

Impacto ecológico y efecto Venturi en la metalurgia romana*

José GARCÍA ROMERO
Universidad de Córdoba

Resumen

Los cálculos sobre el uso de madera en los procesos metalúrgicos del periodo romano clásico resultan disparatados. Nosotros consideramos que el empleo del efecto Venturi redujo considerablemente el consumo de energía y con ello hacemos racional la equivalencia entre las escorias resultantes y los recursos vegetales disponibles. Sin menospreciar el impacto ecológico de la metalurgia antigua, habría que revisar las estimaciones que hasta ahora se han efectuado.

Abstract

Calculations about the use of wood in the metallurgical processes in the classical Roman period turn out to be absurd. We consider that the use of the Venturi effect reduced considerably the energy consumption and taking this for granted, it seems rational the equivalence between the resultant slags and the available vegetable resources. Without minimizing the ecological impact of the old metallurgy, it would be necessary to revise the estimations that have been made up to now.

Palabras clave: fundición pirítica, hornos, combustible.

Todos los autores que hacen estimaciones sobre la madera empleada en el proceso metalúrgico romano -aunque los cálculos siempre se hacen a la baja, supuesto que sólo contabilizan una fusión, cuando debieron ser múltiples tostaciones, fusiones y refinos- consideran que los datos resultantes parecen disparatadamente voluminosos teniendo en cuenta las posibilidades naturales, el

*. El presente trabajo se enmarca en la labor realizada por el Grupo de Investigación sobre *El medio rural en la Bética romana*, catalogado en el Plan Andaluz de Investigación con N°0342HUM.

agotamiento de los recursos y la capacidad organizativa que esa tala conlleva. Los cálculos no cuadran.

Pienso que hay un error de base, y que estriba en el consumo de combustible en los hornos. Necesitaron mucho menos del que suele suponerse, pues los romanos hicieron uso del "efecto Venturi" en el tiro de los hornos.

Fuera como fuese, de lo que no hay duda es de las ingentes cantidades necesarias diariamente tanto de madera, como de carbón, de ahí que ambos se convirtieran en materias primas estratégicas, fácilmente agotables y, por tanto, bajo estricto control oficial. Necesitarían los servicios de guardabosques muy cualificados y un buen destacamento de hombres encargados de plantar y cortar árboles, así como de hacer pedazos la madera para los carboneros y suministrar el carbón a los fundidores¹.

Nos inclinamos a pensar que el Fisco racionalizaría la tala y repoblación de árboles y facilitaría, de manera restringida, toda la leña y el carbón vegetal necesarios para las fundiciones, los baños, etc.²

Los artículos *VIP.* 1, 9, 10 y 12, sobre el aprovisionamiento de madera, reflejan la penuria de esta mercancía que, dada su escasez, se suministraba por vía oficial, y la reventa ilegal era castigada con una durísima sanción económica. Sólo había una actividad reservada al Fisco, la madera, escasa y básica para la actividad minero-metalúrgica³.

Sobre tales restricciones podemos recordar lo que dice Plinio: "El efecto de la escasez de combustible en la operación de tostación es particularmente sobresaliente en Galia, donde la segunda tostación se lleva a cabo con carbón en lugar de con madera" (*N.H.*, XXXIV, 96). Lo mismo dice del bronce llamado de Campania, que se producía por "fundición adicional con carbón (*carbo*) debido a la escasez de madera". Resulta paradójico que Plinio resalte la escasez de madera, manifestando que se empleaba carbón en lugar de madera, cuando por cada tonelada de éste hacen falta cinco⁴ o siete⁵ de aquélla.

Las escaseces de madera en la Galia y Campania que mencionaba Plinio provocaron, por ejemplo, que el mineral de hierro tuviera que transportarse de las minas de Elba a Populonia para fundirlo. Hay por tanto algo de verdad en la declaración de que las industrias crecientes, notablemente la metalurgia, tuvieron

1. SALKFIELD, (1970), p. 94.

2. LUZON, (1970), p. 233.

3. Cf. DOMERGUE, (1983), pp. 85 y 108.

4. SALKFIELD, (1970), p. 94.

5. CLEERI, (1976), p. 233.

algo que ver con la deforestación del Mediterráneo⁶.

Supuesto que la madera se presenta como un bien imprescindible y perecedero, el combustible se obtenía progresivamente a una mayor distancia y su factura pudo sobrecargar los costes de producción. Su merma constante, en principio, impone límites al crecimiento y, más tarde, termina por dar al traste con la explotación minero-metalúrgica.

Combustible. - El combustible empleado dependía de la fase de fundición o del mineral tratado. En términos generales, como hemos indicado anteriormente, la tostación requería madera y la fusión carbón vegetal, fabricado del tronco de pinos, robles o encinas.

En el sudoeste de la Península se consigue una tonelada de madera de cada 3'33 encinas (*Quercus ilex*)⁸. Ensayos en Riotinto han mostrado que la tasa media de crecimiento de las encinas en cuarenta años alcanza unos trescientos kilogramos (máx. 781) de madera apropiada para carbón y unos setenta y cinco kilos de ramas pequeñas (máx. 156) que podrían servir para la tostación. El clima era más húmedo en época romana, por lo que se podría suponer un total de novecientos kilogramos por árbol⁹.

Como evidencian las excavaciones y los recientes ensayos de laboratorio sobre el carbón vegetal, probablemente sólo se utilizó madera, no ramaje, para la fabricación del carbón vegetal que se usó en los hornos¹⁰.

El carbón constituyó la fuente principal de combustible en el periodo romano. La clase principal de madera utilizada para carbón en el sudoeste de la Península Ibérica fue la encina (*Quercus ilex*), aunque también se pudieron emplear otras variedades, por ejemplo el alcornoque (*Quercus suber*) y la coscoja (*Quercus coccifera*)¹¹.

Cinco toneladas de madera de encina proporcionaban una tonelada de carbón¹². Cinco partes de madera tienen el mismo valor calórico que una parte de carbón¹³.

6. Cf. FORBES, (1950), pp. 18-20.

7. CLÉRE, (1976), p. 240.

8. EDMONSON, (1987), p. 77.

9. FORBES, (1950), p. 19; SALKIHLID, (1970), p. 94.

10. Cf. CLÉRE, (1976), p. 240.

11. EDMONSON, (1987), p. 75.

12. SALKIHLID, (1970), p. 94.

13. FORBES, (1950), p. 19.

El carbón es el residuo obtenido cuando materiales orgánicos (vegetales o animales) se queman parcialmente, pierden agua, se destruyen los carbohidratos y se evaporan las sustancias volátiles. Al final del proceso, el carbón es carbono, más o menos puro. Aunque el volumen de la madera original sólo se reduce a dos tercios, el carbón es muy poroso y su peso es aproximadamente 25 % del original. El carbón desprende aproximadamente el doble de intensidad de calor de un peso equivalente de madera natural sin tratar. El carbón es capaz de elevar la temperatura a 900° C y, con el uso del fuelle, puede subir mucho más, hasta alcanzar las altas temperaturas necesarias para la fusión¹⁴.

Teofrasto (*Historia Plantarum*, V, IX, 4: *De Igne*, 31) explica el proceso utilizado en la combustión del carbón: "Los leñadores cortan y buscan para hacer carbón las ramas derechas y ligeras, porque así pueden apilarse de manera más compacta y conveniente para el carboneo. Cuando ya han calafateado el tiro, pegan fuego al montón y pinchan los lados con asadores. Tal es la madera que los carboneros buscan para hacer carbón"¹⁵.

La siderurgia militar de la armada romana en la campiña sudeste de Inglaterra conseguía una tonelada de hierro empleando doce de carbón¹⁶.

La producción de una tonelada de plata necesitaba diez mil toneladas de árboles, que aportaban el carbón suficiente, entre quinientas y dos mil toneladas. El producto metálico tenía cuatrocientas toneladas de plomo. Frecuentemente la plata aún estaba impura y tenía que lavarse y refundirse para producir plata refinada¹⁷.

Para producir un kilogramo de cobre se necesitan cerca de cuarenta de carbón¹⁸, pero cuando los minerales son muy sulfurados se requiere aún más. En la región de Riotinto los romanos extrajeron y fundieron calcopirita con cerca de 8 % de cobre por medio de una cadena complicada de tostaciones, fundiciones y refinado. Se necesitaban unas 71.840 Kcals. por kilogramo de cobre para los procesos de tostación y, posteriormente, 132.760 Kcals. por kilogramo de cobre para la fundición y refinado. Esto implicaría que por cada kilogramo de cobre se necesitó 21'8 kilogramos de madera para tostación y otros 68'5 kilogramos de madera para la fundición (un tercio del combustible en forma de madera, dos tercios en forma de carbón, cinco partes de madera tienen el mismo valor calórico

14. HEALY, (1978), p. 150.

15. Traducción de DÍAZ-REGAÑÓN, (1988).

16. Cf. CLEERE, (1976), p. 240.

17. HOPKINS, (1978), pp. 35-77, esp. 56.

18. TYLECOTE - CHAZNAVI - BOYDELL, (1977), p. 306.

que una parte de carbón), por tanto un total de 90'2 kilogramos de madera¹⁹.

En Riotinto, una tonelada de escoria de pirita de cobre necesitó 1'833 toneladas de carbón; una tonelada de escoria de tierra jarosítica se produjo con el empleo de una tonelada de carbón²⁰.

Cada horno de hierro etrusco utilizaba anualmente veinticuatro toneladas de carbón sólo para fundición, excluyendo la forja posterior o el tostado previo del mineral. Esto es equivalente a noventa y seis toneladas de madera cruda²¹.

Salkield llegó a calcular, según estimaciones de crecimiento de las encinas en Riotinto, según su rendimiento en carbón, y según las toneladas de escorias de plata conservadas en la zona, que sería necesario que los romanos hubiesen talado seiscientos mil árboles maduros anualmente, que cubrirían un área de dos mil hectáreas, si estuviesen plantados con una densidad de trescientos árboles por hectárea. Como esta cifra es manifiestamente imposible, llega a ser obvio que o los romanos encontraron que el área estaba espesamente arbolada cuando llegaron, o ha habido un cambio fundamental en el clima en el SO. de la Península que afecta la tasa de crecimiento de los árboles²².

Basándose en las estimaciones de Salkield²³, Edmonson²⁴ realiza los cálculos de necesidades de carbón en las fundiciones romanas de *Vipasca*, *Serra da Caveira* y *Riotinto* y le resultan unas cantidades enormes de combustible. Esas cifras son estimaciones conservadoras, cifras mínimas, ya que los periodos principales de operación en cada una de las minas consideradas fueron probablemente más cortos que las cifras utilizadas para el propósito del cálculo. Habría habido periodos en los que la actividad fue mucho mayor que la media, incrementando así aún más la necesidad de combustible. Además también habría que contabilizar la madera necesaria para puntales, pozos, galerías, norias, construcción y tareas domésticas.

Según Luzón, para la fundición de los veinte millones de toneladas de escorias romanas supuestas en Riotinto, se debieron utilizar seis millones de toneladas de carbón de encina, cantidad que, tasada en unidades vegetales de buen tamaño, puede suponer unos veinticinco millones de encinas aproximadamente²⁵.

19. FORBES, (1950), p. 19.

20. Cf. SALKIELD, (1970), p. 94; EDMONSON, (1987), p. 77.

21. HEALY, (1978), pp. 151-152.

22. Cf. SALKIELD, (1970), p. 94.

23. SALKIELD, (1970), pp. 85-98.

24. Cf. EDMONSON, (1987), pp. 77-80.

25. Cf. LUZON, (1970), pp. 232-233.

Los estudios sobre arqueometalurgia de Huelva efectuados por un equipo dirigido por los profesores Blanco y Rothenberg vislumbran que hay algún dato que se escapa, que debió existir algún sistema de utilización racional de la energía: "Dado que toda la fundición romana se hacía a base de carbón de leña, los muchos millones de toneladas de escoria esparcidos por toda Huelva hubiesen requerido una increíble cantidad de carbón, es decir, hubiesen ocasionado la deforestación total de vastas zonas de la Península. Parece lógico, por tanto, contar con la posibilidad de que una gran parte de la energía utilizada en las fundiciones procediese de las piritas mismas, en virtud de algún proceso de fundición pirítica"²⁶.

Estos investigadores aportaron un dato precioso para la correcta calibración del combustible empleado, "la fundición pirítica"; pero no indican cómo se llevaría a cabo. Es en este punto donde este artículo pretende aportar un paso más en el esclarecimiento del enigma de las "proporciones disparatadas", pero fundamentadas, sobre el uso del combustible en la metalurgia de minerales sulfurosos.

Nosotros estimamos que el medio fundamental sería la chimenea y una serie de artilugios de control del tiro que progresivamente, permitasen la comparación, convertían el horno de una supuesta "olla vulgar" en una "olla exprés". Es decir, se trataba de ir reteniendo los vapores de la combustión dentro del horno hasta que, alcanzada una cierta presión, los gases sulfúricos de la combustión terminaban por incendiarse en el interior del horno y elevaban la reducción, acelerando el proceso sin necesidad de consumir las elevadísimas cantidades de combustible vegetal supuestas. Esta técnica contribuía a aumentar la compresión de la atmósfera de gas, es decir, el efecto de reducción que se provoca por el contenido de oxígeno o la razón de monóxido y dióxido de carbono (CO/CO_2) durante el calentamiento²⁷. Es el fenómeno conocido en el mundo de la Física como "efecto Venturi", según el cual al disminuir la presión de un fluido por estrechamiento del conducto por donde circula -en este caso, el aire que entra por la chimenea del horno-, se produce un efecto de vacío -en lo que referimos, dentro del horno-, aumentando la admisión de aire, con lo que se aviva la reacción interior del horno, no por mayor consumo de combustible (carbón), sino de comburente (oxígeno).

26. BLANCO - ROTHENBERG, (1981), p. 175.

27. Cf. HAUPTMANN - WEISGERBER, (1987), p. 432.

Binaghi comenta que en el Jura, en Corintia, en Laurión y en Etruria había hornos que tenían chimeneas con anillos concéntricos de hierro, que podían ajustarse gradualmente para regular el tiro²⁸. Davies señala que un oinocoe de Vulci del siglo VI a. C. muestra un horno de herrería con varios anillos concéntricos en la chimenea, que probablemente se podían ir adjuntando para cerrar la apertura. Unas terracotas con forma de media luna halladas en el yacimiento de metalurgia inicial de Almizaraque (Almería), pudieron haberse utilizado igualmente para ir regulando progresivamente el tiro del horno²⁹.

Esos famosos elementos cerámicos, conocidos como "cuernecillos", que constituyen uno de los elementos más definatorios del Calcolítico andaluz y portugués³⁰, aún no han sido descifrados respecto a su uso, y la interpretación de Davies tampoco ha recibido réplica. Nosotros, habiéndolo documentado en yacimientos romanos de los alrededores de El Viso, como Setecientas, El Pizarro, Chabarcón y Las Costeras, cercanos en un radio de cinco kilómetros al yacimiento de El Cañamal (UH278646, en el mapa 1/50.000, nº 833), donde proponemos la ubicación de *Baedro*, presentamos un tipo de útil, de muy diferentes tamaños, siempre en forma de media luna o corteza esférica, fabricado en gneis granítico-migmatita, sumamente refractario por el elevado número de cristales de mica que entran en su composición, que acoplado a la salida de humos de un horno pudo actuar como elemento de control de la presión de los gases sulfúricos de la combustión, aumentándola progresivamente.

En un tiro horizontal de chimenea habría una ranura vertical que se iría cerrando, añadiendo una tras otra estas piezas en forma de cortezas esféricas, hasta cerrarlo por completo, provocando que los gases terminaran por incendiarse en el interior del horno, aumentando la temperatura, sin necesidad de consumir una gran cantidad de leña. Es el "efecto Venturi". ¿Por qué no se bloqueaba de una vez el tiro?. Porque si se hubiese hecho así la combustión se habría paralizado por falta de oxígeno. Era necesario controlar el tiro hasta alcanzar el nivel de combustión que la operación requería.

Está claro que nuestros estudios sintonizan con la hipótesis enunciada por los directores del Proyecto Arqueometalúrgico de Huelva, pero carecen de las necesarias calibraciones de laboratorio. Desafortunadamente, estas piezas las

28. BINAGHI, (1946), p. 10.

29. Cf. DAVIES, (1935), p. 50.

30. Cf. ARRIBAS - MOLINA, (1978), p. 115; ARRIBAS *et alii*, (1979), fig. 12; MARTÍN DE LA CRUZ, (1985); RUIZ MATA, (1983), fig. 15; TAVARES - SOARES, (1977), p. 261.

hemos encontrado en grandes cantidades en los yacimientos mencionados, descontextualizadas, supuesto que debieron ser lugares donde se tallaron, pero no donde se usaron, y aún no las hemos visto en ningún yacimiento metalúrgico de ninguna época. Dado el paralelismo que proponemos de estas cortezas esféricas pétreas romanas con los "cuernecillos" cerámicos calcolíticos, intuimos que el control del tiro fue una técnica que se aplicó en metalurgia desde época muy temprana.

Healy nos muestra dos hornos metalúrgicos griegos representados uno de ellos en un *oinochoe* ático de figuras negras (510-500 a. C.), conservado en el British Museum, en el que se observa la salida superior de dicho horno cerrada con varios elementos circulares concéntricos.

El otro, cerrado en su parte superior de igual manera, lo reflejó el Pintor de la Fundición (490-480 a. C.) en un *kylix* ático de figuras rojas, conservado en el Staatliche Museen Preussischer Kulturbesitz Antikenmuseum de Berlín.

En hornos de cerámica sigillata de La Graufesenque³¹ se ha constatado igualmente la aplicación del "efecto Venturi", por lo que contamos con evidencias sino del conocimiento de dicho principio en época romana, sí de la aplicación del mismo.

Con esta aplicación se hacen admisibles los cálculos de leña disponible en el entorno de las fundiciones y las cantidades de escoria resultantes, introduciendo racionalidad en las equivalencias entre el carbón de encina y las escorias de la provincia de Huelva realizados por Salkield y que él mismo reconocía como descabellados. Es probable, por tanto, que en época romana la deforestación como resultado de la actividad metalúrgica, siendo un fenómeno real, deba ser rebajada cuantitativamente, no alcanzando las cotas de gravedad que se han supuesto.

Bibliografía

- ARRIBAS, A. - MOLINA, F., (1978), *El poblado de Los Castillejos en las Peñas de los Gitanos (Montefrío, Granada). Campañas de 1971. El Corte N° 1*, Granada.
 ARRIBAS, A. *et alii*, (1979), "Excavaciones en Los Millares (Santa Fe, Almería)", *C.P.Gr.*, 4, pp. 61-118.
 BINAGHI, R., (1946), *La metallurgia ai tempi dell'impero romano*, Roma.
 BLANCO, A. - ROTHENBERG, B., (1981), *Exploración arqueometalúrgica de*

31. Cf. VERNHET, (1981), pp. 25-43.

Huelva, Barcelona.

CLEERE, H., (1976), "Some operating parameters for Roman iron works", *B.Inst.A.London*, 13, pp. 233-246.

DAVIES, O., (1979), *Roman mines in Europe. Ancient economic history*, Oxford, 1935, New York.

DOMERGUE, C., (1983), "La mine antique d'Aljustrel (Portugal) et les tables de bronze de Vipasca", *Conimbriga*, XXII, pp. 5-193.

EDMONSON, J. C., (1987), *Two industries in Roman Lusitania: mining and garum production*, BAR International Series 362, Oxford.

ESTRABON, (1992), *Geografía. Libros III-IV*, Traducción de M^a. José Meana y Felix Piñero, Gredos, Madrid.

FORBES, R. J., (1950), *Metallurgy in Antiquity*, Leiden.

HAUPTMANN, A. - WEISGERBER, G., (1987), "Archaeometallurgical and mining-archeological investigations in the area of Feinan Wadi 'Arabh (Jordan)", *Ann. Ant. Jordan*, 31, pp. 219-437.

HEALY, J. F., (1978), *Mining and Metallurgy in the Greek and Roman World*, London.

IDEM, (1993), *Miniere e Metallurgia nel Mondo Greco e Romano*, Roma.

HOPKINS, K., (1978), "Economic growth and towns in classical antiquity", pp. 35-77, en ABRAMS, P. - WRIGLEY, E. A., (eds.), *Towns in Societies*, Cambridge.

LUZON, J. M^a., (1970), "Instrumentos mineros de la España antigua", *Minería hispana e iberoamericana. Contribución a su investigación histórica*, vol. I, pp. 221-258.

MARTIN DE LA CRUZ, J. C., (1985), "Papa Uvas I. Aljaraque, Huelva. Campañas de 1976 a 1979", *E.A.E.*, 136, Madrid.

MURILLO, J. F. - RUIZ, A. - RUIZ, A. M^a. - ARAQUE, F., (1991), "Materiales calcolíticos procedentes de La Longuera (El Viso, Córdoba)", *A.A.C.*, 2, pp. 53-98.

RUIZ MATA, D., (1983), "El yacimiento de la Edad del Bronce de Valencina de la Concepción", *Actas del I.C.H.A., Prehistoria y Arqueología*, Córdoba, pp. 183-208.

SALKIELD, L. V., (1970), "Ancient slags in the south west of the Iberian Peninsula", *La minería hispana e iberoamericana. Contribución a su investigación histórica*, Vol. I, León, pp. 85-98.

TAVARES, C. - SOARES, J., (1977), "Contribuição para o conhecimento dos povoados calcolíticos do Baixo Alemtejo e Algarve", *Setubal Arqu.*, II-III, pp. 179-272.

TEOFRASTO, (1988), *Historia de las plantas*, Introducción, traducción y notas

por José M^a Díaz-Regañón, Gredos, Madrid.

TYLECOTE, R. F. - CHAZNAVI, H. A. - BOYDELL, J. P., (1977), "Partitioning of trace elements between ores, fluxes, slags and metal during the smelting of copper", *J.A.C.*, 4, pp. 305-333.

VERNHET, A., (1981), "Un four de La Graufesenque (Aveyron): la cuisson des vases sigillés", *Gallia*, 39, pp. 25-43.

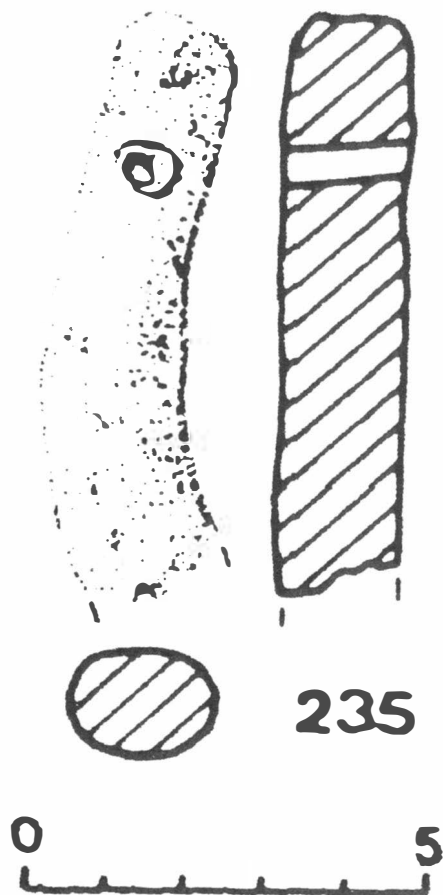


Fig. 1. Cuernecillo cerámico calcolítico de La Longuera (Murillo et alii, 1991, fig. 26, nº 235), distante unos escasos doscientos metros de la mina La Almagrera (El Viso, Córdoba), con aprovechamiento hasta época romana.

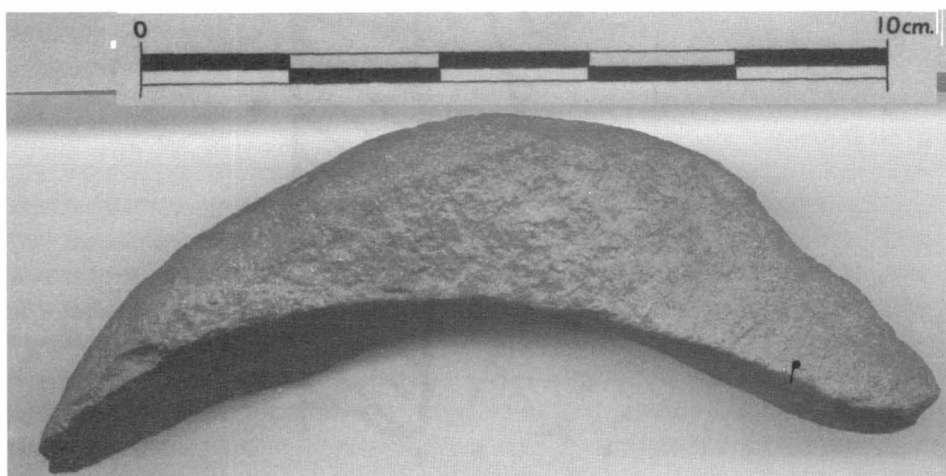


Fig. 2. Representación gráfica de una de las cortezas esféricas supuestamente empleadas en el control de la presión interna de los hornos metalúrgicos romanos.

Flor. II, 13, (2002), pp. 87-101.

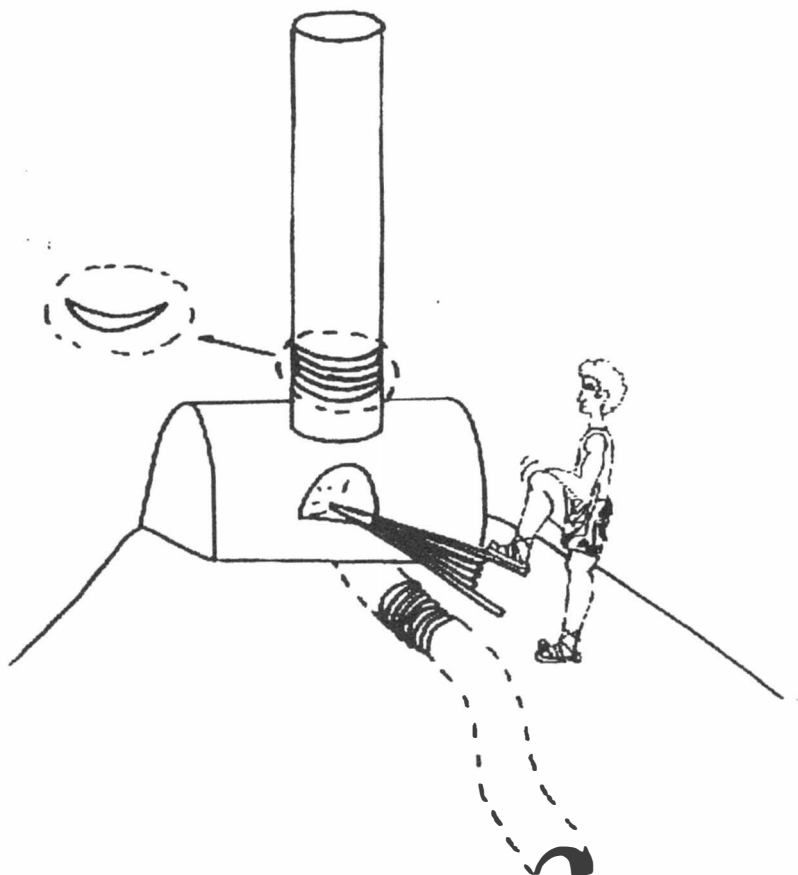


Fig. 3. Esquema de probable uso de las cortezas esféricas en la obstrucción de los tiros de chimenea horizontal o vertical para aumentar la presión interna del horno.



Fig. 4. Oinochoe ático de figuras negras, según Healy, 1993, p. 147, Láms. 61 y 62.

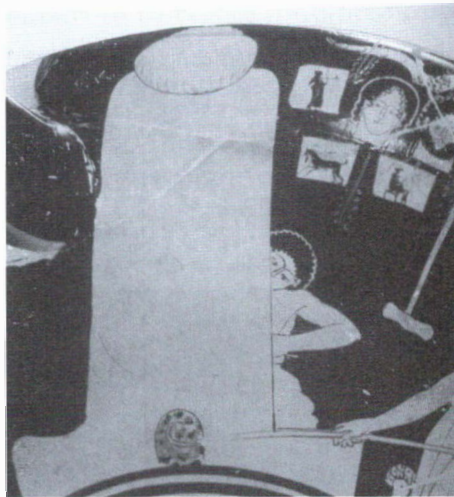
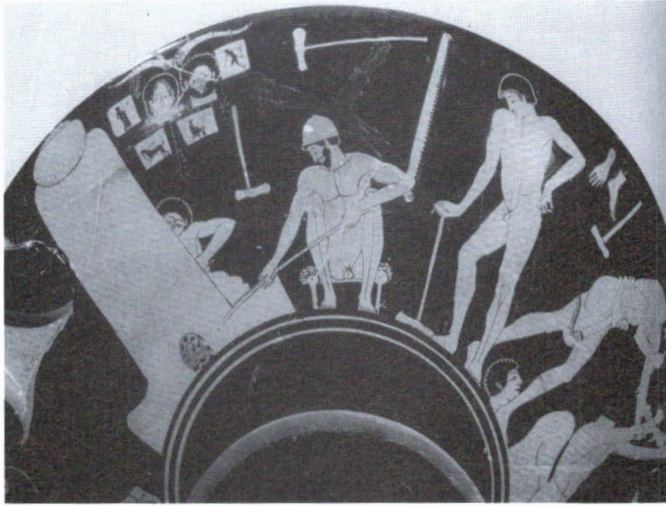


Fig. 5. Kylix ático de figuras rojas según Healy, 1993, p. 140, Láms. 48 y 49.