmento. Sobre éste se superpone una fase de colada que rebosa sobre el borde en forma de una fina capa vidriosa, incolora, de color marrón amarillenta, verdosa, en la que se pueden apreciar parcialmente productos de desvitrificación incoloros (¿piroxeno, melilita?). También se puede observar una leve formación de espinela (magnetita/hercinita). En su parte superior, cercana al borde, la capa de vidrio contiene

nubes de cobre metálico finamente dispersas, y a veces también Cu_2O . En algunas ocasiones existe en este área metal como gotas aisladas de Cu.

CB-13040 (Pp. 1144): es amorfo de la pared de una vasija un fragmento en el que son claramente visibles zonas de diversas tonalidad: una primera capa de color marrón-rojizo oscuro de aproximadamente un centímetro de grosor, a la que se superpone una capa gris aproximadamente de 0,5 cm. de grosor con finas burbujas, con una zona de transición hacia un vidrio incoloro y escorias oscuras, rica en vidrio. La cerámica de color marrón rojizo es sorprendentemente rica en silicatos formando capas, de color marrón verdoso oscuro, algunas en forma de pequeños restos de roca (metamórfica ¿rica en biotita o clorita de Fe?), fundiéndose en un color amarillo pardusco. Conforme nos acercamos a la zona escoriada, ésta se vuelve cada vez más incolora. La capa de escoria es rica en olivino y magnetita idiomorfa. La magnetita y la masa intergranular contienen numerosas gotitas pequeñas de cobre. Olivino, magnetita y cobre presentan un proceso intenso de oxidación, con un poco de Cu_2O y malaquita como formaciones secundarias. También es posible que una pequeña parte del Cu_2O sea de origen primario. En algunas áreas de la capa de escorias que no están tan bien mezcladas, se puede observar cobre primario totalmente oxidado o esponja de Cu. La escoria contiene algunas gotas redondeadas de sulfuro (covellina), junto a magnetita + Cu o como inclusiones en el olivino, también un poco de covellina en el centro de una concentración de malaquita. Además, contiene una pequeña cantidad de Cu_2O residual. Se observan pocas inclusiones metálicas en la zona escoriada. Esta zona presenta abundante espinela ideomorfa (magnetita, lo que evidencia una atmósfera oxidante).

En cambio la muestra *CB-12280_18 (Pp. 1145)* es una cerámica compacta, gris, con una capa de color oscuro por ambos lados. El desgrasante de roca metamórfica contiene, además, un poco de pirrotina oxidante. El fragmento presenta un proceso de fundición distinto sobre cada una de sus superficies: al exterior se aprecia una formación vidriosa y en forma de burbujas y en la interna tiene un vidrio de espumoso a incoloro. En el área exterior del borde se ha formado una capa con Cu finamente disperso (eventualmente con Cu_2O adicional), que en algunas partes contiene diminutas gotitas de metal, de color blanco amarillento. Aquí el vidrio está parcialmente recrystalizado. No se han observado magnetita u otras fases típicas para las escorias.

La cerámica gris de la muestra *CB-4338 (Pp. 1152)* consiste en una masa elemental incolora, vidriosa y fundida llena de burbujas. No se ha conservado ninguna capa interior/exterior de vidrio o de escoria. Tampoco existen indicios seguros de que esté conectado con la tecnología de Cu. Se aprecian restos de cuarzo y clorita (¿?) como desgrasante en la cerámica. Sí es posible observar algunas indicaciones de que puede haber sufrido un proceso de fundición. Existen algunas inclusiones de metales pesados que no hemos podido determinar por el momento de qué se trata.

Los resultados de las muestras de LM son bastante similares. La cerámica está generalmente caracterizada por un desgrasante rico en silicato laminar y una alta proporción de granos de minerales pesados, ricos en hierro. Se trata de hematites/ilmenita, magnetita, muy raras veces de pirita/pirrotina, a veces todavía conectadas con los fragmentos de roca metamórfica. Los silicatos laminares pueden ser tanto biotita oscura como clorita férrica, que es visiblemente más clara. En algunos casos se puede observar la transformación de clorita férrica en magnetita y su disolución en la escoria. No se ha

podido demostrar a ciencia cierta la presencia de moscovita (Hook *et al.*, 1991), ni en los preparados para luz reflejada de la cerámica de CB ni en los de LM, aunque cabe, dentro de lo posible, que se halle adicionalmente.

Los fenómenos de fundición y de oxirreducción también se parecen mucho a los de CB.

LM-89342 (Pp. 1158) y *LM-89239* (Pp. 1159) pertenecen al grupo de cerámica cocida de forma claramente oxidante. El fragmento de borde de la muestra *LM-89342* (Pp. 1158) se corresponde con una cerámica marrón-rojiza, localmente gris por su superficie exterior, con dos capas de escoria. Sobre ellas se encuentra una capa de descomposición rica en hidrato de óxido ferroso. La escoria contiene mucho cuarzo residual derivado de la cerámica fundida y en algunas áreas se aprecian nuevas formaciones de silicato (¿piroxeno?). La capa interior de la escoria contiene paragénesis de delafosita, Cu_2O de color amarillo a amarillo verdoso, de granos muy finos, y magnetita. La segunda capa contiene delafosita más gruesa + Cu_2O . Esta está muy desintegrada y forma pequeñas cuñas. La escoria de esta capa doble cambia a una zona vitrificada con fragmentos de Cu dispersos. Cavidades causadas por las burbujas se han llenado secundariamente de verde, posiblemente malaquita —verde azulado, incoloro— o de cuprita en la zona de Cu. La capa de la escoria que está situada más al interior está visiblemente más oxidada. Hacia el área de reacción del recipiente cerámico aumenta visiblemente la proporción de metal-Cu en comparación con el Cu_2O primario (lám. Ia, b).

También en la muestra *LM-89239* (Pp. 1159) la capa de la escoria se sitúa sobre una zona de fundición muy fuerte y asimismo se diferencian dos capas. En la cerámica fundida existen disgregaciones, a veces con Cu_2O muy disperso. La capa de escoria superpuesta es rica en delafosita, en parte revistiendo a la magnetita, y contiene además algo de Cu_2O . También numerosas nuevas formaciones derivadas de la descomposición; de color verdoso, azulado e incoloro, también como relleno de los poros. Los silicatos derivados del proceso de fundición están mal desarrollados. El contenido en metal de Cu es muy bajo y muy disperso en el vidrio o se encuentra como inclusión en magnetita cerca del contacto con la cerámica. Se aprecia la existencia de una fina capa exterior de la escoria que es claramente más rica en cuprita. Aquí la cuprita está formada primariamente, por lo menos en parte, a veces muy dispersa, en paragénesis con delafosita.

En la muestra *LM-89343* (Pp. 1153) la cerámica es pardusca por el exterior, en dirección a la escoria muy fundida y gris, con una capa delgada incolora vitrificada pegada a la escoria. En la superficie exterior del recipiente se han conservado diminutos restos de conchas de caracoles. La escoria es rica en vidrio con piroxeno (¿?), magnetita y delafosita. Gotas de metal de mayor tamaño son bien de color blanco claramente amarillento o bien contienen pequeñas inclusiones de domeiquita (AsCu_3), de color gris azulado claro, mientras las bolitas de metal de Cu, de menor tamaño, son homogéneas y de color amarillo rojizo. En algunas partes se puede observar covellina, y en numerosas ocasiones, malaquita, sobre todo en la zona de contacto entre la cerámica y la escoria.

La cerámica de la muestra *LM-76083* (Pp. 1154) ha sufrido un proceso de fundición muy fuerte; presenta una transición fluida y sinuosa hacia la zona de escoria. La escoria es muy rica en vidrio, con la típica paragénesis delafosita-cobre-magnetita y eventualmente también con piroxeno. La espinela aparece claramente difuminada por zonas, con un borde más oscuro. Localmente se pueden observar fases de alimentación (Fe-As). Además de en gotas, el Cu está distribuido en el vidrio de manera difusa en forma de

nubes. La escoria presenta un grado de oxidación diferente, con una transición de la zona roja de Cu hacia una zona amarilla-verdosa hacia el interior del recipiente. Disminuyendo la proporción de bolitas de Cu en dirección de la zona amarilla hasta casi desaparecer. La matriz cerámica contiene intrusiones de escoria formadas *in situ* con un diámetro de aproximadamente un milímetro, muy ricas en hierro metálico, finamente distribuido (lám. IIa).

La muestra LM-89407 (Pp. 1155) es una cerámica de color gris con capas de escoria. Los minerales pesados se disuelven en la fundición formándose vidrio predominantemente de color marrón oscuro, con brotes de piroxeno (ζ ?) y con una capa abundante de magnetita, como transición a una zona muy rica en delafosita que, a su vez, cambia a una zona con espinela y cuprita hacia el interior del recipiente (fig. 4). El vidrio de la escoria contiene Cu_2O muy disperso (de color amarillo, amarillo-verdoso, más intenso hasta rojo amarillento). En cambio, la presencia de metal Cu es dudosa. En la parte rica en delafosita predominan las desintegraciones líquido-líquido.

El análisis de la muestra LM-89377 (Pp. 1156), perteneciente a un fragmento cerámico de color gris, presenta también una escorificación *in situ* con hierro metálico, además una graduación en la zona de fundición relativamente fuerte hasta llegar a la escoria en sí. La escoria de piroxeno superpuesta es muy rica en Cu, y en parte con bolas de Cu y domeiquita. Las bolitas más grandes son claramente más ricas en arsénico. También se forma Cu metálico, en parte reducido desde Cu_2O en vidrio intensamente cristalino. En un área limitada la escoria contiene delafosita.

La muestra LM-89418 (Pp. 1157) se trata de un fragmento cerámico con una gruesa capa de escoria. Está caracterizado por una sucesión de capas: cerámica marrón —cerámica gris— una capa gruesa de escoria y además una zona de contacto escoria/cerámica. Se pueden encontrar bolitas de Cu oxidadas en la zona de contacto con la cerámica, así como adherencias cotécticas de Cu con domeiquita en la escoria. Cu_2O aparece abundantemente en forma de bolitas que probablemente sean una formación secundaria de metal, con una transición a malaquita. En el proceso los silicatos también se van suprimiendo parcialmente. El sistema de escorias es muy heterogéneo, con una descomposición líquido-líquido intensa. Destaca especialmente la formación de abundante magnetita en formas cristalinas diversas: idiomorfa hasta cotéctica y, por otra parte, en forma de dendritas muy finas.

LM-89381 (Pp. 1160) es una cerámica en proceso de fundición de color gris. La capa de escoria que lleva adherida es heterogénea, parcialmente muy rica en vidrio marrón oscuro, con restos de los silicatos contenidos en la matriz cerámica dentro de la escoria (lám. IIIa). Presenta una gran cantidad de magnetita idiomorfa y de Cu metálico o en forma de bolitas pequeñas o muy dispersas; o de Cu + delafosita + magnetita muy dendrítica, y al mismo tiempo “vidrio” en avanzado estado de alteración. En contacto con el Cu muy disperso se puede encontrar una pequeña cantidad de calcosina con covellina. El cobre, que está muy distribuido, aparece homogéneamente de un color “cobrizo”, excepto en el contacto con la cerámica, donde presenta un color blanco amarillento más claro. En cambio, las inclusiones de mayor tamaño de Cu son heterogéneas o cotécticas con domeiquita y con plata en la cuprita derivada de la descomposición. El cobre oxida secundariamente a Cu_2O . Junto a la espinela hercínica se forman silicatos en forma de prismas largos (ζ piroxeno?).

4.1.3. Escorias

De acuerdo con los criterios en la elección de las muestras cerámicas, la mayoría de ellas, descritas más arriba, también dan información valiosa sobre el proceso metalúrgico de fundición, aunque estén muy contaminadas por las paredes del horno o por las sustancias del recipiente en que realizó la reacción. Las escorias de los dos yacimientos, CB y LM, difieren básicamente en un punto: CB suministra un gran volumen de escorias metalúrgicas compactas y homogéneas que pertenecen a la tecnología del hierro, sin embargo hay muy poca escoria de cobre. Las escorias de LM son todas escorias de cobre, pero —al igual que la única muestra de CB— por regla general consisten en fragmentos muy pequeños y no son homogéneas.

Las escorias de CB abarcan los muestras *CB-13009* (Pp. 1096), *CB-13007* (Pp. 1098), *CB-13007* (Pp. 1099), *CB-11275* (Pp. 1146), *CB-9297* (Pp. 1148), *CB-10027* (Pp. 1149) y *CB-12267* (Pp. 1151) (5), según la tabla 2. Con la excepción de la muestra *CB-13007* (Pp. 1098), se trata de escorias homogéneas de fayalita con una estructura de enfriamiento muy pronunciada, partiendo de una zona de enfriamiento brusco, con numerosas grietas causadas por tensión: (escoria en forma de placas) con una estructura de fayalita orientada de manera uniforme, perpendicular a la superficie, con una tendencia más o menos clara a una estructura de *espinifex*. En aquellos casos en donde no se trata de restos de gotas o de protuberancias, se han formado superficies intermedias de enfriamiento y oxidación. Las escorias son pobres en wüstita, con wüstita predominantemente cotéctica en olivino fayalítico. La wüstita dendrítica contiene numerosas inclusiones de hercinita al mismo tiempo que comienza una inhomogeneidad de hercinita/magnetita. El olivino primario está levemente estructurado en zonas, una segunda generación de olivino está desarrollada de manera desde microlítica a dendrítica en la masa intergranular. Está enriquecido localmente con leucita. La leucita es cotéctica con olivino y cotéctica con wüstita/magnetita. El carácter de la masa intergranular varía de manera considerable en el tamaño de los cristales y en la composición, que va desde finamente cristalina hasta una estructura de vidrio más compacta. Con un poco de esfuerzo se puede encontrar de vez en cuando hierro metálico en forma de algunas pequeñas gotas aisladas. No se han reconocido otros metales. Sin embargo, la masa intergranular contiene numerosos granitos reflectantes de color amarillo claro que posiblemente se traten de pirrotina. A veces, en el borde exterior de las escorias, ligeramente abultado, aparece adherido algo de “vidrio azul”, restos de la pared del horno o granitos de arena de la base que se han fundido.

En contraposición a estas escorias fluidas y homogéneas, el material de la muestra *CB-13007* (Pp. 1098) es una escoria muy heterogénea de wüstita y fayalita. Se aprecia que en un principio existían algunas zonas que contenían mucho hierro metálico de formas de redondeadas a ovaladas que nos indican que posiblemente se trate de una

(5) Toda esta serie de escorias de hierro que fueron halladas en superficie, tanto durante el proceso de excavación como durante la prospección controlada realizada en la campaña de 1986 en la zona más meridional, que por su composición y su avanzada tecnología no están con toda seguridad conectadas con la metalurgia del cobre desarrollada durante la vida del poblado; se sitúan todas ellas en la zona sur, como ya hemos apuntado, al exterior de la zona de cabañas.

reducción *in situ*. Sin embargo, el hierro metálico está casi completamente descompuesto a herrumbre. En la herrumbre se ha conservado una capa superficial de magnetita con hematites que la traspasan localmente. Además, la muestra contiene una gran inclusión de carbón vegetal. Podría tratarse de un producto residual que resulta del tratamiento ulterior del hierro metálico (escoria de forjar en reducción, es decir, la llamada “escoria de forjar”).

CB-683 (Pp. 1147) representa la única escoria de cobre de CB analizada. Se trata de una escoria muy heterogénea, rica en magnetita (fig. 1). Contiene restos de la cerámica fundida, con granos gruesos de cuarzo y de forma redondeada, así como una cantidad considerable de granos de sulfuro de cobre de forma también redondeada. Los sulfuros son calcosina laminar en todas las fases de su transformación a covellina (6) (fig. 6). La escoria contiene grandes áreas de una mezcla de magnetita + sulfuro de cobre, en parte con inclusiones de sulfuro en la espinela. Se ha documentado una formación de silicatos (¿?) entre el sulfuro y la espinela, formándose al final un reborde de sulfuro con un núcleo. Probablemente se trata de burbujas de gas, creadas durante la reacción, que luego se han llenado secundariamente con malaquita e hidratos de óxido ferroso. Las áreas intermedias sin sulfuro contienen mucha magnetita y gotitas de cobre muy finas así como inclusiones de Cu en la magnetita. En algunos puntos el color del cobre tiende a amarillo blanquizco. Las áreas más pobres en espinela contienen más olivino e inclusiones de gotas de sulfuro ricas en hierro muy oxidadas. En algunas zonas encontramos adherencias de cobre metálico. En la transición a las partes más ricas en magnetita la espinela está distribuida claramente en zonas con un componente de hercinita (¿?). Se puede observar algo de leucita, cotéctica con wüstita/magnetita. De forma secundaria tiene infiltraciones con herrumbre, asociada a la descomposición del olivino (fayalítico) y la formación simultánea de malaquita. La formación secundaria de Cu_2O se puede observar sólo en ocasiones aisladas.

El resto de las escorias investigadas proceden de un área localizada al exterior de la zona de hábitat y con toda seguridad son escorias de hierro de época moderna no conectadas con la tecnología del cobre. Las demás muestras de “escoria” provienen del yacimiento de LM.

LM-6034 (Pp. 1216): es una muestra muy rica en sulfuro de Cu, con magnetita + Cu metálico + delafosita y áreas de escoria más silicatadas. Secundariamente se forman cantidades elevadas de cuprita y malaquita. Se observan numerosas cavidades con burbujas, obviamente primarias, que están rellenas con productos de descomposición. El sulfuro de Cu aparece como inclusión en la escoria rica en Fe bien en forma masiva o bien en forma de granos de diferente tamaño. Tiene los colores de oxidación típicos de la “digenita de Fe”. Aparece abundante delafosita en dirección hacia el sulfuro que se va

(6) Esto es seguramente una descripción simplificada con una nomenclatura inspirada por Ramdohr (1975). En el sistema binario Cu-S (MASKE *et al.*, 1971) y también en el sistema Cu-Fe-S se puede esperar primariamente digenita como fase de temperatura alta, en cambio con temperaturas por debajo de aproximadamente 420 °C se puede esperar calcosina, además de las inclusiones de cobre metálico. La transformación a covellina se lleva a cabo en el área de estabilidad de fases de temperaturas bajas, algo que no se ha investigado aquí.

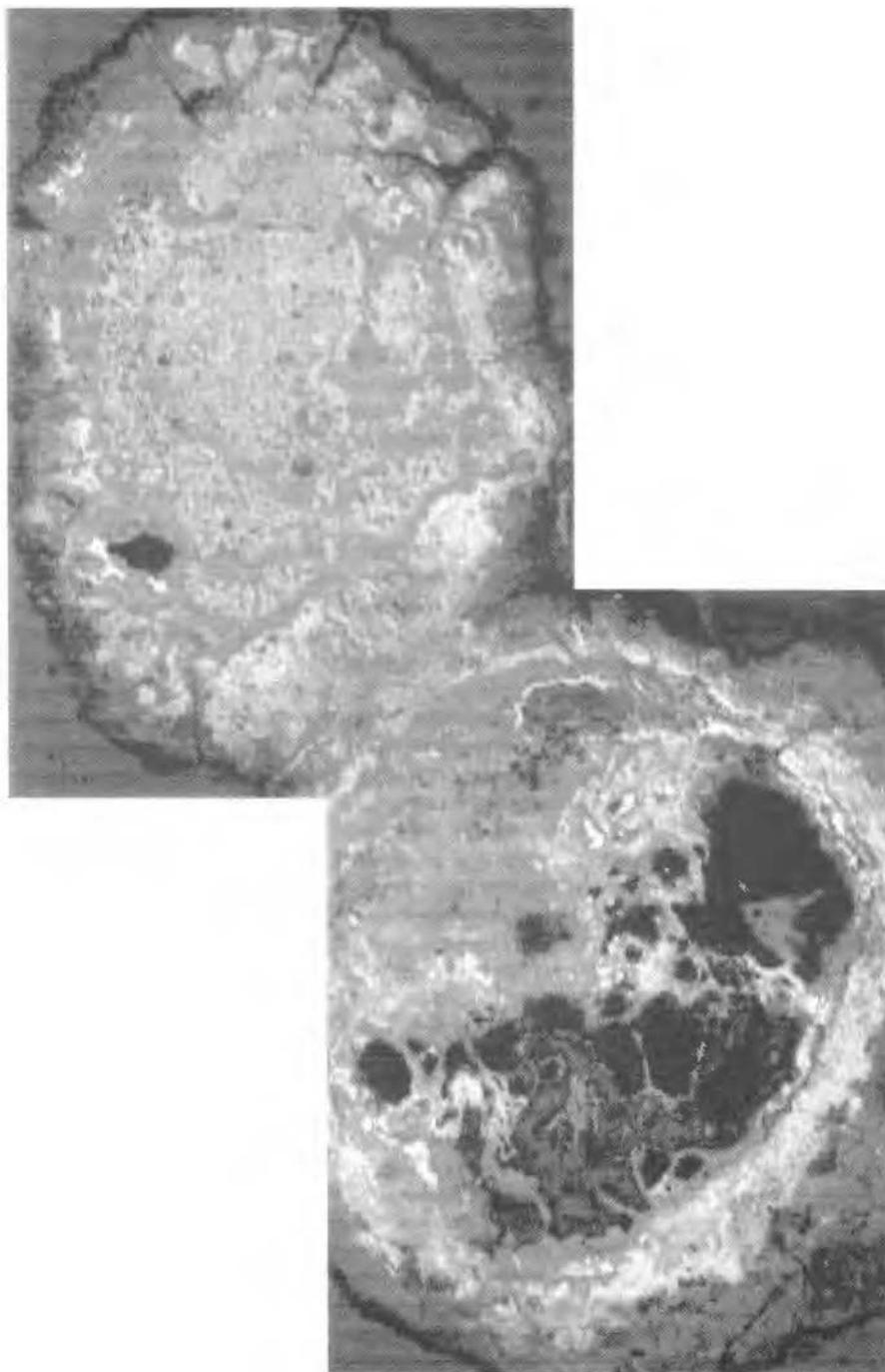


Fig. 1.—CB-683 (Pp. 1147), toma n.º 2311. En la escoria existen inclusiones de mineral de sulfuro de cobre. En las fisuras se aprecia digenita/calcosina en el inicio de su transformación a covellina. Luz reflejada. 1 polarización. Ancho de la toma de aproximadamente 0,28 mm.

disolviendo o bien en el borde de la muestra, en paragénesis con magnetita + Cu. El producto contiene algo de cobre heterogéneo con domeiquita, además de sulfuro de Cu. A menudo el Cu se puede encontrar también como pequeñas inclusiones en la magnetita. En la parte de la muestra que no contiene delafosita se han desarrollado anillos residuales de sulfuro de Cu (ζ ?) alrededor de antiguas gotas mayores de Cu o cavidades de burbujas. Las áreas intermedias ricas en vidrio contienen Cu muy disperso cerca del sulfuro de Cu o de la magnetita. La parte silicatada de la escoria es difícil de observar: es muy rica en vidrio, a veces contiene cristales idiomorfos (ζ olivino?, ζ piroxeno?) y está muy hinchada por productos de descomposición ricos en cobre. El Cu_2O también se convierte igualmente de forma secundaria en covellina.

La muestra *LM-33119* (*Pp. 1219*) está compuesta por una pequeña bolita de escoria y metal descompuesto. Las dos partes están adheridas (lám. IIIb). La descomposición del metal es total, con alrededor de un 40% del volumen de porosidad en los productos de descomposición. Aquí la cantidad de malaquita supera por mucho a la de cuprita. La escoria es rica en magnetita y en Cu_2O . Contiene cobre metálico, tanto en forma de pequeñas inclusiones adheridas a un poco de Cu_2O como en forma de cobre heterogéneo, rico en arsénico. Además existe "digenita de Fe" como inclusión o depósitos redondeados. Son características las inclusiones de Cu en la magnetita. La magnetita presenta parcialmente inclusiones de color claro y de forma laminar (ζ hematites?).

LM-34248 (*Pp. 1221*): es una escoria porosa con magnetita como fase principal, además de Cu_2O y arseniuro de hierro (fase de alimentación FeAs).

Los cristales de Fe y arseniuro se han conservado parcialmente como atolones, con un reborde de magnetita (lám. IVa). Sin embargo, la masa principal de la fase Fe-As está más o menos transformada y en el proceso ha desarrollado estructuras residuales laminares. La escoria contiene muy poco cobre metálico. Aparece en la espinela magnetítica como pequeñas inclusiones, generalmente redondeadas, y al mismo tiempo adherido de forma heterogénea con domeiquita (ζ ?). La magnetita aparece descompuesta marginalmente. Los minerales secundarios están formados por goethita, cuprita, malaquita y productos de transformación que bajo la luz transmitida presentan un color muy claro.

La muestra *LM-36035* (*Pp. 1222*) es una pieza que presenta un tamaño de varios cm^3 procedente de la fundición, con numerosas inclusiones incoloras en forma de bolas. Solamente en muy pocas zonas se encontró una formación de covellina en pequeñas partículas de forma redondeada. En el Cu_2O está incluida localmente una escoria oxidada con una alta proporción de espinela. Por otro lado, el Cu_2S está adherido a una masa compacta de una fase de color pardo rojizo oscuro en forma de varillas (ferrito cálcico), junto a un poco de Cu_2O y malaquita. También se aprecia una gran concavidad de forma redondeada en el sulfuro de cobre, éste está relleno con una mezcla de Cu_2O con malaquita que muestra restos de una estructura dendrítica. El Cu_2S está incluido en forma de bolitas de diferente tamaño que continúan desarrollándose hasta convertirse en finas dendritas. El Cu_2S sólido contiene algunas pequeñas inclusiones redondeadas de metal de Cu. En el agregado del ferrito cálcico, con forma de varillas, aparecen pequeñas inclusiones redondas, posiblemente de la fase Fe-As, en parte en forma de adherencias cotécticas. Al igual que también se encuentran cristales idiomorfos de hercinita (ζ ?) en los cuales se puede reconocer una estructura zonal a través de pequeños depósitos. En esta espinela también se pueden observar inclusiones heterogéneas de cobre. El Cu_2S

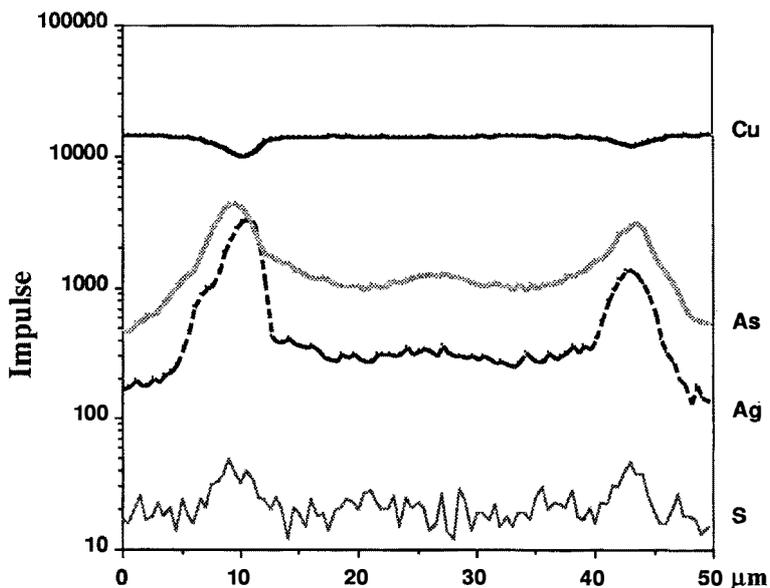


Fig. 2.—Análisis puntual de EMS sobre un cristal de cobre que contiene arsénico. El ámbito intergranular se ha enriquecido con arsénico, plata y sulfuro (haz de rayos, 15, Kv. 10 nA cualitativo).

sólido contiene inclusiones de una “escoria” muy rica en espinela. El área marginal adherida alrededor de la muestra contiene pequeñas partículas de carbón vegetal.

LM-76121 (Pp. 1232): es una bolita porosa con un núcleo rico en Fe y productos de descomposición ricos en Cu metálico situados en la zona más exterior. La parte central es rica en magnetita. En muchas zonas han tomado forma de anillo alrededor de la fase Fe-As dendrítica (atolones). Las áreas de escoria propiamente dichas son muy ricas en arseniuro de hierro, que es altamente reflectante. En la espinela de magnetita se puede encontrar cobre en forma de inclusiones diminutas. Las inclusiones de Cu de mayor tamaño son claramente heterogéneas y posiblemente estén adheridas a domeiquita. En la “escoria” rica en magnetita también pueden verse inclusiones en forma de bolitas, algunas de sulfuro de Cu (covellina). En el centro de la muestra se observan hidratos de óxido ferroso. El borde presenta adherencias de Cu_2O y malaquita, con algunas partículas más grandes de carbón vegetal y granos de minerales pesados, ricos en Fe.

LM-36015 (Pp. 1283). Se trata de una escoria muy heterogénea con una alta proporción de sulfuro de Cu y pueden verse bajo luz transmitida varillas de ferrito cálcico anisótropas de color rojo marrón oscuro. El sulfuro de Cu se ha conservado solamente de forma residual en sus proporciones de covellina (covellina normal), mientras que la proporción de digenita se ha transformado en malaquita prácticamente en su totalidad. La covellina también se está descomponiendo a cuprita en el límite del fragmento analizado sin que se pudiera observar cobre metálico en el proceso. En algunas zonas la escoria propiamente dicha conserva espinela (magnetita) en abundancia. En la magnetita se pueden encontrar numerosas inclusiones de cobre “rojo”, finas y redondas. En las zonas

ricas en silicatos aparece el vidrio Cu muy disperso, junto con piroxeno (ζ ?), y a veces Cu + delafosita. El Cu en vidrio junto a piroxeno (ζ ?) está directamente en contacto con la zona de fundición con el sulfuro (sólido), acompañados de grandes cavidades causadas por desgasificación. El Cu_2O rellena las burbujas de forma secundaria. La escoria contiene en algunos puntos Cu adherido a domeiquita. Los antiguos atolones con un borde que ha desaparecido por oxidación, todavía contienen la fase Fe-As de color blanco-amarillento muy reflectante y altamente anisótropa. Algunos atolones de Fe-As se encuentran mezclados con la covellina de forma redondeada o formas redondas ricas en Fe-As como inclusiones en las masas de sulfuro. Además, se pueden observar áreas con una mezcla compacta de varillas anisótropas de color pardo rojizo (ferrito cálcico).

LM-36016 (Pp. 1284): es igualmente una escoria muy heterogénea, con una inclusión de cobre descompuesto de un tamaño apreciable. Esta inclusión presenta residuos de una estructura dendrítica en el producto de descomposición malaquita- Cu_2O (lám. IVb). El cobre "rojo" no alterado forma inclusiones en la magnetita que está distribuida en forma de varillas o en forma de laminillas más grandes y heterogéneas y que están en proceso de oxidación de manera selectiva hacia una escoria vidriosa. Localmente la escoria silicatada muestra pronunciadas separaciones en la fase líquido-líquido. Contiene también pequeñas inclusiones redondeadas de sulfuro de Cu (covellina). Los hidratos de óxido ferroso ocupan áreas de mayor tamaño, al igual que lo hacen el Cu_2O y la malaquita que se han formado secundariamente.

LM-3610 (Pp. 1286): esta muestra constituye una masa heterogénea estriada de malaquita y cuprita, con zonas más ricas en magnetita, eventualmente con restos de una colada silicatada. En algunas ocasiones se ha conservado metal de Cu en forma de pequeñas inclusiones en la magnetita o en el silicato, en parte más oxidado. Se aprecia que la magnetita se está convirtiendo de forma secundaria en hidratos de óxido ferroso.

LM-76165 (Pp. 1289): también se trata de un producto de fundición heterogéneo, muy descompuesto. Llama la atención las sardinetas formadas por dendritas de sulfuro de Cu (calcosina laminar, parcialmente covellina) alrededor de los agujeros o de los productos de transformación. El color de los productos de transformación ricos en Cu varía mucho, desde un azul verdoso intenso a verdoso o azulado claro. La masa contiene formaciones de atolones (ζ magnetita descompuesta?) que todavía son reconocibles, con un poco de Cu_2S residual en el interior. Los granitos de Fe-As blancos, altamente reflectantes, son frecuentes a veces junto con gotitas de cobre rojo, distribuidas en forma de nubes. En una zona con desintegraciones líquido-líquido y de cupritas secundarias de mayor tamaño y redondeadas se han conservado pequeñas gotas de domeiquita-Cu de carácter heterogéneo.

En cambio, la muestra *LM-89413 (Pp. 1290)* es una escoria, con cobre y cuprita primaria. Se caracteriza por una cristalización selectiva y por una desintegración líquido-líquido. Se forman áreas que están compuestas de maneras distintas: más pobres en delafosita, con gotas metálicas de Cu distribuidas en forma de nubes, y gotas más grandes de cuprita, que probablemente se han formado primariamente, junto con cuprita muy rica en delafosita, muy dispersa y localmente dendrítica. En las dos áreas se cristalizan distintas fases incoloras de silicato que, sin embargo, no han podido ser determinadas de manera más precisa. El cobre observado es homogéneo. La cuprita y la malaquita forman rellenos secundarios en las cavidades.

4.1.4. *Metal*

Numerosas muestras de cerámica y de escoria de CB y LM contienen cobre metálico, como ya se ha indicado. Su contenido en metal, el tamaño de las inclusiones metálicas y la composición del mismo son claramente diferentes. Probablemente la mayoría del metal ya se ha transformado, formando productos secundarios que ahora determinan el carácter de muchas de las escorias analizadas. Bajo la denominación de “metal” se han agrupado las muestras que proceden de fragmentos metálicos de gran tamaño.

Contrario al aspecto que presentan las escorias y las muestras de cerámica escoriadas, que a primera vista es extraordinariamente variado, la imagen de estos metales y objetos metálicos es muy uniforme: según los análisis microscópicos, las diferencias se aprecian en la estructura original y en el grado de descomposición. La mayoría de las muestras están tan descompuestas que casi no se ha conservado cobre residual. En cambio, los productos de descomposición de todos los metales originarios y objetos metálicos todavía contienen algo de plata residual en una distribución muy difusa. Sólo muy pocas de las muestras se pueden considerar metálicas (*CB-8083_b* (Pp. 1150), *LM-61025* (Pp. 1287), *LM-61511* (Pp. 1288)). La distinción entre “metal bruto” y “objetos” esta realizada con criterios arqueológicos. Los “objetos” (tabla 2) se distinguen por una forma exterior especial (artificial) (por ejemplo, sección romboidal en la muestra *LM-33067* (Pp. 1217), y quizás también en *LM-61313* (Pp. 1227), con una sección que va desde redonda a oval-redondeada y/o por una estructura paralela muy pronunciada de los componentes metálicos u oxidados. En cambio, las bolitas de metal o las gotas más pequeñas demuestran una característica estructura de grano redondo o dendrítica. Estas características estructurales también son de esperar en objetos fundidos sin tratamiento mecánico. Por esta razón algunos de los fragmentos más grandes de “metal bruto” que se han investigado aquí también podrían formar partes de objetos fundidos.

La muestra *CB-8083* (Pp. 1150) es la única muestra metálica de CB que hemos analizado. Se trata de un objeto con un núcleo metálico de cobre en gran parte conservado, rodeado de cuprita sólida, malaquita-azurita y capas de un sulfuro de Cu que se ha formado secundariamente. El metal presenta claramente una estructura paralela a lo largo de las superficies planas de la muestra que se continúa en la estructura residual de los productos de la descomposición, cuprita/malaquita. La estructura del metal se caracteriza por cavidades y por las diferentes formas en que se oxidan algunas zonas metálicas. Durante la oxidación se forman en la cuprita inclusiones en forma de placas alargadas, levemente curvadas, y en forma de estrías, de color gris heterogéneo hacia la cuprita, en las cuales también se forman cristalitas de cuprita. Observándolos bajo el campo oscuro de luz reflejada son incoloros o amarillentos, con un relleno de cuprita muy fino, de color amarillo o verde amarillento. En el borde de los agujeros, se superpone por encima de la aleación original cobre no oxidado que se ha formado de manera secundaria. En el campo oscuro de luz reflejada se observa que la zona de cuprita formada directamente a partir del metal es claramente más oscura y estriada que las demás zonas de cuprita. La cuprita contiene plata metálica en partículas más grandes. La forma o el tamaño original del objeto están marcados por un depósito opaco de escaso grosor que cubre casi todo el borde exterior del área de cuprita. Por encima de la cuprita hay sulfuro de Cu en capas con una estructura típica de gel. El sulfuro de Cu (calcosina laminar) se convierte

en covellina y finalmente en malaquita-azurita. En la zona de transformación de cuprita—malaquita-azurita—, sulfuros, observamos algunas áreas que presentan como inclusiones, productos incoloros de descomposición.

Las demás muestras de “metal” provienen del yacimiento de LM.

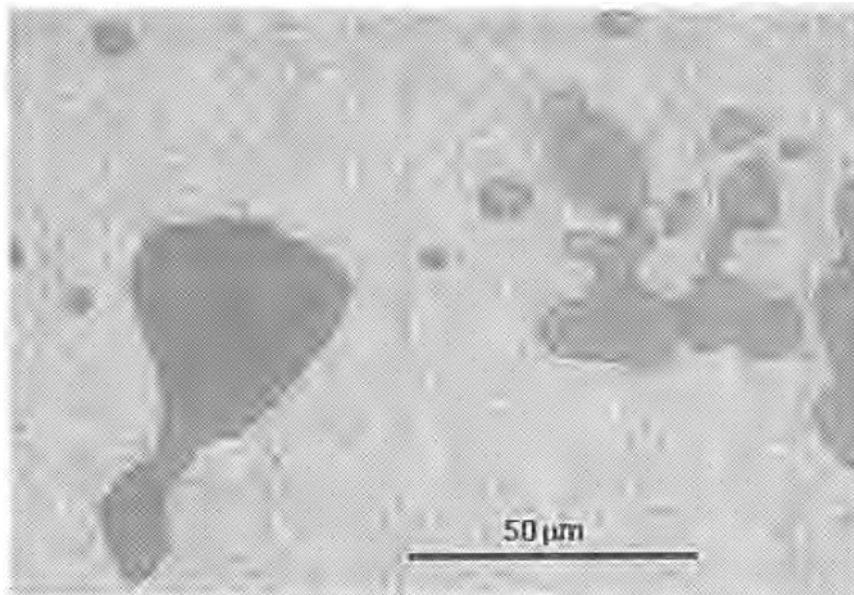
LM-61025 (Pp. 1287): se trata de cobre sólido bien conservado. El metal contiene grandes áreas cotéticas con Cu_2O . En la zona más exterior de la muestra existen además depósitos redondeados de una fase adicional que, bajo luz reflejada, se asemeja bastante a la cuprita (fig. 3a). El metal recién pulido presenta colores claramente distintos que van desde rojo-cobrizo a blanco azulado. Los rebordes de los granos están marcados por domeiquita, y en las zonas más amplias, por una mezcla cotética de $\text{Cu} + \text{domeiquita}$. La domeiquita aparece en combinación con diminutas partículas de plata. En la zona oxidada de la periferia se encuentran zonas más amplias de plata metálica en parte junto a cobre idiomorfo formado secundariamente (lám. Va).

Entre dos cristales de Cu se observa un anillo conteniendo As . El As tiende a concentrarse en las zonas superficiales, lo cual permite contener el proceso de oxidación.

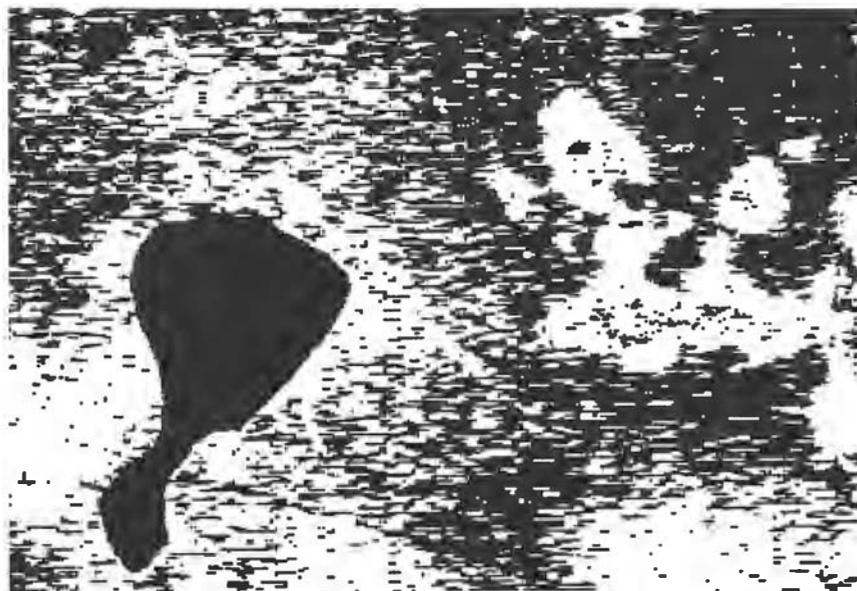
El cobre de *LM-61511 (Pp. 1288)* se encuentra en una fase de descomposición selectiva. La corrosión del metal empieza en los centros de los cristalitos donde se forman cavidades, con lo cual las áreas intergranulares se conservan en un primer momento. La muestra no contiene cuprita primaria. En la cuprita secundaria, formada por descomposición, se encuentra plata residual. A la superficie original del objeto se superpone otra adherida que contiene cuprita con todas las transiciones hacia la malaquita. La superficie adherida tiene incrustadas partículas de polvo de carbón vegetal.

Las características mecánicas y químicas de estas partes metálicas son también típicas en las demás muestras descompuestas de este conjunto de material. La corrosión de metales no deformados causa formas dendríticas (por ejemplo, *LM-61286 (Pp. 1225)*, *LM-61497 (Pp. 1229)*). Metales expandidos dejan entrever la típica estructura paralela, aunque la cuprita secundaria de la primera fase de descomposición sólo se conserva en forma residual en la malaquita, por reacciones sucesivas (*LM-24111 (Pp. 1281)*). La superficie original del metal viene marcada por capas de cuprita especialmente masivas o por un reborde estrecho de fases opacas de grano muy fino. Sobre esta superficie se forma una adherencia compuesta por numerosas capas de cuprita y malaquita en forma de gel, a veces con bandas finas de sulfuros de Cu secundarios de grano fino. La superficie adherida precipita también grandes cantidades de productos incoloros de descomposición. En su mayoría, los granitos opacos que se observan son partículas de carbón vegetal y a veces granos de minerales pesados ricos en hierro.

LM-33118 (Pp. 1282): es una muestra que ofrece una particularidad. Se trata de un metal completamente descompuesto sin deformación visible. Los productos de descomposición son cuprita y malaquita. En ellos se han mantenido fases residuales de límites de granos con una estructura cotética (lám. Vb). Estas fases son traslúcidas de color marrón muy oscuro, y bajo luz reflejada presenta coloración azulada en las proximidades de la cuprita. Probablemente se trata de un fenómeno de transición que conduce desde la corrosión selectiva a la desaparición total del cobre metálico.



a



b

Fig. 3.—a) *LM-61025 (Pp. 1287)*. Inclusiones redondeadas de fases oxidantes en cobre metálico. Fotografía en B/N de una toma en color de luz reflejada digitalizada. b) *LM-61287 (Pp. 1287)*. Separación cromática azul/rojo del original en rojo de la Fig. 3a. Rojo= coloreado en rojo. Blanco= coloreado en azul. Tanto el cobre de la masa básica como las inclusiones de las zonas que se han podido aislar muestran claras diferencias de color. El cobre de color rojizo pobre en arsénico contiene cuprita de color azul. En el cobre rico en arsénico de color azul existen inclusiones de “una fase de $\text{Cu}_2\text{O-As}_2\text{O}_3$ ” de color rojo.

4.2. Existencia de fases y composición química

4.2.1. Menas

Una revisión crítica de las muestras que se han considerado menas, pone en evidencia que prácticamente no se ha conservado en los hallazgos materia prima inalterada que se hubiera podido utilizar para un proceso de fundición de cobre. Los más adecuados para esto serían los pequeños fragmentos de los productos de descomposición óxido-hidróxido, fácilmente alterables. No se hicieron análisis químicos de ellos. La pirita, que está descompuesta, indica que se trata de productos naturales. Pero también podrían ser el resultado de la alteración de las muestras ricas en sulfuro de cobre, mejor conservadas dentro del material recuperado. Sin embargo, no se trata de materia prima inalterada sino de restos de un proceso de fundición (7). A pesar de esto, su composición permite sacar indirectamente algunas conclusiones, al menos parcialmente, de las menas originales.

El producto de la fundición denominado “mena” contiene sulfuro de cobre pobre en Fe, además de fases ricas en hierro-ferrito cálcico y espinela magnética. El sulfuro contiene algo de arsénico, subordinadamente antimonio y plata. Tanto el ferrito de Ca como la espinela están enriquecidos con cinc. En algunos casos aislados se pueden comprobar adherencias de sulfuro de Fe-Zn a sulfuro de Cu (*LM-33119 (Pp. 1219)*). La espinela contiene cantidades de Cu y de magnesio superiores al promedio. En el sulfuro de Cu existen inclusiones aisladas, ricas en cloruros, y también nuevas formaciones de cobre metálico, además de pequeñas cantidades de arseniuros de hierro y algo de pirrotina rica en Cu. El alto contenido en hierro de los productos de fundición es prueba de que deben proceder de una materia prima con una composición compleja. Lo mismo sugieren los altos contenidos en Ca del ferrito dicálcico o el Mg y el Zn en las espinelas analizadas (tablas 4 y 5). Los contenidos en arsénico encontrados en el sulfuro sugieren que hay una proporción de arsénico en torno a un 1% de su peso en el cobre metálico. Sin embargo, la composición del metal requiere claramente una materia prima con un mayor contenido en As. Aparte de unas escasas impurezas, no se ha demostrado que haya plomo. La cuprita, que aparece de manera abundante en las muestras de CB y LM, no se trata con seguridad de ninguna mena fundida sino, en su mayor parte, de un “mineral de mena formado secundariamente”. Su composición es interesante, ya que se forma directamente del cobre metálico (tabla 9).

4.2.2. Cerámica

La cerámica de carácter pirometalúrgico de CB y LM está representada solamente por fragmentos de recipientes cerámicos. Entre ellos no se encontró ninguna muestra que

(7) En Hook *et al.* (1991) se apunta que: “The ores being processed were found to be arsenic-containing copper ores...”. Habría que hacer suposiciones adicionales a este planteamiento general. Se puede debatir si ya estaban oxidadas las menas originalmente sulfúricas/arseniúricas en el momento de su utilización y en qué medida lo estaban.

TABLA 4
ANALISIS-SEM DE LOS SULFUROS (% peso específico)

Sulfuro de cobre masivo											
<i>N.º Análisis</i>	<i>N.º Preparado</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Ni</i>	<i>Ag</i>	<i>Pb</i>	<i>Zn</i>	<i>S</i>	<i>As</i>	<i>Sb</i>	<i>Total</i>
5280	1216	75,72	0,15	n.b.	0,07	0,00	0,04	22,11	0,60	0,00	98,69
5281	1216	76,61	0,37	n.b.	0,14	0,00	0,01	21,48	0,18	0,01	98,80
5267	1222	77,91	0,14	n.b.	0,01	0,00	0,03	20,26	0,89	0,04	99,28
5266	1222	77,90	0,02	n.b.	0,09	0,00	0,00	20,16	0,53	0,04	98,74

Inclusiones de sulfuro en parte con núcleos ricos en Zn											
<i>N.º Análisis</i>	<i>N.º Preparado</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Ni</i>	<i>Ag</i>	<i>Pb</i>	<i>Zn *)</i>	<i>S</i>	<i>As</i>	<i>Sb</i>	<i>Total</i>
9125	1219	79,71	0,12	0,03	0,08	0,02	0,57	19,18	0,29	0,00	99,43
9126	1219	6,03	12,54	0,07	0,07	0,00	50,18	30,80	0,31	0,00	49,82
9127	1219	29,46	8,25	0,08	0,03	0,00	33,49	28,25	0,44	0,00	66,51
9128	1219	78,86	0,10	0,02	0,05	0,00	1,33	19,42	0,22	0,00	98,67

* Análisis parciales, la suma es igual a la de los elementos analizados, Zn diferencia respecto a 100.

se pudiera interpretar como restos de horno de fusión en el cual se hubieran realizado procesos de fundición sin la mediación de tales recipientes. Basándose en este hecho se puede suponer que las transformaciones pirometalúrgicas se han llevado a cabo exclusivamente, o por lo menos en su mayoría, en recipientes cerámicos. Con ello estos recipientes asumen todas las funciones mecánicas, térmicas y sobre todo químicas que en procesos metalúrgicos de épocas posteriores corresponden a la pared de horno. En efecto, la sustancia cerámica participa directamente en la formación de la colada y de las escorias metalúrgicas, asumiendo el papel de fundente en el proceso. Las condiciones bajo las cuales se llevan a cabo las transformaciones son en parte muy oxidantes y en parte muy reductoras. En el caso normal sobre zonas fuertemente oxidadas, se les superponen otras reductoras. Las transformaciones en el fragmento cerámico son tan intensas que bajo condiciones reductoras extremas tienen lugar formaciones de escorias y reducción a hierro metálico incluso sin la participación directa del contenido del recipiente (lám. IIa). En contacto con el contenido del recipiente se funde la cerámica. Esta capa de fundición o está cubierta de manera discontinua por la colada de la escoria o existe una zona de transición delgada con inclusiones más o menos intensas. Por esta razón el fragmento cerámico se funde (lám. IIb y IIIa): el cuarzo se conserva de forma residual, los filosilicatos ricos en hierro se transforman en escoria, y en este proceso se forman bien los característicos cordones de magnetita o bien vidrio de color marrón muy oscuro. Sin embargo, el contenido en hierro de la cerámica no es tan alto como para justificar la presencia de las fases ricas en hierro en las menas residuales fundidas, como se ha indicado anteriormente, y en las escorias. En cambio, los contenidos en Al_2O_3 y MgO de los componentes de la cerámica probablemente constituyen un factor importante en la composición de la colada (tabla 6). Restos de conchas de caracoles que se conservan ocasionalmente en algunos puntos de la cerámica (*LM-89343 (Pp. 1153)*) pueden

TABLA 5

ANALISIS-SEM DE LOS FRAGMENTOS DE ESCORIAS OXIDADAS (% peso específico)

Ca-Fe-Oxido = C2F, Ferrito dicálcico procedente de sulfuros de cobre masivo											
<i>N.º Análisis</i>	<i>N.º Preparado</i>	<i>SiO2</i>	<i>TiO2</i>	<i>Al2O3</i>	<i>Fe2O3</i>	<i>CaO</i>	<i>MgO</i>	<i>NiO</i>	<i>Cu2O</i>	<i>ZnO</i>	<i>Total</i>
8397	1222/1	0,98	0,09	0,57	55,57	41,34	0,00	0,00	0,19	0,64	97,76
8398	1222/1	0,69	0,00	0,45	57,31	36,55	1,19	0,07	1,75	1,82	97,32
8403	1222/1	1,31	0,18	0,47	53,88	40,78	0,00	0,02	0,61	1,05	95,94
8405	1222/1	0,45	0,00	0,26	57,75	41,14	0,00	0,00	0,46	0,00	99,61
8407	1222/1	0,46	0,02	0,07	57,53	40,75	0,00	0,00	1,27	0,26	99,64
Espinela procedente de inclusiones de escoria en sulfuro de cobre masivo											
<i>N.º Análisis</i>	<i>N.º Preparado</i>	<i>SiO2</i>	<i>TiO2</i>	<i>Al2O3</i>	<i>FeO</i>	<i>CaO</i>	<i>MgO</i>	<i>NiO</i>	<i>Cu2O</i>	<i>ZnO</i>	<i>Total *</i>
8383	1222/1	0,06	0,00	0,09	80,84	0,05	2,83	0,13	0,61	7,67	92,27
8384	1222/1	0,11	0,01	0,10	68,56	1,24	3,15	0,07	8,61	5,98	87,82
8385	1222/1	0,06	0,07	0,67	79,32	0,70	5,43	0,24	2,76	4,92	94,16
8386	1222/1	0,02	0,03	1,04	75,54	0,91	7,73	0,40	1,96	5,29	92,93
8387	1222/1	0,03	0,00	0,10	78,38	0,09	3,00	0,06	0,76	8,46	90,89
8388	1222/1	0,09	0,04	0,11	80,31	0,06	2,72	0,38	0,61	7,73	92,05
8389	1222/1	0,08	0,00	0,13	80,33	0,06	2,62	0,17	0,71	7,34	91,43
8390	1222/1	0,09	0,02	0,07	79,38	0,28	3,23	0,19	1,12	7,93	92,31
8391	1222/1	0,07	0,00	0,12	78,53	0,58	3,19	0,27	1,60	7,87	92,23
8392	1222/1	0,12	0,01	0,45	71,71	1,17	1,06	0,21	5,83	6,90	87,46
8393	1222/1	0,06	0,01	0,74	80,76	0,71	1,75	0,65	5,71	4,01	94,39
8394	1222/1	0,08	0,01	0,98	78,77	0,42	1,68	0,92	10,43	1,95	95,24
8395	1222/1	0,11	0,00	0,93	84,36	0,53	1,77	0,86	3,06	1,75	93,37
8396	1222/1	0,06	0,00	1,43	80,29	0,72	2,26	0,89	4,76	2,49	92,90
8399	1222/1	0,98	0,12	1,97	63,69	0,20	6,05	1,48	5,59	11,67	91,73
8400	1222/1	0,04	0,03	2,43	60,72	0,32	10,23	1,90	4,68	10,90	91,24
8401	1222/1	0,06	0,05	2,49	60,05	0,24	10,00	1,67	5,25	9,83	89,63
8402	1222/1	0,00	0,06	1,66	69,92	0,79	7,49	0,62	0,78	10,59	91,91
8404	1222/1	0,06	0,00	0,41	75,45	1,72	1,67	0,03	0,46	11,87	91,66
Espinela procedente de escoria de cobre											
<i>N.º Análisis</i>	<i>N.º Preparado</i>	<i>SiO2</i>	<i>TiO2</i>	<i>Al2O3</i>	<i>FeO</i>	<i>CaO</i>	<i>MgO</i>	<i>NiO</i>	<i>Cu2O</i>	<i>ZnO</i>	<i>Total *</i>
8408	1283	0,00	0,00	1,91	69,91	0,89	0,88	0,45	3,13	15,42	92,59
8410	1283	0,11	0,00	2,13	64,62	0,81	1,69	0,51	7,72	15,81	93,39
8411	1283	0,00	0,00	1,12	72,24	1,47	0,45	0,14	2,87	12,93	91,21
8412	1283	0,00	0,00	0,41	73,86	2,71	1,77	0,31	1,18	10,29	90,52
8413	1283	0,02	0,00	0,56	79,19	2,41	1,34	0,18	0,15	8,28	92,13
8414	1283	0,01	0,03	0,40	80,09	2,20	1,45	0,07	1,09	6,30	91,64
8415	1283	0,07	0,07	2,60	78,29	0,19	0,65	0,16	2,48	8,76	93,27
8416	1283	0,02	0,04	0,89	77,98	0,18	0,74	0,26	6,18	6,86	93,13
8417	1283	0,00	0,00	1,31	75,59	2,01	0,43	0,09	3,34	9,80	92,56

* Total realizado sobre los análisis en bruto sin tener en cuenta el grado de oxidación.

justificar que una determinada cantidad de CaO derivaría directamente de la pared del recipiente. Al enfriarse aparecen intensos fenómenos de alteración en la escoria, probablemente causados por la alta proporción de filosilicatos presentes en la cerámica y

en combinación con componentes de ceniza (K_2O , etc.), eventualmente fundentes (Keesmann *et al.*, 1990).

4.2.3. Escorias

Las escorias fluidas y homogéneas de hierro de CB son probablemente “modernas” y con toda probabilidad no pertenecen al contexto de la tecnología de la Edad del Cobre. Las escorias de cobre de los dos yacimientos son generalmente muy heterogéneas y fragmentadas. El fraccionamiento mecánico puede ser en parte el resultado de la transformación secundaria muy intensa durante su periodo de deposición. La heterogeneidad química es el resultado de transformaciones pirometalúrgicas: durante la fase de calentamiento se alcanzaron únicamente transformaciones en las superficies contiguas y el producto se mezcló mecánicamente. Ya en estado caliente, tuvo lugar una homogeneización muy incompleta.

De ninguno de los dos yacimientos se conocen escorias homogéneas y capaces de fluir en distancias centrimétricas. Si las muestras investigadas son realmente representativas del proceso, el producto estaría formado por una mezcla de mena en proceso de transformación, escoria silicatada y metal en diferentes cantidades. Durante el enfriamiento tuvieron lugar intensos procesos de desintegración en la parte silicatada. La descomposición posterior ha modificado con carácter perdurable la composición de la materia y ha hecho que finalmente a partir de los productos ricos en cobre se hayan formado de nuevo paragénesis de mineral: cuprita, malaquita,... Su interpretación pirometalúrgica en recipientes de mayor tamaño sólo se puede hacer basándose en los restos de la estructura. Sin embargo, generalmente en áreas muy pequeñas, en las fases originales se han conservado silicatos, óxidos y metales. Además existen fases adicionales en las escorias que, según las muestras analizadas, no se pueden interpretar de forma clara como productos de la fundición de la escoria o de la descomposición de la misma, por ejemplo, fases de Ca-As y silicatos de Cu.

Los silicatos “normales” de la escoria se conservan mejor en capas sobre la cerámica. En la tabla 6 están recogidos los componentes principales de los silicatos de las capas de la escoria que se superponen a la cerámica, procedentes de los dos yacimientos. La elección no estuvo determinada por el lugar de procedencia de las muestras, sino por un criterio tecnotipológico en base al interés de los hallazgos de los dos yacimientos, después de obtener los hallazgos cualitativos, según esto posiblemente se trate de dos líneas tecnológicas que se diferencian tanto en su contenido en CaO como también en su contenido en SiO_2 : escorias de piroxeno y escorias de olivino. El bajo contenido en CaO del olivino demuestra que no se trata solamente de una diferencia en relación con la cantidad de SiO_2 procedente de la sustancia cerámica. La ferro-wollastonita de LM-89418 (Pp. 1157) es a la vez un indicio del contenido realmente muy alto en CaO de la colada y de la temperatura comparativamente alta de trabajo: La masa principal de las partes silicatadas en las escorias de piroxeno no está compuesta de manera eutéctica. Los piroxenos hedenbergíticos se diferencian de la wollastonita-Fe por un contenido sustancialmente más alto de P_2O_5 (sustitución isomorfa de Si^{IV} por P^V) y por un contenido claramente más alto de TiO_2 . Ello a su vez demuestra que los piroxenos se han crista-

lizado directamente durante el proceso de fundición donde se enriquecen en estos dos óxidos, con temperaturas <1000 °C. En cambio, el contenido en MnO de las wollastonitas es mucho más alto (8).

El componente cristalino principal de las escorias más pobres en CaO es olivino fayalítico. En la mayoría de las muestras está ya muy oxidado e hidratado. Su composición llama la atención por su bajo contenido en CaO. El contenido en MgO está un poco más elevado, pero semejante al contenido en MgO de los piroxenos y de las wollastonitas de Fe.

Parece que los filosilicatos (cloríticos) de la sustancia cerámica son proveedores importantes de MgO (tabla 6). La colada residual (“vidrio” o masa intergranular) es muy rica en potasio, en comparación con Na_2O presente. A veces contiene cristales de leucita. El bajo contenido en Na_2O excluye prácticamente el uso de halita como fundente. Por esta razón es imposible explicar directamente el contenido en cloruro encontrado una y otra vez en el microanálisis realizado en las muestras de CB y LM. Probablemente se puede considerar secundario como un componente de las formaciones de descomposición.

Los óxidos primarios son sobre todo ferrito cálcico, espinelas, delafosita y cuprita.

El ferrito cálcico es característico en las muestras ricas en sulfuros y en algunos casos incluso constituye la fase principal. Las espinelas son componentes característicos de las escorias investigadas. Según los análisis ópticos realizados, su composición varía ampliamente. Se observaron espinelas ricas en Al que, por el momento, no se han analizado. Las espinelas ricas en hierro, como pueden observarse en la tabla 5, proceden de una mena fundida con componentes de escoria (*LM-36035 (Pp. 1222)*), o de una escoria heterogénea, rica en sulfuro (*LM-36015 (Pp. 1283)*). Se caracterizan por composiciones muy variables. Al alto contenido en hierro corresponde un contenido en magnetita de cristales de tamaño muy pequeño. Falta por completo el componente de hercinita, es decir, las espinelas son extremadamente pobres en Al_2O_3 . En cambio, los contenidos en ZnO son parcialmente muy altos. Esto se aplica tanto a la espinela de las inclusiones de escoria en mena sulfúrica como a la espinela de la escoria rica en sulfuro. En ambos casos también son muy altos los contenidos en CuO, proporcionalmente alto es el % calculado para el componente de cuproespinela. Las escorias que se superponen a la cerámica contienen una cantidad especialmente elevada de delafosita. Su paragénesis con magnetita y cobre o cuprita son claros indicios del potencial elevado de oxígeno y de la composición química variable de las escorias (lám. IIb). Aparte de la cuprita que se ha formado secundariamente a partir de la abundante presencia de cobre metálico, el Cu_2O también aparece como un componente primario de la escoria. Solamente se

(8) Hook *et al.* (1991): “The slag layers were found to be rich in copper, arsenic, iron, and calcium in addition to silica. Zink and manganese concentrations are also relatively high”. Sin embargo, en este trabajo no se indican ni los contenidos absolutos de manganeso ni las áreas donde han encontrado el contenido más alto de Mn. Sólo se supone que el origen de Mn es la ceniza del combustible. Según nuestros análisis, el contenido en Mn incluso en las fases más ricas en manganeso (wollastonitas de Fe) no llega al 1% del peso y por regla general es mucho más bajo que el contenido en magnesio. Controles continuos y cualitativos de EDS durante las mediciones EMS no mostraron indicios de manganeso como elemento principal, así que al final renunciamos a hacer una determinación rutinaria de manganeso.

TABLA 6
ANÁLISIS-SEM DE LOS SILICATOS (% peso específico)

Piroxeno													
<i>N.º Análisis</i>	<i>N.º Preparado</i>	<i>SiO₂</i>	<i>TiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>FeO</i>	<i>MnO</i>	<i>MgO</i>	<i>CaO</i>	<i>ZnO</i>	<i>Na₂O</i>	<i>K₂O</i>	<i>P₂O₅</i>	<i>Total</i>
8661	1157	36,44	0,04	1,66	32,50	0,30	1,50	20,69	1,42	0,12	0,00	0,34	95,01
8662	1157	37,19	0,04	1,50	31,17	0,33	2,00	21,12	1,04	0,10	0,03	0,50	95,02
8663	1157	38,44	0,11	1,49	30,47	0,24	2,53	21,58	0,86	0,10	0,01	0,53	96,36
8665	1157	37,15	0,06	1,49	32,29	0,28	1,85	21,36	0,95	0,17	0,00	0,59	96,19
8666	1157	37,48	0,04	1,43	30,87	0,18	1,97	21,28	0,91	0,12	0,00	0,53	94,81
8667	1157	38,05	0,05	1,60	31,30	0,30	1,78	21,23	1,13	0,17	0,01	0,42	96,04
8668	1157	36,86	0,08	1,55	29,64	0,26	2,01	20,71	0,82	0,18	0,03	0,56	92,70
8669	1157	40,17	0,04	1,66	29,04	0,48	2,63	21,38	0,84	0,14	0,00	0,31	96,69
8670	1157	39,16	0,05	1,74	30,00	0,30	2,10	21,88	1,05	0,18	0,00	0,44	96,90
8671	1157	43,75	0,06	2,55	27,17	0,32	0,78	17,19	1,17	0,31	0,72	0,53	94,55
Wollastonita													
<i>N.º Análisis</i>	<i>N.º Preparado</i>	<i>SiO₂</i>	<i>TiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>FeO</i>	<i>MnO</i>	<i>MgO</i>	<i>CaO</i>	<i>ZnO</i>	<i>Na₂O</i>	<i>K₂O</i>	<i>P₂O₅</i>	<i>Total</i>
8672	1157	49,41	0,02	0,13	15,83	0,91	2,39	30,15	0,97	0,02	0,03	0,07	99,93
8673	1157	50,05	0,00	0,05	13,18	0,95	2,82	30,82	1,08	0,02	0,00	0,00	98,97
8674	1157	50,71	0,01	0,01	10,93	0,94	2,24	34,17	0,80	0,03	0,02	0,07	99,93
8675	1157	49,71	0,00	0,06	13,18	1,02	2,44	31,12	0,87	0,06	0,01	0,05	98,52
Olivino													
<i>N.º Análisis</i>	<i>N.º Preparado</i>	<i>SiO₂</i>	<i>TiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>FeO</i>	<i>MnO</i>	<i>MgO</i>	<i>CaO</i>	<i>ZnO</i>	<i>Na₂O</i>	<i>K₂O</i>	<i>P₂O₅</i>	<i>Total</i>
8677	1147	29,52	0,00	0,14	58,96	0,03	2,17	0,22	0,00	0,05	0,34	0,08	91,51
8680	1147	29,40	0,00	0,12	65,34	0,04	2,21	0,05	0,00	0,06	0,00	0,20	97,42
8681	1147	29,62	0,02	0,08	63,85	0,01	2,37	0,07	0,26	0,00	0,01	0,08	96,37
8682	1147	30,45	0,02	0,06	60,25	0,09	6,26	0,06	0,00	0,02	0,00	0,06	97,27
8684	1147	30,09	0,01	0,10	61,97	0,15	4,67	0,07	0,16	0,02	0,00	0,07	97,31
Cerámica fundida													
<i>N.º Análisis</i>	<i>N.º Preparado</i>	<i>SiO₂</i>	<i>TiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>FeO</i>	<i>MnO</i>	<i>MgO</i>	<i>CaO</i>	<i>ZnO</i>	<i>Na₂O</i>	<i>K₂O</i>	<i>P₂O₅</i>	<i>Total</i>
8686	1147	34,39	0,04	21,32	30,61	0,25	12,49	0,09	0,09	0,05	0,20	0,03	99,56
"Vidrio", masa intergranular													
<i>N.º Análisis</i>	<i>N.º Preparado</i>	<i>SiO₂</i>	<i>TiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>FeO</i>	<i>MnO</i>	<i>MgO</i>	<i>CaO</i>	<i>ZnO</i>	<i>Na₂O</i>	<i>K₂O</i>	<i>P₂O₅</i>	<i>Total</i>
8678	1147	49,24	0,02	8,62	24,10	0,00	0,03	11,07	0,03	0,66	1,01	0,90	95,68
8683	1147	46,39	0,43	16,34	30,54	0,13	0,25	2,37	0,12	0,15	1,39	0,22	98,33
8685	1147	47,27	0,37	16,11	27,50	0,05	0,54	1,64	0,00	0,28	1,74	0,35	95,85
8687	1147	49,16	0,08	13,72	28,28	0,05	0,10	3,90	0,00	0,24	2,10	0,29	97,92

pueden interpretar de manera indirecta si las bolas de mayor tamaño de la cuprita proceden de forma primaria o secundaria de la paragénesis. En cambio, la cuprita muy dispersa en la escoria rica en vidrio es inequívocamente un producto primario de la oxidación.

4.2.4. Metal

De los hallazgos arqueometalúrgicos se pueden deducir tres puntos claves de la metalurgia del cobre de CB y LM:

1. Producción de metal.
2. Obtención de la materia prima adecuada.
3. Producción de objetos metálicos.

La producción de metal está relacionada con las menas y las escorias de manera más directa y en mayor grado que los dos siguientes puntos. El metal bruto, la materia prima y los objetos están generalmente tan descompuestos que sólo algunas muestras nos permiten realizar observaciones de conjunto. Sin embargo, a partir de observaciones aisladas se puede obtener un cuadro que, de manera general, puede ser característico de la metalurgia del cobre de ambos yacimientos. Los contenidos en arsénico del metal corresponden a una aleación de cobre y arsénico con un contenido en arsénico que excede el ámbito de homogeneidad de cobre ($As >$ aproximadamente 7% del peso). En algunas muestras, el cobre, con un contenido medio en arsénico, tiene contenidos en hierro que se acercan ya a un equilibrio entre cobre y hierro metálico (tabla 7). Aunque se forme hierro metálico en el proceso de la producción de cobre (en algunas muestras anteriormente comentadas), hasta el momento no se ha podido demostrar que éste constituya una fase independiente en el cobre de CB y LM.

El contenido en As del cobre aumenta en un primer momento de manera continua desde el núcleo de los cristallitos de Cu hacia el borde y eleva después el contenido en domeiquita (Cu_3As , tabla 8), fig. 2. A la vez, el contenido en elementos “extraños” aumenta su %: Pb, Sb, S. Las estructuras cotécticas que habría que esperar en esta zona, sólo aparecen allí donde la zona eutéctica es suficientemente ancha y donde el área central no está sobreestampada por la cristalización acumulativa procedente del cobre. El caso es diferente en las inclusiones pequeñas de cobre dentro de la escoria o sobre la cerámica: aquí se pueden observar, como inclusiones independientes, los pasos desde el Cu-As eutéctico a cobre rico en arsénico reflectante de color amarillo, hasta cobre puro (rojo). El cobre de CB y LM claramente contiene plata. Los contenidos más elevados en arsénico están a la vez relacionados con los contenidos más elevados en plata. En las zonas más ricas en arsénico la aleación contiene inclusiones de plata metálica pura (9).

(9) Según los análisis globales de Hook *et al.* (1991), el contenido en plata del cobre de CB y LM está muy por debajo del 0.5% del peso y por ende claramente dentro del área de homogeneidad (de temperatura alta) en el sistema Cu-Ag. En el sistema Cu-As-Ag estos pequeños contenidos en plata están enriquecidos localmente de manera eutéctica hasta plata metálica. Durante la corrosión del metal la plata constituye la última fase metálica antes de llegar a la oxidación completa (Ag_2O , tabla 9). Si se siguiera la argumentación de Ryndina y Yakhontova de 1985 (citado según Muhly, 1989) y de Muhly (1989), las incrustaciones de plata observadas deberían indicar el uso de cobre nativo. El contenido total en plata de las leznas de Tell Maghzaieh es parecido al de nuestras aleaciones. Desgraciadamente, los análisis espectrográficos citados por Muhly no contienen datos sobre el contenido en As. Es cierto que el metal investigado por nosotros tiene como base un proceso de fundición de menas. Nuestras observaciones de cobre en proceso

TABLA 7
ANALISIS-SEM DE LOS METALES (% peso específico)

Cobre												
<i>N.º Análisis</i>	<i>N.º Preparado</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Ni</i>	<i>Ag</i>	<i>Pb</i>	<i>Zn</i>	<i>S</i>	<i>As</i>	<i>Sb</i>	<i>Cl</i>	<i>Total</i>
5268	1222	91,70	4,54	n.b.	0,23	0,06	0,38	0,32	3,30	0,79	n.b.	101,32
5273	1216	98,15	2,65	n.b.	0,05	0,00	0,00	0,05	0,28	0,00	n.b.	101,18
5274	1216	96,14	4,80	n.b.	0,08	0,00	0,11	0,00	0,23	0,00	n.b.	101,36
5277	1216	95,82	2,28	n.b.	0,03	0,01	0,07	0,01	2,35	0,03	n.b.	100,60
5278	1216	93,91	2,76	n.b.	0,14	0,00	0,00	0,01	4,40	0,52	n.b.	101,74
5279	1216	89,00	4,93	n.b.	0,02	0,00	0,00	0,02	6,95	0,53	n.b.	101,45
8421	1288	100,06	0,03	0,02	0,09	0,00	0,00	0,01	0,96	0,05	0,03	101,25
8422	1288	96,66	0,00	0,00	0,48	0,03	0,01	0,01	3,45	0,00	0,00	100,64
8427	1287	99,42	0,03	0,09	0,15	0,04	0,00	0,01	0,29	0,00	0,01	100,04
8429	1287	100,53	0,04	0,00	0,35	0,07	0,00	0,00	0,72	0,00	0,00	101,71
8430	1287	100,26	0,01	0,01	0,19	0,00	0,00	0,00	0,42	0,01	0,00	100,90
8432	1287	99,88	0,00	0,04	0,56	0,00	0,00	0,03	1,04	0,00	0,00	101,55
8434	1287	99,75	0,00	0,03	0,34	0,12	0,00	0,00	0,85	0,03	0,02	101,14
8441	1287	90,34	0,00	0,00	2,10	0,00	0,04	0,00	7,84	0,07	0,02	100,41
8442	1287	90,65	0,00	0,00	2,34	0,00	0,04	0,00	7,98	0,07	0,00	101,08
8472	1284	98,72	2,46	0,01	0,15	0,00	0,04	0,00	0,20	0,00	0,01	101,59
9168	1288	98,48	n.b.	0,07	0,29	0,00	n.b.	0,01	2,28	0,04	n.b.	101,17

Plata												
<i>N.º Análisis</i>	<i>N.º Preparado</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Ni</i>	<i>Ag</i>	<i>Pb</i>	<i>Zn</i>	<i>S</i>	<i>As</i>	<i>Sb</i>	<i>Cl</i>	<i>Total</i>
5269	1222	30,26	0,03	n.b.	62,72	0,03	0,00	0,09	0,00	0,00	n.b.	93,13
5272	1227	4,92	0,02	n.b.	89,67	0,08	0,08	0,01	0,00	0,00	n.b.	94,78
8440	1287	0,02	0,00	0,00	97,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	97,67
8474	1284	2,09	0,11	0,07	97,74	0,00	0,00	0,04	0,08	0,07	0,00	100,20
8475	1284	2,19	0,08	0,08	96,99	0,00	0,23	0,07	0,02	0,00	0,03	99,69

Durante la oxidación del cobre arsenicado, la plata se conserva como la última fase metálica e incluso se puede encontrar en la "malaquita". Por lo tanto, a la plata le corresponde el papel de un elemento conductor en este proceso metalúrgico. Sin embargo, las laminillas de plata pocas veces alcanzan a tener un tamaño que permita determinar su presencia junto a cobre y/o Cu_2O mediante un microanálisis (tabla 7).

Es interesante lo observado en el metal de la muestra LM-61025 (Pp. 1287): aquí la zona que presenta una fuerte aleación con As constituye una transición hacia cobre con cuprita cotéctica. En una zona intermedia se encuentra una fase transparente en forma de inclusiones redondeadas que a primera vista se pueden confundir bajo luz reflejada con cuprita, pero que, sin embargo, se distingue claramente por su color rojo más intenso (fig. 3a, b). Se trata de un óxido de Cu-As desconocido hasta el momento por nosotros;

de corrosión que tiene un contenido bajo en plata demuestran que las inclusiones de plata en el área del límite de la oxidación del cobre a cuprita primero siguen creciendo de tamaño y en parte no se hacen visibles hasta ese momento.

con una composición aproximada de $4\text{Cu}_2\text{O}\cdot 3(\text{As,Sb})_2\text{O}_3$. Esta fase se forma durante la oxidación en la zona eutéctica rica en As y a la vez contiene cantidades variables de Cu_2S (tabla 9). Obviamente, se trata de una fase que sirve de mediadora entre los equilibrios de cobre-domeiquita y de cobre-cuprita (10) (fig. 4).

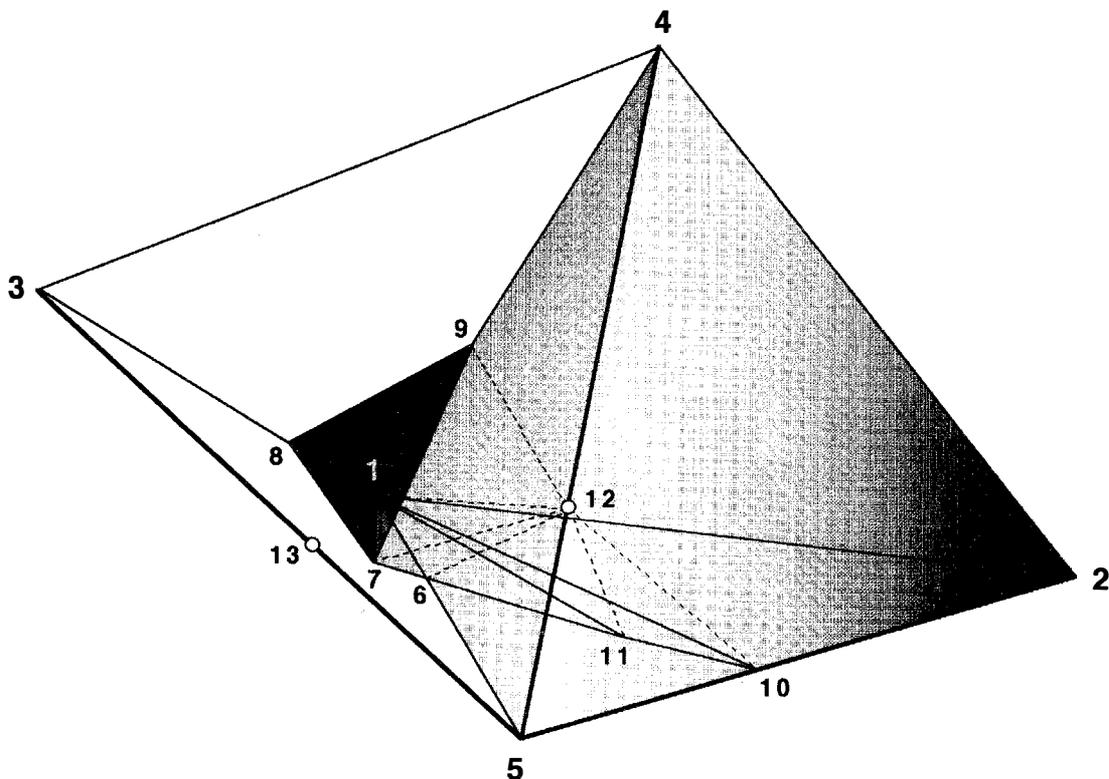


Fig. 4.—Tetraedro doble Cu-As-O-S/Cu-Fe-O-S (porcentaje molecular).

- | | |
|---|---|
| 1 Cu | 8 Cu_3As (Domeiquita) |
| 2 Fe | 9 Cu_2S (Calcosina, Digenita) |
| 3 As | 10 Fe_3O_4 (Magnetita) |
| 4 S | 11 CuFeO_2 (Delafosita) |
| 5 O | 12 SO_2 (Dióxido de sulfuro, gasificado) |
| 6 Cu_2O (Cuprita) | 13 As_2O_3 (trioxido de Arsénico) |
| 7 "Fase $\text{Cu}_2\text{O}-\text{As}_2\text{O}_3$ " | |

Se trata de un sistema de componentes de 5 elementos. En realidad es un sistema de 4 elementos que se puede aplicar al metal o a la escoria. No se han observado posibles paragénesis rica en arsénico con cobre metálico (1). La oxidación con formación de cuprita conduce a la paragénesis 1-6-7-9 más pobre en arsénico. En las dos escorias son importantes la combinación de fases 1-6-11 (-12) con delafosita-cuprita-cobre o delafosita-magnetita-cobre (ver texto).

(10) Es posible que esta fase sea el mismo material que Northover (1989) describió como "clusters of mixed oxides" (Cu_2O , As_2O_3). Sin embargo, según nuestras observaciones, no deberían coexistir Cu_2O y As_2O_3 , al igual que Cu_3As y Cu_2O .

TABLA 8

ANÁLISIS-SEM. ARSENIUROS DE COBRE E HIERRO (% peso específico)

Domeiquita												
<i>N.º Análisis</i>	<i>N.º Preparado</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Ni</i>	<i>Ag</i>	<i>Pb</i>	<i>Zn</i>	<i>S</i>	<i>As</i>	<i>Sb</i>	<i>Cl</i>	<i>Total</i>
8433	1287	72,52	0,00	0,22	0,19	0,00	0,02	0,10	30,55	0,47	0,00	104,07
8436	1287	72,07	0,05	0,00	0,13	0,00	0,00	0,10	30,80	0,08	0,06	103,29
8444	1287	58,82	0,01	0,01	0,42	1,08	0,00	1,18	30,64	3,60	0,00	95,76
8445	1287	57,23	0,00	0,07	0,61	0,31	0,00	1,29	33,25	4,31	0,01	97,08
8450	1287	53,23	0,08	0,06	0,50	0,60	0,00	2,13	33,36	5,23	0,01	95,20
9140	1287	71,50	0,00	0,06	0,01	0,20	0,00	0,14	29,45	0,15	0,00	101,51
Arseniuro												
<i>N.º Análisis</i>	<i>N.º Preparado</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Ni</i>	<i>Ag</i>	<i>Pb</i>	<i>Zn</i>	<i>S</i>	<i>As</i>	<i>Sb</i>	<i>Cl</i>	<i>Total</i>
5265	1221	1,36	43,10	n.b.	0,03	0,00	0,02	0,08	53,96	0,00	n.b.	98,55
8459	1221	1,36	43,30	0,21	0,04	0,00	0,04	0,03	59,00	0,01	0,00	103,99
8460	1221	1,74	41,99	0,08	0,00	0,00	0,10	0,07	58,61	0,00	0,02	102,61
8463	1221	1,61	43,56	0,14	0,00	0,00	0,08	0,04	58,53	0,04	0,03	104,03

El metal de los objetos forjados está deformado, de manera que sólo se pueden constatar analogías generales en el carácter de la aleación: contenido en plata, estructura por zonas de los cristalitas de Cu y enriquecimiento local de otros elementos (Sb). Estas composiciones concuerdan también con aquellas partes del cobre que no han sido tratadas mecánicamente. Incluso cuando la descomposición llega a un alto grado, existen suficientes restos químicos y residuos de la estructura como para llevar a cabo una comparación. Sin embargo, apenas existen posibilidades para una diferenciación exacta entre el metal bruto, la materia prima que se obtiene a partir de la fundición y los objetos fundidos.

5. INTERPRETACION DE LOS RESTOS ARQUEOMETALURGICOS

5.1. Menas y obtención de metal

El intentar interpretar los hallazgos metalúrgicos de CB y LM se parece a un puzzle gigantesco: el material de las muestras proviene de dos yacimientos situados a cierta distancia el uno del otro. De los dos lugares hemos seleccionado una parte de ellas. Los hallazgos pertenecen a diferentes fases de la cadena de producción que probablemente sería parecida en los dos yacimientos. Se parte de estos supuestos para la interpretación. Los resultados de la investigación científica proceden de un material que en muchas ocasiones sólo deja entrever rastros de las características originales. Se tiene una idea preconcebida que está influenciada por una serie de presupuestos que o bien son demasiado simples, en el sentido de que son primitivos, o bien que derivan de la metalurgia moderna y que por lo tanto no son reales. Una comparación experimental con la metalurgia antigua en el área del suroeste de España, Río Tinto, que ahora se conoce a grandes rasgos (Keesmann, 1993), al principio no da resultado, ya que los hallazgos son

TABLA 9
 ANALISIS-SEM DE OXIDOS METALICOS (% peso especifico)

Cuprita												
<i>N.º Análisis</i>	<i>N.º Preparado</i>	<i>Cu2O</i>	<i>Fe</i>	<i>Ni</i>	<i>Ag2O</i>	<i>Pb</i>	<i>Zn</i>	<i>S</i>	<i>As</i>	<i>Sb</i>	<i>Cl</i>	<i>Total</i>
5271	1227	96,64	0,20	n.b.	0,00	0,10	0,00	0,01	0,03	0,03	n.b.	97,01
8423	1288	99,15	0,04	0,00	0,06	0,04	0,00	0,00	0,09	0,02	0,10	99,50
8446	1287	99,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,11	0,00	0,04	0,00	99,55
8466	1221	91,22	2,94	0,00	2,16	0,00	0,00	0,03	0,55	0,02	1,78	98,70
9165	1288	100,77	n.b.	0,00	0,01	0,00	n.b.	0,02	0,15	0,03	n.b.	100,97
9166	1288	98,27	n.b.	0,08	0,41	0,00	n.b.	0,04	0,12	0,00	n.b.	98,92
9167	1288	100,97	n.b.	0,08	0,00	0,00	n.b.	0,00	0,00	0,10	n.b.	101,15
Oxido de plata												
<i>N.º Análisis</i>	<i>N.º Preparado</i>	<i>Cu2O</i>	<i>Fe</i>	<i>Ni</i>	<i>Ag2O</i>	<i>Pb</i>	<i>Zn</i>	<i>S</i>	<i>As</i>	<i>Sb</i>	<i>Cl</i>	<i>Total</i>
8448	1287	4,45	0,00	0,00	91,62	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,05	96,13
Fase Cu-As-O												
<i>N.º Análisis</i>	<i>N.º Preparado</i>	<i>Cu2O</i>	<i>Fe</i>	<i>Ni</i>	<i>Ag</i>	<i>Pb</i>	<i>Zn</i>	<i>S</i>	<i>As2O3</i>	<i>Sb2O3</i>	<i>Cl</i>	<i>Total</i>
8447	1287	56,62	0,04	0,02	0,66	0,15	0,14	4,24	34,54	3,84	0,00	100,26
8451	1287	54,19	0,07	0,00	0,63	1,63	0,12	2,16	39,90	6,01	0,00	104,71
8452	1287	52,02	0,05	0,00	0,75	1,26	0,07	2,24	38,50	5,95	0,00	100,84
8453	1287	48,86	0,00	0,02	0,52	0,49	0,00	2,00	38,99	5,91	0,00	96,80
9133	1287	51,18	0,02	0,00	0,51	0,34	0,00	2,88	37,55	4,83	0,01	97,32
9135	1287	51,43	0,04	0,01	0,70	0,28	0,00	2,42	40,65	5,30	0,00	100,83
9156	1287	52,44	n.b.	0,02	0,70	0,69	n.b.	2,41	39,68	4,81	n.b.	100,75
9157	1287	52,02	n.b.	0,06	0,71	0,70	n.b.	2,51	39,30	4,93	n.b.	100,23
9158	1287	52,96	n.b.	0,07	0,74	0,78	n.b.	2,41	38,92	4,76	n.b.	100,63
9161	1287	53,67	n.b.	0,00	0,79	0,25	n.b.	2,25	39,84	5,51	n.b.	102,30
9162	1287	52,21	n.b.	0,11	0,74	0,44	n.b.	2,28	37,48	5,24	n.b.	98,50
9163	1287	51,99	n.b.	0,09	0,90	0,30	n.b.	2,51	38,55	6,63	n.b.	100,95

completamente diferentes. La cadena de la tecnología metalúrgica del cobre de CB y LM empieza con la disponibilidad de menas aptas para una “fundición”, es decir, para una transformación pirometalúrgica. En ambos lugares se utilizaron menas sulfúricas. Hasta el momento éstas no se han encontrado en los yacimientos, sin embargo sí se han encontrado productos de una descomposición que pueden tener un origen sulfúrico. En cambio, existen fragmentos de sulfuro de mayor tamaño que o bien son totalmente refundidos o bien han sido al menos fuertemente fundidos en sus superficies y que quizás originariamente se trataran de calcosina natural. No existen indicios de una calcinación gradual o de una fundición de sulfuros de cobre y hierro hasta convertirse en mineral de cobre sin sulfuro de hierro. La cantidad de sulfuro de cobre no es lo suficientemente alta como para explicar la composición de la escoria y del metal: falta el contenido en hierro que está documentado en la espinela magnetítica, la digenita, el olivino y el piroxeno y también el elevado contenido en arsénico necesario para producir composiciones eutécticas de Cu-As. La cerámica utilizada como recipientes de fundición en la cual se llevaron a cabo las transformaciones pirometalúrgicas, es relativamente rica en hierro y se ha

fundido parcialmente en el proceso. Sin embargo, esta cerámica tiene una composición básicamente distinta en la proporción de los diferentes elementos e incluso esa diferencia se mantiene con las escorias silicatadas situadas directamente sobre ella. Las fases más ricas en arsénico encontradas en las diferentes muestras ¡tienen la composición de domeiquita (Cu_3As , aproximadamente 30% de peso de As) y FeAs (contenido en As hasta 59% del peso)! La domeiquita o las composiciones similares a domeiquita son indudablemente producto de la obtención de metal y de restos de colada de la aleación de arsénico y cobre en el proceso de endurecimiento. De acuerdo con su aspecto dendrítico, el FeAs es también un producto procedente de la fundición.

El sulfuro de cobre fundido adherido a composiciones parecidas a la escoria, es un indicio directo de que las transformaciones durante la obtención de metal no fueron completas. Y en efecto, todas las observaciones en las muestras que contienen escoria demuestran que estos productos de la fundición fueron sumamente heterogéneos y en un espacio reducido contenían desde la mena hasta el metal (11). Los restos de la calcosina están acompañados en la mayoría de los casos por FeAs. El As (Fe,Ni) es un mineral poco frecuente en España (Westerveldit de La Gallego), sin embargo su presencia en las muestras y la composición rica en níquel contradicen que este mineral fuera un elemento añadido. Otra posibilidad sería que FeAs desempeñe el papel de una fase alimenticia como se conoce en los procesos de disociación, complejos y antiguos, constatados en la región de Huelva. Sin embargo, estas fases “alimenticias” son mucho más ricas en Fe (Fe_2As , Fe_3As y hierro aleado con arsénico) y siempre son el resultado de condiciones de fundición sumamente reductoras (12). Igualmente, se puede comprobar una fuerte reducción en la cerámica utilizada para la fundición que hemos investigado. La composición de la mayoría de las escorias investigadas demuestra que las condiciones para la fundición tenían una tendencia oxidante hasta llegar a un equilibrio con la magnetita ($\text{FeO Fe}_3\text{O}_4$). El FeAs también fue sometido a esta oxidación, formándose una costra de reacción de magnetita en forma redondeada (en el corte se puede observar la forma de “atolones”) con FeAs incrustado como residuo, parcialmente cristalizando en forma dendrítica. El producto de la oxidación de Cu_2S en la fundición es Cu_2O , que no es estable al lado del Cu_2S . Las dos fases reaccionan a cobre metálico (“calcínación”) (13).

(11) Una posible continuación de esta idea sería que originalmente existían muchos más productos escorificados. Se conoció su contenido en metal. Ahora disponemos de ejemplos procedentes del Irán donde cantidades elevadas de escoria fueron golpeadas hasta convertirlas en arena y de la arena se obtuvieron bolitas de metal (cobre) de un tamaño de 1 a 2 mm mediante tratamiento manual (KEESMANN *et al.*, 1993).

(12) Merkel *et al.* (1988) mencionan composiciones muy parecidas en relación con la tecnología de Cu-As probablemente pre-colombina situada en el norte de Perú. A este producto lo llaman “alimenticio”. Deliberadamente no queremos utilizar el término de “fase alimenticia” para el FeAs en las muestras investigadas por nosotros. Si no, tendríamos que incluir todos los arseniuros de Cu en este término, es decir, también la domeiquita (Cu_3As), como componente del cobre primariamente producido. “Alimenticio” no solamente está ligado a ciertas composiciones sino más todavía a un procedimiento genético: la desintegración líquido-líquido de un sistema con componentes metálicos y sulfúricos, a veces también silicatados, en proporciones cuantitativas variables (BLANDERER, 1964). Tales sistemas, normalmente, son el resultado de procesos metalúrgicos llevados a cabo de manera reductora. En nuestro caso, esto sólo se puede aplicar con restricciones.

(13) Esta declaración contradice a las observaciones apreciadas en una escoria de cobre del periodo calcolítico de Tell Abu Matar, Feinan, relatadas por A. HAUPTMANN: “Partial desulfurization of Chalcocite

El resultado son bolitas de cobre en una colada silicatada que se transforman en gotas de cobre de mayor tamaño. Este fenómeno se ha observado a menudo en las escorias y en la cerámica de CB y LM. Aparece simultáneamente cobre heterogéneo, cotéctico con domeiquita. Esto significa que directamente con y junto a la formación de Cu, mediante la calcinación en un sistema de reacción, se libera mucho arsénico. Esto posiblemente sea debido a la oxidación de FeAs con una formación simultánea de óxidos de Fe que, a su vez, forman una transición a una escoria silicatada. Se forma una aleación de cobre y arsénico con una temperatura de fundición relativamente baja (≥ 690 °C). El proceso transcurre con dificultad, sin la mediación de una colada “inerte” y protectora, entre otras razones porque el sistema en su conjunto no es lo suficientemente capaz de fluidificarse y por eso se dificulta el intercambio de elementos. Por esta razón se producen fundiciones más o menos fluidas y ricas en hierro que son o pobres en CaO (fayalíticas) o ricas en CaO (piroxénicas). Las fundiciones piroxeníticas son, en contraposición a las fayalíticas, mucho menos susceptibles a una solidificación por oxidación. De hecho, la composición preferida de la fundición en CB y LM parece que fue piroxenítica. Sin embargo, no hay ningún indicio de que en la metalurgia del cobre de CB y LM se hubiera utilizado una escoria fluida y homogénea.

Las “menas” sulfúricas investigadas proceden exclusivamente del yacimiento de LM. Se conoce la existencia en las proximidades de minerales carbonatados asociados a minerales de hierro explotables y gangas ricas en Cu con sulfuros y arsenidos (14). Sin embargo, la investigación de las “menas” en los restos hallados en CB y LM no dio ningún indicio directo sobre el portador original del arsénico. Por tanto, el origen del FeAs sintético en la escoria queda sin aclarar por el momento. Como acompañantes naturales de calcosina se puede pensar en un principio en sulfuros de Cu-Fe primarios (por ejemplo, calcopirita), en piritita y también en paragénesis con un contenido potencial en arsénico, junto con mineral gris de cobre con plata. También se podría pensar en

(Matte) by the roast-reaction leading to a mymecitic intergrowth of cuprite and chalcocite.” (Hauptmann, 1989). Su ilustración 14,11 no muestra tanto una estructura mirmecítica, en el sentido de una reacción de cuerpos sólidos, sino más bien un producto —probablemente cotéctico— de cristalización, resultado de una fundición. Sin embargo, las fases adheridas no muestran ninguna tendencia hacia una reacción. Sería concebible la existencia de cuprita secundaria de una descomposición del cobre metálico. Recientemente HAUPTMANN *et al.* subrayan nuevamente la coexistencia de Cu_2S y Cu_2O en formaciones cotécticas (HAUPTMANN *et al.*, 1993, ilustración 15) en “reacciones de calcinación”. La reacción a cobre metálico, que obviamente no se puede observar aquí, precisa aún de una explicación razonable.

(14) Sierra de Alhamilla, yacimiento ALS2, localizado tras la prospección arqueometalúrgica realizada en septiembre de 1988 (ROTHENBERG, 1988; 1989). Aquí, entre las costras de descomposición, también se encuentra un mineral gris de cobre, que podría suministrar tanto arsénico como plata (tetrahedritanantita, determinación de rayos X sobre los minerales de ALS2 realizada por P. Maier, 1988). Las inclusiones metálicas e incluso las escorias investigadas de este yacimiento son, al igual que las de otros yacimientos de la región, parecidas a los productos de CB y LM en cuanto a su composición. Suponiendo que en todos estos yacimientos se han llevado a cabo procesos de reducción sobre una base de elementos ricos en azufre y arsénico, el volumen de la producción de escorias y el estado de su conservación sugieren que en ALS2 la tecnología de trabajo se encontró en un nivel de desarrollo más avanzado que lo esperado en una época tan antigua. Las excavaciones en CB y LM hasta el momento no han proporcionado escorias que no fueran comparables en cuanto a su homogeneidad a los principales productos hallados en las proximidades. Las escorias de ALS2 —probablemente más recientes— además tienen numerosas inclusiones metálicas de mayor tamaño (ver nota 11).

arsenopirita (FeSAs) y eventualmente en lollingita (FeAs₂). Dentro de esta paragénesis también pertenecería la esfalerita (ZnS), como una posible fuente del contenido extremadamente elevado en zinc de las espinelas de la escoria. El enriquecimiento local de plata en la colada de la escoria indica que, en efecto, existían fases ricas en plata en la mezcla de las menas. La formación de FeAs en la colada procedente de arsenopirita no es tan fácil que se dé en las condiciones bajo las cuales se llevó a cabo la calcinación de calcosina a cobre (15) (Apéndice. Esquema de reacción n.º 1). Es posible que, en realidad, la composición de las menas o el procedimiento metalúrgico fuera más complejo todavía. Las inserciones masivas de ferrito cálcico en los productos de transformación son un indicio para ello. Dichas inserciones también han sido sometidas a un proceso de fundición, junto a calcosina, con la formación simultánea de metal, eventualmente por desintegración. En estas áreas tiene que haber habido una colada muy pobre en SiO₂, con un exceso de CaO derivado de cal o de gangas carbonatadas. Composiciones de este tipo intervienen como producto de la solidificación en las escorias con Ferro-Wollastonita (16). De este hecho se deducen temperaturas de trabajo que claramente sobrepasan las temperaturas eutécticas de las coladas piroxenítica y fayalítica que tienen una composición simple (≤ 1000 °C).

En su totalidad, el sistema de reacción consistió en una mezcla de cuerpos sólidos de composiciones diferentes con temperaturas de fundición ≥ 1000 °C, que no se fundieron de manera totalmente homogénea. A la vez se formó una zona de colada muy

(15) Hasta ahora no disponemos de investigaciones exactas sobre cómo se llevó a cabo realmente la producción de aleaciones de Cu-As. Por esta razón, las exposiciones de otros autores acerca de las menas y de los procesos metalúrgicos de la fundición no son tampoco muy fiables. Merkel *et al.* (1988) indican la existencia de arsenopirita (FeAsS) y escorodita (FeAsO₄ · 2H₂O) en los alrededores de sus excavaciones (Batán Grande). Lechtman (1988) cuenta con el uso de enargita, tenantita y además con arsenopirita, “in association with chalcopyrit and other primary sulfides of copper” para la misma metalurgia de Cu-As precolombina en el norte de Perú.

(16) A propuesta de B. Rothenberg y con su apoyo llevamos a cabo investigaciones de carácter petrográfico-petroológico muy intensas de las escorias de cobre del Wadi Arabah en los años 1986-87 (KRAWCZYK, KRAWCZYK, E. KEESMAN, I. 1987, 1991). Constatamos que las escorias “piroxeníticas” en este área tienen un papel mucho más importante que el conocido por las investigaciones de Bachmann (1980). Sin embargo, “pyroxene type slag” se debería entender sólo como interpretación de análisis globales no diferenciados. En realidad, la cristalización en escorias de una composición análoga también empieza con ferro-wollastonita o con piroxenoides ricos en manganeso (escorias de “knebelita”). La exposición de Rothenberg (1988), en cuanto a la composición de las escorias de cobre, probablemente desde el inicio del Islam, procedentes de Beer Ora, “... fluxing with limestone, a fact which was quite difficult to accept for the Roman period in the Arabah”, podría causar la impresión de que las escorias ricas en calcio fuesen una invención de tiempos más recientes. Seguramente, éste no es el caso. Tal como muestra el ejemplo de LM, el uso consciente de composiciones ricas en CaO es mucho más antiguo. Las condiciones específicas siempre están en función de las posibilidades económicas y técnicas, así como de las necesidades. En el transcurso del desarrollo tecnológico, esto causa sólo un cambio en los puntos esenciales. Un desarrollo similar se puede comprobar en la tecnología del hierro (no independiente de la tecnología del cobre): las composiciones ricas en calcio de las fundiciones en el proceso de tratamiento del hierro anticipan por mucho el desarrollo siguiente de la tecnología de cuba y de alto horno. En un principio es insignificante (aunque no técnicamente) si la composición está regulada por “fundentes” o, en procesos llevados a cabo con un claro propósito térmico, por participación de la pared del contenedor o del revestimiento del horno (ver el tratamiento del hierro Niedererlbach, Keesmann, 1985).

fluida que también era bastante deshomogénea y que además se desintegró. En cambio, una parte de los productos de la reacción, concretamente las espinelas magnetíticas, adicionalmente aumentaron la proporción de cuerpos sólidos en el sistema. La fase del sistema que funde a temperatura más baja fue una colada metálica compuesta de manera más o menos eutéctica, con un contenido elevado en arsénico. No es posible hacer un balance cuantitativo de los elementos, ya que se desconoce tanto la composición original de la mezcla capaz de reaccionar como el poder de transformación. Sobre todo, se pueden esperar pérdidas considerables de arsénico bajo las condiciones de reacción ya en el primer paso de ésta para la producción de metal por sublimación de As_2O_3 . La prueba directa de FeAs como fase del sistema más rica en arsénico, y por ende también como suministrador de arsénico bajo las condiciones de reacción observadas, casi no deja lugar a dudas sobre el posible uso de arsénico elemental (Hook *et al.*, 1991) empleado en la aleación. A pesar de ello, no se puede excluir con toda seguridad aleación con arsénico (eventualmente formado de manera intermedia: Apéndice esquema de reacción, n.º 1) mientras no se conozca todo el procedimiento técnico a fondo.

5.2. Producción de material Cu-As

El cobre de una estructura eutéctica con domeiquita no es el material utilizado en la producción de objetos metálicos, ya que el contenido en arsénico de ellos es mucho más bajo. Las observaciones en las capas de la escoria de la cerámica de los crisoles y en el metal sólido indican un tratamiento ulterior oxidante del metal bruto previamente fundido. Esto resulta de la observación en sistemas muy pobres en sulfuro, o prácticamente sin sulfuro, con cobre+domeiquita heterogéneos. El cobre heterogéneo se disuelve, quedando residuos de mayor tamaño. Al mismo tiempo, se forma cobre homogéneo pobre en arsénico en sus alrededores inmediatos, y en un principio muy disperso, en una colada silicatada, en la cual enseguida se concentran bolas de cobre más grandes. Este proceso se lleva a cabo en el límite de la oxidación del cobre metálico a cuprita. A veces ocurre una sobreoxidación a delafosita y a cuprita. Una fase intermedia de la oxidación del cobre rico en arsénico es la formación de arsenita de Cu(I). Bajo estas condiciones es probable que se sublime a As_2O_3 (17). El resultado de una eliminación casi total del arsénico del material original es la composición eutéctica del cobre con cuprita que hemos observado (18). ¡Hasta este punto la temperatura de la fundición del metal sube

(17) Según Blanderer (1964), As_2O_3 tiene la tendencia a descomponerse en As_2O_5 y As a partir de aproximadamente 300 °C. Por esta razón, temperaturas más altas no facilitarían necesariamente el proceso de eliminar arsénico del sistema.

(18) Querer ver aquí las “desoxidising properties of arsenic” (BM) significaría confundir el origen con el efecto. Los autores mencionan inclusiones de Cu_2S en el cobre. Los restos investigados del producto heterogéneo de reacción que consisten en menas, escoria y metal realmente contienen todavía mucho sulfuro de cobre sobrante, en forma de menas sobrefundidas y como inclusiones en la escoria. Por lo menos en estas áreas la reacción de calcinación se llevó a cabo con un sobrante de Cu_2S . Una primera consecuencia de esto sería que no se puede aplicar tal cual la suposición de G. Rapp, Jr. (RAPP, 1989), “..., ancient craftsmen undoubtedly removed nearly all of the sulfur during the roasting stage” a la metalurgia antigua del cobre de CB y LM. Sí se podrían esperar inclusiones de sulfuro en el metal. Una oxidación más intensa,

continuamente hasta más de 1000 °C! Sin embargo, las composiciones realmente observadas y las que se pueden dar como probables demuestran que la composición global de la aleación fue manipulada de tal manera que en el área del cobre homogéneo se creó al final un producto con tendencia general monofásica que todavía contenía arsénico hasta un $6\pm 2\%$ del peso (tabla 7). Esta manipulación debería haber sido posible sin grandes dificultades mediante la fusibilidad del metal y mediante la cantidad del arsénico que se sublima (19).

Por las muestras cerámicas y por las coladas superpuestas a ellas indican claramente que la metalurgia de CB y LM, en relación al sistema Cu-Fe-As-S-O que predomina, no se llevó a cabo exclusivamente bajo condiciones oxidantes. La selección de las muestras no permitió ninguna conclusión acerca de la distribución de las áreas oxidantes y reductoras en los crisoles. Según nuestras observaciones, las condiciones cambian en la misma zona y causan una superposición de productos de composición distinta. Algunas muestras de cerámica fueron calentadas bajo condiciones reductoras tan fuertes, por lo menos en la fase final y decisiva de su utilización, que se produjo hierro metálico mediante una reducción de fases ricas en hierro. En algunas muestras la composición del cobre sugiere tales condiciones (tabla 7). Sin embargo, no son compatibles con condiciones bajo las cuales se formaron las típicas escorias de cobre ricas en magnetita. Si se consiguió, tal como hemos expuesto arriba, controlar el contenido en arsénico en la aleación del cobre mediante un tratamiento posterior oxidante, por ejemplo, a través de la temperatura de fundición, para obtener el material deseado, entonces esta composición debería de cambiarse, dentro de lo posible, durante el tratamiento siguiente. Por tanto, para hacer una colada estrictamente reductora a partir de este momento.

5.3. Composición de las aleaciones de cobre y arsénico

Los resultados de los análisis globales del metal de CB y LM de los que disponíamos hasta el momento (Hook *et al.*, 1991) no se pueden comparar con los análisis puntuales realizados en esta investigación, toda vez que la selección de muestras se realizó con criterios diferentes (tabla 7). Los análisis globales abarcan el total de los componentes en un área más amplia y deberían por tanto representar la composición media del metal, en contraposición a los análisis puntuales. Los resultados de los análisis realizados en el British Museum (BM) sugieren que la composición de la mayor parte del cobre y de los objetos de cobre se encuentran claramente por debajo del límite de homogeneidad que muestra el arsénico en el cobre bajo temperaturas de fundición ($< 7\%$ del peso). Estos

por ejemplo, durante el tratamiento posterior, debería incluir también este sulfuro de cobre. Cabría encontrar inclusiones de Cu_2S preferentemente en muestras de metal más ricas en As, tal como realmente hemos encontrado en los productos metálicos de Sierra Alhamilla (ver nota 13). Sin embargo, en esta investigación no hemos podido identificar inclusiones en cobre metálico que podrían ser inequívocamente Cu_2S . Por otra parte, hemos observado varias veces Cu_2S en productos muy descompuestos, además de mucha cuprita. Es posible que en un principio hayan existido aquí inclusiones de sulfuro en el metal. Además, la fase de Cu-As-O encontrada por nosotros en el cobre, contiene en parte cantidades considerables de azufre en forma de sulfuro (tabla 9). Se puede calcular que el azufre llegue aproximadamente a un 10% del peso de Cu_2S en las inclusiones analizadas. Se podría tratar de adherencias de Cu_2S a este $4\text{Cu}_2\text{O}\cdot 3\text{As}_2\text{O}_3$.

(19) O bien el típico olor a ajo.

resultados derivan de muestras que, según la determinación de todos los componentes metálicos, contienen en parte mucho menos Cu (=metal total) que el que era de esperar. Las cifras obtenidas en los análisis se encuentran parcialmente en el área de la composición de cuprita y a veces muy por debajo (fig. 5). Las discrepancias dentro del marco de los límites de error no tienen mucha importancia (20). Tal como demuestran estas investigaciones, el cobre en todas las composiciones de las muestras de CB y LM está bien conservado sólo cuando se trata de cuerpos relativamente pequeños, bien protegidos de la corrosión, mediante escoria o similares productos de reacción. Las piezas y los objetos metálicos de mayor tamaño que estaban al descubierto, salvo en algunas excepciones, están bastante o muy descompuestos. El proceso de descomposición es el siguiente: primero se forma cuprita y finalmente malaquita. La cuprita, al lado del cobre aleado con arsénico, prácticamente no contiene arsénico (tabla 9). Esto no significa que los productos de la corrosión en su totalidad no contengan arsénico, sino que demuestra que el arsénico en el sistema de corrosión es muy móvil y que se puede trasladar fácilmente del área del metal original. Por esta razón, los contenidos en arsénico de las aleaciones de arsénico y cobre, con mucha probabilidad son considerablemente más bajos que en el metal original (fig. 6) y dependen del grado de la lixiviación. La distribución de la frecuencia de los contenidos en arsénico en el cobre y en los objetos de cobre, mencionada por Hook *et al.* (1991) se puede considerar menos significativa de lo que se pensaba inicialmente. La corrección correspondiente no sólo lleva a contenidos en arsénico que, por término medio, son claramente más elevados, sino también a una agrupación diferente de algunos objetos en relación con el contenido en arsénico de la aleación original.

Los cristallitos de cobre observados se han ido formando por zonas, es decir, el núcleo es relativamente pobre en arsénico y está rodeado por capas cada vez más ricas en arsénico (fig. 2). Esta deshomogeneidad química se conserva incluso después de haber estado sometido a un tratamiento mecánico (fig. 7). De acuerdo con ello, en el metal se pueden esperar en contra áreas eutécticas muy ricas en arsénico o intercalaciones parecidas a domeiquita incluso en las composiciones globales del cobre arsenicado cuyos contenidos en arsénico están todavía por debajo del límite de la homogeneidad de Cu bajo altas temperaturas en el sistema Cu-As (21).

(20) En el trabajo de Hook *et al.* (1991) se aprecia un error de $\pm 2\%$ del peso para la determinación del cobre. Este error es un poco alto para el cobre puro; sin embargo, puede subir rápidamente para el metal con una aleación más intensa. "The few slightly low analytical totals are due to the corroded nature of some of the samples." Según la fig. 5, esto sólo se puede interpretar como un *understatement*. Las discrepancias en las sumas de los análisis que se mencionan aquí son mucho más altas que las que resultan de los errores analíticos (ver tabla 1 y 2, BM). Una exacta relación lineal entre el contenido original en arsénico en el cobre y el grado de descomposición, no se puede esperar en una toma de muestra casual sin tomar en consideración la estructura detallada. Por ende, los contenidos levemente más altos en arsénico del metal especialmente descompuesto no constituyen ningún contraargumento.

(21) "... segregation in most real situations ... in cast alloys with only a little over 2% arsenic." (NORTHOVER, 1989). Sin embargo, el modelo de un "enfriamiento muy rápido desde una fundición homogénea" no se puede aplicar a todos los casos y pasos del procedimiento de la metalurgia antigua. La consecuencia sería un contenido en As más equilibrado, con tendencia hacia composiciones dentro del área de homogeneidad del cobre. Esto significaría que, con un procedimiento de fundición levemente modificado y con velocidades variables de enfriamiento, también se puede coordinar la proporción y eventualmente la distribución de la fundición eutéctica restante.

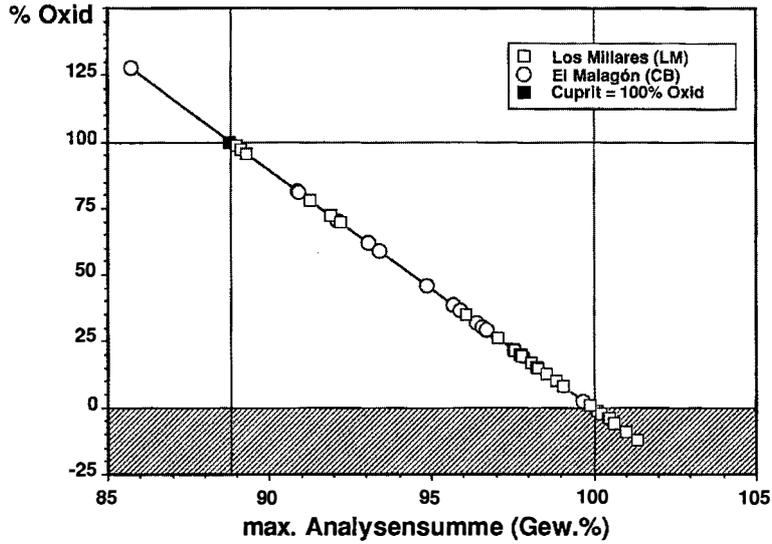


Fig. 5.—Suma de los análisis metálicos de LM y CB (valores máximos) según referencia de Hook *et al.* (1991) (Tablas 1 y 2). El grado de descomposición derivado sobre la base de $\text{Cu}_2\text{O}=100\%$.

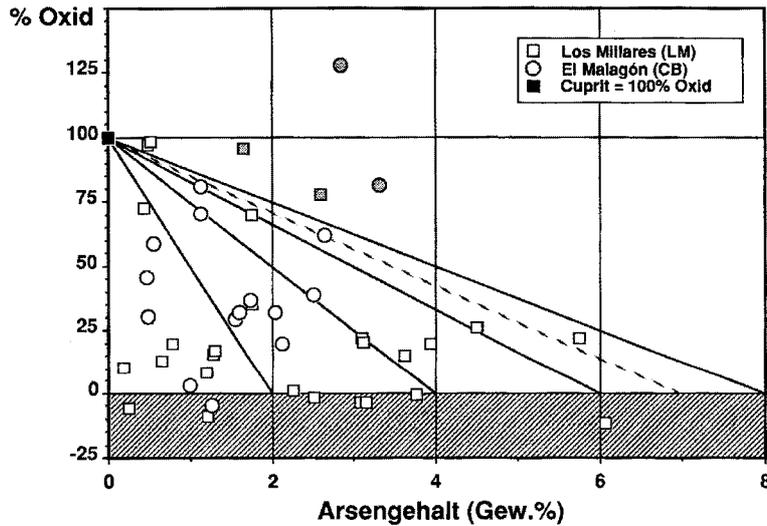


Fig. 6.—Extrapolación del contenido en arsénico originario en el metal fresco a partir del contenido en arsénico del metal. El contenido en óxido se corresponde con la fig. 5. La composición límite para el arsénico en cobre asciende según nuestros análisis aproximadamente a un 7,0% del peso del arsénico (línea puntillada). Compárese con la tabla (análisis metálico). Punteado: alto contenido en arsénico junto con un grado de oxidación muy elevado con productos de transformación posiblemente complejos (metal junto con óxido+arseniato+“magnetita”). Para estas pruebas no es posible una extrapolación lineal sobre la base Cu_2O .

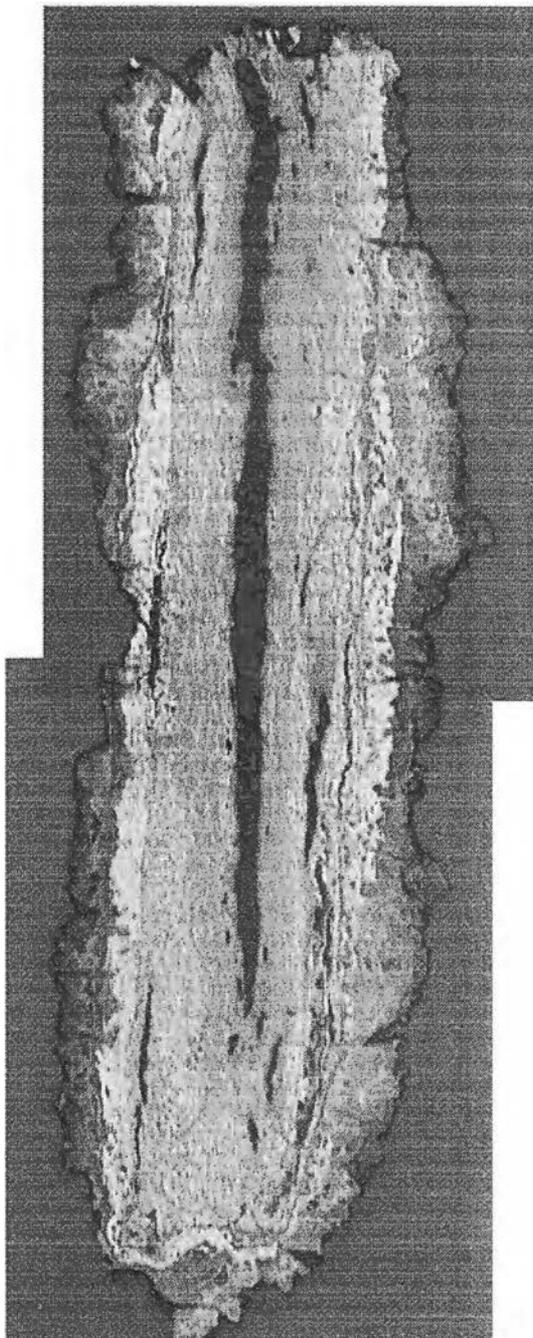


Fig. 7.—LM-61465 (Pp. 1228). Huellas de forja laminares con la típica formación de huecos en el centro junto a la corrosión. Se ha conservado muy poco metal. Los productos de oxidación (sobretudo cuprita y “magnetita” conserva de forma residual las estructuras originarias del metal. Ancho de la toma de aproximadamente 5 mm.

6. CONSIDERACIONES FINALES

Los restos arqueometalúrgicos recuperados en dos de los asentamientos más intensamente investigados durante los últimos años dentro del marco del sureste peninsular, El Malagón y Los Millares, nos permiten realizar una serie de valoraciones generales sobre el proceso de producción metalúrgica desarrollado durante la Edad del Cobre.

Los trabajos de minería/cantería no debieron de resultar ni una novedad ni tan siquiera un esfuerzo suplementario, a juzgar por la experiencia obtenida desde tiempo atrás en trabajos, por ejemplo, de recogida de materia prima para la realización de útiles líticos. De hecho, durante la Edad del Cobre se explotaron abundantemente minerales oxidados (óxidos y carbonatos de cobre) en depósitos de cobre de las zonas superficiales y filones de sulfuros de la zona de enriquecimiento secundario.

Para poder realizar estos trabajos, el registro arqueológico nos muestra una gama amplia de herramientas, como martillos minero y piedras con cazoleta, usadas para machacar el mineral extraído.

En cambio, por lo que respecta a las minas o filones de mineral explotado, son muy difíciles de documentar, dado que el paso del tiempo ha conseguido borrar toda huella de estos primeros trabajos metalúrgicos. En este sentido, las prospecciones arqueometalúrgicas realizadas dentro del Proyecto Los Millares pueden, al menos, indicarnos las diferentes mineralizaciones de que disponían y cuáles de ellas pudieron ser fuente de la materia prima seleccionada y explotada. En relación a este tema hemos de señalar que, por el momento, no se han localizado restos materiales (herramientas) asociados a ninguna de las mineralizaciones potencialmente más aptas para haber sido explotadas. De todas formas, los análisis efectuados sobre restos de estas mineralizaciones y los materiales asociados a estas tareas recuperados durante el proceso de excavación, permiten desarrollar, sobre todo, por exclusión de elementos presentes, hipótesis sobre los puntos de captación de la materia prima y de la tecnología empleada en estas tareas de extracción.

La siguiente fase a la de cantería/minería sería la de la transformación del mineral. Esta supone la selección de la mena de la ganga mediante un fuerte y repetido triturado del mineral, utilizando para ello machacadores de piedra sobre una base dura. El tamaño de los fragmentos de mineral que hallamos en las diversas campañas de excavación realizadas, son relevantes en relación con la intensidad del proceso de selección y hacen que redunden en una más completa información sobre el modo y las técnicas de trabajo desarrolladas. Los resultados analíticos obtenidos de las muestras de escorias, zona escoriada de la cerámica, etc., confirman que por lo general se utilizó como mineral original uno no arsenicado, añadiéndose el As de forma intencionada. La fuente de As sería, en estos casos concretos (en Los Millares y El Malagón), una lollingita o una pirita arsenical.

En la fase siguiente el material seleccionado se introduce en un recipiente cerámico junto con abundante carbón, como combustible, más otros ingredientes que se añaden como fundentes para fluidificar la escoria y facilitar la separación del metal.

Prácticamente la totalidad de las muestras analizadas en este trabajo, ponen de relieve el hecho de que hubo un intento por controlar tanto los ingredientes como los tipos de ambientes, oxidante y/o reductor, en los que se realizaba la fundición, con vistas a obtener un producto final previamente deseado y que incluso estos primeros metalúr-

gicos trataron de regular la cantidad final de As recalentando el Cu para que se volatilizara el As sobrante.

Estas vasijas cerámicas, conocidas como vasijas-horno, están ampliamente representadas dentro de contextos de la Edad del Cobre del Sureste peninsular (Los Millares, El Malagón, Almizaraque) y no reciben ningún tratamiento especial, ni la materia prima es diferente al resto de la empleada para la manufactura de otros tipos cerámicos (Hook *et al.*, 1991). Son fácilmente reconocibles por las adherencias escoriáceas y de cobre metálico que conservan, por lo general, en su superficie interna. Tipológicamente, los fragmentos recuperados responden a formas abiertas, fuentes hondas y cazuelas no muy profundas con las paredes exteriores alisadas o sin tratamiento e improntas en la superficie del molde de cestería usado en su fabricación (Moreno *et al.*, en prensa).

Los fragmentos de vasijas-horno de Los Millares y El Malagón presentan restos de adherencias metálicas, pequeños restos de mineral parcialmente reducido junto con trocitos de carbón vegetal (Moreno *et al.*, en prensa). Los minerales sulfurados sufrirían un proceso de calcinación previo al de reducción realizado en recipientes de forma abierta.

No se ha conservado ningún recipiente completo de los denominados como vasijas-horno por el hecho evidente de que, para recuperar la masa resultante, éstas se tendrían que romper antes de liberar mediante un fuerte martilleado las bolitas de metal antes de introducir las en otro recipiente cerámico, el crisol, en donde se realizaría la fundición.

Estos crisoles suelen tener forma de escudilla, de unos 120 a 150 mm. de diámetro en la boca, poco profundos (de 30 a 50 mm de altura), con fondo plano y de paredes gruesas. El desgrasante utilizado generalmente es mica y/o cuarzo.

Una vez el metal en estado líquido, se vierte sobre moldes (de los que existe una amplia representación en los dos asentamientos aquí investigados) con el fin de obtener lingotes para su posterior comercio, láminas o barras o piezas diseñadas previamente sobre los moldes. En algunos casos concretos se ha podido demostrar la utilización de chatarra como material recuperable para la manufactura de otros objetos.

La última fase del proceso metalúrgico sería la de acabado o de manufactura de la pieza propiamente dicha.

La serie de metalografías efectuadas sobre una muestra ampliamente representativa del material metálico recuperado son las que nos detallan los procesos, tanto térmicos como mecánicos, a los que fueron sometidos los diferentes útiles y/o objetos manufacturados. Además, hemos observado que es posible establecer una correlación entre dichos procesos y la funcionalidad específica que se les quería otorgar a cada uno de estos artefactos.

En relación a los tipos morfométricos, más que a la funcionalidad específica, se puede señalar que el repertorio de útiles responde a un utillaje de tipo doméstico (hojas, sierras, punzones, leznas, barras y hachas) que repiten formas realizadas sobre otras materias primas.

Si bien es verdad que durante la Edad del Cobre se aprecia un intento de controlar, a través de ciertos medios, el proceso metalúrgico para darle ciertas cualidades a los artefactos metálicos, hecho que se refleja desde la propia selección de la materia prima, no resulta menos cierto que, como ya hemos apuntado anteriormente, ese esfuerzo por mantener un control durante toda la cadena metalúrgica no siempre fue posible, aunque

sí fue del todo fundamental como impulso de nuevos avances tecnológicos. Control total que no se consolidará hasta iniciada la Edad del Bronce.

Por otra parte, en el yacimiento de Los Millares se han puesto de manifiesto varias estructuras dedicadas exclusivamente a las tareas de producción metalúrgica, por lo que podemos destacar la importancia que a nivel socio-económico tendría la metalurgia al constatarse la aparición de especialistas en el trabajo metalúrgico, al tiempo que se desarrollaba uno de los factores determinantes en cualquier avance tecnológico, el de la experimentación.

Esta hipótesis queda corroborada al aparecer en Los Millares (Arribas *et al.*, 1987) diversas áreas en donde se realizaron fases diferentes del proceso metalúrgico.

Los resultados y las interpretaciones que de aquí se deriven deben de tomarse como preliminares a la espera de poder ofrecer un estudio más en profundidad de todos aquellos restos metalúrgicos que actualmente están siendo objeto de estudio y que serán recogidos en la Memoria Final sobre el Proyecto Los Millares, actualmente en curso de realización. Una vez obtenidos todos los resultados analíticos de los diversos materiales implicados en la cadena de producción de objetos metálicos, podremos hacer la interpretación final, atendiendo tanto a la situación estratigráfica en que se hallaron como a la localización contextual dentro de cada uno de los yacimientos.

Según nuestros conocimientos hasta el momento, la tecnología del arsénico y del cobre de CB y LM ofrece la imagen de un procedimiento metalúrgico muy diferenciado en múltiples fases. Por tanto, no se trata solamente de un episodio transitorio en la metalurgia sino, obviamente, de un importante período de transición durante el cual se desarrollaron o perfeccionaron partes esenciales de procedimientos técnicos sobre los cuales se podían basar avances posteriores.

Nuestra interpretación de los análisis sobre las muestras practicadas de CB y LM es un intento de entender mejor los rasgos principales de esta metalurgia antigua en suelo europeo. Algunas preguntas quedan sin contestar o incluso surgen como resultado de esta investigación. Se pueden encontrar ciertos paralelos en el desarrollo en áreas históricas y geográficas muy distintas; por ejemplo, con la tecnología del cobre de los Andes. Sin embargo, desgraciadamente sólo disponemos de muy pocos estudios sobre conjuntos similares que nos permitan realizar un estudio comparativo. Los resultados de la arqueometalurgia experimental no resultan tampoco de gran ayuda cuando se trata, como es el caso de los trabajos de Rostocker *et al.* (1989, 1991), que son más bien teóricos y que no concuerdan en realidad con las materias primas observadas por nosotros ni con el proceso de reacción visto en nuestras muestras.

En comparación con investigaciones de épocas más recientes acerca de la metalurgia de metal no ferroso en el sur de España, sobre todo en la región de Río Tinto, se detecta un aspecto sorprendente: La metalurgia de CB y LM representa posiblemente la metalurgia más antigua conocida en el suroeste de Europa. Sin embargo, en ella ya existen o están presentes todos los elementos que posteriormente se desarrollarán de manera claramente diferenciada y que alcanzarán al final de la época romana el nivel *standard* más alto que se continúa hasta el final de la Edad Media. Hubiera sido suficiente, por ejemplo, utilizar adicionalmente un poco de galena (PbS) de la contigua Sierra de Gádor en la mezcla de menas para incluir la plata en el plomo —mediante una fundición reductora— y de esta manera obtenerlo como un metal nuevo mediante oxidación,

aunque esto hubiera tenido consecuencias graves para la tecnología del arsénico y del cobre. A lo mejor, el conocimiento de un mineral de cobre más rico en hierro hubiera sido el requisito previo para un desarrollo en esta dirección. En todo caso, es de suponer que en el sur de la Península Ibérica se dio un desarrollo continuo de la tecnología del metal no ferroso en el cual El Malagón, Los Millares y probablemente también Zambujal (Portugal) documentan hitos decisivos en un momento antiguo.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores dan las gracias a todos los excavadores y, sobre todo, a F. Molina González, del Departamento de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada. No es solamente que gracias a su interés pudimos investigar los restos arqueometalúrgicos. También ha contribuido en gran medida y de varias maneras tanto al inicio de las investigaciones como al éxito de las mismas.

Queremos dar las gracias especialmente a B. Rothenberg (Londres/Tel Aviv) por los contactos que estableció con distintas instituciones para llevar a cabo un trabajo en común dedicado al conocimiento de la metalurgia antigua. Parte de la investigación no hubiera sido posible sin el apoyo financiero de la Fundación Volkswagen, que fomentó dicha investigación tanto directa como indirectamente en el marco de su especialidad en arqueometalurgia.

Gracias también a los colaboradores del Museo Británico, con los cuales tuvimos muchos contactos variados y fructíferos.

Por el resultado del tratamiento científico, el primer autor quiere dar las gracias a todos los estudiantes colaboradores del grupo de trabajo de arqueometalurgia que desde los años 80 vienen contribuyendo a reunir todos los datos y conocimientos arqueometalúrgicos sin los cuales no hubiera sido posible hacer una síntesis de todas las distintas observaciones acerca de la metalurgia del cobre de CB y LM.

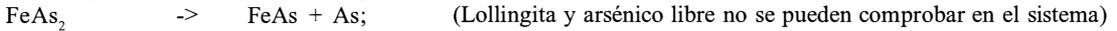
Finalmente, queremos dar las gracias a B. Schulz-Dobrick, del Departamento de Ciencias Geológicas de la Universidad de Maguncia, por su contribución irremplazable, gracias a la cual se pudieron llevar a cabo con éxito los análisis con el microsonda.

APENDICE

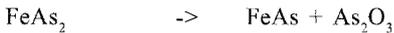
ESQUEMA DE REACCION DE LA TECNOLOGIA DEL ARSENICO Y DEL COBRE DE EL MALAGON Y LOS MILLARES (muy simplificado, no estequiometrico)

1. Formación de FeAs (¡hipotético, sin conocer las menas de As realmente utilizadas!)

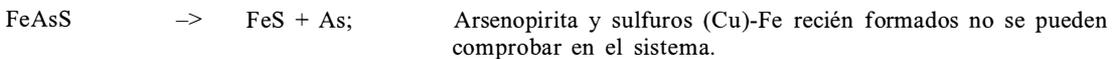
Descomposición térmica de lollingita bajo cierre hermético (obtención de arsénico)



Descomposición térmica de lollingita bajo suministro reducido de oxígeno



Descomposición térmica de arsenopirita bajo cierre hermético (obtención de arsénico)

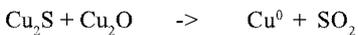


¿Posible reacción alternativa?

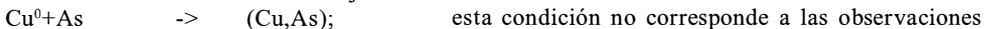
Descomposición térmica de arsenopirita bajo suministro reducido de oxígeno



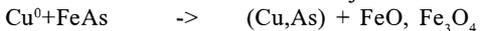
2. Obtención de cobre por el método de la calcinación



3.0. Formación de aleación bajo cierre hermético



3.1. Formación de aleación bajo suministro reducido de oxígeno



3.2. Regulación de arsénico bajo suministro reducido de oxígeno

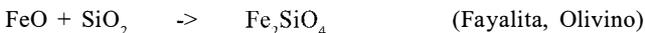


3.3. Oxidación de cobre bajo suministro reducido de oxígeno

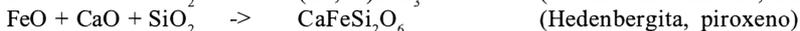
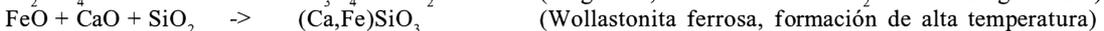


4. Escorificación derivada de la colada silicatada

Escorificación bajo condiciones reductoras



Escorificación bajo condiciones menos reductoras



BIBLIOGRAFIA

- ALCARAZ, F. *et al.* (1987): "Proyecto de prospección arqueológica superficial llevado a cabo en el Pasillo de Tabernas (Almería)", *An. Arq. And.* 1986, II, pp. 62-65.
- ALMAGRO, M. y ARRIBAS, A. (1963): *El poblado y la necrópolis megalítica de Los Millares (Santa Fe de Mondújar)*, Bibl. Praeh. Hisp. 3, Madrid.
- ARRIBAS, A. (1976): "A new basis for the study of the Eneolithic and Bronze Age in South-east Spain". En *Essays to S. Pigott*, London, pp. 153-162.
- ARRIBAS, A.; CRADDOCK, P.; HOOK, D. R.; MOLINA, F. y ROTHENBERG, B. (1989): "Investigación arqueometalúrgica en yacimientos de las Edades del Cobre y del Bronce en el Sudeste de Iberia". En C. Domergue (Ed.): *Minería y metalurgia en las antiguas civilizaciones mediterráneas y europeas I (Coloquio Internacional Madrid, 24 a 28 de octubre, 1985)*, Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales, Madrid, pp. 71-79.
- ARRIBAS, A. y MOLINA, F. (1987): "New Bell Beaker discoveries in the Southeast Iberian Peninsula". En W. H. Waldren y R. C. Kennard (Eds.): *Bell Beakers of the Western Mediterranean I*, BAR International Series, 331, Oxford, pp. 129-146.
- (1991): "Los Millares: nuevas perspectivas". En W. H. Waldren, J. A. Enseyat, R. C. Kennard (Eds.): *Ind Deya International ... II*, BAR Int. serie 574, pp. 409-420.
- ARRIBAS, A.; MOLINA, F.; SÁEZ, L.; TORRE, F. DE LA; AGUAYO, P.; BRAVO, A. y SUÁREZ, A. (1983): "Excavaciones en Los Millares (Santa Fe de Mondújar, Almería). Campañas de 1982 y 1983", *Cuad. Preh. Gr.* 8, pp. 123-147.
- ARRIBAS, A.; MOLINA, F.; CARRIÓN, F.; CONTRERAS, F.; MARTÍNEZ, G.; RAMOS, A.; SÁEZ, L.; TORRE, F. DE LA; BLANCO, I. y MARTÍNEZ, I. (1987): "Informe preliminar de los resultados obtenidos durante la VI campaña de excavaciones en el poblado de Los Millares (Santa Fe de Mondújar, Almería), 1985", *An. Arq. de And., II*, pp. 245-262.
- BACHMANN, H. G. (1980): "Early Copper Smelting Techniques in the Sinai and Negev as Deduced from Slag Investigations". En P. T. Craddock (Ed.): *Scientific Studies in Early Mining and Extractive Metallurgy*, British Museum Occasional Paper N.º 20, London, pp. 103-134.
- BLANCE, B. (1961): "Early Bronze Age colonists in Iberia", *Antiquity* 35, pp. 192-202.
- BLANDERER, J. (1964): "Die metallurgischen Speisen und ihre Verarbeitung", *Erzmetall* 17, pp. 247-253.
- BOSCH GIMPERA, P. (1920): "La arqueología prerromana hispánica". En A. Schulten (Ed.): *Hispania*, Barcelona, pp. 148-155.
- (1932): *Etnología de la Península Ibérica*, Barcelona.
- (1969): "La Cultura de Almería", *Pyrenae* 5, pp. 47-93.
- CHAPMAN, R. W. (1982): "Autonomy, ranking and resources in Iberian prehistory". En C. Renfrew y S. Shenan (Eds.): *Ranking, resource and exchange. Aspects of Archaeology of Early European Society*, Cambridge, pp. 46-51.
- (1991): *La formación de las sociedades complejas. El Sureste de la Península Ibérica en el marco del Mediterráneo occidental*, Ed. Crítica/Arqueología, Barcelona.
- CHILDE, G. (1963): *The megalithic Builders of Western Europe*, Pelican, London.
- GILMAN, A. (1976): "Bronze Age dynamics in South-east Spain", *Dialectical Anthropology* 1, pp. 307-319.
- (1987a): "El análisis de clase en la Prehistoria del Sudeste", *Trab. Preh.*, 44, pp. 27-34.
- (1987b): "Regadío y conflicto en sociedades acéfalas", *B.S.A.A.*, LIII, pp. 59-72.
- (1993): "Cambio cultural y contacto en la Prehistoria de la Europa Mediterránea", *Trab. Preh.* 50, Madrid, pp. 103-112.
- HAUPTMANN, A. (1989): "The Earliest Periods of Copper Metallurgy in Feinan, Jordan". En Hauptmann, A., E. Pernicka y G. A. Wagner (Eds.): *Archäometallurgie der alten Welt-Old World Archaeometallurgy* 7, Heidelberg.
- HAUPTMANN, A.; LUTZ, J.; PERNICKA, E.; YALCIN, Ü. (1993): *Zur Technologie der frühesten Kupferverhüttung im östlichen Mittelmeerraum. Between the Rivers and over the Mountains. Archaeologica Anatolica et Mesopotamica Alba Palmieri dedicata* (Hrsg. M. Frangipane, H. Hauptmann, M. Liverani, P. Matthiae, M. Melnik). Seiten. Rom, Universtät "La Sapienza", pp. 541-572.

- HERNANDO, A. (1987-88): "Interpretaciones culturales del Calcolítico del Sureste español. Estudio de sus bases teóricas", *Cuad. Preh. Gr.*, 12-13, pp. 35-80.
- HOOK, D. R.; FREESTONE, I. C.; MEEKS, N. D.; CRADDOCK, P. T.; y MORENO, A. (1991): "The early production of copper-alloys in south-east Spain", *Archaeometry Conference*, Heidelberg, pp. 65-76.
- KALB, F. (1969): "El poblado del Cerro de la Virgen de Orce (Granada)", *X C.N.A. (Mahón 1967)*, pp. 216-225.
- (1975): "Arquitectura de las colonias del Bronce I", *XIII C.N.A.*, pp. 383-386.
- KEESMANN, I. (1985): Chemische und mineralogische Untersuchung von Elsenschlacken aus der hallstattzeitlichen Siedlung von Niedererlbach. *Archäologisches Korrespondenzblatt* 15:3. Römisch-Germanisches Zentralmuseum. Mainz, pp. 351-357.
- KEESMANN, I. (1993): Naturwissenschaftliche Untersuchungen zur antiken Kupfer— und Silververhüttung in Südwestspanien. *Montanarchäologie in Europa* (Hrsg. H. Steuer u. U. Zimmermann), (1993). Archäologie und Geschichte. Freiburger Forschungen zum ersten Jahrtausend in Südwestdeutschland, Band 4. Thorbecke Verlag Sigmaringen, pp. 105-122.
- KEESMANN, I., HEEGE, A. (1990): Archäometallurgische Untersuchungen an Material der Ausgrabung 1984 am "Steinbühl" bei NörtenHardenberg, Ldkr. Northeim. *Nachrichten aus Niedersachsens Urgeschichte (NNU)* 59, pp. 87-109.
- KRAWCZYK, E., KEESMANN, I. (1987): Pyroxen— und Olivinparagenesen in alten Buntmetallenschlacken. *Fortschritte der Mineralogie* 65:1, Schweizerbarth Stuttgart, p. 109.
- KRAWCZYK, E., KEESMANN, I. (1991): Ergänzende Untersuchungen zur Kupfermetallurgie von Timna im Wadi Arabah, Israel, *Jahrbuch des RGZM Mainz* 35 (1988) (Inga Serning-Sonderband), pp. 516-522.
- LECHTMAN, H. (1988): Traditions and Styles in Central Andean Metalworking. *The Beginning and Use of Metals and Alloys. Papers from the Second International Conference on the Beginning of the Use of Metals and Alloys*, Zhengzhou, China, 21-26. Oktober 1986 (Hrsg. R. Madin). Massachusetts Institute of Technology, pp. 344-378.
- LEISNER, G. y V. (1943): *Die Megalithgräber der Iberischen Halbinsel, Der Süden*, Römisch-Germanische Forschungen 17, Berlin.
- (1949): "Los monumentos megalíticos del mediodía de la Península Ibérica, según los resultados a los que han llegado G. y V. Leisner", *Arch. Esp. Arq.* XXII, pp. 75-85, 195-206, 249-263, 363-377.
- LULL, V. (1983): *La cultura de El Argar. Un modelo para el estudio de las formaciones económico-sociales prehistóricas*, Ed. Akal, Madrid.
- MALDONADO, M. G.; MOLINA, F.; MÉRIDA, V. y RUIZ, V. (1991): "Recuperación y procesamiento de datos en un modelo de prospección sistemática", *II Encuentros sobre Arqueología y Patrimonio de Salobreña* (en prensa).
- MASKE, S., SKINNER, B. J. (1971): Studies of the sulfosalts of copper. Phases and Phase relations in the system Cu-As-S. *Econ. Geol.* 66, pp. 901-918.
- MATHERS, C. (1984): Linear progression, inflation and prestige competition: 2nd millenium transformations in South-East Spain. En W. H. Waldren *et al.* (Eds.): *The Deya Conference of Prehistory*, BAR International Series, Oxford, pp. 1167-1196.
- MENKEL, J. F., SHIMADA, I. (1988): Arsenical Copper Smelting at Batán Grande, Peru. *IAMS* 12, pp. 4-7.
- MERGELINA, C. (1941-42): La estación arqueológica de Montefrío (Granada). I. Los dólmenes, *B. S. A. A.*, VIII, Valladolid, pp. 33-106.
- MOLINA, F. (1983): "Prehistoria". En F. Molina y J. M. Roldán: *Historia de Granada I. De las primeras culturas al Islam*, Granada.
- (1988): "El Sudeste". En G. Delibes *et al.*: El Calcolítico en la Península Ibérica, *Rassegna di Archeologia* 7, pp. 256-262.
- MOLINA, F.; CONTRERAS, F.; RAMOS, A.; MÉRIDA, V.; ORTIZ, F. y RUIZ, V. (1986): "Programa de recuperación del registro arqueológico del Fortín 1 de Los Millares. Análisis preliminar de la organización del espacio", *Arqueología Espacial. Coloquio sobre el microespacio* 8, Teruel, pp. 175-202.
- MORENO, A. (1993): *El Malagón. Un asentamiento de la Edad del Cobre en el Altiplano de Cúllar-Chirivel*, Tesis Doctorales Microfilmadas de la Universidad de Granada, Granada.
- MORENO, A.; MARTÍNEZ, J. y RAMOS, A. (1987): "Prospección arqueológica superficial en la zona occidental y central del Pasillo de Chirivel/Vélez Rubio (Almería)", *An. Arq. And.* 86 II, pp. 19-25, Sevilla.

- MUHLY, J. D. (1989): Cayöni Tepesi and the Beginnings of Metallurgy in the Old World. *Archäometallurgie der alten Welt - Old World Archäometallurgy* (Hrsg. A. Hauptmann, E. Pernicka, G. A. Wagner), Beiheft 7, Heidelberg, Deutsches Bergbau Museum Bochum, pp. 1-12.
- NORTHOVER, J. P. (1989): Properties and Use of Arsenic-Copper-Alloys. *Archäometallurgie der alten Welt - Old World Archäometallurgy* (Hrsg. A. Hauptmann, E. Pernicka, G. a. Wagner), Beiheft 7, Heidelberg, Deutsches Bergbau Museum Bochum, pp. 111-118.
- PIGGOT, S. (1965): *Ancient Europe from the beginnins of agriculture to Classical Antiquity*, Edinburgh.
- RAMDOHR, P. (1975): *Die Erzminerale und ihre Verwachsungen*, Akademie-Verlag, Berlin.
- RAMOS, A. (1981): Interpretaciones secuenciales y culturales de la Edad del Cobre en la zona meridional de la Península Ibérica. La alternativa del materialismo cultural, *Cuad. Preh. Gr.* 6, pp. 242-256.
- RAMOS, A.; MARTÍNEZ, G.; RÍOS, G. y AFONSO, J. (1991): *Flint production and exchange in the Iberian Southeast, III millenium B. C. VI International Flint Symposium. Postsymposium Field Trip*, Granada.
- RAPP, G. (1989): Determining the Origins of Sulfide Smelting. *Archäometallurgie der alten Welt - Old World Archäometallurgy* (Hrsg. A. Hauptmann, E. Pernicka, G. A. Wagner), Beiheft 7, Heidelberg, Deutsches Bergbau Museum Bochum, pp. 107-110.
- RENFREW, C. (1967): Colonialism and megalithismus, *Antiquity* 41, pp. 276-288.
- ROTHERBERG, B. (1989): Arsenical copper ore in the newly discovered Copper-Age mine ALS2 in Almería, South-East Andalusia (Spain) - a correction. *IAMS* 14. London, p. 7.
- ROTHERBERG, B. F.; CARRIÓN, A.; MORENO y MÉRIDA, V. (1988): "A prehistoric copper mine and smelter in south-east Andalusia (Spain)". First discovery by IAMS survey team, *IAMS Newsletter* 13, pp. 1-5.
- RYNDINA, N. V. YAKHONTOYA, L. K. (1985): "The Earliest Copper Artifact from Mesopotamia". *Sovietskaja Archeologija* 1985, pp. 155-165, citado en MUHLY (1989).
- SANGMEISTER, E. (1960): "Metalurgia y comercio del cobre en la Europa prehistórica", XI, *Zephyrus*, pp. 131-139.
- SAVORY, H. (1977): "The role of Iberian Communal tombs in mediterranean and Atlantic Prehistory". En V. Markotic (Ed.): *Ancient Europe and the Mediterranean*, pp. 161-180.
- SCHÜLE, W. y PELLICER, M. (1966): El Cerro de la Virgen. Orce (Granada) I, *Exc. Arq. Esp.* 46, Madrid.
- SIRET, L. y E. (1890): *Las Primeras Edades del Metal en el Sudeste de España. Resultados obtenidos en las excavaciones hechas por los autores desde 1881 a 1887*, Barcelona.
- TORRE, F. DE LA; MOLINA, F.; CARRIÓN, F.; CONTRERAS, F.; BLANCO, I.; MORENO, M. A. y DE LA TORRE, M. P. (1984): "Segunda campaña de excavaciones en el yacimiento de la edad del Cobre de El Malagón (Cúllar-Baza, Granada)", *Cuad. Preh. Gr.*, 9, pp. 221-226.

FE DE ERRATAS

INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS DE LA METALURGIA DE EL MALAGON Y LOS MILLARES, EN EL SURESTE DE ESPAÑA.

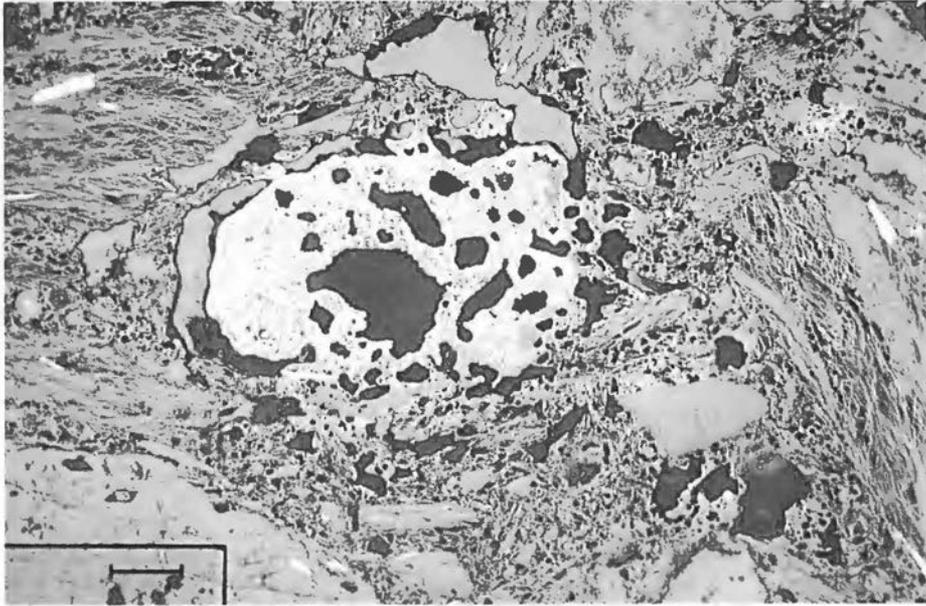
Págs. 264, 301. El pie de la Fig. 1 corresponde a la Lám. IV.-a).

Págs. 298, 299. El pie de la Lám. I corresponde a la Lám. II.

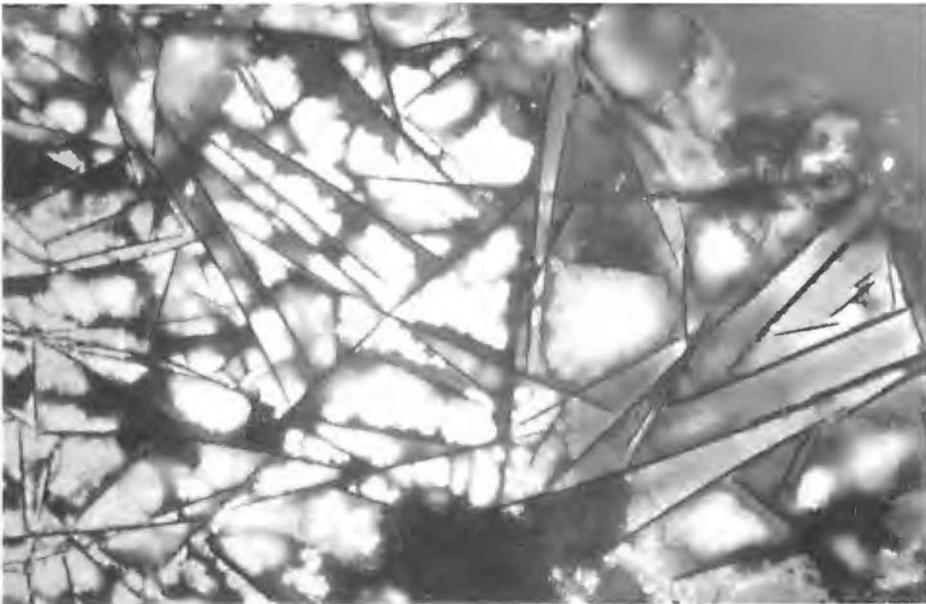
Págs. 299, 298. El pie de la Lám. II corresponde a la Lám. I.

Págs. 300, 264. El pie de la Lám. III.-b) corresponde a la Fig.1.

Págs. 301, 300. El pie de la Lám. IV.-a) corresponde a la Lám. III.-b).

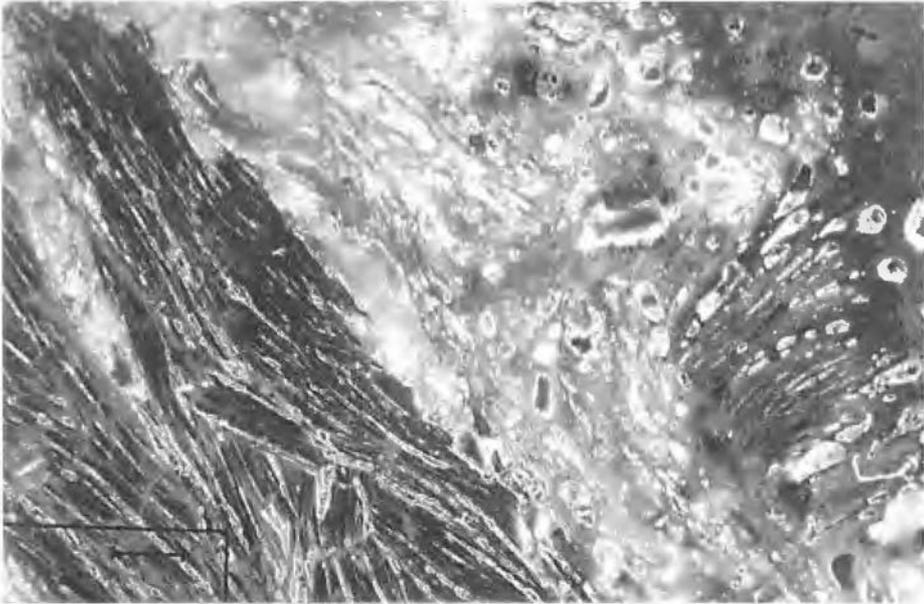


a

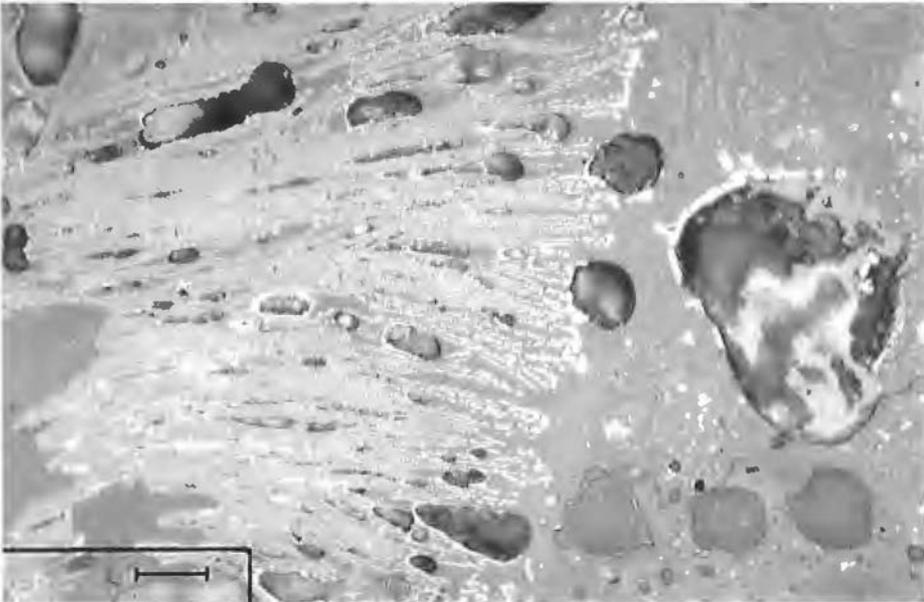


b

Lám. I.—a) *LM-89342 (Pp. 1158)*, toma n.º 2368. Fragmento cerámico en contacto con escoria fundida. La cerámica contiene silicatos ricos en Fe en diferentes estadios de transformación. Margen izquierdo: marrón oxidado o incoloro. Margen derecho: fundiéndose bajo una formación de burbujas. Luz reflejada, campo oscuro sin polarización. Ancho de la toma de aproximación 0,7 mm. b) *LM-89342 (Pp. 1158)*, toma n.º 2369. Silicato laminar rico en hierro en fase de fundición. En contacto con las escorias de fundición se forman cuerdas orientadas de magnetita. Luz reflejada. 1 polarización. Ancho de la toma de aproximadamente 0,28 mm.

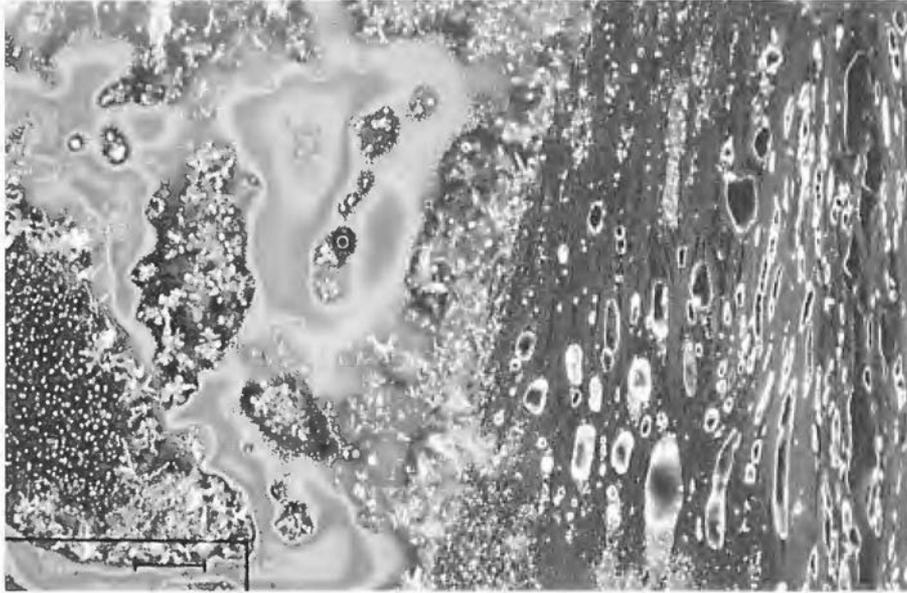


a

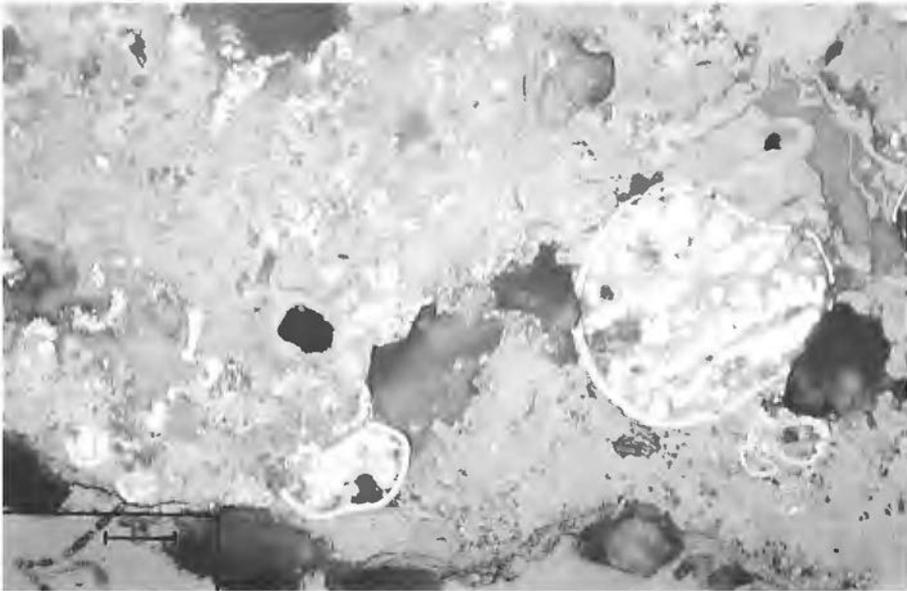


b

Lám. II.—a) LM-76083 (Pp. 1154), toma n.º 2362. Escoria de fundición formada *in situ* en el fragmento cerámico, con inclusiones de numerosas gotitas de hierro. Luz reflejada, sin polarización. Ancho de la toma de aproximadamente 2,8 mm. b) LM-89407 (Pp. 1155), toma n.º 2149. Varillas de delafosita (CuFeO_2) en una matriz vidriosa. El vidrio de la escoria contiene gotitas muy pequeñas de cobre (de color amarillo) en forma dispersa. Luz reflejada, campo oscuro sin polarización. Ancho de la toma de aproximación 0,28 mm.

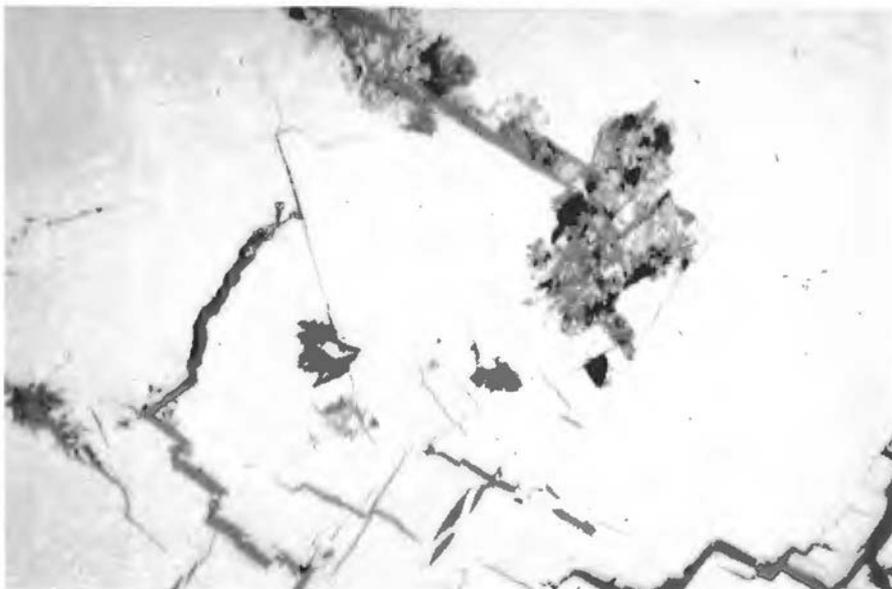


a

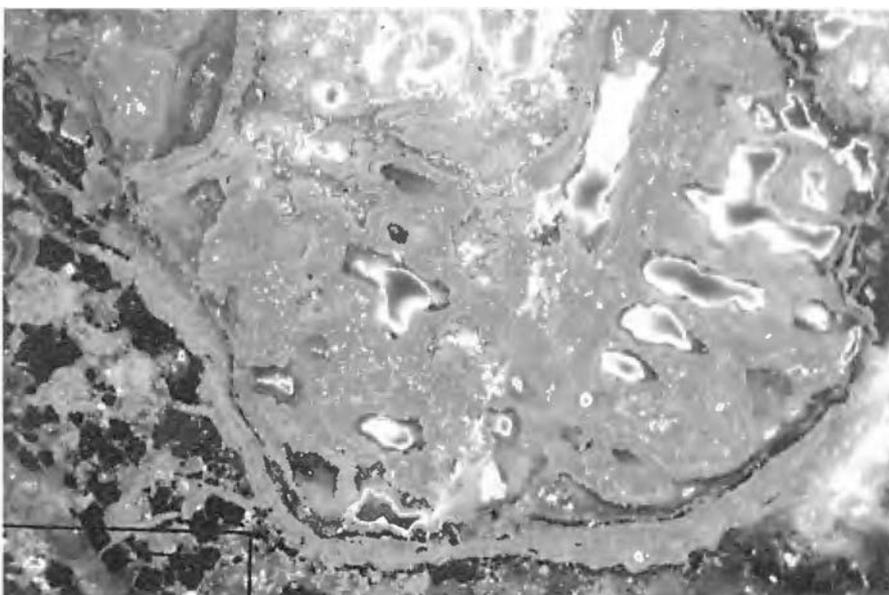


b

Lám. III.—a) *LM-89381* (*Pp. 1160*), toma n.º 2382. Se aprecia el contacto entre la cerámica y la escoria de fundición. En la cerámica se funde un paquete de silicatos laminares. Se forma una fundición rica en SiO_2 que al enfriarse se transforma en vidrio con inclusiones de piroxeno (de color verdoso). El vidrio de la escoria contiene nubes de gotitas metálicas muy finas de cobre de color amarillo-rojizo. Luz reflejada, campo oscuro sin polarización. Ancho de la toma de aproximadamente 0,7 mm. b) *LM-33119* (*Pp. 1219*). Bolita de escoria rica en magnetita y metal descompuesto prácticamente en su totalidad. Ambas partes están adheridas. La bolita “metálica” es muy porosa y contiene en la cubierta de escoria originaria aún algunos sulfuros de Cu-Fe-Zn. Ancho de la toma de aproximadamente 4,5 mm.

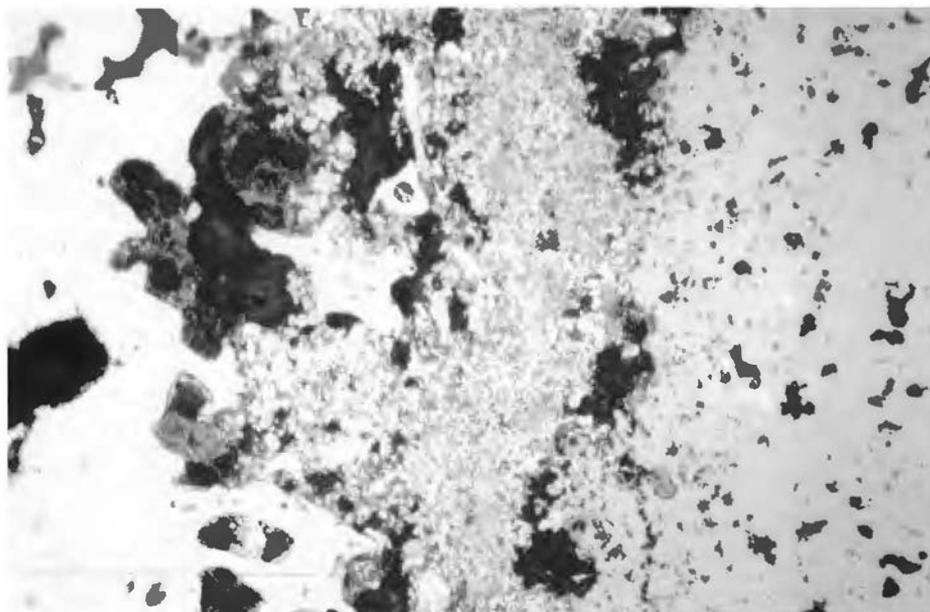


a

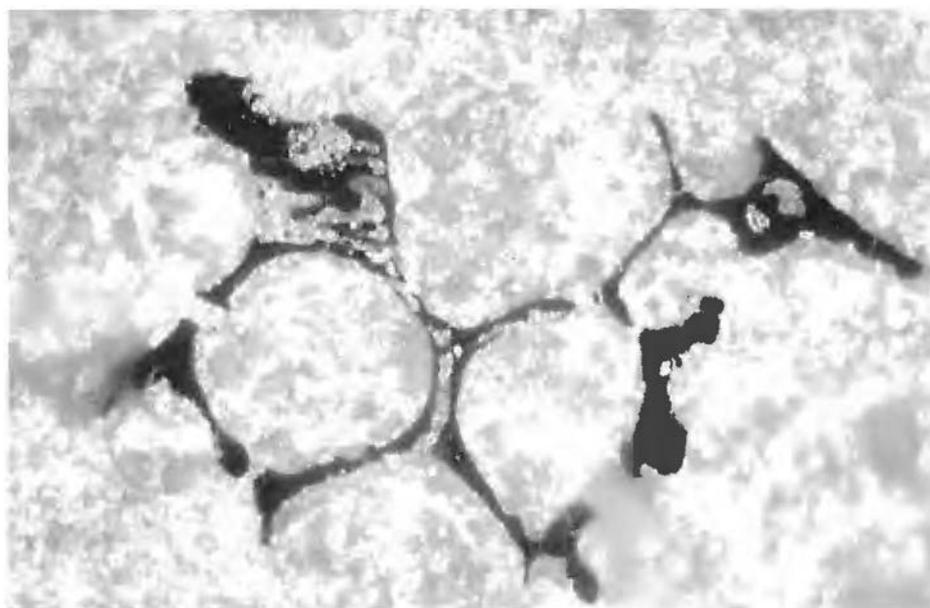


b

Lám. IV.—a) *LM-32248* (*Pp. 1221*), toma n.º 2375. Escoria con numerosas inclusiones de arseniuro de hierro. El arseniuro de Fe forma cristales dendríticos en el interior de segregaciones redondeadas (¿alimentación?). El borde de la bolita está marcada por un reborde de magnetita (“atolones”). Una parte de la materia originaria de la bolita está descompuesta secundariamente. Luz reflejada, 1 polarización. Ancho de la toma de aproximación 0,7 mm. b) *LM-36016* (*Pp. 1284*), toma n.º 2379. Grano de cobre metálico totalmente oxidado con un reborde de óxido. Los productos de transformación (sobretudo cuprita, Cu_2O) ha conservado de forma residual la estructura originaria dendrítica del cobre que se ha enfriado a partir de la fundición. Luz reflejada sin polarización. Ancho de la toma de aproximadamente 0,7 mm.



a



b

Lám. V.—a) *LM-61025* (*Pp. 1287*), toma n.º 2146. Cobre metálico en proceso de oxidación. En la transformación del cobre a Cu_2O se libera plata metálica en forma de partículas muy finas de color blanco. Luz reflejada. 1 polarización. Ancho de la toma de aproximadamente 0,7 mm. b) *LM-33118* (*Pp. 1282*), toma n.º 2186. Cobre metálico con masa intergranular eutéctica. El cobre metálico y las líneas que recorren la masa intergranular están totalmente descompuestos. Luz reflejada en lubricante. 1 polarización. Ancho de la toma de aproximadamente 0,14 mm.