

MIGUEL ÀNGEL FERRER ERÉS

LA METALURGIA IBÉRICA DEL HIERRO: UNA APROXIMACIÓN A TRAVÉS DE LA INTERPRETACIÓN ARQUEOMÉTRICA

This study proposes an approximation to the economy during the iberian period. Focusing our attention on the iron reduction process. To reach this conclusion metalographical and chemical analyses have been made over the remains of the iron and steel industry work, from the 3rd and 2nd century b.c. The purpose of the obtained results is focused to historical and cultural perspective.

I. INTRODUCCIÓN

En esta comunicación, proponemos una aproximación a la economía en el mundo ibérico y en concreto al área de actividades artesanales relacionadas con la metalurgia del hierro, centrándonos sobre todo en el proceso de reducción directa de mineral de hierro. Para lograr esta aproximación, contaremos con una serie de indicios recogidos en el yacimiento arqueológico y que corresponden a materias primas, residuos y el resultado (esponja ferrífera) de los procesos de producción siderúrgica de época ibérica.

La práctica totalidad de las piezas estudiadas han sido recogidas en prospección en la zona F del yacimiento de Los Villares (Caudete de las Fuentes, Valencia). Asentamiento de unas 10 Ha. que actuó como lugar central de un amplio territorio en época ibérica. Por acuñación de monedas en el s. II a.C. conocemos su nombre antiguo, *Kelin*. El hábitat se inicia en la primera mitad del s. VII a.C., prolongándose ininterrumpidamente hasta principios del s. I a.C. (Mata, 1991).

Los restos siderúrgicos examinados los encuadraremos cronológicamente, atendiendo a su situación dentro del yacimiento y a los materiales cerámicos asociados, y puesto que no aparece ningún fragmento cerámico anterior al s. III a.C. en superficie, podemos situar estos indicios metalúrgicos dentro del período Ibérico Pleno, s. III a s. II a.C. Es en este período del Ibérico Pleno que arranca desde la 2ª mitad del s. V a.C., en el que se puede empezar a vislumbrar, en estudios todavía referidos a zonas muy concretas, un hábitat jerarquizado

y organizado en territorios bien estructurados que perdurarán sin grandes cambios hasta la llegada de los romanos (Bernabeu *et alii*, 1987).

Creemos que revisten un especial interés la utilización de técnicas de prospección integradas en proyectos amplios de estudios del territorio, como método para la localización de afloramientos actuales y recogida de indicios metalúrgicos (como escorias, restos de paredes de horno, etc...) que por su poca espectacularidad son frecuentemente pasadas por alto, pero que sin embargo pueden llegar a dilucidar cuestiones tan importantes como situación y naturaleza de los talleres y su relación con diferentes hábitats y núcleos jerarquizados, así como la importancia y naturaleza de la producción metalúrgica. Además, el estudio de estos vestigios nos permitirá asociarlos a su correspondiente fase de la cadena de producción. En definitiva, del conjunto de datos que nos proporcionen estos restos arqueológicos se pueden realizar importantes inferencias culturales, económicas, sociales y de organización del trabajo en época antigua. Según Bonet *et alii* (1994): "(...) se constata que el emplazamiento no sólo obedece a cuestiones defensivas sino que se han de tener en cuenta las razones de estrategia económica como la proximidad a las vías de comunicación, las fuentes de materias primas y la explotación agrícola y ganadera".

Si pretendemos, como es el caso, realizar un estudio completo sobre la reducción de mineral de hierro en época protohistórica, tendremos en primer lugar que tener en cuenta el

conjunto de elementos que intervienen en ella: materias primas, combustible (carbón vegetal), mineral (óxidos de hierro), residuos de producción (escorias), residuos asociados (paredes de horno escorificadas) y productos (metales). Obligatoriamente tendremos que contar con los datos proporcionados por la arqueología experimental.

Para ilustrar esta interrelación entre economía agro-pastoril y tecnología de producción de hierro por reducción directa, podríamos citar fuentes antiguas, aunque tan alejadas en el tiempo y espacio como esta de La Ilíada (Canto XXIII-826): “¡Levantaos los que hayáis de entrar en esta lucha! La presente bola proporcionará al que venciere cuánto hierro necesite durante cinco años, aunque sean muy extensos sus fértiles campos; y sus pastores y labradores no tendrán que ir por hierro a la ciudad.”

Estas razones de estrategia económica están vinculadas íntimamente (para el período histórico que tratamos) con el dominio de la tecnología del hierro que aparecerá integrada completamente en la economía agrícola-pastoril. Prácticamente todo el utillaje agrícola se realizará en hierro durante el Ibérico Pleno (Pla, 1968; Sanahúja, 1971).

Sin duda las innovaciones tecnológicas en el ámbito de la metalurgia del hierro, tuvieron que producir un incremento en la productividad de los campesinos ganaderos (sin analizar asuntos como modelos de explotación y propiedad de la tierra), siempre contando con los bajos rendimientos de la agricultura antigua condicionada por la “ley de los rendimientos decrecientes” formulada por David Ricardo. También se verán favorecidos los factores de desarrollo urbano como la construcción, los transportes, el utillaje de otros artesanos, con un metal que por sus características se adapta bien y da un aceptable rendimiento. Con lo que observaremos un uso masivo de este metal refrendado por el registro arqueológico: clavos, herrajes para puertas y vigas, llantas y refuerzos para ruedas de carro, atalajes para los caballos y animales de tiro, herramientas para los distintos oficios, armas, etc. Es decir, se cumple la base fundamental para continuar con la innovación tecnológica: una demanda social y económica suficiente para aceptar y mantener el cambio, asumirlo y estimular la producción. No hay que olvidar que los enfoques del estudio de la metalurgia desde un ángulo técnico, están dando herramientas para avanzar en la explicación cultural de conjunto, que en definitiva es lo que pretende el arqueólogo; pero no podemos detenernos ahí y quedarnos en la simple recogida de datos por interesantes que éstos resulten a la larga. Cualquier metalurgia antigua está ligada a un modo de vida. La tecnología fue asimilada y utilizada para expresar una realidad social y económica (Rovira, 1997; Mohen, 1990).

Para la obtención de hierro durante toda la protohistoria, se utilizó la reducción directa en fase sólida del mineral (óxidos) en horno bajo, lográndose un metal con un alto contenido en carbón (acero). Las condiciones del horno habían de ser muy reductoras, también se debía contar con una salida para evacuar la escoria (contenida en el mineral) licuada, o bien contar, con un depósito para recibirla. El resultado de esta

operación es la lupia o esponja ferrífera (figs. 4 y 5), muy poco homogénea y con abundantes inclusiones de escoria, por lo que el mallado (para aglomerar el metal) y la forja eran etapas imprescindibles y fundamentales en la manufactura de hierro en este período histórico.

Este apretado resumen nos servirá como introducción a este trabajo. Se pueden encontrar explicaciones más detalladas en las obras de referencia citadas.

II. INSTRUMENTAL Y MÉTODOS UTILIZADOS

Para la caracterización de las muestras y su posterior adscripción a su correspondiente etapa de la cadena operativa de la producción de hierro se han utilizado los siguientes medios y técnicas:

Estudio metalográfico:

- Pulidoras DAP-5 y LABOPOL-5 de Struers.
- Cortadora Struers ACCUTOM 2.
- Lupa binocular NIKON SMZ - 10 A.
- Equipo de microfotografía NIKON SMZ - 10 A.
- Microscopio NIKON OPTIPHOT 100.

Microanálisis:

- Microscopio electrónico de barrido PHILIPS SEM 515.
- Detector EDAX ECON 4 con ventana de berilio.
- Microscopio “ambiental” PHILIPS XL 30 ESEM con videoimagen.

La metodología consistió en la realización, estudio e interpretación de probetas metalográficas obtenidas de los materiales arqueológicos, utilizando el microscopio óptico metalográfico y realizando microfotografías de las mismas.

El microanálisis realizado con el microscopio electrónico de barrido tiene la gran ventaja de no ser destructivo y proporcionar un análisis elemental instantáneo cuantitativo o cualitativo de la superficie de la muestra. Así como, permite realizar también observaciones metalográficas.

III. RESULTADOS DEL ESTUDIO ARQUEOMÉTRICO

Los minerales de hierro recogidos en prospección en diferentes yacimientos, una vez realizada su caracterización, concuerdan en su composición con los materiales y residuos de reducción directa, aunque hay que recordar que la composición de los materiales de construcción del horno también intervendrán en la composición de las escorias. Son minerales de hierro en forma de óxidos y óxidos hidratados (limonita, hematites parda, hematites roja) que precisamente son los únicos que pueden transformarse en hierro por reducción en horno bajo con carbón vegetal (las formas minerales carbonatadas y sulfuradas deberán ser transformadas en óxidos mediante un proceso de tostación, es decir, quemadas en un ambiente oxidante como el fuego de una hoguera de leña, p.e.). Otro aspecto a tener en cuenta en la investigación es el área de captación de estos recursos mineros, que aunque se suele comenzar afirmando en todas las publicaciones que estos recursos de mineral de hierro son de los más abundantes en la corteza terrestre, hay que tener en cuenta que la mena utilizable para este tipo de producción de hierro mediante

LA METALURGIA IBÉRICA DEL HIERRO: UNA APROXIMACIÓN A TRAVÉS DE LA INTERPRETACIÓN ARQUEOMÉTRICA

reducción directa sólo está constituida por la montera oxidada, es decir, la parte superficial del filón que sería explotada a cielo abierto y es de suponer que difícilmente encontraremos restos, al ser éstos fácilmente explotables y un recurso tradicional para la producción de hierro prácticamente hasta el s. XIX en algunos lugares de la península (procedimiento de la farga catalana).

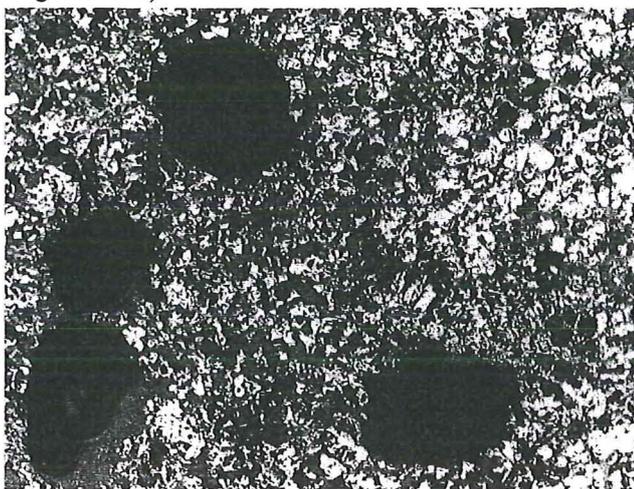


Figura 1: Escoria de sangrado de horno conteniendo gran cantidad de wuestita, óxido de hierro anhidro (FeO) (gránulos brillantes). El resto, fayalita, silicato de hierro anhidro (Fe_2SiO_4) y vidrio de relleno. 100 x . Ataque con nital al 2 %.

III.1. Residuos de la reducción directa del mineral de hierro

Los principales minerales que forman la escoria son la fayalita, silicato de hierro anhidro (Fe_2SiO_4), óxido de hierro anhidro (FeO) y vidrio de relleno.

Las escorias constituyen los residuos de la reducción directa. Son el resultado de la solidificación de los diferentes materiales licuados durante el proceso de reducción dentro del horno. Su examen, tanto a simple vista como en el laboratorio metalográfico, nos dará valiosas pistas sobre la tecnología de producción de hierro durante este período a varios niveles.

Tomando como ejemplo los materiales de que disponemos, comenzaremos hablando de las escorias. El aspecto exterior de esta escoria de colada o sangrado de horno, es la de un cordón sinuoso, con superposiciones, burbujas de degaseo y superficies lisas de color gris intenso. Su análisis nos da información sobre la posición de enfriamiento, que en este caso, tuvo lugar sobre una superficie ligeramente inclinada donde se enfrió esta colada con relativa rapidez, puesto que no dio tiempo al degaseo total quedando atrapadas muchas burbujas.

También podemos deducir de esta primera observación la tipología del horno. En este caso, se tratará de un bajo horno con solera ligeramente elevada y aberturas practicadas en la base que permitían evacuar la escoria.

Otro examen preliminar se puede llevar a cabo con un simple imán. Podemos comprobar, en este caso, que la escoria es magnética, lo que nos indica que es un producto de la

reducción de hierro y da una primera impresión de haber retenido gran cantidad de óxido de hierro en su composición, lo que indica un bajo rendimiento en la operación de reducción directa.

Igualmente, podemos distinguir a simple vista esta escoria de la producida en el siguiente proceso de refinado de la esponja ferrífera, dado que en este caso aparece muy fragmentada y en pequeños trozos muy angulosos producidos por intenso mallado.

Los restos de pared de horno escorificados, de los que también disponemos de muestras, resultarán asimismo, fácilmente distinguibles a simple vista por presentar una superficie más uniforme que la escoria de colada y ser su aspecto más vitrificado. Su parte interior conserva la apariencia terrosa y arenosa, sólo parcialmente fundida.

Entre los materiales recogidos contamos con otro tipo de escoria, que aunque en realidad pertenece a la etapa de refinado o de post-reducción de la esponja ferrífera, consideramos interesante hablar de ella a efectos de distinguirla de las de reducción. Este tipo de escorias es el que se produce en el hogar de forja cuando se desprenden las escorias superficiales que envuelven la esponja ferrífera y éstas quedan depositadas en el fondo del hogar de forja, adquiriendo una forma hemisférica. Es una escoria fayalítica, pero está acompañada de una alta proporción de óxidos de hierro, lo que le da su característico aspecto de hierro oxidado.

En el laboratorio, utilizando análisis químicos y el examen metalográfico, podríamos, en el caso de contar con suficientes datos, realizar el balance químico y deducir mediante cálculo la cantidad de mineral necesaria en la producción de una determinada cantidad de escoria (Serneels, 1995).

También podríamos comparar los resultados de los análisis de composición de los minerales disponibles en el yacimiento o su entorno con los de las escorias, verificando así su compatibilidad (Serneels, 1993).

En el siguiente paso de nuestro estudio, ya en el laboratorio metalográfico, la observación al microscopio permite comprobar que la muestra de escoria de sangrado (fig. 1) es una escoria fayalítica en la que se puede apreciar una enorme cantidad de gránulos de wuestita, los más brillantes en la imagen. Los gránulos grises son fayalita (silicato de hierro) y el resto más oscuro es vidrio de relleno.

La conclusión inmediata a la vista de esta superficie, es que nos encontramos ante una escoria de colada o de sangrado de horno, obtenida por reducción directa de mineral de hierro. La gran cantidad de hierro residual incluido en la escoria, en forma de óxido (wuestita), alrededor de un 80 %, nos da a entender que la reducción realizada en este bajo horno tuvo un rendimiento muy pobre, alrededor del 20 % del peso de mineral reducido.

El microanálisis elemental dio como resultado altos niveles de hierro en su composición, seguido por calcio, silicio y aluminio, como podemos apreciar en el espectro resultante (fig. 2). Es interesante comparar este espectro con el resultante del análisis elemental efectuado sobre la escoria más vitri-

19-NOV-99 18:21:11 SUPER QUANT
 RATE= 2936CPS TIME= 120LSEC
 FS= 6039/ 6039 PRST= 120LSEC
 A =muestra 7

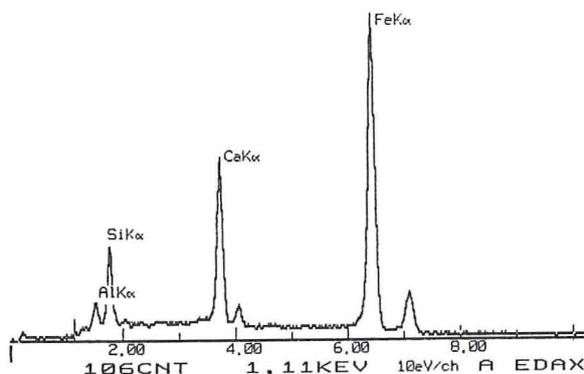


Figura 2: Espectro correspondiente a la escoria de sangrado.

ficada (fig. 3) que resulta prácticamente inverso, aunque los niveles de hierro encontrados confirman que participó en alguna fase de la reducción directa de mineral de hierro. Este tipo de escoria se forma en la pared del horno de reducción al fundirse parcialmente la arcilla arenosa que lo constituye, por lo tanto, su matriz es fundamentalmente silícea conteniendo poca cantidad de óxido de hierro.

En este apartado, es conveniente comparar los resultados de los rendimientos obtenidos con los obtenidos por experimentación y etnoarqueología, lo que nos permitirá, hacer cálculos, comparar y valorar el dominio de las técnicas y las habilidades de los artesanos pirometalúrgicos del periodo histórico que estamos estudiando.

Algunos ejemplos de experimentación con hornos de diferentes tipos centroeuropeos recogidos por Pleiner (1988), nos dan como resultado pobres rendimientos; para una sola operación de reducción, 15 - 18 % de hierro extraído del peso del mineral. No obstante, otros ejemplos de hornos dan buenos rendimientos, como los de la Bohemia Central en el s. II a.C. con un 30 % de hierro extraído del peso del mineral.

III.2. Los productos de la reducción directa del mineral de hierro

El producto principal obtenido tras la reducción directa del mineral de hierro en horno bajo será lo que llamamos esponja ferrífera (fig. 4), que es un aglomerado de partículas de hierro más o menos carburado y escoria, junto a otros elementos que han participado en el proceso de reducción dentro del horno y que no se han fundido por completo, como la ganga, restos de mineral y algún fragmento de carbón. Su estructura es heterogénea y porosa y su superficie es irregular. Una vez martillada y más compactada, se llamará lupia, será el paso previo al lingote.

La esponja, producto del bajo horno, es todavía un producto poco conocido (Serneels, 1997) del que existen escasos datos arqueológicos, etnográficos o experimentales descritos en la bibliografía.

Para este estudio disponemos de una esponja ferrífera recuperada en la zona F del poblado de Los Villares.

19-NOV-99 18:14:06 SUPER QUANT
 RATE= 3269CPS TIME= 120LSEC
 FS= 8705/ 8705 PRST= 120LSEC
 A =muestra 3

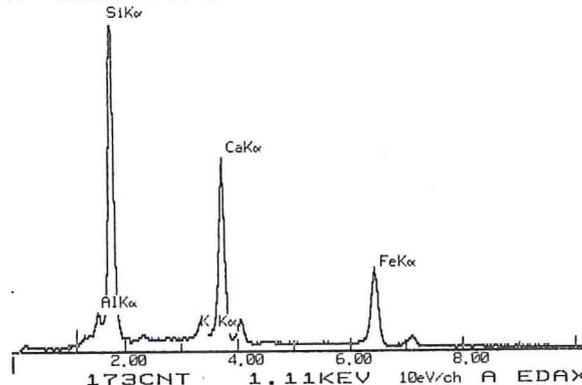


Figura 3: Espectro correspondiente a la pared de horno escorificada.

Son muchas y variadas las conclusiones a las que podemos llegar en un primer examen macroscópico de la pieza. Éste nos confirma el aspecto heterogéneo de la misma en su superficie exterior y en el interior al seccionarla (fig. 6). Esto nos habla de la variación de las condiciones termodinámicas en el interior del horno.

El aspecto exterior nos dará una idea aproximada de la composición general del metal contenido, puesto que la esponja será más compacta, cuánto más carburada esté y al contrario, será más esponjosa si su estructura es ferrítica. En nuestro caso es compacta.

También podemos inferir la estructura del horno que la produjo (lo que confirmará algunos datos obtenidos con el análisis de las escorias), puesto que este producto tan compacto y con poca cantidad de escoria adherida, necesita para su fabricación hornos con dispositivos para separar la escoria, bien sea por medio de fosa bajo el horno o bien con aberturas de sangrado practicadas en la base del horno.

Otra conclusión a la que llegamos es que la temperatura alcanzada tuvo que ser necesariamente muy alta para conseguir licuar la escoria y que ésta fluyese.



Figura 4: Esponja ferrífera.

Nos aporta otros datos importantes sobre la naturaleza del mineral, puesto que la menor presencia de escoria también estará relacionada con la mayor riqueza del mineral en óxidos,

LA METALURGIA IBÉRICA DEL HIERRO: UNA APROXIMACIÓN A TRAVÉS DE LA INTERPRETACIÓN ARQUEOMÉTRICA

o bien su enriquecimiento por tratamientos de concentración del mineral que comprenderían operaciones como el triturado, el tostado, el lavado y el batido.



Figura 5: Pequeñas esponjas ferríferas.

Por último, nos dará una primera impresión sobre los combustibles utilizados. En nuestro caso, restos de carbón adheridos a la esponja después de su determinación antracológica (realizada por S. de Haro), dan como resultado que el carbón utilizado en el horno de reducción se obtenía de la madera de pino (*Pinus Halepensis*), recolectada en las proximidades y que además nos proporciona interesantes datos medioambientales para el período estudiado, no menos importantes, puesto que en definitiva el resultado de la operación de reducción directa dependerá en gran medida del dominio que el metalurgo antiguo tuviera de las artes del fuego. Así, será el carbón vegetal, el que durante su combustión libere monóxido de carbono que reaccionará con el mineral reduciendo los óxidos de hierro. La temperatura y el tiempo de duración de la reacción determinarán la difusión del carbono dentro del metal, pudiendo llegar a producir acero.

El poder calorífico de los diferentes combustibles influiría indudablemente en su elección por el metalurgo antiguo. Las maderas duras como el roble o el haya proporcionan mayor rendimiento que las maderas tiernas, aunque los restos arqueológicos parecen indicar que los metalúrgicos utilizan la materia prima más accesible.

El carbón posee doble poder calorífico con relación a la madera correspondiente. Reducciones de hierro de tipo experimental lo confirman (Sarabia, 1994) y permiten hacernos una idea de la relación mineral-combustible necesarios para llevar a cabo la reducción directa, dando como resultado una proporción 1/2 favorable para el combustible.

En relación con este tema se nos abre otro campo de estudio, el relacionado con el impacto que la metalurgia antigua del hierro produjo en el paleoambiente y las posibilidades de aprovechamiento agrícola y ganadero de las sin duda amplias zonas deforestadas, como bien indican fuentes escritas antiguas tales como Diodoro de Sicilia (V, 13) quien ensalzó la riqueza de la isla llamada Aethaleia por el nombre griego del humo (*aithalos*) causado por los hornos de reducción del mineral de hierro, que ilustra el gran impacto sobre el medio ambiente. Estas fuentes también nos informan de la deforestación total de algunas zonas, como la isla de Elba en el s. V a.C. (Mohen, 1990).

El siguiente nivel de análisis, el estudio metalográfico y de composición elemental se realizó con los medios ya citados en el apartado de instrumental y medios.

La sección de una de las pequeñas esponjas (fig. 6) ilustra la heterogeneidad de estos productos de reducción directa, mostrando un interior poroso y con inclusiones de escoria, no obstante esta muestra es rica en metal y éste aparece compacto y relativamente carburado, con unos porcentajes de carbono que lo clasifican como un acero eutectoide.

Una imagen más detallada (fig. 7) nos muestra la estructura widmanstätten formada por ferrita y perlita con algunas inclusiones de escoria, lo que significa que estamos en presencia de un acero eutectoide en esta zona de la esponja. Al aumentar la temperatura a la que fue calentado el acero, aumentan las regiones de perlita y se forma gradualmente un dibujo triangular (estructura widmanstätten). Esto nos indica que el espécimen fue enfriado desde una temperatura muy alta. En el momento en que el metalurgo lo sacó de la base del horno, el calor de la esponja producía una luz amarillenta debido a la energía calorífica en torno a los 1.250 ° C. El enfriamiento fue razonablemente lento, al aire y sin ningún tratamiento mecánico.

En cambio otras zonas combinan el acero eutectoide (sólo perlita) con acero hipoeutectoide, como observamos en la figura 8 en la que apreciamos estructura celular con perlita y ferrita, y en la que podemos comprobar la diferencia de carburación entre diferentes áreas. En la parte inferior de la imagen, encontramos estructuras widmanstätten con perlita y ferrita, a medida que aumenta el carbono, algunos granos están compuestos sólo de perlita. En la imagen aparece también escoria.

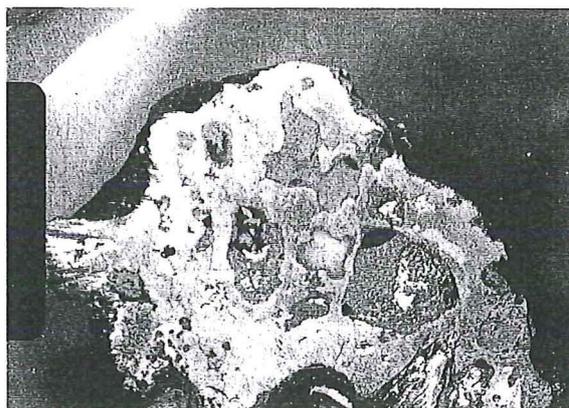


Figura 6: Sección de una esponja ferrífera. 15 x

No todos los productos estaban bien acabados. Éste es el caso ilustrado en la figura 9. La metalografía obtenida de una pequeña esponja excesivamente carburada, da directamente acero hipereutectoide. Se puede apreciar en la imagen bandas de cementita en forma acicular. La cementita (carburo de hierro) es el constituyente más duro de los aceros, aislada no se presenta más que en los productos que contienen más del 0'85 % de carbono. En la imagen es el constituyente más brillante,

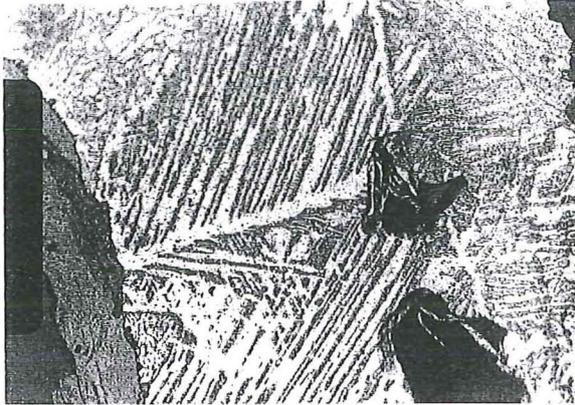


Figura 7: Perlita (láminas oscuras) y ferrita (láminas claras). Estructura widmanstätten. 100 x. Atacada con nital al 2 %.

las bandas más claras son cementita libre. También podemos observar las huellas dejadas por agujas de cementita al ser arrancadas durante el pulido metalográfico. La cementita se puede pulimentar en relieve por su dureza y es muy quebradiza. Estos datos nos demuestran que ésta sería una pieza de desecho, inutilizable para la forja por lo quebradiza y que presupone unas condiciones de enfriamiento muy rápido en una pieza que había salido del horno con fuerte carburación.

Por último, comentar la imagen de la figura 10 que consiste en una videoimagen obtenida con microscopio electrónico "ambiental" (E.S.E.M.) en la que podemos observar estructura widmanstätten de perlita y ferrita.

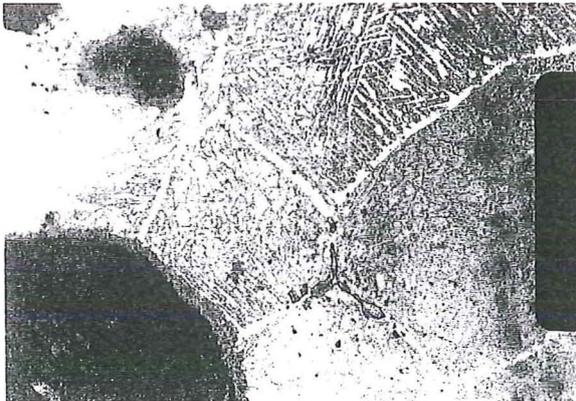


Figura 8: Estructura celular, áreas con perlita y ferrita en estructura widmanstätten y áreas compuestas únicamente por perlita. 100 x. Atacada con nital al 2 %.

Las técnicas de microscopía electrónica de barrido son muy adecuadas para este tipo de investigación metalográfica, ya que no es una técnica destructiva, proporciona imágenes topográficas de la muestra con gran resolución, gran profundidad de campo y mayor versatilidad que el microscopio óptico. Además si lleva acoplado el correspondiente detector, puede proporcionarnos un análisis composicional inmediato de la superficie que estamos observando. La visualización en

pantalla permite distinguir la distribución de fases cuyos elementos estén muy separados en el sistema periódico. Por todo ello, resulta una poderosa herramienta de trabajo utilizable por el arqueometalurgo.



Figura 9: Cementita en forma acicular (es el componente más brillante). 100 x. Atacada con nital al 2 %.

A modo de conclusión podríamos comentar que el estudio de estos materiales antiguos ha ratificado que en efecto se trataba de productos de la reducción directa de mineral de hierro en horno bajo y residuos asociados. Confirma también que era posible la producción durante el período histórico del Ibérico Pleno de aceros de diferentes "calidades" o grados de carburación por el método de reducción directa. Si bien al ser ésta una "producción artesanal", por fuerza encontraremos ejemplos fallidos, materiales excesivamente cementados "pasados en el horno", así como tasas de rendimiento de algunas hornadas, no excesivamente buenas. No obstante como ya hemos dicho, no tendríamos que considerar esto como "defectos", sino más bien una característica común a todo proceso

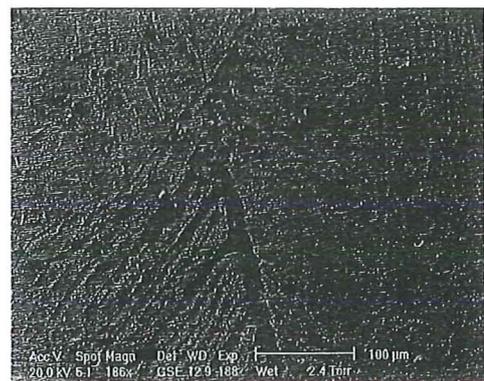


Figura 10: Videoimagen obtenida con M.E.B. Ferrita y perlita en estructura widmanstätten.

artesanal no estandarizado.

A partir del punto en que dejamos este resumen, tendríamos que seguir hablando de lo que a veces es llamado "segunda reducción", y que consiste en el siguiente obligado paso en la cadena operativa de la siderurgia antigua, la forja. Pero esto excedería los límites de este trabajo, centrado en el proceso de reducción directa del mineral de hierro.

LA METALURGIA IBÉRICA DEL HIERRO: UNA APROXIMACIÓN A TRAVÉS
DE LA INTERPRETACIÓN ARQUEOMÉTRICA

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro agradecimiento por la colaboración y ayuda prestada al Dr. S. Rovira, Departamento Conservación Museo Arqueológico Nacional; Dra. C. Mata, Departamento de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Valencia; Dr. J.V. Gimeno, Departamento Química Analítica de la Universidad de Valencia y Dr. A. Tato, Sección de Microscopia del S.C.S.I.E. de la Universidad de Valencia.

BIBLIOGRAFÍA

- AVNER, S.H., 1996: *Introducción a la metalurgia física*. McGraw-Hill. México, D.F.
- BERNABEU, J.; BONET, H.; MATA, C., 1987: Hipótesis sobre la organización del territorio edetano en época ibérica plena: el ejemplo del territorio Edeta/Lliria. *Iberos. I Jornadas sobre el Mundo Ibérico*, Jaén, 137-156.
- BONET, H.; GUÉRIN, P.; MATA, C., 1994: Urbanisme i Habitatge ibèrics al País Valencià. *Cota Zero*, 10, Vic, 115-130.
- BROTHWELL, D.; HIGGS, E., 1980: *Ciencia en arqueología*. Fondo de Cultura Económica. Madrid.
- GREAVES, R.H.; WRIGHTON, H., 1979: *Metalografía microscópica práctica*. Urmo. Bilbao.
- KEHL, G. L., 1954: *Fundamentos de la práctica metalográfica*. Ed. Aguilar. Madrid.
- MATA, C., 1991: *Los Villares: origen y evolución de la cultura ibérica*. Serie Trabajos Varios del S.I.P., 88, Valencia.
- MOHEN, J. P., 1990: *Métallurgie Préhistorique. Introduction à la Paléoméallurgie*. Masson, Paris.
- PLA, E., 1968: Instrumentos de trabajo ibéricos en la Región Valenciana. *Estudios de Economía de la Península Ibérica*, Ed. Vicens Vives, Barcelona, 143-190.
- PLEINER, R., 1988: Les primeres produccions de ferro a l'Europa Central i Oriental. *Cota Zero*, 13, Vic, 71-84.
- ROVIRA, S., 1997: Metodologia per a la investigació arqueometal·lúrgica. Una revisió crítica. *Cota Zero*, 13, Vic, 9-18.
- ROVIRA, S.; GÓMEZ RAMOS, P., 1998: Metalografía: Realización e Interpretación. *Arqueometalurgia del bronce. Introducción a la metodología de trabajo*, *Studia Archaeologica*, 86, Valladolid, 69-80.
- SANAHÚJA, M. E., 1971: Instrumental de hierro agrícola e industrial de la época ibero-romana en Cataluña. *Pyrenae*, 7, Barcelona, 61-110.
- 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: Archéométrie des scories de fer. Recherches sur la sidérurgie ancienne en Suisse occidentale. *Cahiers d'Archéologie Romande*, 61, Lausanne.
- SERNEELS, V., 1995: À propos de quelques scories: Le fer en Suisse romande. *Paléoméallurgie du fer et cultures, Symposium international*, 21-28.
- SERNEELS, V., 1997: L'estudi dels rebutjos metal·lúrgics i la seva aportació a la comprensió de la indústria del ferro. *Cota Zero*, 13, Vic, 29-42.