

CARACTERIZACIÓN DE LAS ESCORIAS DE HIERRO Y SU INTERPRETACIÓN EN EL CONTEXTO HISTÓRICO-ARQUEOLÓGICO

por

J. SIMÓN ARIAS¹, M. MARSAL ASTORT¹,
J. PÉREZ SUÑÉ² y J. GÓMEZ SÁNCHEZ²

RESUMEN

La morfología y el estudio arqueométrico de las escorias de hierro debe permitirnos diferenciar el estadio de la cadena operativa de la cual procede: reducción y post-reducción. Circunstancia que posibilita identificar el tipo de actividad siderúrgica llevada a cabo en el yacimiento arqueológico objeto de estudio y su implicación técnica y económica.

INTRODUCCIÓN

El hierro, desde su plena difusión y explotación en la península, constituyó una materia prima esencial para las sociedades antiguas (ibérica, romana y visigótica), pues devino un medio privilegiado para mejorar el bienestar material y de detentar el poder militar. A pesar de su importancia, la siderurgia antigua es una actividad técnica y económicamente poco conocida.

Nuestra experiencia, en yacimientos arqueológicos de diferentes épocas y en la revisión de memorias de excavación de yacimientos del noreste peninsular, nos muestra que en demasiadas ocasiones no se han identificado estructuras y espacios de trabajo, asociados a distintos modelos de hábitat (*oppida, villae, tabernae*), como instalaciones destinadas a la producción de hierro (minas a cielo abierto, hornos, talleres de forja) por no haber sido posible reconocer, documentar, cuantificar y estudiar los productos resultantes y los desechos de

1. Dpto. Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.

2. Dpto. Prehistoria, Historia Antigua y Arqueología, Facultad de Geografía e Historia, Barcelona.

esas instalaciones: mineral, restos de manufacturas y muy especialmente las escorias de hierro en sus diversas formas. Siendo la consecuencia de ello que pase desapercibida y no se incluya en la valoración global del yacimiento objeto de estudio, una actividad técnica, con una repercusión económica tan importante, como fue la siderurgia en sus diversos estadios.

TIPOLOGÍA DE LAS ESCORIAS DE HIERRO ATENDIENDO A SU FORMACIÓN

Las escorias de hierro están formadas mayoritariamente por los materiales residuales resultantes de la sucesión de operaciones técnicas que integran la cadena operativa de la siderurgia antigua.

En la cadena operativa de la siderurgia antigua se producen diversos tipos de escorias con características morfológicas y estructurales distintas, consecuencia de las diferentes condiciones de formación que seguidamente explicitamos.

Escorias de reducción

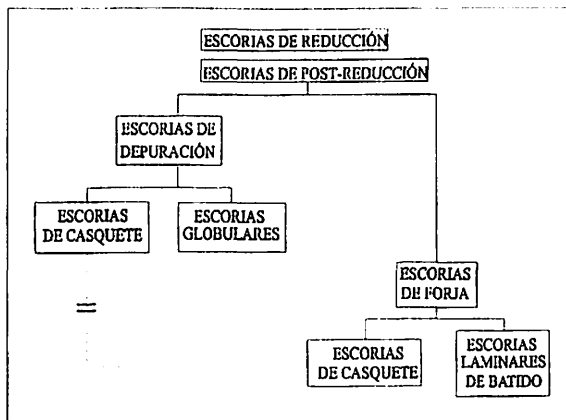
Nos ceñiremos sólo a las escorias producidas con el método directo de obtención del Fe en el horno bajo (ejemplos contemporáneos fueron la farga catalana y la ferrería vasca).

Por muy concentrado, enriquecido, que esté el mineral de hierro siempre lleva asociados otros elementos. Para la formación de Fe metal es preciso quebrar la estructura cristalina del mineral a reducir (generalmente óxidos) y arrancar los átomos de oxígeno, u otros, con el fin de liberar los átomos de hierro. Para ello se precisa: energía (combustión del carbón vegetal) y un agente reductor (elemento químico) que tenga mayor tendencia que el Fe a combinarse formando óxidos con los oxígenos disponibles en detrimento del metal. Químicamente se denomina reducción.

En siderurgia, el carbono, procedente de la combustión del carbón vegetal, representa el papel de agente reductor. Teóricamente a partir de 700 °C, el carbono, C, y el monóxido de carbono, CO, son capaces de arrancar el oxígeno del óxido ferroso, FeO. Esta reacción produce el dióxido de carbono: gas carbónico, CO₂ y el hierro metálico, Fe. A mayor temperatura, más se favorece esta reacción. Al quemarse el carbón en el horno, se libera de una parte el calor necesario y de otra el monóxido de carbono reductor. La reducción será favorecida por: una temperatura elevada, gran extensión de la superficie de contacto entre el mineral y el gas, y elevada proporción de monóxido de carbono, CO. A 700 °C el hierro está muy lejos de su punto de fusión, permaneciendo en estado sólido de igual modo que otros constituyentes del mineral. Entre los 1100-1200 °C la ganga, generalmente silíceo, que acompaña al mineral, se combina con el óxido ferroso y los restantes óxidos difícilmente reducibles a estas temperaturas, formando la escoria que funde y cuela. La fusión de la escoria se realiza al alcanzar el horno la temperatura necesaria, normalmente sin fundentes adicionales, y el flujo viscoso obtenido, rico en óxido de hierro, se

Caracterización de las escorias de hierro y su interpretación

OPERACIONES TÉCNICAS	PRODUCTO
LOCALIZACIÓN	Mineral + Rocas encajantes
EXTRACCIÓN	Mineral de primera extracción + Otras rocas
ENRIQUECIMIENTO lavado, fragmentación y calcinado	Mineral concentrado + Ganga
REDUCCIÓN MÉTODO DIRECTO (Horno bajo)	Esponja de hierro + Escoria de reducción
DEPURACIÓN (Primera forja)	Lingote de hierro + Escoria de depuración
FORJADO	Manufacturas + Escoria de forja



denomina escoria de colada. Ésta puede fluir al exterior (fot. 1), si el horno posee un canal para tal fin, o bien, precipitar al fondo de la cubeta del horno de reducción (fot. 2).

Escorias de depuración: de casquete y globulares

La esponja de hierro obtenida es necesario purificarla de todas las inclusiones no metálicas que lleva incorporada: escorias y carbones. Esta depuración se puede llevar a cabo calentando la esponja hasta la temperatura de fusión de la escoria en el mismo horno bajo en que ha tenido lugar la reducción y durante el siguiente proceso de reducción (tal era el caso del método catalán, conocido por «Farga Catalana») o utilizando otro horno o fragua.

Bajo la acción de la alta temperatura parte de la escoria atrapada en la esponja vuelve a fundir y cuela fuera de ésta. La restante es expulsada de la masa metálica al someterse, en caliente, al martilleo. El calentamiento y martilleo se reitera hasta haber desescorificado totalmente el metal, y haberle dado la forma de lingote o barra. Esto crea escorias de dos morfologías distintas. Si la depuración de la esponja se lleva a cabo en una forja (fragua), la escoria se ira acumulando en la parte inferior del horno, por debajo de la entrada de la tobera, tomando forma de casquete, cóncavo-convexa o plano-convexa (fot. 3).

La escoria que es expulsada de la esponja, durante el martilleo de ésta en caliente, tendrá la forma de glóbulos de pequeño tamaño. Pero su composición será la misma de las escorias de primera obtención del metal (fot. 4, izquierda).

Escorias de forja: de casquete y laminares (fot. 4).

Durante la manipulación del lingote para conformarlo en objeto, también se desprenden escorias. La conformación del objeto, generalmente, se realiza

por forja en caliente del lingote. Pero al calentar el metal, en contacto con el oxígeno del aire, se forma una película externa de oxidación. Para limpiar la superficie del metal de esa película de óxido, el herrero usaba un decapante (generalmente arena o arcilla) que extendía sobre la superficie metálica de trabajo, lo que provocaba el desprendimiento de la capa de oxidación.

Como en el caso anterior, encontraremos escorias de forja de distinta morfología. La escoria que se ha ido acumulando en el fondo de la fragua, también tipo casquete, y que puede proceder sólo de la acumulación de escorias de forja (óxido de hierro + decapante + carbón), o de las escorias procedentes de esta operación, más las escorias de la anterior operación de depuración.

También pueden desprenderse escorias fundidas en forma de gota (formadas por el óxido superficial + el decapante) que quedan diseminadas en el fondo de la fragua.

Durante la operación de martilleo, en caliente, de la pieza metálica sobre el yunque para conformarla en objeto, se desprende la película superficial de óxidos, son los óxidos de batiduras, que se esparcen por el suelo de la fragua, normalmente en forma de pequeñas y delgadas laminitas (foto 4).

METODOLOGÍA DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL

Con todas las escorias utilizamos la misma metodología: Observación de una cara pulida, al microscopio óptico de reflexión y electrónico de rastreo. Análisis por dispersión de energía de rayos X, análisis por difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X, si es necesaria, y análisis de imagen.

Los análisis se realizan en colaboración con el equipo de difracción de rayos X del Instituto «Jaume Almera» del CSIC, dirigido por F. Plana Llevat.

La composición química de las escorias refleja el conjunto del tratamiento del cual éstos son el residuo, es decir, del mineral empleado y de la masa de hierro obtenida.

La observación microscópica permite identificar fases minerales, y dar una aproximación de la proporción en que se encuentran. También permite conocer su textura, que nos informa sobre la dinámica de cristalización. Y si hay reliquias de mineral, o de otro tipo de inclusiones.

Mediante la dispersión de energía de rayos X podemos realizar un análisis puntual cuantitativo de elementos.

Los espectros de difracción de rayos X dan las principales fases cristalinas presentes. También informan sobre la proporción cristal / vidrio que hay en la muestra.

El método de fluorescencia de rayos X nos da la composición global de los elementos presentes en la muestra.

Los fragmentos o partículas metálicas presentes, estudiados por los métodos metalográficos, nos hablan de las condiciones en que se han formado, y también de las características del material (esponja) producido durante el proceso de reducción.

MORFOLOGÍA Y CARACTERÍSTICAS DE LAS ESCORIAS DE HIERRO

Entendemos por escoria la substancia no aprovechable, que queda después de un proceso. Puede resultar muy difícil identificar un antiguo proceso metalúrgico, pues generalmente los hornos han sido destruidos. Cuando sabemos con certeza, por los restos arqueológicos hallados, que en un determinado lugar se ha realizado alguna actividad metalúrgica, normalmente tan sólo se documentan las escorias como vestigio de esa actividad. Tholander se plantea las cuestiones siguientes: ¿Qué clase de actividad se ha llevado a término? (reducción, post-reducción, forja, afino). ¿Qué tipo de horno se ha empleado? (de taza, de cubo, horno alto). ¿Qué clase de material se ha producido? (hierro, cobre, plomo). ¿Qué cantidad de producción se ha realizado? (rendimiento del proceso). Para dar respuesta a estas cuestiones, muchas veces las escorias son el único testimonio que ha llegado hasta nosotros.

Si tenemos distintas escorias, observaremos que se diferencian unas de otras por su aspecto, forma, color y peso. ¿A qué son debidas estas diferencias?

En las **escorias de reducción**, la tonalidad variará en función de los elementos de la ganga del mineral. La morfología nos mostrará cómo se produjo su enfriamiento, pues la superficie será distinta según las escorias hayan fluido libremente, o no, fuera del horno. En el caso de haber colado fuera del horno, la superficie superior, siempre oscura y lustrosa, es lisa o formando cordones (chorretones), según el grado de viscosidad; mientras que la cara inferior es rugosa, porque es la réplica de las sinuosidades del suelo donde solidificó. Si la escoria precipitó y permaneció dentro del horno, su superficie no es lustrosa y acostumbra a tener mucha porosidad y a llevar adherida gran cantidad de carbón. No tienen una forma determinada. Pero la conducción de la operación de reducción, influye, en todos los casos, de manera esencial sobre la forma y aspecto de las escorias resultantes.

Las **escorias de depuración y de forja**, por su forma y tamaño, si se recuperan enteras, son fáciles de identificar: pequeñas (aproximadamente unos 10 cm), casi circulares y plano o cóncavo-convexas: son las escorias en forma de casquete. La superficie acostumbra a ser mate, a veces se observan unas zonas con herrumbre y otras con huellas de carbón vegetal.

Las conclusiones a que llegamos respecto a la interpretación de las escorias, son el fruto del trabajo realizado por otros autores, y de los resultados de los análisis, realizados por nosotros, generalmente, a escorias procedentes de yacimientos del noreste peninsular.

Tras lo expuesto se podría concluir que los distintos tipos de escorias son fácilmente identificables. Pero en la mayoría de las ocasiones eso no es así, siendo el principal factor que dificulta esa identificación, el estado fragmentado en que acostumbran a encontrarse en los contextos arqueológicos. Aun así, intentamos encontrar una explicación correcta haciendo un estudio sistemático, mediante el análisis químico, mineralógico, textural y morfológico. Los resultados de estos análisis han de caracterizar las escorias producidas en el curso de las distintas etapas de la cadena operativa de la siderurgia antigua.

Las escorias que pueden proporcionarnos más información sobre el proceso, son las producidas durante la obtención del hierro. Su composición química depende de: la química del mineral, del aporte de las paredes del horno y del aporte de las cenizas del carbón vegetal. Y está influenciada por la temperatura del horno y por la presión parcial del monóxido de carbono. Por tanto, su estudio permite conocer muchos parámetros del proceso: composición del mineral, temperaturas del horno, rendimiento de la operación. También las partículas metálicas que han arrastrado nos informan de la calidad de la masa de hierro producida.

Los minerales de hierro utilizados en el método catalán deben ser en roca, ricos y fundir fácilmente. La ganga que los acompaña es silíceo. Cuando el mineral cumple estas condiciones, una escoria de reducción directa está constituida, mayoritariamente, por la reacción producida entre la wüstita (FeO) y el óxido de silicio (SiO_2) del mineral, formándose fayalita ($2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$), cuando se consigue la temperatura necesaria.

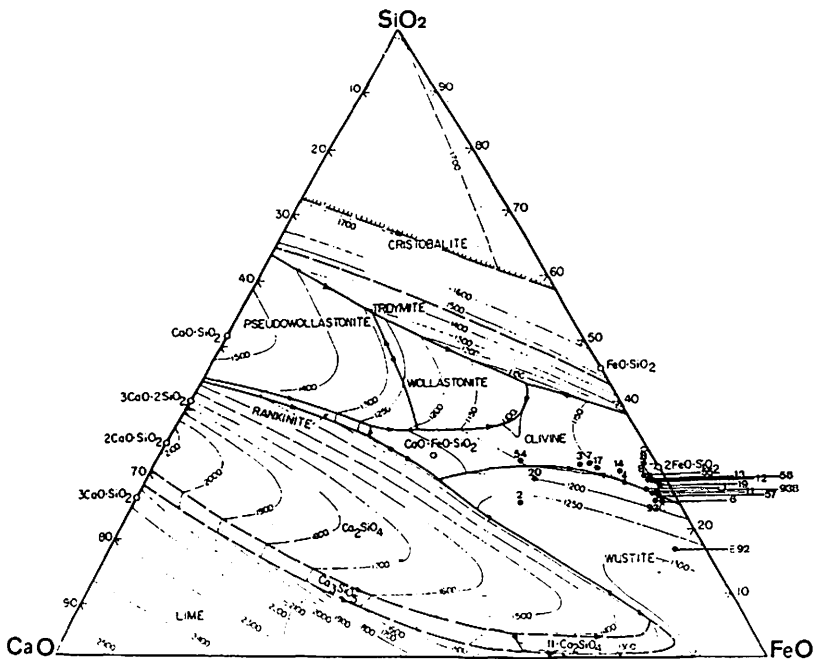
La escoria, explica Tholander, se forma dentro de cada pieza de mineral, y gotea a través de las grietas de las paredes de éste, precipitado al fondo del horno. También acostumbra a arrastrar microgranos de hierro, óxidos de hierro libre y/o trazas de mineral.

De los residuos de la reducción directa, las escorias coladas son las que presentan una paragénesis microscópica más homogénea (Domergue). El orden de cristalización de las fases minerales es siempre el mismo, en superficie de colada hay un borde de óxidos de hierro superior, que indica la oxidación superficial de la escoria en el momento de fluir al exterior del horno. Hacia el interior, aparecen las dendritas de wüstita que aumentan de tamaño siguiendo el gradiente térmico de solidificación. Esta wüstita libre atestigua que una parte del hierro no se ha reducido y acompaña a la escoria. La fase que cristaliza a continuación es el olivino fayalítico, el mineral dominante. Las distintas estructuras de la fayalita, equigranular, alargada o tabular son debidas a distintas velocidades de enfriamiento y a variación en la temperatura del inicio de la cristalización (Serneels). La última fase que solidifica es la intersticial vítrea, la composición de la cual es función del mineral y el carbón vegetal utilizados.

Las escorias antiguas, por sus componentes mayoritarios, podemos situarlas en el sistema $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-FeO}$. Lo ejemplarizaremos con 30 muestras estudiadas pertenecientes a un escorial del Pallars Jusa (Lérida), datado en los siglos X-XI. La mayoría se proyectaba sobre el diagrama trifásico $\text{SiO}_2\text{-CaO-FeO}$. Todas estaban cercanas a un mínimo térmico de solidificación, el canal cotéctico entre el olivino y la wüstita, agrupándose, la mayoría, cerca de la fayalita.

En el yacimiento ibérico de Les Guardies (El Vendrell, Tarragona) todas las escorias documentadas son de pequeño tamaño. Si se trata de escorias procedentes del proceso de reducción, sólo son fragmentos resultantes del troceado de escorias de mayor tamaño. Pero también podría tratarse, algunas, por su morfología, de escorias globulares de post-reducción, expulsadas de la masa de

Caracterización de las escorias de hierro y su interpretación



Fe durante su purificación con el martilleo, y de escorias laminares de batidura, creadas durante la forja en caliente. Los análisis realizados con una muestra de cada una de ellas nos condujeron a concluir que todas ellas eran fragmentos de escorias más grandes procedentes del proceso directo de obtención del Fe. Las fases cristalinas presentes y su proporción confirmaron la fluidez de unas, de otras no. Un dato significativo fue la presencia de Mn, en forma de óxido, sólo en algunas escorias. Este elemento, presente en el mineral en forma de óxido, pasa total o parcialmente a la escoria, dependiendo de la temperatura alcanzada en el horno. Estos resultados podían hacer presuponer que en un mismo centro productivo se habría utilizado, para la obtención de hierro, mineral de distintas procedencias.

Si las escorias de casquete proceden de una operación de depuración, estarán formadas por: los aportes de carbón vegetal, el metal a purificar, las inclusiones escoriáceas y material de las paredes del horno. Mientras que si proceden de una operación de forja, estarán formadas por: los aportes del carbón vegetal, el metal, las paredes del horno y el decapante. Las principales características que nos ayudarán a diferenciarlas ya han estado explicitadas por distintos autores: Benoit describió las escorias de forja de los siglos XV al XVIII estudiadas por él. Serneels hizo un estudio de las escorias de forja romanas. Nosotros hemos estudiado este tipo de escorias, como son las procedentes de la Farga de Banyoles (Girona) y las escorias romanas de la villa de Can Feu (Sant Quirze del Vallés, Barcelona). Los estudios analíticos de estas escorias

nos han conducido a resultados coincidentes con los de los autores mencionados. Todas presentan un exceso de hierro, en estado metálico y oxidado, respecto a las escorias de obtención directa. Y, aunque están presentes las mismas fases mineralógicas que en las escorias de reducción (wüstita, olivino, vidrio) se encuentran en otras proporciones y distribuidas muy heterogéneamente. No hay continuidad en las microestructuras observadas, y los agujeros internos, no siempre están producidos por las burbujas dejadas por el gas, sino que, a veces, los forman dos superficies de solidificación que no han entrado en perfecto contacto. En dos de las escorias de casquete de la Farga de Banyoles, sólo estaba presente el hierro metálico en distintos grados de oxidación y restos de carbón vegetal. Esto nos hizo concluir que éstas se habían formado por los residuos producidos durante la confección y reparación de utensilios de hierro.

Las escorias globulares tienen la misma composición que las escorias producidas durante el proceso de reducción, pues son las inclusiones atrapadas en el metal.

Las escorias laminares de batidura están formadas básicamente por óxidos de hierro, u óxidos de hierro + sílice / arcilla, ya que provienen de la película superficial del metal.

LAS ESCORIAS DE HIERRO EN EL REGISTRO ARQUEOLÓGICO

Las escorias de hierro se localizan allí donde se ha desarrollado alguna actividad siderúrgica. En general, el beneficio del mineral y la explotación del bosque para carboneras determinaron, hasta la introducción de la fuerza hidráulica, la localización de las instalaciones para la transformación del mineral de hierro; mientras que la cercanía al consumidor determinó la ubicación de los talleres de forja para la manufactura y reparación de útiles y herramientas de hierro. Si nos ceñimos al noreste peninsular observamos que en la Antigüedad se implantaron dos modos de organización espacial de la cadena operativa.

En época ibérica se realizaría la totalidad de la cadena operativa, desde la extracción hasta la manufactura en el mismo lugar, o área próxima al lugar de hábitat. El yacimiento que mejor ejemplariza este período cronocultural es el de Les Guardies (El Vendrell, Tarragona), con una mina a cielo abierto, diversos hornos de reducción y estructuras de preparación del mineral, pero donde no se han documentado escoriales; los distintos tipos de escorias (reducción y post-reducción) de formas diversas y siempre de pequeño tamaño, lo cual sugiere una intensiva reutilización, aparecen diseminadas por el yacimiento, formando parte de pavimentos y rellenos de estratos.

En época romana, momento en que se intensifica el comercio de metales y la *villa* rústica se implanta como unidad básica de ocupación y explotación de territorio, la siderurgia surge y se desarrolla en el contexto de las *villae* como una actividad complementaria de la agricultura de exportación. Un solo yacimiento, la villa de El Vilarenc (Calafell, Tarragona) con un taller de forja formado por dos hornos elevados plantea la posibilidad de que en él se hu-

biera llevado a cabo la totalidad de la cadena operativa. Lo habitual es localizar escorias de post-reducción de pequeño y mediano tamaño, generalmente en forma de casquete cóncavo-convexo y con un canal en la cara superior, formado por el aire inducido por el fuelle cuando ésta se encontraba en estado pastoso, junto a escorias globulares de batido. Estas escorias tampoco se encuentran concentradas formando escoriales o depósitos propios del taller de forja, sino diseminadas por el yacimiento, como en las *villae* de El Tossal del Moro (Corbins, Lleida), Can Feu (Sant Quirze del Vallés) o Casablanca (Jesús-Tortosa, Tarragona). Escorias de estas características se empiezan a documentar en contextos urbanos, como es el caso de la ciudad de *Iluro* (Mataró, Barcelona) donde en una *tabernae* del cardo máximo de la ciudad se localizó un horno metalúrgico y escorias diseminadas.

En época tardorromana-visigótica la totalidad de la cadena operativa parece concentrarse en pequeños *vici* artesanales, donde la siderurgia se practicaría junto a la metalurgia del bronce y la alfarería. De este período disponemos de un yacimiento en fase de estudio, se trata de La Solana (Cubelles, Barcelona). Junto a hornos de reducción, se documentan escorias de post-reducción y forja, así como numerosos fragmentos de escorias de reducción, de nuevo siempre diseminados por diferentes ámbitos del yacimiento.

BIBLIOGRAFÍA

- BENOIT, P.,
(1989) Scories de réduction et scories de forge: approche analytique et archéologique, *Archaeometallurgy of iron*. Symposium Liblice, Prague.
- DOMERGUE, C. *et al.*,
(1995) Caractérisation minéralogique, géochimique et métallurgique des résidus de réduction directe, d'épuration et de forge du centre sidérurgique romain de Martys (Aude, France), *Revue d'Archéométrie*, 19, pp. 49-61.
- FRANÇOIS, J.,
(1843) *Recherches sur les gisements et le traitement direct des minerais de fer dans les Pyrénées et particulièrement dans l'Ariège*, Paris, Ed. Carilian-Goeury et Dalmont.
- KEESMAN, I.,
(1989) Chemische und mineralogische Detailuntersuchungen zur Interpretation eisenreicher Schlacken, *Archaeometallurgy of iron*. Symposium Liblice, Prague.
- SERNEELS, V.,
(1993) *Archéométrie des scories de fer. Recherches sur la sidérurgie ancienne en Suisse occidentale*, Ed. Cahiers d'Archéologie romande, Lausanne.
- SIMÓN, J.,
(1992) *La Farga Catalana: estudi metal·lúrgic del procés*, Societat Catalana de Tecnologia, filial de l'IEC, Barcelona.

SIMÓN, J. y PÉREZ, J.,

(1996) *Estudio de las escorias romanas encontradas en Can Feu (St. Quirze del Vallés)*, Comunicació: Lattes (Montpellier), CNRS.

THOLANDER, E.,

(1989) Microstructure examination of slags as an instrument for identification of ancient iron-making processes, *Archaeometallurgy of iron*. Symposium Liblice, Prague.



Foto 1.



Foto 2.

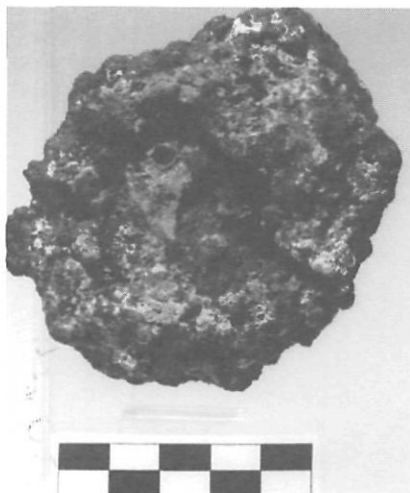


Foto 3.



Foto 4.