

Historia de la investigación experimental sobre la metalurgia del cobre primitiva¹

History of experimental research about primitive copper metallurgy

Alberto Obón Zúñiga

Resumen

En este artículo, el lector encontrará una síntesis del conjunto de investigaciones que han aplicado la experimentación para el estudio de las técnicas prehistóricas de transformación de minerales de cobre. Se trata de un corpus experimental de trabajos clasificados según la cronología y el ámbito geográfico que ofrece una visión de conjunto de esta cuestión, y además puede ser utilizado para consultas específicas. Tras valorar los procedimientos y los resultados de cada aportación según el criterio de rigor de la teoría de la experimentación en arqueología, he podido constatar la escasez de proyectos a largo plazo así como de experimentaciones abordadas de manera realista.

Palabras clave: Experimentación, arqueometalurgia, minerales de cobre.

Résumé

Dans cet article, le lecteur trouvera une synthèse de l'ensemble des recherches qui ont appliqué l'expérimentation à l'étude des techniques préhistoriques de transformation de minerais de cuivre. Il s'agit d'un corpus expérimental de travaux classés par chronologie et zone géographique qui offre une vue d'ensemble de cette question, et peut aussi être utilisé pour des consultations spécifiques. Après avoir évalué les procédures et les résultats de chaque contribution selon le critère de rigueur de la théorie de l'expérimentation en archéologie, on constate que les projets à long terme ainsi que des expérimentations abordées de manière réaliste ne sont pas nombreuses.

Mots clés: Expérimentation, archéométagallurgie, minéraux de cuivre.

1. Introducción

La experimentación en arqueología tiene una larga historia y ha contribuido enormemente al desarrollo de la teoría y el método en arqueología (Shimada, 2005: 604 y 631). No debe ser considerada como una subdisciplina puesto que simplemente forma parte del proceso de investigación. Su importancia reside en la posibilidad de comprobar hipótesis

y generar analogías dentro del proceso de interpretación del registro arqueológico (Ascher, 1961: 795; Schiffer *et al*, 1994: 198; Mathieu, 2002: 2), con una cualidad heurística para descubrir nuevas hipótesis que no existían inicialmente (Reynolds, 1999; Terradas y Clemente, 2001: 91).

Muchos autores coinciden en que el principal valor del experimento en arqueología es el estudio de los

1. Síntesis de un capítulo de la Tesis doctoral presentada en la Universidad de Zaragoza el 14 de noviembre de 2017, titulada: Los inicios de la obtención de cobre en el suroeste europeo. Aproximación experimental a la metalurgia de Almería (Almería).

procesos tecnológicos que dan lugar a los restos arqueológicos, o al menos es el ámbito donde es más fácil observar resultados (Malina, 1983: 70; Callahan, 1999: 4). Por este motivo, es un excelente medio de aproximación a la producción de metales en el pasado, principal objeto de estudio de la arqueometalurgia, permitiendo conocer las múltiples opciones posibles a lo largo de toda la secuencia de operaciones, desde la minería hasta el uso de los objetos metálicos (Heeb y Ottaway, 2014). El propósito de simular un proceso metalúrgico de forma controlada, cuantificada y observable, no es definir científicamente viejos procedimientos tecnológicos ni tampoco ser un especialista en metalurgia, sino más bien mejorar la comprensión sobre el registro arqueológico. En esta labor, la comparación entre los datos arqueológicos y los experimentales debe ser continua e ir en ambos sentidos (Amick *et al*, 1989: 1; Lammers-Keijsers, 2005).

En mi tesis doctoral sobre la transformación de minerales de cobre en la península ibérica durante el Calcolítico realicé una revisión exhaustiva de los referentes de aplicación del método experimental con el propósito de diseñar y ejecutar de forma adecuada la experimentación (Obón, 2017). Estas investigaciones se basan en evidencias de diversas regiones del mundo y han sido realizadas por parte de autores de varios países desde finales del siglo XIX hasta la actualidad. Se trata de un conjunto de experiencias previas sobre las posibilidades técnicas según las limitaciones físico-químicas, el registro de datos y el uso de aparatos de medición, la realización de analíticas de laboratorio y la comparación con el registro arqueológico. Únicamente están recogidas las experimentaciones sobre operaciones de transformación de minerales de cobre, a veces junto con otros minerales para obtener aleaciones o como fundente. No incluyo trabajos que aborden técnicas de minería u operaciones de fundición de metal, conformación de objetos (moldeo, forja) o funcionalidad de los mismos, ni tampoco hay referencias a publicaciones que no presenten objetivos ni resultados claros.

Hasta ahora no se había realizado una síntesis de la historia de la investigación en el ámbito de la metalurgia con minerales de cobre (Grigoriev, 2011: 55; 2015: 31), existiendo tan solo la obra desactualizada de J.F. Merkel (1982) que fue sintetizada en otro trabajo (Tylecote y Merkel, 1985). En algunas ocasiones, se había hecho referencia a varias investigaciones sobre un aspecto concreto, pero siempre de forma incompleta. Existe una gran diversidad de trabajos que han tratado cuestiones como el origen de la metalurgia, los procesos extractivos con diferentes minerales (oxídicos o sulfuros), las diferentes técnicas de aporte de aire, los procesos técnicos para realizar

aleaciones o el uso de estructuras de combustión específicas. Muchas investigaciones se centran en yacimientos o problemas arqueológicos concretos, tratando de reproducir una cadena operativa cuyos productos coincidan con los arqueológicos. Se han llevado a cabo pruebas de laboratorio y pruebas de campo, pruebas aisladas y largas series de pruebas, y también procedimientos más o menos rigurosos. Algunos trabajos optan por el uso de elementos y materiales modernos y otros abordan las operaciones de forma realista. Para poder hacer una valoración crítica de cada aportación, es necesario exponer los fundamentos de la experimentación en arqueología distinguiendo entre diferentes tipos de actividades, la experiencia, el experimento y la educación. Ésta última es un excelente medio didáctico pero no forma parte de la investigación.

2. Procedimiento experimental:

La experiencia y el experimento

La experiencia y el experimento persiguen objetivos radicalmente distintos y se desarrollan de manera diferente (Reynolds, 1999: 157; Outram, 2008: 3-4), aunque son actividades complementarias y debe existir una interrelación entre ambas. A diferencia del experimento, la arqueología experiencial no pretende verificar una hipótesis ni tiene procedimientos bien definidos, sino que únicamente trata de llevar a cabo tareas que tuvieron lugar en el pasado de forma realista (Jeffery, 2004). La puesta en práctica de los procesos técnicos que van a ser objeto de análisis permite adquirir conciencia sobre el grado de dificultad de algunas operaciones, y es un requisito imprescindible para poder llegar a la planificación sistemática del programa experimental. Estas actividades también han sido definidas como las pruebas destinadas a definir las variables, evaluar los parámetros y configurar las hipótesis (Lammers-Keijsers, 2005: 21; Terradas y Clemente, 2001: 91), con la posibilidad de acelerar el proceso en alguna de sus fases. El nivel de destreza que se puede llegar a adquirir puede ser un problema, tanto por una carencia de habilidades, como por la aplicación de técnicas que no corresponden al objeto de estudio.

El experimento se ha definido como un método para establecer una conclusión razonada mediante la comprobación de la validez de una hipótesis inicial (Reynolds, 1999). Se desarrolla bajo parámetros de simplificación de la realidad a observar mediante una selección de los elementos que van a ser analizados. Debe existir un control de las variables relevantes y la posibilidad de ser repetido.

Existen algunos principios básicos que motivan experimentar aspectos del pasado desde el presente.

El principio de simulación implica la posibilidad de recrear un fenómeno a través de la interacción de algunas variables previamente seleccionadas en función del tiempo (Morgado y Baena, 2011: 22). Se trata de crear una realidad simulada bajo condiciones controladas con el fin de estudiar procesos específicos (Amick *et al.*, 1989: 1; Schiffer *et al.*, 1994: 198; Mathieu, 2002: 1). Por otro lado, los principios de actualismo y de uniformitarismo permiten el uso de la analogía o inferencia inductiva (Vila Estévez, 1999). La propiedad de uniformidad se puede aplicar a aquellas cuestiones que tienen una regularidad previsible y observable en el presente.

Finalmente, las inferencias derivadas de la experimentación deben ser coherentes con la escala de análisis en función del grado de control sobre las variables (Amick *et al.*, 1989: 2). En algunos casos prima el control y la medición absoluta de una o varias variables sobre la complejidad de la realidad del contexto cultural arqueológico (Morgado y Baena, 2011: 23). En otros, las condiciones del fenómeno a observar tratan de ser próximas a las que acontecieron en el pasado aproximándose a las condiciones materiales, técnicas y productivas, siempre asumiendo que el registro arqueológico es fragmentario y que no es posible tener un control absoluto sobre todas las variables. Este tipo de experimento ha sido denominado “integral” (Moreno Jiménez *et al.*, 2007), “actividad auténtica y científica” (Callahan, 1999: 5), “desarrollado bajo condiciones parecidas a las originales” (Terradas y Clemente, 2001: 91-92), o “actualista” (Outram, 2008: 2-3). No debe ser menos riguroso en el control y en la medición de variables que el experimento de laboratorio. También se ha señalado que los experimentos de laboratorio y los de campo pueden ser complementarios dentro de una investigación (Shimada, 2005: 625-627).

3. Etapas de la experimentación en arqueometalurgia

3.1. Los pioneros

A finales del siglo XIX, principalmente en el norte y centro de Europa y en los Estados Unidos, se recurría con regularidad al denominado experimento imitativo (Ascher, 1961: 794), establecido como un legítimo ejercicio para el estudio de yacimientos, objetos, materiales y técnicas (Coles, 1979: 26). Estas prácticas permitían acercarse a comprender las cuestiones técnicas y normalmente se centraban en resolver problemas particulares que presentaban los materiales arqueológicos. Un caso, posiblemente único en España (Baena *et al.*, 2014: 85), fue el del belga L. Siret, quién realizó a principios del siglo XX algunas pruebas de moldeo de hachas del Bronce Final en Almería (Montero *et al.*, 2012).

Los experimentos sobre transformación de minerales de cobre en sociedades primitivas tardan en aparecer con respecto a la antigüedad del estudio de los objetos de metal. El primero que ha dejado constancia corresponde a **F.H. Cushing** (1894: 93-96), cuya figura también es destacable por haber sido el primer antropólogo en vivir un largo periodo con su objeto de estudio (Green, 1979: 6), pues fue aceptado por los indios zuñis en Arizona y Nuevo México (EEUU) al tiempo que desempeñaba una labor como etnólogo. También excavó varias estructuras para reducir minerales pertenecientes a los Indios Pueblo en el sur de Salado Valley (Arizona), con una datación estimada entre el 1300-1400 de nuestra era. Consistían en cubetas excavadas donde se colocaba una gran vasija de fondo casi plano, y frecuentemente se encontraban próximas a pequeñas galerías de aprovechamiento de sulfuros de cobre. Realizó un experimento para demostrar que es posible producir objetos de cobre con una tecnología primitiva, motivado por el escepticismo general existente en la época sobre la capacidad de los nativos americanos. La reducción tiene lugar en el interior de un hoyo poco profundo con las paredes forradas de barro. Añade varias cargas de mineral previamente tostado a un fuego de carbón avivado solo por el viento. Tras varias horas de operación recupera gotas de cobre mezclados con fragmentos de escoria. El metal fue refundido en lingotes. Aunque no ofrece apenas datos, el procedimiento es coherente porque somete a prueba una hipótesis con un alto grado de autenticidad en cuanto a las técnicas y los materiales utilizados.

La segunda experimentación, realizada por el británico **W. Gowland** (1912), aborda la co-reducción de minerales de cobre y de estaño para producir bronce, basándose en las observaciones sobre técnicas metalúrgicas que realizó en la década de los 80 del siglo XIX en Japón y Corea. Afirma que estas operaciones durante la Edad del Bronce en las islas británicas no requerían de grandes instalaciones, frente a otras interpretaciones existentes en la época que se basaban en las técnicas de reducción industriales. La carga consiste en una mezcla de 7 kg de carbonatos de cobre, 4,5 kg de casiterita, junto con 3,4 kg de caliza molida y 4,5 kg de carbón vegetal. Introduce capas alternas de carga y carbón en un caramullo de carbón (Fig. 1). Empleó una tobera con un orificio de 2,5 cm pero no especifica el método de aporte de aire. Tampoco indica la cantidad de metal y escoria recuperados (Tylecote y Merkel, 1985), pero sí que la aleación contenía un 22% de Sn. El experimento se repitió varias veces obteniendo siempre una aleación de Cu-Sn.

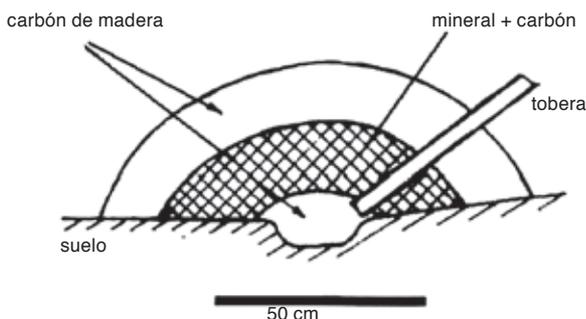


Figura 1. Esquema de la estructura utilizada por W. Gowand (1912), en S. Rovira (2003-2004).

3.2. Período de entreguerras

Trascurridos los primeros años del siglo XX la relevancia de la arqueología experimental disminuye considerablemente, así como el interés por cuestiones técnicas de la cultura material en favor de cuestiones de organización política y social (Coles, 1979: 27 y 30; Malina, 1983: 72). Durante el período de entreguerras apenas se realizaron grandes proyectos de experimentación como en el período anterior, y solo esporádicamente se efectuaron algunos experimentos aislados. Además, el predominio del particularismo histórico y de la historia cultural hizo socavar los principios científicos básicos, fomentando la idea relativista de la imposibilidad de tratar la historia de las sociedades humanas desde una perspectiva científica, y desestimando el uso de la analogía (Vila y Estévez, 1999). En cuanto al estudio de la metalurgia, los objetos recibieron una atención casi exclusiva durante mucho tiempo, existiendo un predominio de los estudios tipológicos sobre los tecnológicos.

A este período pertenece la experimentación de **H.H. Coghlan** (1939, 1940) sobre la invención de la metalurgia en Mesopotamia y Egipto. Plantea dos hipótesis de situaciones en las que pudieron reducirse minerales oxídicos de cobre de forma accidental. La primera tiene lugar en un simple agujero en el suelo

(30 cm de diámetro) con un anillo de piedras concéntrico (90 cm de diámetro). Introduce dos capas de pequeños fragmentos de malaquita en el centro de un caramullo de carbón y aprovecha únicamente la corriente de aire un día de viento fuerte. Añade nuevas cargas de carbón y mantiene una temperatura elevada durante varias horas, pero solo obtiene óxidos de cobre. El proceso fue repetido con cuprita y los resultados fueron otra vez negativos. Afirma que en un hogar abierto sin ventilación forzada es difícil que se produzca la reducción puesto que no da lugar al ambiente reductor necesario. En la segunda serie, trata de simular a pequeña escala las condiciones de una reducción fortuita de malaquita en un horno de cerámica con cúpula, inspirado en las evidencias más antiguas halladas en Mesopotamia. El fuego actuaría desde abajo y alrededor. Por ello coloca un vaso de cerámica boca abajo sobre un plato con un fragmento de malaquita en el interior de un fuego de carbón que se mantuvo en combustión durante varias horas (Fig. 2). Obtiene un nodulillo de cobre de aspecto poroso. El experimento fue repetido con un fragmento de malaquita más pequeño y el resultado fue una pepita de cobre compacta. Sugiere que la metalurgia del cobre pudo haber sido descubierta en Egipto a través del uso de la malaquita para la decoración de la cerámica.

3.3. Surgimiento y consolidación de la arqueometalurgia experimental moderna

El procedimiento y la teoría del experimento no fueron definidos con claridad hasta los años sesenta, cuando diversos autores, principalmente en el ámbito anglosajón, comenzaron a dotar a este tipo de prácticas de un cuerpo teórico y metodológico. Algunos cambios trascendentales propiciaron la aparición de la arqueología experimental moderna. Tras la Segunda Guerra Mundial los arqueólogos empezaron a adoptar nuevas aproximaciones y técnicas analíticas para mejorar las técnicas de prospección, de excavación y

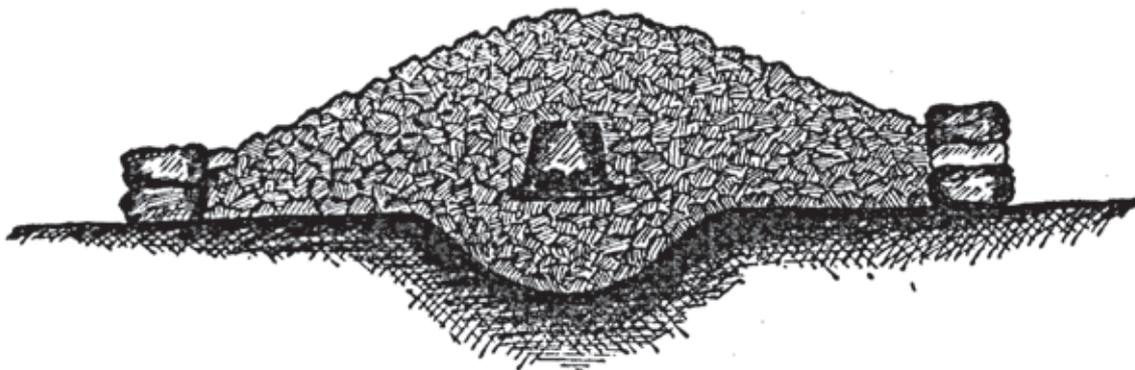


Figura 2. Esquema de la estructura de la segunda serie de pruebas de H.H. Coghlan (1940).

el análisis de los datos (Coles, 1979: 30-31). Probablemente como consecuencia de estos cambios, que podemos denominar tecnológicos, durante los años sesenta y setenta se produjo un cambio de paradigma epistemológico en Prehistoria y Arqueología en el contexto de aparición de la "Nueva Arqueología" y las "Teorías de alcance medio", que consistían en generalizaciones para conectar el registro arqueológico estático con la dinámica social (Vila y Estévez, 1999; Pijoan, 2001: 94-96; Almeida, 2009). Se rompe con la prehistoria cronoculturalista preocupada por cuestiones de tipología y secuencias de culturas, centrando más bien la atención en la comprensión de la complejidad sociohistórica a través de la tecnología y del hecho técnico. La Nueva arqueología presenta un enfoque paleoetnológico del pasado y apuesta por la interrelación entre disciplinas científicas. Se retoma la práctica del experimento y se abren algunos museos al aire libre y centros de arqueología experimental en varios países como EEUU, Inglaterra, Polonia, Austria, Dinamarca y Suecia (Malina, 1983: 73).

A mediados de la década de los sesenta comienza un goteo continuo de publicaciones sobre experimentaciones con minerales de cobre, las cuales he clasificado por orden cronológico según la zona geográfica de estudio. El tipo de experimentación depende en gran medida del contexto de la arqueometalurgia en cada momento. Hasta los años setenta estaban en auge las investigaciones dedicadas a cuantificar los elementos traza para tratar de identificar patrones de impurezas que indicasen la procedencia de objetos de metal o el uso de determinadas técnicas. Esta estrategia fue perdiendo importancia por su escasa capacidad de contribuir a resolver dichas cuestiones, debido a la inestabilidad de algunos elementos y también a las condiciones de reducción irregulares en la metalurgia primitiva (Rovira, 1989: 48). Se produjo un cambio de estrategia o incluso de paradigma en la disciplina, pasando de situar la atención en el objeto, a centrarse en caracterizar los procesos tecnológicos del pasado a través del estudio de todos los productos y subproductos de la producción y utilizando los análisis químicos en esta tarea (Goodway, 1991).

4. Investigaciones por regiones del mundo

4.1. Próximo Oriente

4.1.1. Irán

Tres décadas después de la experimentación de H.H. Coghlan, **R. Pleiner** (1967) realiza una experiencia sobre las evidencias del yacimiento de Tal-I-Iblis del V mil BC, donde se habían encontrado fragmentos de cerámica con adherencias. Introduce pequeños fragmentos de malaquita procedentes del yacimiento en un

crisol elaborado con arcilla local y cocido a baja temperatura. Coloca el crisol en un hogar de carbón situado en un agujero de 20 cm de diámetro. Inyecta aire mediante un compresor a una tobera ubicada en el borde del crisol con una inclinación de 15-20°. Durante los 30 min de operación registran temperaturas de 1100°C. Recupera algunas gotas de cobre en la escoria. El crisol se fundió sin que exista un paralelo con los crisoles arqueológicos. Fue analizado indicando temperaturas de hasta 1200°C (Frame, 2004: 37 y 118).

4.1.2. Técnicas de transformación de minerales en general

En este apartado he agrupado algunas simulaciones en laboratorio carentes de realismo, y que no se centran en una zona o yacimiento concreto. **R.F. Tylecote** (1974) realiza dos experimentos simulando un proceso técnico de reducción de óxidos de cobre para mostrar que esta operación no implica grandes dificultades siempre que se utilicen minerales muy puros. En el primero introduce 30 g de óxidos de cobre y 10 g de carbono como agente reductor en un crisol de cerámica. El resultado son granos de cobre metálico puro. Si la temperatura se eleva por encima del punto de fusión (1084°) se forman gotas de cobre esféricas. Si transcurre más tiempo se forma una pepita o nodulillo en el fondo del crisol. Comprueba como el 70% del cobre se puede recuperar fácilmente y apenas se genera escoria. En el segundo experimento utiliza 10 g de óxidos de cobre, 10 g de carbono y 20 g de fayalita para simular la ganga que puede acompañar a los minerales. El óxido se reduce formando una red dendrítica de Cu rico en Fe dentro de una escoria viscosa. Si continua el calentamiento, la escoria se reduce y se vuelve más viscosa impidiendo separar el cobre.

W. Rostoker realiza varias series de pruebas de laboratorio. En primer lugar, aborda la obtención de cobre a partir de calcopirita en dos operaciones (Rostoker, 1975). Dispone de muestras de calcopirita en fracción polvo (20% de Cu) que va a tostar en sartenes poco profundas a una temperatura de 400-550°C durante 8 h. La reducción del mineral tostado mezclado con cuarzo tiene lugar en un crisol de arcilla que se coloca dentro de una cubeta. Aplica calor con un soplete de gas hasta que se alcanzan los 1300°C. El material licuado es vertido en un molde y recupera cobre metálico (90% de Cu) atrapado en una escoria vítrea. Repite los experimentos a una temperatura más baja pero la viscosidad del Cu rico en Fe dificulta la separación. A 1150°C las gotas de cobre atrapadas en la escoria no se pueden recuperar fácilmente. Afirma que la operación solo es viable si se alcanzan 1200°C. La ceniza del carbón rica en K y Na actúa de fundente reduciendo la viscosidad.

En otra ocasión, junto con otros autores, aplica la técnica de co-reducción de calcopirita y malaquita para la obtención de cobre en una sola operación (Rostoker *et al*, 1989). La presencia de malaquita facilita el procesado de calcopirita porque se produce una reacción entre O y S. Disponen malaquita de la mina de Tonglúshan (Hubei, China) y calcopirita con algo de piritita y cuarzo procedente de una mina de Arizona, además de sulfuro de hierro y escoria (70% de FeO y 30% SiO₂) como fundente. Utilizan un horno de gas y crisoles donde introducen cargas de 100 g de malaquita o de calcopirita en pequeños fragmentos, mezcladas o no, y 100 g de escoria machacada. Generalmente, cuando se alcanzan los 1250°C aparece una escoria fluida. El proceso continúa hasta que la escoria está inactiva. Repiten esta operación varias veces y siempre obtienen un nódulo de cobre metálico de entre 10 y 76,5 g, además de óxidos de cobre, mata de cobre y escoria, con diferencias debidas al tiempo de exposición. También aparecen gotas metálicas atrapadas en la escoria o en la mata cobrizada. El cobre metálico presenta siempre una composición similar, con sulfuro de cobre (3%) como principal impureza, y también Fe (hasta el 3,3%). Sugieren que los sulfuros se pudieron tratar junto con óxidos tal vez de manera accidental, mientras que la producción de mata de cobre se adoptaría solo posteriormente. El uso de carbón es prescindible puesto que no es necesario un ambiente reductor.

La última serie experimental se centra en la obtención de aleaciones de base cobre en un recipiente cerámico mediante la técnica de co-reducción de diferentes minerales (Rostoker y Dvorak, 1991). Introducen en un crisol 50 g malaquita con alrededor del 27% de su peso de ganga rica en Si (en algunas pruebas utilizan calcopirita), mezclada con el mineral que van a co-reducir (7 g de arsenopirita, 4-9 g de As₂S₂, 15 g de cobre arsenical sintético, 7 g de esfalerita, 12,5 g ZnO, 1,2-3,3 g de SnO₂ o 25g de galena). También introducen C o S como agente reductor y 4,5 g de Na₂CO₃ para simular la aportación de las cenizas del carbón, y después cubren la carga con 60 g escoria machacada procedente de otras operaciones o bien con 40 g de limonita. La cubeta donde se coloca el crisol fue calentada mediante un soplete de gas durante 90 min, registrando temperaturas de hasta 1250-1300°C a partir de los 75 min. El material resultante consiste en metal, mata de cobre, speiss y escoria formada por silicatos y óxidos de Fe. En pruebas con minerales de As, las escorias solo contienen entre el 1 y 1,5 % de dicho elemento, mientras que en el metal hay hasta un 4,5%. En las pruebas con malaquita, Zn y Pb se concentran más en el Cu que con calcopirita. Fe está en su mayor parte presente en inclusiones de sulfuro.

4.1.3. Chipre

A. Steinberg y F. Koucky (1974) realizan dos pruebas en laboratorio en condiciones poco controladas sobre las evidencias del yacimiento de Idalión, que van desde la Edad del Bronce hasta época romana. Preparan diez pequeños crisoles de alúmina tapados con diferentes contenidos de malaquita y azurita de Masokambos o de calcopirita de Vasilikos, junto con carbón de pino y SiO₂ procedente de arenisca muy pura. Utilizan un horno moderno de combustión de coque de planta rectangular (45x60 cm), e inyectan aire en la parte inferior mediante un compresor. Realizan dos operaciones con una duración de 2 h y 1 h 30 min. Cuando la carga solo es de carbonatos de cobre aparecen gotas metálicas, mientras que acompañados de fundente, el material se vuelve muy fluido y aparecen gotas de metal en la escoria. En los crisoles que contenían calcopirita y fundente se forma una matriz vítrea con algo de mata cobrizada. Afirman que procesar los sulfuros requiere de una operación de oxidación previa a la reducción.

U. Zwicker y otros autores (1985) llevan a cabo varias series experimentales sobre la transformación de sulfuros de cobre en recipientes cerámicos. Se trata de una gran aportación procedimental, si bien de nuevo intervienen numerosos elementos modernos y procesan cargas muy pequeñas. Se basan en los hallazgos de pequeños crisoles neolíticos y otros de mayor tamaño del Bronce Final, como los del yacimiento de Enkomi, en los cuales el cobre contiene sulfuros. En la primera serie, introducen sulfuros de cobre y hierro de Bougainville (Nueva Zelanda) en un crisol sencillo, y lo cubren con un caramullo de carbón de 50 cm de diámetro. Utilizan entre tres y seis tubos de soplado. En la primera prueba, fue tostado a 800°C y después reducido a 1100°C. Consiguen recuperar el 50% del Cu. En otra prueba, el crisol se coloca en un hogar de carbón e inyectan aire a través de un agujero en la pared del crisol. El material resultante (sulfato de cobre azul) es introducido en el crisol junto con carbón y sometido a una temperatura de 1100°C. Cuando el mineral es mezclado previamente con pequeños fragmentos de estiércol logran recuperar el 75% del Cu. Sugieren la existencia de un tipo de producción de cobre y de aleaciones en recipientes cerámicos desde la prehistoria hasta época romana, la cual se realizaría con fuelles a partir de la Edad del Bronce. Finalmente, en la misma campaña realizan una aproximación a las técnicas de producción de latón, tanto la co-reducción como la cementación, inspirándose en la producción de bronce del período Arcaico.

4.1.4. Israel, Palestina y Jordania

Entre 1976-1983 tienen lugar varias experimentaciones en laboratorio basadas en los hallazgos arqueome-

talúrgicos del valle de Timna en el sur de Negev (Israel). La hipótesis de partida es que la tecnología evolucionó del uso de pequeñas cubetas durante el Calcolítico a hornos con posibilidad de sangrado de escoria a partir del Bronce Final. Se trata de una aportación metodológica rigurosa con un procedimiento en el que modifican diversos parámetros para observar diferencias en los resultados, también realizan abundantes mediciones y analíticas e incluso cálculos sobre los procesos termodinámicos. Por otro lado, se trata de experimentaciones poco realistas con la intervención de elementos y conocimientos modernos que no corresponden a la metalurgia prehistórica. En la primera parte, **R.F. Tylecote** y **P.J. Boydell** (1978) diseñan dos series experimentales con dos estructuras elaboradas con ladrillos refractarios, arena y otros materiales modernos. La estructura A, basada en evidencias de *Site 2* de finales del II mil BC, consiste en una estructura cilíndrica (32 cm y 76 cm de altura) con una abertura para el sangrado de escoria. La estructura B simula una cubeta rodeada por un murete de cantos (22 cm de diámetro y 30 cm de profundidad) del yacimiento *Site 39* del IV mil BC (Fig. 3). Utilizan un compresor de aire con una capacidad máxima de 550 l/min, carbón como combustible y fundente (arena de sílice, hematites y un mineral de Mn). Utilizan un mineral oxidico de cobre en dos de las pruebas, y minerales artificiales en el resto, siempre en fragmentos de pocos milímetros. Durante la experimentación modifican el caudal de aire, la proporción de mineral y combustible, las dimensiones de los elementos y la disposición y el número de toberas. En el horno de sangrado se alcanzan temperaturas más altas, pero no funciona bien debido a la introducción de una excesiva proporción de fundente y la baja cantidad de cobre. En una prueba en la que colocan una tobera horizontal en el lado opuesto a la tobera inclinada, aportando ambas

entre 350 y 520 l/min, consiguen que se produzca una escorificación. En la estructura B realizan trece experimentos. Obtienen más cobre con un caudal de 150 l/min que con 100 l/min. A 200 l/min las condiciones son demasiado oxidantes y se forma magnetita, contribuyendo a la pérdida de Cu debido a la viscosidad de la escoria. Durante la operación registran temperaturas de 1200°C, mientras que el porcentaje de CO₂ osciló entre el 2,2 y el 25%. Efectúan ocho pruebas de fundición del metal obtenido en crisoles y hornos modernos. Pretenden eliminar el Fe porque no está presente en los objetos calcolíticos. Las gotas de cobre contenían Fe y S como impurezas principales, mientras que el As disminuyó su concentración inicial a la mitad.

H.A. Ghaznavi dirige una nueva serie de 17 experimentos en la estructura B para observar la evolución de la concentración de elementos en los productos metálicos y las escorias, teniendo en cuenta los elementos introducidos por el mineral, el combustible y los fundentes (Gazhnavi, 1976; Tylecote *et al*, 1977; Tylecote, 1980). Utilizan minerales de Timna y de otras seis procedencias (Rudna Glava en Serbia, Río Tinto en Huelva, Parys Mountain en Gales, Avoca en Irlanda y dos minerales creados artificialmente). Los sulfuros de cobre son tostados previamente a 850°C durante 5 h. Durante la serie modifican parámetros como el ángulo de las toberas. Calientan la estructura con carbón durante varias horas y a continuación introducen varias cargas de minerales de cobre y de fundentes (óxidos de hierro y arena), generalmente en una proporción de 1:2 con los minerales oxidicos y de 2:1 con los sulfuros. Un compresor aporta a cada tobera un caudal de 150 l/min. Con una sola tobera y cargas de entre 2 y 6 kg de mineral solo se forman gotas metálicas, mientras que con dos toberas y cargas de entre 1,2 y 2,5 kg de mineral se alcanzan temperaturas más altas y obtienen lingotes de entre 200 y 400 g. De los 49 elementos detectados en el mineral solo 12 pasan en cantidades mayores de 10 ppm (0,001%). Las principales impurezas son S y Fe. Ciertos elementos como As y Sb aparecen más en el metal que en la escoria. Ag y Ni son más estables en ambos casos. Las altas temperaturas producen una disminución de la presencia de Zn, Sb, Pb y Bi en el metal. Todo el CaO, Na₂O y K₂O presente en la escoria puede derivar de la ceniza. En cada operación de reducción consumen 8 kg de carbón a partir de 24 kg de leña para obtener 200 g de Cu y 2 kg de escoria. También realizan nueve pruebas de afino con el metal obtenido en algunas de las pruebas y obtienen cobre bastante puro. Sugieren que los sulfuros requieren temperaturas demasiado altas para eliminar las impurezas y solo el uso de óxidos de cobre bastante puros explica la pureza de los cobs tempranos.

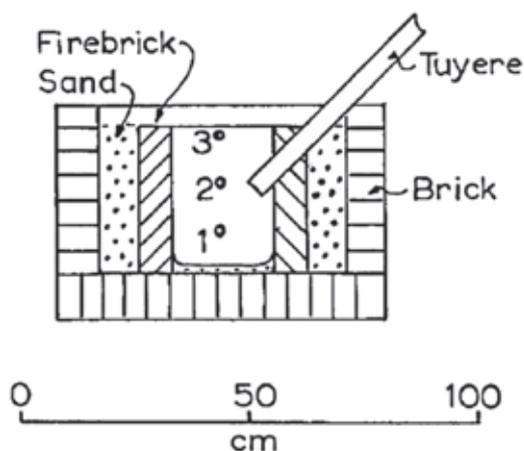


Figura 3. Esquema de la estructura B de los experimentos sobre Timna (Tylecote y Boydell, 1978).

En otra ocasión, **H.G. Bachmann y B. Rothenberg** (1980) efectúan un experimento sencillo y realista para comprobar la viabilidad de la técnica del tiro natural en una simple cubeta, inspirándose en los restos pertenecientes al IV mil BC de los yacimientos *Site 30A* y *Site 34* de Timna. Colocan cantos de arenisca forrados con arcilla en una cubeta situada en la elevación donde se ubica el yacimiento 30A y orientada en la dirección del viento con una velocidad de 3,5 a 7 m/s. En la prueba no utilizan mineral y se limitan a registrar la temperatura introduciendo cargas de 1 a 1,5 kg de carbón. En 40 min se alcanza una temperatura máxima de 1260°C. Afirman que incluso con viento suave se alcanzan temperaturas suficientes para la reducción y la fundición de cobre, pero una carga de mineral habría absorbido bastante calor y la temperatura hubiera sido más baja.

Entre 1978 y 1982, **J.F. Merkel** (1982, 1983 y 1990) realiza 32 pruebas de reducción retomando el uso de la estructura A con algunas modificaciones. Esta vez los parámetros que modifica son relativos a las toberas (número, disposición, diámetro interno, ángulo), el combustible (cantidad, tamaño, proporción mineral/combustible), las dimensiones de la estructura, los tiempos, los fundentes (óxidos de hierro, proporción mineral/fundente), el uso de diferentes minerales (cobre en virutas con arena para simular la ganga del mineral, mineral de Calabona-Cerdeña o mineral de Timna) o el uso de diferentes medios de inyección (compresor o fuelles). Registra temperaturas de hasta 1400°C y mide las concentraciones de CO₂, O₂ y CO. En la primera parte (pruebas 1-26) utiliza un compresor que aporta un caudal medio de aire de 350- 400 l/min, y la carga consiste en virutas de Cu, arena y mineral de Fe como fundente. Se producen escorificaciones y consigue obtener un lingote plano. En la segunda parte las operaciones son ejecutadas con mayor realismo con tres fuelles-vasija que insuflan alrededor de 360 l/min. En la prueba 27 procesan mineral de Timna con fundente y obtienen escoria en la que predomina la fayalita y algo de Cu rico en Fe. Las últimas pruebas tienen lugar en el entorno de Timna (pruebas 28-32) y utiliza minerales de cobre locales con ganga de SiO₂ y Fe. La estructura excavada y revestida de arcilla, arena y carbón en polvo presenta unas dimensiones similares. La duración total de cada prueba fue de 6 h y se produce una pequeña escorificación. Recupera 2,1 kg de goterones de Cu negro rico en Fe. Finalmente, realiza operaciones de afino en laboratorio en una cubeta poco profunda y obtiene lingotes planos en algunos intentos, llegando a una recuperar el 80-90% del Cu inicial. El contenido de Fe disminuye entre el 2 y el 6%. En general, la concentración de Fe, Zn y Co disminuye hasta un 80-100%, mientras que Ag y Sn incrementan.

Aunque el autor propone la realización de operaciones sucesivas de afino, lo cierto es que estos experimentos no reproducen la tecnología antigua por el uso de carbón y óxido de hierro como fundente en proporciones demasiado altas (Craddock y Meeks, 1987: 200-201).

M. Bamberger y P. Wincierzt (1990: 123-157) llevan a cabo simulaciones sobre las evidencias del Bronce Final de los yacimientos de Timna. Se trata de un programa sistemático en el que realizan abundantes mediciones y analíticas y elaboran modelos matemáticos para explicar los efectos de la modificación de parámetros y su influencia en la eficiencia del proceso. La primera serie de pruebas se centra en la inyección de aire. Utilizan un tonel (30 cm de diámetro y 50 cm de altura) que llenan con virutas de leña y aportan aire con un compresor. Las toberas presentan un orificio de 15 o 25 mm de diámetro y son colocadas en posición horizontal o a 30° de inclinación. Con la tobera de 25 mm de diámetro se consigue mayor caudal pero se forman más turbulencias, mientras que la posición inclinada es más eficiente. En la segunda serie simulan operaciones de transformación de minerales en un horno cilíndrico (40 cm de diámetro interno y 60-70 cm de altura) con abertura para el sangrado. Utilizan toberas de 10-15 mm de diámetro situadas a 10-20 cm del centro del horno y conectadas a un compresor que suministra 18 m³/h de aire por tobera. Introducen una mezcla de Fe₂O₃, (hasta 5 kg por prueba), arena de SiO₂ (hasta 6 kg) y virutas de latón con 60 % de Cu (hasta 20 kg), mezclados en diferentes proporciones con el fin de obtener escorias similares a las de Timna. Las nueve pruebas consisten en un calentamiento con carbón, después introducen el mineral y el fundente y finaliza con el sangrado. Los parámetros que dan los mejores resultados son el uso de seis toberas inclinadas y una proporción de mineral y fundente/carbón no superior a 2:1. El mínimo caudal de aire para que se produzca la escorificación es de 15 m³/h por cada tobera. Finalmente, realizan cuatro pruebas con los parámetros mencionados introduciendo entre 7,5 y 26 kg de mineral de Timna (20% de Cu) y entre 22 y 64 kg de hematites. Se producen varios sangrados por prueba pero solo en una de ellas, con una ratio fundente/carbón de 1:1, obtienen un lingote (97% de Cu).

Además de Timna, las evidencias de otros lugares fueron estudiadas mediante la experimentación. **L.A. Khalil y H.G. Bachmann** (1981) realizan una experiencia inspirada en el hallazgo de minerales alterados, goterones de metal y la existencia de una aleación de Cu-Sn-As en niveles del Bronce Inicial y Medio (2900-1550 BC) de Jericó (Palestina). Plantean una operación sencilla en un recipiente de cerámica con una capacidad de 200 cm³, el cual es calentado sobre

una cama de carbón. A continuación, introducen varias cargas de malaquita machacada y carbón (20 g cada vez) durante 15 min. Un tubo de cerámica conectado a un bidón de aire comprimido inyecta una corriente de aire constante permitiendo alcanzar y mantener una temperatura de 1200°C. Detienen el aporte de aire a los 40 min de la adición de la última carga y recuperan gotas de cobre metálico. No se forma escoria debido a que el mineral era rico en Cu.

S. Kölschbach (2000) realizó una experimentación sobre las evidencias del Bronce Inicial en Faynan (Jordania). Los hornos utilizados (60 cm de planta y 62 cm de altura) funcionan con la corriente de aire natural que penetra a través de toberas de arcilla (4 cm de orificio) colocadas en la pared del lado donde más sopla el viento. Para conocer más detalles de este trabajo sería necesario traducir la publicación del alemán.

S. Shalev y otros autores (2003) realizan una experiencia realista para comprobar la viabilidad de la reducción, fundición y moldeo de cuprita muy pura procedente de Israel en una sola operación. Ante la ausencia de datos sobre las estructuras de combustión del Calcolítico Inicial en Israel, opta por utilizar un recipiente de arcilla situado en un hogar normal de leña y carbón. La inyección de aire se efectúa con un único fuelle de mano. No ofrecen mayores precisiones ni analíticas, pero conocemos algunos datos más (Rovira, 2004: 13). Introducen cuprita machacada, probablemente procedente de un yacimiento calcolítico, sobre las brasas en el interior de un recipiente (4-5 cm de profundidad y 15 cm de diámetro) y se cubre con una capa de 8-10 cm de carbón. Dos toberas inyectan aire alternativamente sobre la boca del crisol y de modo rasante. Transcurridas 3 h se vertieron unos 200 g de cobre líquido en un molde de hacha plana y apenas se produjo escoria.

4.1.5. Anatolia

U. Zwicker (1980) lleva a cabo una serie experimental en laboratorio sobre las aleaciones de Cu-Sb-As del 3500 BC en Norsun-Tepe. Primero realiza dos pruebas utilizando en cada una de ellas 2 g de carbonatos de cobre asociados a cuarzo procedentes del yacimiento. Coloca dos fragmentos de carbón y el mineral entre ellos en un recipiente y lo calienta con la ayuda de un compresor. La primera prueba tiene una duración de 7 min y la segunda de 3 min. Los materiales obtenidos, tanto los fragmentos de escoria como las gotas metálicas, contienen Sb y As. Otras dos pruebas tienen lugar en un horno pequeño de laboratorio donde introduce 200 g de carbón seguido de seis cargas de un total de 200 g de mineral mezclado con 200 g de carbón, ambos en fragmentos de menos de 1 mm. La duración fue de 1 h en ambas pruebas. Se alcanzan los 1200°C de temperatura y el

volumen de aire fue de 2,6 m³ y 3,3 m³ respectivamente. Obtiene escoria con gotas metálicas. Realiza tres intentos con malaquita asociada a arenisca y recupera cobre metálico con entre el 1-25% de Fe y los mismos elementos traza que el mineral. Por último, realiza dos pruebas de fundición con carbón en un crisol alcanzando los 1200°C. Las composiciones del material obtenido con el mineral asociado a arenisca presentan más similitudes con las escorias de Norsun-Tepe, ya que éstas no contienen Sb ni As.

C. Caneva y C. Giardino (1996) realizan una serie experimental basada en los hallazgos de Arslantepe para comprobar las posibilidades del uso de bajos hornos. Se trata de otra experimentación poco realista y descrita con pocos detalles. Primero efectúan una serie de experiencias de co-reducción de calcopirita con malaquita en diferentes hornos elaborados con arcilla refractaria, fragmentos de arenisca-cuarzo y paja. El mejor resultado se produce en hornos de 20 cm de diámetro de la cámara y 80 cm de alto con dos toberas de 40 cm en la base. En las primeras pruebas inyectan aire mediante un ventilador centrífugo y después con un fuelle de mano de tipo herrero con el que obtienen un caudal de aire similar (300-600 l/min). En el calentamiento (3-5 h) se alcanzan los 1200°C. A continuación introducen una carga de carbón, minerales de cobre y caliza y sílex como fundentes. El resultado de la reducción (10 h) es una escoria que contiene gotas de cobre. También realizan algunas pruebas sin fundente en un recipiente cerámico con una pequeña cantidad de carbón. Inyectan aire directamente al crisol (10 min) y obtienen un resultado similar. En la segunda serie realizan pruebas en laboratorio de co-reducción de minerales de cobre (cobre nativo procedente de Kirmizi Tarla o calcopirita tostada) y minerales de arsénico (realgar u oropimente). Utilizan un horno donde colocan un crisol con los minerales y carbón, más polvo de sílice como fundente cuando se utiliza calcopirita. Con cobre-oropimente se producen altas pérdidas de As. El cobre obtenido presenta entre el 3,7 y el 5,7% de As.

4.2. Toscana y Cerdeña (Italia) y Creta (Grecia)

U. Zwicker y otros autores (1980) realizan diez pruebas de laboratorio sobre la producción de lingotes de cobre de piel de toro en Cerdeña durante la Edad del Bronce a partir de calcopirita de Funtana Raminosa (Cerdeña). A pesar del uso de minerales locales, la ausencia de realismo resta valor a la comparación entre el material experimental y el arqueológico. Los minerales, nueve fragmentos de calcopirita y otro de pirrotina con Co, son procesados con carbón inyectando aire y/u oxígeno comprimidos, y

modificando la duración de la prueba entre 0,2 y 10 min. En una reacción corta solo se producen óxidos de cobre y de hierro, además de sulfuros y silicatos. Si se prolonga a más de 5 min se forma cobre metálico, además de fases de óxidos y de silicatos. En 5 min con oxígeno la cantidad de metal obtenida es mayor que si se inyecta aire. En 10 min con aire se forma abundante cobre metálico que contiene Cu_2O , además de escoria. En 1 min a alta temperatura y con pirrotina se produce Fe metálico en pequeña cantidad. En otra prueba procesan 10 g de calcopirita, 5 g de Cu muy puro y 2,5 g carbón a 1250°C durante 30 min. La mata cobriza y el cobre metálico presentan trazas de As e inclusiones de sulfuros y óxidos. Afirman que la composición de las escorias es similar a las de Nurallao por su contenido en sulfuros. Los lingotes gruesos contienen óxidos y debieron ser fundidos en condiciones oxidantes, ya que As, Ni y Co pasan a la escoria como óxidos. Los lingotes finos presentan inclusiones de sulfuros.

A. Brunn (1993) efectúa unos experimentos de producción de cobre a partir de calcopirita de Rocca San Silvestro (Toscana) reducida a fragmentos de entre 1 y 5 cm de diámetro. A pesar del uso de un compresor de aire no logra obtener una gran cantidad de metal. Primero realiza una tostación con leña en una superficie de 225 x 95 cm forrada de arcilla roja y rodeada por cantos de arenisca local, inspirada en los hallazgos de Mitterberg (Austria). En los dos primeros intentos de 2 h 47 min y 1 h de duración, respectivamente, no logra eliminar todo el S. En la tercera prueba tuesta 2900 g durante 1 h 28 min y recupera 2550 g de mata cobriza. La reducción tiene lugar en un horno elaborado con bloques de arenisca y arcilla, inspirado en las evidencias de Rocca San Silvestro. Presenta dos cámaras de combustión, una abierta de 47,5 x 60 x 50 cm, y otra cerrada con abertura para el sangrado de 47,5 x 40 x 50 cm. Tras efectuar unos test para comprobar la pérdida de calor, realiza tres pruebas en la cámara cerrada. Introduce el mineral tostado junto con cuarzo y limonita como fundente. En los dos primeros intentos no se alcanza una temperatura suficiente como para formar escoria. En el tercer intento modifica la inclinación del fondo 15° hacia el agujero de sangrado y se produce mate y escoria con gotas de cobre atrapadas. En la última prueba tratan de reducir el mate obtenido pero no obtienen gotas metálicas, quizá por una rápida formación de la escoria.

El yacimiento de Chrysokamino (Creta), donde se encontraron minerales de cobre oxídicos con alto contenido en Si, mineral de hierro y restos de cerámica perforada con adherencias escoriáceas en niveles datados en 2300-2100 BC, motivó dos series

experimentales. Primero, **T.O. Pryce** y otros autores (2007) llevan a cabo varias experiencias en dos estructuras de 30 cm de altura y un diámetro de 40 cm en la base y 20 cm en la parte superior, ambas elaboradas con una mezcla de arcilla, arena y serrín. En el fondo tienen una depresión de 10 cm para recuperar los productos, y una de ellas presenta perforaciones. Un ventilador centrífugo aporta un caudal máximo de 93,75 l/min. Para simular los componentes originales del mineral disponen de escoria de fundición de cobre granulada y de cobre puro. Con carbón como combustible registran temperaturas de más de 1300°C y proponen que las perforaciones permiten el aumento térmico necesario para que la escoria fluidifique y el cobre se separe mejor. La falta de realismo de este trabajo limita el valor de una comparación con el registro arqueológico.

En la segunda serie de tres pruebas ejecutadas por **M. Catapotis** y otros autores (2008), el procedimiento es más riguroso y eliminan parte de los elementos modernos, aunque nuevamente hay aspectos experienciales. Elaboran hornos de 20 y 30 cm de altura con una mezcla de arcilla, sílice y hojas de pino. Presentan una abertura para el sangrado y numerosas perforaciones de 2 cm en posiciones aleatorias. Utilizan dos parejas de fuelles de piel ajustada a recipientes metálicos que se accionan con mangos de madera y disponen están unidos a cuatro toberas de 1,5 cm de diámetro interno. Para simular las condiciones del viento, un ventilador centrífugo aporta una corriente de 55 km/h a 1,5 m de distancia. En la primera prueba utilizan huesos de oliva como combustible pero se produce mucho humo sin que se lleguen a superar los 700°C . En la segunda prueba utilizan 11,7 kg de carbón, 3,3 kg de escoria machacada y 0,6 kg de cobre metálico. Tras 46 min de calentamiento y 100 min de inyección de aire, se forma una torta de escoria en una zona superior al nivel de sangrado. La mayoría del cobre se había concentrado en la parte superior de dicha torta. Afirman que las perforaciones facilitan la acción del viento porque tienden a generar una mayor temperatura en la parte superior. En la última prueba utilizan 2,8 kg de malaquita asociada a esquistos (6% de Cu) recogida en Chrysostomos (sur de Creta), y como fundente 2,8 kg de mineral de hierro y 1,4 kg de caliza. Tras un calentamiento (48 min) con el ventilador situado a 1 m del horno, accionan los fuelles (1h 20 min). Consumen 15 kg de carbón y se alcanzan temperaturas superiores a los 1300°C . Se produjo el sangrado de una escoria de aspecto viscoso. En el interior del horno recuperan una densa torta de escoria con algunas gotas de cobre atrapadas.

4.3. Los Alpes

4.3.1. Austria

Las evidencias arqueometalúrgicas de la Edad del Bronce en los Alpes, particularmente en Austria, han motivado un la realización de diversas aproximaciones experimentales. La primera de ellas, realizada por **J.W. Anstee** (1966), consiste en una experiencia aislada de obtención de cobre a partir de calcopirita en dos operaciones. Tuesta una parte del mineral en fragmentos de pocos milímetros mediante un soplete de gas, y el resto en un fuego sobre unas losas de arcilla refractaria durante 30 min. Machaca el material resultante, todavía con algo de calcopirita sin alterar, a tamaño de polvo grueso y lo mezcla con arcilla. La reducción tiene lugar en una estructura elaborada con bloques de arenisca (23 cm de diámetro en la base y 90 cm de altura). Afirma inspirarse en hallazgos de la Edad del Bronce, pero la estructura no tiene paralelos concretos. El fondo del horno presenta una cubeta de 7,5 cm de profundidad formada por un crisol colocado sobre una laja de arenisca y forrado con arcilla. Después de un calentamiento (3 h), insufla aire con un fuelle (1 h y 40 min en total). Primero introduce cinco cargas de seis pepitas de mineral mezcladas con carbón fino (durante 42 min), seguidas de dos cargas de carbón más. Se formó una escoria con una capa gruesa y porosa sin metal visible, cubierta por otra capa de escoria que contenía dos fragmentos de mata cobriza y seis pepitas de cobre atrapadas.

C. Böhne (1968) aborda la transformación de calcopirita basándose en las evidencias encontradas en el distrito minero de Mitterberg (Salzburgo). Utiliza dos estructuras para la reducción pero no contrasta los resultados entre los productos obtenidos en ambas. Previamente la calcopirita de Mitterberg (16,17% de S) fue tostada junto con fragmentos de cuarzo sobre una rejilla de hierro en un fuego de carbón durante 1 h. Un intento utilizando coque como combustible fracasa. Para la reducción utiliza un compresor de aire y una tubería de hierro de 25 mm de diámetro. El mineral tostado (6,65% de S) se mezcló con caliza y fluorita para simular la composición de las escorias. Primero utiliza un simple agujero en el suelo forrado de arcilla refractaria (50 cm de diámetro y 20 cm de profundidad) para simular la técnica más antigua. Calienta la estructura e introduce carbón mezclado con mineral en pequeños fragmentos. Continúa añadiendo cargas de combustible y finalmente obtiene una torta de escoria con algo de cobre. Funde el metal obtenido y obtiene un cobre más puro. Otra serie tiene lugar en un bajo horno que consiste en un agujero con paredes de piedras y arcilla (20 cm de diámetro y 1 m de alto) con una abertura para el sangrado de escoria. En uno de varios intentos se forman tortas de escoria de 2-3 cm

de espesor con cobre atrapado y mineral alterado. El metal fue afinado en el horno simple durante 1 h y recuperan gotas de cobre con algo de Fe atrapadas en escoria. Sugiere que eliminarían las impurezas del metal mediante varias operaciones de afino.

H. Neuninger y otros autores (1970) llevan a cabo una serie de pruebas en laboratorio sobre el posible uso de tetraedrita durante la Edad del Bronce en la cueva de Tischofer en Kufstein (Tirol). Se inspiran en las técnicas de la obtención de cobre en varias operaciones de los indígenas de la isla de Luzón (Filipinas), documentadas en el siglo XIX. La tetraedrita (que contiene Cu, Sb, As e inclusiones de baritina), junto con arena de cuarzo como fundente, fue sometida a diversas reducciones en un crisol en el interior de un horno eléctrico a 1200 o a 1300°C, alternando con tostaciones de la mata cobriza resultante bajo la llama de un soplete de gas. En la última reducción amasan los productos con carbón formando bolas. Durante la prueba remueven el contenido del crisol con un palo. El metal reducido contiene en torno al 91% de Cu, el 4% de Sb y apenas algo de S. Se ha señalado la inadecuada presentación de los datos de este trabajo (Merkel, 1982: 44), además de la falta de realismo por el uso de materiales y técnicas modernas.

El estudio de los materiales del yacimiento nº 27 de Kitzbühel (Tirol) de mediados del II mil BC, lleva a **U. Zwicker y F. Goudarzloo** (1979) a realizar una simulación en laboratorio poco realista sobre la posibilidad de obtener cobre a partir de sulfuros en una sola operación. En la primera serie introducen sulfuros de cobre y hierro procedentes de Nueva Zelanda en un recipiente de grafito (22 cm de diámetro y 34 cm de altura) y utilizan un compresor de aire. Logran tostar cargas de 100 g de mineral a menos de 1000°C removiendo la carga para conseguir un proceso oxidante. Después realizan una fase reductora y obtienen lingotitos de 35 g. Vuelven a procesar a 1200°C los restos de la carga, 811 g de mata cobriza, escoria y carbón, recuperando otros 45 g de Cu junto a 215 g de mata de cobre y 523 g de escoria. La escoria contiene abundante magnetita e inclusiones de Cu y de sulfuros. En otra serie, utilizan escoria procedente del yacimiento nº 27. Primero refunden 35 g y obtienen un material compuesto por silicatos ricos en Cu y otros elementos, con inclusiones de sulfuros de Cu y Fe. En otro intento refunden 800 g y enfrían el material rápidamente en agua. Detectan algo de cobre metálico en los glóbulos de sulfuro. También refunden la escoria añadiendo el 10 o el 25% de MnO_2 , y observan como la cristalización comienza a menor temperatura, a partir de 1005°C. En otro intento someten una carga de fragmentos de sulfuros y MnO_2 (25%) a temperaturas entre 200 y 280°C durante 2 h, y enfrían en agua.

A partir de 280°C se forma una estructura homogénea por la transformación de Cu_2S y CuS en Cu_9S_5 . Finalmente, funden un mineral sintético ($\text{Cu}_{1,96}\text{S}$) con diferentes contenidos en metales (en torno al 5% de Cr, Mn, Ni o Co y entre el 1 y el 5% de Fe) a 1300°C. El cobre precipita en gran medida con adiciones de Cr, Ni y Co, Fe y algo menos con Mn. Con adición del 5% de Fe y enfriamiento rápido se forman glóbulos de Cu dentro del sulfuro.

Menos habituales son las experiencias realizadas por **R.C.P. Doonan** (1994) sobre los tratamientos previos a la reducción, como la preparación del mineral y la operación de tostación, basándose en las evidencias del valle de Ramsau (Estiria) durante la Edad del Bronce. Primero realiza una prueba de tostación de 100 g de calcopirita en una mufla a 700°C durante 48 h. El propósito es comprobar si facilita el machacado pero el resultado es negativo. Posteriormente tritura 150 kg de calcopirita con ganga de cuarzo y esquistos procedente de la mina de Erzberg (Eisenerz) a fragmentos de 1 cm en un total de 19 h. Tamiza el mineral con una malla de 1 cm y separan los fragmentos con más ganga. Después de varias horas obtienen 33,4 kg de fragmentos ricos en calcopirita. Las pruebas de tostación tienen lugar al aire libre con leña de pino en una estructura rectangular de 2 x 0,9 m y 0,2 m de profundidad. Después de algunos ensayos sin mineral para observar el comportamiento de la estructura alterando diferentes parámetros, realiza dos pruebas con 30 kg de combustible y 8 kg de calcopirita cada vez. En el segundo intento, deja más espacio entre las brasas y se alcanzan hasta 892°C. Prácticamente la totalidad del mineral se había tostado. En la última prueba introducen 17 kg de calcopirita en cargas de 1 kg y consigue una oxidación todavía más completa.

H. Herdits y K. Löcker abordan la transformación de sulfuros en varias operaciones para el estudio de las evidencias del Bronce Medio y Final de Mitterberg, donde aparecen hornos de planta rectangular y estructuras de tostación (Herdits, 1997; Herdits y Löcker, 2004). Trituran 17 kg calcopirita asociada a minerales de hierro y cuarzo, que procede escombreras de antiguas minas de Mitterberg. Primero realizan una tostación oxidante en un crisol sobre un hogar de leña con murete en un lado. Inyectando aire mediante fuelles. Los minerales quedan tostados en diferente medida y se forma escoria rica en magnetita y algo de cobre metálico. La operación de reducción tiene lugar en un bajo horno de planta rectangular elaborado con mampostería y barro con una abertura para el sangrado de escoria. Utilizan dos fuelles unidos a dos toberas y carbón como combustible y registran una temperatura media de 1320°C. No se forma la cantidad de escoria fayalítica que esperaban debido a un

ambiente excesivamente reductor o bien a una deficiente tostación. La mata cobriza más rica en Cu es tostada de nuevo en la primera estructura a 750°C. Machacan el material resultante y recuperan cobre con el 10% de Fe mientras que el metal arqueológico presenta solo alrededor del 5%.

G. Woelk y otros autores (1998) realizan cinco pruebas sobre la transformación de sulfuros durante el Bronce Medio. Proceden modificando parámetros hasta dar con el resultado esperado. Primero, elaboran un horno cónico (40x60 cm de base) en una trinchera excavada en una ladera con piedras y arcilla. Dejan una abertura para evacuar la ceniza e instalan dos toberas a 20 cm de altura unidas a un compresor de aire. El mineral sintético simula el producto de la tostación de sulfuros (Cu_2O de 16%, 50% de Fe_2O_3 , 50%, 18% de SiO_2 y 16% de CaCO_3). Es mezclado con melaza formando bolitas de 0,5-1 cm. En la primera prueba, las temperaturas no fueron lo suficientemente altas, y por ello reducen un 60% el espacio de la cámara del horno. Realizan otro intento de 2 h de duración con 15 kg de carbón y seis cargas de 1 kg de mineral. Se forma escoria con gotas de cobre de 1 cm. En el tercer intento se alcanza mayor temperatura y recuperan abundantes prills y nódulos de mayor tamaño. Para la siguiente prueba reducen el espacio bajo las toberas y crean otra abertura para el sangrado de escoria. Tras un calentamiento (2 h) introducen dos cargas de 1,5 kg de mineral. Incrementan el caudal de aire de 8 a 16 m³/h, y 1 h después disminuyen a 12 m³/h (200 l/min) hasta que se produce un sangrado de 600 g de escoria (3h 14 min). Continúan inyectando aire (1h 20 min más), cubren el horno y lo dejan enfriar. El resultado son dos masas de metal y una torta de escoria. En la última prueba elevan un poco más el fondo del horno. En el calentamiento (3 h) se alcanza 1000°C. Incrementan el caudal a 15 m³/h y cargan 3 kg de mineral cubierto por 3 kg de carbón. Se produce el sangrado de escoria (a los 10 min), y sucede lo mismo después de cada nueva carga de 2 kg de mineral y 2 kg de carbón (durante 1h 20 min). La prueba continua sin nuevas cargas (30 min) y recuperan dos tortas de 1,64 kg formadas por metal (90% de Cu con inclusiones de Fe) y algo de escoria fayalítica.

F. Lorscheider dirige una investigación experimental sobre la posibilidad de reducción de fahlores en una sola operación durante el Calcolítico (Lorscheider *et al*, 2003). Para facilitar la oxidación, reducen tennantita procedente de Mina Clara (Wolfach, Alemania) inferiores a 1 mm. En la primera serie probaban estructuras abiertas de diferentes dimensiones inspiradas en hallazgos de yacimientos del Trentino (Italia) y Austria. Alguna consiste en una simple

cupeta en la que logran obtener una escoria con gotas de cobre atrapadas. Entre el mineral y el metal As pasa de un 6% a casi desaparecer, Sb del 1,6 al 1%, y solo Ag se concentra del 0,6 al 0,7%. Otra prueba tiene lugar en una cámara de 17x20 cm constituida por lajas de piedra hincadas con un lado abierto. Se forma una torta con escoria en la que se aprecia una pequeña gota de cobre. En la segunda serie introducen carbón y tennantita con algo de calcopirita en una estructura rectangular similar a la anterior. Utilizan un compresor que simula el caudal de aire de cuatro tubos de soplado. En los dos primeros intentos procesan en cada uno 300 g de mineral y las dimensiones de la cámara son de 20x30 cm y de 20x20 cm respectivamente. La temperatura fue demasiado baja en la zona inferior y solo obtienen escoria con algo de cobre metálico y mineral alterado. En otras dos pruebas la cámara era de 15x20 cm y la tobera se coloca en posición horizontal desde el principio. Primero introducen 200 g de mineral que añaden durante 30 min y obtienen una escoria más homogénea con gotas de cobre atrapadas. En la última prueba añaden una losa de arenisca en la base del horno e introducen cargas de mineral (45 min), y el suministro de aire prosigue (1 h). Remueven el mineral a medida que introducen nuevas capas de carbón (3,5 kg en total). Obtienen una placa de escoria de entre 0,3 y 1 cm de espesor con algo de cobre atrapado.

G. Goldenberg y otros autores (2011) abordan nuevamente la obtención de cobre a partir de calcopirita durante la Edad del Bronce. Se trata de experiencias centradas en dominar el proceso técnico y sus diferentes posibilidades de forma realista, basándose en las técnicas tradicionales del Nepal. Utilizan calcopirita asociada a pirrotina, feldespatos, piroxeno y fluorita, junto con fundente que consiste en escoria procedente de una escombrera de la Edad del Bronce en el Trentino y algo de arenisca. Primero realizan una reducción del mineral triturado en pequeños fragmentos, y después un proceso de múltiples pasos de tostación y reducción. La estructura de planta rectangular (32 cm de lado y 40 cm de altura) fue elaborada con bloques de pórfido alrededor de una cubeta poco profunda. Colocan dos toberas de cerámica conectadas a dos fuelles y utilizan carbón como combustible. Alcanzan temperaturas de hasta 1300°C en operaciones de entre 45 a 120 min de duración. Se forma una masa fundida compuesta por mata de cobre y escoria. En la operación de tostación colocan bolas de mata de cobre triturada y envuelta en estiércol en una estructura semi-excavada de planta ovalada (100 x 80 cm) elaborada con losas de piedra. El proceso dura 90 min y el producto vuelve a ser reducido en un intento que no se completó. Afirman que las opera-

ciones fracasan por la falta de calidad del mineral, el cual además no se preparó adecuadamente.

Finalmente, **E. Hanning** (2012) lleva a cabo tres series experienciales para comprender el proceso técnico de transformación de sulfuros durante la Edad del Bronce en yacimientos como Mitterberg o Acqua Fredda (Italia). Se trata de una experimentación realista realizada con bajo control de variables. Utiliza calcopirita procedente de México acompañada por otros sulfuros, cuarzo y calcita, la cual reduce a fragmentos de 3-5 cm y posteriormente somete a temperaturas de 500-900°C en un fuego de leña durante 4-6 h. El material resultante presenta diferentes grados de oxidación pero no consiguen eliminar todo el S. Elabora tres estructuras de planta cuadrada (45x45 cm y 100 cm de altura) con piedra y arcilla de Mitterberg. En la parte inferior introduce dos toberas unidas a dos fuelles. En la primera serie de cinco reducciones y dos tostaciones algunas zonas del horno permanecieron a poca temperatura y el mineral no se transformó. Cerca de las toberas, donde se alcanzan hasta 1450°C, aparece una masa formada por escoria y mata de cobre con bastante Fe e inclusiones de Cu.

En la segunda serie realiza seis reducciones y dos tostaciones utilizando mineral mezclado con fragmentos de escoria de las pruebas anteriores y cuarzo. En una prueba, tras un calentamiento de 2 h, introduce varias cargas de la mezcla (entre 106 y 178 kg en total) y acciona dos fuelles durante 6-8 h. Con leña de alerce y abeto se alcanzan 1300°C, menos temperatura que con carbón. Aparece algo de cobre metálico en la superficie de la mata de cobre y gotas atrapadas en la escoria. Después de realizar otra tostación y una segunda reducción la mayor parte del material todavía son sulfuros. En la tercera serie realiza seis reducciones y cuatro tostaciones. Después de un calentamiento (2 h), introduce 8 kg de mineral previamente tostado y mezclado con 4 kg de escoria y 2 kg de cuarzo. Durante la reducción (6-8 h) consume (entre 198-306 kg). Se forma una masa de escoria con una capa de mata de cobre que contiene inclusiones de cobre metálico. En las cuatro operaciones que tienen éxito reúnen 14 kg de mata de cobre a partir de 32 kg de mineral. Después de una segunda tostación y reducción de la mata con 2 kg de cuarzo y 2 kg de escoria solo obtienen un sulfuro de cobre más concentrado.

4.3.2. Suiza

W. Fasnacht (1991, 1995, 1999, 2001 y 2009) ha realizado diversas experiencias sobre la metalurgia en Suiza desde el IV mil BC. Aborda de forma realista aspectos como el uso de combustible (leña o carbón) o el medio de inyección de aire (soplado o fuelle). En las pruebas basadas en los hallazgos de los yacimien-

tos palafíticos, introduce carbonatos de cobre y óxido de hierro en un crisol con mango de madera situado en una cubeta simple rodeada por cantos y un parapeto de ladrillos refractarios de 30 cm de altura. El hogar alcanza los 800°C sin inyectar aire. Con dos tubos de soplado o dos fuelles en pocos minutos se superan los 1100°C. Durante la prueba, un fuego próximo a la estructura sirve para transferir combustible. El carbón es más estable y tiene más poder calorífico pero experimenta con leña de diferentes especies llegando a alcanzar 1170°C. Obtienen gotas de cobre atrapadas en la escoria de hasta 6 cm que después son fundidas. Una sola persona funde hasta 50 g, mientras que cuatro personas llegan a fundir varios cientos de gramos.

4.3.3. Francia

A. Ploquin y otros autores (1998) realizan una serie de experiencias en las que utilizan bornita de Saint Véran (Hautes-Alpes), basadas en las evidencias del yacimiento de La Cabane des Clausis del Calcolítico y del Bronce Antiguo. En las dos primeras series tuesta una mezcla de pequeños fragmentos de bornita y esquisto con riebeckita (25%) en un fuego abierto. Añaden cargas de leña y mineral durante varias horas pero no obtienen buenos resultados. En otro intento, la tostación de 2 kg de mineral y 0,7 kg de esquistos durante 36 h da lugar a 200 g de cobre, 1,7 kg de escoria y 500 g de mata cobriza. La reducción se realiza en un horno tipo Mitterberg con una tobera pero no obtienen un material similar al arqueológico. La tercera serie tiene lugar en un lugar próximo al yacimiento, a 2250 m de altura. Realizan tres tostaciones en un hogar de leña delimitado con losas planas colocadas de canto para favorecer la acción del viento. Las cargas son de alrededor de 1800 g y la duración entre 5 y 18 h. En la primera reducción utilizan una cubeta con una sola tobera con un orificio de 1 cm, pero no se alcanza la temperatura necesaria. Añaden un anillo refractario y dos toberas unidas a dos fuelles de 5 l de capacidad cada uno. Realizan tres pruebas en las que calientan bastante la estructura antes de insuflar durante entre 2,5 y 3 h de duración. Introducen entre 0,650 y 1,5 kg de mineral y 0,1-0,2 de esquistos. En cada prueba obtienen una torta de con una capa gruesa de mata cobriza con algunas gotas de cobre metálico y otra capa más fina de escoria.

E. Burger y otros autores llevan a cabo una experimentación en laboratorio sobre la co-reducción de minerales oxídicos y sulfuros, según las escorias de los yacimientos de La Capitelle du Broum (Hérault) y de Saint Véran (Hautes Alpes), y de Riparo di Gaban (Trentino) (Burger, 2008; Burger *et al*, 2010). La serie consiste en cincuenta pruebas en laboratorio y alguna

experiencia con mayor realismo en una estructura al aire libre con fuelles. Utilizan un horno eléctrico tubular y un crisol de caolinita. La carga consistió en 3 g de diferentes mezclas de polvo de calcopirita, malaquita o cuarzo. En la mayor parte de las pruebas se mantiene una temperatura estable de 1200°C durante 30 min, y en algunas se prolonga hasta 8 h. El enfriamiento también osciló entre 10 y 500°C por minuto, pero no se producen diferencias significativas. Inyectan diferentes mezclas de CO y CO₂ con un caudal de 1 l/min, generando una presión parcial de oxígeno (pO₂) entre 0,21 10⁻³, 10⁻⁴, 10⁻⁷ y 10⁻¹⁰ atm. En cada prueba obtienen una gota de cobre con algo de mata de cobre residual y de escoria. En condiciones reductoras, la escoria presenta cristales de fayalita y granos de cuarzo como las de Riparo di Gaban. En condiciones intermedias aparecen también cristales magnetita y mata de cobre residual, similares a las de La Capitelle du Broum y Saint Véran. En condiciones oxidantes observan cristales de cuprita, delafosita y cristobalita. A mayor cantidad de oxígeno se forma más Fe³⁺. Sugieren que la obtención de cobre se realizaría en dos operaciones y que el contenido inicial de oxígeno en el mineral es determinante. También la presión parcial de oxígeno juega un papel y es un testimonio de las condiciones de trabajo.

4.3.4. Italia

E. Silvestri y otros autores (2014) efectúan varias pruebas sobre la transformación de calcopirita en la región del Trentino, donde se han hallado numerosas estructuras de combustión entre el III mil BC y el Bronce Final. Las descripciones son escasas. Elaboran dos hornos contiguos de planta cuadrangular (50 cm de lado y 1 m de altura) con pórfido, donde introducen carbón y una mezcla de calcopirita y cuarzo. Al principio utilizan una bomba eléctrica para la inyección de aire y después la sustituyen por unos fuelles de bolsa unidos a toberas, pero no consiguen mantener una temperatura de 1000°C en toda la cámara. Obtienen una masa parcialmente fundida con inclusiones de mata cobriza y gotas metálicas, en mayor medida cuando el material vuelve a ser procesado. También realizan varias operaciones de tostación modificando el tiempo de exposición. Introducen calcopirita en pequeños fragmentos, el 80% menor a 1 cm, en una plataforma elaborada con arcilla y piedras (100x50 cm). Colocan una pila de leña de 70 cm que se deja arder (1 h), y después el mineral se deja en las brasas (entre 2 y 27 h). Los fragmentos presentan diferentes grados de oxidación. En la última campaña elaboran un horno-chimenea con ladrillos refractarios que funciona con tiro natural. Comprueban que alcanza fácilmente los 1200°C, teniendo en cuenta que no hay carga de mineral.

4.4. Sur de Francia

Durante dos décadas, **J. Happ** dirige diversas series experimentales en el Arqueódromo de Beaune (Borgoña), principalmente sobre las evidencias de minería y metalurgia prehistóricas de la zona de Cabrières (Hérault). Si bien aborda cuestiones arqueológicas concretas y efectúa aproximaciones realistas, la mayor parte de las pruebas son experienciales. La primera serie tiene lugar en una cubeta excavada con paredes de piedras y arcilla, basada en las estructuras halladas en Mitterberg y en el Trentino (Happ *et al*, 1994). Introducen varias cargas de malaquita de la mina prehistórica de la Vierge que alternan con cargas de carbón, e inyectan aire mediante un fuelle. Se alcanzan los 1200°, llegando hasta los 1350° delante de la tobera. Obtienen una escoria rica en Si y Cu (27%) que contiene gotas de cobre de 1-2 mm. En la segunda serie procesan tetraedrita procedente de Pioch Farrus 448, yacimiento con evidencias de minería y metalurgia. Primero tuestan el mineral en un hogar simple a una temperatura de 500°C. Después amasan el material resultante con arcilla y realizan otra tostación en un hogar delimitado por piedras. Finalmente, la reducción tiene lugar en una estructura también simple donde introducen capas sucesivas de mineral y de carbón e insuflan aire a ritmo suave. El material resultante se componía de gotas de cobre ricas en Sb y fragmentos de escoria. En otra serie de pruebas procesan minerales oxidicos y sulfuros de Cabrières y también carbonatos de cobre bastante puros de Chessy (Rhône) (Happ *et al*, 1996; Happ, 1997 y 1998). La reducción se lleva a cabo en estructuras similares a las de la primera serie y después realizan operaciones de afino. El cobre metálico contiene mucho menos Sb que el mineral de Cabrières. El tratamiento de sulfuros es similar a la anterior serie, y se forma escoria fayalítica con mata cobriza y nódulos de cobre metálico. En una prueba recuperan 200 g de cobre a partir de 2 kg de mineral que contiene un 47% de Cu, lo que supone un rendimiento del 20%. La mata de cobre se puede volver a reducir. En otras experimentaciones similares a la segunda serie utiliza calcopirita de las minas de Burc (Tarn) (Happ, 2002). Tras calentar la estructura, introduce 4 kg de calcopirita (con un 30% de Cu) previamente tostada, junto con 1,6 kg de SiO₂ y 0,3 kg de CaO. Registran temperaturas de hasta 1250°C y también la existencia de un ambiente reductor. Transcurridas 3 h, obtienen una torta de 4,4 kg formada por 2,7 kg de escoria y 1,7 kg de mata cobriza. Posteriormente, procesa 200 g de dicha mata cobriza y logra obtener 80 g de cobre. Otras pruebas fueron realizadas en un hogar de carbón rodeado de piedras que funciona con ayuda de la corriente de aire natural (Happ, 1999). Utiliza recipientes perforados (9

cm de diámetro y 13 cm de altura) con 75 agujeros de 0,7 cm. En la primera prueba procesa 1 kg de calcopirita previamente tostada en fragmentos de 0,5-1 cm. Tras 1 h de operación, la mata de cobre y la escoria no se separan adecuadamente. En otra prueba utiliza 500 g de malaquita en fragmentos de 0,1-0,5 cm durante 1 h. A pesar de la baja temperatura alcanzada se forman algunas gotas de cobre. En la tercera prueba introduce 1 kg de calcopirita y 70 g de malaquita con un resultado similar a la primera prueba. Efectuará más operaciones de este tipo con minerales de Cabrières en las que obtienen goterones de cobre, pero apenas hay descripciones (Happ, 2005).

P. Ambert y otros autores (1997) abordan la transformación de minerales de Cabrières, para el estudio de la metalurgia calcolítica del yacimiento de Roque Fenestre (Hérault). Se trata de una aproximación experiencial realista, en la que se ponen en juego los requerimientos mínimos sin el uso de fundentes. Utilizan dos tipos de minerales del entorno del yacimiento, tetraedrita-malaquita de Pioch Farrus I y calcopirita-tetraedrita-malaquita de Pioch Farrus 448. Las pruebas tienen lugar en un lugar expuesto al viento próximo a Roque Fenestre. Tuestan el mineral durante 4 h en una cama de carbón sobre una superficie plana delimitada por piedras. La reducción tiene lugar en una cubeta excavada de 15 cm con un anillo de bloques de dolomía de 30 cm de diámetro, inspirada en los hallazgos de Timna (Israel) o Wadi Arabah (Jordán). Calientan la estructura con ayuda del viento a través de una tobera e introducen cargas de mineral y capas de carbón durante 4 h. En la prueba con mineral de Pioch Farrus I recuperan una torta con gotas de cobre de hasta 2 cm. Con ambos minerales obtienen metales ricos en Sb, Ag y As, similar a los arqueológicos. Defienden que se puede obtener cobre mediante un proceso rudimentario en una sola operación puesto que se forma cobre metálico desde la tostación.

D. Bourgarit y otros autores (2005) realizan varias pruebas sobre las evidencias de transformación de calcopirita en vasijas en el yacimiento de Al Claus (Tarn y Garona) en 2400-2200 BC. En las pruebas de campo, colocan vasijas (30 cm de altura y 30 cm de diámetro) en una cubeta excavada. Introducen una carga de 500 g compuesta por calcopirita (90%), malaquita y cuarzo, en fragmentos de 0,5-2 mm, y 1 kg de carbón en pequeños fragmentos. Después de un calentamiento (1 h), inyectan aire con un fuelle unido a una tobera de arcilla (1 h). Registran temperaturas de hasta 1300°C. En algunas pruebas remueven la carga con un palo para facilitar la entrada de oxígeno. En función de la proporción de malaquita y calcopirita, y de la remoción o no de la carga, se forman tres tipos de materiales: escoria con predominio de mata cobriza;

escoria silicatada con agujas de delafosita y cuprita; escoria que contiene fases de cuarzo, fayalita, magnetita, mineral similar a calcosina y nódulos de cobre atrapados. Recuperan aproximadamente el 20% de Cu. La mayor parte de las pruebas están realizadas en laboratorio con la intención de observar las diferencias según la temperatura, la presión parcial de oxígeno y la proporción de minerales sulfuros y oxídicos. Utilizan un horno eléctrico tubular y un pequeño recipiente de caolinita. Introducen una carga de entre 3 y 5 g similar a la mezcla anterior pero sin carbón, y la someten a temperaturas de entre 1000 y 1300°C (30 min). Aplican cuatro diferentes corrientes de gas (aire - 0,21 atm, de aire y nitrógeno - 0,03 atm y de nitrógeno - $6,10^{-5}$ atm y sin corriente de aire - 0,1 atm). A baja temperatura (1000-1050°C) la carga no alcanzó el estado líquido y los minerales no se transforman. A 1100-1300°C se forman los tres tipos de materiales mencionados más arriba. A 1250°C o más el producto es más homogéneo y menos viscoso que el material encontrado en el yacimiento. Sugieren que la obtención de cobre en una sola operación depende de una combinación precisa entre el contenido de oxígeno sólido y gaseoso, aunque no es necesario la co-reducción con malaquita. El proceso se puede realizar con leña porque no necesita un ambiente reductor ni temperaturas muy altas.

4.5. Península ibérica

Desde mediados de los años noventa, **S. Rovira** ha efectuado varias experimentaciones sobre las técnicas de reducción, co-reducción y cementación en recipientes cerámicos durante el Calcolítico y de la Edad del Bronce. Las primeras series son experiencias aisladas de reducción de minerales oxídicos. En el primer intento introduce carbonatos de cobre asociados a arseniatos y cuarzo en fragmentos de 1-2 cm en una vasija de arcilla refractaria de 15 cm de diámetro (Rovira, 2003). Calienta la vasija con leña (30 min) y a continuación inyecta una corriente de aire de 15/20 Km/h mediante un ventilador (2 h). Se formó mineral tostado y una masa compuesta por silicatos, óxidos de cobre, y algo de cobre metálico rico en As, Sb y Fe. Afirma que el cobre arsenical se produce accidentalmente por la composición de los minerales. En las siguientes pruebas utiliza dos fuelles de 40 l de capacidad unidos a dos toberas con un orificio de 10 mm (Rovira y Gutiérrez, 2003 y 2005). En una vasija (30 cm de diámetro y 10 cm de altura) ajustada en una cubeta, introducen 1 kg de malaquita del Zaire molida en granos de 2-3 mm y polvo, y mezclada con carbón, en pequeñas cargas (2 h). Añaden varias cargas de carbón (6 kg en total) (1 h) y dejan consumir las brasas (1 h). El material resultante consistía en fragmentos de mineral sin reaccionar y de escoria, uno de ellos con

algo de cuprita y gotas de cobre metálico. En otra prueba utilizan 1 kg de malaquita-tenorita (60% de Cu) con ganga de feldespato procedente de una mina de Burgos. Calientan una estructura de 40 cm de diámetro y 30 cm de profundidad (30 min), añaden mineral (2 h) en fragmentos de 2 mm y mezclado con arcilla en bolas, y prolongan la inyección de aire (1 h). Obtienen una escoria muy porosa que contiene nódulos y bolitas microscópicas de cobre. Partiendo de una carga con un contenido de 420 g de Cu, separan 117,3 g de metal de 565 g de escoria, lo que representa un rendimiento del 27,9%. También procesa minerales oxídicos procedentes de la escombrera de la mina de Lozoyuela (Bustarviejo, Madrid) (Rovira, 2011-2012). En esta ocasión las dos toberas tienen un orificio de 25 mm y la cubeta es de 30 cm de diámetro y 20 cm de profundidad. En los dos últimos intentos añade dos muretes de 30 cm de altura para instalar las toberas. Calienta la estructura (45 min) y después introduce cargas de mineral en fragmentos milimétricos (400 g en cada prueba) cada 15 min. Durante la inyección de aire (1 h 25 min) registra temperaturas de hasta 1200°C. Obtiene una torta de escoria en cuya superficie hay gotas de cobre. Todos los elementos que contiene el mineral se detectan en el metal. En la escoria aparece cobre metálico atrapado, delafosita, magnetita, cuarzo, mineral alterado y algo de fayalita.

Las dos últimas series tratan la obtención de aleaciones de Cu-Sn en la misma estructura de la serie anterior (Fig. 4) (Rovira, 2011-2012; Rovira *et al*, 2009). Primero efectúa una experiencia aislada de cementación. Introduce 300 g de cobre electrolítico en pequeños fragmentos en un crisol, junto con 30 g de casiterita (78,6% de Sn). Cuando el hogar de carbón en la cubeta alcanza los 900°C, coloca el crisol y lo cubre de brasas. Durante la operación alcanzan temperaturas de entre 1000 y 1200°C. A los 40 min, el metal llevaba en estado líquido hacía 10 min y se detiene el proceso. Obtiene un lingote irregular de bronce pobre sobre una cantidad de casiterita sin reaccionar. La parte superior del lingote tiene un 3,11% de Sn, mientras que la parte inferior en contacto con la casiterita presenta el 4,26%, pero en forma de agujas euhedrales de casiterita debido a un ambiente oxidante. Sugiere que el proceso debe prolongarse durante más tiempo removiendo el contenido del crisol. Por último, realizan una operación de co-reducción a partir de 1 kg de mineral oxídico de la mina de Lozoyuela (con el 25-30% de Cu) en fragmentos milimétricos, y 200 g de casiterita muy pura de Orense (Galicia). Tras un calentamiento (30 min), introducen cargas de carbón y mineral en el crisol (30 min más) y continúan insuflando aire (30 min). Se alcanza una temperatura de 1200°C y obtienen una



Figura 4. Imagen de la estructura utilizada por S. Rovira (Rovira *et al*, 2009).

masa de escoria con algunas gotas de metal de entre 1 y 20 mm. Reúnen 124 g de metal, lo que suponía el 27% de un máximo estimado de Cu y Sn en los minerales de 457 g. La escoria presenta una matriz de vidrio silicatado complejo donde se identifica wollastonita y piroxeno. Aparece malayaita como resultado de la reacción entre la casiterita y silicatos ricos en Ca. También ha sido detectado en escorias arqueológicas por lo que puede considerarse un estigma de la técnica de co-reducción. Algunas inclusiones metálicas no contienen nada de Sn, otras hasta el 80% y ninguna es de Sn puro. Finalmente, en un pequeño crisol funden un pequeño lingote de 53, 88 g a partir de 69 g de gotas de metal. El lingote presenta un color plateado debido al fenómeno de la segregación inversa, y contiene 79,4% de Cu, 15,7% de Sn y 2,81% de Bi.

J. Happ (1997) realiza una serie experimental sobre la metalurgia calcolítica con malaquita, azurita y olivenita procedentes de Río Tinto. Coloca una vasija de 30-35 cm de diámetro y 3 cm de altura en un sen-

cillo hogar sobre piedras. Únicamente con ayuda del viento, el mineral se reduce fácilmente alcanzando los 950°C. En otra ocasión, junto con **J. Briard** y otros autores (1998), realizan una serie experiencial realista sobre las evidencias del Calcolítico y del Bronce Antiguo de Portugal. Primero tuestan calcopirita de Neves Corvo (Aljustrel) (29,88% de Cu y 3% de As) en un hogar de carbón. Después mezclan el mineral tostado con cuarzo (50%) y dolomía (1-2%) y lo procesan en un horno con carbón aportando aire mediante fuelles conectados a toberas de arcilla. Obtienen fragmentos de escoria (13-30% de Cu) y de mata de cobre (75,4% de Cu y 0,5% de As) con algunas gotas metálicas. También realizan dos pruebas de cementación con casiterita (80% de Sn y 4% de As) procedente de la mina d'Argozelo (Vimosio) y virutas de cobre (97,5% de Cu y 2% de As). En el primer intento obtienen un lingote de bronce, y en el segundo, el metal resultante contiene un 85,1% de Cu, un 2% de Sn y un 10% de As. La aleación Cu-Sn no se produjo satisfactoriamente.

M. Hunt y otros autores (2001) realizan una experiencia aislada para evaluar los restos con un criterio tafonómico. Ponen en práctica una supuesta metalurgia especializada pero no establecen una comparación con un periodo concreto o con un yacimiento. Introducen 2200g malaquita asociada a cuarzo (20%) y 4400 g de óxido de hierro como fundente, ambos procedentes de la Sierra de Tejada, en el interior de un horno (30 cm de diámetro y 50 cm de profundidad) parcialmente excavado en el suelo y elaborado con piedras, fragmentos de ladrillo, barro y arcilla caolinizada. Utilizan dos fuelles tipo herrero unidos a dos toberas sin cocer con un orificio de 2 cm y colocadas a 40° de inclinación. Tras un calentamiento (1 h) a 1000°C, introducen cargas de los minerales en fragmentos menores a 1 cm cada 30 min. Durante la reducción (4 h) se alcanza una temperatura máxima de 1100°C. Dejan enfriar el horno varias horas y recuperan un total de 353,4 g de cobre metálico (el 30% del Cu estimado) y 2945 g de escoria.

E. Hanning dirige una serie de 17 pruebas sobre la metalurgia de Zambujal (Hanning *et al*, 2010). Se trata de una aproximación con cierto grado de realismo y un procedimiento experimental adecuado. Sin embargo, a tenor de los resultados, la fase experiencial de adquisición de habilidades debió haber sido más amplia. Los minerales (malaquita, cuprita, óxidos de hierro, sulfuros, cuarzo y otros) contienen entre el 20-60% de Cu y proceden de cinco áreas mineras (Mercês I, Mostadeira, Mocissos y Entre Aguas de la zona de Ossa Morena y Barrigão de la zona Surportuguesa). Utilizan recipientes cerámicos ovalados tipo crisol-lingotera, similares a los arqueológicos, que colocan en hogares con una piedra plana en la base y rodeados de piedras. En las primeras pruebas la estructura es de 70 cm de diámetro, y al final de la serie es de planta cuadrada de 25 cm de lado, ambas sin paralelos en el registro arqueológico. Insuflan aire mediante tubos de caña o bambú con boquillas de arcilla sin cocer que presentan orificios de 6 mm, y en ocasiones también utilizan una bomba de doble cilindro y 2,5 l de capacidad. En las cinco operaciones de reducción, una con cada tipo de mineral, proceden calentando la estructura y el crisol (más de 1 h), después introducen capas de entre 100 y 250 g de mineral en fragmentos inferiores a 5 mm, mezclado y cubierto con carbón. Realizan una fase sin insuflar (entre 20-76 min) para tostar los sulfuros que pudiera contener la carga, y después inyectan aire (entre 30 y 120 min). Con seis soploadores llegan a mantener temperaturas de entre 1000 y 1300°C durante 15 min (Fig. 5). El material resultante presenta una matriz silicatada que contiene abundante Ca, óxidos de hierro, mineral alterado y granos de cuarzo, además de inclusiones de cobre metálico con

algo de Fe y As. Los mejores resultados se obtienen con el mineral de Mocissos recuperando gotas metálicas de hasta 0,5 cm, y también con el mineral de Mercês I. Las cenizas han aportado a la escoria elementos como Ca, K, Mg, P y otros. No aparece fayalita de forma significativa.

Por último, un proyecto a largo plazo sobre la metalurgia calcolítica en la península ibérica ha sido realizado por **A. Obón y A. Berdejo** con una larga fase experiencial y una comparación realista con la metalurgia de Almizaraque (Almería) (Obón, 2017).

4.6. Islas Británicas

A.M. Pollard y otros autores (1991a y b) llevan a cabo dos series de pruebas en laboratorio sobre la primera técnica de reducción en estructuras simples y a baja temperatura. Las primeras operaciones son de co-reducción de olivenita y malaquita sintéticas. Introducen la mezcla con carbón en un crisol de vidrio que calientan en un horno eléctrico a temperaturas de entre 600 y 1000°C. La temperatura máxima que se alcanza en cada prueba se produce a los 10 min. Observan que a más de 950°C la carga se reduce rápidamente a metal. A temperaturas inferiores se produce una mayor volatilidad de As. El metal obtenido se funde en el horno a 1000°C y se forma bastante metal eutéctico (20%). Realizan pruebas con malaquita y olivenita (6%) de las minas de Wheal Edward (Cornualles, Inglaterra), que calientan entre 2 y 15 min a 850°C, y obtienen resultados similares. El cobre arsenical se produciría por la reducción de minerales de cobre secundarios asociados a arseniatos, ambos de color verde. En otra serie realizan operaciones de co-reducción de malaquita con Sb_2O_3 (entre el 1 y el 10%) y NiO (entre el 1 y el 10%) de las minas de Wheal Edward. Son procesadas de forma similar a unas temperaturas de entre 600-1100°C durante entre 30 y 120 min. Tanto As como Sb son reducidos fácilmente. Afirman que el porcentaje de As en los objetos del Bronce Inicial de las islas británicas es del 1-5%, únicamente posible con el uso de minerales secundarios en estructuras sencillas, ya que los fahlores o los sulfatos secundarios requieren 1300°C y a esa temperatura As y Sb se incorporan completamente.

H. Herdits y otros autores (1995) realizan una serie experiencias sobre la obtención de bronce mediante la técnica de cementación en una cubeta excavada (13 cm de diámetro y 5 cm de profundidad) forrada con caolín. Colocan una tobera con un orificio de 2 cm a 10° de inclinación. En la prueba con mejores resultados introducen 30 g casiterita tostada procedente de Cornualles (50% de Sn y 2-3% de estannita y calcopirita) y 147 g de cobre metálico procedente de una reducción de malaquita previa no descrita.



Figura 5. Imagen de la experimentación dirigida por E. Hanning (Hanning *et al*, 2010).

Durante 30 min, el hogar de carbón es avivado mediante un compresor, alcanzando una temperatura media de 1150°C. La masa fundida fue removida en varias ocasiones y obtienen 158 g de bronce (8,4% de Sn) y una pequeña cantidad de escoria vítrea. La pérdida de metal en las diversas pruebas estuvo entre el 3 y el 10%. En otra prueba de laboratorio introducen 12 g de concentrado de mineral de Sn tostado con 61,59 g de Cu en un crisol de porcelana y lo calientan en un horno eléctrico a 1300°C y ambiente oxidante durante 8 min. El tiempo fue insuficiente y recuperan 54,29 g de bronce (3,9% de Sn) y 17,54 g de escoria.

S. Timberlacke (2005: 198-216 y 2007: 32-34) efectúa dos series experimentales sobre la primera metalurgia del cobre con bastante realismo. Utiliza minerales y arcilla locales, y también elabora carbón a partir de leña local de varias especies (fresno, roble, castaño y aliso). El escaso metal obtenido indica que debería haber desarrollado una fase experiencial más amplia. En primer lugar, realiza siete intentos de reducción de azurita formada en lutitas y malaquita asociada a arenisca, procedentes ambas

de las minas prehistóricas de Engine Vein (Alderley Edge, Inglaterra). Reduce estos minerales a fragmentos milimétricos y forma bolas con polvo de carbón, serrín y estiércol. Somete las cargas de mineral de entre 60 y 810 g a temperaturas de 800-1100°C durante 1,5-2 h. Las cinco primeras pruebas tienen lugar en cubetas forradas de arcilla (35-40 cm de diámetro por 15 cm de altura) donde aporta aire con dos fuelles de 2-3 l de capacidad unidos a dos toberas con un orificio de 2 cm. Otra prueba tiene lugar en una estructura cuadrangular (15 cm de lado y 30-40 cm de altura) elaborada con bloques de arenisca y arcilla, y utilizan tres fuelles-vasija. En la última prueba inyecta aire mediante tubos de soplado a una estructura de 20 cm de diámetro y 10 cm de altura. Aunque en todos los intentos obtiene gotas metálicas, el mejor resultado es de tan solo el 5,7% del peso de la carga. La mayor parte del Cu estaba en forma de óxidos debido a que la reducción fue deficiente (Craddock *et al*, 2007). No se forma delafosita porque el mineral tenía poco Fe. En otra serie intenta obtener cobre en una sola operación a partir de calcopirita de Copa Hill (Cwmystwyth, Gales). Primero

utiliza un crisol en una cubeta pero solo obtiene un sulfuro de Cu y Fe, con algo de mata de cobre y bolitas de Cu microscópicas. Realiza otra prueba en una pequeña cubeta que simula las estructuras descubiertas en Ross Island (Irlanda). El mineral es tostado a 750°C (2,5 h) y después a una temperatura inferior (2 h). La reducción tiene lugar bajo un caramullo de carbón (2,25 h) donde insufla aire con dos fuelles unidos a una sola tobera. La temperatura media fue de 1180°C y la máxima de 1300°C. Obtienen unos pocos gramos de cobre rico en Fe a partir de 430 g de calcopirita. La mayor parte de los restos son mata de cobre y sulfuros de Fe y Cu.

M. Krismer y P. Tropper (2010) realizan tres experiencias de reducción de minerales de cobre y de estaño para comparar el uso de una estructura tipo chimenea con una simple cubeta. En dos pruebas utilizan exclusivamente casiterita, y en otra procesan malaquita procedente de África en una estructura excavada y forrada de arcilla (20 cm de diámetro y 80 cm de altura) con un recipiente en el fondo. En la parte inferior, colocan una tobera elaborada con arcilla de Londres, arena, estiércol de oveja y paja. Utilizan 4,5 kg de carbón como combustible y un único fuelle de forma triangular. A los 4 min del inicio de la prueba se alcanzan 1200°C. A continuación introducen 1 kg de malaquita en pequeños fragmentos en dos cargas de 500 g separadas por 20 min. La prueba tuvo una duración de 2 h y 36 min registrando una temperatura máxima de 1370°C. Recuperan una masa de 425 g de escoria. Las condiciones fueron poco reductoras porque la mayor parte de la escoria contiene cuprita y apenas cobre metálico. Afirman que la estructura pequeña es más eficiente para distribuir y alcanzar la temperatura y consume menos carbón.

D.A. y S.G. Chapman (2013) realizan una experiencia aislada con alto grado de realismo sobre la metalurgia del Bronce Final del yacimiento de Pentwyn (Great Orme, Gales), próximo a minas prehistóricas de carbonatos de cobre. En dicho yacimiento aparecen pequeños hoyos en el suelo con un anillo de barro endurecido por el fuego, asociados a gotas de cobre y fragmentos de escorias. Excavan pequeños agujeros (10 cm de diámetro y 11 cm de profundidad) y forman un anillo exterior con la tierra extraída donde encajan una tobera a 60° de inclinación. La tobera está unida con arcilla a una rama de sauco vaciada con un conducto interior de 15 mm. Sellan la pequeña cámara con una tapa formada por tierra vegetal con hierba. Calientan con ramas de abedul y añaden carbón (un total de 900 g) e introducen la malaquita a tamaño polvo con algo de carbón mojado y polvo. Colocan la cubierta e inyectan aire durante 90 min. El resultado es en gran parte mineral alterado y algunos granos de cobre adheridos a escoria.

4.7. Malaquita de Heligoland (Alemania)

W. Lorenzen (1965 y 1966) realiza una serie de operaciones de reducción de minerales oxídicos de cobre asociados a arenisca procedentes de la isla de Heligoland. Primero, efectúa pruebas de campo en una cubeta (70 cm de diámetro y 30-40 cm de profundidad) excavada en un pequeño montículo. Añade una tobera y dos muretes de barro de 1,5 m de longitud para aprovechar el viento. Tras un calentamiento (1 h), introduce el mineral en una vasija de barro poco cocida y añade cargas de carbón (4 h). Finalmente la cubeta se cubre con arena y se deja enfriar varias horas. La mayor parte del mineral se había reducido dando lugar a gotas de cobre de 1 cm, en parte atrapadas en la arenisca. En otros intentos en condiciones de poco viento no se alcanzó la temperatura adecuada y el mineral no se reduce completamente. En un intento con fuerte viento el mineral se transformó en fragmentos de escoria porosos con gotas de cobre atrapadas. Obtiene un buen rendimiento con un mineral pobre en cobre. La segunda serie de reducciones tiene lugar en un horno eléctrico para observar el proceso en condiciones controladas. Utiliza un recipiente de grafito de 2 l de capacidad donde calienta el mineral mezclado con carbón hasta alcanzar la temperatura determinada para cada prueba (1-2 h), y luego se mantiene a la misma temperatura (4 h) antes de dejarlo enfriar. Realiza tres pruebas en las que se alcanzan entre 1000 y 1300°C. A partir de 1000°C el mineral se reduce a cobre metálico. A mayor temperatura las partículas de cobre se compactan en pequeños glóbulos. A partir de 1150°C la arenisca funde en una escoria porosa y aumenta notablemente la cantidad de gotas de cobre (0,5-5 mm). A 1250°C hay una desgasificación general y las gotas de Cu empiezan a unirse en la parte inferior de la masa fundida. Hasta 1300°C algunos pequeños glóbulos de cobre todavía se mantenían en la escoria. Tres muestras son fundidas. Observa que tanto el mineral como el metal reducido y el fundido presentan los mismos elementos traza. A altas temperaturas solo continúan presentes Pb y As.

4.8. Rusia

B.A. Pazuchin (1964) lleva a cabo una serie de veinte pruebas en laboratorio sobre la producción intencional de cobre arsenicado mediante la co-reducción de minerales oxídicos de cobre con sulfuros de arsénico. Se trata de una experimentación rigurosa pero con una escasa adecuación a la tecnología prehistórica. Los minerales proceden del río Aldan (Sajá-Yakutia) y de Krasnoyarsk en Rusia, y de Svaneti (Georgia). En cada prueba, un crisol de grafito que contiene una mezcla con diferentes proporciones de cobre en polvo, óxido de cobre o malaquita, con oropi-

mente, tennantita, arsenopirita o estibina, es sometido a temperaturas de 1150-1200°C. Observa que la presencia de malaquita contribuye a la oxidación y eliminación del S en forma de SO_2 . En las pruebas con oro-pimente se produce abundante mata cobriza, y el metal presenta entre el 6 y el 19% de As. Con malaquita y tennantita llega a obtener el 2% de As y no se forma speiss. En las cuatro pruebas con arsenopirita, se producen pérdidas de As a partir de 550°C, con mayor intensidad cuando se calienta a 700°C. Con estibina y malaquita la aleación presenta el 6,9% de Sb, y con óxido de cobre presenta el 13%.

Décadas después, **S. Rovira** (1999) aborda una aproximación realista sobre las evidencias del yacimiento de Gorny (1700-1400 BC) (Kargaly, Orenburg) para comprobar el rendimiento de los carbonatos de cobre locales en dos tipos de estructuras. Tres pruebas tienen lugar en cubetas excavadas de 30, 20 y 15 cm de diámetro y 30, 20 y 15 cm de profundidad, respectivamente, con dos fuelles de cuero de 30 l de capacidad unidos a dos toberas de cerámica con un orificio de 10 mm. En otras dos pruebas utiliza dos hornos cilíndricos de 40 cm de profundidad elaborados con piedra arenisca y barro. Uno de los dos presenta 50 cm de diámetro y funciona mediante la corriente de aire natural que penetra por tres aberturas en su base. El otro horno tiene 40 cm de diámetro y recibe el aporte de aire de tres fuelles unidos a toberas con un orificio de 25 mm. Procede calentando la estructura (30 min) y después introduce varias cargas de carbón y de mineral en fragmentos de hasta 2-3 mm (entre 2 y 4 h). En las cinco pruebas obtienen tortas de una escoria ligera con gotas de cobre de hasta 3-4 mm, menos densas que las arqueológicas. En la prueba con el horno de 40 cm introducen 3 kg de mineral y un total de 6 kg de carbón. Obtienen 110 g de metal que representa un rendimiento del 53,1% con respecto al Cu que contenía el mineral (6,9%). El consumo de carbón fue de 13 kg, lo que supone 65 kg por 1 kg de metal. Estima que el conjunto de operaciones pueden ser ejecutadas por 2-3 personas en 8 h, y apunta que las estructuras sencillas son viables pero no necesariamente se aplicaría la cadena operativa planteada.

S. Grigoriev (2008, 2011 y 2015: 32-63) realiza una serie de 34 pruebas sobre la transformación de minerales en diferentes momentos de la Edad del Bronce en el sur de Rusia, entre Don y Altái. Procesa tanto minerales oxídicos como sulfuros procedentes de Kargaly e Ishkinino (Orenburg), de Tash-Tau, Nikolskoye y Dergamysh (Baskortostán), y de Turgoyak (Cheliabinsk). Previamente elabora carbón en una fosa excavada, y también crisoles y toberas a partir de arcilla y arena de cuarzo. En una serie simula los hornos con cúpula de la cultura Sintashta (2100-1700 cal BC), elaborados con bloques de arcilla o cantos de

granito, más arcilla y arena. Tienen y unas dimensiones de entre 40 y 70 cm de diámetro, inferiores a las arqueológicas, y están conectados a un pozo por un canal de ventilación. Inyecta aire mediante una pareja de fuelles y una tobera. Otra serie tiene lugar en una estructura con forma de cúpula pero sin pozo, de entre 25 y 55 cm de diámetro en la base y 35 cm de altura. Utiliza fuelles de gran tamaño con una palanca para incrementar la fuerza. En la mayor parte de las operaciones procesa malaquita con abundante ganga reducida a pequeños fragmentos (entre polvo y 5 cm) en el horno con o sin crisol, a veces junto a covellina. El calentamiento se ejecuta con leña (20 min) y para la reducción con carbón (2-4 h). Dejan enfriar la estructura varias horas. En muchas pruebas solo obtiene cuprita y escoria a pesar de las altas temperaturas alcanzadas (1200-1300°C y puntualmente hasta 1400°C). Trata de identificar estigmas en el material relacionados con el uso del crisol o de una estructura determinada o con el tipo de carbón. Observa abundantes óxidos (cuprita, magnetita y delafosita) que indican unas condiciones más oxidantes que en las escorias arqueológicas, las cuales son también más homogéneas. En algunas pruebas recupera algunas gotas metálicas que funde en un crisol a 1100-1200°C. Entre el mineral y el metal, disminuye considerablemente la concentración de As. También realiza algunas pruebas de tostación de calcopirita en ésta última estructura o en un hogar abierto con resultados dispares. No consigue eliminar todo el S.

D. Pitman y otros autores (2013) ejecutan varias pruebas de campo y de laboratorio sobre la transformación de calcopirita en recipientes cerámicos según los restos de Stepnoye, yacimiento perteneciente a la cultura de Sintashta. Plantean que pudo coexistir el uso de estructuras simples con otras complejas. Las series de pruebas de laboratorio se centran observar los efectos de diferentes desgrasantes que contienen los crisoles (talco, arena, carbón, serrín y estiércol de caballo) para contribuir a retener la escoria fundida. Mezclan cada desgrasante con arcilla y preparan bloques de 35x35 mm con una depresión en el centro de 10 mm de profundidad donde van a colocar carbón con 0,5 g de escoria arqueológica machacada. Introducen los bloques en un horno eléctrico durante 6 min a 1150°C. Se forman adherencias con todos los desgrasantes excepto con el talco, un mineral con propiedades refractarias. Las series de campo tienen lugar primero en una cerámica en el interior de una cubeta poco profunda (40-50 cm de diámetro), similar a las detectadas en los yacimientos de Arkaim y Sintashta. Utilizan una pareja de fuelles de 10 l unidos a una tobera de 20 mm de diámetro interno, y carbón de roble y de haya como combustible. Las pruebas tienen

una duración de 1 h. Registran temperaturas de entre 1000°C y 1250°C, pero solo consiguen mantenerlas con dos parejas de fuelles que aportan entre 150 y 200 l/min. En la quinta prueba la carga es de 200 g de cobre metálico y 300 g de escoria machacada procedente de experiencias previas. Tras un calentamiento de la estructura (30 min), añade cargas de cobre (cada 6 min) y cargas de carbón. Finalizada la prueba (2 h en total), recuperan un lingote y escoria. Por último, realizan una prueba con 120 g de calcopirita procedente de Cornualles (Inglaterra) con la intención de producir mata de cobre. Utilizan un crisol en forma de placa basado en un hallazgo del yacimiento de Ust'ye. Tras un largo calentamiento, inyectan aire (25 min) y obtienen escoria y mata de cobre fundida. Aumenta la concentración de Cu y disminuye la de S y Fe. La escoria presenta bastones de fayalita en una matriz vítrea y también granos de cuarzo.

4.9. Malaquita de Tonglūshan (China)

Los restos arqueometalúrgicos hallados en la mina de malaquita de Tonglūshan (Hubei), pertenecientes al período Primavera-Otoño (770-476 BC), motivaron a diversos autores a ejecutar una aproximación experimental cuyos resultados fueron traducidos del chino y resumidos con poco detalle (Wagner, 1986: 7). Elaboran dos hornos con arcilla y otros materiales. En la primera estructura, colocan una única tobera y el fuelle utilizado para la inyección de aire resultó insuficiente. La carga no descendió pero consiguen recuperar 2 kg de cobre metálico. El segundo horno (70x28 cm de planta y 150 cm de altura) presenta un canal de aireación en la parte inferior y una abertura para el sangrado de escoria (27x19 mm). Utilizan dos toberas de 5 cm de diámetro que aportan un caudal de 4,5-5 m³/min. La carga total fue de 100 kg de malaquita, 111 kg de cuarzo, 122 kg de arenisca y 731 kg de carbón, en 109 cargas (diez cada hora). La duración de la prueba fue de 10 h y 36 min. Es una experiencia única por las elevadas cantidades procesadas. Se produjeron catorce escorificaciones y dos sangrados de metal, recuperando 70 kg de cobre más 30 kg en la estructura. El mineral empleado contenía el 9% de Cu, el 23% de Fe y el 10% de SiO₂. El metal presentaba entre el 94 y el 97% de Cu acompañado por en torno al 3% de Fe, mientras que la escoria contenía muy poco Cu.

4.10. Sur de África

H.M. Friede y R.H. Steel (1975) realizan una aproximación experiencial a la metalurgia de Transvaal, Zimbabue y Zambia en los primeros siglos de nuestra era. Las cuestiones arqueológicas que abordan son demasiado amplias y diversas para una sola campaña de veinte pruebas de reducción. Utilizan malaquita

(17,5% de Cu) mezclada en algunas pruebas con azurita procedente de las minas de Nchanga (Zambia) en tres tipos de estructuras de combustión. El aire se insufla a través de fuelles de 5 l (60 a 90 l/min), o bien mediante un compresor (120 l/min), ambos unidos toberas de arcilla refractaria con un diámetro interno de entre 2,5 a 4 cm. Primero utilizan un horno Kaonde/Venda que consiste en un agujero (18 cm de diámetro y 3 cm de profundidad) con una chimenea (39 cm de altura) formada por tres anillos de cerámica. Colocan otro cilindro de 42 cm de altura y 26 cm diámetro y rellenan el espacio con material aislante. Durante la inyección introducen capas de mineral y carbón. A las 3 h aumentan la cadencia de insuflación y poco después dejan enfriar el horno. La torta de escoria resultante presentaba abundante óxido de cobre y también algunas gotas metálicas de hasta 5 mm. En otros intentos obtienen algo más de metal pero las diferencias son poco significativas. El cobre se recupera en otra operación a 1100°C con una adición de Si. La segunda estructura consiste en un agujero circular (20 cm de diámetro) forrado con arcilla y rodeado de piedras. Realizan una fundición de cobre procedente de las anteriores reducciones con carbón en un crisol cubierto con otro recipiente. Cuando el metal funde es removido con un palo verde para eliminar el oxígeno. Obtienen Cu con un 4,4 % de Fe, una composición similar a la de algunos objetos arqueológicos de Transvaal. Por último, simulan un horno de arcilla Uitkomst utilizando un montículo de termitas. Excavan la cámara del horno en forma de botella con una profundidad de 36 cm, y forran las paredes con arcilla. Se alcanzan 1200°C y obtienen una escoria con gotas de cobre que extraen y funden.

4.11. Perú

C.B. Donnan (1973) pone en práctica una operación sencilla y realista de obtención de lingotes de cobre a partir de cuprita y malaquita sobre la metalurgia de la cultura Moche del I milenio de nuestra era. Introduce los minerales en pequeños fragmentos y polvo en un crisol junto con carbón en polvo. Coloca el crisol cubierto por carbón en una estructura circular rodeada de ladrillos, la cual simula los adobes rectangulares de una escena de metalurgia representada en un cuenco de cerámica Moche. La inyección de aire se realiza mediante tubos de soplado. Cuando se alcanzan los 1300°C (15 min) trata de mantenerlos (1 h). Recupera una parte del metal rodeado por una capa de escoria. En tres pruebas utilizan cuprita muy pura y se forman lingotes de aspecto muy similar a los arqueológicos. En una de las pruebas el crisol es cubierto con una tapa y el lingote obtenido contiene menos Fe. Su composición (99% de Cu) se asemeja

más a los de la cultura Moche que los otros dos. En la cuarta prueba utilizan malaquita y obtienen un lingote con una composición similar a los Moche, pero más poroso y con formas más irregulares.

I. Shimada y J.F. Merkel realizan una aproximación experiencial sobre las evidencias de la región de Batán Grande pertenecientes a sicanes, chimúes e incas entre el 900 y el 1500 de nuestra era (Merkel y Shimada, 1988; Shimada y Merkel, 1991). Las operaciones son abordadas con cierto realismo utilizando materiales similares a los arqueológicos. Machacan óxido de cobre y hematites procedentes de la mina de Cerro Blanco y los mezclan a partes iguales. Utilizan cubetas de varios tamaños revestidas con arena, arcilla y piedras del lugar, y también una estructura chimú auténtica de 600 años de antigüedad en Cerro Huaringa. Después de un calentamiento de la estructura con carbón de algarrobo (30 min), introducen una carga de 100 g de la mezcla y comienzan a soplar mediante tubos con boquillas. Para mantener un caudal eficiente realizan relevos de 10 min en grupos de tres sopladores consiguiendo alcanzar 1200°C en casi todas las pruebas. Cuando se añaden cargas de combustible la temperatura desciende por debajo de 1100°C. Consumen 1 kg de carbón cada hora. En la prueba con el horno original introducen 900 g de carga e insuflan aire (3 h). La escoria resultante de 775 g fue machacada y recuperan 30 g de cobre metálico. La composición de los materiales es similar a los arqueológicos salvo por la baja presencia de As (1%) en el metal, a pesar de que se había concentrado con respecto al mineral. Calculan que cada operación precisa 4-5 personas trabajando entre 3 y 4 h. La producción máxima diaria por cada estructura sería de 5 kg de escoria con entre 0,3 a 0,6 kg de cobre recuperable.

H. Lechtman lleva a cabo otra serie experimental basada en los hallazgos de Batán Grande, esta vez sobre la co-reducción de minerales de Cu y As (Lechtman y Klein, 1999). El procedimiento experimental es riguroso pero el proceso técnico es poco realista. Reduce minerales de cobre (atacamita y paratacamita con algo de brochantita y azurita) y sulfuros con arsénico (enargita y arsenopirita), ambos procedentes de minas y depósitos de Perú, a fragmentos de 0,7-0,8 cm y los mezcla en diferentes proporciones (respectivamente 2:1, 3:1 o 4:1). Realiza doce pruebas en un bajo horno elaborado con arcilla, fragmentos de gres y arena, inyectando aire con un compresor que aporta 200-240 l/min a una tobera de cerámica refractaria de 1 cm de diámetro interno. En uno de los experimentos calienta la estructura (1 h) con 5,3 kg de carbón. Seguidamente introduce cargas de la mezcla (14 min) y continúa añadiendo carbón (4,2 kg más). Durante la reducción (51 min), registra temperaturas de hasta 1200°C. En otra

serie de ocho pruebas, procesan 500 g de la mezcla en un crisol de grafito y arcilla refractaria sobre una cama de coque de 15 cm en el interior de un horno (0,55 m de altura y 0,33 cm de diámetro). Cuando se alcanzan 700°C (25-30 min), tapa el crisol y comienza a inyectar aire alcanzando los 1050-1190°C en 5-7 min. Obtiene cobre arsenical en ambas estructuras, además de mata cobriza y escoria, y sugiere que la aleación es intencional. Con arsenopirita se produce una mayor concentración de As en el metal que con enargita. La impureza principal es Fe y también se forma algo de speiss.

5. Valoración final

La lista de trabajos mencionados no es extensa si consideramos que comprende investigaciones de todo el mundo durante más de un siglo, e indica claramente que el método experimental se ha aplicado de manera puntual. El número de países o de zonas que cuentan con estudios de este tipo es bajo. Dos de ellas, los Alpes y el Próximo Oriente, han sido objeto de un mayor número de investigaciones, mientras que el resto de países mencionados cuenta con escasos ejemplos.

Generalmente, la experimentación se ha utilizado para tratar de resolver cuestiones arqueológicas concretas. No necesariamente es un conocimiento acumulado, y muchas veces se obvia o se ignora la metodología y los resultados de trabajos anteriores, siendo la experiencia propia el punto de partida habitual. Este hecho nos permite disponer de diversas maneras de resolver problemáticas similares, siempre teniendo en cuenta la composición y las características de los minerales utilizados.

Predomina el uso de estructuras abiertas sobre los hornos o estructuras complejas, y hay un número ligeramente mayor de pruebas de reducción de minerales oxidicos sobre el procesado de sulfuros. Hay pocas operaciones de transformación de sulfuros en una sola operación. Algunas técnicas para la producción de aleaciones como la cementación han sido abordadas en pocas ocasiones, algunas más en el caso de la co-reducción. En cuanto a la inyección de aire predomina el uso de aparatos modernos, seguido de fuelles y en menor medida el uso del viento y la técnica del soplado. Muchos aspectos importantes, como la comparación de diferentes tipos de combustible (carbón, leña u otros), apenas han sido tratados. Finalmente, el número de experimentaciones al aire libre es mayor que las de laboratorio.

Las investigaciones descritas presentan diferencias en cuanto al procedimiento y los resultados obtenidos. Varios aspectos otorgan más valor a este tipo de trabajos como el rigor procedimental, la medición de las principales variables, la realización de adecuadas analíticas, los proyectos a largo plazo con una

fase experiencial amplia y la puesta en juego de una experimentación realista. También se puede incluir la correcta publicación de los resultados. Pocas experimentaciones tienen un alto grado de realismo consecuente con la tecnología que es objeto de estudio y hay una escasez de proyectos a medio y largo plazo. Para establecer una comparación válida entre el registro experimental y el arqueológico no es suficiente con la consecución de pruebas aisladas, o de los experimentos llamados *de fin de semana*, siendo necesarios proyectos experimentales más amplios en los que se puedan establecer análisis estadísticos a través de la arqueometría y la cuantificación (Malina, 1983: 76; Schiffer *et al*, 1994: 197-198; Shimada, 2005: 623-624). Dichos proyectos deben ceñirse a un problema arqueológico específico del cual se disponga información suficiente. Para ser abordados, es necesario la previa consecución de habilidades a través del ensayo-error en una completa fase experimental.

Mediante la experimentación realista o integral se pueden generar datos potencialmente contrastables a los arqueológicos, los cuales nunca serán absolutos pero sí válidos en términos de probabilidades. La obtención de resultados similares a los arqueológicos no demuestra la exclusividad del método y de las técnicas empleadas, pudiendo alcanzar resultados similares con un proceso distinto (Terradas y Clemente, 2001: 93). Para desarrollar una investigación de este tipo, entre otros requisitos, son necesarios la adquisición de un cierto grado de habilidad y la existencia de las evidencias minerales en el presente. Debe ser realizado usando la tecnología apropiada (Coles, 1979: 38) mediante una comprensión lo más completa posible de los restos arqueológicos y una interpretación de las técnicas metalúrgicas que se van a simular. Es interesante el uso de minerales de cobre que procedan de las mineralizaciones explotadas por los prehistóricos (Happ, 1998: 17). Este tipo de estudios pueden contribuir a obtener conclusiones más amplias y avanzar en el proceso de pulir la interpretación, mejorando con ello la comprensión del papel de la metalurgia en una determinada sociedad del pasado.

6. Bibliografía

- ALMEIDA, M. (2009): "Potencial de l'aproximació experimental en el marc de l'anàlisi espacial en Arqueologia i Prehistoria: entre crítica tafonòmica i interpretació paleoetnològica". *Cota Zero* 24, 49-59.
- AMBERT, P.; BOUGARIT, D.; MILLE, B.; CAROZZA, L. y HAPP, J. (1997): «Un nouveau point sur l'expérimentation métallurgique des cuivres gris du Midi de la France». *Archéologie en Languedoc* 21, 45-50.
- AMICK, D.S.; MAULDIN, R.P. y BINFORD, L.R. (1989): "The potential of experiments in lithic technology". En D.S. Amick y R.P. Mauldin (eds.): *Experiments in Lithic Technology*. BAR International Series 528. Oxford, 1-14.
- ANSTEE, J.W. (1966): "Copper smelting experiments". *Bulletin of the Historical Metallurgy Group* 1 (7), 3-12.
- ASCHER, R. (1961): "Experimental archaeology". *American Anthropologist* 63 (4), 793-816.
- BACHMANN, H.G. y ROTHENBERG, B. (1980): "Die Verhüttungsverfahren von Site 30". En H.G. Conrad y B. Rothenberg (eds.): *Antikes Kupfer im Timna-Tal. Der Anschnitt Beiheft* 1, 215-236.
- BAENA PREYSLER, J.; TORRES, C., PALOMO, A.; MOZOTA, M. y CLEMENTE, I. (2014): "EXPERIMENTAL Archaeology in Spain". En J. Reeves y R. Paardekooper (eds.): *Experiments past: Histories of Experimental Archaeology*. Sidestone Press. Leiden, 85-95.
- BAMBERGER, M. y WINCIERTZ, P. (1990): "Ancient smelting of oxide copper ore". En B. Rothenberg (ed.): *Researches in the Arabah 1959-1984, 2. The Ancient Metallurgy of Copper*. IAMS, 123-157.
- BÖHNE, C. (1968): "Über die Kupferverhüttung der Bronzezeit. Schmelzversuche mit Kupferkieserzen". *Archaeologia Austriaca* 44, 49-60.
- BOURGARIT, D.; MILLE, B.; BURENS, A. y CAROZZA, L. (2005): "Smelting of chalcopyrite during Chalcolithic times: some have done it in ceramic pots as vase-furnaces". En H. Kars y E. Burke (eds): *33rd International Symposium on Archaeometry (Amsterdam, 2002)*. Vrije Universiteit, 297-302.
- BRIARD, J. ; BOURHIS, J. R. ; HAPP, J. ; QUERRE, G. y VAN SCHOOR, M. (1998): "Paléoméallurgie du Portugal. Minerais, analyses et archéologie expérimentale". En M.C. Frere-Sautot (coord.): *Paléoméallurgie des cuivres. Colloque (Bourg-en-Bresse et Beaune)*. Monographies Instrumentum 5. Mergoil, 53-58.
- BRUNN, A. (1993): «Experiments on copper-smelting at Rocca San Silvestro». En R. Francovich (coord.): *Archaeologia delle attività estrattive e metallurgiche*. Universidad de Siena, 629-638.
- BURGER, E. (2008): «Métallurgie extractive protohistorique du cuivre: étude thermodynamique et cinétique des réactions chimiques de transformation de minerais de cuivre sulfurés en métal et caractérisation des procédés». Tesis doctoral. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.
- BURGER, E.; BOURGARIT, D.; WATTIAUX, A. y FIALIN, M. (2010): "The reconstruction of the first copper-smelting processes in Europe during the 4th and the 3rd mill BC: where does the oxygen come from?". *Applied Physics A* 100 (3), 713-724.
- CALLAHAN E. (1999): "What is Experimental Archaeology?". En D. Wescott (ed.): *Primitive technology, a book of earth skills*. Society of primitive technology. Gibbs-Smith Publisher. Salt Lake City, 4-6.
- CANEVA, C. y GIARDINO, C. (1996): "Extractive techniques and alloying in prehistoric central Anatolia: Experimental methods in Archeometallurgy". En Ş. Demirci *et al* (eds.): *Archaeometry 94. The Proceedings of the 29th International Symposium on Archaeometry (Ankara, 1994)*. Tübitak. Ankara, 451-459.
- CATAPOTIS, M.; PRYCE, O. y BASSIAKOS, Y. (2008): "Preliminary results from an experimental study of perforated copper-smelting shaft furnaces from Chrysokamino (Eastern Crete)". En I. Tzachili (ed.): *Aegean Metallurgy in the Bronze Age. Proceedings of an International Symposium held at the University of Crete, Rethymnon, Greece (2007)*. Ta Pragmata. Atenas, 113-121.
- CHAPMAN, D.A. y CHAPMAN, S.G. (2013): "Reconstructing and using the Pentwyn pit furnaces". Unpublished report. Ancient Arts, 2-24.

- COGHLAN, H.H. (1939): "Some Experiments on the origin of early copper". *Man* 39 (Jul.), 106-108.
- (1940): "Prehistoric copper and some experiments in smelting". *Transactions of the Newcomen Society* 20, 49-65.
- COLES, J. (1979): *Experimental Archaeology*. Academic Press. Londres.
- CRADDOCK, P.T. y MEEKS, N.D. (1987): "Iron in ancient copper". *Archaeometry* 29 (2), 187-204.
- CRADDOCK, P.T.; MEEKS, N.D. y TIMBERLAKE, S. (2007): "On the edge of success: the scientific examination of the products of the Early Mines Research Group Experiments". En S. La Niece et al (eds.): *Metals and Mines: Studies in Archaeometallurgy*. Archetype Publications. Londres, 37-45.
- CUSHING F.H. (1894): "Primitive copper working: an experimental study". *The American Anthropologist* 7 (1), 93-117.
- DONNAN, C.B. (1973): "A Precolumbian Smelter from Northern Peru". *Archaeology* 26 (4), 289-297.
- DOONAN, R.C.P. (1994): "Sweat, fire and brimstone: pre-treatment of copper ore and the effects on smelting techniques". *Historical Metallurgy* 28 (2), 84-97.
- FASNACHT, W. (1991): "Der prähistorische Bronzeguss im Experiment: Erfahrungen anlässlich der Ausstellung Pfahlbau Land". *Minaria Helvetica* 11a, 3-12.
- FASNACHT, W. (1995): "4000 Jahre Kupfer- und Bronzeguss im Experiment". *Experimentelle Archäologie in Deutschland, Bilanz 1994. Archaeologischen Mitteilungen aus Nordwestdeutschland, Beiheft 8*, 237-246.
- FASNACHT, W. (1999): "Experimentelle rekonstruktion des Gebrauchs von frühbronzezeitlichen Blasdösen aus der Schweiz: Kupferverhüttung und Bronzeguss". En A. Hauptmann et al (eds.): *International Symposium, The beginnings of Metallurgy (Bochum, 1995). Der Anschnitt Beiheft 9*, 291-294.
- FASNACHT, W. (2001): "Zehn Jahre Kupfer- und Bronzeguss im Experiment - oder die wiederholte Erfindung des Rades". *Zeitschrift für schweizerische Archäologie und Kunstgeschichte* 58 (1), 67-72.
- FASNACHT, W. (2009): "7000 years of trial and error in copper metallurgy - in one experimental life". En T. L. Kienlin y B. W. Roberts (eds.): *Metals and societies. Studies in honour of B.S. Ottaway*. Universitätsforschungen zur prähistorischen Archäologie 169. Bonn, 395-399.
- FRAME, L. (2004): "Investigations at Tal-i Iblis: evidence for copper smelting during the Chalcolithic period". Tesis doctoral. Massachusetts Institute of Technology.
- FRIEDE, H.M. y STEEL, R.H. (1975): "Notes on Iron Age copper-smelting technology in the Transvaal". *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* 76 (4), 221-231.
- GHAZNAVI, H.A. (1976) "Trace element partitioning in early copper smelting". Tesis doctoral. University of Newcastle.
- GOLDENBERG, G.; ANFINSET, N.; SILVESTRI, E.; BELGRADO, E.; HANNING, E.; KLAUNZER, M.; SCHNEIDER, P.; STAUDT, M. y TÖCHTERLE, U. (2011): "Das Nepal-Experiment-experimentelle Archäometallurgie mit ethnoarchäologischem Ansatz". En K. Oeggel et al (eds.): *Die Geschichte des Bergbaus in Tirol und seinen angrenzenden Gebieten. Proceedings Meeting des SFB-HiMAT (Mühlbach, 2010)*. Universität Innsbruck, 83-90.
- GOODWAY, M. (1991): "Archaeometallurgy: evidence of a paradigm shift?". En P.B. Vandiver et al (eds.): *Material Issues in Art and Archaeology II. MRS Symposium Proceedings* 185, 705-712.
- GOWLAND, W. (1912): "The metals in antiquity". *Journal of the Royal Anthropological Institute of Great Britain and Ireland* 42, 235-287.
- GREEN, J. (ed.) (1979): *Zuñi: Selected Writings of Frank Hamilton Cushing*. University of Nebraska Press. Lincoln y Londres.
- GRIGORIEV, S. (2008): "Experiments with ancient smelting process on the Turgoyak Lake". *Journal of Experimental Pyrotechnologies* 1, 33-36.
- (2011): "Experiments with ancient copper smelting technologies". En D. Gheorghiu G. Children (eds.): *Experiments with Past Materialities*. BAR International Series 2302, 55-65.
- (2015): *Metallurgical production in northern Eurasia in the Bronze Age*. Archaeopress. Oxford.
- HANNING, E. (2012): "Reconstructing Bronze Age Copper Smelting in the Alps: an ongoing process". *Experimentelle Archäologie in Europa - Bilanz 2012*, 75-86.
- HANNING, E.; GAUSS, R. y GOLDENBERG, G. (2010): "Metal for Zambujal: experimentally reconstructing a 5000-year-old technology". *Trabajos de Prehistoria* 67 (2), 287-304.
- HAPP, J. (1997): "Descobrir la metal-lurgia del coure a partir de l'experimentació". *Cota Zero* 13, 93-102.
- HAPP, J. (1998): "La découverte de la métallurgie du cuivre à travers l'expérimentation". En M.C. Frere-Sautot (coord.): *Paléoméallurgie des cuivres. Colloque (Bourg-en-Bresse et Beaune)*. Monographies Instrumentum 5. Mergoïl, 17-26.
- HAPP, J. (2002): "Etude expérimentale des procédés d'élaboration du cuivre aux époques protohistoriques". *Cu + 2*, 11-15.
- HAPP, J. (2005): "Comment j'ai enterré ma tuyère et mon soufflet à la Capitelle du Broum". *Cu + 4*, 29-31.
- HAPP, J.; AMBERT, P.; BOURHIS, J.R. y BRIARD, J. (1994): "Premiers essais de métallurgie expérimentale à l'Archéodrome de Beaune à partir de minerais chalcolithiques de Cabrières (Hérault)". *Bulletin de la Société Préhistorique Française* 91 (6), 429-434.
- HAPP, J.; BRIARD, J.; BOURHIS, J.R. y AMBERT, P. (1996): «Bilan des recherches en métallurgie expérimentale relatives à la production du cuivre au Chalcolithique et à l'âge du Bronze. En C. Mordant et al (eds.): *L'atelier de bronzier en Europe. Colloque International Bronze '96 (Neuchâtel y Dijon)*. Tomo II. CTHS. Paris, 83-92.
- HEEB, J. y OTTAWAY, B.S. (2014): "Experimental Archaeometallurgy". En B.W. Roberts y C.P. Thornton (eds.): *Archaeometallurgy in global perspective*. Springer. New York, 161-192.
- HERDITS, H. (1997): "Experimentalarchäologische Untersuchungen zur bronzezeitlichen Verhüttung sulfidischer Kupfererze". *Experimentelle Archäologie, Bilanz 1996. Archäologische Mitteilungen aus Nordwestdeutschland, Beiheft 18*, 21-31.
- HERDITS, H. y LÖCKER, K. (2004): "Eine bronzezeitliche Kupferhütte im Mitterberger Kupferkies-Revier (Salzburg). Ausgrabung und Rekonstruktion". *Alpenkupfer - Rame delle Alpi, Der Anschnitt Beiheft* 17. Bochum, 177-188, 2004.
- HERDITS, H.; KEEN, J. y STEINBERGER, M. (1995): "Wie kommt das Zinn in die Bronze? Ein Beitrag zur experimentellen Archäologie". *Archäologie Österreichs* 6 (1), 78-85.
- HUNT ORTIZ, M.A.; HURTADO PÉREZ, V.; GALLARDO FUENTES, J.M. y POLVORINOS DEL RÍO, A. (2001): "El valor de los ensayos experimentales para la interpretación de los restos arqueológicos prehistóricos." En B. Gómez Tubío et al (eds.): *Actas del III Congreso Nacional de Arqueometría (Sevilla, 1999)*, 533-541.
- JEFFERY, D. (2004): "Experiential and experimental archaeology with examples in iron processing". *IAMS* 24, 13-16.

- KAHLIL, L.A. y BACHMANN, H.G. (1981): "Evidence of copper smelting in Bronze Age Jericho". *Historical Metallurgy* 15 (2), 103-106.
- KÖLSCHBACH, S. (2000): *Experimente zur Simulation prähistorischer Kupfergewinnung: Zur Verfahrenstechnik von Windöfen*. Shaker. Aachen.
- KRISMER, M. y TROPPEL, P. (2010): "Mineralogy meets archaeology: Experimental archaeometallurgy of Bronze Age Sn and Cu smelting" *Mitteilungen der Österreichische Mineralogische Gesellschaft* 156, 115-128.
- LAMMERS-KEIJERS, Y.M.J. (2005): "Scientific experiments: a possibility? Presenting a general cyclical script for experiments in archaeology". *EuroREA, Journal for (Re) construction and Experiment in Archaeology* 2, 18-24.
- LECHTMAN, H. y KLEIN, S. (1999): "The production of copper-arsenic alloys (arsenic bronze) by cosmelting: modern experiment, ancient practice". *Journal of Archaeological Science* 26, 497-526.
- LORENZEN, W. (1965): *Helgoland und das früheste Kupfer des Nordens*. Ottendorfer Verlagsdruckerei. Otterndorf.
- LORENZEN, W. (1966): "Notes concerning copper smelting". *Bulletin of the Historical Metallurgy* 7 (1), 13-21.
- LORSCHNEIDER, F.; MAASS, A. y STEININGER, D. (2003): "Frühe Kupferproduktion-archäologischer Befund und Experiment: Versuche zur Fahlerzverhüttung in einem einzigen Ofengang". En T. Stöllner *et al* (eds.): *Man and mining. Der Anschnitt Beiheft* 16. Bochum, 301-307.
- MALINA, J. (1983): "Archaeology and experiment". *Norwegian Archaeological Review* 16 (2), 69-78.
- MATHIEU, J.R. (2002): "Introduction". En J.R. Mathieu (ed.): *Experimental archaeology. Replicating past objects, behaviours, and processes*. BAR International Series 1035, 1-12.
- MERKEL, J.F. (1982): "Reconstruction of Bronze Age copper smelting. Experiments based on archeological evidence from Timna, Israel". Tesis doctoral. University of London.
- MERKEL, J.F. (1983): "Summary of experimental results for Late Bronze Age copper smelting and refining". *Masca* 2 (6), 173-178.
- MERKEL, J.F. (1990): "Experimental reconstruction of Bronze Age copper smelting based on archaeological evidence from Timna". En B. Rothenberg (ed.): *Researches in the Arabah 1959-1984, 2. The Ancient Metallurgy of Copper*. IAMS. Londres, 78-122.
- MERKEL J.F. y SHIMADA, I. (1988): "Investigation of prehistoric copper smelting at Batán Grande, Perú". *IAMS Newsletter* 12, 4-7
- MONTERO RUIZ, I.; CACHO, C.; GALÁN, E.; GARCÍA-VUELTA, O. y MURILLO-BARROSO, M. (2012): "Luis Siret: arqueólogo experimental". En Junta de Andalucía (ed.): *Memorial Luis Siret. I Congreso de Prehistoria de Andalucía*, 529-532.
- MORGADO, A. y BAENA PREYSLER, J. (2011): "Experimentación, Arqueología experimental y experiencia del pasado en la Arqueología actual". En A. Morgado *et al* (eds.): *La investigación experimental aplicada a la arqueología*. Ronda, Málaga, 21-28.
- MORENO JIMÉNEZ, F.; SÁNCHEZ ELENA, M.; TERROBA VALADEZ, J.; AFONSO MARRERO, J.A.; MARTÍNEZ FERNÁNDEZ, G.; MORGADO RODRÍGUEZ, A. y MORENO GONZÁLEZ, J.C. (2007): "Un proyecto integral de Arqueología Experimental: el poblado de la Algaba (Ronda, Málaga)". En M. Ramos *et al* (coords.): *Arqueología experimental en la Península Ibérica investigación, didáctica y patrimonio*. Asociación Española de Arqueología Experimental. Santander, 37-44.
- NEUNINGER, H.; PREUSCHEN, E. y PITTIONI, R. (1970): "Versuch einer Fahlerzverhüttung nach dem alten Arbeitsgang auf der Insel Luzon". *Archaeologia Austriaca* 47, 87-90.
- OBÓN ZÚÑIGA, A. (2017): "Los inicios de la obtención de cobre en el suroeste europeo. Aproximación experimental a la metalurgia de Almería (Almería)". Tesis doctoral inédita. Universidad de Zaragoza.
- OUTRAM, A.K. (2008): "Introduction to experimental archaeology". *World Archaeology* 40 (1), 1-6.
- PAZUCHIN, V.A. (1964): "O proischozhenii drevnej myš'jakovistoj medi (on the origin of ancient copper containing arsenic)". *Izvestija Akademii Nauk SSSR-Metallurgija i Gornoe Delo* 1, 151-165.
- PIJOAN LÓPEZ, J. (2001): "Experimentación en Arqueología: reflexiones para una propuesta operativa y explicativa". *RAMPAS* 4, 91-114.
- PITMAN, D.; DOONAN, R.C.P.; HANKS, B.; ZDANOVICH, D.; KUPRIYANOVA, E.; VAN BREMPT, L. y MONTGOMERY, D. (2013): "Exploring metallurgy at Stepnoye: The role of ceramics in the matte conversion process". En D. Dungworth y R.C.P. Doonan (eds.): *Accidental and experimental Archaeometallurgy. Historical Metallurgy Society Occasional Publication* 7, 153-160.
- PLEINER, B. (1967): "Preliminary evaluation of the 1966 metallurgical investigations in Iran". En J.R. Caldwell (ed.): *Investigations at Tal-I-Iblis. ISM Preliminary Reports* 9, 340-405.
- PLOQUIN, A.; HAPP, J.; BARGE, H. y GUEDON, J.L. 1998: "Expérimentation sur la bornite de Saint-Véran (Hautes-Alpes)". En M.C. Frere-Sautot (coord.): *Paléoméallurgie des cuivres. Colloque (Bourg-en-Bresse et Beaune). Monographies Instrumentum* 5, 37-44.
- POLLARD A.M.; THOMAS R.G. y WILLIAMS P.A. (1991a): "Some experiments concerning the smelting of arsenical copper". En P. Budd *et al* (eds.): *Archaeological Sciences 1989: Proc. conf. on the application of scientific tech. to Archaeo. (Bradford, 1989)*. Oxbow Monograph 9, 169-174.
- POLLARD A.M.; THOMAS, R.G.; WARE, D.P. y WILLIAMS, P.A. (1991b): "Experimental smelting of secondary copper minerals: Implications for Early Bronze Age Metallurgy in Britain". En E. Pernicka y G.A. Wagner (eds.): *Archaeometry '90: 27th International Symposium on Archaeometry (Heidelberg, 1990)*, 127-136.
- PRYCE, T.O.; BASSIAKOS, Y.; CATAPOTIS, M. Y DOONAN, R.C. (2007): "'De Caerimoniae' Technological choices in copper-smelting furnace design at Early Bronze Age Chrysokamino, Crete". *Archaeometry* 49 (3), 543-557.
- REYNOLDS, P.J. (1999): "The nature of experiment in Archaeology". En A. F. Harding (Ed.): *Experiment and design: Archaeological studies in honour of J. Coles*, 156-162.
- ROSTOKER, W. (1975): "Some experiments in prehistoric copper smelting". *Paléorient* 3, 311-315.
- ROSTOKER, W. y DVORAK, J.R. (1991): "Some experiments with co-smelting to copper alloys". *Archaeomaterials* 5, 5-20.
- ROSTOKER, W.; PIGOTT, V.C. y DVORAK, J.R. (1989): "Direct reduction to copper metal by oxide-sulfide mineral interaction". *Archeomaterials* 3, 69-87.
- ROVIRA, S. (1989): "Arqueología y Arqueometalurgia". *Boletín de la Asociación Española de Amigos de la Arqueología* 27, 45-50.
- ROVIRA, S. (1999): "Una propuesta metodológica para el estudio de la metalurgia prehistórica: el caso de Gorny en la región de Kargaly (Orenburg, Rusia)". *Trabajos de Prehistoria* 56(2), 85-113.
- ROVIRA, S. (2003): "Resultado de un primer experimento de fundición de minerales de cobre en el arqueódromo de

- Borgoña". En J. Fernández Manzano y J.I. Herrán (coords.): *Mineros y fundidores en el inicio de la edad de los metales: el Midi Francés y la Península Ibérica*. MIC, 74-81.
- ROVIRA, S. (2003-2004): "La metalurgia prehistórica de la Península Ibérica en los tiempos de las grandes sepulturas colectivas". *Boletín de la Asociación Española de Amigos de la Arqueología* 43, 151-167.
- (2011-2012): "Arqueometalurgia experimental en el departamento de Prehistoria y Arqueología de la UAM". *Cu-PAUAM* 37-38, 105-120.
- ROVIRA, S. y GUTIÉRREZ, A. (2003): "Toro 2001: crónica de un proceso de fundición experimental de minerales de cobre" En J. Fernández Manzano y J.I. Herrán (coords.): *Mineros y fundidores en el inicio de la edad de los metales: el Midi Francés y la Península Ibérica*. MIC, 70-74.
- ROVIRA, S. y GUTIÉRREZ, A. (2005): "Utilisation expérimentale d'un four primitif pour fondre du minerai de cuivre". En P. Ambert y J. Vaquer (eds.): *La première métallurgie en France et dans les pays limitrophes. Mémoire de la Société préhistorique française* 37, 241-246.
- ROVIRA, S.; MONTERO RUIZ, I. y RENZI, M. (2009): "Experimental co-smelting to copper-tin alloys". En T. L. Kienlin y B. W. Roberts (eds.): *Metals and societies. Studies in honour of B.S. Ottaway*. Universitätsforschungen zur prähistorischen Archäologie 169, 407-414.
- SCHIFFER, M.B.; SKIBO, J.M.; BOELKE, T.C.; NEUPERT, M.A. y ARONSON, M. (1994): "New perspectives on Experimental Archaeology: Surface treatments and thermal response of the clay cooking pot". *American Antiquity* 59 (2), 197-217.
- SHALEV, S.; HAPP J. y FRERE-SAUTOT M.C. (2003): "How could have the chalcolithic people from southern Israel produced their copper tools, more than six thousand years ago?". *Cu + 3*, 5.
- SHIMADA, I. (2005): "Experimental Archaeology". En H.D.G. Maschner y C. Chippindale (eds.): *Handbook of Archaeological methods (I)*, 603-642.
- SHIMADA, I. y MERKEL J.F. (1991): "Metalurgia de aleaciones de cobre en el Perú antiguo". *Investigación y Ciencia* 180 (Sept.), 60-67.
- SILVESTRI, E.; BELLINTANI, P.; MOTTES, E. y NICOLIS, F. (2014): "Evidence of mining without mines: smelting activity during the Bronze Age in Trentino". En J. Silvertant (ed.): *Research and preservation of ancient mining areas. 9th International Symposium on archaeological mining history (Trento, 2014)*, 88-103.
- STEINBERG, A. y KOUCKY, F. (1974): "Preliminary metallurgical research on the ancient cyprriot copper industry". *American Expedition to Idalion, Cyprus. Bulletin of the American Schools of Oriental Research. Supplementary Studies* 18,148-178.
- TERRADAS, X. y CLEMENTE, I. (2001): "La experimentación como método de investigación científica: aplicación a la tecnología lítica". En L. Bourguignon *et al* (dirs.): *Préhistoire et approche expérimentale*, 89-94.
- TIMBERLACKE, S. (2005): "The experimental smelting of copper carbonate ores from Engine Vein, Alderley Edge". En S. Timberlake y A.J.N.W. Prag (eds.): *The archaeology of Alderley Edge*. BAR British Series 396, 198-216.
- TIMBERLACKE, S. (2007): "The use of experimental archaeology/archaeometallurgy for the understanding and reconstruction of Early Bronze Age mining and smelting technologies". En S. La Niece *et al* (eds.): *Metals and Mines: Studies in Archaeometallurgy*, 27-36.
- TYLECOTE, R.F. (1974): "Can copper be smelted in a crucible?". *Historical Metallurgy* 8 (1), 54.
- TYLECOTE, R.F. (1980): "Summary of results of experimental work in early copper smelting". En W.A. Oddy (ed.): *Aspects of early metallurgy. British Museum Occasional Paper* 17, 5-13.
- TYLECOTE R. F. y BOYDELL, P.J. (1978): "Experiments on copper smelting based on early furnaces found at Timna". En B. Rothenberg (ed.): *Chalcolithic Copper Smelting: Excavation and Experiments. Archaeo-Metallurgy IAMS Monograph* 1, 27-49.
- TYLECOTE R.F. y MERKEL, J.F. (1985): "Experimental smelting techniques: achievements and future". En P. Craddock y M.J. Hughes (eds.): *Furnaces and smelting technology in Antiquity. British Museum Occasional Paper* 48, 3- 20.
- TYLECOTE, R.F.; GHAZNAVI, H.A. y BOYDELL, P.J. (1977): "Partitioning of trace elements between the ores, fluxes, slags and metal during the smelting of copper". *Journal of Archaeological Science* 4 (4), 305-333.
- VILA, A. y ESTÉVEZ, J. (1999): "Etnoarqueología como experimentación". En L. Mameli y J. Pijoan (eds.): *Reunión de Experimentación en Arqueología. Treballs d'Arqueologia n° especial*. UAB. Bellaterra.
- WAGNER, D.B. (1986): "Ancient Chinese copper smelting, sixth century BC: Recent excavation and simulation experiments". *Historical Metallurgy Society* 20 (1), 1-16.
- WOELK, G.; GELHOIT, P. y BUNK, W. (1998): "Reconstruction and operation of a Bronze Age copper-reduction furnace". En T. Rehren *et al* (eds.): *Metallurgica Antiqua, in honour of H.G. Bachmann and R. Maddin. Der Anschnitt Beiheft* 8, 263-277.
- ZWICKER, U. (1980): "Investigations on the extractive metallurgy of Cu/Sb/As ore and excavated smelting products from Norsun-Tepe (Keban) on the upper Euphrates (3500-2800 BC)". En W.A. Oddy (éd.): *Aspects of Early Metallurgy. British Museum Occasional Paper* 17, 13-26.
- ZWICKER, U. y GOUDARZLOO, F. (1979): "Investigation on the distribution of metallic elements in copper slag, copper matte and copper and comparison with samples from prehistoric smelting places". En I. Scollar: *Proceedings of the 18th international symposium on archaeometry and archaeological prospection (Bonn, 1978)*. Archaeo-Physika 10, 360-375.
- ZWICKER, U.; VIRDIS, P. y CERUTI, M.L. (1980): "Investigations on copper ore, prehistoric copper slag and copper ingots from Sardinia". En P. Craddock (ed.): *Scientific studies in early mining and extractive metallurgy. British Museum Occasional Papers* 20, 135-163.
- ZWICKER, U.; GREINER, H.; HOFMANN, K.H. y REITHINGER, M. (1985): "Smelting, refining and alloying of copper and copper alloys in crucible furnaces during Prehistoric up to Roman times". En P. Craddock y M.J. Hughes (eds.): *Furnaces and smelting technology in Antiquity. British Museum Occasional Paper* 48, 103-115.