

KOBIE SERIE ANEJO, nº 13: 13-20
Bizkaiko Foru Aldundia-Diputación Foral de Bizkaia
Bilbao - 2014
ISSN 0214-7971
Web <http://www.bizkaia.eus/kobie>

UNA APROXIMACIÓN A LA TECNOLOGÍA DEL HIERRO PREHIDRÁULICO Y A SU ESTUDIO.

An approximation to the technology of prehydraulic iron and to its study.

Marc Gener Moret¹

Palabras clave: Arqueometalurgia. Arqueometría. Epistemología. Metalurgia del hierro. Multidisciplinariedad. Paleosiderurgia. Técnicas de análisis. Tecnología.

Hitz gakoak: Arkeometalurgia. Arqueometría. Epistemologia. Burdinaren metalurgia. Diziplininitza. Paleoburdingintza. Analisi-teknika. Teknologia.

Keywords: Analytical techniques. Archaeometallurgy. Archaeometry. Epistemology. Iron technology. Multidisciplinarity. Paleosiderurgy. Technology.

RESUMEN

En el periodo anterior a la aplicación de la tecnología hidráulica a la producción de hierro, la metalurgia de este metal en occidente comparte una serie de características comunes. En este trabajo se elabora un resumen de estas características y se hacen una serie de propuestas para elaborar una aproximación multidisciplinar al estudio de la paleosiderurgia.

LABURPENA

Burdina-ekoizpenerako teknologia hidraulikoaren aplikazioaren aurreko aldian, mendealdean metal horren metalurgiak ezaugarri komunean partekatzen du. Lan honetan ezaugarri hauen laburpen bat lantzen da, eta proposamen batzuk egiten dira paleoburdingintzaren ikerketara diziplina anitzeko hurbiltzea lantzeko.

SUMMARY

In the period prior to the implementation of hydraulic technology to the production of iron, its metallurgy in occident shares some common traits. In this article we summarize some of these traits and present some proposals in order to devise a multidisciplinary approach to the study of paleosiderurgy.

1 Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Instituto de Historia - Centro de Ciencias Humanas y Sociales (IH-CCHS). c/ Albasanz 26-28, 28037 - Madrid

1. INTRODUCCIÓN:

No creo que sea necesario destacar la importancia de la tecnología de los metales dentro de la historia de la humanidad (Tylecote 1992). Y dentro de la larga, fructífera y compleja relación de la humanidad con los metales, el hierro tiene un lugar privilegiado. Tanto si lo estudiamos en sus orígenes o a lo largo de la historia (Tylecote 1992; Buchwald 2005), en su producción (Pleiner 2000), su transformación (Pleiner 2006) o sus aplicaciones (Tylecote y Gilmour 1986; Williams 2003), es fácil darse cuenta que se trata de un material que ha acompañado al ser humano a lo largo de su desarrollo, y ha sido protagonista, como motor o como instrumento, de muchos de los cambios que ha experimentado. Así, la disponibilidad y control de los recursos asociados a este metal se convierten en cuestiones económicas, sociales y políticas, y su tecnología en generador de conocimiento y promotor de intercambio. El objetivo de este artículo es proponer una reflexión sobre la manera de aproximarnos al estudio de la metalurgia del hierro antiguo y plantear algunas de las cuestiones que deberían estar presentes cuando intentamos entender la relación existente entre el hierro y aquellos que lo producen, lo transforman y lo utilizan.

Los estudios arqueológicos sobre los diferentes elementos de la cultura material pueden llevarse a cabo desde diferentes perspectivas, y la arqueometría es una de ellas. Olin (1982: 19) define la arqueometría como *“application and interpretation of natural science data in archaeological and art historical studies”* (“aplicación e interpretación de datos proporcionados por las ciencias naturales a los estudios de arqueología e historia del arte”). Y lo cierto es que la arqueometría, y con ella la arqueometalurgia, es una disciplina que no ha hecho más que ganar relevancia con el tiempo dentro de la arqueología general en las últimas décadas (López-Romero y Montero Ruiz 2006; Armada Pita, *et al.* 2008; Costa 2008; Perea *et al.* 2008), planteando nuevas cuestiones y proponiendo e implementando métodos innovadores para responderlas (Montero *et al.* 2007). Aún así, fieles a la letra de la definición de Olin, muchos estudios comprendidos en este campo se limitan a aplicar algún tipo de método analítico sobre una pieza arqueológica y presentar los resultados del análisis. Sin embargo, es importante recordar que el sujeto de nuestro estudio no es tanto el objeto en sí como la circunstancia (entendida en el sentido más amplio) humana que produce ese objeto. Y el objeto o, mejor, el sujeto, que tratamos aquí es la metalurgia del hierro, y lo que buscamos es entender cómo y porqué esta metalurgia presenta las características que presenta en cada tiempo y en cada área geográfica.

2. LOS PROCESOS DE OBTENCIÓN DEL HIERRO Y EL ACERO.

A pesar de que el hierro es un elemento extremadamente abundante en la corteza terrestre (el segundo metal más abundante después del aluminio) se tarda bastante en descubrir cómo extraerlo debido a que en la naturaleza siempre aparece combinado con otros elementos, y el proceso técnico necesario para obtener el hierro es más complejo que en el caso de otros metales, como el cobre, el oro o la plata, que ya se usan de manera habitual cuando el hierro hace su aparición.

Por otro lado, si queremos aproximarnos a la metalurgia del hierro es necesario tener en cuenta su relación con el acero. El acero es una aleación de hierro y carbono y sus propiedades varían en función de la cantidad de este último, que en los periodos históricos que nos ocupan y en Europa occidental oscila entre 0% y 1% de C en masa, suficiente para alterar las propiedades mecánicas del hierro proporcionándole más dureza, tenacidad y resiliencia (para las propiedades mecánicas de los metales, ver por ejemplo Callister (1995: 112-156) y la capacidad de ser templado, es decir, sometido a un proceso térmico que le proporciona dureza adicional. La estrecha relación entre el metal y su aleación se debe a que la extracción del hierro a partir del mineral necesita mucho calor, y en la antigüedad la fuente de calor más eficiente que se conocía era el carbón, que está compuesto básicamente de carbono. Para que éste se introduzca en el hierro, dando lugar al acero, se necesitan unas condiciones de temperatura y poca oxigenación que eran habituales en los procesos de producción y transformación del hierro, con lo cual no es de extrañar que ambos estuvieran presentes en este tipo de metalurgia desde el principio.

Es necesario mencionar que el papel del carbono en la composición del acero no se descubre hasta finales del s. XVIII (Smith 1964), con lo cual el conocimiento que ha gobernado esta tecnología durante la mayor parte de la historia del hierro es puramente empírico.

Aún así, los datos indican que desde muy temprano se conoce la diferencia entre hierro y acero. El estudio de los objetos históricos nos muestra que a medida que se avanza en el conocimiento de esta tecnología el uso del acero en sustitución del hierro en objetos o partes de objetos que aprovechaban mejor sus propiedades mecánicas, evidencia una intencionalidad en la elección del material. La constancia de que la diferencia se conocía y se explotaba sustentada justifica una línea de investigación destinada a determinar hasta qué punto se controla el procesos de obtención de cada material a pesar de desconocer el papel que jugaba el carbono en todo ello.

Para obtener hierro, partimos de un mineral. Los más adecuados para la extracción son los óxidos e hidróxidos de hierro (como las hematitas, magnetitas, limonitas, goetitas, etc.) o los carbonatos (como la siderita). El procedimiento básico, descrito aquí de manera simplificada, pasa por someter el mineral a un proceso de reducción, que, simplificando, lo que hace es quitarle el oxígeno a los óxidos de hierro dejando sólo el metal, para lo cual hace falta carbono y temperatura. Se lleva a cabo en un horno, es decir, una estructura que contenga todos los elementos y retenga el calor, cuya configuración variará a lo largo del tiempo y a lo ancho de la geografía, en función del conocimiento tecnológico y la disponibilidad de recursos. En el horno se colocan el mineral y el carbón, y para que este pueda arder hasta alcanzar la temperatura necesaria para que se produzca la reducción, se incorpora un sistema de alimentación de aire, que puede ser por ventilación natural, mediante sistemas de aperturas que ayuden a la circulación del aire, o por ventilación forzada, generalmente mediante fuelles.

Una vez iniciado el proceso de combustión del carbón, lo habitual es que este arda creando dióxido de carbono (CO₂), pero en el horno, debido a la acumulación de carbón y mineral y a que el flujo de aire en su interior no se distribuye por igual en todas partes, se generan unas condiciones en las que la combustión se produce con déficit de oxígeno, produciéndose monóxido de carbono (CO), un gas altamente reactivo. Así, en una atmósfera rica en CO, éste se combina con los óxidos presentes para producir CO₂, que es mucho más estable, arrancando el oxígeno del mineral y haciendo que poco a poco éste quede reducido al hierro metálico que queremos obtener. Esta reacción empieza a producirse a partir de aproximadamente 900° C, pero para que sea razonablemente eficiente tenemos que movernos alrededor de 1100° o 1200° C. A esta temperatura el mineral se reduce y también reacciona con la ganga para producir compuestos que se funden a esta temperatura, dando lugar a una escoria líquida que se acumula en el fondo del horno o se extrae periódicamente en un proceso conocido como “sangrado”. Del análisis de estas escorias se puede obtener una gran cantidad de información sobre el proceso tecnológico que las ha producido, y actualmente este es uno de los elementos principales para el estudio de la paleometalurgia (Rovira y Renzi 2010).

Es importante mencionar que, a diferencia de la escoria, el hierro no se funde en ningún momento del proceso (el hierro puro funde a 1538°C), sino que las partículas de metal se van consolidando a medida que se va reduciendo el mineral. El resultado final de la operación es, si todo sale bien, una masa esponjiforme compuesta de hierro metálico, escoria solidificada y fragmentos de mineral sin reducir y de carbón, a la que se denomina lupia. En Europa, este proceso de obtención del hierro en estado sólido es el habitual hasta que, bien entrada la Edad Media y en gran parte gracias a la introducción de los sistemas hidráulicos de

inyección de aire, se diseñan hornos capaces de producir metal fundido directamente del mineral, aumentando así considerablemente la capacidad de producción. Eso no significa que en ciertas circunstancias no se produjera hierro fundido en Europa antes de las fechas mencionadas (Craddock y Lang 2005), pero se trata de la excepción. También hay que decir que este desarrollo de la metalurgia no es igual en todas partes; en China, por ejemplo, la tecnología de obtención de hierro sigue un camino distinto y usan hierro fundido desde el s. VI a.C. (Wagner 1999).

Una vez obtenida la lupia ésta debe consolidarse y compactarse mediante forjado, calentándola y golpeándola con fuerza sobre una superficie dura. En este proceso el metal se deforma, cerrando los huecos que puedan haber quedado en su interior, triturando las impurezas sólidas y expulsando la escoria líquida o semilíquida, para producir un lingote o preforma que es lo que se usará como materia prima para empezar a fabricar objetos. A pesar de la consolidación, siempre quedan bastantes impurezas atrapadas en el interior del metal, lo cual es precisamente una de las características del hierro obtenido mediante este proceso. Otra característica es que por lo general se trata de hierro dulce, sin carbono, pero bajo ciertas circunstancias el mismo proceso puede producir acero.

Las condiciones adecuadas para que el hierro adquiera carbono y se transforme en acero son una temperatura por encima de los 900° C, una atmósfera rica en CO y tiempo. A esta temperatura el hierro está sólido pero en un estado que acepta bien el C en disolución, y permite además que éste circule por su interior mediante un proceso de difusión. El CO reacciona con el metal, de manera que la capa superficial del metal se enriquece en carbono, que por diferencia de concentraciones tenderá a difundirse hacia el interior. Cuanto más tiempo transcurra sometido a estas condiciones, más carbono se irá introduciendo en el material. Este proceso se conoce con el nombre genérico de carburización.

Evidentemente, las condiciones necesarias para que se lleve a cabo la carburización son muy parecidas a las que se encuentran en algunas partes del interior del horno durante el proceso de reducción, por lo cual es posible obtener acero en vez de hierro como producto de la reducción del mineral. Es lo que se conoce como obtención del acero por el método directo. Esto, sin embargo, exige bastante control sobre la atmósfera que rodea el hierro, lo cual no es nada fácil en un horno primitivo y exige experiencia y habilidad por parte del operador del proceso. Lo habitual era obtener como resultado una lupia con porciones más carburizadas que otras, que al final darían lugar a lingotes más acerados que otros.

Otra manera de obtener acero era carburizar el hierro tras haberlo sacado del horno, en una operación

independiente. Para ello se parte del lingote o preforma de hierro y se somete de nuevo a las condiciones de reducción indicadas durante un tiempo variable para propiciar la introducción de carbono en el material. Este proceso, si se llevaba a cabo a una cierta escala, podía producir acero en cantidades apreciables, como alternativa a la obtención por reducción directa, pero lo cierto es que con frecuencia el artesano es capaz de realizar él mismo carburizaciones superficiales (un proceso que se conoce también como cementación) sobre porciones de metal o sobre una pieza ya acabada y que se quiere endurecer. Basta con que se verifiquen las condiciones a nivel local, lo cual se puede hacer en una simple fragua.

Es importante tener en cuenta que este proceso es reversible (descarburización), y que si la atmósfera que rodea el metal es rica en oxígeno en vez de en CO, como por ejemplo bajo la acción directa del flujo de aire, el carbono es arrancado de la superficie del acero, dejando sólo hierro.

Es por la necesidad de mantener el equilibrio entre todos estos procesos de reducción/oxidación, carburización/decarburización que la obtención de acero mediante el proceso de reducción directa no es una tarea fácil. Pero éste método y la carburización/cementación serán las únicas fuentes de acero en la antigüedad, hasta que ya bien entrada la edad media, con la obtención de hierro fundido, se desarrollen otros sistemas. Pero todo esta dificultad hace fácil entender porqué el acero se consideraba un material más valioso que el hierro.

El hierro y el acero tienen además la capacidad de unirse entre sí y a sí mismos mediante un proceso termomecánico conocido como soldadura a la calda o a la forja, que consiste en calentar las dos piezas de metal que se quieren unir a una cierta temperatura (que puede estar entre el 50% y el 90% de la temperatura de fusión del material), ponerlas en contacto y golpearlas para que hagan presión entre ellas. La combinación de calor y presión produce un fenómeno de difusión entre los átomos de hierro de ambas superficies, dando como resultado la unión de las piezas, lo cual permite unir varios trozos de metal para hacer uno mayor, o de combinar hierro y acero en una misma pieza a partir de elementos separados. Para evitar que el óxido que se forma en el hierro al calentarlo impida que las superficies entren en contacto directo, dificultando la unión, se usan sustancias a modo de fundente (arena, por ejemplo, por su riqueza en sílice), de manera que con la temperatura se combinan con los óxidos y se licúan, disolviéndolos. Al golpear, el líquido se expulsa por la fuerza del impacto y las superficies limpias entren en contacto y se unen.

3. EL ESTUDIO DE LA TECNOLOGÍA DEL HIERRO.

El estudio de los restos arqueológicos combinado con el análisis de los restos de producción y de los elementos féreos de la cultura material nos proporciona información útil sobre cómo es la metalurgia del hierro en cada contexto geográfico y cronológico. Pero estos datos poseen también una dimensión antrópica que relaciona los procesos tecnológicos con la percepción que tenían de ellos sus usuarios. Se plantean así una serie de cuestiones que pueden servir de guía a la hora de planificar la adquisición de datos y de diseñar experimentos, marcando con la búsqueda de respuestas un camino a seguir en el estudio de la tecnología del hierro.

Así, en el campo de la percepción, los datos indican que históricamente se distingue entre hierro y acero, al principio de manera poco homogénea, pero con consistencia creciente a medida que transcurre el tiempo y el conocimiento empírico se crea, se asienta y se transmite. Y lo que distingue un material de otro, lo que se intenta maximizar en cada caso, son sus propiedades mecánicas (Callister 1995: 112-156). Esto queda reflejado, además de en las fuentes escritas cuando existen (Biringuccio, *et al.* 1942; Agricola, *et al.* 1992), en el hecho que los análisis de las piezas nos indican que cada material tiende a usarse allí donde se aprovechan mejor esas propiedades mecánicas (ver por ejemplo Williams (2003, 2012) para el caso del armamento). El hierro es más dúctil y maleable, y también más resiliente. El acero por su lado es más duro y más tenaz, y además se puede templar. Eso significa que, por ejemplo, el hierro es más apropiado para trabajarse en frío, y aguanta mejor los impactos, mientras que el acero soporta mejor las cargas y las deformaciones, y su mayor dureza (que se puede aumentar enormemente gracias al templado) lo hace particularmente adecuado para los filos y las puntas de las armas y herramientas. Por otro lado, el aumento de la dureza del acero templado aumenta también su fragilidad, y en cualquier caso ya hemos visto que es un material más difícil de obtener que el hierro.

Con todo esto, ¿podemos decir que el acero es mejor que el hierro? ¿Qué tiene más calidad? Obviamente no. La calidad no es un valor absoluto, sino sometido a la circunstancia. Cada material se usa con objetivos distintos, y su calidad dependerá de la función del objeto que queramos fabricar y de la capacidad que tengamos para hacerlo, y vendrá determinada por factores como la accesibilidad a materias primas, el coste económico o el conocimiento tecnológico del que se disponga (Gener 2011). En resumen, el uso de cada material es el fruto de una decisión técnica, que viene condicionada por una gran cantidad de factores, no todos tecnológicos.

Esto nos deja con una cantidad considerable de preguntas asociadas a la producción y utilización de los materiales férricos, algunas de ellas perfectamente contestadas en según qué épocas y lugares, pero sin una respuesta clara en otras, sobre todo cuando intentamos aproximarnos al estudio de las etapas más antiguas o de las zonas geográficas con escasez de fuentes documentales. Preguntas como, ¿qué factores influían en la elección de los minerales? ¿Qué peso tenía el rendimiento del proceso frente a la accesibilidad del mineral? En este sentido ¿se comerciaba con minerales particularmente aptos para el proceso? ¿Hasta qué punto resultaba eso rentable?

Y el acero, ¿se producía sólo por el método directo? ¿De manera intencionada, buscando un resultado concreto, o se limitaban a seleccionar el resultado de procesos sobre los que se tenía poco control? ¿Se carburizaba hierro en bruto como parte de un modelo de producción, que comercializaba los dos productos diferenciados, o por lo contrario se hacía a pequeña escala, bajo demanda y probablemente por parte de los últimos operarios de la cadena de fabricación del objeto, los herreros? ¿Se encargaban estos últimos de carburizar el acero en bruto en las fraguas, o cementaban piezas producidas? ¿O ambas cosas, en función de la necesidad del momento? ¿Hasta qué punto se controlaba la cantidad de carbono introducida en el metal? ¿El acero producido por el proceso directo y el que se obtenía carburizando en fragua, se percibían como distintos? ¿Qué papel jugaban otras maneras de obtener un hierro más duro, como el endurecimiento por martilleado en frío o el uso de hierro fosfórico?

Está claro que la tecnología tenía fundamentalmente una base fenomenológica y empírica. ¿Cómo se adquiere y se mejora este conocimiento? ¿Aparece en un sitio y se transmite, o surge en diferentes puntos que comparten condiciones parecidas y que necesitan resolver problemas similares? Y si se transmite, ¿cómo lo hace? ¿Por influencias culturales? ¿Por intercambio entre expertos? Si detectamos avances tecnológicos parecidos en áreas diferentes, ¿cuándo podemos hablar de relaciones y cuando de desarrollo convergente?

Y todo esto nos lleva también a preguntarnos ¿qué sabemos del control que tenían sobre lo que trabajaban? ¿Cuánto del producto final, que es lo que estudiamos, es fruto de la circunstancia y cuánto de la intencionalidad? ¿Cómo se pueden percibir en cada época los fenómenos físico-químicos (temperaturas, reacciones, cambios de estado...) que gobiernan la aplicación de esta tecnología, para poder responder a ellos, adaptarse, controlarlos y optimizarlos? Es decir, hasta qué punto sabían lo que hacían? ¿Podemos averiguar qué partes de los procesos y de los productos son intencionales y cuáles accidentales? Es más, ¿cuánto esfuerzo se dedica a mejorar la calidad del objeto o a la optimización de esos procesos? ¿Qué factores (sociales, culturales, económicos, etc.) gobiernan la voluntad de optimización?

Todas estas preguntas involucran cuestiones tecnológicas, históricas y socioculturales. Y en general todas ellas son preguntas generales pero que exigen respuestas locales, porque probablemente tengan escalas geográficas y cronológicas particulares a la hora de formularlas, con lo que las estrategias para buscar las respuestas deberán adaptarse también de manera particular.

Afortunadamente los instrumentos que tenemos para contestarlas son también variados. Según el caso, la arqueología no ofrece herramientas como la posibilidad de evaluar la contextualización, elaborar tipologías y, en general, proporcionarnos multitud de elementos para llevar a cabo estudios comparativos. La documentación, además de proporcionar datos directos, también ofrece una valiosa perspectiva sobre el contexto sociocultural y sobre la percepción que se tiene en cada momento de los diversos elementos que queremos estudiar. Y las técnicas instrumentales nos permiten ahondar en los aspectos más técnicos. La metalografía (por microscopía óptica o electrónica) nos permite estudiar la microestructura del metal, su composición, hacer proyecciones sobre sus propiedades mecánicas y establecer a qué tipo de procesos termomecánicos se ha sometido. Las diversas técnicas espectroscópicas, muchas de ellas no destructivas, nos permiten obtener datos muy específicos sobre composición, estructura cristalina o el estado de degradación del material. Los ensayos mecánicos, en originales o en réplicas bien caracterizadas, nos dan una idea de las propiedades mecánicas en cada caso. Los análisis de Carbono-14 nos proporcionan datos sobre cronologías, mientras que los análisis de isótopos de elementos caracterizadores (como el osmio o el estroncio), que aún no están tan desarrollados como los de isótopos de plomo pero en los que se está trabajando intensamente, permiten empezar a considerar la posibilidad de poder ligar las piezas a sus centros de producción y configurar así redes de intercambio. Mención especial merecen los análisis aplicados a las escorias, que pueden proporcionar información muy valiosa sobre un amplio rango de factores. Así, en el caso de las escorias de producción se pueden obtener datos sobre la temperatura alcanzada en el horno, la eficiencia del proceso, el tipo de materia prima empleada o las reacciones químicas que se han producido. Las escorias de transformación o de forja dan indicaciones sobre la pérdida de metal en estos procesos, el grado de refinamiento del material, la composición del producto final o el uso de fundentes. Las escorias atrapadas en el mismo metal pueden revelar información sobre su origen geográfico, a través de elementos traza y estudios isotópicos, así como sobre los procesos de producción y transformación a los que ha sido sometido.

Y por encima de todo esto, la experimentación, sustentada en los datos disponibles y diseñada cuidadosamente para responder a cuestiones concretas, nos permite comprobar de manera empírica muchas de las hipótesis que se formulan a partir de los resultados obtenidos, lo cual proporciona gran solidez al desarrollo de los estudios.

Con todo esto a nuestra disposición, lo único que hace falta para avanzar en nuestro conocimiento de la metalurgia del hierro es una buena planificación, con una sistematización de la obtención de datos (analíticos, arqueológicos o históricos, sin distinción) y un buen diseño y ejecución de experimentos, todo lo cual debe conducir a poder realizar cómodamente los estudios comparativos imprescindibles para ir construyendo el mapa del impacto de este tipo de metalurgia en cada momento y en cada lugar.

4. A MODO DE CONCLUSIÓN.

En nuestro país, los trabajos arqueométricos sobre la metalurgia del hierro se centran sobre todo en sus etapas más tempranas, estudiando su introducción y desarrollo en el contexto de las culturas prerromanas de la península ibérica. El panorama generalizado que estos estudios nos dejan para la edad del hierro es el de un control desigual de esta tecnología (Lorrio *et al.* 1999: 170-172; Rovira 2000: 216-217). Así, la arqueometalurgia nos indica que en este periodo se conocen las diferencias entre hierro y acero, se sabe soldar a la calda y unir los dos tipos de materiales para combinar sus propiedades, se sabe carburizar y se sabe templar cuando hace falta. Pero también queda claro que este conocimiento no siempre se aplica de forma óptima en cada situación, dando lugar por ejemplo a armas de filos puramente de hierro, como el caso de la falcata del Cerro de la Peladilla (Lorrio, *et al.* 1998-1999). Esta tecnología se va volviendo cada vez más consistente a medida que el conocimiento empírico se va creando, asentando y distribuyendo, pero este proceso de consolidación también se produce de manera desigual hasta bien entrada la edad media (La Salvia 2000; Williams 2012).

Sin embargo, lo que el conjunto de análisis disponible hasta el momento sí pone en evidencia es que estamos frente a unos mecanismos complejos de gestión de los recursos, en un contexto de convivencia geográfica y cronológica de diversos niveles tecnológicos que ofrecen la posibilidad de implementar soluciones distintas a problemas similares. Para su comprensión necesitamos, entre otras cosas, trazar los canales de transmisión del conocimiento técnico, y probablemente relacionarlo con las diversas vías potenciales de adquisición y desarrollo de la tecnología de producción y trabajo del hierro en el territorio de la Península Ibérica (Pons i Brun 1986-87; Almagro-Gorbea 1993), de manera que más allá de las clásicas influencias orientalizantes y centroeuropeas (fenicios, celtas hallstáticos, La Tène, etc.) se hace imprescindible entender como interaccionan estos factores con las condiciones y las culturas locales (Renzi *et al.* 2013), y extender el campo de estudio a la romanización y la Edad Media.. Esto debería permitir, para cada época y para cada contexto geográfico, la identificación y

caracterización de ciertas identidades tecnológicas que resultan una herramienta útil a la hora de contribuir a la difícil tarea de desentrañar el entramado de relaciones entre las diversas culturas y sociedades peninsulares y de éstas con sus vecinos europeos y mediterráneos.

5. BIBLIOGRAFÍA.

Agricola, G.; Andreu Peón, C. y Paredes, J. C.

1992 *De re metallica : de la minería y los metales*, 2a ed edn., Unión Española de Explosivos, Madrid.

Almagro-Gorbea, M.

1993 “La introducción del hierro en la Península Ibérica. Contactos precoloniales en el Período Protoorientalizante”, *Complutum* 4, 81-94.

Armada Pita, X. L.; Comendador Rey, B. y García-Vuelta, Ó.

2008 ‘La investigación arqueométrica sobre la metalurgia de Galicia: una aproximación a su trayectoria y estado actual’, en Rovira Llorens, S., García Heras, M., Gener Moret, M., y Montero Ruiz, I. (eds.), *Actas del VII Congreso Ibérico de Arqueometría (Madrid, 8-10 octubre 2007)*, Quadro, Madrid, 410-431.

Biringuccio, V.; Smith, C. S. y Gnudi, M. T.

1942 *The pirotechnia of Vannoccio Biringuccio*, American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, New York.

Buchwald, V. F.

2005 *Iron and steel in ancient times*, Historisk-filosofiske Skrifter 29, Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab, Copenhagen.

Callister, W. D.

1995 *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*, 2 vols., Reverté, Barcelona etc.

Costa Caramé, M. E.

2008 ‘Estado actual de la investigación arqueometalúrgica en España: una aproximación bibliométrica’, en Rovira Llorens, S., García Heras, M., Gener Moret, M., y Montero Ruiz, I. (eds.), *Actas del VII Congreso Ibérico de Arqueometría (Madrid, 8-10 octubre 2007)*, Quadro, Madrid.

Craddock, P. y Lang, J.

2005 “Charles Dawson’s cast-iron statuette: the authentication of iron antiquities and possible coal-smelting of iron in Roman Britain”, *Historical Metallurgy* 39 (1), 32-44.

Gener, M.

- 2011 'Integrating form, function and technology in ancient swords. The concept of quality', en Uckelmann, M. y Mödinger, M. (eds.), *Bronze age warfare : manufacture and use of weaponry*, BAR international series 2255, Archaeopress, Oxford, 117-123.

La Salvia, V.

- 2000 'Use of five senses and technical evaluation: metallurgists between tradition and innovation in preindustrial Europe', en Pétrequin, P., Fluzin, P., Thriot, J., y Benoit, P. (eds.), *Arts du eu et productions artisanales*, Éditions APDCA, Antibes.

López-Romero González de la Aleja, E. y Montero Ruiz, I.

- 2006 'Archaeometry and the international evolution of studies on metallurgy: a bibliometrical perspective', en Pérez Arantegui (coord.), J. (ed.), *34th International Symposium on Archaeometry*, Institución "Fernando el Católico" (C.S.I.C.). Excma. Diputación de Zaragoza, Zaragoza, 195-200.

Lorrio, A. J.; Gómez Ramos, P.; Montero, I. y Rovira, S.

- 1999 'Minería y metalurgia celtibérica', en Burillo Mozota (coord.), F. (ed.), *IV Simposio sobre Celtiberos. Economía.*, Institución "Fernando el Católico". Excma. diputación de Zaragoza, Zaragoza, 161-180.

Lorrio, A. J.; Rovira, S. y Gago Blanco, F.

- 1998-1999 "Una falcata damasquinada procedente de la Plana de Utiel (Valencia): estudio tipológico, tecnológico y restauración", *Lucentum* XVII - XVIII, 149-161.

Montero Ruiz, I.; García Heras, M. y López-Romero, E.

- 2007 "Arqueometría: cambios y tendencias actuales", *Trabajos de Prehistoria* 64 (1), 23-40.

Olin, J. S.

- 1982 *Future directions in archaeometry : a round table*, Smithsonian Institution Press, Washington DC.

Perea, A.; Armbruster, B.; Montero Ruiz, I. y Rovira Llorens, S.

- 2008 'Arqueometalurgia: Historia y Tecnología', en Saiz Jiménez, C. y Rogerio Candellera, M. Á. (eds.), *La investigación sobre patrimonio cultural*, Red Temática de Patrimonio Histórico y Cultural (CSIC), Sevilla, 129-142.

Pleiner, R.

- 2000 *Iron in archaeology: the European bloomery smelters*, Archeologický ústav AV, Praha.

- 2006 *Iron in archaeology: early European blacksmiths*, Archeologický ústav AV, Praha.

Pons i Brun, E.

- 1986-87 "El principio de la metalurgia del hierro en Catalunya", *Zephyrus* 39-40, 251-263.

Renzi, M.; Rovira, S.; Rovira Hortalà, M. C. y Montero Ruiz, I.

- 2013 'Questioning research on early iron in the Mediterranean', en Humphris, J. y Rehren, T. (eds.), *The World of Iron*, Archetype, London, 178-187.

Rovira Llorens, S.

- 2000 "Continuismo e innovación en la metalurgia ibérica", *SAGVNTVM. Papeles del Laboratorio de Arqueología de Valencia*, Extra 3, 209-227.

Rovira, S. y Renzi, M.

- 2010 'Las operaciones pirometalúrgicas y sus subproductos', en Montero Ruiz (coord.), I. (ed.), *Manual de Arqueometalurgia*, Cursos de Formación Permanente para Arqueólogos 1, Museo Arqueológico Regional de la Comunidad de Madrid y Sección de Arqueología del CDL de Madrid Alcalá de Henares - Madrid, 87-122.

Smith, C. S.

- 1964 "The Discovery of Carbon in Steel", *Technology and Culture* 5 (2), 149-175.

Tylecote, R. F.

- 1992 *A history of metallurgy* 2nd edn., Institute of Materials, London.

Tylecote, R. F. y Gilmour, B. J. J.

- 1986 *The metallography of early ferrous edge tools and edged weapons*, B.A.R., Oxford.

Wagner, D.

- 1999 'The earliest use of iron in China', en Young, S. M. M., Pollard, A. M., Budd, P., y Ixer, R. A. (eds.), *Metals in Antiquity*, BAR International Series 792, Archaeopress, Oxford, 1-9.

Williams, A.

- 2003 *The knight and the blast furnace : a history of the metallurgy of armour in the Middle Ages & the early modern period*, Brill, Leiden.
- 2012 *The sword and the crucible : a history of the metallurgy of European swords up to the 16th century*, History of Warfare 77, Brill, Leiden, Boston.