

LA MINERÍA DEL COBRE

Aunque la minería del cobre en España perdió la importancia relativa que tuvo a finales del siglo pasado, debido al gran aumento del consumo mundial y al descubrimiento de importantes minas en otros países, aún tiene relevancia en Europa Occidental que es muy deficitaria en éste metal. En el artículo que ahora presentamos de **Juan Eugenio Morera**, el autor, tras una referencia, inevitable, a la historia de este sector, pasa a describir las características geológicas y técnico-económicas de los yacimientos españoles, sus elevados costes de explotación, la presencia de impurezas y los esfuerzos de renovación tecnológica y de investigación y prospección de las empresas del sector. Concluye el autor con una descripción de la situación del mercado en los últimos años, caracterizada por una fuerte y continuada baja de los precios tras las crisis energéticas que determinaron una reducción y estancamiento de la actividad económica. Una recuperación de ésta mejoraría las expectativas del sector, siempre y cuando fuera lo suficientemente intensa para que el precio del cobre subiese en forma importante.

I. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

EL nombre de «cobre» viene del de Chipre, porque en esta isla egipcios, griegos y romanos se abastecieron de este metal durante treinta siglos. Allí se encontraba en forma elemental que no requería concentración ni fundición.

También la Península Ibérica, y en particular España, ocupó un papel de cierta importancia como suministrador de cobre en la antigüedad. Recientes estudios arqueometalúrgicos han demostrado la existencia de una metalurgia de cobre en varios puntos de la provincia de Huelva en el cuarto milenio antes de Cristo. Los minerales tratados eran óxidos y carbonatos (azuritas y malaqui-

tas), y para la reducción se empleaba carbón de encina. La fecha aproximada de estos hornos primitivos ha podido establecerse de forma rigurosa gracias a los modernos métodos de análisis. No obstante, de estas épocas prehistóricas no se tienen datos para poder evaluar la importancia de esta antiquísima minería.

Sabemos, en cambio, que los romanos investigaron todos los indicios de la llamada «faja pirítica ibérica» (1) —por lo demás, en casi todas las minas españolas de metales se encuentran restos de antiguas labores romanas— y todavía hoy no se explica la extraordinaria habilidad que caracterizaba a los geólogos prácticos que, según parece, acompañaban a las legiones.

Explotaciones romanas más o

menos intensas se encuentran por doquier en «la faja». Pero parece que las más importantes se hicieron en Riotinto (Huelva) y en Aljustrel (Portugal). En Riotinto se han encontrado muchísimos vestigios de intensa actividad minera. Los más importantes desde el punto de vista minero/metalúrgico quizá sean los enormes vacíos de escoria (alrededor de 15,3 millones de toneladas).

Parece que el interés primordial de los romanos no estaba en el cobre sino en la plata, que se concentraba de forma natural en las capas inferiores de las monteras de *gossan* (2). No sabemos qué parte del ingente volumen de escorias procedía de una metalurgia de plata. Pero también consta que explotaron los óxidos de cobre de la zona enriquecida de mineral secundario, para cuyo tratamiento operaron gran número de pequeñas fundiciones, utilizando grandes cantidades de carbón de encina. No parece que los romanos trataran los sulfuros de cobre.

Después de la época romana, la actividad minera del cobre en España decayó y durante largos siglos desapareció por completo (3). Aunque durante la Edad Moderna se intentó, e incluso se inició, alguna actividad en las antiguas minas, la explotación a escala industrial de los yacimientos de cobre se reanudó en el último cuarto del siglo XIX, cuando las minas de Tharsis y Riotinto, en España, y San Domingo, en Portugal, se vendieron o se arrendaron a sociedades británicas constituidas al efecto. Posteriormente otras compañías desarrollaron otros yacimientos menos importantes.

Originalmente el interés de las compañías británicas se fundamentaba principalmente en la ex-

tracción de los sulfuros (piritas ferrocobrizas) para su venta a la industria química, aprovechándose una parte del contenido de cobre mediante el tratamiento de residuos o cenizas de piritas en varias plantas de extracción en el Reino Unido, en el continente y, más tarde, en Norteamérica. Como la capacidad de producción de las minas era mucho más importante, los ingleses aprovecharon, modificándolo, un proceso local para la recuperación de cobre calcinando el mineral extraído y depositado en montones y lixiviando el calcinado para recuperar el cobre por cementación. Los montones de mineral en calcinación se denominaban «teleras». Naturalmente este proceso llevaba consigo la emisión a ras de suelo de grandes cantidades de SO₂ que causaban gran contaminación. Este método fue prohibido por el gobierno español y, a finales del siglo pasado, fue sustituido por la llamada cementación natural u oxidación al aire libre de los sulfuros de cobre, conservándose el azufre de la pirita de hierro. Después de lavar el mineral, las piritas lavadas se vendían para la producción de ácido.

Como este artículo no se propone abarcar la historia de la técnica para la recuperación del cobre contenido en los minerales piríticos españoles, pasamos por alto la evolución de los procesos de fundición utilizados en Riotinto.

En el año 1906 se construyó una nueva fundición en Riotinto para el tratamiento de minerales ricos en cobre, utilizándose cinco hornos de cuba. Esta fundición sufrió varias modificaciones y estuvo en funcionamiento hasta 1970, año en el que fue definitivamente parada.

El primer concentrador de cobre

de 1.000 toneladas/día se construyó en Riotinto y la producción de concentrados se inició en 1930, tratando mineral de cobre diseminado del 1 al 1,8 por 100 de cobre contenido.

La estadística de la producción de cobre en España es complicada. En la etapa 1876-1970 el cobre procedente de las minas españolas se recuperó de diferentes formas: cobre de cementación y mata que se exportaba al Reino Unido, cobre negro y blíster que se producía en Riotinto y, finalmente, cobre contenido en las piritas exportadas que se recuperaba en las ya mencionadas plantas de tratamiento de cenizas fuera de España. Charles Harvey (4) recoge la producción de cobre español en todas sus formas, independientemente del país donde se recuperaba, desde 1876 hasta 1953. En términos absolutos, la producción de cobre pasó de 21.000 Tm. en 1876 hasta 63.700 en 1929, cifra récord de la serie.

Muy interesante es el dato de lo que significaba la producción de cobre de minerales españoles en comparación con la producción mundial. De 1890 a 1900 el cobre procedente de España representó alrededor del 10 por 100 de la producción mundial. En 1890 la producción mundial de cobre ascendió a 274.000 Tm. y el cobre español a 46.800 Tm. España era el tercer país productor, después de Chile y EE.UU. El crecimiento de la demanda de cobre por la extensión masiva de la electrificación determinó una gran expansión de la producción mundial, alcanzándose el millón de Tm. en 1912. (En 1984 la producción minera mundial ascendió a 6.329 millones de Tm.).

Mientras tanto, la producción de cobre español decayó, princi-

palmente por el continuo descenso de la ley de los minerales. En 1936 la producción total procedente de minerales españoles había bajado a 26.000 Tm., de las cuales se produjeron en España, en forma de blíster, unas 8.000.

En años más recientes, el hito más importante fue la construcción de la nueva fundición de cobre de Huelva — que se puso en marcha en 1970 —, condición básica para la puesta en explotación de yacimientos de tamaño medio/pequeño y de leyes relativamente bajas.

II. FORMAS DE PRESENTACION DE LOS MINERALES DE COBRE EN ESPAÑA

Al tratar de clasificar los minerales de cobre presentes en España, hemos dejado de lado, deliberadamente, los criterios puramente geológicos o mineralógicos. Una clasificación de esta clase tendría, sin duda, interés científico, pero desde el punto de vista de la economía de su explotación minera sería menos relevante. Hemos preferido, en cambio, utilizar una tipología simple, basada en criterios técnico-económicos de tratamiento y aprovechamiento del cobre contenido en los minerales.

Así, consideramos que los diversos yacimientos (desgraciadamente no muy numerosos) de nuestro país entran en uno de los tres tipos siguientes: diseminados, masivos y semimasivos. En esta clasificación lo que se tiene en cuenta es si el mineral portador del cobre (sulfuros) se presenta en forma diseminada dentro de la roca matriz o, en el extremo opuesto, en forma masiva. En el

primer caso, la proporción de los sulfuros es porcentualmente baja. En términos de azufre contenido, esta clase de minerales no tendría más de un 5 por 100 de azufre ó 9/10 por 100 de sulfuros.

En el otro extremo tendríamos los yacimientos masivos, en los que el mineral tendría un contenido en azufre de alrededor del 46 por 100, lo que equivale a decir que la suma de los diferentes sulfuros alcanzaría valores superiores al 90 por 100 del total contenido en la roca. La existencia, por lo menos en Riotinto (en la mina subterránea de Alfredo), de una zona mineralizada intermedia, que se explota minieramente en forma independiente, aconseja introducir una tercera categoría, la de los semimasivos, en los que el contenido de azufre oscila aproximadamente entre el 36 y el 40 por 100.

Insistimos en que la razón de esta clasificación se basa exclusivamente en el tratamiento mineralúrgico que se aplica para extraer los sulfuros de cobre y, en consecuencia, el coste en que se incurre en el proceso de tratamiento. Ambos (proceso y coste de tratamiento) son substancialmente diferentes en el caso del mineral diseminado y del masivo. Los minerales semimasivos se pueden asimilar, desde el punto de vista del tratamiento, a los diseminados, aunque a menudo tienen características específicas que aconsejan un tratamiento independiente.

Según esta clasificación, los principales *minerales de cobre diseminados* en España serían los procedentes de los siguientes yacimientos:

- Los minerales de Cerro Colorado (Riotinto), en explotación.
- Los minerales de los diversos

yacimientos de la zona de Arinheiro, Bama, etc., en la proximidad de Santiago de Compostela, también en explotación.

- Las reservas geológicas que posee el grupo minero Ojea en la misma zona anterior y que no están en explotación.
- Los llamados minerales piroclásticos que explota Andaluza de Piratas, S. A. en Aznalcóllar (Sevilla).
- El mineral de Cala (Huelva), en el que la diseminación de los sulfuros de cobre se encuentra en una roca cuyo mineral principal es la magnetita. Actualmente la explotación de este yacimiento está interrumpida.

Los *minerales masivos* actualmente en explotación son los de Aznalcollar, donde coexisten con una explotación de minerales diseminados (los piroclásticos ya mencionados), y el yacimiento de Sotiel, en explotación por la empresa del sector público Minas de Almagrera, S. A.

Además de los dos mencionados, existen en la faja pirítica de Huelva yacimientos muy conocidos de sulfuros masivos, pero cuya explotación se limita a la extracción y trituración del mineral tal cual, como mena principalmente de azufre. Este mineral se denomina tradicionalmente piritita porque ésta es la especie mineralógica predominante.

Los *yacimientos de piritas* más conocidos son los de Tharsis, Riotinto y San Telmo, todos en la provincia de Huelva. Aunque, como decimos, estos yacimientos de piritas se explotan principalmente para aprovechar su alto contenido en azufre, el cobre contenido en buena parte de ellos se recupera en Metalquímica del Nervión (Bilbao), que opera una

planta de tratamiento de los residuos procedentes de la tostación de piritas en las fábricas de ácido sulfúrico.

En algunos de los yacimientos de piritas mencionados se recuperan cantidades relativamente pequeñas de cobre en forma de cáscaras, con un contenido de metal del 60 por 100. Estas cáscaras de cobre proceden del desagüe de minas de interior de piritas y, sobre todo, de la lixiviación de minerales marginales (de ley demasiado baja para ser sometidos al proceso de flotación) o de la lixiviación de pizarras con pequeños contenidos de calcopirita (caso de Herrerías, en la provincia de Huelva).

Con objeto de conocer la importancia relativa de cada una de ellas, facilitamos en el cuadro número 1 la producción de cobre contenido de todas las fuentes mencionadas, en 1984.

III. CARACTERISTICAS TECNICO-ECONOMICAS DE LOS MINERALES ESPAÑOLES

1. Minerales diseminados

1.1. Contenido en sulfuros

Como decíamos en el apartado anterior, esta clase de minerales de cobre se caracteriza por la presencia en la roca de una diseminación generalmente muy fina de sulfuros metálicos, principalmente de cobre. Los minerales de cobre típicos son la calcopirita y, en mucha menor medida, la calcosina, pero con frecuencia estos minerales de cobre van acompañados de otros sulfuros metálicos, principalmen-

CUADRO N.º 1
PRODUCCION DE COBRE CONTENIDO
EN ESPAÑA EN 1984

<i>Mina</i>	<i>Empresa</i>	<i>Tm de Cu Contenido</i>
<i>Minerales diseminados</i>		
Cerro Colorado	Río Tinto Minera	27.740
Santiago	Río Tinto Minera	8.500
Aznalcóllar (piroclásticos)	Andaluza de Piratas	4.700
Cala	PRESUR	—
<i>Minerales semimasivos</i>		
Alfredo	Río Tinto Minera	10.660
<i>Minerales masivos</i>		
Aznalcóllar	Andaluza de Piratas	4.700
Sotiel	Minas de Almagrera	500
<i>Cáscaras de cobre de minas</i>		
Riotinto	Río Tinto Minera	2.200
Varias minas (*)		93
<i>Cáscaras de residuos de piratas</i>		
Metalquímica del Nervión		3.600

(*) Tharsis, Herrerías, Concepción...

se requiere una molienda tan fina, basta moler a 270 mallas.

Estas características mineralógicas son desfavorables en comparación con la mayor parte de las minas extranjeras. Gran parte de los yacimientos extranjeros pertenecen al tipo generalmente conocido como *porphyry copper*, en los que es suficiente moler a unas 200 mallas. Esta característica tiene gran importancia económica, ya que la molienda representa alrededor del 30 por 100 del coste de tratamiento (desde la trituración hasta la concentración).

1.3. Ley del concentrado.

La ley de cobre de los concentrados españoles es baja (18/23 por 100) en comparación con la mayor parte de los concentrados que se producen en el mundo. Ello es debido a tres causas fundamentales:

- a) en los minerales españoles la especie mineralógica casi exclusiva es la calcopirita, con baja presencia de las especies más ricas, como la calcosina y la bornita (5);
- b) alta presencia de pirita íntimamente mezclada con calcopirita;
- c) presencia de otros sulfuros metálicos no cobrizos.

te de zinc (blenda/esfalerita), de plomo (galena) y de hierro (pirita propiamente dicha). En algún yacimiento (Santiago) los sulfuros son casi exclusivamente calcopirita, pirita y pirrotina. En otro (Cala, provincia de Huelva) un único mineral de cobre, la calcopirita, se encuentra diseminado en magnetita. En general, el contenido total de azufre de todos los sulfuros metálicos se sitúa en torno al 5 por 100 de la roca, del cual los sulfuros de cobre representarían un 9/10 por 100. La ley de cobre contenido en esta clase de yacimientos es baja, como se ve en el cuadro n.º 2.

1.2. Tamaño de liberación de los sulfuros de cobre

Los principales yacimientos españoles, en la llamada faja pirítica

ca de Huelva, requieren molien- das muy finas para poder liberar los sulfuros del resto de la roca y, dentro del conjunto de sulfuros, los de cobre.

En Cerro Colorado hace falta moler a 270/325 mallas para liberar la calcopirita. En Santiago no

CUADRO N.º 2
CONTENIDO EN COBRE DE MINERALES DE
COBRE DISEMINADOS

<i>Mina</i>	<i>% Cu</i>	<i>Observaciones</i>
Cerro Colorado	0,60	Media 1984
Santiago	0,47	Media 1984
Aznalcóllar (piroclasto)	0,58	Media yacimiento
Cala	0,27	Media reservas explotables

Estas causas pueden presentarse simultánea o parcialmente, según los yacimientos, complicando su mineralurgia, reduciendo la recuperación y disminuyendo la ley.

El proceso consiste generalmente en una flotación de todos los sulfuros, seguida de una depresión de la pirita mediante cal. Pero este proceso es sólo parcialmente eficaz. Parte de la pirita no se separa y, en consecuencia, el concentrado de cobre sigue conteniendo una cierta cantidad de pirita y otros sulfuros (blenda, pirrotina). El resultado es un concentrado con ley de cobre más baja que el procedente de los *porphyry copper*. Estos suelen tener una ley de cobre por encima del 30 por 100.

Esta característica de los minerales españoles, que es la causa de la ley relativamente baja del concentrado, tiene consecuencias económicas importantes. Por un lado, el coste de transporte a las fundiciones es más alto por unidad de cobre contenido. Por otro, el coste de tratamiento en las fundiciones es más elevado. Comercialmente, las fundiciones comerciales (*custom smelters*) cargan por tonelada de concentrado una cifra fija (por ejemplo, U.S.\$ 40/50 por Tm. de concentrado) y, por ello, cuanto más baja es la ley de cobre en el concentrado mayores son los gastos de tratamiento (*smelting charges*) por unidad de cobre contenido en el concentrado.

También las pérdidas en fundición y, como consecuencia, las deducciones comerciales de cobre pagable son más elevadas por tonelada de cobre contenido en los concentrados de ley baja.

1.4. Fragmentación, dureza y abrasividad de los minerales.

Los yacimientos españoles de

cobre, tanto los de la «faja pirítica» como los de Santiago tienen características de dureza y fragmentabilidad más desfavorables que la mayoría de los yacimientos extranjeros. Típicamente, en los *porphyry copper* la roca matriz ha sufrido, por el vulcanismo que originó el yacimiento, una especie de trituración natural, de forma que, como la fragmentabilidad natural es alta, el consumo específico de explosivos en el arranque es bajo. Una idea del efecto económico de estas características físicas es el consumo de explosivos, que en los yacimientos españoles alcanza los 600 grs. por m.³, mientras que en los yacimientos tipo *porphyry* suele estar en los 300 grs. (6). Estas características desfavorables de fragmentabilidad tienen también su repercusión en los rendimientos y costes de las excavadoras.

En cuanto a la trituración, las rocas de los yacimientos españoles necesitan una trituración primaria en general sobredimensionada. El autor ha visitado minas de cobre, como la Caridad (Méjico) y Bouganville (Papua-Nueva Guinea), en las que la planta de trituración primaria apenas es necesaria.

La mala fragmentabilidad, la dureza y la abrasividad de la roca tienen gran importancia en los costes de molienda, entre los cuales es relevante el llamado *work index*, o índice de Bond, que mide el consumo energético en la molienda del mineral. Las dos partidas más importantes del coste de molienda son el consumo de hierro, relacionado con la abrasividad (bolas, barras y emplacados de molino), y el de energía (electricidad), relacionado con la fragmentabilidad.

El consumo de hierro típico en

los yacimientos diseminados de la faja pirítica estará entre los 1.000 y los 1.100 grs. por tonelada tratada, y el consumo energético total del tratamiento se situará alrededor de los 25 kwh por tonelada tratada.

Resumiendo, los yacimientos diseminados españoles actualmente en explotación tienen características técnico-económicas menos favorables que la mayor parte de los yacimientos en explotación en el mundo occidental.

2. Minerales masivos

Como decíamos anteriormente, los yacimientos de sulfuros masivos son aquellos en los que prácticamente todo el cuerpo mineralizado está constituido por sulfuros metálicos, principalmente sulfuros de hierro (piritas), aunque también están presentes, en mayor o menor medida, según los diversos yacimientos, otros sulfuros de cobre (calcopirita), de zinc (blenda/esfalerita) y de plomo (galena). El carácter predominante del sulfuro de hierro es el origen de que la mayor parte de estos yacimientos se conozcan como masas de piritas. En algunos casos, en los que la proporción de blendas y galenas es más alta, nos encontramos con la denominación local de *minerales complejos* o, simplemente, *complejos*. Todos estos yacimientos están situados en la faja pirítica del suroeste de la Península Ibérica.

Desde fines del siglo XIX, y hasta hace menos de diez años, los yacimientos de sulfuros masivos eran explotados esencialmente como mena de azufre para la producción de ácido sulfúrico, aprovechándose solamente parte del cobre y la casi totalidad de los metales preciosos en el trata-

miento posterior de los residuos. Ultimamente, con la introducción en Metalquímica de elementos del proceso Complex, se recupera la mayor parte del contenido de Zn en las cenizas, en forma de zinc electrolítico.

Lo que interesaba era el alto contenido de azufre, valorándose comercialmente una parte del cobre. El precio en los mercados internacionales y también en el interior se calculaba base 48 por 100 de azufre. Los llamados complejos no se explotaban. La presencia en ellos de proporciones mayores de otros sulfuros reducía la ley de azufre y la contrapartida de zinc y plomo no se valoraba, porque el procedimiento tradicional de tratamiento de las cenizas no permitía la recuperación del plomo y sólo parcialmente la del zinc. Por otra parte, la presencia de plomo y zinc planteaba otros problemas en la tostación de las piritas, y en cuanto al plomo (7), su no recuperación afectaba al último aprovechamiento de las cenizas ya lixiviadas, que se utilizaban como un mineral de hierro llama-

do, por su color, mineral de púrpura (*purple ore*).

En definitiva, no se pensó en la explotación de los yacimientos de sulfuros complejos porque, como tales, no eran adecuados para la vía tostación-tratamiento de cenizas. Hay que añadir un factor de gran importancia. Hasta hace pocos años, la opinión técnica generalizada era que la separación de los diferentes sulfuros por la vía de flotación era económicamente inviable y técnicamente muy difícil. Esta es otra característica de los minerales sulfurosos de la «faja pirítica», esto es, la estructura mineralógica íntimamente relacionada de los diferentes sulfuros.

Para comprender mejor la importancia de este problema es conveniente tener a la vista los principales yacimientos de sulfuros masivos en España, con la estimación de las reservas y de sus contenidos en metales no férricos (véase cuadro n.º 3). De estos yacimientos, sólo el de Aznalcóllar y, más recientemente, el de So-

tiel se han explotado como mena polimetálica, produciéndose concentrados de cobre, de zinc y de plomo, y quedando como subproducto piritas flotada. Los demás yacimientos se explotan como mena de azufre, produciéndose piritas trituradas al tamaño requerido por las fábricas de ácido.

Según se observa en el cuadro número 3, las mayores reservas de sulfuros masivos pertenecen a la Compañía de Tharsis. A diferencia de Aznalcóllar y Sotiel, los yacimientos de Tharsis eran y son muy adecuados para la producción de ácido sulfúrico por su alto contenido en azufre (46/48 por 100) y su relativamente bajo contenido en plomo y arsénico.

Históricamente, las piritas de Tharsis han tenido un mercado asegurado, lo que no ocurría con los minerales de Aznalcóllar y Sotiel. Por otra parte, el contenido relativamente bajo de Zn y Pb no justificaba el planteamiento de su beneficio por la vía de la flotación.

CUADRO N.º 3
ESTIMACION DE RESERVAS CONOCIDAS DE LOS PRINCIPALES YACIMIENTOS ESPAÑOLES DE SULFUROS MASIVOS

Yacimiento	Empresa	Mill. de Tms.	Contenido de metales no férricos				
			Cu %	Zn %	Pb %	Ag g/tm.	Au g/tm
Filón Sur, filón Norte, Sierra Bullones	Tharsis	70(*)	0,65	2,09	0,82	28	0,90
La Zarza	Tharsis	50(*)	0,59	1,91	0,76	28	1,20
San Dionisio	Río Tinto Minera	46(*)	1,06	2,50	0,63	21	0,37
San Antonio	Río Tinto Minera	9,5	1,68	2,19	1,08	64	0,60
Aznalcóllar	Andaluza de Piritas	43	0,44	3,33	1,77	67	ND
Sotiel	Minas de Almagrera	59(*)	0,61	3,80	1,60	ND	ND
San Telmo	San Telmo Ibérica	2,3	1,40	1-2	ND	ND	ND

Notas:

1) Las cifras marcadas con (*) corresponden a reservas geológicas.

2) La cifra de Aznalcóllar corresponde a las reservas mineras al principio de la explotación.

2.1. Contenidos en sulfuros

Ya hemos mencionado que más del 90 por 100 de la roca de los yacimientos masivos son sulfuros. La ley de azufre del mineral estará entre el 46 y el 48 por 100 de S. La proporción de los diferentes sulfuros es, naturalmente, diferente en los tres yacimientos más importantes. (Aznalcóllar, Sotiel y Masa San Dionisio). Por ejemplo, en Aznalcóllar, según los análisis del cuadro n.º 3, y teniendo en cuenta una ley de azufre del 46 por 100, la blenda representaría un 5 por 100, la galena un 2 por 100 y la pirita casi un 28 por 100. Si todo el cobre estuviera en forma de calcopirita, el contenido de ésta sería del orden del 1,30 por 100 (8).

2.2. Tamaño de liberación y ley del concentrado.

Andaluz de Piritas fue la pionera en el tratamiento mineralúrgico de los yacimientos de este tipo. La planta empezó a funcionar en enero de 1980 sobre la base de la flotación global de todos los sulfuros, seguida de una flotación diferencial de cada uno de ellos.

El problema técnico-económico principal que se presentaba era la necesidad de una molienda extremadamente fina para conseguir concentrados de cada metal no férreo con el menor contenido posible de los otros metales y con una recuperación aceptable.

Limitándonos al objetivo de este artículo, que es la minería de cobre, hay que resaltar que la recuperación de cobre en estos minerales masivos por los procedimientos de flotación hasta ahora aplicados es baja, del orden del 70 por 100, que compara desfavorablemente con el 80-85 por 100

que se obtiene en los minerales diseminados. Por otra parte, el concentrado de cobre no está completamente limpio de zinc y de plomo. Un análisis de la producción corriente de concentrado podría arrojar valores de un 20,5 por 100 de Cu, 4 por 100 de Zn, 4 por 100 de Pb y 1.500 gr. de Ag.

El problema principal del concentrado de cobre de Aznalcóllar es su contenido en ciertas impurezas, especialmente antimonio (más del 2 por 100), que hacen muy difícil su tratamiento normal en las fundiciones de concentrados convencionales. Más adelante se tratará este tema de las impurezas con carácter general para todos los minerales españoles.

En cuanto a Sotiel, el yacimiento se puso en explotación por minería de interior, y la planta de concentración inició sus operaciones en otoño de 1984. El proceso es similar al de Aznalcóllar y los problemas mineralúrgicos que se plantean también. Un análisis de la producción reciente de concentrados de cobre podría arrojar los siguientes resultados: 17/20 por 100 Cu, 3/5 por 100 Pb, 4/6 por 100 Zn, 0,8/1,5 por 100 Sb.

Las características de fragmentación y abrasividad de los yacimientos masivos son similares a las de los demás yacimientos. No obstante, el coste de molienda es mucho más elevado. Por ejemplo, en Aznalcóllar el consumo de hierro alcanza a 2.180 grs. por tonelada de mineral tratado y el de energía a 49 kwh por tonelada de mineral, ya que el tamaño al que es necesario moler es mucho más fino.

IV. SUBPRODUCTOS E IMPUREZAS PRESENTES EN LA PRODUCCION DE MINERALES DE COBRE ESPAÑOLES

En los yacimientos de cobre es frecuente encontrar valores económicamente aprovechables de otros metales. Así, por ejemplo, el molibdeno es un metal que está presente, en mayor o menor medida, en casi todos los yacimientos del tipo *porphyry copper*, aportando una valiosa contribución a la economía de estas explotaciones.

Otros yacimientos contienen diferentes metales valiosos. Bouganville, en Papua-Nueva Guinea, tiene cantidades sustanciales de oro: 0,50/0,60 gr. por tonelada métrica de mineral, ó 28/35 grs. por tonelada de concentrado. Palabora, en Africa del Sur, contiene valores aprovechables de uranio, magnetita y fosforita. En España, varios yacimientos contienen cantidades, generalmente no muy importantes (9), de metales preciosos, según se puede ver en el cuadro n.º 4, en el que se muestran los contenidos aproximados de estos metales en los concentrados.

Además, en los minerales semimasivos, y sobre todo en los masivos, se obtiene como subproducto pirita de flotación, que requiere plantas de ácido equipadas con hornos especialmente diseñados para tratar piritas tan finas. Existen en España plantas de ácido dotadas de tales instalaciones, si bien la producción de piritas de flotación es superior a la capacidad de tratamiento actual. En general, y con excepción de la plata de Aznalcóllar y del oro de Cala, el crédito por metales preciosos tiene poca importancia

CUADRO N.º 4
**CONTENIDOS DE ORO Y PLATA EN CONCENTRADOS
 ESPAÑOLES (gr/tm)**

Yacimiento	Oro	Plata
Cerro Colorado	1,2	70/100
Santiago	1,2	35
Cala	3/4	20
Aznalcóllar: piroclásticos	0,4	200
piritas	1	1.500
Sotiel	N.D.	80/150

en la economía de las explotaciones mineras españolas (10).

En cambio sí existe un problema de impurezas que conviene tratar con más extensión. En general, fuera de España se encuentran muy pocos yacimientos con impurezas que tengan importancia económica significativa. Durante muchos años prácticamente el único concentrado con impurezas muy elevadas que se ofrecía en el mercado era el de Lepanto (Filipinas) cuyo concentrado contenía el 10 por 100 de arsénico (11).

Ya se ha dicho que los *porphyry copper* se caracterizan por producir concentrados altos en cobre y sin otros sulfuros metálicos (zinc, plomo). Ahora añadimos que carecen también de otras impurezas, como el antimonio, el arsénico y el bismuto. Estos elementos son altamente perjudiciales porque sólo se eliminan parcialmente en las fundiciones convencionales. En el refinado electrolítico se elimina una parte de estas impurezas, pero otra queda en el cobre catódico. El cobre destinado a usos eléctricos, que constituye más del 60 por 100 del consumo total, debe cumplir requisitos muy estrictos, y la tolerancia en anti-

monio y arsénico en las normas internacionales es mínima (12).

Casi todos los concentrados españoles de la «faja pirítica» contienen valores variables de antimonio y arsénico. Esta es una característica general de toda la faja, si bien los contenidos varían según los yacimientos. En particular, la concentración de impurezas es superior en los yacimientos masivos. Con pocas excepciones, las piritas ibéricas contienen un 0,3/0,4 por 100 de arsénico en cabeza. De lo anterior quedan excluidos los yacimientos de Cala y Santiago, cuya formación geológica es distinta. Cala producía un concentrado muy limpio y Santiago también (ver cuadro n.º 5).

Este problema de las impurezas tiene gran importancia, ya que no sólo afecta al menor valor del concentrado, por las penalizaciones usuales en el comercio internacional de minerales, sino que en algunos casos impide totalmente el tratamiento en cantidades importantes en las fundiciones convencionales.

En lo que se refiere a España, este problema se plantea de forma grave sólo en los concentrados de Aznalcóllar y Sotiel, pero es indiscutible que en el balance metalúrgico de la fundición de Huelva influye ya el contenido de antimonio y arsénico de los concentrados de Cerro Colorado. En el epígrafe VII se trata este problema con más detalle.

V. RESERVAS

En un trabajo sobre la minería de cobre, como sobre cualquier otro sector minero, parece obligado tratar el tema de las reservas. Sin embargo, el autor de este artículo confiesa su reticencia al abordar esta materia por la gran dificultad que presenta. En primer lugar, habría que distinguir entre reservas geológicas y reservas mineras. Las primeras resultarían de la investigación geológica de un

CUADRO N.º 5
**CONTENIDOS APROXIMADOS DE ANTIMONIO Y
 ARSENICO EN CONCENTRADOS ESPAÑOLES (en %)**

Yacimiento	Sb	As
Cerro Colorado	0,10	0,18
Aznalcóllar: concentrado de piritas	2/2,50	0,15
concentrado de piroclastos	N.D.	0,15
Sotiel	0,8/1,5	0,2/0,5
Cala	0,05	0,08
Santiago	0,01	0,02

yacimiento. Las segundas serían aquella parte de las geológicas para las que existe un plan de extracción minera viable técnica y económicamente.

En la minería a cielo abierto el plan minero resulta del cálculo de una corta, lo que implica que una parte de la mineralización existente queda fuera de la corta elegida. En algunos casos este cálculo es más fácil: cuando la mineralización está bien localizada porque el yacimiento es de tipo masivo o porque la disseminación es homogénea. Pero en otros yacimientos disseminados, como el de Cerro Colorado, la mineralización es errática y hay que aplicar procedimientos geoestadísticos para determinar el tonelaje de mineral. Se sabe que existe mineral, pero no se sabe exactamente dónde. En estos casos es fundamental determinar la ley de corte (*cut-off grade*) y, a partir de ella, establecer la relación estéril/mineral. A leyes de corte más bajas la relación disminuye y las reservas mineras aumentan. La ley de corte está, a su vez, determinada, entre otras variables, por el precio esperado del cobre y por la mayor o menor dificultad de la minería selectiva. En general, los *porphyry copper* son yacimientos disseminados dentro de masas bastante homogéneas. Hay zonas de estéril interior (dentro de la corta) fácilmente identificables. La elección de la ley de corte no plantea problemas. Está casi definida por la naturaleza del yacimiento. Se conoce el mineral que hay y dónde está.

En la minería de interior es muy importante acertar en la selección del método minero que se adapte mejor a las características físicas de la roca, de forma que el plan minero sea el más económico e incorpore el máximo posible

de las reservas geológicas. Pero en esta técnica de laboreo no es posible extraer la totalidad de las reservas. Según los diferentes métodos de minería interior, la recuperación varía. Como decíamos, el método se elige según las características de la roca. En algunos casos, como en Alfredo (Riotinto), la roca es tan competente que es posible adoptar métodos como el *blast hole stoping* con relleno hidráulico, en el que la mecanización es alta (13).

Otro problema, al hablar de reservas mineras, es su carácter variable según el precio del metal y, en menor medida, la evolución tecnológica.

También ocurre que las empresas no tienen siempre el mismo concepto sobre lo que son reservas probadas, probables o posibles. No todas las empresas dan la misma importancia al reconocimiento completo de sus reservas, lo cual es explicable por el elevado coste de una investigación bien realizada.

Con todas estas matizaciones, debe leerse el cuadro n.º 6 sobre reservas. Se puede observar que en este cuadro no figuran las reservas cuya concesión posee el grupo minero Ojea, cerca de Santiago. Estas podrían ascender a 7 millones (geológicas) con 0,7/0,8 de Cu. La profundidad de la mineralización no permite la minería a cielo abierto. Habida cuenta de los altos costes de la minería interior, es difícil pensar en su explotabilidad. Tampoco se tienen en cuenta las reservas de mineral masivo de la Masa San Dionisio por no existir un plan conocido de viabilidad técnico-económica.

Por último, no se ha cifrado tampoco el cobre de los yaci-

mientos convencionales de pirritas, parte del cual se recupera a través de Metalquímica. Por esta vía se obtienen anualmente 3.500/4.000 toneladas de cobre contenido en cáscaras. Si consideramos veinte años de explotación (las reservas permiten más) tendríamos una cifra adicional de, aproximadamente, 70.000/80.000 toneladas de cobre.

VI. PRODUCCION DE COBRE MINERO EN ESPAÑA

1. Evolución de la producción

Hora es de cifrar cuantitativamente la importancia que tiene la producción de cobre de la minería española. En el cuadro n.º 7 se facilita la serie de producción de cobre minero en España desde 1971 hasta 1984. Se elige como punto de partida 1971, año en el que se inicia por Río Tinto Patiño la producción de concentrados de cobre en la mina a cielo abierto de Cerro Colorado, la fuente más importante tanto por su producción como por sus reservas.

En el período 1972-1975 la producción se mueve entre las 25.000/32.000 tms. En 1976 entra en producción la planta de concentración de Santiago, que aporta unas 10.000 tms. anuales de cobre contenido en concentrados. En 1981 se pone en marcha la ampliación de las plantas de Riotinto mediante la expansión de la corta de Cerro y la entrada en producción del yacimiento semimasivo de Alfredo con el nuevo método de extracción.

En 1980 se había iniciado la producción de concentrados en la mina a cielo abierto de Aznalcó-

CUADRO N.º 6
ESTIMACION DE RESERVAS MINERAS DE COBRE EN ESPAÑA
(Tms. de cobre recuperables)

Yacimiento	Clase	Empresa	Mineral	Ley cabeza	Cobre recuperable	Situación del yacimiento
Cerro Colorado	cielo abierto	Río Tinto Minera	195 Mill.	0,43	670.000	En explotación
Santiago	cielo abierto	Río Tinto Minera	22,5 Mill.	0,45	81.000	En explotación
Alfredo	interior	Río Tinto Minera	7 Mill.	1,50	84.000	En explotación
Aznalcóllar						
• piríticos	interior	APIRSA	43 Mill.	0,44	132.440	En explotación
• piroclastos	interior	APIRSA	30 Mill.	0,58	139.200	En explotación
Sotiel	interior	Minas Almagrera	29,5 Mill.	0,61	125.965	En explotación
Cala	cielo abierto	PRESUR	24 Mill.	0,27	48.600	Interrumpida la explotación
San Antonio	interior	Río Tinto Minera	10 Mill.	1,67	124.250	Explotación no iniciada
					1.401.455	

Notas:

- 1) Las reservas de RTM son a 1-1-85. En todos los yacimientos se ha tomado como recuperación mineralúrgica el 80 %. Es posible que la recuperación de Santiago y Alfredo sea mayor.
- 2) Las reservas de APIRSA son al iniciarse la explotación. Se toma una recuperación del 70 % para los piríticos y un 80 % para los piroclastos.
- 3) En Cala se supone una recuperación del 75 % por la baja ley de cabeza.
- 4) Sotiel. Suponemos que las reservas geológicas se convierten en 29,5 Mill. de reservas mineras y se le aplica al mineral una recuperación mineralúrgica del 75 %.
- 5) En San Antonio se supone una recuperación del 75 %.

llar, con sus dos líneas; minerales masivos (piríticos) y piroclastos. Esta producción se interrumpió en 1982, después de que dos años de sequía agotasen las reservas de agua de la presa, reanudándose en 1983.

En el cuadro de producción no se menciona la mina de Sotiel, de la empresa del INI Minas de Almagrera. Después de largos años de estudio y preparación minera, se inició la producción de la planta en 1984 con menos de 1.000 toneladas de cobre contenido en concentrado. En 1985 se estima que esta explotación alcanzará un ritmo de 2.500 Tms de cobre contenido en concentrados, además de los concentrados de zinc, plomo y pirita. El mineral masivo se extrae por minería interior y se somete a un complejo proceso de flotación similar al de Aznalcóllar (14).

2. Importancia de la producción de cobre en España

No todos los concentrados de cobre producidos en España se consumen en nuestro país, por razones que se explicarán más adelante.

Para conocer el balance de la producción/consumo de cobre es más conveniente analizarlo desde las fases siguientes a la de la concentración, esto es, la fundición y el refinado.

Adelantemos aquí que el consumo de cobre refinado en España, según las estadísticas de UNICOBRE (Asociación de Transformadores de Cobre Refinado), se mueve alrededor de las 120.000 Tms., esto es, una cifra aproximadamente el doble de la produc-

ción de cobre minero. Sin embargo, la producción española tiene considerable importancia si se la compara con la de los demás países de la Comunidad Económica Europea, que no supera en total las 5.000 Tms. Fuera de la C.E.E. hay tres países productores de cierta importancia en la Europa Occidental: Suecia (64.000 Tms.), Finlandia (37.000 Tms.) y Noruega (26.200 Tms.). Todas estas cifras corresponden a 1983. Pensando, pues, en la integración de España en la C.E.E., las 60/65.000 Tms. de producción española tienen una importancia relativa considerable.

VII. TRATAMIENTO DE LOS CONCENTRADOS DE COBRE

En un artículo sobre la minería

del cobre, especialmente sobre la minería del cobre en España, es imposible dejar de considerar la fase siguiente, es decir, el o los procesos que transforman los concentrados y las cáscaras de cobre en cobre refinado, esto es, en un producto de alta pureza, objeto de un comercio interno e internacional de gran importancia, cuyo precio se establece en las grandes bolsas internacionales de metales, básicamente en el London Metal Exchange. En definitiva, desde el punto de vista comercial, uno de los *commodi-*

ties más importantes del mercado internacional.

El único proceso para el tratamiento de las materias primas cobrizas cuya viabilidad está completamente probada es el pirometalúrgico, la metalurgia del fuego, es decir, el proceso de fundición.

Sin embargo, desde hace muchos años los científicos y los técnicos han estudiado procesos hidrometalúrgicos (metalurgia por vía húmeda) impulsados por diversas razones. Una de ellas ha

sido la creciente preocupación por la protección del medio ambiente, ya que las fundiciones, en mayor o menor medida, contaminan la atmósfera. Los simples y baratos procesos de fundición antiguos, especialmente el más popular, los hornos de reverbero, han sido prácticamente abandonados en casi todos los países, porque en ellos el azufre contenido en los sulfuros de cobre se emitía en su casi totalidad libremente a la atmósfera en forma de SO₂, mediante chimeneas que difundían el dióxido de azufre a

CUADRO N.º 7
PRODUCCION DE COBRE MINERO EN ESPAÑA
(Tms. de cobre contenido)

	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984
<i>Concentrados</i>														
Río Tinto (ERT) (1)	1.008	1.155	1.600	1.918	1.520	1.000	18	-	-	-	-	-	-	-
Cerro Colorado (RTM) (1)	13.490	17.227	19.000	17.482	21.150	16.543	16.344	15.646	17.801	18.256	26.515	31.696	31.902	38.800
Santiago (RTM)	-	-	-	-	-	10.354	11.550	11.025	11.025	10.639	9.784	9.810	9.879	8.500
Cala (Min. de Andévalo) (2)	-	910	1.900	1.550	2.380	2.400	587	170	-	1.600	-	-	-	-
La Nava (Hidronitro) (2)	927	367	350	270	360	400	188	-	-	-	1.540	150	13	-
Aznalcóllar (APIRSA)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
• piríticos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.800	4.200	-	2.750	4.700
• piroclastos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.100	3.850	-	1.925	4.700
Total:	15.425	19.659	22.850	21.673(3)	25.470(3)	30.697	28.687	26.841	28.826	35.385	45.889	41.656	46.469	56.700
<i>Cáscaras</i>														
Río Tinto (ERT) (4)	734	1.639	800	1.091	1.090	1.000	1.120	-	-	-	-	-	-	-
Cerro Colorado (RTM) (4)	-	184	1.000	1.126	1.900	1.783	980	2.510	3.201	2.556	2.058	2.726	2.715	2.200
Metalquímica	3.741	3.619	4.175	4.222	3.325	3.906	3.276	3.426	2.991	3.066	3.341	3.213	4.257	3.452
Varias minas (5)	146	230	250	240	240	240	350	394	525	407	225	274	109	93
Total:	4.621	5.672	6.225	7.055	7.180	6.929	5.726	6.330	6.717	6.029	5.624	6.213	7.075	5.745
TOTAL COBRE:	20.046	25.331	29.075	28.728	32.650	37.626	34.413	33.171	35.543	41.424	51.513	47.869	53.544	62.445

Notas:

- 1) En 1976 se fusionaron las dos explotaciones mineras en la zona de Riotinto pertenecientes a ERT y a Río Tinto Minera (RTM). El cobre procedente de Alfredo está incluido en la producción de Cerro.
- 2) En 1971 la producción global de Cala y La Nava fue de 927 Tms.
- 3) En 1974 y 1975 se incluyen 93 y 60 Tms. de cobre, respectivamente, de la mina San Enrique.
- 4) Hasta 1977 inclusive subsistieron en Riotinto dos plantas de cementación. A partir de 1978 todas las aguas cobrizas se tratan en una sola planta.
- 5) Las cifras son estimadas y el grado de precisión varía. Hay un aumento de producción de cáscara entre los años 1977-1980 que es debida a la entrada en producción en Herrerías de una planta de cementación de cobre a partir de aguas de lixiviación de pizarras.
- 6) No se ha incluido el cobre contenido en las matas cobrizas procedentes de las fundiciones de plomo españolas, que podría cifrarse en 200/300 Tms. anuales.

capas más altas de la atmósfera. Por ejemplo, la mayor parte de las fundiciones de EE.UU., hasta hace pocos años, se basaba en hornos de reverbero.

La política de protección del medio ambiente, más o menos intensa según la densidad de población de los diferentes países, ha obligado a abandonar el barato proceso de fundición de reverbero, imponiéndose principalmente el proceso *flash smelting*, desarrollado por la empresa finlandesa Outokumpu. Con el *flash* la casi totalidad del SO_2 se transforma en ácido sulfúrico. El ácido de las fundiciones de metales no féreos se denomina «fatal», porque su producción es inevitable cualquiera que sea la demanda de ácido. En algunos países, donde las fundiciones de cobre están ubicadas en zonas poco pobladas, la salida del ácido es complicada y costosa, por ser un producto de transporte caro en comparación con su precio. En determinadas coyunturas, el ácido sulfúrico de fundición se ha llegado a vender a precio FOB negativo. Este problema ha impulsado a la investigación de procesos hidrometalúrgicos en los que no existe la desventaja de tener que disponer del ácido.

El encarecimiento de los costes de fundición, tanto de capital como de operación, ha sido otra de las causas que ha impulsado también a la búsqueda de procesos hidrometalúrgicos que fuesen más económicos y viables en unidades más pequeñas, ya que el tamaño mínimo económico de las fundiciones ha ido aumentando por razones económicas y gracias al constante desarrollo de la tecnología.

Por otra parte, la pirometalurgia, hasta el momento, no ha sido

capaz de resolver satisfactoriamente el tratamiento en gran escala de concentrados «sucios», es decir, con contenido de otros metales y, sobre todo, con impurezas precisamente de la clase que, por la naturaleza de nuestros yacimientos, nos preocupan principalmente: arsénico y antimonio.

Alguna fundición, por ejemplo Olen, en Bélgica, se ha especializado en el tratamiento de minerales de cobre y plomo. Pero tampoco puede admitir cantidades importantes de concentrados altos en antimonio y arsénico. Quizás la fundición de Ronnskar, en Suecia, perteneciente a la empresa Boliden, sea una de las más especializadas en tratar concentrados complejos con contenidos de arsénico altos.

En España existe en la actualidad una sola fundición plenamente adecuada para tratamiento de concentrados sulfurados. Ubicada en la zona industrial del puerto de Huelva, inició sus operaciones en 1970 basándose en dos hornos de cuba del modelo modificado por el proceso japonés Momoda, y convertidores y hornos convencionales de afino. Además contaba con una planta de ácido sulfúrico para el tratamiento de los gases residuales y una refinería electrolítica.

En 1975 se puso en marcha un horno *flash* y una segunda planta de ácido sulfúrico. La decisión de construir un horno *flash* sustituyendo a los hornos Momoda se basaba en la necesidad de doblar la capacidad de producción (para llegar a unas 80/85.000 Tms. de cobre blíster al año). Fueron consideraciones importantes en la elección del proceso Outokumpu la necesidad de reducir la contaminación y la mejora de los costes de operación unitarios.

A su vez, la capacidad inicial de la electrolisis fue aumentada dos veces hasta la cifra actual de 105.000 Tms./año.

La localización de la fundición en el puerto de Huelva se basaba en la proximidad del yacimiento de Cerro Colorado y en la necesidad de importar tonelajes importantes de concentrados extranjeros para alcanzar una capacidad mínima económica, para lo que había que construir la fundición cerca de un puerto abierto al tráfico internacional.

La construcción de una fundición moderna en Huelva tuvo gran importancia estratégica, porque hizo posible y estimuló la búsqueda y el desarrollo de yacimientos de baja ley en nuestro país. Sin embargo, los concentrados de Aznalcóllar y Sotiel no se tratan normalmente en Huelva. Como se ha dicho, estos concentrados tienen contenidos en antimonio muy elevados.

El concentrado de Cerro Colorado contiene también impurezas en cantidades apreciables (véase cuadro n.º 5), si bien aquéllas no llegan al nivel tan elevado que alcanzan en los concentrados de Aznalcóllar y Sotiel. El cátodo de Huelva cumple las estrictas especificaciones comerciales gracias a que en su composición influyen favorablemente los concentrados «limpios» de importación y también el esfuerzo tecnológico que desde 1970 se ha realizado en Huelva para la eliminación de impurezas.

En resumen, las fundiciones convencionales admiten un cierto volumen de impurezas con tal de que su nivel medio total no supere ciertos límites en el lecho de fusión del horno.

No obstante, no son de desde-

ñar los avances tecnológicos (por ejemplo, la utilización de aire enriquecido con oxígeno) que permiten, entre otras ventajas, una eliminación mayor de impurezas en el proceso de fundición, conversión y refino.

En vista de las posibilidades de hallazgo y, en su caso, desarrollo minero de masas de sulfuros masivos en la faja pirítica, incluyendo los importantes yacimientos de Portugal a los que aludiremos más adelante, sería deseable que la fundición de Huelva, la única de momento en el Suroeste de la Península, intensificara sus estudios de cara al tratamiento de esta clase de concentrados.

La inexistencia, de momento, de una solución perfecta de tipo pirometalúrgico para el tratamiento de concentrados «sucios» explica los estudios y trabajos realizados para encontrar una vía hidrometalúrgica. A este respecto, es importante notar que uno de los procesos ensayados, a nivel de laboratorio, más prometedores es precisamente el proceso COMPREX, desarrollado por la empresa española Técnicas Reunidas S. A. Aunque existen otros procesos hidrometalúrgicos (ninguno probado a escala industrial), el COMPREX ofrece la indiscutible ventaja de haber sido estudiado específicamente para los minerales masivos españoles. El proceso fue evaluado en 1980/1981 por una empresa de ingeniería americana, la cual concluyó que es un método técnicamente viable para recuperar el cobre, el zinc, el plomo y la plata del yacimiento de sulfuros masivos de la Masa San Dionisio (15).

No obstante, añadía la empresa consultora, la plena viabilidad del proceso sólo podrá establecerse mediante la operación de

una planta piloto integrada de unas 10 Tms./día.

El proceso parte de un concentrado global con valores, en el caso de San Dionisio, del 10 por 100 de Cu, 28 por 100 de Zn, y 6 por 100 de Pb. La concentración global es relativamente fácil y económica y la recuperación de metales muy alta. Los problemas aparecen, como se ha dicho, en la flotación diferencial. Problemas, repetimos, que consisten en la necesidad de una molienda muy fina, baja recuperación del cobre y del plomo y concentrados relativamente contaminados. Por último, el problema del antimonio y del arsénico, repetidamente aludido en este artículo.

Los productos del proceso COMPREX son cobre de una calidad muy próxima a la del cátodo electrolítico convencional y cátodos de zinc de calidad equivalente a la convencional. Al final del proceso se obtendría una cáscara de plomo/plata de la que, si fuera necesario, podrían también separarse los dos metales.

Este proceso, como los demás hidrometalúrgicos, no produciría —por supuesto— contaminación atmosférica, pero se generaría un residuo de yeso y una solución de cloruro sódico. Se cree que estos residuos no plantearían problemas de medio ambiente.

Aunque se han hecho tanteos de análisis económico del COMPREX, parece que para establecer claramente su viabilidad técnico/económica es precisa la construcción y operación previa de la planta piloto mencionada.

Nos hemos extendido en estas consideraciones por creer que es de gran trascendencia el disponer de una solución viable, técnica y

económicamente, para el aprovechamiento de los yacimientos existentes y de los que se puedan encontrar, en el futuro, en la faja pirítica. La importancia del problema sobrepasa nuestras fronteras: en Portugal, como veremos, existen yacimientos importantísimos de sulfuros masivos.

VIII. REFINO ELECTROLITICO DEL COBRE EN ESPAÑA

Aunque sea brevemente, estimamos conveniente dar una rápida ojeada a esta fase final en el proceso de tratamiento del mineral de cobre, ya que el precio del mineral, en última instancia, está basado en el del cobre electrolítico.

La fórmula de venta de los concentrados de cobre tiene, a grandes rasgos, la siguiente estructura: se paga el cobre contenido menos una unidad al precio de mercado del cobre electrolítico (generalmente el del London Metal Exchange) y se deducen unos gastos de refino, expresados generalmente en centavos de dólar por libra de cobre pagable, y unos gastos de fundición, expresados en dólares por tonelada de concentrado. Estas deducciones sufren fluctuaciones considerables según el mercado de concentrados. Se trata de un mercado complejo, porque el número de vendedores de concentrados es pequeño (los grandes yacimientos disponen, generalmente, de sus propias fundiciones) y el número de compradores, los llamados *custom smelters* también es pequeño. (La mayor parte de las fundiciones tratan exclusivamente los concentrados de sus minas).

En Europa hay sólo tres *custom smelters*, fundiciones comercia-

CUADRO N.º 8
CAPACIDAD DE REFINO ELECTROLITICO EN ESPAÑA

<i>Empresa</i>	<i>Localidad</i>	<i>Tms. de capacidad</i>
Electrolisis del Cobre	Palencia	32.000
ERCOSA	Bilbao	26.000
Río Tinto Minera	Huelva	105.000
TOTAL:		163.000

les, importantes: la Norddeutsche Affinerie en Hamburgo, Río Tinto Minera en Huelva y Outokumpu en Finlandia. En cambio, hay numerosas fundiciones comerciales en el Japón y países del Extremo Oriente (Corea, Taiwan y China). A principios de 1982 las condiciones C.I.F. *spot* de concentrados limpios estaban alrededor de 8 centavos por libra de gastos de refino, 65 dólares por Tm. de gastos de fundición y pago a los 30/50 días.

En el momento en que se escribe este artículo, el mercado está en una fase de escasez de concentrados que ha deteriorado sensiblemente estas condiciones.

Ahora las deducciones podrían ser de 6 centavos por libra de refino, 35 dólares de fundición y pago al contado.

La necesaria brevedad de este artículo nos obliga a dejar la importante faceta del mercado de concentrados para volver al tema del refino electrolítico.

A diferencia del caso de la fundición, España dispone de varias refinerías electrolíticas. La capacidad de refino electrolítico en España en la actualidad puede verse en el cuadro n.º 8. La producción de cobre electrolítico en los últimos siete años se muestra en el cuadro n.º 9.

Sólo los cátodos producidos en Huelva tienen la consideración *high grade*, es decir, cumplen las estrictas condiciones en cuanto a contenido de impurezas exigidas por el London Metal Exchange para el cobre de alta calidad.

Una gran parte de la producción de cátodos española es exportada. Por otra parte, siendo el cobre una mercancía liberalizada, se importa cobre electrolítico en forma de cátodos, *wirebars* (lingotes para la producción de hilos eléctricos) y otras formas (*cakes* y *billets*) necesarias para la producción de semitransformados planos, tubos y macizos. En el cuadro n.º 10 se recogen las cifras de producción, exportación, importación y consumo aparente de cobre electrolítico desde 1979 a 1984. Los datos de importación y exportación proceden de la Dirección General de Aduanas. Por consiguiente, no tienen en cuenta los *stocks* y adolecen de los naturales desfases en el tiempo.

CUADRO N.º 9
ESTIMACION DE LA PRODUCCION DE COBRE ELECTROLITICO EN ESPAÑA
(Miles de ms.)

<i>Empresa</i>	<i>1978</i>	<i>1979</i>	<i>1980</i>	<i>1981</i>	<i>1982</i>	<i>1983</i>	<i>1984</i>
Río Tinto Minera	93,1	90,4	103,1	102,3	106,2	99,7	107,7
Electrolisis del Cobre	21,6	21,6	21,7	20,4	22,3	19,4	18,3
Ercosa	—	—	—	23,7	28,1	22,2	22,3
Indumetal	12,5	10,5	10,5	—	—	—	—
Cobre electrolitico y metales (CEYMSA)	12,6	9,3	9,4	—	—	—	—
TOTAL:	139,9	131,8	144,7	146,4	156,6	141,3	148,6

Nota:

En 1981 la actividad de refino electrolítico de Indumetal y CEYMSA se fusionan, creándose para este fin la empresa ERCOSA.

IX. PERSPECTIVAS DE LA PRODUCCION DE COBRE EN ESPAÑA

1. Posibilidad de encontrar nuevos yacimientos

Hasta el principio de la década de los años sesenta la actividad de exploración minera en España había sido escasa. Posteriormente, y hasta la fecha, ha sido y continúa siendo muy activa, tanto por empresas españolas como por empresas extranjeras, solas o asociadas con empresas españolas. Prácticamente todas las grandes casas mineras del mundo, y algunas de las medianas, se han establecido en España por algún tiempo y han invertido cantidades de importancia.

Fuera de la «faja pirítica», el resultado no ha sido brillante. Quizás sólo se han descubierto dos yacimientos metálicos explotables en zonas donde históricamente no había habido actividad minera alguna. Uno es el de plomo/zinc de Rubiales, en el Bierzo, descubierto por COMINCO y explotado por EXMINESA (47 por 100 propiedad de COMINCO). El otro son los yacimientos de cobre cerca de Santiago de Compostela (Arinteiro, Bama, Arca, Vieiro) que fueron descubiertos por Río Tinto Patiño (hoy Río Tinto Minera) y explotados por la misma empresa.

Por consiguiente, en los casi veinticinco últimos años de intensa actividad exploradora, realizada por múltiples empresas de solvencia, sólo se ha encontrado, fuera de la «faja pirítica», un yacimiento de cobre explotable. Se han estudiado todos los indicios; se han encontrado mineralizaciones de cobre, pero de poca o ninguna importancia económica. El

CUADRO N.º 10
PRODUCCION, EXPORTACION, IMPORTACION Y CONSUMO APARENTE DE COBRE ELECTROLITICO EN ESPAÑA
(En miles de Tms.)

	1979	1980	1981	1982	1983	1984
Producción	129,9	144,7	146,4	156,6	141,3	148,6
Exportación	30,0	60,0	74,3	72,8	71,4	67,1
Importación	20,2	24,0	20,3	12,4	21,0	24,6
Consumo aparente	139,1	108,7	92,4	96,2	90,9	106,1

autor de este artículo, que dirigió durante más de dieciseis años una de las empresas mineras españolas más activas en exploración minera, es de la opinión de que las posibilidades de encontrar minas de cobre en España fuera de la «faja pirítica» ibérica son pequeñas, en el estado actual de la tecnología de investigación aplicable.

No ocurre lo mismo en la «faja pirítica» de Huelva. Ahí, en las últimas décadas, se han identificado y puesto en explotación tres importantes mineralizaciones: Cerro Colorado, Aznalcóllar y Sotiel. En los tres casos los descubrimientos estaban relacionados con minas todavía en explotación o abandonadas. En el de Cerro Colorado había indicios anteriores (desde 1920) sobre zonas mineralizadas. Además el yacimiento se encuentra rodeado de yacimientos masivos en explotación o agotados (San Dionisio, Filón Sur, Filón Norte, Dehesa, Lagos y Planes).

En el caso de Aznalcóllar, existía una mina de piritas que se explotaba por interior y a pequeño ritmo. Las grandes reservas de Aznalcóllar eran desconocidas de los antiguos explotadores. Pareci-

do es el caso de Sotiel, yacimiento próximo a una antigua mina parada.

Fuera de las minas, el resto de la «faja pirítica» ha sido y está siendo investigada por varias empresas. La investigación ha pasado por fases de mayor o menor intensidad. Toda la zona está cubierta por una «Reserva del Estado» que durante largo tiempo ha actuado en forma negativa. En algún momento se pretendió que sólo el Estado, a través de sus empresas u organismos, investigara una zona tan prometedora. Después la zona reservada se dividió en bloques, según una distribución que tenía en cuenta las zonas de influencia de las distintas empresas propietarias de minas o concesiones. En esta etapa se hicieron esfuerzos de intensidad desigual, según la mayor o menor vocación investigadora de las diferentes empresas. Estos esfuerzos no tuvieron éxito, hasta el punto de que la explotación prácticamente cesó.

Posteriormente, el hallazgo de algunos yacimientos en el lado portugués de la «faja», despertó, de nuevo, el interés del Estado y de las empresas privadas en la zona. Por segunda vez el Estado

dividió la Reserva en bloques, que adjudicó a diversos grupos empresariales, exigiendo niveles mínimos de trabajo para asegurar la intensidad de la exploración.

La explotación de la parte española de la «faja» es difícil, y hasta el presente no ha producido, como decimos, resultados prácticos.

No obstante, hay un hecho estimulante y esperanzador, al que ya se ha aludido, que es el éxito obtenido en el lado portugués, en especial el descubrimiento del importantísimo yacimiento de Neves/Corvo. Este es un yacimiento de sulfuros masivos de alto contenido metálico en cobre, zinc y plomo. A 31 de diciembre de 1983 las reservas geológicas delineaban tres clases de mineral. Mineral de cobre (27 mill. de tms.) con el 8,66 por 100 de Cu; mineral complejo zinc-cobre (7,2 mill. de tms.) con 4,5 de Cu y 2,48 por 100 de Zn, y mineral complejo de zinc (32,9 mill. de tms.) con 5,71 por 100 de Zn, 1,14 por 100 de Pb y 0,48 por 100 de Cu. La zona sigue investigándose, con el hallazgo de nuevas reservas.

El proyecto de Neves/Corvo está siendo desarrollado como una mina de interior con una planta de flotación. Para 1987 podría estar en funcionamiento una planta que produjera al año 50/75.000 tms. de cobre contenido en concentrados. La inversión total superará los 200 millones de dólares. A diferencia de los yacimientos encontrados en el lado español, el concentrado de Neves no plantearía problemas graves de impurezas.

Además de Neves/Corvo, se han encontrado varios yacimientos alrededor de la mina de piratas de Aljustrel, cuya explotación,

como en el caso de Riotinto y Tharsis, se inició hace más de 3.000 años.

Las nuevas reservas de Aljustrel podrían ascender a 200 millones de tms, en varios yacimientos de sulfuros masivos con contenidos de cobre mucho menos espectaculares que el de Neves. Los hallazgos portugueses permiten mirar con optimismo los esfuerzos que se realizan en el lado español de la «faja». Aunque el concentrado de Neves podrá ser tratado por procedimientos pirometalúrgicos convencionales, el resto de los minerales portugueses seguirá planteando problemas de tratamiento similares a los explicados en el epígrafe VII de este artículo, lo que hace más acuciante la necesidad de desarrollar un proceso adecuado para el beneficio de esta clase de minerales masivos polimetálicos.

2. Perspectivas económicas de los minerales de cobre españoles

Al entrar en este tema, es ineludible referirse, aunque sea de forma somera, al mercado internacional del cobre metal.

Hasta la primera crisis del petróleo, en otoño de 1973, el mercado se había caracterizado históricamente por fluctuaciones en los precios del cobre mayores que en otros mercados internacionales de materias primas. No ha sido raro el caso en el que el precio medio de un año comparado con el siguiente haya variado en un 40 por 100. Estas fluctuaciones violentas en los precios pueden atribuirse a dos aspectos básicos del mercado mundial del cobre. En primer lugar, la elasticidad de la curva de la oferta de cobre a cor-

to plazo es baja, pero muy alta la de la oferta de cobre a largo plazo. Esta notable diferencia puede atribuirse al cada vez más largo período de tiempo que hace falta para poner nuevas minas en producción. En segundo lugar, la demanda de cobre es muy inelástica a corto plazo y bastante inelástica a medio plazo respecto del precio, pero, en cambio, es extremadamente sensible a los cambios de actividad en los países consumidores. La baja elasticidad/precio de la demanda se explica por el tiempo necesario para adaptar la estructura industrial que usa cobre a otros metales sustitutos. Más bien el precio de sustitución del cobre por otros materiales obedece al desarrollo de la tecnología con bastante independencia del precio del cobre. Estos factores explican por qué a la industria del cobre le cuesta tanto encontrar niveles de equilibrio. Por ejemplo, un crecimiento fuerte del volumen de actividad de la economía internacional conduce a precios de cobre por encima del nivel de equilibrio, por la inelasticidad a corto plazo de la oferta. Y lo contrario ocurre cuando el nivel de actividad de la economía se reduce y los *stocks* aumentan constantemente a niveles, a veces, equivalentes a seis meses del consumo mundial.

Los factores de rigidez de la oferta aumentaron al llevarse a cabo, después de la segunda guerra mundial, el proceso de descolonización, y al estatizarse grandes minas productoras y exportadoras tanto en países de reciente acceso a la independencia (Zaire, Zambia), como en otros (Chile y Perú). Previamente la propiedad de las grandes minas exportadoras pertenecía a grupos internacionales privados. Para mantener el equilibrio del mercado, estos grupos elaboraron estrategias de

limitación de producción que durante algún tiempo introdujeron cierta estabilidad en los precios. Ahora, aunque existe una organización internacional de los gobiernos de los países exportadores (CIPEC), todas las tentativas de control de la oferta han fracasado, básicamente porque los gobiernos de muchos de estos países dependen del cobre como fuente principal de divisas.

Con esta nueva estructura, estalla la primera crisis del petróleo, seguida de la segunda unos años después. El nivel de actividad de la economía mundial sufre un descenso drástico, que tiene la correspondiente repercusión en la demanda de cobre. La incapacidad de la oferta de adaptarse a la violenta reducción de la demanda se ve agravada, en esta ocasión, porque, además, los países exportadores, lejos de reducir la producción, intentan incluso aumentarla, en la medida de lo posible, para hacer frente al aumento de la factura del petróleo. Por otra parte, había proyectos de expansión de la producción en avanzado estado de ejecución que, por las mismas razones, los gobiernos no quieren paralizar. La consecuencia ha sido una depresión continuada y acentuada de los precios del cobre. El hecho de que los pocos países productores (EE.UU. y Canadá) que disfrutaban de altos grados de economía de mercado paralicen progresivamente la producción de gran parte de sus minas no es en absoluto suficiente para alcanzar un equilibrio oferta/demanda. Así se ha llegado a la situación actual, en la que los precios del cobre, expresados en dólares constantes, son los más bajos desde 1950 y, de hecho, por debajo de los costes de producción de gran parte de la producción de cobre del mundo.

Esta situación afecta a España en mayor medida por las características ya mencionadas de los yacimientos españoles, que se encuentran en el tercio superior de la curva de costes de producción del mundo occidental.

El cobre como metal sigue teniendo futuro, a pesar de que en algunos casos haya sido sustituido por otros materiales (un ejemplo típico es el de las fibras ópticas, que sustituyen al cobre en telecomunicación). Pero estas sustituciones no son la causa principal de la depresión del precio sino, como hemos dicho, el estancamiento de la economía mundial.

En la actualidad existen indicios de que el precio del cobre ha tocado ya fondo (por ejemplo, la importante disminución de los *stocks* mundiales de cobre), y si la economía mundial se reactiva, como es el caso de EE.UU. y Japón, no es pecar de optimista esperar una tendencia al equilibrio y, por consiguiente, a niveles de precio más en consonancia con los costes de producción. Lo que parece claro es que se tardará en iniciar la construcción de los numerosos proyectos que están en lista de espera, después de un período tan largo de precios antieconómicos.

En cualquier caso, dada la escasez de reservas de cobre en los países de la CEE, podría esperarse que la adhesión de España y Portugal atraiga recursos importantes para la financiación del mantenimiento de la producción y su desarrollo, incluyendo la importante faceta del esfuerzo tecnológico necesario para el mejor aprovechamiento de los recursos mineros ibéricos.

POST SCRIPTUM

El presente artículo se escribió en la primavera de 1985. A finales de julio de 1986 se decidió enviar a imprenta los diferentes artículos de este número de PAPELES DE ECONOMÍA ESPAÑOLA y el autor ha tenido la oportunidad de revisar el artículo original. En el año largo transcurrido se han producido numerosos cambios, algunos de los cuales requieren un obligado comentario.

La fase depresiva del mercado del cobre se ha intensificado y, en consecuencia, el precio internacional del metal está alcanzando nuevos mínimos. Por una parte la demanda mundial de cobre no ha respondido a la moderada reactivación de la economía occidental. Ello puede ser debido a la continuación del proceso de sustitución del cobre por otros materiales (por ejemplo, extensión del uso de fibras ópticas en telecomunicación) y a la falta de reactivación de la actividad constructora en la mayor parte de los países. Por el lado de la oferta se está produciendo un fenómeno de reestructuración de la producción en virtud del cual ciertos productores han reajustado sus costes mucho más eficazmente que otros. En los países de economía de mercado más flexible los costes se han reducido no sólo por la adaptación más rápida de la disminución de los costes energéticos, sino también por la mayor facilidad de ajuste de la mano de obra y de los salarios. Este es, por ejemplo, el caso de algunas minas norteamericanas que se están poniendo de nuevo en producción tras haber reducido sustancialmente los salarios y haber mejorado la eficiencia de las actividades mineras. Por otra parte, algunos proyectos nuevos con costes de producción relativa-

mente bajos se han puesto en producción. Como la demanda sigue estacionaria, estos aumentos de capacidad de las empresas más eficientes están ocasionando cierres de otras minas marginales. La oferta de concentrados ha aumentado y, en consecuencia, las condiciones de compra se han abaratado. Las deducciones por refinación y fundición han aumentado acercándose a las prevalencias a principios de 1982.

Las repercusiones de estos cambios en la minería española de cobre han sido obviamente desfavorables. La caída del precio del cobre no ha venido compensada por mejoras suficientes en los costes de producción. Las conocidas rigideces de la economía española dificultan la capacidad de las empresas para ajustar sus costes. En el momento en que se escribe esta nota han trascendido ya a la prensa los planes de cierre temporal de las explotaciones mineras de cobre más importantes de España.

En el campo de la fundición merecen destacarse las mejoras tecnológicas introducidas en la fundición de Huelva, en parte debidas al uso de aire enriquecido con oxígeno, que han hecho posible el tratamiento en España de una parte de los concentrados producidos con contenidos altos en impurezas.

NOTAS

(1) La «faja pirítica ibérica» se extiende en una longitud de 250 kms. desde el valle del Guadaiquivir, en España, hasta el valle del río Sado y la costa atlántica de Portugal.

(2) Se llama *gossan* a los restos de un yacimiento de sulfuros masivos que, por oxidación y lixiviación natural, se convirtieron en masas de óxidos.

(3) Por ejemplo, no queda apenas rastro alguno en la zona minera que demuestre actividad durante la dominación musulmana.

(4) Charles E. HARVEY; *The Rio Tinto Company*. Editado por Alison Hodge, 1981.

(5) El contenido de cobre en la calcopirita pura es 34 %, mientras que el de la calcosina pura supera al 79 por 100, y el de la bornita, el 63 por 100.

(6) El consumo de explosivos es un componente muy importante del coste de extracción. En las minas a cielo abierto, por tonelada de material movido (tanto estéril como mineral) el coste de explosivos representa un 25 por 100 del coste minero total. Hay que admitir que el precio de los explosivos en España es sustancialmente más alto que en los demás países productores de cobre. No nos parece oportuno profundizar aquí en este tema, que afecta no sólo a la minería de cobre sino al resto de los sectores mineros.

(7) Es bien conocido el efecto negativo del plomo en la siderurgia, que se fue acentuando a medida que el mercado internacional de mineral de hierro iba siendo abastecido con calidades superiores, más altas en contenido de hierro y sin impurezas.

(8) Parte del cobre de Aznalcóllar está en forma de tetraedrita.

(9) Con la excepción del concentrado pirítico de Aznalcóllar.

(10) En Río Tinto se producen cantidades muy importantes de oro y plata procedentes del tratamiento de *gossan*. Gran parte del *gossan* procede de Cerro Colorado, pero también existen reservas de *gossan* procedentes de otros yacimientos piríticos explotados en la zona.

(11) Este concentrado se fundía tradicionalmente en la fundición de ASARCO en Tacoma, EE.UU., que poseía instalaciones especiales. Esta fundición tuvo que cerrar por razones de contaminación. Lepanto introdujo una tostación o calcinación del concentrado que reducía el contenido de arsénico al 1,5 por 100.

(12) Las especificaciones de la Bolsa de Londres para la contratación de cátodos de alta calidad (*high grade*) establecen contenidos máximos de 4 ppm para el antimonio y 5 ppm para el arsénico, entre otras impurezas.

(13) Sin embargo, la recuperación no es muy alta, del orden del 75 por 100, comparada con la del *sublevel caving* (más del 90 por 100) o el *block caving* (85 por 100).

(14) Almagrera había estudiado otros procesos antes de inclinarse por la flotación diferencial. Incluso había construido y operado una planta piloto para ensayar el proceso Auxini de tostación sulfatante.

(15) Obviamente, esta conclusión es extensible a los demás yacimientos españoles de sulfuros masivos, muestras de los cuales han sido también estudiadas en los laboratorios de Técnicas Reunidas.