

CARACTERIZACIÓN DE ESCORIAS DE ÉPOCA ROMANA POR MEDIO DE LA MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

Pablo Gómez Ramos⁽¹⁾ y Salvador Rovira⁽²⁾

Resumen

En este trabajo se presentan algunos análisis realizados a escorias de época romana de la Península Ibérica mediante la microscopía electrónica de barrido. Dicha técnica permite, además del análisis compositivo de los materiales, concretar el tipo de escoria y también de producción metalúrgica en la que tuvo origen. La presencia de determinados elementos discriminatorios en estos silicatos de hierro, variedad de estructuras microscópicas (wustíticas, fayalíticas...) utilización de fundentes, posibles fuentes de aprovisionamiento de materias primas, temperaturas de fluidificación de las escorias, etc., son algunas de las preguntas que actualmente se intentan explicar mediante modernas y sofisticadas técnicas de análisis.

Palabras clave: escorias romanas, escorias de reducción, escorias de forja, microscopía electrónica.

1. INTRODUCCIÓN

El legado de objetos metálicos aportado por los romanos es tan amplio y variado que durante mucho tiempo la investigación dejó al margen el estudio de los restos implicados en su producción. Entre los residuos dejados en la obtención de metales, ocupa un papel fundamental las escorias, no sólo por el elevado volumen de hallazgos, sino también por la importancia que tiene a la hora de conocer los procedimientos y el grado de pericia de los metalúrgicos romanos.

Actualmente en el estudio de las escorias, la microscopía electrónica se ha convertido en el método más utilizado y posiblemente también, el más eficaz para la definición concreta del tipo de escorias:

⁽¹⁾ Dpto. de Prehistoria y Arqueología. Universidad Autónoma de Madrid. Ciudad Universitaria de Canto Blanco. 28049 Madrid.

⁽²⁾ Museo Arqueológico Nacional. C/ Serrano, 13. 28001 Madrid. E-mail: srl@man.es.

A grandes rasgos, según la producción concreta del metal la primera división que puede establecerse es entre escorias de producción de hierro y escorias de producción de metales no férricos. A su vez, según el proceso de la cadena operativa existen escorias de reducción de minerales y escorias de post-reducción, obtenidas durante la fabricación del metal (escorias de forja de hierro, escorias de refinado, etcétera).

Un primer acercamiento, en la caracterización de tipos, viene dado por el examen morfológico externo. Según la textura, color, tamaño, peso, etc., y sobre todo, según la experiencia del excavador se podrá realizar una primera selección tipológica. Los dos tipos de escorias de reducción de minerales, independientemente si son minerales para la obtención de cobre, hierro, etc., son escorias de fondo de horno y escorias de sangrado. Ambas se diferencian fácilmente desde el punto de vista morfológico ya que las escorias de sangrado presentan siempre en el exterior signos claros de haber fluido en estado pastoso desde el interior hacia el exterior del horno. Bastante más difícil es la distinción entre los distintos tipos de escorias de post-reducción, sobre todo, en el trabajo del hierro, ya que suelen ser fragmentos amorfos de pequeño tamaño. Es aquí donde la microscopía y distintos métodos de análisis de laboratorio permitirán la discriminación entre unas y otras.

2. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE LAS ESCORIAS METALÚRGICAS

Todas las escorias de metal producidas en la Antigüedad son básicamente silicatos de hierro cristalizados, por lo que es necesario el empleo de la analítica para discriminar el tipo de metal, aunque la composición química de las mismas puede variar según el mineral y fundentes empleados y también según las condiciones y temperaturas del horno.

Entre los componentes mineralógicos más habituales destacan sobre todo silicatos, óxidos y metales [1]. El silicato dominante en las escorias tanto de producción de cobre como de hierro es la fayalita ($2\text{Fe}_2\text{SiO}_4$). Se forma por reacción del óxido ferroso (FeO) con la sílice (SiO_2) presente, bien en la ganga, bien en los fundentes añadidos. En determinadas condiciones se pueden formar distintos tipos de fayalita si se encuentran presentes otros óxidos como el de calcio (CaO) y magnesio (MgO), por sustitución del hierro. Tal es el caso del piroxeno hiperesteno $[(\text{Fe},\text{Mg})_2\text{Si}_2\text{O}_7]$ y la hedenbergita ($\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$). Otros silicatos son el piroxeno $(\text{Fe},\text{Zn},\text{Mn},\text{Mg})\text{O}\cdot\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$, la willemita (Zn_2SiO_4 o $2\text{ZnO}\cdot\text{SiO}_2$) y la monticellita $(\text{Fe},\text{Zn},\text{Mn},\text{Mg})\text{O}\cdot\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$. Los silicatos de la familia de los feldespatos, en especial la anortita ($\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$) también se encuentran a veces en las escorias.

Muy común en escorias de hierro pero también puede existir en escorias de cobre, estaño o plomo es la presencia de distintos tipos de óxidos. Los principales óxidos de hierro son la wustita (FeO), magnetita (Fe_3O_4), hematites (Fe_2O_3) y espinel (complejo formado por óxidos de Zn, Mn, Mg, Fe y Al), etc. Los óxidos del tipo de la magnetita tienen puntos de fundición relativamente elevados y su presencia en la escoria

tiende a hacerla más viscosa, aumentando las pérdidas de metal por arrastre [2]. Se forman en ambientes oxidantes del horno, cerca de la boquilla de las toberas, cuando los fundentes son excesivamente ricos en óxido de hierro (trabajo del cobre), y su presencia en la escoria se delata por tener propiedades magnéticas, siendo atraídas por el imán.

En todo proceso de fundición es imposible evitar la formación y pérdida de parte de metal en las escorias, perfectamente observables a través del examen microscópico. Así, las escorias de cobre presentan normalmente inclusiones de gotitas o glóbulos metálicos de tamaño variable. Lo mismo ocurre con las escorias obtenidas en la producción de hierro, plomo o plata. Debido a que tanto las escorias de obtención de hierro como las de cobre son principalmente silicatos y óxidos de hierro, la aparición de glóbulos de cobre puede servir como argumento caracterizador del tipo de producción metálica obtenida. El hallazgo de una cantidad excesiva de metal en la escoria es indicio de una escorificación deficiente (inadecuada composición de fundentes) o de una temperatura del horno por debajo de la necesaria para conseguir una buena fluidificación de la escoria.

Por lo tanto, silicatos, óxidos y restos de metal son moneda corriente en la analítica de cualquier tipo de escoria. Existe no obstante, una presencia muy clara que permite diferenciar y por lo tanto, caracterizar los distintos tipos de escorias.

3. MUESTREO DE MATERIALES ROMANOS

Desde el punto de vista documental presentamos una selección de escorias diversas de yacimientos romanos en Hispania enclavados en las provincias de Ciudad Real, Gijón y Cádiz que han sido analizadas mediante microscopía electrónica de barrido. El microscopio es un modelo XL 30 de Philips, con fuente de wolframio, detectores de electrones secundarios y retrodispersados, alcanzando un vacío de 3×10^{-6} torr. El análisis químico es por energía dispersiva de rayos X, con detector de Si-Li y analizador DX4i de EDAX. Equipo operado por Dña. Esperanza Salvador (Servicio Interdepartamental de Investigación de la Universidad Autónoma de Madrid).

Morfológicamente las escorias romanas de Ciudad Real y Gijón responden al tipo de escorias de sangrado, es decir, obtenidas durante el proceso primero de reducción de los minerales y que fueron evacuadas fuera del horno. Su salida en estado pastoso ha dejado marcas claras en forma de canales como puede apreciarse en la figura 1. Por su parte, las escorias de Cádiz tienen forma de cuenco y son los restos depositados en el fondo de la fragua mientras se forjan esponjas o lupias de hierro (figura 2). Exteriormente no se aprecian diferencias significativas entre las dos escorias de sangrado, sin embargo, los análisis compositivos (tabla 1) discriminan distintos modelos de producción.

Las escorias de Ciudad Real junto a los componentes más o menos comunes en todas las escorias, como aluminio, calcio o manganeso tienen como elementos particulares óxidos de plomo (3,79 y 3,49%) y azufre (3,34 y 3,14%) que demuestran que

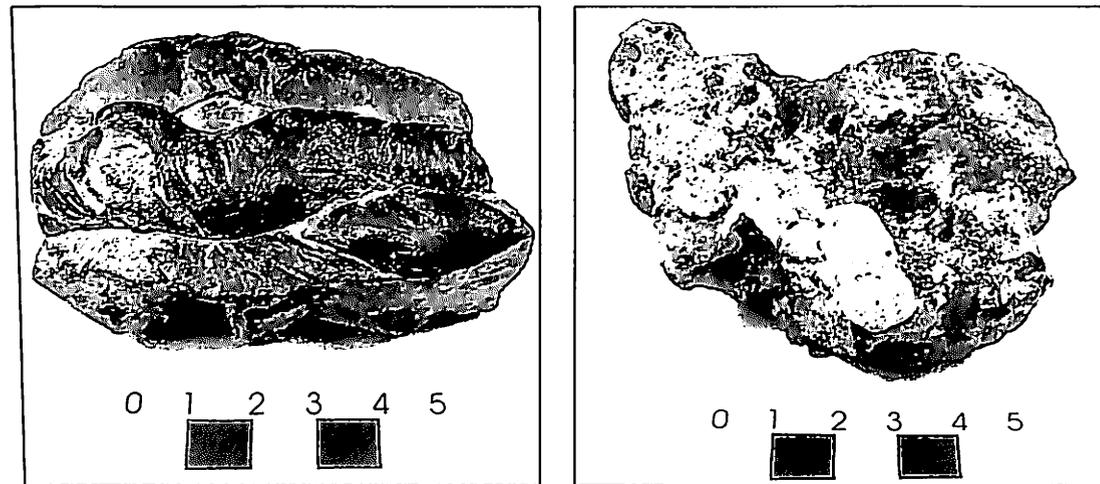


Figura 1. Escoria de sangrado de plomo.

Figura 2. Escoria de forja de hierro de Ciudad Real. Cádiz.

Tabla 1. Análisis generales de escorias de época romana (% en peso).

Localización	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	TiO ₂	CaO	MnO	FeO	P ₂ O ₅	SO ₂	PbO	BaO	Anál.
Ciudad Real	4,18	20,70	1,29	0,19	0,93	1,29	62,38	1,12	3,34	3,79	0,79	44
Ciudad Real	4,17	19,71	1,36	0	1,14	1,13	65,86	0	3,14	3,49	0	55
Gijón	6,30	18,63	1,54	0	0,69	2,46	70,38	0	0	0	0	2.609
Cádiz	0	5,40	0	0	0,89	0	93,71	0	0	0	0	14
Cádiz	0	10,29	0	0	0	0	89,71	0	0	0	0	15

ambas son desechos del laboreo de minerales sulfurados para la obtención de plomo. En cambio, la escoria de Gijón, se vincula directamente con reducción de minerales de hierro. También las dos muestras de Cádiz, son restos de trabajo de forja de hierro y la mayor diferencia con los resultados de Gijón se cifran en los porcentajes de FeO, mucho más elevados en las escorias de forja que en las de reducción y cuya causa explicaremos un poco más adelante.

La técnica de la microscopía electrónica brinda más posibilidades a través de análisis puntuales que permiten conocer la composición mineralógica concreta de cada elemento formativo. Ya hemos señalado anteriormente la elevada diferencia que existen en los contenidos de hierro entre las escorias de sangrado y las escorias de forja y que son observables a través de las estructuras de cada una de ellas. Las primeras, sobre todo, las muestras de Ciudad Real, se aproximan mucho a la escoria fayalítica pura: un 60% de SiO₂ y 40% de FeO, que funde a poco más de 1.100 °C. Esto indica que en los hornos de reducción de mineral se estaban dando buenas condiciones reductoras con temperaturas del orden de 1.300 °C que permitieron el paso de mineral a metal. Las estructuras aportadas por el microscopio de la escoria 44 (figura 3) dibujan campos fayalíticos con segregados de color blanco que son sulfuros de plomo (10,25% S;

86,86% Pb; 2,89% Fe) y segregados de gris claro que son sulfuros de plomo y hierro (32,49% S; 31,48% Pb; 36,03% Fe). Prácticamente idénticas son las fotografías para la escoria 55 (figura 4) con un campo homogéneo de fayalita y segregados de color más blanco de azufre y plomo. Los análisis de los cristales de los silicatos de hierro de ambas muestras no han dado plomo, lo que indica que el metal quedaba alojado en el vidrio de relleno sin reaccionar con la sílice y el hierro.

Las escorias de sangrado de hierro de Gijón (figura 5) muestran una estructura mayoritariamente fayalítica, típica de restos bien formados con paragénesis microscópicas muy homogéneas. La fayalita forma la matriz principal de este tipo de escorias y en este caso tiene un 74,59% de FeO y 20,72% de SiO₂ con cantidades destacadas de MnO, un 3,33% y constituyentes menores de Al₂O₃ (0,77%), K₂O (0,26%) y CaO (0,33%). No obstante, las condiciones reductoras varían según las distintas zonas del horno, lo que motiva que a veces aparezcan reoxidaciones puntuales, principalmente de wustita (FeO) y gotas metálicas, pruebas de que parte del hierro no fue reducido y se perdió inevitablemente en la escoria. Otra de las imágenes (figura 6) muestra un

campo de la misma escoria donde se observan grandes cristales de fayalita (color gris claro) en un vidrio de relleno donde aparecen también esqueletos de wustita (color blanco) y cristales de hercinita: óxido de hierro y aluminio (color gris oscuro) con una proporción de elementos mayoritarios del 66,17% de FeO y 31,26% de Al₂O₃. Otros componentes como calcio, cuando aparecen en porcentajes elevados indican un uso apropiado de los fundentes, y no es extraño encontrar trozos de sílice que debido a las elevadas temperaturas necesarias para su fundición, aparecen incrustados en la



Figura 3. Estructura de escoria de sangrado de Ciudad Real, donde se observa un campo fayalítico con restos blancos de plomo. 250x.



Figura 4. Estructura similar de otra escoria de sangrado de plomo de Ciudad Real. 250x.

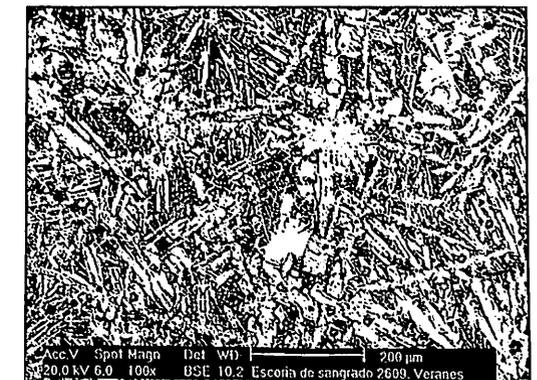
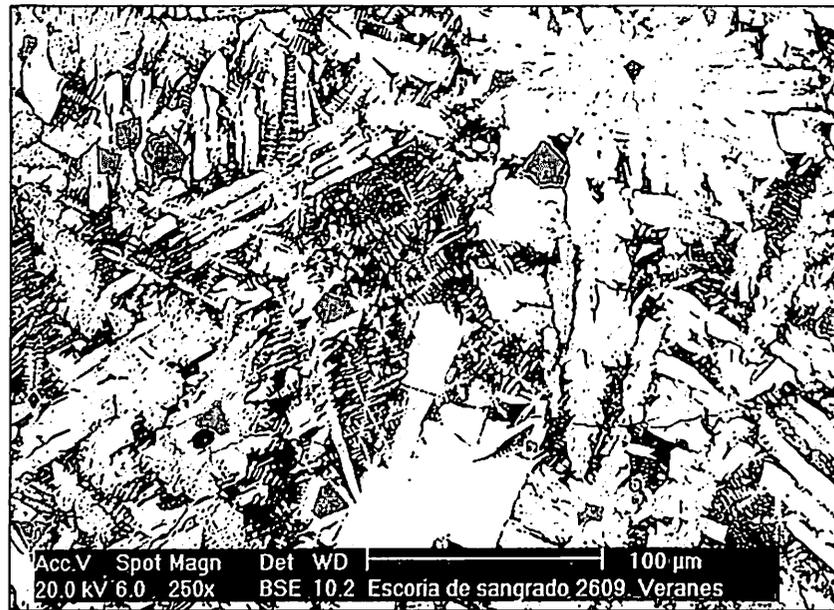


Figura 5. Estructura fayalítica de una escoria de sangrado de hierro de Gijón. 100x.

Figura 6. Campo de la escoria de sangrado de Gijón donde se observan junto a cristales grises de fayalita, agregados dendríticos de wustita de color blanco y cristales de hercinita de color más oscuro. 250x.



matriz de la escoria. Utilización de fundentes que es apta, siempre que los minerales de origen sean poco silicatados ya que en caso contrario su adición eleva innecesariamente la temperatura de fusión hasta casi 200 °C más [3].

Por el contrario, las escorias de forjado de hierro, aunque se encuentran los mismos minerales que en las escorias de reducción, los porcentajes son muy distintos. En este caso son básicamente óxidos de hierro con una cantidad que supera a veces el 90% de hierro como hemos visto en los análisis generales de dos escorias de forja provenientes de Cádiz y que quedan reflejadas también en las figura 7 y 8. Aquí entran en juego otros condicionantes. El ambiente oxidante de la fragua y el contacto de las escorias con el hierro metálico de la esponja, motiva que arrastren gotas de metal

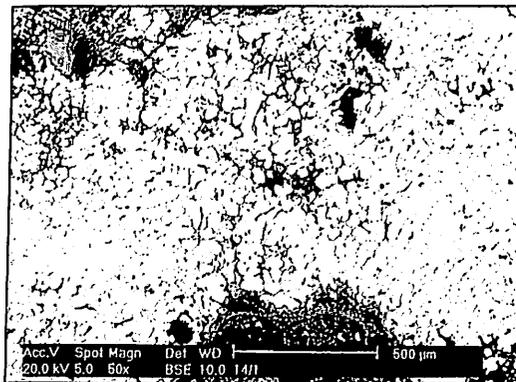


Figura 7. Estructura wustítica de una escoria de forja de Cádiz. 50x.



Figura 8. Estructura con zonas amplias de óxidos de hierro de otra escoria de forja de Cádiz. 50x.

en abundancia y sobre todo, que muchas de las escorias sufran un proceso claro de reoxidación, atestiguado a través de estructuras wustíticas y magnéticas, típicas de cristalizaciones rápidas. Es normal la aparición de fayalitas, muchas veces agrietadas que indican variaciones de temperaturas muy bruscas como son las que se producen en las fraguas con calentamiento y enfriamiento del metal en agua, aceite, etcétera.

Un gran número de análisis realizados en el extranjero, principalmente cuantitativos, a escorias de reducción y de forja de hierro de época romana coinciden con las apreciaciones presentadas [4 y 5]. Escorias de reducción constituidas por más del 90% de fayalita con algo de wustita, glóbulos metálicos, en un vidrio de relleno, generalmente un silicato de hierro, aluminio y calcio, y en algún caso potasio; todos elementos constituyentes de la ganga originaria de los minerales de partida y de los posibles fundentes empleados. Debido al ambiente reductor del horno en que son producidas encontraremos por lo general, indicios débiles de oxidación. Por el contrario, las escorias de procesos de post-reducción como son las obtenidas en trabajos de forja y refinado, aunque presentan una mineralogía similar a las de reducción tienen contenidos distintos. Esta diferencia se debe a que son producidas en condiciones más oxidantes, donde el agente reductor ya no es el monóxido de carbono sino el oxígeno, lo que conlleva a la formación de un mayor número de óxidos de hierro (wustita, magnetita, etc.) situados preferentemente en las partes más superficiales de la escoria. Es muy frecuente también la aparición de metal no oxidado, cuyos análisis revelan el tipo de producción (hierro dulce, acero e incluso fundiciones con más del 2% de C).

Frente a esta generalidad no debe olvidarse que a veces se encuentran también desechos de operaciones incompletas que muestran una gran variedad en porcentajes y formas mineralógicas. Por eso es importante contar con todos los elementos de la cadena operativa del trabajo metalúrgico (mineral de partida/escorias resultantes/metal obtenido). Como no siempre es posible, se torna imprescindible que los métodos utilizados sean precisos y las descripciones completas, pues sólo así tendremos verdaderas posibilidades de caracterizar correctamente estos productos, que actualmente se valoran como parte clave para el conocimiento de la metalurgia antigua.

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bachmann, H.G., 1982, *The Identification of slags from archaeological sites*, Occasional Publication, 6, Institute of Archaeology, Londres, 14-17.
- [2] Biswas, A.K. y Davenport, W.G., 1993, *El cobre. Metalurgia extractiva*, Limusa, México.
- [3] Ploquin, A., 1994, L'analyse chimique en paléosidérurgie, en M. Mangin, *La sidérurgie ancienne de l'Est de la France dans son contexte européen. Archéologie et archéométrie. Actes du Colloque de Besançon, 10-13 novembre 1993*, París, 16-23.
- [4] Fluzin, P. y Leclère, D., 1998, Etat de l'interprétation des scories sidérurgiques à partir d'investigations métallographiques, en *Les métaux antiques: travail et restauration*. Ac-

tes du colloque de Poitiers, 28-30 sept. 1995 (dirs. Nicolini, G. y Dieudonné, N.), *Monographies instrumentum*, 6. Ed. Monique Mergoïl. Montagnac, 135-144.

- [5] Jarrier, C., Domergue, C., Pieraggi, B., Ploquin, A. y Tollon, F., 1995. Caractérisation minéralogique, géochimique et métallurgique des résidus de réduction directe, d'épuration et de forge du centre sidérurgique romain des Martys (Aude, France), *Revue d'Archéométrie* **19**, 49-61.