

## Aproximación histórica y metalúrgica a los primeros hornos altos españoles: las fábricas de artillería de Liérganes y La Cavada<sup>(\*)</sup>

J. Setién\* y J. A. Díez-Aja\*

### Resumen

En este trabajo se presenta una somera revisión histórica del origen y funcionamiento de los primeros hornos altos que operaron en España, como parte esencial de las Reales Fábricas de Artillería de Liérganes y La Cavada. Tras describir brevemente los procesos siderúrgicos involucrados, se muestran los resultados de los análisis metalúrgicos efectuados sobre muestras de escorias procedentes de estos hornos, así como el estudio metalográfico de una bala de cañón de idéntica procedencia. Estos resultados muestran que, a pesar de la reconocida calidad de las piezas de artillería obtenidas, los procesos de reducción de mineral aplicados en el horno eran imperfectos y no estaban totalmente bajo el control del fundidor.

### Palabras clave

Historia de la siderurgia española; Características de los procesos y productos; Escorias.

## Historical and metallurgical approach to the first spanish blast furnaces: the artillery works of Liérganes and La Cavada

### Abstract

This work presents a brief historical review of the origin and development of the first Spanish blast furnaces, as an essential part of The Royal Artillery Works at Liérganes and La Cavada. After a concise description of the siderurgical processes involved, the results of the metallurgical analysis performed on slags from these furnaces are shown. Also the metallographic study of a cannonball is included. These results reveal that, in spite of the well-known quality of the cast products, the mineral reduction in furnaces was not complete and the associated processes were not totally under the foundryman's control.

### Keywords

History of Spanish siderurgy; Characteristics of processes and products; Siderurgical slags.

## 1. INTRODUCCIÓN

Fue, principalmente, en el transcurso del siglo XVI cuando la artillería adquirió consideración como arma eficaz en el sitio de plazas y, sobre todo, como apoyo al combate naval sustituyendo, paulatinamente, al tradicional abordaje. España, en su papel de primera potencia mundial y con el fin de mantener su supremacía, llevó a cabo notables esfuerzos y dedicó importantes inversiones para la obtención de piezas de artillería de calidad. Desde el momento en que resultó imprescindible disponer de numerosas escuadras de galeones bien artillados para garantizar el dominio de las rutas marítimas, se hizo evidente la necesidad de poseer hornos altos que fueran capaces de

proporcionar el suministro de metal requerido. En este sentido, cabe señalar que sólo cinco de estos galeones requerían una masa metálica artillera equivalente a la de cien galeras clásicas de las que, por aquel entonces, surcaban el Mediterráneo<sup>[1]</sup>.

Tradicionalmente, las piezas de artillería eran moldeadas en bronce (el llamado bronce para cañones, con contenidos de estaño que oscilaban entre el 8 y el 12 %), alcanzando un reconocimiento notable en este sentido la Real Fábrica de Artillería de Sevilla, construida a partir de los talleres que, en 1565, fundó Juan Morel, hijo del famoso fundidor y artillero Bartolomé Morel, y que fue adquirida para el Estado por el Rey Felipe IV, en 1634. No obstante, a lo largo del siglo XVI, la gran demanda de artillería naval

(\*) Trabajo recibido el día 14 de febrero de 2007 y aceptado en su forma final el día 9 de julio de 2007.

\* División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales. E. T. S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria. Avda. Los Castros s/n. 39005. Santander. e-mail: setienj@unican.es

coincidió con un desmesurado encarecimiento de los precios del cobre, lo que, sumado a la ancestral escasez de estaño, obligó a buscar nuevas alternativas en la producción, ya que el ejército no podía permitirse el dispendio que suponía seguir utilizando artillería de bronce. El hierro forjado no resolvía el problema, porque también resultaba caro y, además, los procedimientos de la época sólo permitían la construcción de piezas muy toscas y pequeñas, dificultad ésta que no sería adecuadamente resuelta hasta bien entrado el siglo XIX.

Todas estas razones impulsaron el desarrollo de las técnicas basadas en el uso del hierro colado, por las cuales se apostó decididamente. En este contexto, a principios del siglo XVII, la Junta de Fábricas de Navíos elevó a Felipe III una angustiosa consulta por la que se decidió dar los pasos encaminados a la importación de esta técnica desde países centroeuropeos, haciendo venir de Flandes dos casas de fundidores en bronce, con destino a Lisboa y La Coruña, y otras tantas de hierro, que podrían establecerse en la región cantábrica. En este acontecimiento tuvo su origen la construcción de las fábricas de cañones de Liérganes y La Cavada, que contarían con los primeros hornos altos de fundición de hierro que entraron en funcionamiento en España.

## 2. LAS FÁBRICAS DE LIÉRGANES Y LA CAVADA

El origen de estas instalaciones se remonta a 1602, año en que el gobierno de Felipe III comisionó al embajador Baltasar de Zúñiga para la búsqueda en Lieja de fundidores que estuvieran dispuestos a establecerse en nuestro país y desarrollar aquí sus conocimientos técnicos sobre el arte de fundir el hierro. De esta forma, el embajador se puso en contacto con el empresario Juan Curcio (Fig. 1), hombre de gran prestigio entre los industriales y poseedor de una gran fortuna. En primera instancia, Curcio intentó asentarse en territorio vasco, pero el monopolio que poseían las ferrerías del Señorío de Vizcaya lo impidió. Fue, entonces, cuando se decantó por el sitio de Liérganes, a orillas del río Miera, y en 1622, Felipe IV aprobó el dictamen del Consejo de Estado concediéndole el privilegio de exclusiva por quince años para la producción de hierro para servicio de la artillería y otros objetos de uso civil, como morillos, escudos de armas y otras manufacturas menores.

En 1623, Curcio levantó dos hornos para obtener el metal fundido y edificó los talleres de moldeo y dependencias necesarias, muriendo en 1629, al parecer arruinado y sin haber logrado buena artillería a pesar de las excelentes condiciones del lugar.



Figura 1. Retrato de Juan Curcio.

Figure 1. Juan Curcio's portrait.

No obstante, la demanda militar de la última ofensiva española en Europa impulsó espectacularmente los trabajos en Liérganes, mejorándose la producción al mezclar el mineral montaños con el de Somorrostro, para cuya explotación se había logrado una autorización del Señorío de Vizcaya. Como ésta fuera todavía insuficiente para satisfacer las necesidades, en 1634, se decidió levantar dos nuevos hornos con sus instalaciones anejas en el cercano sitio de La Cavada, entrando en funcionamiento en 1640.

No sería hasta mediados del siglo XVIII, bajo la dirección de Joaquín de Olivares, Marqués de Villacastel, que las fábricas vivirían una nueva expansión con la instalación de dos nuevos hornos altos, destinados en principio a la fabricación de municiones, y otros dos hornos de reverbero, marcando durante el período de 1756 a 1759 la máxima producción en toda la historia de las fábricas. A finales de 1760, la administración estatal, por diversas razones, procede a la intervención técnica de las fábricas, pasando a su gestión directa desde 1763 y culminando el proceso de dominación gubernamental con la expropiación de las mismas, consumada en 1769. Esta nacionalización marcaría el inicio del declive de los establecimientos.

No obstante, todavía se pueden destacar algunos éxitos puntuales, como los conseguidos en los años 1783 y 1784 en que se llegaron a fabricar 958 cañones, de los cuales 784 fueron útiles. En 1793 se realizaron

los primeros experimentos para fundir con coque, y su fracaso marcaría el destino futuro de ambas fábricas. Así, en mayo de 1795, tras 170 años de actividad, la fábrica de Liérganes fue definitivamente clausurada.

La falta de inyección de capital, la reducida demanda de artillería asociada al vertiginoso derrumbe de la flota española y, finalmente, la escasez de carbón vegetal unida a los infructuosos intentos llevados a cabo para fundir con coque, también acabarían por condenar las instalaciones de La Cavada. A pesar de que a la vuelta de Fernando VII se intentó rehabilitar las factorías, lo único que se consiguió en 1819 fue una fundición de revitalización con resultados mediocres, llegándose a producir únicamente 60 cañones. En los años siguientes, los hornos de La Cavada permanecieron apagados hasta que se inició, en 1826, la que habría de ser su última fundición. Los resultados fueron desastrosos, al obtenerse un hierro de calidad blanca, desigual y durísimo, que era prácticamente imposible de barrenar, existiendo algún cañón que invirtió 153 días en dicho proceso cuando antaño lo normal era emplear cuatro o cinco días. En tales circunstancias, era previsible la paulatina desaparición de la fábrica, acelerada además por la gran crecida del río Miera en 1834, que destruyó la presa principal paralizando e inutilizando las máquinas e ingenios, y por el saqueo de las instalaciones por parte de tropas del ejército carlista, que dejaron los establecimientos en la mayor ruina. En 1838, en los Reales Sitios quedaban unos hornos ruinosos que jamás se encenderían, unos edificios completamente deteriorados y una capilla que, con el tiempo, se convertiría en residencia privada.

Los adelantos científicos y tecnológicos en materia de siderurgia y balística, a los que no pudieron acompañarse, marcaron el fin de aquellas fábricas que contaron con los primeros hornos altos para fundición de hierro que se levantaron en España y, por espacio de dos siglos, fueron un referente de calidad a nivel europeo en la fabricación de piezas de artillería de hierro colado.

### 3. LAS INSTALACIONES Y LA PRODUCCIÓN DEL COMPLEJO LA CAVADA-LIÉRGANES

A finales del siglo XVIII y durante el apogeo de estas factorías que precedió a su decadencia, las instalaciones del complejo La Cavada-Liérganes fueron, sin duda alguna, impresionantes para los estándares de la época<sup>[2]</sup>.

En Liérganes se encontraban los hornos más antiguos, el de Santo Domingo y el de San Francisco,

ambos de 6,13 m de altura, además de dos fraguas, una carbonera para el carbón de leña, un lavadero para el mineral de hierro y otro para fundentes, un obrador para moldería en barro, almacenes, una capilla dedicada a San Andrés, edificios de administración y de habitaciones para los empleados.

La Cavada contaba, para la producción de la artillería, con cuatro hornos de primera fusión de 7,24 m de altura, pareados de dos en dos, llamados de San José y Santa Teresa y de Nuestra Señora del Pilar y Santa Bárbara, equipada cada pareja con un cabestrante para la manipulación de cañones y moldes; dos hornos de reverbero para refundir el hierro colado y fabricar municiones y otros objetos menores; dos hornos de presión para la fundición de moldes de bronce; un horno de cementación para producir el acero que se necesita en las máquinas barrenadoras; dos hornos tostadores para minerales refractarios y un horno con destino a los ensayos metalúrgicos; carboneras, tanto para carbón de leña como carbón mineral; obradores de moldería, cerrajería, carpintería y diversas fraguas; máquinas para barrenar, decapitar, centrear y fogonar cañones así como otras para cortar mazarotas, afilar instrumentos y diversos tornos tanto para metal como para la madera de los moldes; almacenes, depósitos, una capilla en la que se celebraban dos misas diariamente, viviendas para el Comandante, Ministro de Hacienda y altos empleados con sus huertas anejas, cuartel para la tropa, edificios de administración, tabernillas, abacerías y un matadero, completaban las instalaciones del complejo.

A estas hay que sumar además las correspondientes obras hidráulicas para el suministro de la energía: tres presas, una en Liérganes, otra en La Cavada y una tercera en Valdelazón, todas ellas sobre el río Miera, con sus correspondientes cauces y canales para dar movimiento a las diferentes máquinas necesarias para la elaboración de la artillería de hierro colado.

En cuanto a la producción del complejo, no resulta sencillo, en absoluto, evaluar en cifras el rendimiento de una instalación que ha estado en servicio de forma más o menos continuada durante más de 200 años. Por ello, es loable el excelente trabajo realizado por Alcalá-Zamora, y de cuya extensa y rigurosa obra, publicada en 1974, se han tomado los datos aquí presentados<sup>[3]</sup>.

La importancia productiva del complejo Liérganes-La Cavada, se puede resumir en la fabricación de 26.000 cañones útiles para el servicio y municiones de variado tipo para realizar hasta seis millones de disparos, a los que se suman muchos millares de piezas y bienes de equipo destinados a usos comerciales, domésticos, industriales o de lujo. En su conjunto, esto supone unas 100.000 t de hierro colado, elaboradas en unas 150 campañas de fundición a lo largo

de 200 años. Estas cifras, que pueden parecer ridículas en comparación con la producción actual de una gran planta siderúrgica (varios millones de toneladas anuales), eran no obstante importantes en el contexto de la época.

Para alcanzar estas cifras, se beneficiaron más de 300.000 t de mineral de hierro explotadas tanto en minas próximas al complejo como traídas de otros centros mineros, principalmente Somorrostro; para su reducción y procesado, se consumieron en los hornos altos, reverberos y fraguas, unas 250.000 t de carbón vegetal y otras 15.000 t de carbón mineral.

En este sentido, conviene señalar que para la producción de una tonelada de carbón de leña, se requería, en promedio, la poda de 40 árboles, lo que significa un total de diez millones de árboles carboneros afectados, buena parte de ellos de forma irreversible. En relación al hierro producido, las cifras indican que 1.000 t de hierro colado requerían la poda de un mínimo de 100.000 árboles, y aunque teóricamente éstos debían retoñar, en la práctica, por causas diversas, se perdían muchos de ellos. En cuanto a la superficie forestal afectada, cabe señalar que el molde de un cañón de 24, que no era el calibre mayor, con un peso que superaba las dos toneladas, consumía la poda de casi 2,5 hm<sup>2</sup> de bosque carbonero, lo que supuso el asolamiento de 50.000 hm<sup>2</sup> de bosque en una zona principal de 140.000 hm<sup>2</sup>, aparte de otras devastaciones parciales.

Por último, en lo referente a capital e inversiones, se estima el pago de unos 20 millones de jornales pagados, de los cuales, aproximadamente un tercio correspondía al personal de las propias fábricas (un promedio de alrededor de 300 personas durante dos siglos) y el resto a satisfacer las actividades complementarias, entre las que se incluyen el carboneo, transporte, minería y otras afines. Añadiendo costes de infraestructuras, equipamientos y demás partidas, se puede cifrar la inversión acumulada en torno a los 120 millones de reales de mediados del siglo XVIII (de 250 a 370 millones de euros actuales).

#### 4. EL PROCESO SIDERÚRGICO

Como ya se ha comentado, la fabricación de cañones fue la principal actividad de las fábricas durante, prácticamente, toda su historia. El proceso seguido, consistente en colar el hierro líquido directamente sobre los moldes en el foso de colada, no tuvo mejora apreciable alguna hasta el fin de las fábricas.

Con anterioridad a la introducción de los hornos altos, la siderurgia tradicional, durante prácticamente toda la Edad Media, estuvo basada en el trabajo metalúrgico desarrollado en las llamadas ferrerías,

que básicamente consistía en la obtención de hierro a partir del llamado "método directo"<sup>[4]</sup>. El hierro dulce obtenido por esta vía era de muy buena calidad pero el proceso daba muy bajo rendimiento, pues se perdía la mitad del metal mezclado con las escorias.

La introducción de la tecnología del horno alto, con la construcción de rudimentarios hornos que quemaban carbón vegetal, supuso, no obstante, una verdadera revolución. La forma alta de los hornos y el uso de fuelles más potentes que los habituales en las ferrerías tradicionales, permitió la fusión del hierro en mayores cantidades<sup>[4]</sup>. Pero, el problema surgía a la hora de intentar fundir volúmenes grandes de metal, como los requeridos para la obtención de piezas de artillería. Este cambio de escala significaba un verdadero salto cualitativo en selección de materiales, técnicas, estructura y dimensiones del horno, infraestructura auxiliar, formación del personal cualificado, organización administrativa y financiación. En este sentido, debe hacerse notar que la fabricación de cañones, cuyo peso neto por unidad, en promedio, oscilaba de casi una tonelada a más de tres, entrañaría un desafío técnico en cada fundición a fin de conseguir masas de metal homogéneo y de la calidad requerida para soportar la dura prueba de los disparos.

En esencia, los protocolos de operación comprendían una serie de pasos bien establecidos. Cuando uno de estos hornos era encendido, se tardaba cierto tiempo en conseguir hierro de la suficiente calidad para la producción de un cañón. El primer arrabio procedente del horno se utilizaba como platina para fundir; el siguiente hierro que era capaz de producir el horno se empleaba en el moldeado de bienes de equipo, como herramientas, corazas o tuberías de conducción de agua. Sólo a partir de ese momento, se consideraba que el hierro remanente en el horno tenía la suficiente calidad como para producir los valiosos cañones, efectuándose entonces la colada en los grandes moldes construidos al efecto. Las condiciones de operación, con muy altas temperaturas y gran abrasión, hacían necesaria la operación en modo continuo (24 h al día durante varios meses) para obtener el mayor rendimiento posible de las instalaciones, evitando así choques térmicos no deseados durante los ciclos de parada y encendido.

En la tabla I se muestra la carga recomendada por una Comisión de Marina en dictamen de 30 de Septiembre de 1772, tras estudiar los hornos de las fábricas de Liérganes y La Cavada<sup>[3]</sup>.

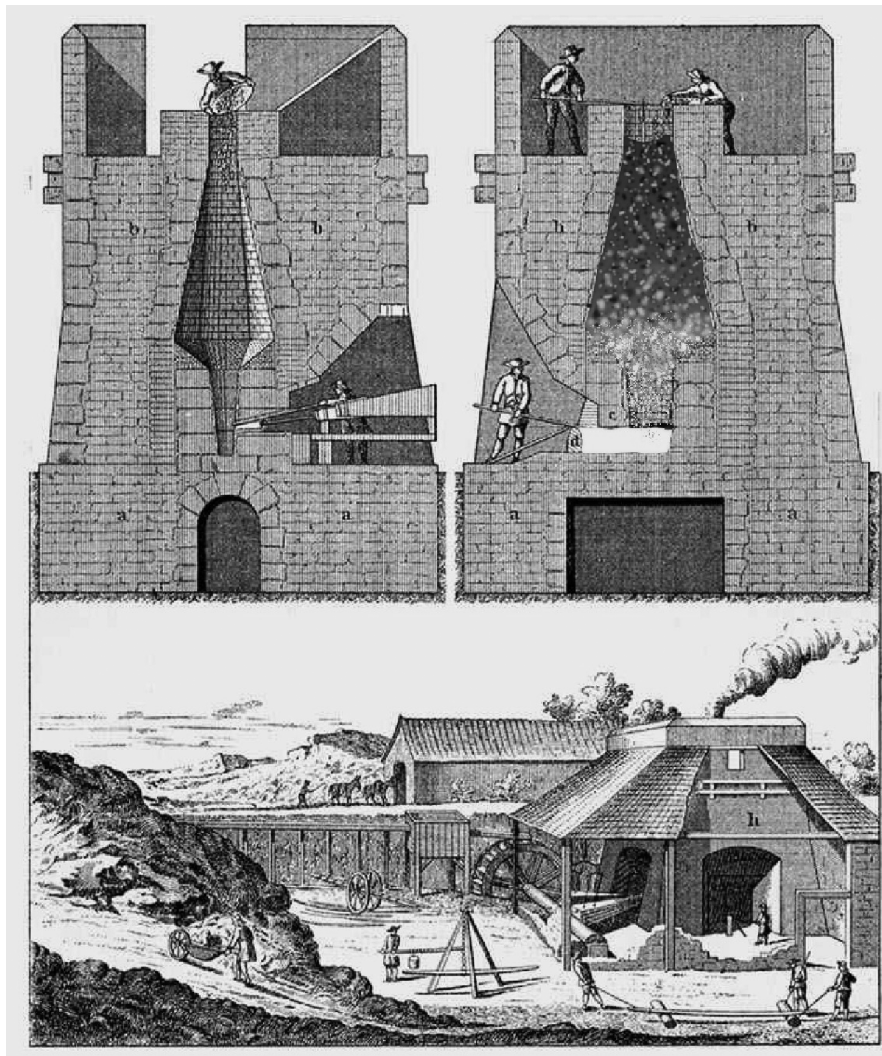
El proceso siderúrgico que tenía lugar en el horno alto era relativamente complejo y sus detalles se pueden consultar en la bibliografía especializada<sup>[5]</sup>. La marcha a través del horno comprendía diversas transformaciones que culminaban con la obtención del metal en el crisol (Fig. 2) <sup>[6]</sup>.

**Tabla I.** Carga estándar recomendada para una colada

*Table I. Standard recommended charge for a heat*

Carga	Procedencia	Peso (lb)	Peso total (lb)	%
Mineral de hierro	Vena de Somorrostro	119	441	43,4
	Vena de Cabárceno	102		
	Vena de Pámanes	220		
Fundentes	Hierro platina*	45	94	9,3
	Escoria lavada	25		
	Piedra calear	24		
Combustible / reductor	Carbón vegetal	480		47,3

\*La platina era hierro de desecho de los primeros días de fusión.



**Figura 2.** Horno alto de los siglos XVII y principios del XVIII (Grabado modificado<sup>[5]</sup> a partir del original extraído<sup>[6]</sup>).

*Figure 2. Blast furnace of XVII and beginning of XVIII centuries.*

En esencia, la operación se iniciaba con la incorporación, a través del tragante del horno, de cargas alternativas de mineral, combustible y fundente. A lo largo de la cuba se realiza el calentamiento inicial de la carga y cierta reducción del material férrico. Este proceso culmina en el vientre. A través de la tobera se inyecta el aire que, en su ascenso y en la zona de los etalajes, inicia la fusión de la carga, teniendo lugar el goteo del arrabio y la escoria que, finalmente, se separan por diferencia de densidad en el crisol.

El proceso químico involucrado puede resumirse en las siguientes etapas: a partir del tragante y a medida que desciende la carga, el óxido de hierro del mineral se reduce a óxido ferroso primero y, posteriormente, a hierro metálico esponjoso (al modo del obtenido en las ferrerías) por la acción de los gases carbónicos generados durante la combustión del carbón. En esta misma zona se produce la disociación del carbonato cálcico de la piedra caliza en dióxido de carbono y cal, que contribuyen a la reducción y a la formación de la escoria. El mineral de hierro está completamente reducido antes de iniciarse la formación de escoria en la región media del horno. A partir de esta zona, en la parte más ancha del horno, la temperatura sobrepasa la de fusión del arrabio (hierro con carbono absorbido durante su descenso, que rebaja notablemente su punto de fusión) y la de la escoria, con lo que funden conjuntamente. El estrechamiento de las paredes del horno a partir de esta zona compensa la disminución del volumen de la carga por efecto de la fusión. Cuando se llena el crisol, tras varias horas de operación ininterrumpida, se realiza la colada en los moldes a través de la piqueta de descarga, siendo posible, en este momento, la separación del arrabio y de la escoria debido a sus distintas densidades, que permiten a la escoria quedar sobrenadando en el caldo de la colada en el crisol.

En estos procesos primitivos, la calidad de las piezas obtenidas no era óptima: se obtenían coladas más o menos frágiles y con abundante presencia de escorias retenidas y defectos (grietas, poros, sopladuras, etc.), tanto internos como superficiales que, en muchas ocasiones, hacían inservibles las piezas.

En cuanto al tipo de hierro colado que se obtenía, cabe señalar que, en las primeras épocas, los hornos altos disponían de pequeña capacidad de soplado en sus barquines, a lo que se unía su poca altura, con lo que las temperaturas alcanzadas eran bajas y, consecuentemente, quedaba muy limitada la reacción entre el carbono y el óxido de silicio de la escoria. Por ello, el hierro colado obtenido estaba constituido principalmente por fundición blanca.

Las mejoras en los hornos, en cuanto a mayor capacidad de soplado e incremento en su altura, dieron lu-

gar a un notable aumento del contenido de silicio del arrabio, pasando éste, gradualmente, de niveles originales próximos al 0,7 % (fundición blanca), al 1,1 % (fundición atruchada), y finalmente, por encima de este valor y hasta el 2,5 % (fundición gris). A partir del siglo XIX, la fundición se obtendría ya a partir de cubilotes y no de hornos altos. Tanto en Liérganes como en La Cavada, dada la poca altura de los hornos y la pequeña capacidad de soplado, nunca se llegó a obtener la fundición gris de modo habitual.

## 5. ANÁLISIS METALÚRGICOS

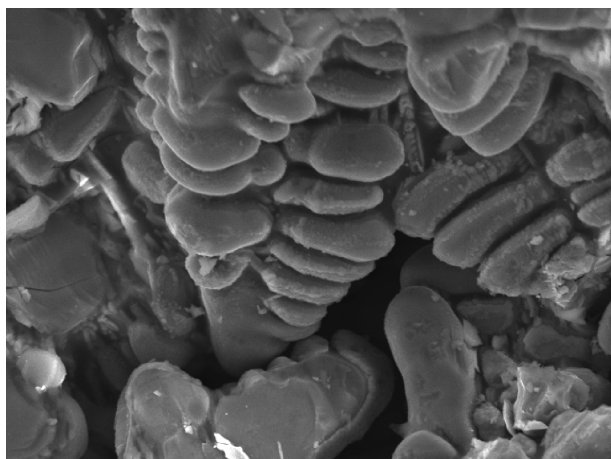
Como parte importante de esta aproximación al estudio del funcionamiento de las fábricas de Liérganes y La Cavada, se ha tenido la oportunidad de llevar a cabo análisis metalúrgicos de algunos de los productos fundidos en sus hornos, que han sido conservados en manos de coleccionistas privados.

En concreto, ha sido posible trabajar sobre algunos restos de escorias de fundición recogidos en las proximidades del emplazamiento original de las fábricas y, excepcionalmente, se ha podido realizar un estudio microestructural detallado sobre un proyectil, del que se desconoce su antigüedad exacta pero se tiene la certeza sobre su procedencia de los hornos de la fábrica de Liérganes.

### 5.1. Las escorias

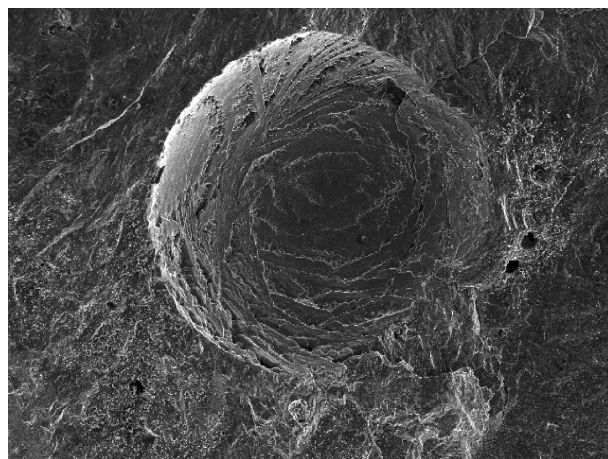
Los fragmentos de escoria analizados tienen el aspecto morfológico y estructural típicamente característico de este tipo de residuos. No obstante, los elevados valores registrados en las medidas de sus densidades aparentes, próximos en promedio a  $4.000 \text{ kg/m}^3$ , así como la respuesta magnética intensa que exhiben frente a la acción del campo creado por un imán, hacen suponer que sus contenidos de hierro son significativamente elevados.

En efecto, en la micrografía que se presenta en la figura 3, tomada con ayuda de un microscopio electrónico de barrido (MEB), se muestra el aspecto característico de determinadas zonas de la escoria; la morfología dendrítica revela que el material realmente ha evolucionado desde un estado de completa fusión. Asimismo, en la micrografía de la figura 4, se observa un nódulo esférico con alto contenido de hierro metálico, como revela el microanálisis por energía dispersiva de rayos X (EDAX) realizado sobre él y cuyos resultados se presentan en la tabla II. De igual forma, en la tabla III se recogen los resultados promedio de los diversos



**Figura 3.** Detalle de la morfología dendrítica de ciertas zonas de la escoria (x2000).

*Figure 3. Dendritic morphology observed in some zones of the slag (x2000).*



**Figura 4.** Detalle de uno de los nódulos ricos en hierro presentes en la escoria (x60).

*Figure 4. Detail of one of the rich-iron nodules found in the slag (x60).*

**Tabla II.** Análisis de un nódulo rico en hierro presente en la escoria (% peso)

*Table II. Analysis of one iron-rich nodule found in the slag (weight %)*

Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe
6,85	1,26	2,01	9,89	4,24	0,20	0,27	0,11	75,17

**Tabla III.** Promedio de los diversos microanálisis realizados sobre la escoria (% peso)

*Table III. Average results of microanalysis carried out in the slag (weight %)*

Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe
2,46	1,31	18,34	33,81	1,72	1,84	1,35	0,33	38,84

microanálisis EDAX realizados sobre zonas amplias de la escoria.

No resulta sencillo comparar estos resultados con otros realizados en condiciones similares, pues los datos referenciados son muy escasos. Así, por ejemplo, en alguna referencia bibliográfica<sup>[7]</sup> se encuentran resultados de análisis de escorias de hierro de distintas épocas, que abarcan desde tiempos de los romanos hasta nuestros días.

De esta forma, se comprueba que mientras las escorias producidas en hornos bajos de tipo "walloon" podían encerrar contenidos de hierro (FeO + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) incluso superiores al 60 %, en los hornos altos europeos de carbón vegetal de los siglos XVII y XVIII se consiguió reducir este porcentaje hasta valores comprendidos entre el 2,5 y el 15 %, muy por debajo de

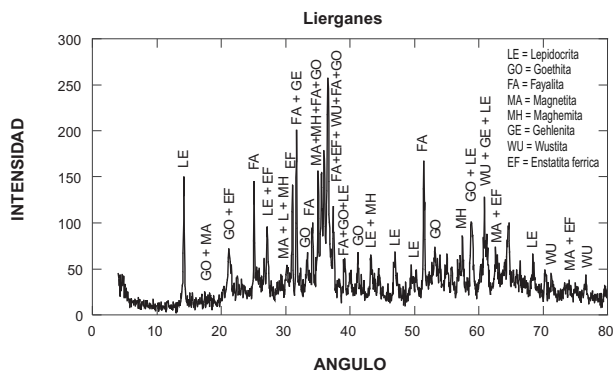
los valores registrados en las escorias de Liérganes. De igual forma, el contenido de silicio (SiO<sub>2</sub>) se establecía en torno al 45 %, el de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) en torno al 10 %, el de calcio (CaO) próximo al 20 %, el de magnesio (MgO) cercano al 12 % y el de potasio (K<sub>2</sub>O) en el 2,5 %, revelando la presencia significativa de este elemento el uso de carbón vegetal como combustible en el horno<sup>[8]</sup>. Como puede comprobarse, los valores referenciados difieren bastante de los registrados en las escorias de Liérganes, cuyos elevados contenidos de hierro revelarían rendimientos productivos más bajos que los del resto del continente, si bien es preciso hacer notar la enorme variabilidad de resultados que se registra de unas muestras de escoria a otras, aún cuando su procedencia sea la misma. Esta variabilidad característica refleja que los

procesos de reducción de mineral aplicados en el horno eran imperfectos y no estaban totalmente bajo el control del fundidor, lo cual implicaría que las condiciones reductoras y el rendimiento en el interior del horno fueran irregulares.

Con el fin de profundizar más en los aspectos tecnológicos del proceso siderúrgico, se ha llevado a cabo también un estudio de las fases mineralógicas presentes en la escoria por técnicas de difracción de rayos X. En la figura 5 se muestra el difractograma obtenido, junto con la indicación de las fases identificadas en su interpretación.

Como puede comprobarse, y en buen acuerdo con los resultados analíticos EDAX, la escoria consta de diversos compuestos que pueden agruparse, básicamente, en dos grandes tipologías. Por una parte, hay una presencia importante de silicatos, tanto de hierro, caso de la fayalita ( $Fe_2SiO_4$ ), como silicatos cálcico-alumínicos, principalmente gehlenita ( $Ca_2Al_2SiO_7$ ), o ferromagnésicos, como es el caso de la enstatita férrica  $(Mg,Fe)SiO_3$ ; la escoria fayalítica pura es la ideal, pues funde a poco más de  $1.100\text{ }^{\circ}C$  y es muy fluida en el intervalo  $1.200\text{-}1.250\text{ }^{\circ}C$ , por lo que la presencia de fayalita y su abundancia son indicadores de la temperatura de formación de la escoria; cristaliza en la escoria formando cristales aciculares y su composición es del 60 % de  $SiO_2$  y 40% de  $FeO$ . El otro gran grupo de compuestos lo constituyen las fases ricas en hierro, estando este elemento presente tanto en forma de hidróxido  $FeO(OH)$  (goethita y lepidocrita), como de óxido en distintos estados de oxidación (wustita  $FeO$ , maghemita  $Fe_2O_3$  y magnetita  $Fe_3O_4$ ).

La wustita es un óxido de hierro no estequiométrico que aparece corrientemente en todo tipo de escorias siderúrgicas, ya que se forma en ambientes con escaso potencial reductor apareciendo, usualmente,



**Figura 5.** Difractograma realizado sobre muestra de escoria de Liérganes.

*Figure 5.* X-ray diagram of a slag sample from Liérganes.

en el sinter y también en el horno alto, como fase intermedia de la reducción de los óxidos férricos a arrabio, manifestando su presencia una sobresaturación en óxidos de hierro. De igual forma, la maghemita, espínela que posee una estructura derivada de la magnetita con un cierto número de posiciones vacantes, es un compuesto metaestable que suele formarse a partir de la magnetita o por calentamiento de hematitas ( $Fe_2O_3$ ), y que aparece típicamente en minerales sometidos a la acción del calor o parcialmente reducidos.

En definitiva, el hecho de que aparezcan cantidades apreciables de óxidos no reducidos, principalmente magnetita, además de justificar el carácter ferromagnético de las escorias, indica que el proceso verificado en el horno ha sido ciertamente incompleto. En esta misma línea apunta la detección en la escoria de silicatos férricos, como la fayalita, que no aparecen en los análisis típicos de escorias siderúrgicas modernas. Esto revela que la técnica empleada para reducir los minerales de hierro en el horno, que da como resultado este tipo de escorias, corresponde a un proceso siderúrgico no perfeccionado; en efecto, aunque se lograba la formación de las escorias fayalíticas, la atmósfera del horno no acababa de ser la adecuada, al no alcanzar el suficiente potencial reductor para captar todo el oxígeno procedente del mineral y reducir, de esta forma, todo el hierro presente, dando lugar, por tanto, a escorias muy ricas en óxidos de hierro.

## 5.2. La bala de cañón

El proyectil estudiado es una bala de cañón de geometría aproximadamente esférica (Fig. 6). Cualquier proyectil que vaya a ser impulsado por la explosión de la



**Figura 6.** Bala de cañón procedente de la fábrica de Liérganes.

*Figure 6.* Cannonball from Liérganes Works.



pólvora, debe tener unas características dimensionales que permitan una fácil carga (paso) a todo lo largo del ánima del cañón; su diámetro, por tanto, ha de ser inferior al interno del cañón, con una cierta holgura que permita su uso en cualquier cañón del mismo calibre y que, al mismo tiempo, mantenga la máxima estanqueidad en el momento de la detonación.

Los proyectiles, colados directamente desde el horno alto, podían presentar dos tipologías microestructurales alternativas, ya que el arrabio producido no tenía una calidad constante. Así, podían ser del tipo fundición gris, con estructura perlítica o ferrítico-perlítica, o del tipo fundición blanca, con ledeburita y cementita como constituyentes principales. De estas dos posibilidades, la primera era la ideal, pues al ser su tenacidad superior a la de la segunda, se evitarían posibles roturas frágiles del proyectil en el momento de la explosión.

En la famosa "Enciclopedia Francesa" de Diderot y D'Alembert <sup>[9]</sup> se describe, muy detalladamente, el proceso de moldear balas de cañón de diversos calibres, según las ordenanzas de 1732. Con toda probabilidad, un sistema de moldeo semejante habría sido usado en Liérganes y La Cavada. El trabajo era laborioso, requiriendo labores de carpintería, selección y mezcla de arenas, preparación de modelos, secado de cajas, etc. En la fotografía de la bala, se aprecian, en efecto, las marcas circunferenciales que delatan el moldeo en caja, y el agujero de sección cuadrada que alojó el bebedero y que revela una insuficiente aportación de caldo de la colada.

En el caso que nos ocupa, el proyectil pesa 3.954,5 g y su volumen, supuesto esférico, se puede acotar entre 523,6 y 606,1 cm<sup>3</sup>, al ser el diámetro variable entre 100 y 105 mm. La densidad teórica, por tanto, estaría comprendida entre 7.550 y 6.520 kg/m<sup>3</sup>. Estos valores estarían de acuerdo con los que ofrece la bibliografía que, para balas de cañón del siglo XVII, propone en promedio una densidad de 6.940 kg/m<sup>3</sup> <sup>[3]</sup>. El análisis químico realizado sobre esta pieza ha proporcionado los resultados que se muestran en la tabla IV.

No resulta fácil contrastar estos valores en el contexto de otros análisis procedentes de la misma fuente, pues ciertamente son escasas las referencias com-

posicionales a las piezas fundidas en Liérganes y La Cavada. Únicamente se tiene constancia documental de que, en el período comprendido entre 1630 y 1800, "los cañones santanderinos fueron los más feos y los mejores del mundo" <sup>[3]</sup>, estando fabricados en fundición gris de altísima calidad. En este sentido, esta misma referencia bibliográfica recoge unos análisis realizados en el Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM) en fecha indeterminada pero, lógicamente, anterior a la de publicación del libro (1974). Parece ser que tales análisis fueron realizados tanto sobre balas de cañón como sobre virutas extraídas de alguno de los escasos cañones supervivientes de La Cavada (precisamente su aspecto feo en comparación con los fabricados de bronce, auténticas obras de arte, favoreció que, una vez fuera de uso, fueran refundidos para aprovechar el material en otros menesteres). Tales análisis, en promedio, sitúan el contenido de carbono escasamente por encima del 2%, el manganeso entre el 0,6 y el 1 % para las balas y hasta el 1,5 % para los cañones, y el silicio en torno al 0,3 %, estableciéndose el contenido de azufre entre 0,05 y 0,11 % y el de fósforo en el 0,1 %.

Sin embargo, el elevado contenido en carbono (3,7 %) registrado en el análisis de nuestra bala, unido al moderado contenido en silicio (0,53 %), parecen sugerir más probablemente que en este caso se trate de una fundición blanca. A esta hipótesis contribuye la extraordinariamente alta dureza encontrada en la bala, con un valor promedio superior a 65 Rockwell C.

Ahora bien, sin duda el objetivo primordial de los hornos de Liérganes y La Cavada era producir fundición gris, de mayor ductilidad, y no la extremadamente frágil e inadecuada fundición blanca, incapaz de resistir sin fracturarse los tremendos impactos asociados a las detonaciones. No obstante, también se tiene constancia documental <sup>[3]</sup> de que las fundiciones realizadas en los años 1819 y 1826, como ya se ha comentado, produjeron hierro de clase blanca, por lo que este proyectil podría pertenecer a esa época.

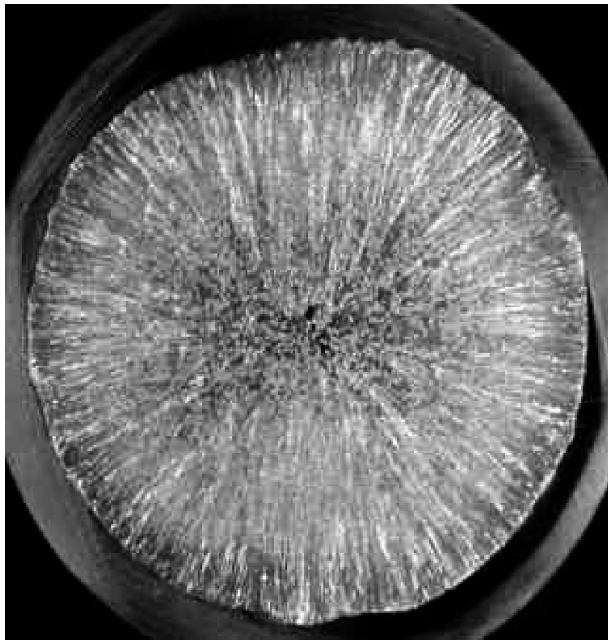
Con el fin de contrastar estos extremos y arrojar algo más de luz a la investigación, se llevó a cabo un estudio metalográfico de la bala, siguiendo para ello los protocolos habituales de las técnicas arqueometalúrgicas <sup>[10 y 11]</sup>; de esta forma, se procedió a su corte según un plano diametral con ayuda de una muela abrasiva refrigerada. Posteriormente, se embebió media bala en resina de poliéster para desbaste y pulido metalográfico. Finalmente, el ataque se efectuó con Nital.

En la figura 7 se muestra el aspecto macroscópico que presenta la bala tras el ataque, revelando la micrografía una cristalización radial, exenta de poros y

**Tabla IV. Análisis de la bala de cañón**  
(% peso)

*Table IV. Analysis of the cannonball (weight %)*

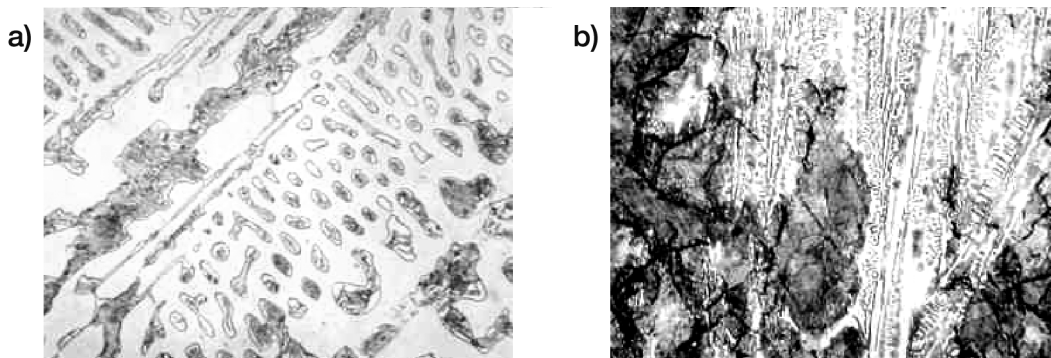
C	Si	Mn	S	P	Fe
3,70	0,53	0,37	0,10	0,074	95,23



**Figura 7.** Macrografía de la bala de cañón.

*Figure 7. Macrographic analysis of the cannonball.*

rechupes importantes. De igual forma, en las micrografías de la figura 8 se aprecian sendos detalles de la microestructura y sus distintos constituyentes, mayoritariamente ledeburita y cementita junto a pequeñas zonas aisladas de grafito y perlita, que efectivamente son los característicos de la fundición blanca, confirmándose de esta forma la naturaleza de la aleación. A este respecto, cabe señalar que la microestructura observada es la propia para un horno alto de poca altura y bajo aporte térmico, uniéndose a ello una alta velocidad de enfriamiento de la pieza a solidificar.



**Figura 8.** Detalles de la microestructura de fundición blanca de la bala de cañón: a) ledeburita (x100) y b) ledeburita, cementita, perlita y grafito (x600).

*Figure 8. Details of the white iron microstructure reported in the cannonball: a) ledeburite (x100) and b) ledeburite, cementite, perlite and graphite (x600).*

## 6. CONCLUSIONES

A la vista de lo expuesto a lo largo del artículo y de los resultados obtenidos, se pueden extraer, con carácter general, las siguientes conclusiones:

- El levantamiento de los primeros hornos altos en España, en las fábricas de artillería de Liérganes y La Cavada, supusieron un importante salto tanto cualitativo como cuantitativo con respecto a los métodos tradicionales de producción de hierro utilizados hasta entonces en las ferrerías.
- El análisis, tanto elemental como mineralógico, de las escorias procedentes de estos hornos altos revela que los procesos de reducción del hierro a partir del mineral correspondiente no estaban del todo perfeccionados, perdiéndose cantidades importantes del metal junto con la escoria.
- Aunque el objetivo principal de las fábricas de artillería de Liérganes y La Cavada era la obtención de hierro dúctil (fundición gris), tanto para sus cañones como para los proyectiles y municiones, el análisis químico y metalográfico de una bala de cañón procedente de una de ellas revela que el material constituyente es fundición blanca, extremadamente dura y frágil y, en consecuencia, poco apto para su uso en servicio.

## REFERENCIAS

- [1] F. Olesa, *La Organización Naval de los Estados Mediterráneos y en especial de España durante los siglos XVI y XVII* (2 tomos), Ed. Naval. Madrid, España, 1968.
- [2] F. González-Camino, *Las Reales Fábricas de Artillería de Liérganes y La Cavada*, Discurso de

- ingreso en la Institución Cultural de Cantabria, Diputación Provincial de Santander, Santander, 1972, pp. 8.
- [3] J. Alcalá-Zamora, *Historia de una empresa siderúrgica española: los altos hornos de Liérganes y La Cavada, 1622-1834*, Diputación Provincial de Santander, Institución Cultural de Cantabria del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Centro de Estudios Montañeses, 1974, pp. 69-73.
- [4] P. Arroyo y M. Corbera, *Ferrerías en Cantabria. Manufacturas de ayer, patrimonio de hoy*, Asociación de Amigos de la Ferrería de Cades, Santander, 1993.
- [5] J.A. Díez Aja, *La fusión del hierro y las fábricas de Liérganes y La Cavada*, Cantabria Tradicional (www.cantabriatradicional.com), Santander, 2006, pp. 52.
- [6] A. Ledebur, *Manuel Théorique et Pratique de la Métallurgie du Fer*, Baudry & Cie (Ed)s., París, 1895, pp. 403.
- [7] R.F. Tylecote, *A History of Metallurgy*, The Institute of Metals, 2<sup>nd</sup> Ed. London, U.K., 1992, pp. 65 y ss.
- [8] G. Rosado y J.C. García *Rev. Metal. Madrid* Vol. Extr. (2005) 101-106.
- [9] D. Diderot y J.B. le R. D'Alembert, *L'Encyclopédie*, París (Francia) 1765.
- [10] J.M. Gómez de Salazar, M. I. Barrena y A. Soria, *Rev. Metal. Madrid* Vol. Extr. (2005). 412-416.
- [11] J. Simón, J. Tartera, M. Marsal y J. Auladell, *Rev. Metal. Madrid* Vol. Extr. (2005) 507-512.