

KOBIE SERIE ANEJO, nº 13: 39-58
Bizkaiko Foru Aldundia-Diputación Foral de Bizkaia
Bilbao - 2014
ISSN 0214-7971
Web <http://www.bizkaia.eus/kobie>

LA PRODUCCIÓN DE HIERRO ENTRE LOS PUEBLOS IBÉRICOS SEPTENTRIONALES. EXPERIMENTACIONES Y PRIMEROS RESULTADOS

*Iron production among the Iberian northern peoples.
Experimentations and first results*

José Miguel Gallego Cañamero¹

Palabras clave: Armamento ibérico. Arqueología experimental. Hierro. Hornos de reducción.

Hitz gakoak: Arkeologia esperimentalak. Armak Iberiar. Burdina. Murrizketa labeak.

Keywords: Bloomery furnaces. Experimental Archaeology. Iberian weaponry. Iron.

RESUMEN

Se realiza una pormenorizada descripción de varias experimentaciones llevadas a cabo en bajos hornos de reducción directa, implementando en el discurso detalles sobre los procesos periféricos que definen la cadena siderúrgica de los pueblos ibéricos al norte del Ebro entre los ss. IV y II a. C., e incidiendo en las leyes físicas que definen la dinámica de las estructuras. Finalmente, se exponen una serie de deducciones preliminares a tenor de las experimentaciones en el campo a la espera de nuevos resultados microscópicos y de rayos- X adicionales.

LABURPENA

Zuzeneko erredukzio-labe baxuetan garatutako hainbat esperimentazioen deskribapen xehakatur egin da, K.a. IV. eta II. mendeen artean Ebro iparraldeko herri iberiarretan izandako kate siderurgikoa definitzen duten prozesu periferikoei buruzko xehetasunak diskurtsoan inplementatuz. Amaitzeko, eta emaitza mikroskopiko berrien eta X-izpien emaitzen itxaroan, arloan egindako esperimentazioen gaineko atariko ondorio batzuk ageri dira.

1 ARTIFEX, conservación y recreación del patrimonio arqueológico, C/ Jansana, 19, bajos 1ª, 08902, L'Hospitalet de Llobregat, Barcelona (artifex.crpa@artifexcrpa.com)

SUMMARY

We perform a detailed description of several experiments carried out in bloomery furnaces, implementing the details of the peripheral speech processes that define the iron chain of the Iberian peoples to the North of the Ebro river, between 4th to 2nd cent. BCE. and affecting the physical laws that define the dynamics of the structures. Finally, some preliminary deductions are discussed under the light of the field experiments waiting for additional new results from microscopic X-rays analytical.

1. INTRODUCCIÓN.

1.1. Planteamiento científico.

En el año 1997 vieron la luz editorial dos trabajos que ampliaban notablemente el panorama tradicionalmente establecido sobre las fases de la cadena siderúrgica durante la Protohistoria de la Península Ibérica y sobre el armamento prerromano de la Península Ibérica. Por un lado, la memoria de excavación del excepcional yacimiento ibérico de Les Guàrdies (El Vendrell, Tarragona), un núcleo rural ibero- cosetano que se dedicó, entre los ss. IV y II a. C., a la explotación intensiva de mineral de hierro y a su transformación en metal, tal como testimoniaban las evidencias arqueológicas exhumadas y que aún hoy en día sigue siendo un unicum en el mundo ibérico y celtibérico (Morer y Rigo 1997). Por el otro, un excelente e innovador análisis que enfocaba el armamento ibérico y celtibérico desde un punto de vista tipológico, geográfico, funcional y simbólico, obra del profesor Fernando Quesada, donde recogía prácticamente todas las armas documentadas en los yacimientos pre-romanos hasta el momento, que sentó un hito a nivel académico. Hoy en día, diecisiete años después, continúa siendo un referente ineludible para los investigadores sobre las panoplias pre-romanas de la Península Ibérica (Quesada 1997). Ambas obras ejercieron un potente impulso sobre nuestra propia orientación arqueológica y científica que, en el año 2009, maduró y tomó forma de un proyecto denominado “De la mina a la fragua. La siderurgia en el mundo ibérico” (Gallego 2013) cuyo objetivo era revisar, estudiar y reproducir integralmente el proceso de elaboración de armas de hierro durante la Protohistoria de la Península Ibérica, desde la extracción del mineral en minas a cielo abierto hasta los trabajos de forja, y complementar así el marco teórico planteado en los trabajos mencionados y en otros que incidían, en mayor o menor medida, en determinados aspectos de la siderurgia o de las armas de hierro ibéricas y celtibéricas (Madroneiro 1989; Quesada 1997; Morer y Rigo 1999; Lorrio *et al.* 1999; Burillo y Rovira, 2005; Molist *et al.* 2005; Rovira, 2000 y 2012; Rovira *et al.* 2012; García, 2006; Fabré *et al.*, 2012 entre muchos otros), incluyendo en el catálogo de datos a tener en cuenta las referencias en los autores clásicos (Polibio, Diodoro, Filón o Marcial). Este proyecto, que aún sigue en desarrollo, tiene un carácter totalmente autofinanciado desde el ámbito empresarial y privado y ya ha ofrecido interesantes resultados, aunque desgraciadamente, existen ciertas limitaciones propias a la hora de someter los resultados a analíticas microscópicas que están ralentizando el desarrollo de la investigación. El material obtenido en prácticamente todos los hornos está todavía pendiente de análisis y estudio.

A pesar de que inicialmente el principal objeto de estudio eran las armas férricas (ofensivas y defensi-

vas) sensu stricto y su empleo táctico, era obvio que no podíamos desarrollar este trabajo experimental sin abarcar los procesos previos, entre los que destacaba necesariamente la producción de hierro en bajos hornos de reducción directa y el posterior trabajo en la fragua. A nuestro juicio, no es correcto establecer e implementar un marco teórico derivado de la experimentación, con hipotéticas proyecciones en el terreno social político y económico de los pueblos ibéricos y celtibéricos, cuando los resultados emanan de la utilización de elementos actuales como materias primas adquiridas, materiales, herramientas, maquinaria y técnicas modernas. En este sentido, nuestra propuesta se ciñe, por tanto, a las directrices de la arqueología experimental más rigurosa establecida con claridad hace ya algunos años (Reynolds 1988; Andrieux 2004, detallado también en Gallego, 2014).

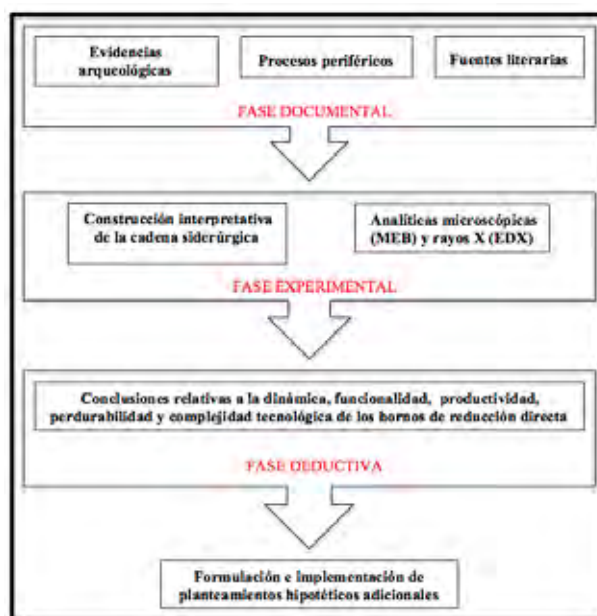


Figura 1. Esquema del planteamiento teórico del proyecto de siderurgia experimental “De la mina a la fragua. La siderurgia en el mundo ibérico”.

En el desarrollo de este proyecto experimental se ha seguido un planteamiento empírico estructurado en tres fases (fig. 1). Como es obvio, este proyecto debía empezar por una exhaustiva recolección de evidencias arqueológicas lo que nos permitiría, por un lado, disponer de material con el que elaborar futuros planes de trabajo y, por el otro, de información relativa a cada etapa del proceso siderúrgico, incluyendo los procesos periféricos (elaboración de carbón, extracción y enriquecimiento de mineral, reducción directa, trabajos de fragua, etc.) lo que nos permitiría centrarnos en una u otra en función de la propia evolución de la investigación. Paralelamente, contamos con abundantes descripciones sobre la siderurgia pre-romana de la Península Ibérica (Polibio de Filón de Bizancio o Marcial de Babilis...) que nos proporcionan una serie de datos e indicios alternativos sobre la metalurgia antigua que no debemos menospreciar en lo que a su valor paleo- etno-

gráfico se refiere y que aportan información adicional sobre la siderurgia protohistórica, en este caso, de primera mano. Las construcciones interpretativas de modelos experimentales fruto de esta estructuración basada en la suma de evidencias arqueológicas directas e indirectas y de las referencias en la literatura greco-romana, además de la implementación en el discurso de los procesos periféricos, pueden ofrecer un panorama alternativo de alto valor científico.

Posteriormente, y dentro del marco teórico que planteamos, los datos obtenidos serán contrastados mediante el análisis con microscopio electrónico de barrido (MEB/ SEM) y con el analizador por dispersión de energía de rayos X (EDM). La transformación en la fragua de las esponjas ferríferas experimentalmente obtenidas constituirá otro eslabón en esta cadena empírica que permitirá su comparación con metales antiguos ayudando, quizá, a definir parámetros de fabricación, temperaturas alcanzadas y materias primas. Su ulterior cotejo con objetos de hierro arqueológicos y escorias férreas procedentes de algunos yacimientos ibéricos con los que intentar establecer cánones relativos a la procedencia de la materia prima, a los materiales y técnicas empleados durante la elaboración del hierro, así como a la temperatura alcanzada y toda la información adicional que pudiera ofrecernos la microscopía y que pudiéramos finalmente emplear para desarrollar nuestro estudio experimental es también una etapa contemplada. Finalmente, este corpus documental, servirá para ampliar el horizonte teórico, y plantear nuevas hipótesis referentes a la tecnología de la cadena siderúrgica, a los procesos periféricos (que en su momento serán asumidos también objetos centrales de estudio), a la fabricación de armas y ulterior trascendencia en el terreno militar, social, económico y político de los pueblos ibéricos y celtibéricos.

2. EXPERIMENTACIONES.

Hasta la fecha de redacción de estas líneas, hemos construido y experimentado con ocho hornos de reducción directa de diferentes tipologías, alternando el sistema de inducción (el aire es introducido de forma manual en el interior del horno), el sistema de tiro natural (el aire es absorbido de forma automática por el propio horno) y el sistema híbrido (el aire entra al horno primero mediante el sistema natural y posteriormente mediante el sistema de inducción).

Nos aproximaremos en este artículo a las peculiaridades arquitectónicas de los hornos, a los detalles del proceso de reducción directa de cada uno de ellos y en la exposición de las leyes físicas que definen la funcionalidad de estos tipos de estructuras de combustión que son las que determinan, en última instancia y a nuestro juicio, su capacidad productiva y, por tanto, su emplazamiento en las proximidades de las zonas de captación de las materias primas y su perduración a lo

largo del tiempo como elementos de generación de riqueza y como uno de los motores económicos de la Antigüedad (Cardona 1999; Gallego Op. cit., 57). Finalmente, llevaremos a cabo una detallada presentación de un proyecto de siderurgia experimental desarrollado en la Ciutadella Ibèrica de Calafell en el que se reconstruyó la cadena siderúrgica integral documentada en el yacimiento ibero-cosetano de Les Guàrdies, al menos entre los ss. IV y II a. C.

Todos los hornos fueron construidos empleando materiales y técnicas que han podido ser testimoniados en el registro arqueológico. Como se ha mencionado en las líneas superiores, en ningún caso recurrimos a elementos actuales. De la misma forma, en la interpretación arquitectónica de los mismos nos basamos, fundamentalmente, en las evidencias exhumadas en el yacimiento ibérico de Les Guàrdies. En todos ellos, excepto en PRELU, se empleó carbón, principalmente de olivo (*Olea Europaea*) y acebuche (*Olea Europaea Sylvestris*) además de pino blanco (*Pinus Halepensis*) y eventualmente encina (*Quercus Ilex*) generado por nosotros mismos en estructuras negativas excavadas en el geológico.

2.1. Los hornos de reducción directa.

La primera tentativa en nuestra aproximación a la siderurgia pre-romana de la Península Ibérica fue PRELU, un horno con pozo simple para escorias que no llegó nunca a ser encendido experimentalmente. Nuestra nula experiencia fáctica en la materia más allá de la recogida de datos bibliográficos (Sarabia 1994; Boonstra *et al.* 1997; Decombeix *et al.* 2001; Leroy y Merluzzo 2004) y la observación de experimentaciones llevadas a cabo por otros investigadores (Burillo y Rovira, 2005) limitó considerablemente la ejecución del proceso reductivo que finalmente fue abortado. Paredes demasiado finas, un diámetro interno de cubeta demasiado amplio y una altura de chimenea insuficiente fueron factores determinantes para ello. No obstante, con este horno comprendimos detalles que en un proceso de reducción adecuado constituyen la diferencia entre el éxito y el fracaso, o dicho de otra forma, aprendimos lo que “no” hay que hacer. Efectivamente, y como hemos podido comprobar en posteriores reducciones experimentales, unas paredes poco gruesas son garantía de una considerable merma de la temperatura que, incluso en varias decenas de grados centígrados, representan la incapacidad para alcanzar el índice térmico adecuado para una reducción exitosa. Además, es probable la aparición de grietas y fisuras por las que puede perderse aún más calor y poner en serio peligro la integridad estructural. Lo mismo ocurre con el volumen del horno que en este caso era, a todas luces, excesivo para la chimenea que se construyó. Como ya concluíamos en un trabajo anterior (para este aspecto ver Gallego, 2014), a mayor volumen, mayor dificultad para conseguir un incremento térmico mediante el sistema de inducción;



Figura 2. Secuencia constructiva del horno PRELU

requerirá, por tanto, de una chimenea de gran altura para conseguir el “efecto chimenea” adecuado. PRELU era demasiado voluminoso y demasiado bajo. (fig. 2)

El siguiente horno, LU, fue construido y encendido en la localidad de Ainet de Besan (Lleida), durante una exhibición pública en el marco de las 1es Jornades de Recerca i Desenvolupament de la Vall Ferrera² organizadas en colaboración entre el Parc Natural de l’Alt Pirineu y l’Ecomuseu de les Valls d’Àneu durante el año 2010. Concebido para funcionar mediante el sistema de inducción, estuvo en funcionamiento durante aproximadamente doce horas, aunque antes de culminar el proceso reductivo un problema técnico con los

² Traducción: “1as Jornades de Investigación y Desarrollo de la Vall Ferrera”

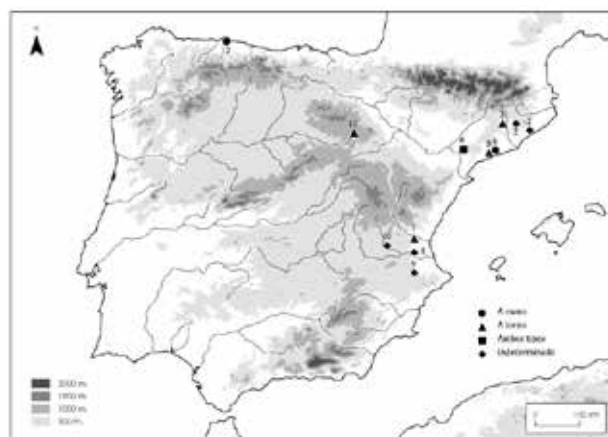


Figura 3. Distribución geográfica de las piezas de insuflación bífidas de “tipo ibérico” en la Península Ibérica. Actualización de las piezas mencionadas en Gallego (en prensa). 1: Turó dels Encantats (Mataró, Barcelona); 2: Camp de les Lloses (Tona, Barcelona); 3: Oliu (Sant Esteve d’Oliu, Barcelona); 4: Olèrdola (Sant Miquel d’Olèrdola, Barcelona); 5: Mas d’en Gual (El Vendrell, Tarragona); 6: Castellet de Banyoles (Tivissa, Tarragona); 7: Tossal de Sant Miquel (Lliria, Valencia); 8: Muela de Arriba y El Zoquete (Requena, Valencia); 9: La Bastida de les Alcusses (Mogente, Valencia); 10: Cerro San Cristóbal (Sinarcas, Valencia); 11: Numancia (Garray, Soria); 12: Campa Torres (Gijón, Asturias).

fuelles impidió el correcto desarrollo de la experiencia. Cabe mencionar que en este horno se empleó por primera vez una pieza de insuflación bífida o de “tipo ibérico” (según la definición propuesta en Molist *et al.*, 2005) para introducir aire mecánicamente en el interior del horno mediante sendos fuelles “de plato” inspirados en modelos africanos³, de 6l. de capacidad cada uno. Este tipo de toberas ha podido ser documentado en diversos yacimientos protohistóricos entre el s. IV y el s. II a. C.⁴ (fig. 3) generalmente asociados a posibles fraguas y, probablemente responden, partiendo de una hipótesis que ya planteábamos en un anterior trabajo (Gallego 2013 y posteriormente desarrollada en Gallego 2014: 53- 57), a los trabajos de post-reducción realizados con la ayuda de fuelles manuales, dado que según hemos podido constatar en diversas experimentaciones, esta pieza constituye una óptima válvula reguladora. Efectivamente, con insuflaciones en alternancia, siempre hay una corriente de aire en dirección al interior del horno, impidiendo así la absorción de aire caliente y brasas desde la cubeta de combustión. La entrada de aire se realizó desde uno de los laterales del horno, con la pieza bífida insertada en otra tobera cilíndrica que se introdujo 20 cm. en el interior de la cubeta con unos 30° de inclinación sobre la horizontal, a unos 30 cm. de altura, tomando como

³ La ausencia de información en el registro arqueológico acerca de los tipos de fuelles empleados en la Protohistoria de la Península Ibérica ha impulsado a los arqueólogos a buscar referentes etnográficos, generalmente inspirados en modelos africanos.

⁴ La aparente concentración de estas piezas en el levante (Valencia y Cataluña) responde, probablemente, a un mayor grado de actividad arqueológica y no representa una realidad histórica. El futuro desarrollo de trabajos arqueológicos en otras zonas contribuirá con nuevos hallazgos al respecto.



Figura 4. Horno LU

referencia la superficie externa. El horno fue construido con una argamasa elaborada a partir de tierra de procedencia local, con un alto contenido en nódulos graníticos de diversas medidas, fibras vegetales de trigo (*Triticum dicocum*). Tanto la superficie interna como externa del horno fue recubierta con una capa de argamasa refractaria elaborada con arcilla local depurada mediante flotación (80%), estiércol de asno (*Equus africanus asinus*) (10%) y cenizas de pino rojo (*Pinus sylvestris*) extraídas de la hoguera en la que se tostó el mineral. Éste fue extraído directamente de las zonas de extracción minera del Pic de la Màniga (2.514 msnm.) donde se ha documentado explotación de óxidos e hidróxidos de hierro desde época romana hasta época reciente (Forés *et al.* 2003). (fig. 4)

La fractura, como enunciábamos anteriormente, de uno de los fuelles “de plato” después de varias horas

de trabajo, representó el punto y final de la experimentación y puso de manifiesto los inconvenientes de llevar a cabo experimentaciones en público, con un horario programado.

El siguiente horno fue ELSEKON, proyectado para funcionar mediante el sistema de inducción manual. Su diseño repetía prácticamente el del horno descrito anteriormente, con medidas similares tanto para el alzado, como para el diámetro como para el grosor de las paredes tanto de la cubeta de combustión como de la chimenea. Sin embargo, en este caso, el emplazamiento y la morfología de las toberas así como la tipología de fuelles fueron objeto de una modificación sustancial. Por un lado, se sustituyó la tobera de “tipo ibérico” por dos de “tipo cilíndrico” de sección en “D”, inspiradas en las documentadas en el yacimiento fenicio de La Fonteta (Guardamar de Segura, Alicante) (Renzi 2007) y en el yacimiento ibérico de la Torre dels Encantats (Arenys de Mar, Barcelona) (Garcès 2013), que fueron dispuestas en lados opuestos de la estructura (E- O), equidistantemente y con una inclinación de 30°. Por otro lado, los fuelles empleados eran del tipo “acordeón”, de 8 l. de capacidad cada uno. Desgraciadamente, la ausencia de válvulas de regulación, la reducida longitud de las toberas cilíndricas y la proximidad de los fuelles al horno provocaron la entrada de aire caliente en el interior de los fuelles que progresivamente incrementaron su temperatura hasta que finalmente, no se pudo evitar la absorción de brasas y su parcial ignición, resultando en la inutilización de los mismos. Este fenómeno de succión confirmó la hipótesis sobre la necesidad de emplear un sistema de insuflación por turnos fijado a una pieza bífida de “tipo ibérico” citada anteriormente. En este sentido, cabe mencionar que otros ejemplos desarrollados experimentalmente en Europa han recurrido a sistemas similares a las piezas bífidas, como en el caso de Lercoul (Dubois 2000) o a sistemas alternativos para impedir la succión, como la colocación de una válvula metálica en el interior de la tobera cilíndrica (Boonstra *et al.* 1997). (fig. 5)

Tomando como referencia documental los restos de un posible horno de reducción directa testimoniado en el yacimiento de Les Guàrdies (El Vendrell, Tarragona), concretamente la estructura UE- 7235 datada en el s. II a. C., planificamos ELTERKER, el primer horno de reducción directa de “tiro natural” construido experimentalmente en la Península Ibérica, sin paralelos en la bibliografía específica. Las razones para inclinarnos por este modelo y sus especificaciones estructurales ya fueron extensamente definidas, por lo que no redundaremos aquí en la misma idea, aunque cabe señalar que su altura final quedó en 1’80 m. con una cubeta de 0’8 m. y una chimenea de 0’25 m. de diámetro interno, siguiendo una relación diámetro/ altura que ya revisábamos (Gallego, 2014). Cabe señalar que para esta experimentación, disponíamos ya de un termopar 14- S- I- 6- IRA- 300 (90% platino, 10% rodio recubierto de porcelana refractaria) de la marca TC medida y control de



Figura 5. Horno ELSEKON

temperatura, S. A. capaz de registrar temperaturas de hasta 1300 °C conectado a un data logger modelo YC-747UD de la marca YCT. Como hemos podido comprobar en experimentaciones posteriores, su ubicación en el interior del horno puede definirse como determinante a la hora de captar correctamente el incremento térmico y es necesario ubicarlo en las proximidades de las zonas de entrada de aire, de mayor incidencia térmica. En esta ocasión, registró un techo térmico de 1017

°C, aunque podemos afirmar que fue mucho mayor⁵. Después de tres horas en precalentamiento con llama viva generada con la cremación de madera seca de pino blanco (*Pinus Halepensis*) durante las cuales se alcan-

⁵ El análisis preliminar de una muestra del producto ha constatado un alto contenido en Wustita (FeO) dendrítica que apunta, por un lado, a que la temperatura en el interior del horno llegó a superar los 1350 °C, temperatura de fusión este óxido y por el otro, a un escaso rendimiento dado la alta presencia de hierro en la matriz escoriácea.



Figura 6. Horno ELTERKER



Figura 7. Horno ELKINKE

zaron temperaturas de 800° C, el proceso de reducción se prolongó de forma ininterrumpida durante poco más de cincuenta horas, periodo en el que se consumieron 100 kg. de carbón de olivo (*Olea Europaea*) y acebuche (*Olea Europaea Sylvestris*) y 31'5 kg. de mineral (limonita) que no había sido previamente deshidratado. Una muestra del material esponjoso obtenido fue sometido a observación en el microscopio electrónico de barrido (SEM) y a la dispersión de energía mediante Rayos- X (EDX), tras observarse una importante presencia de núcleos férricos en su matriz escoriácea, con la intención de comenzar la génesis de un canon susceptible de ser cotejado con piezas férricas originales. Los resultados permanecen aún pendientes de estudio y publicación aunque esperamos poder presentarlos en breve (fig. 6).

Dado que la reducción experimental en ELTERKER y su apertura no provocaron un excesivo deterioro estructural del horno, optamos por reconstruirlo e implementar algunas modificaciones que afectaron principalmente a su altura (se elevó la chimenea 20 cm., quedando en 2 m.) y a la entrada de aire (se incrementó el número de toberas de 13 a 15). Así, el horno ELKINKE disponía de un número mayor de toberas cilíndricas para compensar el mayor grado de succión que, hipotéticamente, debería experimentar como consecuencia del incremento de la altura, siguiendo principios físicos que también describíamos en un trabajo anterior (Gallego, 2014: 47- 52). El registro térmico se documentó con el mismo termopar y el mismo data logger empleados en la experiencia anterior y la lectura alcanzó los 1097 °C, en la misma ubicación. En este caso, y a diferencia de la experimentación anterior, el mineral fue previamente deshidratado mediante combustión directa durante varias horas, perdiendo algo menos del 10% de su peso (de 110 a 100 kg.) y frag-

mentándolo a mano posteriormente en nódulos de unos 1'5 cm. de diámetro aproximadamente. Casi tres horas de precalentamiento con madera seca de pino blanco (*Pinus Halepensis*) precedieron a un proceso reductivo que se prolongó continuamente durante 88 horas y en el que se consumieron 85 kg. de carbón de olivo (*Olea Europaea*) exclusivamente. (fig. 7)

2.2. Reproduciendo la cadena siderúrgica de Les Guàrdies (el Vendrell, Tarragona) (s. IV al II a. C.).

En colaboración con la Ciutadella Ibèrica de Calafell, OpenArch y Exarc, en mayo de 2014 iniciamos el desarrollo de un proyecto pionero en la Península Ibérica cuyo objetivo era interpretar experimentalmente la cadena siderúrgica ibero- cosetana a partir de las evidencias exhumadas en el yacimiento de Les Guàrdies (El Vendrell, Tarragona), anteriormente citado. Esta propuesta, denominada “From evidences to facts. Iberian bloomery chain under an experimental perspective.” contemplaba la construcción de dos hornos de reducción directa como objetos centrales de estudio, aunque también preveía la implementación de procesos periféricos como el carboneo o los trabajos de post- reducción y forja. El proyecto recibió el aval científico y académico del Departament de Prehistòria, Història Antiga i Arqueologia, del Departament de Didàctica de les Ciències Socials, ambos de la Universitat de Barcelona, así como del Institut Català d'Arqueologia Clàssica (ICAC).

La profusión de evidencias en el registro arqueológico de este yacimiento tarraconense (en este caso, datos arqueológicos directos), único en su género en la

Península Ibérica⁶, ofrecía la posibilidad de estudiar e interpretar en profundidad cada paso de la cadena ibero- cosetana de la siderurgia durante los ss. IV y II a. C. Disponíamos para ello de abundante información, como diapositivas, plantas y secciones arqueológicas, memorias de análisis mineralógicos o de análisis microscópicos de algunas escorias y piezas férricas allí encontradas (Simon *et al.* 2005). Sin embargo, y a pesar de la enorme cantidad de datos disponibles, existían ciertas lagunas que hubo que suplir recurriendo a otros yacimientos arqueológicos (datos arqueológicos indirectos). En este caso, debemos mencionar que esta recolección se efectuó siempre acudiendo a contextos geográficos y cronológicos lo más próximos posibles a la localización geográfica y al periodo cronológico que nos ocupaba.

En total, se reprodujeron cuatro estructuras: la UE-7020 (una posible fragua, s. III a. C.), la UE-7022 (una estructura de combustión para el enriquecimiento del mineral y posible carbonera, s. III a. C.), la UE-7235 (un posible horno, s. II a. C.) y la UE-7438 (otro posible horno, s. IV a. C.); además se reprodujo la UE-7425, una concavidad en conexión con la UE-7020, que se asoció a la ubicación de la pieza de insuflación o tobera.

Las fases iniciales de la cadena estaban evidenciadas con las minas a cielo abierto testimoniadas en Les Guàrdies (UE-7072 y UE-7083). Se trataba de estructuras excavadas en el geológico con la intención de llegar a una profundidad suficiente para acceder al filón mineralógico. El examen macroscópico del material geológico depositado en los fondos de la delegación territorial de Girona del Servei de Paleontologia i Arqueologia de la Generalitat de Catalunya permitió comprobar que el mineral allí explotado se encontraba en forma de nódulos irregulares compuestos por limonita. Paralelamente, este mineral aparecía también en disposición laminar horizontal. Según pudimos testimoniar en un afloramiento de la misma veta localizado en la vecina localidad de Calafell (Tarragona), se trataba de formaciones geológicas por filtración y deposición del Pleistoceno⁷ (entre 2'5 mill. y 10.000 años). Fue en este afloramiento donde se extrajo manualmente el mineral imitando el trabajo que pudo haberse realizado en las minas a cielo abierto de Les Guàrdies. En total, y después de seguir la veta hasta un pliegue geológico que se introducía en la tierra y hacía imposible su continuidad, cinco personas pudieron recolectar 41 kg. de mineral en unas cuatro horas, es decir, una ratio de

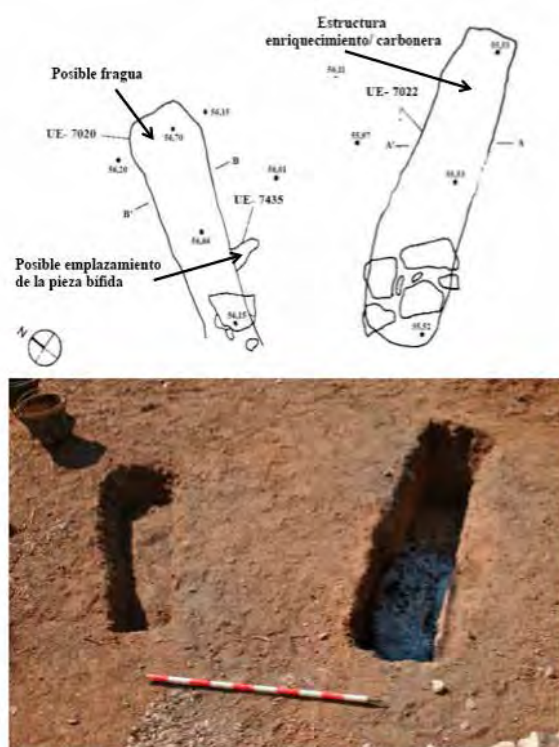


Figura 8. Planta y sección del posible horno de reducción UE-7235 y su interpretación experimental.

2kg./ persona/ hora. Si tenemos en cuenta la baja productividad de los hornos de reducción protohistóricos (Boonstra *et al.* 1997; Dubois 2000; Gallego 2014) entenderemos fácilmente que con esta cantidad de mineral, aún menor después de su deshidratación como veremos en líneas posteriores, la cantidad de hierro que se puede obtener es prácticamente insignificante. O nula.

El primer horno correspondiente a las evidencias arqueológicas directas construido fue ELBUIITE, inspirado en la UE-7235 (fig. 8), fechada en la fase de finales del s. III o principios del s. II a. C. Esta estructura, excavada en niveles del s. III a. C., presentaba un alto grado de deterioro como resultado de los trabajos agrícolas que se habían desarrollado en el terreno durante décadas, hasta el punto que sólo pudo recuperarse el fondo de la cubeta, conteniendo dos niveles⁸, y restos de la pared fornaria. De ello se desprende, primero, que fue utilizada como estructura de combustión y, segundo, que la cubeta fue en gran parte construida por encima del nivel de circulación. El diámetro interno conservado presentaba 90 cm. de diámetro, lo que implicaba, una altura mínima de 1'8 m. si obedecemos a las hipótesis sobre la ratio diámetro/ altura que lanzábamos en nuestro anterior trabajo (Gallego, Ib. 49- 50), aunque nosotros la hicimos alcanzar 2 m.

6 Trabajos arqueológicos en el asentamiento ibérico, romano y medieval de La Codina (Olius, Barcelona) han evidenciado la presencia de un asentamiento que podría constituir un paralelo de Les Guàrdies. No obstante, la ausencia de algunos procesos relativos a la cadena siderúrgica y la destrucción de parte de los niveles ibéricos como resultado de la pervivencia de la ocupación hasta la Edad Media impide una lectura total.

7 Según las cartas geológicas del Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC)

8 El superior (UE-7234) de composición arcillosa y el inferior (UE-7253) con un alto contenido en cenizas y carbones de acebuche (*Olea Europaea Sylvestris*).

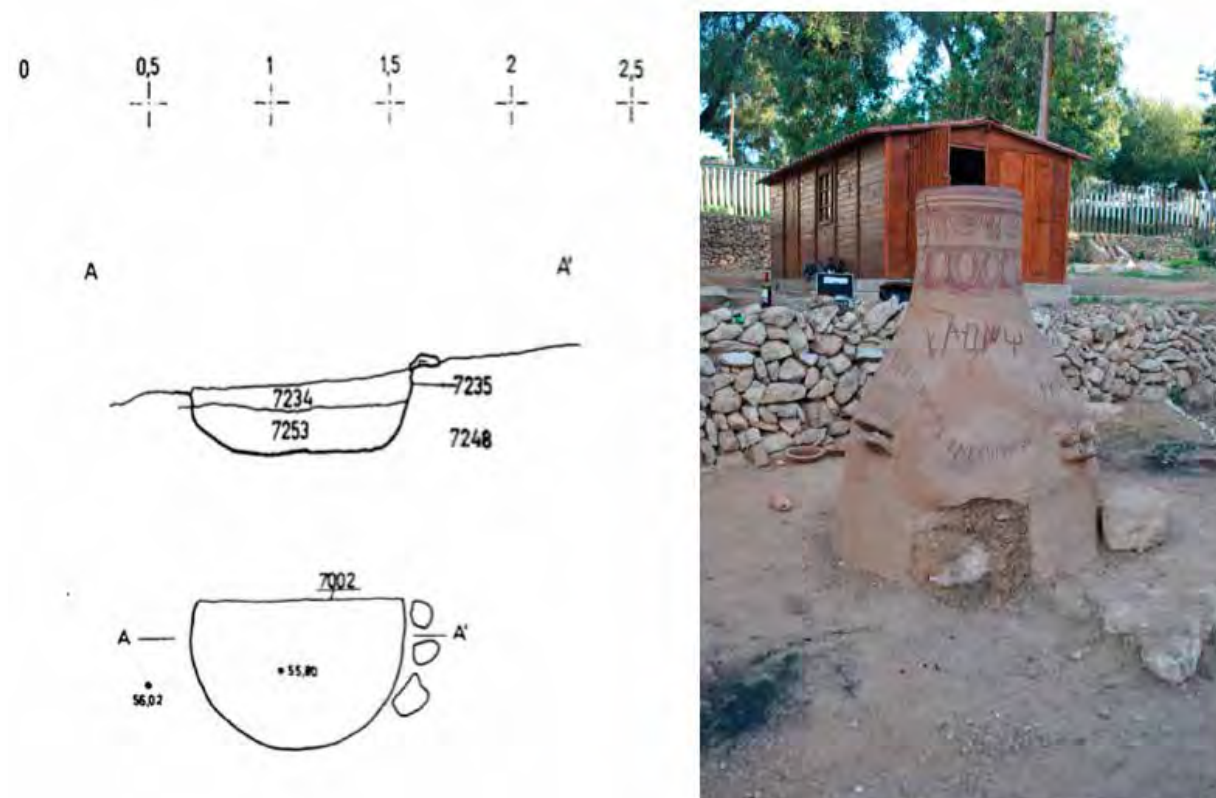


Figura 9. Planta y sección del posible horno de reducción 7438 y su interpretación experimental.

El volumen total del horno superaba los 430 l. No obstante, la experimentación con este horno demostró que esta premisa era insuficiente, por lo que la ratio debe ser aún mayor. Con esa altura construida, el diámetro interno de la chimenea quedó en 25 cm. La diferencia de diámetro entre la cubeta y la chimenea favorece y explica la aceleración de los gases ascendentes siguiendo el Principio de Continuidad de los fluidos de la Dinámica de Fluidos⁹, fenómeno que combinado con otros factores, favorece a su vez el incremento térmico.

Para este horno de tiro natural se recogieron manualmente 100 kg. de mineral procedente de la mina de Rocabrúna (Gavà, Barcelona), ubicada en una zona en la que se ha podido evidenciar explotación durante época ibérica (Álvarez y Estrada 2009), dada la imposibilidad de continuar extrayendo de la veta localizada en Calafell. Para la deshidratación del mineral (proceso periférico que comúnmente aparece referenciado en la bibliografía como “enriquecimiento”) se construyó (o mejor dicho, se excavó) una estructura inspirada en la UE- 7022 de Les Guàrdies. La naturaleza de la estructura combinada con el hecho de que apareció colmatada de un estrato repleto de

cenizas, carbones y fragmentos de mineral tostado (UE- 7414) además de presentar unas paredes fuertemente termo- alteradas hizo pensar a sus excavadores que debía tratarse de un lugar en el que se sometía el mineral a altas temperaturas (Morer *et al.* 1997; Morer y Rigo 1999 y 2003). Una vez deshidratada, esta cantidad quedó reducida a 85 kg. que fueron picados manualmente hasta una medida aproximada de 1 cm. Como combustible, se emplearon 269 kg. de carbón de olivo (*Olea Europaea*) y de encina (*Quercus Ilex*) en una proporción de 45% y 55% respectivamente, a partir de la combustión en una carbonera aérea¹⁰ tradicional de casi 3000 kg. de madera seca, parte de la cual sería empleada más tarde en el horno ELNOBE. La densidad de ambas maderas, consideradas como pesadas en la escala de la dureza de las maderas, es similar (entre 0,85- 1,10 kg/ dm³ y 0,95- 1,20 kg/ dm³ respectivamente) así como sus propiedades caloríficas (16.720 kj/ kg. del olivo/ acebuche por los 12.920 kj/ kg. de la encina).

⁹ Establecido mediante la siguiente fórmula: $A1 \cdot V1 = A2 \cdot V2$ (donde A= Área de la sección transversal del conducto y V= Velocidad del fluido que atraviesa el conducto).

¹⁰ Ignoramos todavía el aspecto de las carboneras durante la protohistoria de la Península Ibérica, razón por la cual recurrimos a la construcción y cremación de una carbonera aérea, siguiendo la tradición aún viva de la zona del Montseny, que, en cualquier caso, siempre producirá combustible vegetal sin las intrusiones de elementos caloríficos tan habituales en el carbón disponible en centros comerciales.

El proceso reductivo, iniciado después de un precalentamiento de cuatro horas con madera seca de pino blanco (*Pinus Halepensis*) durante el cual se superaron los 850 ° C, se prolongó durante 82 horas de forma ininterrumpida. A lo largo del mismo, la temperatura alcanzó los 1283 °C según el registro captado mediante una pistola termográfica de la marca Testo Termografía, modelo 835- T2. Dieciséis toberas cilíndricas, inspiradas en las halladas en el yacimiento fenicio de la Fonteta (Renzi 2007) y en el yacimiento ibérico de la Torre dels Encantats (Garcès 2013) y similares a las que ya habíamos empleado en otros hornos experimentales (vid. supr. fig. 6) fueron emplazadas a una distancia equidistante entre ellas, en grupos de cuatro, con aproximadamente 25° de inclinación respecto a la horizontal, entrando entre 12 y 15 cm. en el interior del horno, a una altura de 30 a 45 cm. respecto al fondo de la cubeta.

A continuación, construimos el horno ELNOBE, inspirado en la UE- 7438 de Les Guàrdies fechada en el s. IV a. C (fig. 9). En este caso, se trataba de una estructura excavada en el geológico cálcico que presentaba un sesgo antrópico en uno de sus laterales, alterando el aspecto de la cubeta original. Probablemente se trataba de un horno del tipo con pozo para escorias o “slag pit furnace” según la bibliografía sajona (Cleere 1972), que había perdido completamente cualquier resto relativo a su alzado aéreo. Su diámetro interno era de 0’65 cm. y los niveles que lo amortizaban se encontraban compuestos por tierra oscura (UE- 7439, nivel superior) y por carbones (UE- 7440, nivel inferior). Un detalle que aparece reflejado en la memoria de excavación es que “[...] la part del fons en què es trobaven els carbons no es trobava cremada, mentre que sí ho estaven les parets laterals del mateix des d’aquell nivel cap amunt”¹¹ (Morer y Rigo 1997), dato que es totalmente coherente con los resultados de las experimentaciones; efectivamente, en la base del horno se acumulan las cenizas y carbones del combustible empleado durante el precalentamiento, dando lugar a un potente manto que “protege” las paredes de las altas temperaturas que, además, tiene una mayor incidencia a medida que asciende hacia y por la chimenea. Creemos que la UE 7440 refleja claramente este fenómeno.

Con estas dimensiones mucho más modestas, de las que se desprendía un volumen notablemente menor (140 l.), nos planteamos la posibilidad de que se tratara de un horno de inducción asistida. La relación existente entre el volumen del horno y la tipología de entrada de aire responde a un teórico principio de rentabilidad en términos productivos que ya fue expuesto (Gallego en prensa). Por tanto, aplicando la misma premisa sobre la ratio diámetro/ altura, construimos una estructura de 1’30 m. con un diámetro de

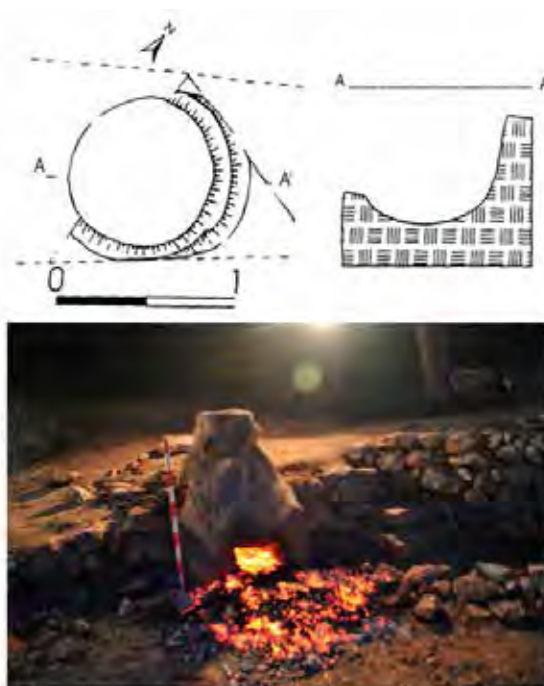


Figura 10. Planta de las UE-7020 y UE- 7022, e interpretación hipotética de ambas estructuras.

chimenea de 0’2 m. capaz de funcionar (hipotéticamente) de forma híbrida, es decir, alternando el tiro natural con la inducción asistida mediante fuelles. En este sentido, se adecuó una de las paredes del horno, concretamente la que corresponde a la parte más alta conservada de la UE- 7438, para poder ubicar una pieza de insuflación bífida que sería complementada con sendos fuelles del tipo “acordeón” de unos 30 l. de capacidad.

El mineral empleado en este horno fue recolectado manualmente mediante la excavación y seguimiento de un filón geológico hasta agotar su capacidad (vid. supra, 9). En total, 16 kg. de mineral deshidratado¹² que apenas fue necesario machacar dado el escaso grosor de las láminas y de los nódulos de limonita. El combustible vegetal estaba constituido por 90 kg. de carbón de olivo (*Olea Europaea*) y de encina (*Quercus Ilex*) en proporciones de 90% y 10 %, respectivamente, respetando la predominancia del primero en el registro arqueológico, que fue introducido en el horno aleatoriamente. El proceso de reducción se inició des-

11 “[...] la parte del fondo en la que se encontraban los carbones no se encontraba quemada, mientras que sí lo estaban las paredes laterales del mismo desde aquel nivel hacia arriba.” (trad. propia)

12 A pesar de que durante el proceso de recolección se consiguieron 41 kg. de mineral (vid. supra, 9), esta cantidad constituye datos relativos que se ven reducidos durante los procesos de tratamiento del mismo. Efectivamente, tras el lavado para eliminar las arcillas adheridas a los núcleos mineralógicos la cantidad se redujo ostensiblemente hasta los 31 kg y posteriormente, con el tostado, la cantidad se redujo hasta los 16 kg. (un 39% de la original). Estas cifras son, a todas luces, insuficientes para conseguir una cantidad de metal férreo rentable en el supuesto que la reducción fuera un éxito. En cuantías tan bajas, el mineral tiende a dispersarse en el interior del horno, haciendo extremadamente difícil la formación de una lúpia manipulable y compactable.

pués de algo menos de cuatro horas de precalentamiento con madera seca de pino blanco (*Pinus Halepensis*) y eventualmente de encina (*Quercus Ilex*), primeramente con tiro libre o natural (durante 12 horas) que permitieron ocho toberas de sección en “D” idénticas a las empleadas en ELBUIE, colocadas en grupos de cuatro y en posición opuesta. Posteriormente, estas entradas de aire fueron taponadas a la vez que se empezaba a insuflar aire en el interior del horno mediante los fuelles, a un ritmo aproximado de 30.000 l. /h. durante diez horas. A lo largo de la experiencia en fase de tiro natural se alcanzó un techo térmico aproximado de 1090 °C que se vio reducido a 980 °C en la fase de inducción asistida.

En ambos casos, el resultado de la reducción fue muy similar. Por un lado, nódulos de mineral alterados en un amplio abanico de posibilidades, entre semi-fundido y simplemente agrietado, que habían quedado dispersos en el interior del horno y que no habían sido afectados por las temperaturas más altas. Por otro lado, lupias de diferente tamaño, material fundido o semi-fundido, en algunas ocasiones con inclusiones de carbón y restos de mineral. Ambos productos están pendientes todavía de revisión, análisis y estudio, por lo que no podemos aquí afinar más sobre la proporción entre las cantidades introducidas y las obtenidas, aunque esperamos poder acometer esta etapa cuanto antes, sin duda ansiosos por determinar las conclusiones.

Respecto a otros procesos periféricos, como el carboneo, el enriquecimiento del mineral y los trabajos de post-reducción y forja, merecen atención aparte.

Para empezar, excavamos una réplica de la UE-7022. Según la información contenida en la memoria arqueológica de la excavación de Les Guàrdies (Morer y Rigo 1997), se trataba de un negativo cuyas paredes evidenciaban una alteración térmica importante (fig. 10). Su contenido, con abundantes trazas de mineral, cenizas y carbones, parecía testimoniar su uso como estructura de enriquecimiento del mineral. Con la intención de comprobar su funcionalidad, en su interior se depositó una gran cantidad de madera seca de pino blanco (*Pinus Halepensis*) a la que se prendió fuego y posteriormente, en el momento más intenso de la combustión, se arrojó el mineral recolectado en la mina de Rocabruna (vid. supra, 11) en pequeñas cantidades. El proceso de tostado o enriquecimiento en esta estructura se extendió hasta que el combustible se consumió de forma natural, varias horas después. El enfriamiento también se produjo de forma natural a lo largo de todo el día. Una vez extraído el mineral, pudimos observar que las paredes y la base de la estructura habían quedado totalmente endurecidas y oxidadas por la acción de las llamas, alcanzando hasta los 4 cm. de grosor, de forma muy similar a la evidencia arqueológica. Paralelamente, en su interior quedaron restos diminutos de mineral mezclados con cenizas y carbón vegetal que podrían corresponder a los estratos contenidos en la estructura arqueológica. En este sentido,

creemos que se puede afirmar sin lugar a dudas que la interpretación de los arqueólogos fue totalmente acertada. Posteriormente, pudimos comprobar que la misma estructura podría haber funcionado como carbonera. Se introdujeron grandes troncos de madera de acebuche (*Olea Europaea Sylvestris*) a los que se prendió fuego. Después de varias horas de ignición, durante las cuales se procedía a romper los troncos semi-carbonizados con la ayuda de una vara de madera, se cubrió con tierra y se dejó en reposo para su enfriamiento natural. Al día siguiente, la tierra fue retirada y se obtuvo una gran cantidad de carbón que fue aprovechado en la reducción del horno ELNOBE. De unos 160 kg. de madera se obtuvieron casi 20 kg. de carbón, aproximadamente.

Junto a la UE-7022 se había documentado la UE-7020¹³, un recorte en el geológico que los arqueólogos interpretaron en el momento de la intervención arqueológica como una posible fragua. En uno de sus laterales, una pequeña concavidad de sección cónica parecía indicar, según la opinión de los mismos arqueólogos, el emplazamiento de una tobera o pieza de insuflación, aunque no se pudo documentar ningún fragmento de la misma. Como ocurría en la estructura descrita anteriormente, los estratos de su interior presentaban un alto contenido en cenizas y carbones. Con la intención de comprobar la funcionalidad hipotética de esta estructura, se replicó la estructura y se complementó con una pieza de insuflación bífida que había sido hallada en un yacimiento contemporáneo a tan sólo unos 5 km. de distancia, probablemente dedicado a una actividad similar¹⁴, combinando, por tanto, evidencias arqueológicas directas e indirectas. Cabe señalar, que la hendidura en el terreno para la tobera quedaba lateralmente desplazada respecto al centro de la estructura. La experimentación demostró que efectivamente, la UE-7020 era totalmente funcional siguiendo el planteamiento hipotético de los arqueólogos (Morer y Rigo 1997) y que la alteración térmica de las paredes se concentraba especialmente en el lateral en el que se empleó la pieza de insuflación, donde se producía la entrada de aire. No obstante, pudimos comprobar que para conseguir un incremento térmico adecuado para poder utilizar esta estructura como fragua, fue necesario construir un “muro divisor” intermedio; pese a la ausencia de evidencias arqueológicas al respecto, pensamos que este elemento podría explicar la diferencia de alteración térmica entre una zona y otra. Creemos también que mientras la mitad de la estructura podría haber sido empleada para llevar a cabo el calentamiento del metal, la otra podría haber permanecido como reserva de combustible y para mantener caliente otras piezas entre las brasas, quizá para su carburación.

13 Cabe señalar que en el caso de Les Guàrdies, estas estructuras asociadas al enriquecimiento del mineral se documentaron en grupos de dos en tres ocasiones.

14 Mas d'En Gual (El Vendrell, Tarragona)

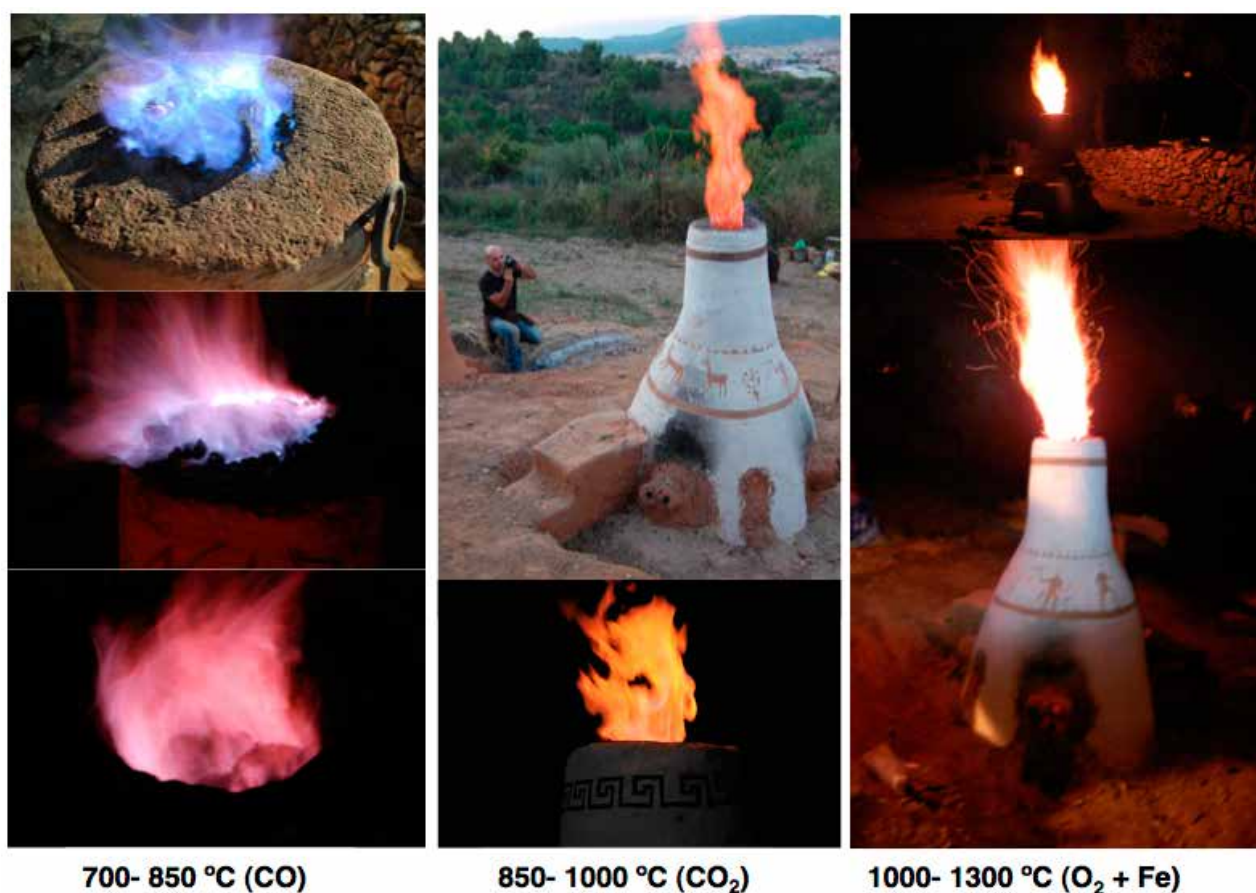


Figura 11. Secuencia en la que se puede observar las diferentes tipologías flamígeras y su lectura térmica..

3. CONCLUSIONES PRELIMINARES.

Desde su hallazgo y excavación el asentamiento de Les Guàrdies (El Vendrell, Tarragona) ha proporcionado a los investigadores gran cantidad de información sobre la cadena siderúrgica de los pueblos ibéricos septentrionales entre el s. IV y el S. II a. C., con los que se construyó una base teórica que este trabajo pretende complementar y ampliar desde el punto de vista experimental.

En este sentido, el conjunto de experimentaciones que hemos presentado en el presente artículo puede contribuir a ampliar los conocimientos sobre el eje central de la cadena siderúrgica protohistórica entre los ss. IV y II a. C., es decir, sobre la producción del metal, y a ampliar el panorama sobre las capacidades técnicas y productivas de los pueblos prerromanos de la Península Ibérica. Las conclusiones que de ellas se liberan afectan tanto al objeto de estudio, los hornos y el proceso de reducción, como a los procesos periféricos que intervienen. Faltaría, como trabajo adicional, complementar todo ello con analíticas de escorias y metales arqueológicos con el objeto de establecer pautas y cánones de explotación mineralógica, producción metálica, fabricación y transformación de objetos, etc.

La experimentación ha demostrado que el tiro natural es más adecuado, rentable y funcional para hornos con un diámetro de cubeta mayor a 50 cm., idóneos cuando se quiere producir metal férreo de manera intensa. Es por esta razón que asentamientos como Les Guàrdies se ubicaron en las proximidades de las zonas de extracción mineralógica y de las zonas de captación de combustible, argumentos que ya habían señalado algunos autores (Rovira y Solías 1991; Morer *et al.* 1997; Morer y Rigo 1999 y 2003; Cardona 1999). Como ya manteníamos en una discusión de un trabajo anterior (Gallego 2014), insuflar manualmente el volumen de aire que necesitan estas estructuras tan voluminosas supondría una inversión en recursos humanos que nosotros consideramos innecesaria a tenor de los resultados obtenidos. La pervivencia en algunos lugares de África de una tradición siderúrgica en la que se emplea la inducción múltiple para hornos más voluminosos incluso que los documentados en el ámbito peninsular tiene sentido en su propio contexto histórico, y no la consideramos extensible para el periodo cronológico y el contexto geográfico que nos ocupa, principalmente, por la inexistencia de zonas de producción intensiva, en las que un segmento de la población se dedica a la producción de hierro a tiempo completo, a diferencia de las zonas de producción protohistóricas como Les Guàrdies o La Codina (Cardona 1999) en las que predomina la

voluntad para producir cantidades de hierro suficientes para ser posteriormente comercializadas o distribuidas. Mención aparte merecería la naturaleza del combustible empleado en este asentamiento, el olivo (*Olea Europaea*), especie llegada a la Península Ibérica a través de la presencia griega y fenicia; la tala de ejemplares de esta especie denotaría la sustitución de una zona agrícola productiva por otra dedicada a la metalurgia. No obstante, no entraremos aquí en este debate que merecería un trabajo aparte.

Gracias a la experimentación hemos podido conocer también la relación entre la tipología de la llama que emerge por la boca de la chimenea, los gases que se liberan y consumen y las temperaturas que se están dando en el interior del horno (fig. 11) una vez iniciado el proceso reductivo. Así, mientras el horno se encuentra lleno de carbón y mineral, se puede apreciar una llama con una altura entre 0 y 25 cm. y una tonalidad azul que indicaría que en el interior de la cubeta se está liberando y consumiendo monóxido de carbono (CO) y que la temperatura interna se encontraría entre los 700 °C- 850 °C (aproximadamente). Cuando la carga de combustible y mineral ha descendido unos 40 cm., liberando parcialmente la chimenea y facilitando la ascensión de los fluidos gaseosos, la llama adquiere una potente y densa tonalidad anaranjada que asoma por encima de la boca de la chimenea entre 25 y 70 cm.; en ese momento, ha disminuido la combustión de monóxido de carbono y se ha empezado a combustionar el oxígeno que se absorbe a través de las toberas ($\text{CO} + \text{O}$) dando lugar a dióxido de carbono (CO_2); el interior de la cubeta se encontraría entre 850 °C y 1000 °C (aproximadamente). Finalmente, cuando la carga ha descendido hasta al altura de las toberas aproximadamente y ha liberado buena parte del volumen de la cubeta y toda la chimenea, la llama alcanza alturas superiores a 70 cm. (llegando a sobrepasar 1 m.) con una ostensible vigorosidad y un tenue color anaranjado, lo que indicaría una temperatura de más de 1000 °C, en algunos casos del orden de los 1300 °C – 1350 °C. Ello respondería a que la succión de aire a través de las toberas (que es incluso audible) es mucho más intensa, dado que la ascensión de los gases a través de la chimenea no encuentra obstáculos y además, se acelera al disminuir el diámetro del conducto, según las leyes de la dinámica de fluidos (Gallego, Ib. 47- 48). Es en este momento cuando el horno se encontraría al máximo de su capacidad térmica con una combustión de oxígeno (O^2) casi al 100%. La cuestión que aún nos falta por determinar es cuánto tiempo habría que mantenerlo en ese estado para poder hablar de óptima rentabilidad y, por tanto, de máxima productividad. La composición química del material obtenido, que será desvelado tras el análisis microscópico, confirmará o desmentirá esta observación. En cualquier caso, es nuestra intención continuar desarrollando esta hipótesis en el futuro inmediato.

Del material experimental obtenido en nuestros hornos, por el momento sólo hemos podido someter a microscopía electrónica y rayos- X el obtenido en el

horno ELTERKER, de tiro natural. Su estudio detallado, que será publicado en el futuro, ha desvelado varios datos que cabe destacar. El primero es que en su matriz se ha encontrado Wustita, óxido ferroso (FeO), cuya temperatura de fusión está entre los 1377° C y los 1424°C, según algunos autores (Benoit y Guillot 1989; Seernels 1993). El hecho de que este elemento se encuentre en formato arborescente o dendrítico evidenciaría una discontinuidad de temperaturas, con fluctuaciones elevadas desde los 1200°C y que posiblemente superen los 1350° C que no se han podido mantener durante el tiempo necesario. Por otro lado, se ha podido observar la presencia de núcleos de hierro metálico (Fe), aunque en una proporción muy pequeña respecto a la masa escoriácea a la cual se encuentra amarrado.. Del conjunto de datos observados, se desprende que aunque este tipo de hornos pueden considerarse plenamente funcionales¹⁵, la reducción en este caso particular fue parcial e incompleta, hecho que responde exclusivamente a nuestra inexperiencia y no a la tipología del horno.

Por otro lado, hemos podido comprobar y entender la naturaleza del diseño de la piezas de insuflación bífidas. Podemos afirmar que su uso responde a la intención de evitar que mediante la fuerza de absorción de los fuelles se introduzca aire caliente y brasas en el interior de los mismos, poniendo en peligro la integridad de los mismos, algo que pudimos comprobar en primera persona. Funcionan como válvulas de retención. Aunque nosotros las considerábamos más adecuadas para los trabajos de fragua (Gallego, en prensa), no descartábamos tampoco su empleo en reducciones puntuales llevadas a cabo en pequeños hornos de reducción hallados en contexto urbano en diversos asentamientos ibéricos y celtibéricos como El Castellar (Librilla, Murcia) (Rovira 2000: 267), la Bastida de les Alcusses (Moixent, Valencia) (Bonet y Vives 2011), Olèrdola (Sant Miquel d'Olèrdola, Barcelona) (Molist 2008) y Segeda (Burillo y Rovira 2005) entre algunos otros.

En base a estas evidencias, y en línea con algunos de nuestros trabajos anteriores (Gallego 2013 y 2014) y con los de otros autores (Rehder 2000) creemos que no es arriesgado afirmar que los ibero- cosetanos de Les Guàrdies en particular y los pueblos iberos en general podrían haber empleado habitualmente hornos de reducción directa con el sistema de tiro natural en zonas de producción intensiva, mucho más rentables y ergonómicos, relegando los hornos de inducción o insuflación, más limitados en cuanto a productividad, para reducciones puntuales en ámbito urbano en los que pequeñas cantidades de metal eran requeridas. La producción intensiva del hierro, desarrollada en un tipo determinado y específico de asentamientos some-

15 Los hornos de tiro natural o tiro libre han sido, y continúan siendo, empleados en algunos lugares de África, llegando a superar, en determinados casos, los 3 m. de altura (Seerneels, com. pers.), lo que prueba y confirma su funcionalidad.

tidos a una importante jerarquización política del territorio, como se ha podido observar en Les Guàrdies (Asensio *et al.* 2001; Santacana *et al.* 2003) era la respuesta a una tendencia al alza en la demanda de objetos y armas de hierro, iniciada probablemente a partir de inicios del s. IV a. C., durante el ibérico pleno, momento a partir del cual se aprecia considerablemente un incremento de los ajuares de hierro en las necrópolis ibéricas coincidiendo con el inicio de la Fase Plena del armamento ibérico o Fase de Panoplia Generalizada (Quesada 2002).

En paralelo a esta generalización de ajuares en los que aparecen armas de hierro a partir del s. IV a. C., parece que se produce también un sustancial incremento en el número de tumbas (Quesada *Ib.*, 42), lo que denotaría un crecimiento demográfico que, necesitado de más zonas de cultivo con los que aumentar y diversificar la agricultura, quizá tuviera su reflejo en un mayor esfuerzo para deforestar y adecuar para la agricultura zonas tradicionalmente boscosas. Es en esta época cuando aparecen las primeras herramientas especializadas en los trabajos agrícolas de hierro. Ambos fenómenos requerirían de una mayor cantidad de este metal que sería elaborado en zonas de producción intensiva como Les Guàrdies o La Codina para ser posteriormente distribuido, comercializado y trabajado en los numerosos talleres de herreros documentados en el mundo ibérico.

En cualquier caso, la existencia contrastada de núcleos de hábitat en los que se trabajaba en la producción intensiva de este metal como actividad primordial, evidenciado en los ejemplos anteriormente mencionados, confirma la necesidad de continuar y ampliar los trabajos arqueológicos hacia zonas próximas a filones ferruginosos. El hallazgo de nuevos asentamientos de esta índole ampliaría considerablemente el panorama sobre la siderurgia ibérica y celtibérica y podría aportar nuevos datos sobre los aspectos tecnológicos, sobre la estructuración social y territorial o sobre las capacidades productivas de los pueblos ibéricos.

4. AGRADECIMIENTOS.

Mi más sincera gratitud se dirige, como no podía ser de otra manera, a Aida Alarcos, mi colega y compañera, por su inagotable apoyo y paciencia durante el desarrollo de este proyecto. Sin su complicidad habría resultado, a todas luces, indefiniblemente más difícil. Agradezco a Jordi Auladell, del Departament de Prehistòria, Història Antiga i Arqueologia de la Universitat de Barcelona, su inestimable implicación y colaboración, fundamentales para interpretar las lecturas microscópicas y de rayos-X, claves para entender los fenómenos físicos que tienen lugar durante el proceso de reducción en el interior de los hornos. A la

prof. Consuelo Mata, del Departament de Prehistòria de la Universitat de València, la enriquecedora y privilegiada información sobre las piezas bífidas de insuflación localizadas en la provincia de Valencia, algunas de las cuales son aún inéditas, y que amplían sustancialmente el horizonte sobre la distribución geográfica y tipológica de éstos elementos. Así mismo, agradezco a Josep Pou y a Manel Gómez, de la Ciutadella Ibèrica de Calafell, a los profs. Joan Sanmartí del Departament de Prehistòria, Història Antiga i Arqueologia de la Universitat de Barcelona, a Xavier Hernández y a Joan Santacana del Departament de Didàctica de les Ciències Socials de la Universitat de Barcelona i a M^a Carme Belarte del Institut Català d'Arqueologia Clàssica (ICAC) su interés y confianza en nuestra propuesta. Mi reconocimiento también a Javier Franco, del equipo arqueológico del Museo de la Minería del País Vasco de Gallarta, por su inquietud científica, que comulga con la nuestra, por su generosidad y por la posibilidad que nos brindó al invitarnos a participar en estas interesantes jornadas sobre la siderurgia pre-hidráulica. Finalmente, quisiera agradecer la colaboración desinteresada que nos prestaron todas aquellas personas atraídas por la experimentación siderúrgica a lo largo de estos años. Mi más profunda gratitud vaya para todos ellos.

5. BIBLIOGRAFÍA.

Adelantado, P.

- 2003 La metalurgia del hierro, en P. Guérin (ed.), *El Castellet de Bernabé y el horizonte ibérico pleno edetano*, Servicio de Investigación Prehistórica, Serie de Trabajos Varios, 101, Diputación Provincial de Valencia, 314- 324.

Álvarez, R., Estrada, A.

- 2009 L'exploració de ferro en el complex miner de Gavà. La mina número 65 en *L'arqueologia a Gavà, homentage a Alicia Estrada*, colección "La nostra gent", núm. 5, 141- 160.

Andrieux, Ph.

- 2004a Expérimenter en archéologie, en en Mangin, M. (dir.), *Le Fer*, ed. Errance, Collection "Archéologies", París, 10- 11.
- 2004b Les traces thermiques sur les parois de four, en Mangin M. (dir.), *Le Fer*, ed. Errance, Collection "Archéologies", París, 70- 71.

Armada, X. - L., Hunt, M. A., Tresserras, J. J., Montero, I., Rafel, N., Ruiz de Arbulo, J.

- 2005 Primeros datos arqueométricos sobre la metalurgia del poblado y necropolis del Calvari del Molar (Priorat, Tarragona), *Trabajos de Prehistoria*, 62, n° 1, 139-155

Armada, X.- L., Garcia, D., Montero, I., Moreno, I., Rafel, N., Rovira, M. C.

- 2005 Minería y metalurgia durante la I Edad del Hierro. Procesos de cambio en el sur de Catalunya, *Revista d'Arqueologia de Ponent* (RAP), nº 15, Universitat de Lleida, 133- 150.

Asensio, D.; Morer, J.; Rigo, A. i Sanmartí, J.,

- 2001 Les formes d'organització social i econòmica a la Cossetània ibèrica: Noves activitats sobre l'Evolució i tipologia dels assentaments entre els segles VI-III a. C., in *Taula Rodona Internacional d'Ullastret: Territori polític i territori rural durant l'edat del ferro a la Mediterrània occidental*, Monografies d'Ullastret, 2, 253-272.

Auladell, J.

- 1993 Metal·lúrgia i útils fèrrics agrícoles i ramaders pre- romans a l'àrea Laietània, *Gala* 2, 227-236.
- 2004 Tecnologia del treball del ferro al Nord- est peninsular en l'Ibèric Antic i Ple, Tesis Doctoral dirigida por Gràcia, F. y Simon, J., defendida en octubre de 2004, Universidad de Barcelona, Barcelona.

Auladell, J., Simon, J.

- 1997 Anàlisi metal·logràfica d'elements fèrrics pre-romans: una aproximació als mètodes siderúrgics a la Laietània, *Pyrenae*, 28, 119- 132.

Benoit, P., Guillot, I.

- 1989 Scories de reduction et scories de forge: approche analytique et archeologique, en *Archaeometallurgy of iron* (1967-1987), Liblice, 1987.

Blakelock, E., Martínón, M., Veldhuijzen, H. A., Young, T.

- 2009 Slag inclusions in iron objects and the quest for provenance: an experiment and a case study, *Journal of Archaeological Science* 36, 1745- 1757.

Bonet, H., Vives- Ferrándiz, J. (eds.)

- 2011 La Bastida de les Alcusses. 1928- 2010, Museu de Prehistòria de València, 119- 124.

Boonstra, A., Van de Manakker, T., Van Dijk, W.

- 1997 Experiments with a slag- tapping and a slag pit furnace, en Lars Chr. Nørbach (ed.): *Early iron production. Archaeology, technology and experiments. Nordic Iron Seminar*, Lejre, del 22 al 28 de julio, 1996. Technical Report Nr. 3. 1997, 73- 80.

Bordas, A., Molinas, R., Saa, M.

- 2009 La mineria del ferro a Gavà. Darreres intervencions arqueològiques a la serra de les Ferreres, en *L'arqueologia a Gavà, homentatge a Alicia Estrada*, colección "La nostra gent", núm. 5, 161- 176.

Burillo, F., Rovira, S.

- 2005 Experimentos de fundición de minerales de hierro en la ciudad- estado celtibérica de Segeda (Mara, Zaragoza), en *Avances en Arqueometría*, Universitat de Girona, 137-145.

Cabboï, S., Dubois, C., Dunikowski, Ch., Leroy, M.,

- 2004 La fabrication du charbon de bois, en Mangin, M. (dir.), (2004) :*Le fer*, Col. *Archéologiques*, Errance, Paris.

Cardona, R.,

- 1999 Memòria arqueològica del jaciment del Camp dels Moros de la Codina, Pinell, Campanya 1999. Servei de Patrimoni arqueològic i paleontològic del Departament de Cultura de la Generalitat de Catalunya.

Chapa, T., Mayoral, V.

- 2007 Arqueología del trabajo. El ciclo de la vida en un poblado ibérico, col. Akal Arqueología, Madrid, especialmente III, ed. Akal, 90- 101.

Cleere, H. F.

- 1972 The classification of early smelting- iron furnaces, *The Antiquaries Journal* II, 8- 23.

Craddock, P. T., Meeks, N. D.

- 1983- 1988 Iron in copper, en Speri, G. (ed.) *The first iron in the Mediterranean*, Populonia- Piombino, 1983, PACT, 21, Strasbourg, 1988, 119- 130.

Crew, P.

- 1991 The Experimental Production of Prehistoric Bar Iron, *Historical Metallurgy* 25/1, 21- 36.
- 1998 Laxton revisited: a first report on the 1998 excavations, *Historical Metallurgy* 32/ 2, 49- 53.

Decombeix, P., Domergue, C., Fabré, J. M., Gorgues, A., Tollon, Tournier, B.

- 2000 Reflections sur l'organisation de la production du fer a l'époque romaine dans le bassin supérieur de la Dure, au voisinage des Martys (Aude), *Gallia*, 23- 36.

Decombeix, P. M., Fabré, J. M., Rico, Ch.

- 2001 Expérimentations de réduction directe du fer dans des reconstitutions des bas-fourneaux romains de la Montagne Noire, en *Actes del*

1er Simposi sobre la Minería i la Metal·lúrgia antiga al sud-oest europeu (Centre d'Arqueologia d'Avinganya, Seròs, 5 al 7 de mayo del 2000), 185- 194.

Domergue, C., Leroy, M.,

- 2000 L'état de la recherche sur les mines et les métallurgies en Gaule, de l'époque gauloise au haut Moyen Âge, en Domergue, C., Leroy, M., (eds.): *Mines et métallurgies en Gaule, Gallia* 57, 3-10.

Dubois, C.

- 2000 Lercoul (Pyrénées ariégeoises): une site sidérurgique du III^e s. de notre ère, en Domergue, C., Leroy, M., (eds.): *Mines et métallurgies en Gaule, Gallia* 57, 53-62.

Dunikowsky, M. Cabboï, S.

- 1995 La sidérurgie chez les Sénon: les ateliers celtiques et gallo- romains des Clérimois (Yonne), *Documents d'Archéologie Française* 51, Maison des Sciences de l'Homme, Paris.

Ehren, Th., Charlton, M., Chirikure, S., Humphris, J., Ige, A., Veldhuijzen, H. A.

- 2007 Decisions set in slag. The Human factor in African iron smelting, en La Niece, S., Hook, D. R., Craddock, P.T. (eds.) *Metals and Mines. Studies in Archaeometallurgy*, London, Archetype, British Museum, 211-218.

Espelund, A.

- 2010 Experimental ironmaking once more: combining theory and find material, *EuroREA* 7, 4- 8.

Fabré, J. M., Polo, C., Rico, Ch., Villargordo, C.

- 2012 Minería y siderurgia Antigua en Sierra Menera (Teruel- Guadalajara). Nuevos avances de la explotación del hierro en época Antigua (ss. II a. C. – II d. C.), en Minería y Metalurgia antiguas. Visiones y revisiones, Casa de Velázquez, 43- 62.

Ferrer, M. A.

- 2000 La metalurgia ibérica del hierro. Una aproximación a través de la interpretación arqueométrica, en Mata, C., Pérez, G. (eds.), *Ibers. Agricultors, artesans i comerciants. III Reunió sobre Economia en el Món Ibèric, SAGVNTUM Extra- 3*, Universitat de València, 283- 290.
- 2002 La actividad extractiva y metalúrgica, en Bonet, H. y Mata, C. (eds.), *El Puntal dels Llops. Un fortín edetano*, Servicio de Investigación Prehistórica, *Serie de Trabajos Varios* 99, Diputación Provincial de Valencia, 192- 211.

Forbes, R. J.

- 1971 *Studies in Ancient Technology* VIII, Leiden. 2^a edición revisada.

- 1972 *Studies in Ancient Technology*, IX, Leiden. 2^a edición revisada.

Forés, A., Gassiot, E., Oltra, J.

- 2003 Mes enllà de la transhumància: mineria i metal·lúrgia antiga a l'alta muntanya del Pallars Sobirà. En Mata-Perelló, J. M. (ed.) *Libro de Actas del Primer Simposio sobre Minería, Metalurgia y Patrimonio en el Área Mediterránea, Bellmunt del Priorat, del 8 al 10 de Noviembre del 2002*, Ajuntament de Bellmunt, SEDPGYM, UPC, 71-82.

Foster, J.

- 1995 Metalworking in the British Iron Age, en Raftery, A., Megaw, V., Rigby, V. (eds.), *Sites and Sights of the Iron Age. Essays on field-work and Museum Research presented to Ian Mathieson Stead*, Oxford, 49- 60.

Gallego, J. M.

- 2013 La siderurgia en el mundo ibérico. Primeros datos a partir de la experimentación arqueológica, en *Actas del III Congreso Internacional de Arqueología Experimental, Banyoles, del 17 al 19 de octubre de 2011*, Museu d'Arqueologia de Catalunya, Barcelona.
- 2014 Experimentando con armas ibéricas de hierro. La producción del metal en hornos de "tiro natural", *Gladius*, vol XXXIV, CSIC, Madrid.

García, G.

- 2006 Entre íberos y celtas. Las espadas de tipo "La Tène" del Noreste de la Península Ibérica, *Anejos de Gladius* 10, CSIC, Instituto Histórico Hoffmeyer. Instituto de Historia. Ediciones Polifemo, Madrid.

Garcès, I. (dir.)

- 2013 Catàleg dels materials arqueològics de la Torre dels Encantats. Col·lecció del Museu d'Arenys de Mar, Ajmt. d'Arenys de Mar.

Gómez, P.

- 1996 Análisis de escorias férreas: nuevas aportaciones al conocimiento de la siderurgia prerromana en España. *Trabajos de Prehistoria* 53, vol. 2, 1996, 145- 155.

Guitart, J., Palet, J. M., Prevosti, M. (eds.)

- 2003 *Territoris Antics a la Mediterrània i a la Cosetània oriental*, Actes del Simposi Internacional d'Arqueologia del Baix Penedès, el Vendrell, del 8 al 10 de noviembre de 2011, Departament de Cultura, Generalitat de Catalunya.

Izquierdo, P.

- 1992 El jaciment arqueològic de les Sorres, en *Les Sorres X. Un vaixell medieval al canal olímpic de rem*, Castelldefels, Baix Llobregat, Memòries d'intervencions arqueològiques a Catalunya, 1, 21- 25.

Karbowniczek, M., Weker, W., Suliga, I.

- 2009 Experimental metallurgical process in a slag pit bloomery furnace, *EuroREA* 6, 45- 49.

Leroy, M., Merluzzo, P.

- 2004 La réduction: du minerai au métal, en Mangin, M. (dir.), *Le Fer*, ed. Errance, Collection "Archéologies", París, 49- 80.

López, D.

- 2011 Memòria científica de l'excavació arqueològica a l'assentament ibèric (segles III- II a. C.) de Mas d'en Gual (el Vendrell, Tarragona). Servei de Patrimoni arqueològic i paleontològic del Departament de Cultura de la Generalitat de Catalunya.

Lorrio, A., Gómez, P., Montero, I., Rovira, S.

- 1999 Minería y metalurgia celtibérica, en *IV Simposio sobre Celtíberos. Economía*, Zaragoza, 161- 180.

Madroño de la Cal, Á.

- 1989 Los hierros de la España prerromana, en C. Domergue (ed.), *Minería y metalurgia en las antiguas civilizaciones mediterráneas y europeas*, Ministerio de Cultura, 109- 118.

Mangin, M. (dir.)

- 2004 *Le fer*, Col. *Archéologiques*, Errance, Paris.

Mangin, M., Fluzin, PH.

- 2006 L'organisation de la production métallurgique dans une ville gallo-romaine: le travail du fer à Alésia, *Revue archéologique de l'Est* 55, 129- 150.

Manning, W. H.

- 1995 Ironworking in the Celtic World, en *The Celtic World*, Londres, 310- 320.

Martín, A., López, V., Gabaldón, A.

- 2003 El conjunto minero- metalúrgico del término municipal de Senó (Bajo Aragón): un ejemplo del origen y la difusión de la siderurgia protohistórica en el levante español, *Salduie* 3, 257- 267.

Martinelli, B.

- 2008 Patrimoine sidérurgique traditionnel en Centrafrique, en *Revue Centre-Africaine d'Anthropologie*, n°1. La métallurgie du fer en Centrafrique, (online).

Mata, C., Moreno, A., Ferrer, M. A.

- 2009 Iron, Fuel and Slags: reconstructing the Ironworking Process in Iberian Iron Age (Valencian Region), *Pyrenae* 40, vol. II, 105- 127.

Mohen, J. P.

- 1992 *Metalurgia prehistórica. Introducción a la paleometalurgia*, Barcelona.

Molist, N., Ros, A., Bosch, J. M^a, Mestres, J., Senabre, M^a R.

- 2005 Piezas de insuflación de aire del proceso metalúrgico en el noreste peninsular durante el período ibérico, en Puche, O; Ayarzagüena, M. (eds.): *Actas del II Simposio sobre minería y metalurgia históricas en el sudoeste europeo*, Madrid, 24-26 de junio de 2004, Madrid, 179-188.

Molist, N. (ed.)

- 2008 La intervenció al sector 01 del Conjunt Històric d'Olèrdola. De la Prehistòria a l'etapa romana (campanyes 1995- 2006), *Monografies d'Olèrdola* 2, Museu d'Arqueologia de Catalunya, 175- 182.

Morell, N.

- 2008 Treballant el ferro: canvis i continuïtats al nord- est de la Península Ibèrica durant els segles II- I a. C., en Miñarro, M., Valenzuela, S. (eds.): *Actes del I Congreso de Joves Investigadors en Arqueologia dels Països Catalans: la protohistoria als Països Catalans*, *Arqueomediterrània* 10, 113- 122.

Morer, J., Rigo, A., Barrasetas, E.

- 1997 Les intervencions arqueològiques l'autopista A- 16: valoració de conjunt, *Tribuna d'Arqueologia*, 1996- 1997, 67- 98.

Morer, J., Rigo, A.

- 1997 Memòria de la intervenció arqueològica a Les Guàrdies. Autopista A- 16. Servei d'Arqueologia i Paleontologia de la Generalitat de Catalunya, Departament de Cultura.

- 1999 *Ferro i ferrers en el món ibèric. El poblat de les Guàrdies* (El Vendrell), ed. Aucat, Autopistes de Catalunya.

- 2003 Les Guàrdies (El Vendrell, Baix Penedès). Un assentament metalúrgic d'època ibèrica, en *Territoris antics a la Mediterrània i a la Cossetània oriental*, el Vendrell, del 8 al 10 de novembre de 2001, Actes del Simposi Internacional d'Arqueologia del Baix Penedès, Departament de Cultura, Generalitat de Catalunya, 327- 338.

Oliver, A

- 1996 Poblamiento y territorio protohistóricos en el llano litoral del Baix Maestrat (Castellón), Sociedad Castellonense de Cultura, *Arqueologia*- IX, Castellón.

Panareda, J. M., Masnou, J.

- 2010 *El carboneig. Quan el record encara és viu*, Publicacions de l'Abadia de Montserrat.

Pelet, P. L.

- 1993 Une industrie reconnue: Fer, Charbon, Acier dans le Pays de Vaud, *Cahiers d'Archéologie Romande* 60, Lausanne.

Pleiner, R.

- 1980 *Early iron Metallurgy in Europe*, Ed. Wertin Muhly, London.
- 1988 Les primeres produccions de ferro a l'Europa Central i Oriental, *Cota Zero*, 13, Vic, 71- 84.

Quesada, F.

- 1997 *El armamento ibérico. Estudio tipológico, geográfico, funcional, social y simbólico de las armas en la Cultura Ibérica (siglos VI-I a. C.)*, Monographies Instrumentum 3, Montagnac.
- 2002 La evolución de la panoplia, modos de combate y tácticas de los iberos, en *La guerra en el mundo ibérico y celtibérico (ss. VI- II a. C.)*, Collection de la Casa de Velázquez, vol. 78, Madrid, 35- 64
- 2010 Las armas en los poblados ibéricos. Teoría, método y resultados, en *Gladius XXX*, CSIC, Madrid, 17- 42.

Quesada, F., Gabaldón, M., Requena, F., Zamora, M.

- 2000 ¿Artesanos itinerantes en el mundo ibérico? Sobre técnicas y estilos decorativos, especialistas y territorio; en Mata, C., Pérez, G. (eds.), *Ibers. Agricultors, artesans i comerciants. III Reunió sobre Economia en el Món Ibèric*, SAGVNTUM Extra- 3, Universitat de València, 291- 301.

Rehder, J. E.

- 2000 *The mastery and uses of fire in Antiquity*, McGill-Queen's University Press Montreal, Canadá.

Renzi, M.

- 2007 Estudio tipológico y funcional de las toberas del yacimiento de la Fonteta (Guardamar de Segura, Alicante), en *Trabajos de Prehistoria*, 64, 1, 165- 177.

Reynolds, P. J.

- 1988 *Arqueologia experimental. Una perspectiva de futur*, Eumo, (col. Referències 4), Vic.

Rostocker, W., Bronson, B.

- 1990 Pre-industrial iron, its technology and ethnology, *Archaeomaterials Monograph* 1, Philadelphia.

Rovira, M. C.

- 1997 De bronzistes a ferrers: dinàmica de la metal·lúrgia protohistòrica al nord- est peninsular, *Cota Zero* 13, 59- 70.
- 2000 Los talleres de herrero en el mundo ibérico. Aspectos técnicos y sociales; en Mata, C., Pérez, G. (eds.), *Ibers. Agricultors, artesans i comerciants. III Reunió sobre Economia en el Món Ibèric*, SAGVNTUM Extra- 3, Universitat de València, 265- 270.
- 2012 La producció siderúrgica en època ibèrica a Catalunya, en *Boscos de Ferro, Actes de les Primeres Jornades de Recerca i Desenvolupament de la Vall Ferrera*, Garsineu Edicions, Tremp, 41- 50.

Rovira, S., Burillo, F., López, R., Ibáñez, J.

- 2012 Metalurgia y explotación de recursos minerales en el entorno de la ciudad- estado celtibérica de Segeda I (Mara, Zaragoza) en Orejas, A., Rico, C. (eds.): *Minería y metalurgia antiguas. Visiones y revisiones*, Casa de Velázquez, Madrid, 27- 42.

Rovira, S.

- 1993 La metalurgia de la Edad del Hierro en la Península Ibérica: una síntesis introductoria, en Arana, R., Muñoz, A. M., Ramallo, S. i Ros, M^a. M. (eds.): *Metalurgia en la Península Ibérica durante el Primer Milenio a. C. Estado actual de la investigación*, Universidad de Murcia, 45- 70.
- 2000 Continuismo e innovación en la metalurgia ibérica, en Mata, C., Pérez, G. (eds.), *Ibers. Agricultors, artesans i comerciants. III Reunió sobre Economia en el Món Ibèric*, SAGVNTUM Extra- 3, Universidad de Valencia, 209- 221.

Rovira, S., Solías, J. M.

- 1991 Iron minery and metallurgy in the lower course of river Llobregat (N. E. of Spain) during the Roman Republican period, en *Materialy Archeologiczne XXVI, International Archaeometallurgical Symposium*, 53- 57.

Santacana, J., Pou, J., Morer, J., Asensio, D. Sanmartí, J.,

- 2005 Evidències arqueològiques del procés d'emergència "d'élites" aristocràtiques a la ciutadella

ibérica d'Alorda Park (Calafell, Baix Penedès), in Mercadal, O. (coord.): *XIII Col·loqui Internacional d'Arqueologia de Puigcerdà. Homenatge a Josep Barberà i Farràs*, Puigcerdà, november the 14th and the 15th 2003, vol 1, 597- 614.

Sarabia, F. J.

- 1994 Aproximación teórica y metalográfica a la reducción de hierro en la Prehistoria partiendo del trabajo experimental, *Trabajos de Prehistoria* 51, Madrid, 95- 109.

Serneels, V.

- 1993 Archéometrie des scories de fer. Recherches sur la sidérurgie ancienne en Suisse occidentale.
- 1997 L'estudi dels rebutjos metal·lúrgics i la seva aportació a la comprensió de la indústria del ferro, revista Cota Zero, 13, Vic, pp. 29- 42.
- 1998 *La chaîne opératoire de la sidérurgie ancienne*, en Feugère, M., Serneels, V. (dir.): *Recherches sur l'économie du fer en Méditerranée nord-occidentale*, Monographie Instrumentum, 4, Montagnac, 7- 44.

- 2004 Le Fer et ses minerais, en Mangin, M. (dir.), *Le Fer*, ed. Errance, Collection "Archéologies", París, 25- 48.

Serneels, V., Crew, P.

- 1997 Ore-Slag Relationships from experimentally Smelted Bog- Iron Ore, en Early Ironworking in Europe, archaeology and experiment, international Conference at Plas Tan Y Bwlch (Crew, P. y Crew, S. eds.), Plas Tan Y Bwlch Occasional Paper 3, pp. 78- 82.

Simon, J., Tartera, J., Marsal, M., Auladell, J.

- 2005 De los íberos al imperio romano. Evolución tecnológica del hierro, *Revista de Metalurgia*, núm. esp. CSIC, Madrid, 507- 512.

Tylecote, R. F., Austin, J. N., Wraith, A. E.

- 1971 The mechanism of the bloomery process in shaft furnaces, *Journal Iron Steel Institute* 209, 342- 363.