

## La fundición pre y protohistórica:

Aspectos teóricos sobre los hallazgos arqueológicos de la fundición de metales

Pablo Gómez Ramos

La metalurgia, como toda actividad productiva, se compone de una serie de elementos y productos que les son propios. En el terreno arqueológico los hallazgos son relativamente abundantes y aunque la investigación arqueometalúrgica europea ha proporcionado un bagaje de conocimientos tecnológicos de gran relevancia lo cierto es que el tema está lejos de estar agotado. El interés principal de estas páginas reside en dar a conocer a la comunidad científica española cuales son los elementos principales relacionados con la fundición primaria de metales que pueden hallarse en el registro arqueológico ya que varios de ellos suelen confundirse profanamente al presentar diversas lecturas. A ello cabe añadir, nuestro deseo de matizar en la medida de lo posible la idea equivocada y muy extendida que otorga a la fundición un carácter complejo y unas estructuras excesivamente desarrolladas, y que viene motivada sin duda, por la falta de estudios básicos sobre el tema.

Los agentes tecnológicos del trabajo del metal pueden dividirse en dos grandes bloques, ambos interrelacionados entre sí:

- 1.- Elementos empleados en la fundición (hornos, toberas, crisoles,...).
- 2.- Productos resultantes de la misma (escorias y lingotes).

### 1.- Elementos de la fundición.

**Hornos.** La fundición de metales en la Antigüedad des-

cansaba en una tecnología muy sencilla basada en pequeños hornos donde se procesaban minerales y metales con la ayuda de fuelles y toberas y, ocasionalmente, con el empleo apropiado de fundentes. A grandes rasgos, el horno es una cámara donde se producen las transformaciones químicas que van a permitir la conversión de un mineral metálico en metal. En el rendimiento de los hornos habrá que tener en cuenta distintos elementos como son el combustible empleado (con alguna excepción, fue siempre carbón vegetal), la capacidad aislante del horno, para la cual se emplean revestimientos arcillosos y una aireación adecuada a través del suministro de aire mediante el uso de toberas y fuelles.

El proceso de fundición, según experimentos actuales y estudios etnográficos de pueblos primitivos, pasaba, una vez construido y seco el horno, por calentar la cámara, y suministrar a continuación la carga de mineral y combustible en proporciones adecuadas, siendo el baremo desde 1:1 a 1:5. Mineral y carbón se mezclaban machacados para facilitar las superficies de contacto con el agente reductor (monóxido de carbono). El tiempo de operación estaba en función de la capacidad del horno, y se estima que duraba varias horas.

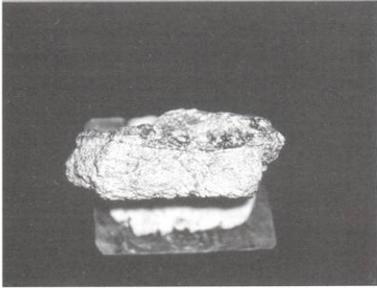
Aunque en todas las producciones intervenían hornos de pequeño tamaño (no suelen superar el metro de diámetro), ne-

*Pablo Gómez Ramos es Doctor en Prehistoria y Arqueología, y becario de Formación de Personal Investigador del M.E.C.*

cesario para poder calentarse sin dificultad ya que el poder calorífico del carbón vegetal y los sistemas de aireación no permitían el uso de hornos de gran volumen, lo cierto es que pueden establecerse algunas diferencias según el metal procesado, principalmente en lo relacionado a la dinámica y productos de la fundición. En el caso de los **hornos de cobre y bronce**, junto a estructuras excavadas en el suelo con superestructuras de forma y tamaño variable era también normal la utilización de simples vasijas cerámicas, que, en la península ibérica, será el tipo más utilizado. Se trata de vasos sin preparación especial, de gran tamaño, muy superior al de los crisoles, que suelen presentar la cara interna vidriada y con restos escoriáceos (Foto 1) mientras que la cara externa no presenta alteraciones térmicas. La producción de los hornos de cobre y bronce variaba entre conglomerados de horno, formados por



1.



2.

Foto 1. Microfotografía de una adherencia en una vasija-horno del yacimiento de la Edad del Hierro de la Bauma del Serrat (Gerona). 200x.

Figura 1: Reconstrucción de un horno meorítico de reducción de hierro (Tylecote, 1970, p. 72, fig. 6).

Figura 2: Horno de copelación de plata en las minas griegas del Laurion (Conophagos, 1989, p. 279, fig. 1).

Foto 2. Fragmento de un revestimiento de un horno de bronce del yacimiento de la Segunda Edad del Hierro del Castrejón de Capote (Badajoz).



Fig. 2

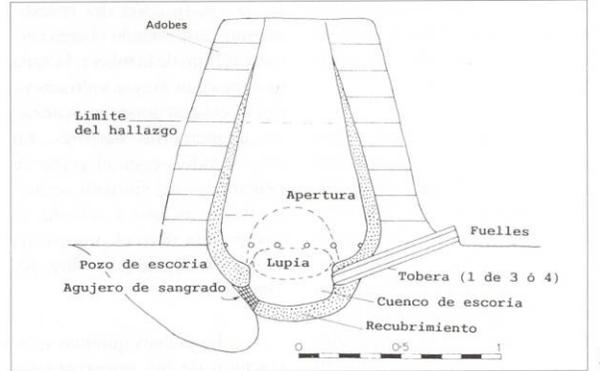


Fig.

minerales parcialmente reducidos con goterones de metal, propios de vasijas-horno y hornos simples, y lingotes de metal depositados en la solera de los hornos de mayor capacidad que eran posteriormente refundidos en crisoles y vertidos en moldes.

No ocurre lo mismo en el caso de la metalurgia del hierro, pues todos los hornos antiguos de reducción de hierro se caracterizaban por la imposibilidad de alcanzar la temperatura de fusión del metal (unos 1.560 °C) y por lo tanto, su licuado y trabajo en moldes. El mineral reducido quedaba conformado en un lingote en bruto en estado sólido de varios kilos de peso, conocido con los términos de lupia o es-

ponja ferrífera, situado cerca o encima del flujo obtenido a través de la tobera, al ser la zona donde se alcanzaba la mayor temperatura (Figura 1). Un proceso posterior de forja en caliente servía para compactar la lupia y mediante sucesivos martillados dar la forma adecuada al lingote. Los hornos son similares a los del trabajo del cobre y bronce, siempre de pequeño diámetro y donde es común la construcción de estructuras verticales donde integrar la/s tobera/s ya que en el caso del hierro el aporte de aire es casi siempre necesario.

El otro metal importante producido en la Prehistoria fue la plata. Su trabajo estuvo íntimamente ligado a la producción

de plomo ya que en muchos casos ambos metales forman asociación en los mismos conjuntos mineralógicos. La reducción de los minerales de plata pasaba por distintas fases (tostado a baja temperatura, purificación del plomo crudo y por último, la copelación). Las dos operaciones primeras se realizaban en hornos de pequeño tamaño similares a los anteriores. Tampoco la copelación, empleada para la obtención de plata en el Egeo ya desde mediados del III milenio precristiano (Wagner et al., 1980, p. 77) implicaba, grandes estructuras, siendo necesario un crisol y un potente chorro de aire para oxidar de manera selectiva el plomo y separar así el litargirio (óxido de plomo) del metal noble (Figura 2).

El proceso de degradación del horno debido al paso del tiempo o en su momento a una destrucción voluntaria, conlleva que los vestigios de estructuras metalúrgicas que el arqueólogo

pueda encontrar sean siempre parciales y a veces de difícil identificación. Esta carencia queda suplida en parte por el hallazgo de otros elementos relacionados con las estructuras de los hornos -revestimientos y toberas- o con la fundición del metal - sobre todo, crisoles y moldes -.

**Revestimientos.** (Foto 2).

En hornos excavados en el suelo y principalmente en hornos construidos con piedras o adobes era frecuente, aunque no siempre imprescindible, revestir el fondo y las paredes con una o más capas de arcilla con el fin de igualar la superficie interior dándole la forma deseada y taponar también orificios y huecos por los cuales podía perderse calor. Este material refractario, que ha de resistir elevadas temperaturas sin sufrir grandes variaciones, conserva en las zonas que han estado en contacto con la carga, coloraciones ocasionadas por el fuego que van de los tonos rubefactados a los grises cen-

cientos, adherencias de escorias o una capa vidriada por la naturaleza alcalina de las cenizas incandescentes.

Se han encontrado restos de hornos cuya pared presenta una sección en la que se distinguen varias capas, siendo el verdadero revestimiento (la capa que envuelve el hogar) de un material más refractario. Uno de los estudios más exhaustivos llevados a cabo acerca de la naturaleza de los refractantes usados en hornos es el referido a Timna, Israel (Tite et al., 1990). En él se revela que la arcilla utilizada para toberas y revestimientos es poco calcárea mientras la encontrada en los fondos de horno contiene más del 5% de óxido de cal; no obstante, las propiedades refractarias parecen ser muy similares aunque la tendencia a la vitrificación es mayor en la no calcárea (Tite et al., 1990, p. 160).

Otro ejemplo es el caso de los revestimientos de hornos de cobre excavados en Knosos (Creta), de tiempos helenísticos y romanos, cuyos análisis demuestran el uso de arcilla común para la estructura de la pared y arcillas distintas, más calcáreas, para el revestimiento (Photos, Fillippakis y Salter, 1985, pp. 193-194).

De la Península Ibérica hemos tenido ocasión de estudiar varios fragmentos de este mismo tipo. También dependiendo de las distintas zonas del hor-

no la vitrificación del revestimiento varía, siendo el área cercana al flujo de la tobera, la zona que presenta mayor vidriado ya que es el lugar donde se alcanzan las temperaturas mayores. En este sentido, según el grado de penetración del vidriado, se puede llegar incluso a calcular el tiempo que duró el proceso de fundición (Craddock, 1989, pp. 196-197).

El análisis químico y estructural de los revestimientos es una fuente importante de información acerca de las temperaturas de operación del horno, pues determinadas transformaciones en los compuestos arcillosos se producen a unas temperaturas dadas. De ese modo se ha podido averiguar que las paredes de los hornos de Timna no superaron los 1.100 °C; en cambio algunas toberas tuvieron que soportar hasta 1.225 °C (Tite et al., 1990, p. 171, tabla 4), lo cual significa que la temperatura en el hogar debió ser algo superior.

Algunos trozos desgajados e intensamente vitrificados de estos revestimientos pueden identificarse erróneamente como escorias de fundición ya que los componentes ferrosos de la ganga reaccionan con la sílice de la arcilla llegando a formar verdaderos silicatos (escoria) en la propia pared. Sin embargo, análisis cuantitativos son reveladores a la hora de distinguir unos y otros. Efectivamente, los contenidos de hierro son mucho más altos en las escorias.

**Toberas.** Como ya señalamos anteriormente, el aporte de aire es requisito imprescindible para el funcionamiento de los hornos (sean metalúrgicos o no) al permitir el inicio y continuación de los procesos de combustión dentro de la cámara. Tal aporte de oxígeno podía llegar por tiro natural, aprovechando las corrientes de aire, o inyectado a través de toberas insuflándolo a pulmón o con la ayuda de fuelles.

Como es obvio, el empleo de tiro natural no deja resto material alguno en el registro arqueológico (salvo que algún día se dé la circunstancia de encontrar restos de la pared de un horno con las características bocas de ventilación), por lo que su utilización se deduce indirectamente de los hallazgos de fundiciones emplazadas en lugares con vientos dominantes fuertes. El tiro artificial, en cambio, se identifica sin lugar a dudas con el hallazgo de los conductos, generalmente cerámicos, a través de los cuales circulaba el aire insuflado, y denominados genéricamente con el término de toberas, aunque sólo la boquilla embutida en la pared del horno y que comunica la cámara de fundición con el elemento auxiliar generador del aporte de aire (pulmón o fuelles) es la tobera propiamente dicha. Prueba evidente de su función en tareas metalúrgicas es la formación de vidriados y adherencias escoriáceas en el extremo que ha estado en contacto con la carga durante el

funcionamiento normal del horno.

La forma y tamaño de las toberas son variados y, al igual que ocurre con los crisoles, según las zonas y momentos cronológicos o culturales van a predominar unos tipos u otros. De modo general se pueden dividir, según los *orificios* o canales de salida que presenten, en toberas simples o dobles. Según su forma *exterior* pueden ser toberas rectas o acodadas en ángulo recto, tubulares o troncocónicas. Y según la *sección interior*, toberas de sección cilíndrica, sección en forma de D, etc.

Los primeros restos materiales de toberas aparecen ya en el III milenio a.C. asociadas a pequeños hornos para la fundición de minerales de cobre en varias zonas geográficas como la India (Hedge y Ericson, 1985), el valle de Timna, Israel (Rothenberg, 1985). También se han encontrado formando parte de ajuares funerarios de metalúrgicos en tumbas calcolíticas de Europa Central y de la antigua Unión Soviética (Mohen, 1991).

Una fuente de indudable interés acerca del empleo de ciertos tipos de tobera son las representaciones iconográficas en algunos frescos egipcios del Imperio Antiguo. En los más antiguos se documenta la utilización de tubos de soplado a base de cañas (*blowpipes*), dotados de una bo-

Figura 3: Dibujo de la Tumba de Puyemrê que muestra el uso conjunto de fuelles y tubo de soplado (según Davies, en Scheel, 1989, p. 24, fig. 16).

Foto 3: Tobera del yacimiento de la Segunda Edad del Hierro de La Campa Torres, Gijón (Maya et al., 1993, p. 89).

quilla tubular (tobera) de arcilla en el extremo dirigido al horno. Tal es el caso de las pinturas de tumbas del III milenio a.C. como la mastaba de la reina Meresankh III en Giza, del visir Mereruka en Saqqara o la tumba del visir Pepiankh en Meir (Scheel, 1989, figs. 2, 13 y 14). Pronto debieron verse ampliadas las posibilidades con el empleo de fuelles, como ilustra la representación hallada en la tumba de Puyemrê de Tebas, donde un trabajador emplea el insuflado a pulmón mientras otro operario da movimiento a un par de fuelles accionados con movimientos alternantes de las piernas, inyectando de esta manera el aire al horno (Figura 3).

Aunque ciertamente exigüos, también en la Península Ibérica existen hallazgos adscritos al Calcolítico pero siguen siendo casos aislados a diferencia de lo que ocurrirá a partir del Bronce Final (Foto 3). Es probable que esta escasez de hallazgos peninsulares sea debida no tanto a la utilización de sistemas de tiro natural como al empleo de tiro forzado dirigido a través de tubos de soplado de naturaleza orgánica, y por lo tanto perecedera, como son las cañas y juncos vegetales. Así, la relación entre estos primeros tubos de soplar y conductos de arcilla más duraderos se ha constatado en el interior de algunas toberas de arcillas halladas en contextos

calcolíticos de la India, donde se ha observado impresiones de cortezas de bambú, lo que indica que fueron hechas rodeando las cañas vegetales de una capa de arcilla, siguiendo un método que ha estado vigente en este país hasta el siglo XX (Hedge y Ericson, 1985, p. 64).

En otro orden de cosas, el estudio de las toberas y su funcionamiento se ha visto completado en los últimos años con la analítica experimental y con la observación etnográfica. Con ello se han tratado de establecer de forma empírica algunas de las variables básicas que definen la utilidad efectiva de las toberas y del aporte de aire en general en el proceso de fundición. Tales variables son: el número de toberas empleadas por hornada, el diámetro interior de las mismas, la posición que ocupan dentro del horno, el volumen de aire que introducen y la temperatura a la que se puede llegar.

En esta línea, el trabajo de Bamberger (1985) ponderó a través de distintos experimentos la importancia que el grado de penetración y la correcta distribución de la corriente de aire tienen en los procesos de fundición de minerales, según se coloque la tobera en posición inclinada u horizontal. Una penetración en el interior de la cámara en torno a los 10-20 cm, una posición inclinada y dirigida hacia el fondo del horno, un diámetro interior de 15 a 25 mm y la utilización simultánea de varias de ellas son elementos importantes para conseguir la temperatura necesaria, no sólo para la reducción de los minerales, en este caso de cobre, sino también para la correcta licuación de la escoria. La escoriación que presenta la parte exterior de algunas toberas halladas en sitios de fundición en Arabia y el Sinaí, adscritos al Imperio Nuevo Egipcio - Bronce Final -, ha permitido determinar arqueológicamente

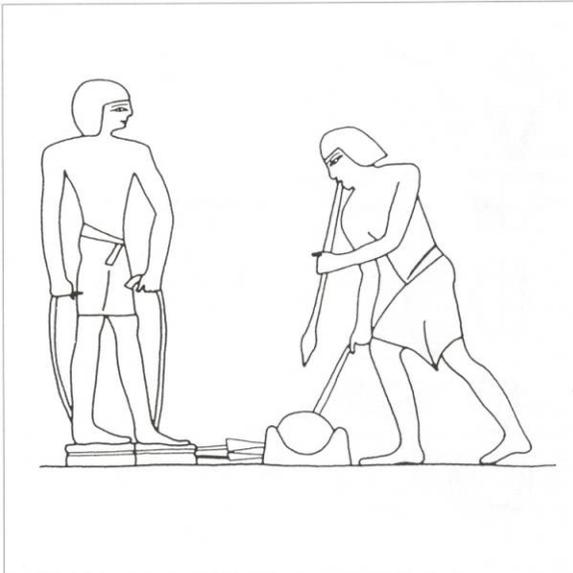


Fig. 3



3.

que algunas de ellas eran embudadas horizontalmente en el horno, mientras que otras debieron presentar un ángulo de inclinación en torno a los 25-30° con respecto a la horizontal (Rothenberg, 1985, p. 126). El diámetro de la salida de aire de las toberas típicas de este momento es del orden de 15 mm, coincidiendo con los resultados experimentales de Bamberger.

El soplado a través de tubos y a fuerza de pulmones puede generar un flujo intermitente de 40 litros por minuto pero sólo de 10 a 20 en un proceso continuado, suficiente sin embargo para calentar un hogar con poco volumen y alcanzar temperaturas por encima de los 1.000°C (Tylecote, 1981, p. 108). El sistema de soplado humano era particularmente apropiado para dirigir el aire y calentar localmente ciertas partes, por lo que siguió siendo utilizado durante largo tiempo en otras aplicaciones como los trabajos de orfebrería, soldaduras delicadas, etc.

No obstante, pronto entrarían en juego los fuelles de pellejo animal, con los que se conseguiría un notable sobreamiento de la corriente de aire y con ello unas temperaturas mayores en el hogar. Así, algunos datos obtenidos de trabajos experimentales indican que la utilización de un par de fuelles similares a los representados en las tumbas egipcias permitían alcanzar una temperatura de en-

tre 1.400-1.450 °C en la cabeza de la tobera, es decir, unos 1.250-1.350 °C útiles en sus proximidades, a un ritmo de 70-80 pulsaciones por minuto y fuelles de 3 a 5 litros de volumen útil cada uno (Andrieux, 1988, p. 81), con un flujo que podría rondar aproximadamente los 350 litros por minuto.

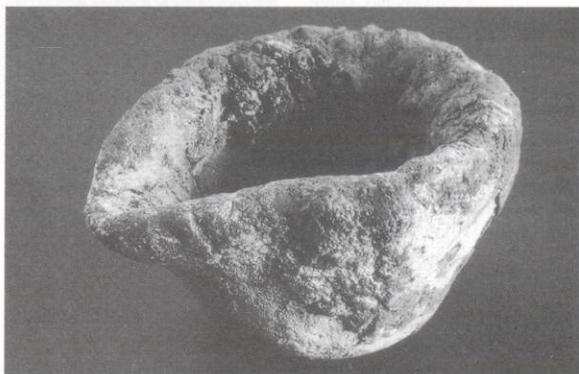
Estos trabajos se han centrado principalmente en experimentaciones de hornos de fundición de cobre. En el caso del hierro la aireación suplementaria con toberas y fuelles también se presenta como un requisito si no imprescindible (hay experimentos exitosos únicamente con tiro natural, Nosek, 1985), sí de gran importancia, al acortar el tiempo de reducción y lograr la formación de metal de forma más rápida y efectiva.

**Crisoles.** Los crisoles, recipientes utilizados para la fusión del metal son, junto con los moldes de fundición, los dos elementos más habituales de los procesos metalúrgicos conservados de épocas pretéritas. El más antiguo, localizado en Abu Matar con una cronología de finales del IV milenio a.C. es de forma semiesférica y con una línea marcada a modo de canal de vertido (Tylecote, 1980, p. 201). El III milenio supone la irrupción de la metalurgia en numerosas zonas geográficas con el hallazgo de crisoles entre otros lugares, en Meser (Israel), Lesbos, Lerna y Sesklo (Grecia), Troya (Anatolia), Porto Torrao,

Los Millares, Almizaraque, etc. (Península Ibérica).

La tipología es dispar según zonas, culturas y períodos cronológicos, pero a grandes ras-

gos se caracterizan por ser vasijas de arcilla muy refractaria y en algunos casos de piedra (esteatita), de pequeño tamaño y formas variadas (piramidales, cónicas, hemisféricas, globulares, etc.) y



4.

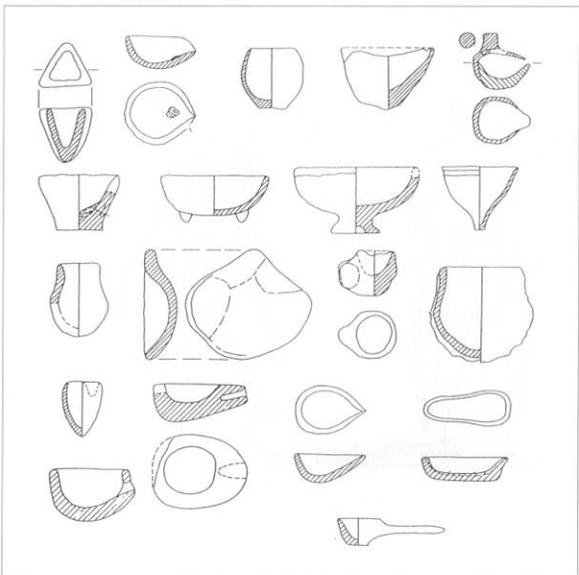


Fig. 4

Foto 4. Crisol para fundición de metal del yacimiento de la Segunda Edad del Hierro de La Campa Torres, Gijón (Maya et al., 1993, p. 89).

Figura 4: Distintos tipos de crisoles prehistóricos, romanos y medievales (Tylecote, 1976, p. 20, fig. 13).

Figura 5: Crisoles con agujeros de inserción hallados en Terina, Córcega (Camps, 1990-91, p. 44, fig. 6).

por lo general con un pico vertedor (tangible o ligeramente insinuado) para facilitar el vaciado correcto del caldo metálico a los moldes. Estas características, principalmente tamaño y morfología, han servido para distintas clasificaciones de crisoles según períodos cronológicos demostrándose una variedad difícil de constreñir en esquemas prácticos. La sistematización realizada por Tylecote (1962, p. 132; 1976, pp. 19-20) (Figura 4) con numerosos tipos basados en la morfología de piezas de distinto momento y geografía o la de Mohen según el diámetro y la capacidad de los crisoles (1992, pp. 121-122) son dos ejemplos sintomáticos.

Posiblemente más interesante que formas o dimensiones, sean las distintas soluciones que se adoptaron para el vertido del metal líquido. Junto al habitual pico vertedor o piqueta (Foto 4), dispuesto en el borde se utilizaron agujeros horadados en la cara del recipiente, como ejemplifican los hallazgos de crisoles en el Egeo o los representados en tumbas egipcias y que debieron contar con tapones de arcilla que se quitaban para el sangrado del metal caliente (Tylecote, 1987, p. 186). Solían llevar también muñones, asas o agujeros para insertar un palo que ayudara a retirarlos del fuego y sirviera en la operación de vertido que se estima entre 2 y 5 segundos.

Ejemplos de crisoles con asas huecas de inserción han aparecido en numerosos yacimientos del III milenio a.C.: Terrina (Córcega) (Figura 5), Cerdeña, Francia, en las Cícladas, etc. (Camps, 1990-91, pp. 41-49). Uno de los hallazgos más ingeniosos pertenece a la cultura de Unetice (*ibidem*). Se trata de un crisol en cuyo interior aparcería marcada la forma de un hacha plana conformando una curiosa pieza que funcionó a la vez como molde.

Para fundir el metal en el interior del crisol era necesario calentarlo enérgicamente. La mayoría de autores que han dedicado atención al tema opinan que el crisol era colocado en fuego de carbón, envuelto totalmente por la brasas incluido el interior, avivando la combustión con toberas o tubos de soplado hasta alcanzar y superar suficientemente la temperatura de fusión del metal (en el caso del cobre puro hay que subir la temperatura hasta los 1.083 °C). Ello solía provocar la excoiación de las paredes del crisol tanto por fuera como por dentro, como muestran los hallazgos arqueológicos. Además, al encontrarse el metal cubierto por carbón se evitaba la oxidación de su superficie bajo la acción del aire caliente de las toberas y se facilitaba la operación de refinado.

Tylecote (1987, pp. 189-192) ha hecho interesantes consideraciones acerca del material refractario empleado en la

elaboración de crisoles. Al principio no parece que hubiera una selección de las arcillas, empleándose las mismas que para las vasijas comunes. En tal caso, y para que soportara las tensiones provocadas por el calor, las paredes del crisol solían ser gruesas. Con el tiempo parece que tendió a usarse tierras pobres en silicato de aluminio y más ricas en cuarzo, pues resisten mejor el impacto térmico. Sin embargo carecemos aún de estudios sistemáticos de las pastas de los crisoles lo cual impide conocer con detalle los rasgos evolutivos.

Por otro lado, la importancia de su caracterización correcta estriba en la necesidad de distinguirlos de los contenedores de reducción de minerales, ya que desde el principio crisoles y vasijas-horno conviven juntos. Éstas últimas son por lo general piezas de mayor capacidad, aunque de menor grosor de pared, sin preparación alguna de las pastas y con adherencias escoriáceas de minerales parcialmente reducidos. La fuente de calor y los restos de alteración térmica en las vasijas-horno son por lo general interiores, lo que se convierte en un elemento discriminador de primer orden con respecto a los crisoles.

Un dato que debe destacarse es la capacidad de los crisoles y el volumen estimado de los mismos. Muchos arqueólogos se han extrañado del pequeño tamaño de estas piezas y suponen que por referencia mental a

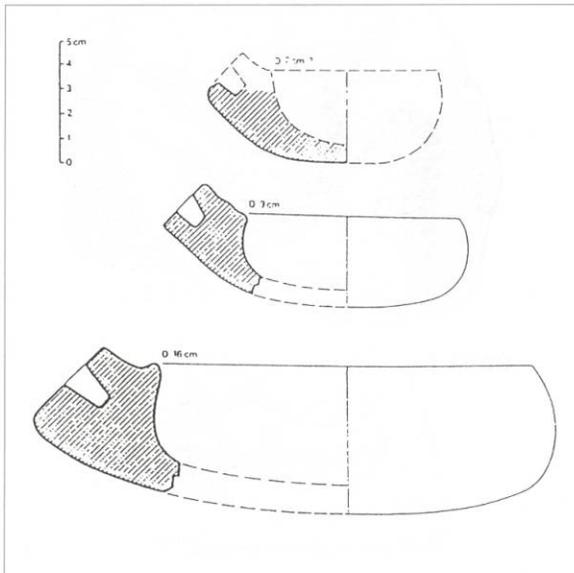


Fig. 5

recipientes para líquidos (agua, vino...) se preguntan dónde fundirían los metalúrgicos antiguos el metal para la elaboración de objetos de mediano y gran tamaño como hachas, espadas, etc. Aparte del trabajo simultáneo de varios crisoles para la fabricación de una misma pieza o el sangrado del metal al molde directamente desde el horno (menos probable), no ha de perderse de vista que la densidad del metal es muy superior a 1. En efecto, el cobre tiene una densidad de  $8,89 \text{ gr/cm}^3$  y aún es mayor en el caso del plomo y los metales preciosos. Por tanto un pequeño crisol con  $100 \text{ cm}^3$  de capacidad útil podría fundir casi 900 gramos de cobre, cantidad más que suficiente para vaciar, por ejemplo, la mayoría de hachas planas conocidas.

**Moldes.** Una vez fundido el metal en el crisol el paso siguiente era su vertido en moldes que tenían impresa la forma del objeto a fabricar. Un primer, pero breve estadio de la metalurgia, consistió en conformar las piezas mediante el martilleado de metal nativo pero el descubrimiento de la fundición llevó de forma inherente a la necesidad de crear los receptáculos apropiados para contener y trabajar el metal líquido. Si los crisoles presentaban una amplia gama morfológica, la sistematización de los moldes, aparte de la materia prima en la que están elaborados (piedra, arcilla o metal) puede simplificarse según el número de valvas y el proceso de

fabricación en: moldes abiertos univalvos, moldes cerrados bivalvos o polivalvos y moldeado con la técnica de la cera perdida

El proceso más antiguo fue el moldeado mediante la utilización de una única valva impresa, generalmente de piedra de grano muy fino. Primero se realizaba el objeto deseado en un soporte duro para impresionar el negativo en el molde si este era de arcilla o tallarlo en el caso de que la valva fuese de piedra. Piedras que generalmente eran calentadas antes del vertido del metal para evitar su rotura debido al choque térmico. Estos moldes eran utilizados para la fabricación de piezas que tuviesen una cara plana, como por ejemplo, hachas, aprovechándose a veces una misma piedra como matriz para el moldeado de varios objetos ya fueran distintos o iguales (Figura 6). Con el fin de retener el calor y evitar la superficie rugosa y burbujeante ocasionada por el contacto del metal caliente con el aire (rechupes) pronto se cubrió la valva con una piedra o laja plana, documentada en numerosos hallazgos (Coghlan, 1975, p. 52), precedente del uso de dos valvas marcadas.

El hecho de que estos moldes presenten en general pocas marcas de fundición y que estudios metalográficos de las hachas antiguas mostraran que fueron trabajadas posteriormente en caliente sirvió para cues-

Figura 6: Distintas caras de un molde de piedra utilizado para la fundición de hachas planas procedente de Ballyglisheen, Gran Bretaña (Tylecote, 1962, p. 108, fig. 23). Foto 5. Minerales parcialmente reducidos provenientes del yacimiento calcolítico de Almizaraque (Almería).

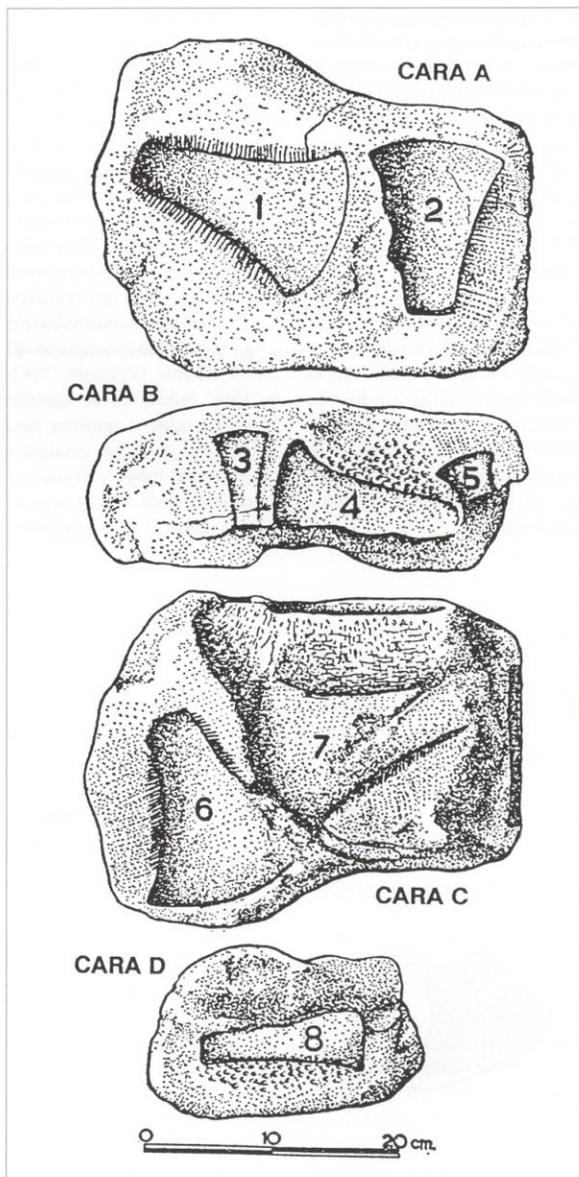
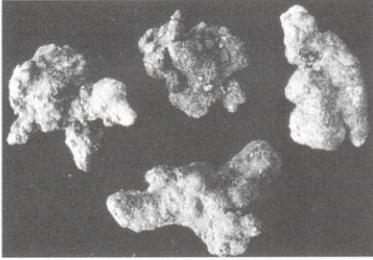


Fig. 6



5.

tionar la utilización de los moldes abiertos en el moldeado de objetos. Experimentos actuales llevados a cabo en moldes de piedra evidenciaron, sin embargo, que tras la fundición los moldes presentaban tan sólo una decoloración superficial que probablemente desaparecía con el paso del tiempo (Voce, 1975, p. 139).

El posterior uso de moldes bivalvos implicaba el mismo principio con la salvedad en este caso de que ambas valvas deberían ser simétricas y ajustarse perfectamente con el fin de evitar cualquier pérdida del metal. Para ello era habitual que llevaran machones o espigas y agujeros para encajarlas. Como el cerramiento totalmente hermético no es conveniente, el escape de gases y aire se hacía por las juntas y también, en épocas más avanzadas, mediante el trazado de incisiones en las caras internas de las valvas formando canales de desgaseo.

Por último, tanto en el tiempo como en el orden de este apartado debe incluirse la técnica del moldeado a la cera perdida. El método más simple era realizar primeramente la matriz en cera que se recubría con arcilla formando un molde relleno. Al ser cocida la pieza la cera se derretía escapando por orificios creados expresamente para ello y el hueco se rellenaba de metal. Este método fue utilizado en el Antiguo Egipto y Oriente Próximo para la fabricación de peque-

ñas estatuas y objetos complicados o donde era necesario remarcar pequeños detalles, si bien en Europa no se dio hasta bien entrante la Edad del Bronce.

Acercas del funcionamiento de los moldes se han venido haciendo algunas consideraciones, recogidas la mayoría por Mohen (1992, pp. 122-130). Unas son de orden termodinámico, relacionadas con los impactos térmicos que se producen tanto en el material del molde como en la masa de metal vertido. El intercambio brusco de calor puede producir la rotura del refractario. Para reducir este riesgo el metalúrgico precalentaba el molde hasta una temperatura del orden de 150 a 200 °C, de manera que si, por ejemplo, se tenía que verter bronce a 1.000 °C, la diferencia de temperaturas era sólo de unos 800 °C.

Una vez introducido el metal, el contacto con la pared fría del molde hace que comience rápidamente la solidificación de fuera hacia dentro en toda la superficie. Pero la velocidad de solidificación va disminuyendo porque la pared del molde se calienta con el intercambio de calor, según las leyes de la Termodinámica. Cuanto más lento sea el proceso (dentro de unos límites), más sana resultará la fundición pues dará tiempo a la evacuación de gases y evitará la formación de rechupes internos. El precaldeo cumple, pues, una doble función: preparar el molde para soportar mejor el choque

termo y frenar la velocidad de enfriamiento del metal. En el caso de los moldes o coquillas metálicas (que aparecen en el Bronce Final en el occidente europeo) parece ser que el precalentamiento facilitaba el desmoldeo al formar una delgada película de óxido en la superficie interna, evitando que la colada se adhiriera al molde.

Otras consideraciones son de orden práctico y tienen que ver con una mejor evacuación de los gases formados. El espacio dejado por la junta de las valvas era el lugar habitual para que escaparan los gases e incluso algo de metal (rebabas), pues el gas retenido o forma burbujas internas o ampollas superficiales. A partir del Bronce Final es frecuente encontrar canales adicionales de desgaseo en los moldes para piezas múltiples (moldes de árbol). Asimismo, determinados relieves del molde como por ejemplo las anillas y muñones de las hachas podrían acumular gas si el molde fuera relleno en posición vertical. Para evitarlo se inclinaba ligeramente el molde, de manera que la colada no cayera directamente sino que se deslizara lateralmente.

Muchas de estas consideraciones, sin duda utilísimas para comprender el empleo de los moldes, surgen de las experiencias acumuladas por el metalúrgico. Sin embargo no siempre la evidencia arqueológica recomienda su aceptación sin reserva. Conocemos muchos ejem-

plos de hachas que conservan solidificado sobre el talón el metal del embudo de colada y que demuestran que la colada metálica fue vertida con el molde en posición completamente vertical. Ello significa que los resultados positivos extraídos de muchas experimentaciones no pueden ser extrapolados siempre a tiempos pretéritos sin ciertas reservas.

## 2.- Productos de las fundiciones de metal.

### Escorias y lingotes.

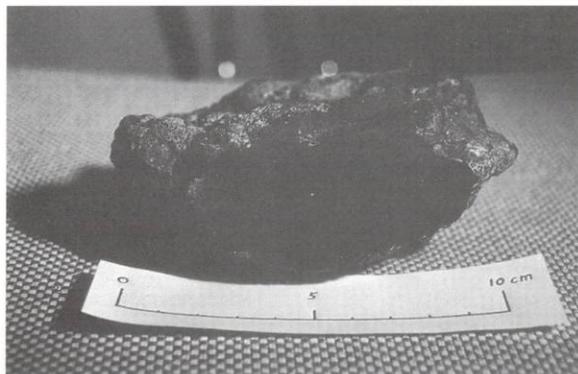
Como señalamos anteriormente la producción de los hornos metalúrgicos es dispar, aunque escorias y lingotes son los productos más comunes. El metal obtenido en los hornos más primitivos (vasijas y hoyos sin estructura superior) consistía en pequeños goterones o nódulos y filamentos de metal, embebidos en una masa de minerales parcialmente reducidos (Foto 5) que era necesario machacar para extraerlos mediante el rompimiento de la cerámica, lo que explica el estado fragmentario que conservan todas las vasijas. Los trozos de metal eran a su vez refundidos posteriormente en crisoles para formar coladas con el volumen suficiente con el que fabricar las piezas metálicas. Estos materiales, que pueden aparecer en cualquier proceso de reducción incompleto, son habituales en fundiciones de bajo rendimiento como son las habidas en hornos muy simples, si bien los minerales parcialmente reducidos podían y solían ser reciclados en un

nuevo proceso hasta lograr su descomposición efectiva, con lo que el rendimiento total llegaba a ser considerable.

Conviene destacar también la escasa o nula utilización de **fundentes**, necesarios para formar auténticas escorias (silicatos de hierro) de bajo punto de fusión, lo que junto a la pureza de los minerales procesados motiva la falta de escorias propiamente dichas siendo más correcto hablar de **conglomerados** de horno (Bachmann, 1980), esto es, masas compuestas por gotas de metal, mineral parcialmente reducido y combustible a medio quemar. En ningún yacimiento peninsular prerromano con restos metalúrgicos de  **cobre o bronce**, se han localizado **escorias de sangrado**, es decir, escorias evacuadas fuera del horno durante el proceso de fundición mediante la apertura de piqueta situadas a la altura adecuada en el cuerpo del horno, por las que se vierte al exterior la masa líquida de la escoria. En efecto, la distinta densidad entre el cobre (su peso específico es 8,89) y la escoria (en torno a 4), hace que ésta última sobrenade en la masa de metal, pudiéndose evacuar del interior de la cámara del horno. Las escorias de sangrado tienen una morfología característica, con una textura exterior compuesta por crestas, canalillos, arrugas y superficies redondeadas, pruebas inequívocas de haber corrido en estado plástico. La temperatura para la licuación del cobre es de 1084°C

y del bronce más común 950°C, mientras que la escoria funde a unos 1150°C, por lo que el hallazgo de escorias sangradas indica el empleo de hornos donde la temperatura debió ser igual o superior a esas cifras. Estas escorias y los lingotes o **tortas plano-convexas**, que reciben su nombre por su forma obtenida en el fondo del horno, son típicos de hornos más desarrollados que las vasijas-horno y aparecen ampliamente repartidos a partir del Bronce Final en zonas como Timna (Israel) o durante época romana. En efecto, las escorias de cobre y bronce peninsulares son, en general, escasas, de mala calidad, muy silicatadas pero poco ferruginosas debido a que no se añaden fundentes de hierro o se añade arena, demostrando un escaso conocimiento de la composición de los minerales y de los principios metalúrgicos de la formación de escoria en grandes áreas de la Península. Similar es el panorama de los lingotes plano-convexos, escasamente documentados en el Bronce Final (Gómez Ramos, 1993) y prácticamente ausentes durante toda la Edad del Hierro en la Península Ibérica.

Distintos análisis espectrográficos y microscópicos realizados a un gran número de muestras de distintos yacimientos de la Edad del Hierro peninsular (Gómez Ramos, 1996) prueban sobradamente el primitivismo dominante también en la **tecnología siderúrgica** antigua. Los hornos no parece que



6.

fueran excesivamente completos si nos atenemos a una producción de escorias de fondo de horno de escasa calidad (Foto 6). A diferencia del trabajo del cobre/bronce, donde el metal se depositaba en el fondo del horno, en la reducción de hierro es la escoria la que cae a la solera de la estructura, mientras que la lupia o lingote se forma más arriba, cerca del flujo de las toberas. Sin embargo, y al igual que en los hornos de cobre y bronce, era posible sangrar la escoria fuera del horno mediante la apertura de piqueras situadas en este caso en la base del horno. En la siderurgia primitiva se obtenía siempre un hierro formado en estado sólido (**lupia o esponja ferrífera**), que no se podía fundir en crisoles ni licuar para verterlo a moldes, ya que la temperatura de fusión del hierro (unos 1560°C) no fueron alcanzables hasta época medieval y moderna. La cantidad de carbono ligada al hierro, inferior generalmente al 0,02%, indica

que el metal obtenido era hierro dulce o ferrítico. Para obtener acero, cuyo contenido en carbono es superior, era necesario carburar en la fragua los lingotes de hierro.

De forma ilustrativa cabe señalar que el metal en bruto obtenido de la reducción de minerales podía seguir varios pasos, con la excepción del hierro, hasta conformar objetos de metal:

- 1) Se vertía en estado líquido directamente desde el horno de reducción a crisoles o moldes (vide Tylecote, 1980, p. 195, fig. 7.3).
- 2) Se dejaba enfriar en el interior del horno. En este caso según el fondo del horno así tenía su forma primera el metal obtenido.
- 3) Se creaban lingotes de diferente morfología a través de su moldeado en lingoteras.

Foto 6. Torta de escoria de hierro del yacimiento de la Edad del Hierro de Picu Castiellu (Asturias).  
 Figura 7: Tipología de lingotes de la Edad del Bronce (Briard, 1976, p. 239, fig. 1). 1. Lingote bipenne de cobre, 2. Lingote-torque, 3. Lingote en forma de hacha plana, 4. Lingote-barra, 5. Lingote "saumon" de bronce, 6. Lingote plano-convexo de cobre, 7. Lingote de plomo en forma de hacha, 8. Barra de bronce (Briard, 1976, p. 239, fig. 1).

De estos procesos, del vertido desde el horno a crisoles o moldes no se tiene evidencias arqueológicas directas. De haberse dado, sería con hornos de importante desarrollo técnico propios de momentos metalúrgicos avanzados, por lo que la falta de lingotes durante todo el Calcolítico europeo no puede interpretarse como testimonio indirecto de esta forma de producción directa desde el horno al molde.

No será hasta el Bronce Antiguo cuando empiecen a aparecer, en distintas zonas de Eu-

ropa continental (Francia, Centroeuropa...), los lingotes más antiguos. Se trata en todos los casos de objetos metálicos obtenidos de moldes que por su abundancia, y en algunos casos también por su funcionalidad incierta, se han interpretado como materia prima. A este grupo pertenecen lingotes en forma de hachas dobles, denominados corrientemente *lingotes bipenne* (Briard, 1976, p. 238), hachas planas de cobre y lingotes-torques con los extremos enrollados, hallados sobre todo en Alemania, y que se denominan *lingotes-barra* o "*rippenbarren*"

(Briard, 1976, p. 238; Mohen, 1992, pp. 117-118) (Figura 7).

En el Bronce Final, junto a nuevos tipos derivados de los anteriores como los *lingotes saumon*, de forma romboidal, o lingotes en forma de *barras de sección plano-convexa* pertenecientes al grupo francés de *Saint-Denis-de-Pile*, aparecen los que serán los lingotes más característicos de finales del Bronce y buena parte de la Edad del Hierro en el trabajo del metal de base cobre: las tortas de fundición, mencionadas comúnmente en la bibliografía como lingotes plano-convexos, en relación a su forma obtenida en el fondo del horno de reducción o de fundición de metal. Suelen ser de cobre casi puro y con un peso por término medio para las mayores piezas, en torno a los 4 kilogramos (Tylecote, 1987, p. 18). Aunque existen algunos hallazgos del Bronce Medio, su gran desarrollo se producirá durante el período último de la Edad del Bronce. No obstante, estos lingotes no son exclusivos ni de Europa Occidental, ni tampoco del Bronce Final. Así, lingotes circulares plano-convexos eran fabricados en los hornos de Timna, Palestina (siglo XII a.C.) y en todo el Mediterráneo oriental. Los pecios anatolios de Gelidonya y Ulu Burun, así como algunos hallazgos en la costa norte de Israel son también representativos a este respecto. A su vez, los lingotes plano-convexos son el tipo de productos de fundición de mayor desarrollo

temporal. Hay tortas de metal en contextos de la Edad del Hierro, pero también en época romana, medieval e incluso moderna (Craddock y Hook, 1987, pp. 201-206).

Cabe mencionar, por su significación en la cuenca oriental del Mediterráneo, los *lingotes de piel de buey* o toro, denominados "*ox-hide*" en la terminología inglesa. Generalmente de cobre y ampliamente presentes en el Egeo, Egipto y zona sirio-palestina, no han sido hallados hasta el momento en Europa Occidental, con la única excepción de Cerdeña y algunos otros restos encontrados en Sicilia, Lipari y sur de Italia.

En cuanto al trabajo del **hierro**, ya hemos señalado que la imposibilidad de obtener hierro licuado en los hornos antiguos impedía el vertido de metal a moldes o lingoteras. Las formas se obtenían a partir del trabajo por martillado del hierro bruto. Los lingotes de hierro más característicos son los *lingotes bipiramidales* ampliamente repartidos en Europa Central y adscritos principalmente al período de La Tène, y, a partir del siglo V a.C., *lingotes-espadas* o *currency bars* en forma de hojas alargadas.

De esta amplia tipología, el repertorio adscribible a la Península Ibérica es francamente reducido, no sólo cuantitativa sino también tipológicamente (Gómez Ramos, 1993). Dejando

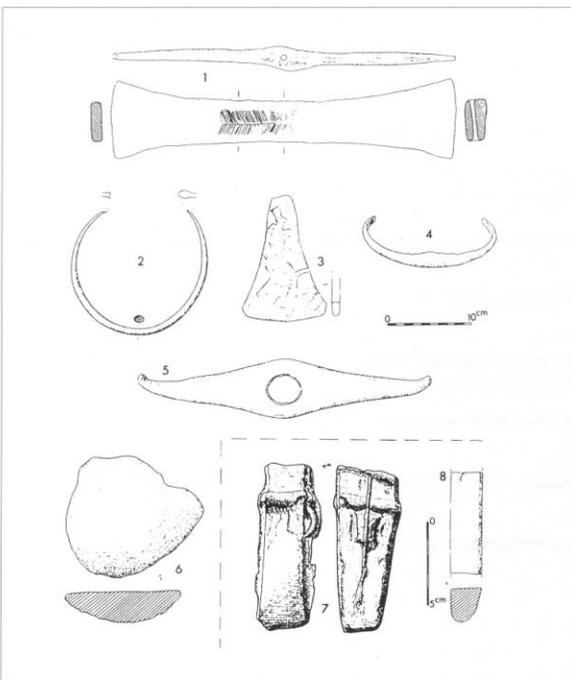


Fig. 7

aparte el hecho de que objetos como hachas, punzones, barras o anillas pudieran haber servido en algún caso como reserva de materia metálica, y de unos pocos lingotes ovalados de pequeño tamaño (por ejemplo, los lingotes de Gamonedo) y piezas informes de chatarra amortizada, los únicos lingotes en *stricto sensu* hallados en la Península Ibérica son lingotes-torta, en depósitos del Bronce Final (Ervedal, Fonte Velha, La Sabina....) y lingotillos producidos

en lingoteras, en numerosos yacimientos de la Edad del Hierro.

En cuanto a otros metales como el **estaño** y la **plata** existe menor información. Con respecto al primero, algunas representaciones en tumbas del Imperio Nuevo Egipto parecen indicar la producción de estaño en el Mediterráneo Oriental en lingotes de forma plano-convexa, si bien, al ser un metal de difícil conservación no se han hallado piezas intactas. La plata, metal

noble, era modelada en distintas formas. En Iberia, los hallazgos más comunes son lingotillos de pequeño tamaño de forma circular plano-convexa y en otros casos, de formas prismáticas.

En suma, el repertorio de elementos y productos de las fundiciones de metal es extenso. Aunque su estudio en profundidad necesitaría más espacio del que hemos dedicado en estas páginas, creemos haber cumplido con el cometido de dar a cono-

cer lo más importante de cada uno de ellos. Las dimensiones pequeñas de los hornos y su funcionamiento, la identificación correcta entre vasijas-horno y crisoles y entre escorias de metal y materiales escoriáceos, son aspectos importantes para lograr una idea aproximada de la tecnología metalúrgica antigua. Conocimientos elementales que deberían servir para reconocer y sobre todo, para interpretar de manera comedida la nómina de hallazgos arqueometalúrgicos.

#### BIBLIOGRAFÍA CITADA:

ANDRIEUX, Ph. (1988): "Expérimenter la terre et le feu", *Dossiers Histoire et l'Archéologie*, n1. 126, pp. 76-86.

BACHMANN, H. G. (1980): "Early copper smelting techniques in Sinai and in the Negev as deduced from slag investigations", en P. T. Craddock (ed.): *Scientific Studies in Early Mining and Extractive Metallurgy, Occasional Paper n1. 20, British Museum*, pp. 103-134.

BAMBERGER, M. (1985): "The working conditions of the ancient copper smelting process", en P. T. Craddock y M. J. Hughes (eds.): *Furnaces and Smelting Technology in Antiquity, Occasional Paper n1. 48, British Museum*, pp. 151-157.

BRIARD, J. (1976): "La paléoméallurgie en France", en Guilaine, Jean (dir.) *La Préhistoire Française, Tomo II. Les civilisations néolithiques et protohistoriques de la France, C.N.R.S., Paris*, pp. 237-245.

CAMPS, G. (1990-91): "Les creusets de Terrina (Aléria, Haute-Corse", en *Le Chalcolithique en Languedoc. Ses relations extra-regionales, Colloque International Hommage au Dr. Jean Arnal, Saint-Mathieu-de-Trévières (Hérault), 20-22 Septembre 1990, Archéologie en Languedoc, 1990/1991*, pp. 41-49.

COGHLAN, H. H. (1975): *Notes on the Prehistoric Metallurgy of Copper and Bronze in the Old World, Occasional Papers on Technology, 4, Segunda Edición. Editado primeramente en 1951.*

CONOPHAGOS, C. E. (1989): "La technique de la coupellation des grecs anciens au Laurim", en Y. Maniatis (ed.): *Archaeometry. Proceedings of the 25th International Symposium, Atenas, mayo de 1986*, pp. 271-289.

CRADDOCK, P. (1989): "The scientific investigation of early mining and smelting", en J. Henderson (ed.): *Scientific analysis in archaeology and its interpretation, Oxford University Committee for Archaeology, no. 19*, pp. 178-212.

- CRADDOCK, P. y HOOK, D. R. (1987): "Ingots from the sea: the British Museum Collection of ingots", *The International Journal of Nautical Archaeology and Underwater Exploration*, vol. 16, n1. 3, pp. 201-206.
- GÓMEZ RAMOS, P. (1993): "Tipología de lingotes de metal y su hallazgo en depósitos del Bronce Final de la Península Ibérica", *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad Autónoma de Madrid*, n1. 20, pp. 73-105.
- GÓMEZ RAMOS, P. (1996): *La tecnología de fundición de metales en la Pre y Protohistoria de la Península Ibérica*, Tesis Doctoral microfichada, Universidad Autónoma de Madrid.
- HEGDE, K. T. y ERICSON, H. E. (1985): "Ancient Indian copper smelting furnaces" en P. T. Craddock y M. J. Hughes (eds. *Furnaces and Smelting Technology in Antiquity*, Occasional Paper n1. 48, British Museum, pp. 59-70.
- MAYA, J. L., ROVIRA, S., CUESTA, F. y LUIGI, P. (1993): "Arqueo-metalurgia del bronce nel villaggio preromano de "La Campa Torres", *SMI Review (Art and Technology)*, n1. 17, año 22, pp. 85-94.
- MOHEN, J. P. (1991): "Les sépultures de métallurgistes du début des âges des métaux en Europe" en Mohen y EluPre (cords.): *Découverte du métal*, Ed. Picard, pp. 131-142.
- MOHEN, J. P. (1992): *Metalurgia Prehistórica. Introducción a la paleometalurgia*, Ed. Masson, Barcelona.
- NOSEK, E. M. (1985): "The polish smelting experiments in furnaces with slag pits", en P. T. Craddock y M. J. Hughes (eds.): *Furnaces and Smelting Technology in Antiquity*, Occasional Paper n1. 48, British Museum, pp. 165-177.
- PHOTOS, E., FILIPPAKIS, S. J. y SALTER, C. J. (1985): "Preliminary investigations of some metallurgical remains at Knossos, Hellenistic to third century AD", en P. T. Craddock y M. J. Hughes (eds.): *Furnaces and Smelting Technology in Antiquity*, Occasional Paper n1. 48, British Museum, pp. 189-197.
- ROTHENBERG, B. (1985): "Copper smelting furnaces in the Arabah, Israel: the archaeological evidence", en P. T. Craddock y M. J. Hughes (eds.): *Furnaces and Smelting Technology in Antiquity*, Occasional Paper n1. 48, British Museum, pp. 123-150.
- SCHEEL, B. (1989): *Egyptian metalworking and tools*, Shire Egyptology, vol. 13. Londres.
- TITE, M., HUGHES, M., FREESTONE, I., MEEKS, N. y BIMSON, M. (1990): "Technological characterisation of refractory ceramics from Timna", en B. Rothenberg, (ed.): *Researches in the Arabah 1959-1984*, Institute for Archaeo-Metallurgical Studies, Institute of Archaeology, University College London, vol. 2, pp. 158-175.
- TYLECOTE, R. F. (1962): *Metallurgy in Archaeology. A Prehistory of Metallurgy in the British Isles*, Londres.
- TYLECOTE, R. F. (1970): "Iron working at MeroN, Sudán", *Bulletin of the Historical Metallurgy Group*, vol. 4, n1. 2, pp. 67-72.
- TYLECOTE, R. F. (1976): *A History of Metallurgy*, The Metals Society.
- TYLECOTE, R. F. (1980): "Furnaces, crucibles, and slags", en T. Wertime y J. Muhly (eds.): *The Coming of the Age of Iron*, pp. 183-228.
- TYLECOTE, R. F. (1981): "From pot bellows to tuyeres", *Levant*, vol. XIII, pp. 107-118.
- TYLECOTE, R. F. (1987): *The early history of metallurgy in Europe*, Ed. Longman.
- VOCE, E. (1975): "Bronze castings in ancient moulds", en Coghlan: *Notes on the Prehistoric metallurgy of copper and bronze in the old world*, pp. 136-139.
- WAGNER, G. A., GENTNER, W., GROPENGIESSER, H. y GALE, N. H. (1980): "Early Bronze Age lead-silver mining and metallurgy in the Aegean: the ancient workings on Siphnos", en P. T. Craddock: *Scientific Studies in Early Mining and Extractive Metallurgy*, Occasional Paper n1. 20, British Museum, pp. 63-85.