

# COBRE CHILENO

tu eres la patria, pampa y pueblo.  
arena, arcilla, escuela, casa  
resurrección, puño, ofensiva  
orden, desfile, ataque, trigo  
lucha, grandeza, resistencia.



(FUENTE: CODELCO CHILE)

## INTRODUCCIÓN

El cobre es un elemento metálico que provino de las profundidades de la Tierra hace millones de años, impulsado por los procesos geológicos que esculpieron nuestro planeta.

En su manifestación más evidente aparece en vetas con un alto contenido de cobre, e incluso como cobre nativo o natural, una peculiaridad que permitió su descubrimiento por parte de sociedades primitivas cuando apenas se iniciaban en el conocimiento de los metales. Estos depósitos de cobre en estado natural o de muy alta pureza abastecieron a la humanidad durante largo tiempo, hasta que se agotaron.

En la actualidad la mayor parte del cobre disponible aparece disperso en grandes áreas, mezclado con material mineralizado y con roca estéril. Estos son los llamados yacimientos porfíricos, que sólo pudieron ser explotados cuando se desarrollaron las habilidades metalúrgicas necesarias para separar y recuperar el metal.

Hay una gran cantidad de compuestos que contienen cobre y que se clasifican en dos grupos:

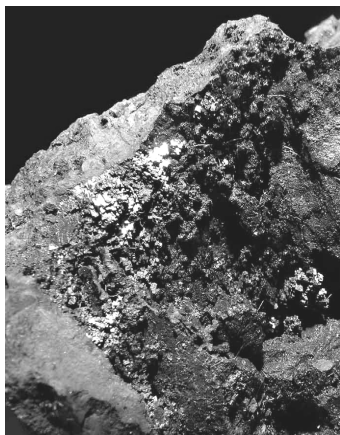
### 1. LOS MINERALES SULFURADOS

### 2. LOS MINERALES OXIDADOS

El metal rojizo es utilizado en forma pura para fabricar una amplia gama de productos como cable y tuberías, pero también está presente en aleaciones para diversos usos logrados a partir de su combinación con otros compuestos como Cinc, Estaño, Plata, Plomo, Sílice, Berilio, Hierro, Aluminio y otros.

MINERALES				
OXIDADOS			SULFURADOS	
ÓXIDOS	$\text{Cu}_2\text{O}$ CUPRITA		SULFUROS	$\text{Cu}_2\text{S}$ CALCOSINA
CARBONATOS	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ MALAQUITA		SULFUROS DOBLES	$\text{CuFeS}_2$ CALCOPIRITA
SILICATOS	$\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ CRISOCOLA			

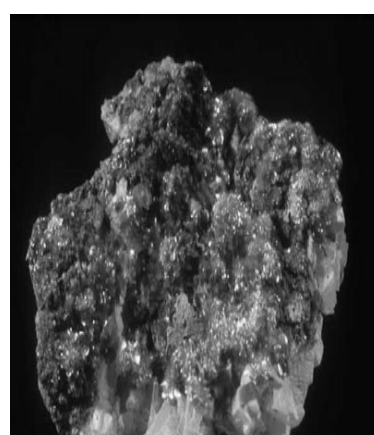
**CUPRITA**



**CALCOPIRITA**



**CALCOSINA**



## PROPIEDADES DEL COBRE

- ALTA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA
- GRAN RESISTENCIA A LA CORROSIÓN
- ALTA CAPACIDAD DE ALEACIÓN METÁLICA
- GRAN CONDUCTIVIDAD TÉRMICA
- CAPACIDAD DE DEFORMACIÓN EN CALIENTE Y FRÍO
- ELEMENTO BÁSICO PARA LA VIDA ANIMAL Y VEGETAL
- EXISTENCIA METÁLICA EN ESTADO NATURAL
- PROPIEDADES BACTERICIDAS

Algunas de esas propiedades son transmitidas a las aleaciones que utilizan Cobre, dos de las más importantes, conocidas desde la antigüedad, son el **Bronce**, un material de gran dureza que resulta de combinaciones con estaño, y el latón, de Cobre con Cinc, fácil de manipular y resistente a la corrosión.

## PRODUCCIÓN DE COBRE

La dispersión con que aparece el Cobre hace necesario someter los minerales extraídos a procesos productivos con la finalidad de obtener un metal puro.

El Cobre se encuentra asociado en su mayor parte a minerales sulfurados, aunque también existen minerales oxidados.

Estos dos tipos de mineral requieren de procesos productivos diferentes, pero en ambos casos el punto de partida es el mismo: la extracción del material desde las minas a rajo abierto o subterráneas, lo que requiere la fragmentación y el transporte del material.

## PROCESO PRODUCTIVO

- El mineral extraído pasa en primer lugar por un proceso de **chancado**. En el caso de los minerales oxidados el proceso productivo implica someter el material a una solución de **lixiviación**, que producirá soluciones de sulfato de cobre, las cuales son sometidas a un proceso de extracción con solventes y posteriormente a un sistema de electroobtención cuyo resultado final son los cátodos de cobre con 99,99% de pureza.
- Los minerales sulfurados pasan primero por el chancado y la molienda, luego por mecanismos de clasificación hasta obtener el concentrado de cobre, que tiene 30% de metal. Su purificación posterior se realiza en hornos que permiten obtener **blister** o ánodos con 99% de pureza. Finalmente la electrorefinación permite transformar los ánodos en cátodos con 99,99% de pureza.

## COBRE SULFURADO

### EXPLOTACIÓN

"Hundimiento por bloque" (yacimientos a cielo abierto)

Se ponen explosivos en la base de un cubo imaginario el que se debilita y por efecto de la gravedad cae como grandes rocas por los embudos contruidos en el cerro.

### CONCENTRACIÓN

El objetivo es liberar y concentrar las partículas de cobre que se encuentran en forma de sal en las rocas mineralizadas, de manera que pueda continuar a otras etapas del proceso productivo.

El proceso se realiza en grandes instalaciones ubicadas en la superficie, formando lo que se conoce como **planta**, y que se ubican lo más cerca posible de la mina. El proceso de concentración se divide en las siguientes fases:

- 1) CHANCADO
- 2) MOLIENDA
- 3) FLOTACIÓN

### CHANCADO

El mineral proveniente de la mina presenta una *granulometría* variada, desde partículas de menos de 1 mm, hasta fragmentos mayores que 1 m de diámetro, por lo que el objetivo del chancado es reducir el tamaño de los fragmentos más grandes hasta obtener un tamaño uniforme máximo de 1,27 cm (1/2 pulgada).

PEDRO DE VALDIVIA

### MOLIENDA

Mediante la molienda, se continúa reduciendo el tamaño de las partículas que componen el mineral, para obtener una granulometría máxima de 180 micrones (0,18 mm), la que permite finalmente la liberación de la mayor parte de los minerales de Cobre en forma de partículas individuales.

El proceso se realiza utilizando grandes molinos cilíndricos, en dos formas diferentes: *molienda convencional o molienda SAG*.

En la molienda SAG, al material mineralizado se le agregan agua en cantidades suficientes para formar un fluido lechoso y los reactivos necesarios para realizar el proceso siguiente que es la flotación.

La molienda convencional se realiza en dos etapas, utilizando molino de barras y molino de bolas, respectivamente, aunque en las plantas modernas sólo se utiliza el segundo. En ambos molinos el mineral se mezcla con agua para lograr una molienda homogénea y eficiente. La pulpa obtenida en la molienda es llevada a la etapa siguiente que es la flotación.

## FLOTACIÓN

La flotación es un proceso físico-químico que permite la separación de los minerales sulfurados de Cobre y otros elementos como el Molibdeno, del resto de los minerales que componen la mayor parte de la roca original.

La pulpa proviene de la molienda, que tiene ya incorporados los reactivos necesarios para la flotación, se introduce en unos receptáculos denominados *celdas de flotación*. Desde el fondo de las celdas, se hace burbujear aire y se mantiene la mezcla en constante agitación para que el proceso sea intensivo.

Las burbujas arrastran consigo los minerales sulfurados hacia la superficie, donde rebasan por el borde de la celda hacia canaletas que las conducen hacia estanques especiales, desde donde esta pulpa es enviada a la siguiente etapa. El proceso se reitera en varios ciclos, de manera que cada ciclo va produciendo un producto cada vez más concentrado. En uno de estos ciclos, se realiza un proceso especial de flotación para recuperar el Molibdeno, cuya concentración alcanza una ley de 49% de **molibdenita** ( $\text{MoS}_2$ ).

Luego de varios ciclos en que las burbujas rebasan el borde de las celdas, se obtiene el concentrado, en el cual el contenido de cobre ha sido aumentando desde valores del orden del 1% (originales en la roca) a un valor de hasta 31% de cobre total.

El concentrado final es secado mediante filtros y llevado al proceso de **fundición**.

## FUNDICIÓN

El concentrado de Cobre seco con una concentración del 31% de Cobre, se somete a procesos de pirometalurgia en hornos a grandes temperaturas, mediante los cuales el Cobre del concentrado es transformado en Cobre metálico y se separa de los otros minerales como Hierro (Fe), Azufre (S), Silicio (Si) y otros.

En la fusión el concentrado de Cobre es sometido a altas temperaturas ( $1.200^{\circ}\text{C}$ ) para lograr el cambio de estado de sólido a líquido. Al pasar a este estado líquido, los elementos que componen los minerales presentes en el concentrado se separan según su peso, quedando los más livianos en la parte superior del fundido, mientras que el Cobre, que es más pesado se concentra en la parte baja. De esta forma es posible separar ambas partes vaciándolas por vías distintas.

El concentrado ya fundido se separa en dos fases:

- Eje o mata: Corresponde a la parte más pesada, que contiene un 45% a 48% de Cobre. Este eje se concentra en la parte inferior del horno, desde donde es retirado en forma líquida y cargado en grandes ollas de acero que lo transportan hacia la siguiente etapa de conversión.
- Escoria: Es la parte más liviana del fundido, formada básicamente por Hierro y sílice (tiene menos de 1% de cobre), la cual queda flotando sobre el eje. La escoria es retirada del horno en forma separada del eje, cargada en ollas y arrojada en un botadero donde se solidifica a temperatura ambiente.

## CONVERSIÓN

Mediante el proceso de conversión se tratan los productos obtenidos en la fusión, para obtener cobre de alta pureza. Para esto se utilizan hornos convertidores llamados Peirce-Smith, en honor a sus creadores.

El convertidor es un reactor cilíndrico donde se procesan separadamente: el eje proveniente del horno de reverbero y el metal proveniente del horno convertidor.

Este es un proceso cerrado, es decir, una misma carga es tratada y llevada hasta el final, sin recarga de material. Finalmente se obtiene **Cobre blister**, con una pureza de 96%.

## PIRORREFINACIÓN

Mediante la pirorrefinación o refinación a fuego se incrementa la pureza del cobre blister obtenido de la conversión. Consiste en eliminar el porcentaje de oxígeno presente en este tipo de cobre, llegando a concentraciones de 99,7% de cobre.

El **Cobre RAF** (refinado a fuego) es moldeado en placas gruesas, de forma de ánodos, de un peso aproximado de 225 kg.

## ELECTROREFINACIÓN (ELECTROBTENCIÓN)

El proceso de electrorefinación se basa en las características y beneficios que ofrece el fenómeno químico de la **electrólisis**, que permite refinar el cobre anódico (ánodo) mediante la aplicación de la corriente eléctrica, obteniéndose cátodos de cobre de alta pureza (99,99%), los que son altamente valorados en el mercado.

La electrorefinación se realiza en celdas electrolíticas, donde se colocan en forma alternada un ánodo (que es una plancha de cobre obtenido de la fundición), y un cátodo, (que es una plancha muy delgada de cobre puro), hasta completar 30 ánodos y 31 cátodos en cada celda.

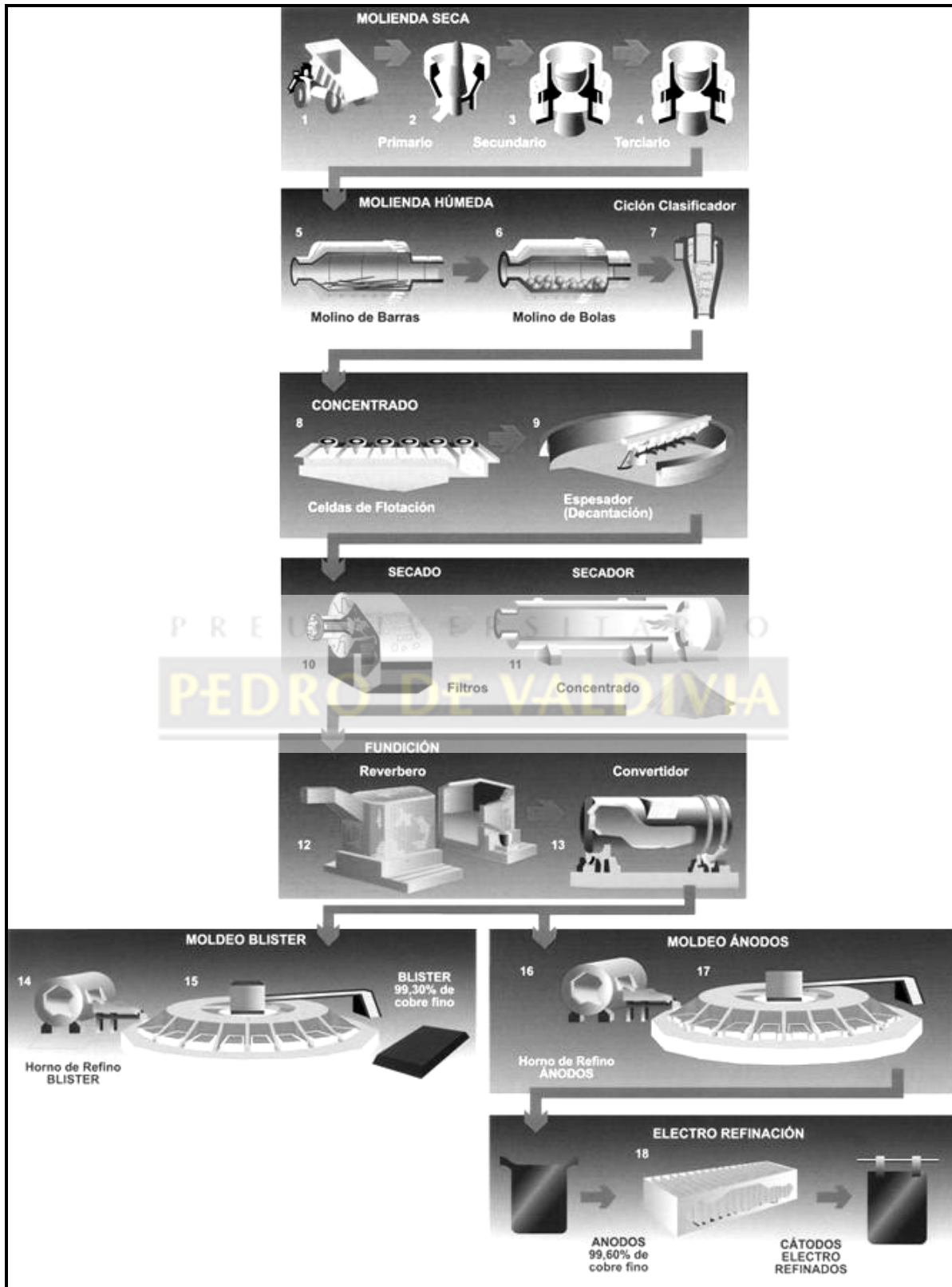
La electrólisis consiste en hacer pasar una corriente eléctrica por una solución de ácido sulfúrico y agua. El ion sulfato de la solución comienza a atacar el ánodo de cobre formando una solución de sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4$ ) denominado **electrolito**. Al aplicar corriente eléctrica, los componentes de la solución se cargan eléctricamente produciéndose una disociación iónica en la que el anión sulfato ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) es atraído por el ánodo (+) y el catión ( $\text{Cu}^{+2}$ ) es atraído por el cátodo (-). El anión  $\text{SO}_4^{-2}$  ataca al ánodo formando sulfato de cobre, el que se ioniza en la solución por efecto de la corriente eléctrica, liberando cobre como catión que migra al cátodo, y se deposita en él. El ion sulfato liberado migra al ánodo y vuelve a formar sulfato de cobre que va a la solución, recomenzando la reacción.

Este proceso es continuo durante 20 días. El día 10, se extraen los cátodos y se reemplazan por otros y los ánodos se dejan 10 días más y se reemplazan por otros. De esta forma, al final del día 20, nuevamente se extraen los cátodos y se renuevan los ánodos.

Los otros componentes del ánodo que no se disuelven, se depositan en el fondo de las celdas electrolíticas, formando lo que se conoce como barro anódico el cual es bombeado y almacenado para extraer su contenido metálico (Oro, Plata, Selenio, Platino y Paladio).



Diagrama de flujo (Codelco Chile)



## **COBRE OXIDADO**

En los yacimientos de cobre de minerales oxidados, el proceso de obtención se realiza en tres etapas que trabajan como una cadena productiva, totalmente sincronizadas:

- 1. LIXIVIACIÓN EN PILAS.**
- 2. EXTRACCIÓN POR SOLVENTE.**
- 3. ELECTROOBTENCIÓN.**

### **LIXIVIACIÓN EN PILAS**

La lixiviación es un proceso hidrometalúrgico que permite obtener el cobre de los minerales oxidados que lo contienen, aplicando una disolución de ácido sulfúrico y agua.

### **CHANCADO**

El material extraído de la mina; generalmente a rajo abierto que contiene minerales oxidados de cobre, es fragmentado mediante chancado primario y secundario (eventualmente terciario), con el objeto de obtener un material mineralizado de un tamaño máximo de 1,5 a  $\frac{3}{4}$  pulgadas.

### **PILA DE LIXIVIACIÓN**

El material chancado es llevado mediante correas transportadoras hacia lugar donde se formará la pila.

El mineral es descargado mediante un equipo especial gigantesco, que lo deposita ordenadamente formando un terraplén continuo de 6 a 8 m de altura: **la pila de lixiviación**. Sobre esta pila se instala un sistema de riego por goteo que cubre toda el área expuesta. Bajo las pilas de material a lixiviar se instala un sistema de tuberías que permiten recoger las soluciones que se infiltran a través del material.

### **RIEGO**

Se vierte lentamente una solución ácida de **agua - ácido sulfúrico** en la superficie de las pilas. Esta solución se infiltra en la pila hasta su base, actuando rápidamente. La solución disuelve el cobre contenido en los minerales oxidados, formando una solución de sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4$ ), la que es recogida por el sistema de drenaje.

La lixivación se mantiene por 45 a 60 días, después de lo cual se supone que se ha agotado casi toda la cantidad de Cobre lixiviable. El material restante o ripio es transportado mediante correas a botaderos donde se podría reiniciar un segundo proceso de lixiviación para extraer el resto de Cobre.

De la lixiviación se obtienen soluciones de sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4$ ) con concentraciones de hasta 9 gramos por litro que son llevadas a diversos estanques donde se limpian eliminándose las partículas sólidas que pudieran haber sido arrastradas. Estas soluciones de sulfato de cobre limpias son llevadas a planta de extracción por solvente.



## **EXTRACCIÓN CON SOLVENTES**

En esta etapa la solución que viene de las pilas de lixiviación se libera de impurezas y se concentra su contenido de cobre, pasando de 9 g/L a 45 g/L, mediante una extracción iónica.

Para extraer el cobre de la solución, ésta se mezcla con una solución de parafina y resina orgánica. La resina captura los iones de cobre ( $\text{Cu}^{+2}$ ) en forma selectiva. De esta reacción se obtiene por un lado un complejo resina-cobre y por otra una solución empobrecida en cobre que se denomina refino, la que se utiliza en el proceso de lixiviación y se recupera en las soluciones que se obtienen del proceso.

El compuesto de resina-cobre es tratado en forma independiente con una solución electrolito rica en ácido, el que provoca la descarga del Cobre desde la resina hacia el electrolito (solución), mejorando la concentración del Cobre en esta solución hasta llegar a 45 gramos/litro. Esta es la solución que se lleva a la planta de electroobtención.

## **ELECTRO-OBTENCIÓN**

Esta etapa corresponde al desarrollo de un proceso *electrometalúrgico* mediante el cual se recupera el Cobre disuelto en una solución concentrada de Cobre.

Mediante el proceso de electroobtención se recupera el Cobre de una solución electrolito concentrado para producir cátodos de alta pureza (99,99%) muy cotizados en el mercado.

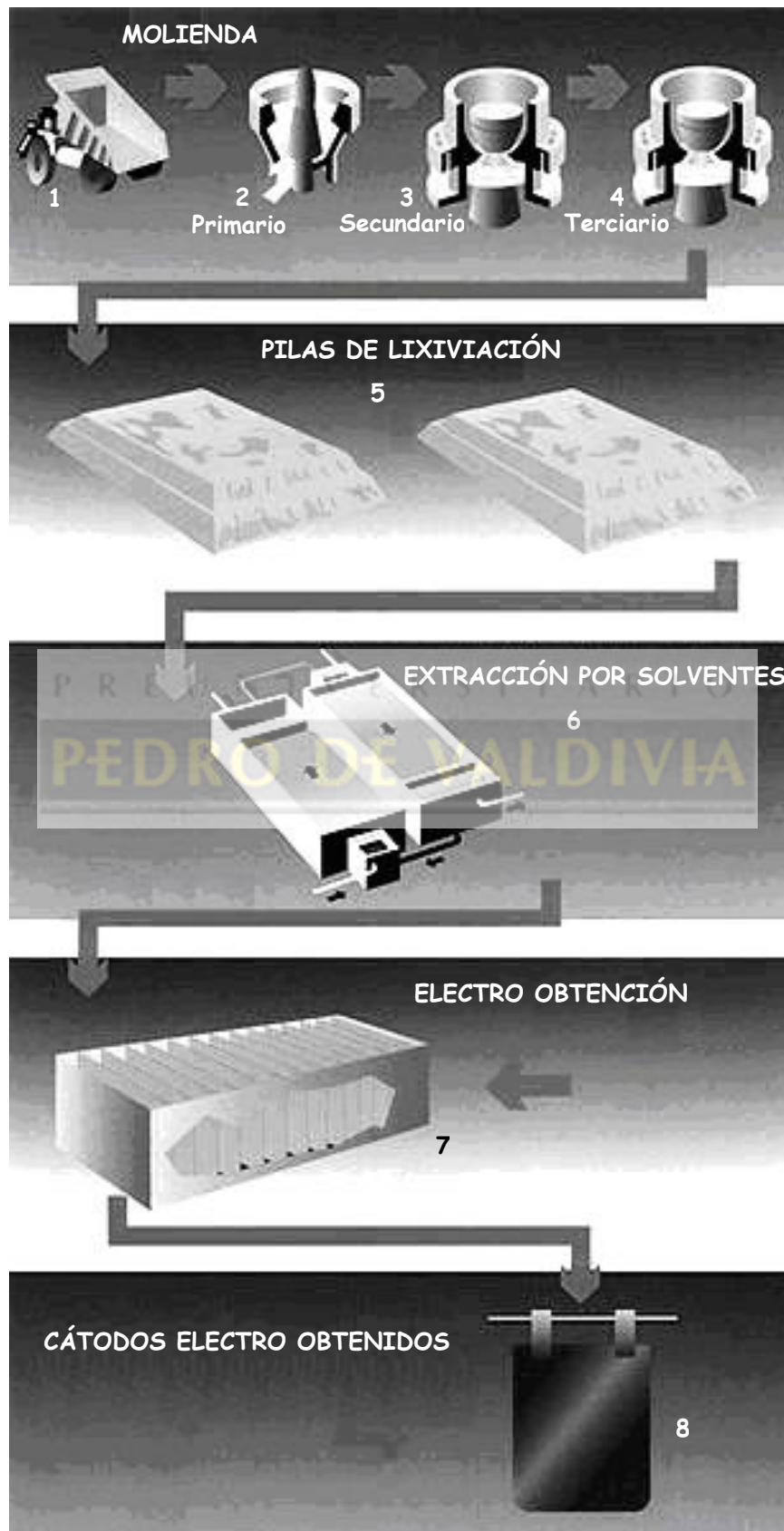
La solución electrolítica que contiene el Cobre en forma de sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4$ ) es llevada a la caldera de electroobtención que son estanques rectangulares que tienen dispuestas en su interior y sumergidas en solución, unas placas metálicas de aproximadamente  $1 \text{ m}^2$  cada una.

Estas placas corresponden alternadamente a un ánodo y un cátodo. Los ánodos son placas de plomo que hacen las veces de polo positivo. Ya que por estos se introduce la corriente eléctrica, en tanto que los cátodos son placas de acero inoxidable y corresponden al polo negativo, por donde sale la corriente.

Todas las placas están conectadas de manera de conformar un circuito por el que se hace circular una corriente eléctrica continua de muy baja intensidad, la que entra por los ánodos y sale por los cátodos.

El Cobre en solución (catión, de carga positiva  $+2$ :  $\text{Cu}^{+2}$ ) es atraído por el polo negativo representado por los cátodos, por lo que migra hacia éstos pegándose partícula por partícula en su superficie en forma metálica (carga cero).

Diagrama de flujo (Codelco Chile)



## **SUBPRODUCTOS DEL COBRE**

### **MOLIBDENO (Mo)**

El Molibdeno es un elemento químico metálico descubierto en 1778, cuyo alto punto de fusión (2.610 °C) lo convierte en un insumo importante para la fabricación de aceros especiales. No existe en estado puro en la naturaleza, pero con frecuencia está asociado al Cobre.

Durante el proceso de concentración del Cobre se obtiene como subproducto el concentrado de molibdeno (bisulfuro de molibdeno  $\text{MoS}_2$ ), cuyo aspecto es el de un fino polvillo negruzco y muy resbaladizo. Este material es sometido a un proceso posterior de tostación para eliminar el Azufre.

El producto resultante que comercializa Codelco es el trióxido de molibdeno grado técnico y se utiliza como materia prima en la elaboración de aleaciones con gran resistencia a la temperatura y corrosión.

El trióxido de molibdeno, un polvo de color amarillo verdoso, se vende envasado como polvo en tambores o tamborcillos, y parte desde puertos marítimos ubicados en el norte y centro de Chile hacia diversos mercados del mundo. Codelco comercializa alrededor de 24.000 toneladas métricas anuales.

### **ÁCIDO SULFÚRICO ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )**

El ácido sulfúrico del 100% ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) es a temperatura ambiente un líquido incoloro e inodoro, claro como el agua y denso, oleoso. Tiene un punto de fusión de 10°C y un punto de ebullición de 338°C, pero a esta temperatura se desprende algo de  $\text{SO}_3$ , por lo que el contenido ácido disminuye hasta 98,3%.

El trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) se desprende fácilmente de la disolución, ya que es volátil a temperatura ambiente. Si se abre un frasco de oleum (ácido concentrado), se desprende enseguida un humo blanco de  $\text{SO}_3$ , por lo que el oleum se llama también "ácido sulfúrico fumante".

De entre sus muchas aplicaciones mencionaremos algunas:

- ✓ Industria de Abonos: para disgregar los fosfatos, preparación de sulfatos, etc.
- ✓ Industria Orgánica: para preparar productos intermedios (para sulfurar, como ácido de nitración, en mezclas con ácido nítrico, etc.)
- ✓ Industria de Soda Artificial.
- ✓ Otras Industrias y Usos Técnicos (para limpiar, acidular, acumuladores, como deshidratante, etc.)

## **PRODUCCIÓN**

Los gases con contenido de Azufre que emanan de los hornos de fusión de concentrados de cobre son captados y conducidos a plantas de limpieza y tratamiento, que permiten obtener la producción de ácido sulfúrico mediante la oxidación de  $\text{SO}_2$  y posterior reacción con agua en reactores de plomo (cámaras de plomo).

Aunque el principal destino del ácido sulfúrico en el mundo es la industria productora de fertilizantes, el consumo en la minería del Cobre ha aumentado en los últimos años, debido a su uso en procesos de lixiviación y de electroobtención utilizados en la fabricación de cátodos de Cobre. Este compuesto también es utilizado en las industrias papelera y química.

En la actualidad, casi todo el ácido sulfúrico producido por Codelco es utilizado en la minería del cobre, así que buena parte de este producto es destinado a consumo propio, o a clientes ubicados en el área de influencia de la División Codelco Norte y la División Salvador en el norte de Chile.

El ácido sulfúrico producido por la División El Teniente, en la zona central de Chile, es transportado por naves hacia la zona norte del país donde están ubicados los principales centros de consumo.

La producción de ácido sulfúrico de Codelco está directamente relacionada con un compromiso medioambiental, ya que usa como materia prima los gases metalúrgicos producidos durante el proceso de fusión-conversión de concentrados de cobre.

## PREUNIVERSITARIO **BARROS ANÓDICOS** PEDRO DE VALDIVIA

Los barros anódicos son un concentrado de metales preciosos generado durante la refinación electrolítica realizada para fabricar cátodos de cobre con 99,99 por ciento de pureza.

Estos componentes se depositan en el fondo de las celdas donde es realizada la refinación y reciben el nombre por su apariencia lodosa. Después de lavar y filtrar el barro para eliminar restos de ácido sulfúrico de la electrólisis, el producto es envasado en tambores metálicos, que son palletizados, consolidados en contenedores y embarcados en servicios navieros hacia los puertos de destino.

Debido a la presencia de metales preciosos como Plata, Oro, Platino y Paladio, los barros anódicos tienen un elevado valor comercial. Para eso deben ser sometidos a un proceso físico-químico que permita separar estos componentes.

Los metales preciosos obtenidos de los barros anódicos son utilizados para la fabricación de joyas, monedas, películas, papeles fotográficos, catalizadores, entre otros.

**DMON-QM32**

**Puedes complementar los contenidos de esta guía visitando nuestra Web**  
<http://www.pedrodevaldivia.cl/>