

STALIN KARL

PROCESOS MINEROS

Curso Universitario Para Ingenieros No Especialistas

PROYECTOS MINEROS

Prologo

La motivación del autor de poder contribuir con las nuevas generaciones de estudiantes de las diversas disciplinas relacionadas con la industria de la minería ha sido una constante para poder volcar en este texto de estudio, sus 20 años de experiencia en ingeniería y construcción de proyectos industriales mineros nacionales e internacionales.

Chile, hoy en día es un país líder en gestión de proyectos para la industria minera. Este hecho es relevante, ya que incentiva la capacidad de desarrollar talentos y generar know-how de exportación a otros países mineros como Chile.

Esperamos poder contribuir con mucha humildad a la formación de profesionales de excelencia en el ámbito de la gestión de proyectos mineros y colaborar con conocimiento específico en el proceso de gestión del proyecto minero.

El objetivo del presente texto es poder facilitar la experiencia e incentivar la innovación que nos permita abordar desafíos de proyectos cada día más complejos en su gestión integral.

COMPARTIR LO APRENDIDO

Texto extraído de la película francesa “Lucy” rodada en 2014 dirigida y escrita por Luc Besson

Profesor Samuel Norman:

La vida nos fue dada hace mil millones de años ¿ Que hemos hecho con ella?

*Para seres primitivos como nosotros, la vida parece tener un solo propósito, **ganar tiempo**. Y el **pasar por el tiempo** también parece ser el único y real propósito de las células de nuestro cuerpo.*

Para lograr esa meta, la masa de las células que forman a las lombrices y a los humanos, solo tienen dos soluciones; ser inmortales o reproducirse.

Si el hábitat no es lo bastante favorable o acogedor, la célula escoge la inmortalidad, en otras palabras autogestión y autosuficiencia.

Por otro lado, si el hábitat es favorable, la célula escoge reproducirse. De ese modo al morir heredan información y conocimientos esenciales a la siguiente célula, quien la hereda a la siguiente célula y así sucesivamente.

“Así conocimiento y aprendizaje son heredados a través del tiempo”

Cien mil millones de neuronas por humano de las cuales solo el 15% están activas, hay más conexiones en el cuerpo humano que estrellas en la galaxia, poseemos una gigantesca red de información, a la que casi no tenemos acceso.

¿Que hacer con el conocimiento adquirido?

“Si lo piensas, la misma naturaleza de la vida, desde el principio, del desarrollo de la primera célula y su división en dos células, el propósito de la vida siempre fue COMPARTIR LO APRENDIDO, no hay un propósito más alto. Si me preguntas que hacer con el conocimiento que estas acumulando te diría compártelo, igual que cualquier simple célula a través del tiempo”

El tiempo le da legitimidad a la existencia, el tiempo es la única unidad de medida, es la prueba de la existencia de la materia, sin el tiempo nada existe.

“La vida nos fue dada hace mil millones de años ahora sabemos que hacer con ella”

Información General

APUNTES DE PROCESOS MINEROS

Curso Para Ingenieros No Especialistas

Ebook Primera Edición Febrero 2020

Stalin Karl Veliz 2020

Apuntes Generales

<http://www.stalinkarl.cl>

Diseño Portada Paul Giorventti

Edición Digital 2020

Arica – Chile

Autor

La motivación del autor de poder contribuir con las nuevas generaciones de estudiantes de las diversas disciplinas relacionadas con la industria de la minería, ha sido una constante para poder volcar en este libro, sus 26 años de experiencia en proyectos mineros nacionales e internacionales. Espero poder contribuir con humildad a la formación de profesionales de excelencia en el ámbito de la industria.



Stalin Karl, es Constructor Civil de la Universidad Católica del Norte Antofagasta e Ingeniero Civil Mecánico de la Universidad de Tarapacá Arica, posee una Maestría en Gestión Integral de Proyectos por la Universidad Católica del Norte Antofagasta.

Se ha dedicado por más de 26 años al área de proyectos mineros participando en la construcción de operaciones mineras de cobre en Chile y de Níquel en Cuba. Su especialidad es de comisionamiento y puesta en marcha de plantas industriales mineras. Ha participado en el desarrollo de metodologías y software para comisionamiento y puesta en marcha implementando sistemas informáticos de gestión EPIN 4.0 en proyectos de Moa Níquel en Cuba y Cobre Las Cruces en Gerena España.

Ha trabajado en empresas de ingeniería y construcción nacionales e internacionales en proyectos tales como:

1. EPCM Doña Inés de Collahuasi Angloamerican 1997 – 1998.
2. EPCM Los Pelambre Antofagasta Minerals 1999.
3. EPC El Tesoro Antofagasta Minerals 2000 – 2001.
4. CTF Codelco Chile 2002 – 2003.
5. EPCM Biolixiviación Codelco Chile 2003 – 2004.
6. EPCM ODS Minera Escondida 2004 – 2005.
7. EPCM Sulphide Leach Minera Escondida Ltda. 2005 – 2006.
8. EPCM MSC OLE/W9 Minera Escondida Ltda. 2007.
9. EPCM Metals Enterprise Expansion Sherrit Company (Moa - CUBA) 2008.
10. EPCM Explotación de Sulfuros RT Fase 1, Codelco Chile 2009
11. Binacional EPCM Pascua Lama, Compañía Minera Nevada. 2010-2011.
12. EPCM EOA Escondida Ore Access, Minera Escondida Ltda. 2012.
13. EPCM Bottlenecking 160 KTPD, Collahuasi, Angloamerican. 2012 – 2014.
14. EPC Antucoya, Compañía Antofagasta Minerals. 2014 – 2015.
15. EPCM Tailing Storage Facility Compañía Minera Candelaria. 2017 – 2018.
16. EPCM Candelaria Mills Optimization Project Compañía Minera Candelaria. 2019.

Ha ejercido cargos desde supervisión a gerencias de especialidad, en diversos proyectos mineros. Además, ha escrito los siguientes artículos y libros de proyectos industriales mineros:

- Pensamiento Complejo en la Estrategia Corporativa de Proyectos Mineros 2016.
- Sistematización de Proyectos Mineros 2016.
- Indicadores de Costo Para Cierre de Proyectos Mineros 2016.
- Apuntes Para el Curso de Procesos Mineros 2018.
- E-Book Fases del Proyecto Minero 2020.
- E-Book Estudio del Proyecto Minero 2020.
- E-Book Ejecución del Proyecto Minero 2020.
- E-Book Cierre del Proyecto Minero 2020.

En la actualidad se encuentra dedicado al ámbito privado, docencia, investigación y consultorías de especialidad.

Introducción General

Teniendo en consideración la importancia de la industria minera en el desarrollo y crecimiento económico del país, es de vital relevancia mantener y mejorar la actual posición de liderazgo mundial de las empresas mineras nacionales e internacionales que operan en nuestro territorio.

Uno de los desafíos clave es contar con personal de excelencia para el crecimiento, desempeño y funcionamiento del sector. Uno de los pilares fundamentales en este cometido es la formación de profesionales de las más variadas disciplinas de la ingeniería con capacidades para participar de la industria minera, con el conocimiento fundamental de procesos mineros y con las capacidades ingenieriles para satisfacer los requerimientos corporativos. Por este motivo es que todo ingeniero que se vea involucrado en una operación minera, debe ser formado y entrenado en el ámbito universitario respecto del proceso minero.

El objetivo de los apuntes para el *Curso de Procesos Mineros Para Ingenieros No Especialistas*, es poder facilitar un curso universitario a nivel general para las carreras relacionadas con esta industria (ingenierías y afines) de manera de entregar al estudiante sólidos conocimientos de los diferentes procesos mineros y pueda abordar desafíos laborales en esta industria de manera más competente y sólida aportando conocimiento específico.

Los apuntes consideran 20 temas abarcando los siguientes tópicos:

1. Introducción
2. Rocas y Minerales
3. Propiedades de los Minerales
4. Conceptos de Minería
5. Procesos Mineralizadores
6. Minerales Cupríferos
7. Proceso de Extracción
8. Proceso de Conminucion
9. Proceso de Manejo de Mineral
10. Proceso de Molienda
11. Proceso de Clasificación
12. Transporte Hidráulico
13. Sistemas de Bombas
14. Proceso de Agitación
15. Proceso de Flotación
16. Sedimentación y Espesamiento
17. Proceso de Filtración
18. Proceso de Secado
19. Procesos de Hidrometalurgia
20. Procesos de Pirometalurgia

Sección 5

INTRODUCCION

En la industria minera, la ingeniería de procesos desarrolla, evalúa y diseña los procesos productivos relacionados con plantas de procesamiento de minerales específicos. Los proyectos mineros a su vez están directamente relacionados con la construcción de los equipos e instalaciones que componen estas plantas de procesamiento de minerales.

Los sistemas de procesos mineros consisten en una serie de tratamientos fisicoquímicos y/o biotecnológicos para extraer las especies de valor, y que varían de acuerdo al tipo de mineral, a la forma en que se encuentra asociado con otros minerales, y al proceso de explotación. Existe un sin fin de equipos e instalaciones para cada una de las operaciones unitarias de estos procesos, los cuales serán abordados en el proyecto minero. Ver figura 1.

Figura 1 Obras de construcción proyecto ministro Hales



Por lo tanto, para poder participar íntegramente de un proyecto minero y tener un conocimiento acabado de él, es necesario y fundamental comprender de forma general la naturaleza de las diferentes tecnologías de procesamiento de minerales y se debe revisar con antelación el concepto de mineral, la formación de yacimientos, y los métodos de minería.

Existen muchos procesos mineros para diversos tipos de mineral, en estos apuntes trataremos los principales a modo de introducción y conocimiento general necesario para abordar un proyecto minero. En la medida que la especialidad, función, rol y complejidad del proyecto lo requiera, se deberá profundizar el conocimiento en procesos específicos de algún mineral, revisando la amplia bibliografía existente sobre el tema.

Estos apuntes son una recopilación bibliográfica de diferentes textos de procesamiento de minerales para la recuperación de metales, de distintos autores, los cuales están enunciados en la bibliografía del capítulo, de manera que el lector pueda profundizar sus conocimientos si lo necesita.

Sección 6

ROCAS Y MINERALES

En geología se le denomina roca a cada uno de los diversos materiales sólidos, formados por cristales o granos de uno o más minerales, de que está hecha la parte sólida de la Tierra y otros cuerpos planetarios. En la Tierra el manto y la corteza están hechos de roca.

Las rocas están constituidas, en general, por mezclas heterogéneas de diversos materiales homogéneos y cristalinos, es decir, minerales. Las rocas poliminerálicas están formadas por granos o cristales de varias especies mineralógicas y las rocas monominerálicas están constituidas por granos o cristales de un solo mineral.

Las rocas suelen ser materiales duros, pero también pueden ser blandas, como ocurre en el caso de las rocas arcillosas o las arenosas.

Los elementos químicos que componen nuestro planeta están distribuidos de una forma que a grandes rasgos es muy regular, ya que depende de dos grandes factores:

- Su abundancia en cada una de las capas que componen el planeta.
- La naturaleza y composición de las rocas presentes en cada sector concreto que analicemos.

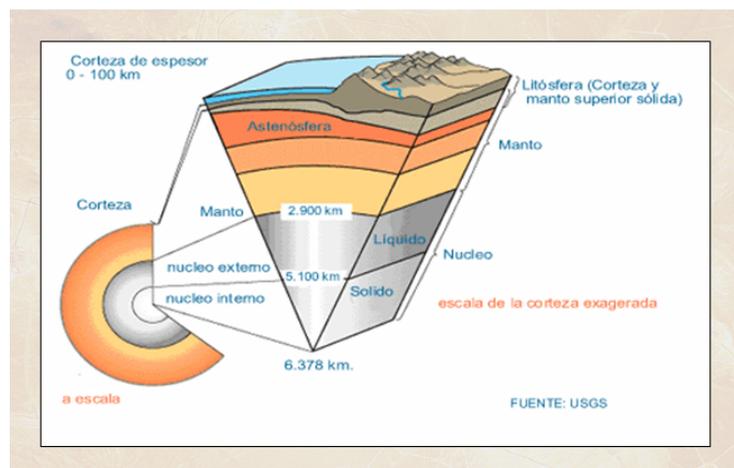
Sobre la base de los datos conocidos sobre la naturaleza y composición geoquímica, mineralógica y petrológica de las diferentes capas en que está dividido nuestro planeta, la composición es simple y homogénea en la zona más profunda (núcleo), e intermedia en el manto, mientras que la capa más superficial (la corteza) presenta una composición más compleja y heterogénea. Esto último se debe a su vez a dos factores:

- El hecho de que la diferenciación planetaria haya producido un enriquecimiento relativo de esta capa en los elementos más ligeros, que no tienen cabida en los minerales que componen el manto, que son de composición relativamente simple: fundamentalmente silicatos de Mg y Fe. Eso hace que, con respecto al manto, la corteza sólo esté empobrecida en elementos como Fe y Mg (en lo que se refiere a elementos mayoritarios) y Ni, Cr, Pt, en lo que se refiere a minoritarios o trazas.
- La mayor complejidad de los procesos geológicos que operan en la corteza producen fenómenos muy variados de enriquecimiento o empobrecimiento de carácter local, que afectan a la concentración de los distintos elementos químicos de diferentes maneras.

De esta manera, podemos entender a la corteza como aquel segmento de nuestro planeta en el que se rompe la homogeneidad de la distribución de los elementos que encontramos en capas más profundas. Por ejemplo, a pesar de que existan algunas variaciones composicionales en el manto, éstas son insignificantes con respecto a la altísima variabilidad que observamos en la corteza. Así, en ésta podemos observar rocas ígneas que independientemente de su lugar de origen (manto astenosférico, manto litosférico, corteza) van desde composiciones peridotíticas hasta las graníticas. Es en la corteza donde, además, encontraremos las rocas sedimentarias y metamórficas. Los procesos que llevan a la diferenciación de un magma, o a la formación de una roca sedimentaria o metamórfica implican en ocasiones transformaciones profundas químico-mineralógicas. Es durante el curso de esos procesos que algunos

elementos o minerales pueden concentrarse selectivamente, muy por encima de sus valores *normales* para un tipo determinado de roca, dando origen a concentraciones anómalas denominadas *yacimientos minerales*. Figura 2.

Figura 2 Corteza Terrestre



Es muy importante considerar el aspecto geoquímico del concepto. Todos los elementos químicos están distribuidos en la corteza de forma muy amplia, aunque en general su concentración en las rocas es demasiado baja como para permitir que su extracción de las rocas resulte rentable. Como hemos explicado, su concentración para dar lugar a un yacimiento mineral se produce como consecuencia de algún proceso geológico (ígneo, sedimentario o metamórfico) que provoca la concentración anómala del elemento.

Por ejemplo, el oro que se encuentra concentrado en los yacimientos sedimentarios de tipo placer puede proceder del oro diseminado en áreas de gran extensión regional. En esas áreas el oro estará presente en las rocas, pero en concentraciones demasiado bajas como para poder ser extraído con una rentabilidad económica. Sin embargo, el proceso sedimentario produce su concentración en los aluviones o en playas, posibilitando en algunos casos su extracción económica. En definitiva, para que un elemento sea explotable en un yacimiento mineral, su concentración debe ser muy superior a su concentración media (clark) en la corteza terrestre.

El otro factor importante a considerar es el económico: esas concentraciones podrán ser o no de interés económico, lo que delimita el concepto de *yacimiento explotable o no explotable*, en función de factores muy variados, entre los que a primera vista destacan algunos como el valor económico del mineral o minerales extraídos, su concentración o ley, el volumen de las reservas, la mayor o menos proximidad de puntos de consumo, la evolución previsible del mercado, etc., factores algunos fácilmente identificables, mientras que otros son casi imposibles de conocer de antemano.

Esta conjunción de factores geológicos y económicos hace que el estudio de *yacimientos minerales* sea una cuestión compleja y problemática, en la que hay que conjugar la labor de especialistas de distintos campos, ya que incluye desde las cuestiones que afectan a la prospección o búsqueda de estas concentraciones, su evaluación, el diseño y seguimiento de su explotación minera, el estudio de la viabilidad económica de la explotación, el análisis del mercado previsible para nuestro producto, hasta factores políticos (estabilidad económica y social de un país) o cuestiones medioambientales, como la recuperación de los espacios afectados por esta actividad.

Es importante saber las definiciones de mineral, roca y metal ya que éstas representan diferentes valores de producto y en parte, diferentes sistemas de proceso.

Sección 7

PROPIEDADES DE LOS MINERALES

Un mineral es una sustancia sólida inorgánica, formada por uno o más elementos químicos definidos, que se organizan ordenadamente en una estructura interna. Los minerales se encuentran en la superficie o en las diversas capas de la corteza del planeta formando rocas, las que son un conjunto de minerales. Para que un material terrestre se defina como tal, debe presentar las siguientes características:

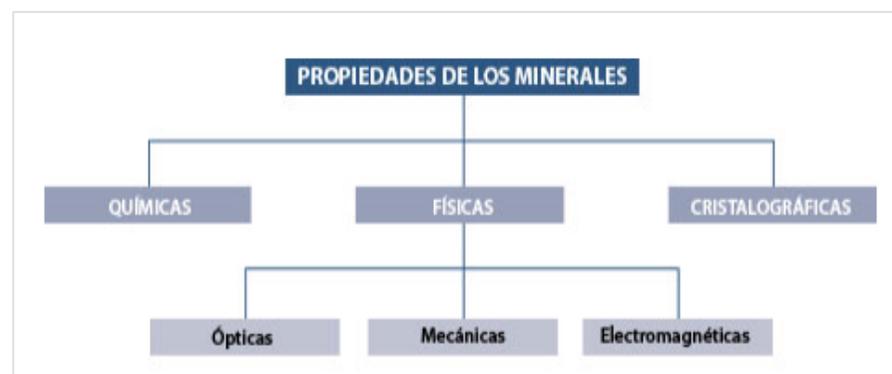
- 📌 Aparecer en forma natural.
- 📌 Ser inorgánico.
- 📌 Ser sólido.
- 📌 Poseer una estructura interna ordenada, es decir, sus átomos deben estar dispuestos según un modelo definido.
- 📌 Tener una composición química definida, esto es, que puede variar sólo dentro de ciertos límites.

Cuando se habla de minerales, sólo se consideran las sustancias que satisfacen estos criterios. Por esta razón los diamantes sintéticos y una gran variedad de otros materiales producidos por los químicos no se consideran minerales. De esta forma, el ópalo -piedra preciosa- se clasifica como mineraloide, ya que, si bien no tiene estructura interna ordenada, cumple los demás requisitos.

Las propiedades físicas y químicas que se pueden observar en las rocas dependen en gran medida de las propiedades físicas y químicas de los minerales que las conforman. Por esta razón, si queremos conocer las características de los minerales de un sector, es fundamental tomar las muestras de rocas que sean representativas. Como sabemos, la observación y medición de las características de los minerales nos permiten identificarlos y luego decidir acerca de las medidas que serán necesarias tomar y /o de los usos, de acuerdo con los objetivos de la exploración.

El reconocimiento de los minerales es el conjunto de técnicas que podemos utilizar para inferir la especie en función de propiedades observables o medibles. Ver figura 3.

Figura 3 Propiedades de los minerales



Cada mineral está compuesto por elementos químicos que se organizan conforme a una estructura regular que se repite en cada muestra.

7.1 Propiedades Químicas de los Minerales

Para conocer las propiedades químicas de un mineral es necesario saber que un mineral es una disposición ordenada de átomos químicamente unidos que forman una estructura. Este empaquetamiento ordenado de los átomos se refleja en objetos de formas regulares denominados cristales. Es por ello que se dice que los minerales tienen una estructura cristalina concreta. La estructura cristalina particular de un mineral está determinada por la disposición atómica interna de sus compuestos, los que están formados por iones (átomos con carga eléctrica). Tanto la carga como el tamaño de los iones que intervienen en la formación del compuesto, determinan su tipo de estructura cristalina.

En la búsqueda de formar compuestos iónicos estables, cada ión de carga positiva se rodea por el mayor número de iones negativos que puedan acomodarse para mantener la neutralidad eléctrica general. Lo mismo ocurre a la inversa.

Cada una de las muestras de un mineral tiene la misma estructura interna, pero como los mismos elementos son capaces de reunirse en más de una forma, puede haber dos minerales con propiedades totalmente diferentes y exactamente la misma composición química. Los minerales de este tipo se denominan polimorfos. Por causas naturales o inducidas, un polimorfo se puede transformar en otro. A este fenómeno se le denomina cambio de fase.

En la naturaleza, ciertos minerales atraviesan cambios de fase conforme pasan de un ambiente a otro. Por ejemplo, si se calienta el grafito a presiones elevadas, se pueden producir diamantes de menor calidad que el original, pero con uso industrial dada su dureza. También, cuando en la naturaleza las rocas son transportadas a mayores profundidades por una placa en subducción, el mineral olivino cambia a una forma más compleja denominada espinela.

7.2 Clasificación de los Minerales

Algunos minerales están compuestos exclusivamente de un elemento, como el oro (Au) o el azufre (S), pero la mayoría es una combinación de dos o más elementos químicos, que forman un compuesto químicamente estable. Si bien la clasificación química no es rígida, se pueden distinguir clases de compuestos químicos que incluyen a la mayoría de los minerales. Ver tabla 1.

Tabla 1 Clases de minerales

Clases	Características
Elementos	Los elementos se encuentran en la naturaleza en estado puro o nativo, es decir, sin formar compuestos químicos. Por ejemplo: oro, grafito, diamante y azufre.
Sulfuros	Son compuestos formados por diversos metales y el azufre. Por ejemplo: galena o esfalerita, calcopirita.
Sulfosales	Compuestos formados por plomo, cobre o plata combinados con azufre y uno o más elementos, tales como antimonio, arsénico y bismuto. Por ejemplo: pirargirita (Ag_3SbS_3)
Óxidos	Compuestos formados por un metal combinado con oxígeno, u óxidos minerales que también contienen agua. Ejemplo: hematites u oligisto (Fe_2O_3), diásporo ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) y grupo hidroxilo (OH).
Haluros	Compuestos formados por metales combinados con cloro, flúor, bromo o yodo. Ejemplo: halita o sal gema (NaCl).
Carbonatos	Compuestos que contienen un grupo carbonato CO_3^{-2} . Ejemplo: calcita (CaCO_3).
Fosfatos	Compuestos que contienen un grupo fosfato en su estructura. Ejemplo: apatita ($\text{Ca}_5(\text{F,Cl})(\text{PO}_4)_3$)
Sulfatos	Compuestos que contienen un grupo sulfato (SO_4) en su estructura. Ejemplo: barita (BaSO_4)
Silicatos	Compuestos formados por varios elementos combinados con silicio oxígeno -que a menudo tienen una estructura química compleja- y minerales compuestos exclusivamente de silicio y oxígeno (por ejemplo, el silice). Es la clase más abundante de minerales e incluyen las familias del feldespato, la mica, el piroxeno, el cuarzo, la zeolita y el anfíbol.

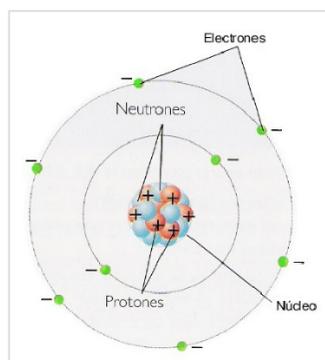
7.3 Átomo y Estructura Atómica

La partícula básica que se combina para formar moléculas y compuestos se llama átomo; esto es, la parte más pequeña de la materia que conserva las características de los elementos.

7.3.1 Estructura del átomo

Los átomos tienen una región central, denominada núcleo. Rodeando al núcleo se encuentran partículas muy livianas llamadas electrones, de carga negativa, que viajan a grandes velocidades. Ver figura 4.

Figura 4 Estructura del átomo



Los átomos se representan en diagramas que muestran los electrones en órbitas alrededor del núcleo, como las órbitas de los planetas alrededor del sol.

Sin embargo, éste es sólo un esquema, ya que los electrones viajan en diferentes planos a diferencia de los planetas que se movilizan en un mismo plano. Como se mueven muy rápido en torno al núcleo, crean zonas esféricas de carga negativa. Estas se llaman niveles de energía o capas, en las que se puede acomodar un número específico de electrones.

Por consiguiente, una representación más real del átomo considera capas a modo de nubes de electrones en movimiento rápido alrededor del núcleo central. Dentro del núcleo se encuentran los protones y los neutrones.

Los neutrones son partículas muy densas con carga eléctrica neutra. Los protones son partículas de carga positiva, tan densos como los neutrones. El número de protones del núcleo determina el número atómico del elemento y su nombre.

Por ejemplo: los elementos con 6 protones en el núcleo son átomos de carbono y tienen el número atómico 6; los elementos con 8 protones en el núcleo son átomos de oxígeno y tienen el número atómico 8.

Todos los átomos tienen el mismo número de electrones que de protones, de manera que el número atómico también equivale a la cantidad de electrones. Como los neutrones no tienen carga, la carga positiva de los protones se equilibra de manera exacta por la carga negativa de los electrones. Es así como, un elemento es un cúmulo de átomos eléctricamente neutros, con los mismos números atómicos.

El hidrógeno es el elemento más sencillo, ya que está compuesto por átomos que tienen un protón en el núcleo y un electrón a su alrededor. Cada electrón se añade de una manera sistemática a una capa o nivel de energía particular. En general, los electrones van entrando a niveles de energía superiores en la medida en que se ha completado la capacidad de los niveles inferiores. La primera

capa principal tiene un máximo de dos electrones, mientras que cada una de las capas superiores, esto es, las que se van alejando del núcleo- contienen ocho o más electrones. Ver figura 5.

Figura 5 Estructura electrónica del átomo

	s	p	d	f
k = 1	1s			
l = 2	2s	2p		
m = 3	3s	3p	3d	
n = 4	4s	4p	4d	4f
o = 5	5s	5p	5d	5f
p = 6	6s	6p	6d	
q = 7	7s	7p		

Para encontrar la distribución electrónica se escriben las notaciones en forma diagonal desde arriba hacia abajo y de derecha a izquierda (seguir colores):

1s	2s	2p	3s	3p	4s	3d	4p	5s	4d	5p	6s	4f	5d	6p	7s	5f	6d	7p
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Para que los átomos tengan una configuración estable deben tener 8 electrones en su última capa. Esta capa externa completa sólo se encuentra en el caso de los gases nobles; esto es, el neón y el argón. Es por ello que no necesitan combinarse con otros átomos, es decir, no son reactivos desde el punto de vista químico. De ahí que se les conozca como gases inertes.

Todos los demás átomos buscan ser estables, es decir, contar con ocho electrones en su capa externa, al igual que los gases nobles.

7.3.2 Enlaces químicos de los átomos

En busca de la estabilidad, los elementos se combinan entre sí para formar una amplia variedad de sustancias más complejas. A la fuerza de atracción existente entre los átomos se le denomina enlace químico.

A los electrones que están en las franjas externas de los átomos e intervienen en el enlace químico se les llama electrones de valencia.

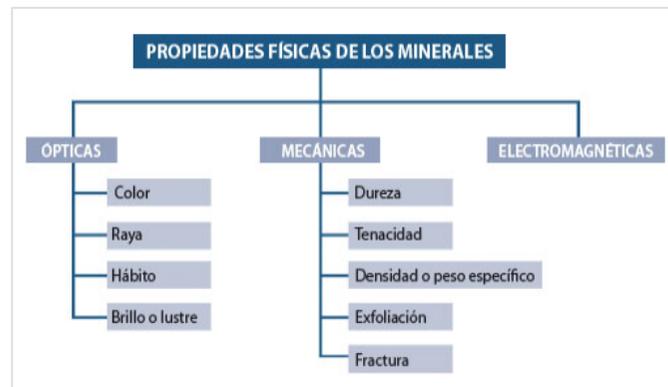
7.4 Compuestos Químicos

Cuando un enlace químico reúne dos o más elementos en proporciones definidas, a la sustancia obtenida se le denomina compuesto. La mayoría de los minerales son compuestos químicos. Los átomos de un compuesto se mantienen unidos gracias a las fuerzas eléctricas.

7.5 Propiedades Físicas de los Minerales

La estructura cristalina interna de cada mineral suele no expresarse externamente. En general, donde se pueda formar un mineral, sin restricciones de espacio, se desarrollan cristales individuales con caras cristalinas bien formadas. Pero casi siempre el crecimiento cristalino se interrumpe dada la competencia por el espacio, lo que se traduce en una masa de intercrecimiento de cristales, donde ninguno de ellos exhibe su forma cristalina. Por esta razón, para reconocer minerales se recurre a sus propiedades físicas más fácilmente reconocibles, que son las ópticas, mecánicas y electromagnéticas. Ver figura 6.

Figura 6 Propiedades físicas de los minerales.



7.6 Propiedades ópticas

7.6.1 Color

En general, el color es un medio poco eficiente para identificar minerales debido a que éstos no se presentan siempre con el mismo color, lo que hace que no sea un indicador unívoco. Ver figura 7.

En relación con el color se distinguen dos grupos de minerales:

- **Idiocromáticos:** que son aquellos que tienen colores característicos según su composición. Sólo para este grupo de minerales el color es un antecedente útil como medio de identificación.
- **Alocromáticos:** son aquellos minerales que presentan un rango de colores debido a la presencia de impurezas o de inclusiones en su estructura.

Figura 7 Propiedades ópticas de los minerales

Mineral		Color
	Magnetita Hematita Epidota Clorita	Negro Rojo Verde Verde
	Lapislázuli Turquesa Malaquita	Azul oscuro Azul característico Verde brillante
	Cobre nativo	Rojo cobrizo

Para reconocer coloración de alocromáticos:

Feldespatos potásicos: su color varía de incoloro a blanco pasando por color carne hasta rojo intenso o incluso verde.

Cuarzo: en su estado puro es incoloro. La presencia de varias inclusiones líquidas le da un color blanco lechoso.

Amatista: es de color púrpura característico, probablemente debido a impurezas de Fe^{3+} y Ti^{3+} y a la irradiación radiactiva.

Corindón: en su estado puro es incoloro. Si porta cromo como elemento traza es de color rojo y se lo llama rubí. A su vez, el zafiro es una variedad transparente de corindón de varios colores.

7.6.2 Raya

Para determinar este parámetro, se raya el mineral utilizando otro de mayor dureza. Se determina el color del polvo fino obtenido. Este parámetro es útil para identificar minerales y menas, ya que suele ser constante, incluso si varía el color del trozo.

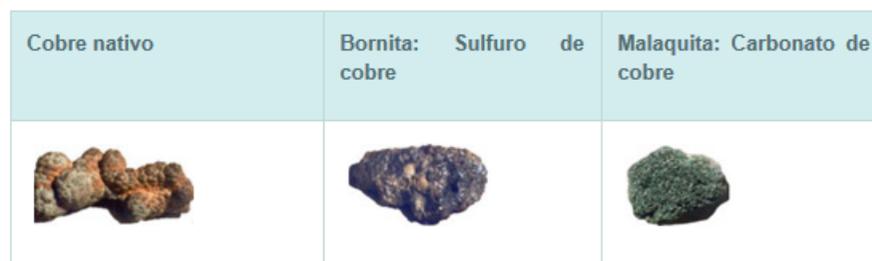
Para reconocer rayas:

- La raya del feldespato potásico siempre es blanca, sin importar si el trozo es incoloro, color carne o verde.
- La raya de la magnetita es negra.
- La raya de la hematita es roja cereza.

7.6.3 Hábito

El hábito se refiere a la forma más común en que se presenta un mineral. Puede corresponder a cristales bien formados o a formas aparentemente no cristalinas. Según las formas básicas de los minerales, se pueden distinguir diferentes hábitos. El cobre puede presentarse como óxido de cobre, sulfuro de cobre o en estado nativo, por lo que puede tener diferentes hábitos dependiendo del tipo, estado y condiciones de entorno (alteraciones). Ver figura 8.

Figura 8 Hábito de minerales



Para reconocer hábitos:

Minerales isométricos o cúbicos: en los que el desarrollo es por igual en todos los sentidos (galena, granate)

Alargados en una dirección: puede ser dirección columnar (anfíbola), acicular o en agujas (atacamita) o fibrosa (asbesto).

Alargados en dos direcciones: puede ser tabular (baritina) u hojosa (micas).

Formas intermedias: es el caso del tonel, una forma de transición entre isométrica y alargada (zafiro).

Granulares, con forma de grano.

Lamelares o laminares: se observan cristales formados por placas u hojas algo separables (por ejemplo, el yeso).

Oolíticos: se observan agregados, formados por pequeñas esferas semejantes a huevos de pescado.

Concreciones: se trata de masas formadas por depósitos de mineral sobre un núcleo.

Dendrítico o arborescente: grupos de cristales en forma arborescente, semejante a la de las plantas.

Estalactitas: cristales con forma de conos o cilindros colgantes.

Según los límites de las formas cristalinas, se pueden distinguir cristales:

Idiomorfos: poseen caras bien desarrolladas.

Hipidiomorfos: poseen caras desarrolladas imperfectamente.

Alotriomorfos: poseen caras deformadas por falta de espacio durante su crecimiento.

Además, dentro de los caracteres morfológicos de los cristales se incluyen también las formas dobles o múltiples (maclas de yeso, fluorita, rutilo, ortoclasa).

7.7 Brillo o lustre

Se refiere al aspecto general que se observa en la superficie de un mineral cuando éste refleja la luz. En general, es una distinción difícil de establecer, ya que es muy subjetiva. Existen tres grandes tipos de brillo o lustre:

Metálico: mineral opaco a la luz, que tiene el aspecto brillante de un metal, y una raya negra o muy oscura. Por ejemplo, galena, pirita y calcopirita.

Semimetálico: brillo propio de minerales transparentes o semitransparentes. Por ejemplo, argentita.

No metálico: brillo que no tiene aspecto metálico. En general, son de colores claros y transmiten la luz a través de láminas delgadas. Su raya es incolora o de color muy débil. Los minerales de brillo no metálico se pueden agrupar en categorías, siendo las dos primeras las más frecuentes.

Vítreos: tiene el reflejo del vidrio (por ejemplo, cuarzo).

Sedoso: con apariencia de seda (por ejemplo, yeso fibroso, malaquita y serpentina).

Resinoso: tiene el aspecto de la resina (por ejemplo, blenda).

Graso: parece estar cubierto con una delgada capa de aceite (por ejemplo, yeso, malaquita, serpentina).

Adamantino: de reflejo fuerte y brillante por su alto índice de refracción (por ejemplo, minerales transparentes de plomo, como crisolita y anglesita).

Nacarado: brillo con el aspecto iridiscente de la perla. Esta característica se observa en superficies de los minerales que se distribuyen paralelas a los planos de exfoliación (por ejemplo, apofilita en el plano basal).

7.8 Propiedades Mecánicas

Son aquellas que para identificarlas requieren de alguna acción que permita distinguir de qué mineral se trata.

7.8.1 Dureza

Es la resistencia que ofrece la superficie lisa de un mineral al ser rayada, ya sea por otro mineral o por una punta de acero. La dureza es una propiedad vectorial, por lo que un mismo cristal puede presentar distintos grados de dureza, dependiendo de la dirección de la raya. Esta diferencia es tan ligera en la mayor parte de los minerales comunes, que sólo se distingue usando instrumentos delicados.

La dureza se mide de acuerdo con la escala de Mohs, en la que se ordenan de menor a mayor los índices de dureza de diez minerales según su capacidad de rayar al precedente y ser rayado por el siguiente. Por ejemplo, Una moneda de cobre tiene dureza 3.

7.8.1.1 Escala de dureza de Mohs

Esta escala ordena las durezas de diez minerales, de menor a mayor según su capacidad de rayar al precedente y ser rayado por el siguiente. Esta secuencia permite comparar con otros minerales para poder determinar su dureza relativa. Ver tabla 2.

Tabla 2 Dureza de Mhos

Dureza	Mineral	Comparación
1	Talco	La uña de la mano lo raya con facilidad
2	Yeso	La uña de la mano lo raya
3	Calcita	La punta de un cuchillo lo rava con facilidad
4	Fluorita	La punta de un cuchillo lo raya
5	Apatito	La punta de un cuchillo lo raya con dificultad
6	Feldespató potásico	Un trozo de vidrio lo raya con dificultad
7	Cuarzo	Puede rayar un trozo de vidrio con facilidad
8	Topacio	Puede rayar un trozo de vidrio con facilidad dejando una marca gruesa
9	Corindón	Raya todos los minerales menos el diamante
10	Diamante	Puede rayar todos los minerales existentes

Cuando un mineral es más blando que otro, porciones del primero dejan una huella sobre el segundo. Para no confundir esa marca con una raya, hay que tratar de borrarla. Si ésta no desaparece, se trata de una raya verdadera. Por ejemplo, si se raya un vidrio (cuarzo) con una tiza, ésta deja un trazo en el primero, pero se borra fácilmente.

Muchos minerales se alteran fácilmente en su superficie, mostrándose mucho más blandos que el original. Para evitar este problema, debe emplearse una superficie fresca (no contaminada) del ejemplar en estudio. Si un mineral es polvoriento, granular o astilloso, puede romperse y quedar aparentemente rayado por un mineral mucho más blando que él mismo. Por ejemplo, un mineral alterado por efecto del agua tiene algunas propiedades modificadas -como la dureza- y puede ser rayado por un mineral más blando.

Cuando se efectúa la prueba de dureza es conveniente confirmarla, repitiendo la operación alterando el orden de ejecución. Es decir, no sólo tratar de rayar el mineral A con el B en ambas oportunidades, sino también tratar de rayar el mineral B con el A.

Un mineral de dureza desconocida puede compararse con minerales u otros objetos de dureza conocida. Por ejemplo, las uñas tienen dureza de 2.5, una moneda de cobre de 3, el acero de un cortaplumas de 5, un trozo de vidrio de 5.5 y el acero de una lima, de 6.5.

7.8.2 Tenacidad

Es la resistencia que un material opone a ser roto, molido, quebrado, doblado o desgarrado. En otras palabras, responde a su cohesión, es decir, a la capacidad de un mineral de resistir la separación de sus componentes sin perder sus propiedades. Por ejemplo, el cobre nativo tiene una tenacidad dúctil, es decir, se pueden formar con él alambres e hilos.

Los diferentes tipos de tenacidad se pueden describir utilizando los siguientes términos:

Frágil: si el mineral se rompe fácilmente o reduce a polvo (arcilla, talco).

Maleable: si el mineral puede ser transformado en hojas delgadas por percusión (minerales nativos como el cobre).

Séctil: si el mineral se corta con un cuchillo y tiene dureza menor a 3 (yeso).

Dúctil: si se le puede dar la forma de hilo (cobre nativo).

Flexible: si puede ser doblado, pero sin recuperar su forma original una vez que termina la presión que lo deforma.

Elástico: cuando recobra su forma primitiva al cesar la fuerza que lo ha deformado (micas).

7.8.3 Densidad o Peso Específico

La densidad depende de la composición química del mineral y de su estructura cristalina. A una temperatura y presión dadas, los minerales que son poco variables químicamente tienen una densidad constante. En ocasiones, basta con determinarla -mediante el uso de instrumentos como balanzas y picnómetros- para identificar el mineral directamente.

El peso específico se indica con una G y corresponde al número que expresa la relación entre el peso (del mineral) y el peso del mismo volumen de agua a 4° C.

Por ejemplo, si un mineral tiene peso específico 2, significa que una muestra pesa dos veces lo que pesaría un volumen igual de agua. El peso específico de una sustancia cristalina depende de dos factores:

- La clase de átomos de que está compuesta
- La manera en que están empaquetados los átomos.

En los compuestos isoestructurales, donde el empaquetamiento es constante, los elementos con peso atómico más elevado tienen, por lo general, mayor peso específico.

Con un poco de práctica se puede calcular el peso específico de los minerales sosteniéndolos en la mano. Si un mineral parece tan pesado como las rocas comunes que se han manejado, por ejemplo, una roca ígnea (Andesita) con una densidad de 2,7, su peso específico estará probablemente en algún punto entre 2,5 y 3, 0. Algunos minerales metálicos tienen el doble o el triple del peso específico de los minerales que constituyen rocas comunes. La galena -mena de plomo- tiene un peso específico de unos 7,5, mientras que el peso específico del oro de 24 quilates es cercano a 20. Ver tabla 3.

Tabla 3 Densidad de minerales

Densidad en g/cm ³	Mineral
2,65	Cuarzo
2,5	Feldespatos
2,6 - 2,8	Plagioclasa
4,47	aritina
4,9	Magnetita
5,0 - 5,2	Pirita
19,3	Oro

7.9 Exfoliación

Si al aplicar la fuerza necesaria un mineral se rompe dejando dos superficies planas, se dice que posee exfoliación, es decir, la propiedad de partirse en direcciones preferentes. No todos los minerales la presentan y sólo un pequeño porcentaje la muestra en un grado eminente. Los que no la tienen, suelen presentar fractura.

Las superficies de exfoliación son siempre paralelas a caras reales o posibles del cristal. Pueden ser superficies perfectas, como el caso de la mica, o más o menos definidas, como en el caso del berilio y la apatita.

En general, la exfoliación es consecuente con la simetría, de manera que, si se trata de un mineral de una estructura octaédrica, deben distinguirse tres direcciones de exfoliación simétricas a la primera; si es una dodecaédrica, existen cinco direcciones similares a la primera.

La exfoliación se relaciona con la estructura del cristal, ya que éste es más débil en ciertas direcciones que en otras. Ésta es una propiedad direccional que -en el caso de existir- determina que en todo el cristal cualquier plano paralelo a ella es un plano de exfoliación en potencia.

Los grados de exfoliación se distinguen de la siguiente forma:

Excelente: se exfolia en láminas en un sentido (grafito, yeso).

Perfecta: el mineral se exfolia en formas regulares delimitadas por los planos de exfoliación como cubos (galena y halita) o romboedros (calcita). En este caso, los planos de exfoliación tienen un brillo nacarado.

Buena: los planos de exfoliación son menos visibles y no siempre son perfectamente rectos (feldespato, anfíbola, piroxeno). Los planos de exfoliación tienen un brillo vítreo.

Imperfecta: la exfoliación no es neta; los planos de separación presentan, en general, una superficie irregular (azufre, apatita).

Muy imperfecta: no hay exfoliación, sino fracturas.

7.9.1 Fractura

Cuando los minerales al romperse no exhiben exfoliación, como el cuarzo, se dice que tienen fractura.

Las diferentes clases de fractura son:

Concoidal: en este caso la fractura tiene superficies suaves, lisas, como la cara interior de una concha. Esto se observa en el vidrio y el cuarzo.

Fibrosa o astillosa: las rocas se fracturan en astillas o fibras.

Ganchuda: la roca se rompe en una superficie irregular, dentada, con filos puntiagudos (plata, oro).

Desigual o irregular: la roca se rompe en superficies bastas e irregulares (pirita).

Terrosa: la roca se fractura en forma de terrones (caolinita).

7.9.2 Propiedades Electromagnéticas de los Minerales

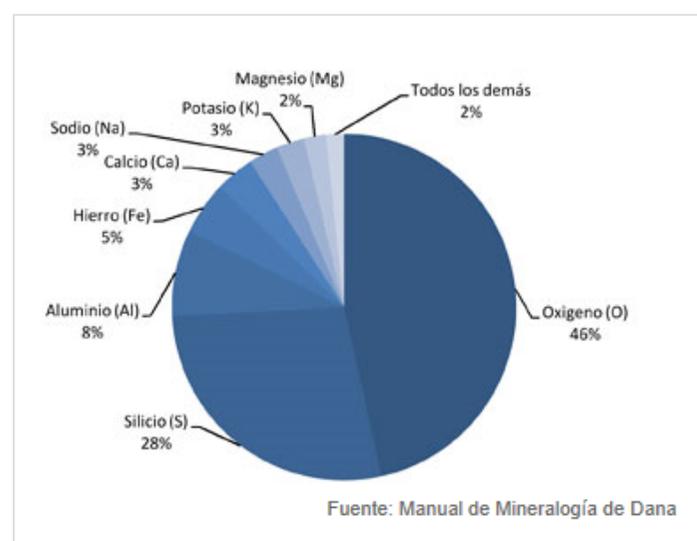
Todos los minerales están afectados por un campo magnético. Los que son atraídos ligeramente por un imán, se llaman paramagnéticos, mientras que los que son repelidos se llaman diamagnéticos.

La magnetita y pirotita son los únicos minerales magnéticos comunes. A su vez, los minerales tienen diferentes capacidades para conducir la corriente eléctrica. Los cristales de metales nativos y muchos sulfuros son buenos conductores de la electricidad y, por el contrario, los minerales tales como las micas son buenos aislantes, dado que no conducen la electricidad.

7.9.3 Minerales Formadores de Roca

A los cerca de 4.000 minerales conocidos, cada año se agregan unos 40 o 50 nuevos. Sin embargo, sólo una decena constituye la mayor parte de la corteza terrestre, por lo que se les clasifica como minerales formadores de rocas. Sólo ocho elementos constituyen la mayor parte de estos minerales y representan más del 98% del peso de la corteza continental. Ver figura 9.

Figura 9 Clasificación de minerales formadores de roca



Con excepción de los gases libres en la atmósfera, cerca de veinte elementos de forma no combinada se encuentran como minerales. Generalmente se les conoce como minerales en estado nativo; entre ellos, minerales tan importantes como el cobre, oro y plata.

Tabla 4 Elementos que por sí solos constituyen minerales

Estado	Nombre	Símbolo
Nativos	Oro	Au
	Plata	Ag
	Cobre	Cu
	Plomo	Pb
	Platino	Pt
	Iridio	Ir
	Osmio	Os
	Hierro	Fe
Seminativos	Arsénico	As
	Antimonio	Sb
	Bismuto	Bi
	Azufre	S
No nativo	Carbono en forma de diamante y grafito	C

7.10 Los Silicatos

La mayoría de los silicatos se forman (cristalizan) en la medida en que se enfría la roca fundida. Este proceso puede producirse en la superficie terrestre, cerca de ella (con baja temperatura y presión) o a grandes profundidades con temperatura y presión elevadas.

Durante la cristalización, el ambiente, así como la composición química de la roca fundida, determina en gran medida los minerales que se producen. Por ejemplo, el silicato olivino cristaliza a temperaturas mucho más bajas que otros silicatos. Algunos silicatos se forman en la superficie terrestre a partir de productos meteorizados de silicatos más antiguos. Otros se originan bajo presiones extremas, en procesos asociados con la formación de montañas. Por lo tanto, cada silicato tiene una estructura y composición química que revela las condiciones en las cuales se desarrolló, de tal manera que los geólogos pueden identificarlas tras un examen cuidadoso.

Esto es importante para comprender el origen de la formación de las rocas, asociada a la presencia de sílice, ya que éste determina a qué presión, temperatura y profundidad se formaron.

Tabla 5 Tipos de minerales según elementos presentes

Tipo de mineral	Características	Ejemplo
Sulfuros	Están formados por las combinaciones de los metales con azufre, selenio o telurio. La mayoría de las menas metálicas son sulfuros.	Calcopirita (S ₂ CuFe)
Sulfosales	Minerales compuestos por plomo, cobre o plata en combinación con azufre y antimonio, arsénico o bismuto	Proustita
Óxidos	Minerales que contienen un metal combinado con el oxígeno; por ejemplo, hematina (Fe ₂ O ₃).	Cuprita (Cu ₂ O)
Hidróxidos	Óxidos metálicos que contienen agua o hidroxilo (OH) como radical importante.	Bauxita
Haluros	Comprende los cloruros, fluoruros, bromuros y yoduros naturales	Atacamita ClCu(OH) ₃
Carbonatos	Los carbonatos son minerales cuya fórmula incluye el radical carbonato CO ₃	Calcita (CaCO ₃)
Nitratos	Pueden ser considerados como sales del ácido nítrico y contienen el radical NO ₃ ⁻ .	Nitro Salitre KNO ₃
Boratos	Contienen el grupo BO ₃	Bórax (Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O)
Sulfatos	Sus fórmulas incluyen el radical sulfato SO ₄	Yeso
Fosfatos	Sus fórmulas incluyen el radical fosfato PO ₄	Apatito (PO ₄) ₃ (Cl,F)Ca ₅
Tungstatos	Contienen el radical WO ₄	Tungstatos
Silicatos	Forman el grupo químico más importante entre los minerales. Contienen varios elementos, de los cuales son frecuentes el sodio, potasio, calcio, magnesio, aluminio y hierro, en combinación con el silicio y oxígeno	Cuarzo

7.10.1 Estructura Química de los Silicatos

Los silicatos frecuentemente forman estructuras químicas muy complejas. Su unidad fundamental es un átomo de silicio (Si) unido a cuatro átomos de oxígeno dispuestos alrededor de él, como en los vértices de un tetraedro. Las diferentes formas de unión de los tetraedros en la estructura del cristal dan origen a los diversos tipos de silicatos.

Además del oxígeno y del silicio, la mayor parte de los silicatos -excepto el cuarzo- tiene uno o más elementos necesarios para establecer la neutralidad eléctrica. Esos elementos adicionales dan lugar a la gran variedad de silicatos y a sus propiedades.

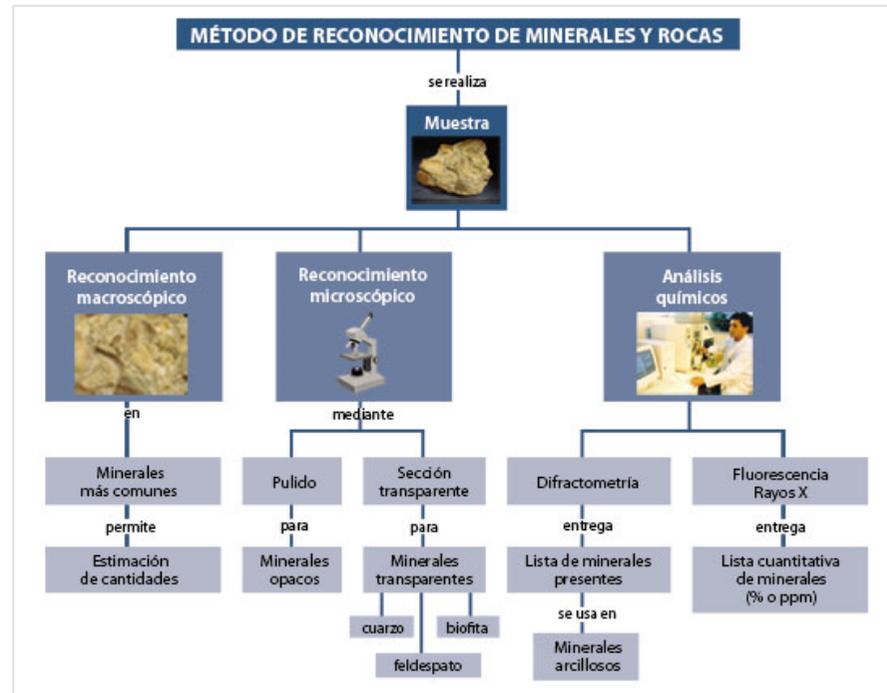
Tabla 6 Estructura de diferentes silicatos

Silicato	Fórmula idealizada	Exfoliación	Estructura de silicatos
Olivino	(Mg,Fe) ₂ SiO ₄	Ninguna	Tetraedro simple
Grupo de los piroxenos (augita)	(Mg,Fe)SiO ₃	Dos planos en ángulos rectos	Cadenas sencillas
Grupo de las anfíbolos (hornoblenda)	Ca ₂ (Mg,Fe) ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	Dos planos a 60° y 120°	Cadenas dobles
Micas Biotita Moscovita	K(Mg,Fe) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂ KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	Un plano	Láminas
Feldespatos Ortosa Plagioclasa	KAlSi ₃ O ₈ (Ca,Na)AlSi ₃ O ₈	Dos planos a 90°	Redes tridimensionales
Cuarzo	SiO ₂	Ninguna	Redes tridimensionales (vista expandida)

7.10.2 Reconociendo los Silicatos

Dado que los elementos silicio-oxígeno son de enlaces fuertes, los silicatos tienden a exfoliarse entre las uniones (enlace) silicio-oxígeno más que a nivel de elementos. Por ejemplo, las micas tienen una estructura laminar y, por tanto, tienden a exfoliarse en placas planas. El cuarzo, que tiene enlaces silicio-oxígeno de igual fuerza en todas direcciones, no tiene exfoliación, pero se fractura. Ver figura 10.

Figura 10 Método de reconocimiento de minerales y rocas



Sección 8

CONCEPTOS DE MINERIA

Cuando hablamos de *yacimientos minerales*, hay una serie de conceptos que son utilizados a menudo en el proyecto minero y tienen gran importancia para poder comprender la concepción del proyecto, ya sea en los aspectos geológicos-geoquímicos, o en los económicos. Los más importantes son los siguientes:

8.1 Mena

Es el mineral cuya explotación presenta interés. En general, es un término que se refiere a minerales metálicos y que designa al mineral del que se extrae el elemento químico de interés (Cu de la calcopirita, Hg del cinabrio, Sn de la casiterita, entre muchos ejemplos posibles). En este caso de los minerales metálicos, se requiere un tratamiento de la mena, que en general comprende dos etapas:

✚ Tratamiento mineralúrgico.

✚ Tratamiento metalúrgico.

8.2 Ganga

Comprende a los minerales que acompañan a la mena, pero que no presentan interés minero en el momento de la explotación. Ejemplos frecuentes en minería metálica son el cuarzo y la calcita. Conviene resaltar que minerales considerados como ganga en determinados momentos se han transformado en menas al conocerse alguna nueva aplicación para los mismos.

8.3 Reservas

Cantidad (masa o volumen) de mineral susceptible de ser explotado. Depende de un gran número de factores: ley media, ley de corte (ver más abajo), y de las condiciones técnicas, medioambientales y de mercado existentes en el momento de llevar a cabo la explotación. Se complementa con el concepto de *recurso*, que es la cantidad total de mineral existente en la zona, incluyendo el que no podrá ser explotado por su baja concentración o ley.

8.4 Ley Media

Es la concentración que presenta el elemento químico de interés económico en el yacimiento. Se expresa como tantos por ciento, o como gramos por tonelada (g/t) (equivale a partes por millón, ppm) u onzas por tonelada (oz/t).

8.5 Ley de Corte (Cut-Off)

Es la concentración mínima que debe tener un elemento en un yacimiento para ser explotable, es decir, la concentración que hace posible pagar los costes de su extracción, tratamiento y comercialización. Es un factor que depende a su vez de otros factores, que pueden no tener nada que ver con la naturaleza del yacimiento, como por ejemplo pueden ser su proximidad o lejanía a vías de transporte, avances tecnológicos en la extracción, etc.

8.6 Valor Clark

El valor Clark es la determinación de la concentración normal o típica de un mineral en la naturaleza. Se calculó el factor del enriquecimiento en comparación de la concentración normal en la corteza terrestre para minerales metálicos, generando la tabla 7 Valor Clark.

Tabla 7 Valor Clark

Elemento químico	% de la corteza (de peso)	Factor de enriquecimiento
Aluminio	8,00	3-4
Fierro	5,8	5-10
Cobre	0,0058	80-100
Níquel	0,0072	150
Zinc	0,0082	300
Uranio	0,00016	1200
Plomo	0,0001	2000
Oro	0,0000002	4000
Mercurio	0,000002	100.000

8.7 Factor de Concentración

Es el grado de enriquecimiento que tiene que presentar un elemento con respecto a su concentración normal para que resulte explotable, es decir:

$$F_c = \text{Ley de Corte} / \text{Valor Clark}$$

8.8 Todo Uno

Mezcla de ganga y mena que se extrae de la mina o cantera, con un contenido o ley determinado, que hay que saber previamente (investigación de pre-explotación) y confirmar tras la explotación.

8.9 Estéril Mineralizado (Todo uno Marginal)

Aquel producto de la explotación que tiene contenidos ligeramente por debajo de la ley de corte, y que no se suele acumular conjuntamente con el estéril, o bien para procesar mediante tratamientos de bajo coste, o en previsión de que los precios del producto suban y puedan aprovecharse como reservas.

8.10 Estéril

Corresponde a las rocas que no contienen mineral o lo contienen en cantidades muy por debajo de la ley de corte. No suele corresponder con la ganga, que como se indica antes, son los minerales acompañantes de la mena.

8.11 Subproductos

Suelen ser minerales de interés económico, pero que no son el objeto principal de la explotación, si bien aumentan el valor económico de la producción: por ejemplo, el Cd o el Hg contenido en yacimientos de sulfuros con altos contenidos en esfalerita, o el manganeso contenido en los pórfidos cupríferos.

8.12 Explotación Minera

Es el proceso o conjunto de procesos por el cual o cuales extraemos un material natural terrestre del que podemos obtener un beneficio económico. Se lleva a cabo en minas, subterráneas o a cielo abierto.

8.13 Metalurgia Extractiva

Es el proceso o conjunto de procesos, propios de la minería metálica, que permiten obtener el elemento de interés a partir del *todo-uno* de mina. Implica o puede implicar una *serie de procesos*.

8.14 Lavado o Concentración

Proceso o conjunto de procesos por el cual o cuales se separan la mena y la ganga. Pueden ser de carácter físico: por ejemplo, separación de la magnetita por medio de electroimanes; o de carácter fisicoquímico: por ejemplo, flotación de los sulfuros.

8.15 Metalurgia

Proceso o conjunto de procesos por el cual se extrae el metal correspondiente de un mineral metálico.

8.16 Pirometalurgia

La pirometalurgia es una rama de la metalurgia extractiva en la que se emplean procesos para obtención y refinamiento de metales utilizando calor, como en el caso de la fundición. Es la técnica más antigua para extracción de metales. Permite obtener metales a partir de sus menas, directamente o después de concentradas, por medio de calor. Se trata principalmente de extraer del mineral, el metal, mediante separación de la ganga del mineral y purificación de los metales. El rango de temperaturas suele superar los 950 °C.

8.17 Hidrometalurgia

La hidrometalurgia es la rama de la metalurgia que cubre la extracción y recuperación de metales usando soluciones líquidas, acuosas y orgánicas. Se basa en la concentración de soluciones en uno a varios elementos de interés metales, presentes como iones, que por reacciones reversibles y diferencias físicas de las soluciones son separados y aislados de forma específica. Como resultado se obtiene una solución rica en el ion de interés y con características propicias para la próxima etapa productiva. El punto fuerte de la hidrometalurgia radica en la gran variedad de técnicas y combinaciones que pueden ser usadas para separar metales una vez que han sido disueltos a la forma de iones en solución acuosa.

8.18 Biominería

Una primera definición del término nos permite decir que la biominería es la disciplina que estudia y aplica la utilización de microorganismos para facilitar la extracción y recuperación de metales desde yacimientos minerales conteniendo hierro y/o sulfuros, concentrados sulfurados en pilas o biorreactores. En un sentido más amplio, aplica la biotecnología a la industria minero-

metalúrgica en tres bioprocesos (Biolixiviación, Biooxidación y biomineralización) para lograr la purificación de metales, cada uno emplea microorganismos específicos con variaciones con el sustrato (minerales) y los productos (Iones, metales, polímeros, ácidos, etc.) para aumentar la productividad de la Industria y tener menor impacto al medio ambiente.

8.19 Procesos Post-Mineros

El producto minero, tal como sale de cantera o de la planta de mineralurgia, si no es de carácter metálico, a menudo necesita otros tratamientos antes de ser aprovechable: por ejemplo, el petróleo necesita el refinado; las rocas industriales necesitan corte y tratamientos superficiales de la superficie de corte; expansión térmica de perlita o vermiculita para obtener áridos ligeros, calcinación de la caliza para obtener cal, entre muchos otros.

8.20 Origen de los Yacimientos Minerales

El origen de los yacimientos minerales puede ser tan variado como lo son los procesos geológicos, y prácticamente cualquier proceso geológico puede dar origen a yacimientos minerales.

En un estudio más restrictivo, hay que considerar dos grandes grupos de yacimientos:

- Los de minerales, ya sean metálicos o no metálicos, que suelen tener su origen en fenómenos locales que afectan a una roca o conjunto de éstas.
- Los de rocas industriales, que corresponden a áreas concretas de esa roca que presentan características locales que favorecen su explotación minera (Canteras).

A grandes rasgos, los procesos geológicos que dan origen a yacimientos minerales serían los siguientes:

8.21 Procesos Ígneos

Plutonismo: produce rocas industriales (los granitos en sentido amplio), y minerales metálicos e industriales (los denominados yacimientos ortomagmáticos, producto de la acumulación de minerales en cámaras magmáticas).

8.21.1 Volcanismo

Produce rocas industriales (algunas variedades "graníticas", áridos, puzolanas), y minerales metálicos (a menudo, en conjunción con procesos sedimentarios: yacimientos de tipo "sedex" o volcanos sedimentarios).

8.21.2 Procesos Pegmatíticos

Pueden producir yacimientos de minerales metálicos (por ejemplo, casiterita) e industriales: micas, cuarzo, etc.

8.21.3 Procesos Neumatolíticos e Hidrotermales

Suelen dar origen a yacimientos de minerales metálicos muy variados, y de algunos minerales de interés industrial.

8.22 Procesos exógenos o superficiales

8.22.1 Erosión

Es el proceso por el cual las rocas de la superficie de la Tierra, en contacto con la atmósfera y la hidrosfera, se rompen en fragmentos y sufren transformaciones físicas y químicas, que dan origen a fragmentos o clastos, y a sales, fundamentalmente. Las transformaciones que implica la erosión pueden dar lugar a yacimientos, que reciben el nombre de yacimientos residuales.

El transporte de los clastos por las aguas y el viento, y de las sales por el agua, modifica la composición química tanto del área que sufre la erosión como del área a la que van a parar estos productos. Además, durante el propio transporte se producen procesos de cambio físicos y químicos, nuevas erosiones, depósito de parte de la carga transportada, etc.

8.22.2 Sedimentación Detrítica

La sedimentación detrítica da origen a rocas como las areniscas, y a minerales que podemos encontrar concentrados en éstas, en los yacimientos denominados de tipo placer: oro, casiterita, gemas etc.

8.22.3 Sedimentación Química

La sedimentación química da origen a rocas de interés industrial, como las calizas, y a minerales industriales, como el yeso o las sales, fundamentalmente.

8.22.4 La Sedimentación Orgánica

Origina las rocas y minerales energéticos, carbón e hidrocarburos sólidos (bitúmenes, asfaltos), líquidos (petróleo) y gaseosos (gas natural). También origina otras rocas y minerales de interés industrial, como las fosforitas, o las diatomitas, entre otras.

Como ya se ha mencionado, la sedimentación asociada a los fenómenos volcánicos produce yacimientos de minerales metálicos de gran importancia.

8.23 Procesos Metamórficos

El metamorfismo da origen a rocas industriales importantes, como los mármoles, o las serpentinitas, así como a minerales con aplicación industrial, como el granate. No suele dar origen a yacimientos metálicos, aunque en algunos casos produce en éstos transformaciones muy importantes.

Sección 9

PROCESOS MINERALIZADORES

Los depósitos minerales metálicos constituyen concentraciones anómalas de un elemento (u elementos) en la corteza terrestre. Ahora bien, para que un determinado elemento llegue a constituir un *yacimiento explotable económicamente* el metal debe estar concentrado muy por encima de su abundancia media en la corteza terrestre (valor clark), el grado de enriquecimiento varía para cada elemento dependiendo del valor de cada metal, esto se ilustra en la tabla 8 (Evans 1980)

Tabla 8 Concentración mínima de elementos metálicos para constituir yacimientos

Elemento	Contenido promedio de la corteza	Ley promedio mínima explotable	Factor de concentración
Al	8%	30%	3,75
Fe	5%	25%	5
Cu	50 ppm	0,4%	80
Ni	70 ppm	0,5%	71
Zn	70 ppm	4,0%	571
Mn	900 ppm	35%	389
Sn	2 ppm	0,5%	2500
Cr	100 ppm	30%	3000
Pb	10 ppm	4,0%	4000
Au	4 ppb	1 g/t	250

La tabla 9 muestra que para que se forme un yacimiento de cobre se requiere que este metal se concentre al menos 80 veces por encima del contenido normal en rocas de este elemento; en los grandes yacimientos cupríferos chilenos que se explotan con leyes de aproximadamente 1% Cu y más la razón de concentración es mayor a 200 veces que el contenido normal de Cu en roca. Además, hay metales que requieren concentraciones varios miles de veces más altas que el contenido normal en rocas corticales (Ej. el Pb) para ser de interés económico. Consecuentemente deben existir procesos naturales que permiten la concentración anómala de elementos en ciertas partes de la corteza terrestre y aquí se presenta una revisión de dichos procesos mineralizadores. Cabe señalar, que si bien existe consenso respecto a los distintos procesos que pueden originar depósitos o yacimientos minerales metálicos, el origen de un tipo específico de yacimientos es en muchos casos controvertido y distintos autores tienen diferentes interpretaciones genéticas.

Tabla 9 Clasificación simple y resumen de procesos mineralizadores

Procesos Endógenos: (Procesos internos de la tierra)

Proceso	Naturaleza del proceso	Depósitos típicos
Cristalización magmática	Precipitación de minerales de mena como constituyentes mayores o menores de rocas ígneas en forma de granos diseminados o segregaciones.	Diamantes diseminados en kimberlitas, tierras raras en carbonatitas. Pegmatitas de Li-Sn-Cs de Bikita, Simbabwe. Pegmatitas de uranio de Bancroft, Canadá y Rössling, Namibia. Granitos, basaltos, dunitas, sienitas de nefelina usados como rocas ornamentales.

Segregación magmática	<p>Precipitación de minerales de mena por cristalización fraccionada y procesos relacionados durante la diferenciación magmática.</p> <p>Inmiscibilidad de líquidos. Precipitación de sulfuros en magmas, fundidos de sulfuros – óxidos u óxidos que se acumulan debajo de silicatos o fueron inyectados en rocas de caja o, en casos raros, eruptados en la superficie.</p>	<p>Capas de cromita del Gran Dique de Zimbabwe y el Complejo Bushveld de Sudáfrica.</p> <p>Depósitos de Cu-Ni de Sudbury, Canadá y los de Pechenga, R.F. y Yilgarn Block de Australia occidental. Depósitos de titanio de Allard Lake, Quebec, Canadá.</p>
Hidrotermal	<p>Deposición desde soluciones acuosas calientes, las cuales pueden tener origen magmático, metamórfico, meteórico, marino o de formación (connatas).</p>	<p>Pórfidos cupríferos chilenos: Chuquicamata, El Teniente, La Escondida, etc. Vetas auríferas de El Indio; Stockwork de molibdenita de Climax. EEUU; Chimeneas de brecha cupríferas del distrito Cabeza de Vaca, Copiapó, etc.</p>
Metamórfico	<p>Metamorfismo regional y de contacto produciendo minerales industriales.</p> <p>Depósitos pirometasomáticos (skarn) formados por reemplazo de rocas de caja adyacentes a una intrusión.</p> <p>Concentración de elementos de mena por procesos metamórficos iniciales o subsecuentes.</p>	<p>Depósitos de andalusita de Transvaal, Sudáfrica; Depósitos de granate de N.Y., EEUU.</p> <p>Depósitos de Cu de MacKay, EEUU y Craigmont, Canadá. Distrito cuprífero de San Antonio, Norte de La Serena. Cuerpos de magnetita de Iron Springs, EEUU; depósitos de Talco de Luzenac, Francia.</p> <p>Algunas vetas de oro y depósitos de Ni diseminados en rocas ultramáficas.</p>

Procesos Exógenos: (Procesos superficiales)

Proceso	Naturaleza del proceso	Depósitos típicos
Exhalativos superficiales; volcanogénicos	<p>Exhalación de soluciones hidrotermales en la superficie, usualmente en condiciones submarinas y originando cuerpos estratiformes de sulfuros metálicos.</p>	<p>Depósitos de metales base de Meggen, Alemania; Sullivan, Canadá; Mount Isa, Australia; Río Tinto, España; depósitos de tipo Kuroko, Japón; Mina La Plata, Ecuador; Depósitos de fuentes termales submarinas de los océanos modernos; Mercurio de Almaden, España; Depósitos de solfataras (caolín y alunita), Sicilia; Azufreras en volcanes del Norte Grande de Chile.</p>
Sedimentarios	<p>Alóctonos (clásticos): concentración de minerales pesados y durables en sedimentos clásticos formando placeres.</p> <p>Autóctonos: precipitación de minerales en ambientes sedimentarios adecuados, con o sin la intervención de organismos biológicos.</p>	<p>Arenas de rutilo-circón de New South Wales, Australia y Trail Ridge, EEUU; Placeres de Sn de Malasia y Brasil; Placeres de Au de Yukon, Canadá y de Marga-Marga, V Región, Chile; Arenas y gravas de uso industrial.</p> <p>Formaciones de hierro bandeado (BIF) de los Escudos Precámbricos, Ej. Itabiritas de Brasil. Depósitos de Mn sedimentario de la III y IV Regiones de Chile; Depósitos de Cobre del Kupferschiefer de Europa; depósitos de fosfatos de Florida, EEUU.</p>
Meteorización	<p>Residuales: lixiviación de los elementos solubles de las rocas dejando concentraciones de elementos insolubles en el material restante.</p> <p>Supergenos: lixiviación y oxidación de elementos valiosos de la parte superior de depósitos minerales y su precipitación en profundidad con concentraciones más altas.</p> <p>Exóticos: lixiviación de elementos metálicos de depósitos primarios y transporte en solución en napas de aguas subterráneas y re-depositación dentro de gravas y rocas a cierta distancia del depósito madre.</p>	<p>Lateritas de Ni de Nueva Caledonia; Bauxitas de Hungría, Venezuela, Guyana, Jamaica y Arkansas, EEUU; Depósitos de caolín de Nigeria.</p> <p>Parte superior de la mayoría de los pórfidos cupríferos chilenos (zonas de óxidos y de sulfuros supérgenos); zona enriquecidas de vetas de plata y oro.</p> <p>Depósitos de Cu: Las Cascadas, I Región; Chuqui Sur en la II Región; Damiana vecino a mina El Salvador en la III Región.</p>

Sección 10

MINERALES CUPRIFEROS

El origen de los yacimientos de cobre se asocia al magma que asciende introduciéndose en las capas superiores de la corteza, en forma de intrusivos. Este ascenso se relaciona a los diferentes fenómenos que han ocurrido en la corteza desde millones de años atrás, como el fluido de aguas termales y el movimiento de la placa oceánica –Nazca- bajo la continental –Sudamericana-. A partir de estos procesos geológicos se irán formando dos tipos de material mineralizado para los yacimientos de cobre: los sulfuros y los óxidos.

Inicialmente los minerales se encuentran como sulfuros en las capas profundas de la corteza, al ascender, y debido a la acción del oxígeno atmosférico, se produce una oxidación de estas especies, formando una capa de mineral oxidado, lo que explica que este mineral se encuentre a un nivel más superficial que los sulfurados.

Bajo la capa de mineral oxidado se encuentra una zona llamada secundaria o supérgeno, donde los minerales sulfurados han sido alterados por efecto de la circulación de aguas superficiales, lo que produce la disolución de algunos minerales, generando a la vez el enriquecimiento de sulfuros y con ello el aumento del contenido de cobre. La zona más profunda del yacimiento donde se preservan las características de su formación original, se ubica por debajo de la zona secundaria y se llama zona primaria de sulfuros o *hipógena*. Los minerales asociados a estas zonas se llaman minerales secundarios y primarios respectivamente. Ver tabla 10.

Tabla 10 Minerales secundarios y primarios 

Zona Mineralizada	Especie Mineralógica	Composición Más Frecuente Para Esta Especie	Cobre (%)
Zona oxidada secundaria	Cobre nativo	Cu ⁰	100
	Malaquita	CuCO ₃ * Cu(OH) ₂ ó Cu ₂ CO ₃ (OH) ₂	57,5
	Azurita	2CuCO ₃ * Cu(OH) ₂ ó Cu ₃ (CO ₃) ₂ (OH) ₂	55,3
	Chalcantita	CuSO ₄ * 5H ₂ O	25,5
	Brochantita	CuSO ₄ * 3Cu(OH) ₂ ó Cu ₂ SO ₄ (OH) ₆	56,2
	Antlerita	CuSO ₄ * 2Cu(OH) ₂ ó Cu ₃ SO ₄ (OH) ₄	53,7
	Atacamita	3CuO * CuCl ₂ * 3H ₂ O ó Cu ₂ (OH) ₃ Cl	59,5
	Crisocola	CuO * SiO ₂ * H ₂ O ó CuSiO ₃ *H ₂ O	36,2
	Dioptesa	CuSiO ₂ (OH) ₂	40,3
	Neotocita	(Cu ₁ -Fe ₁ -Mn _x)SiO ₃	variable
	Cuprita	Cu ₂ O	88,8
	Tenorita	CuO	79,9
	Pitch / Limonita	(Fe ₁ -Cu ₁)O ₂	variable
	Delafosita	FeCuO ₂	42,0
	Copper Wad	CuMnO ₂ Fe	variable
Copper Pitch	CuMn ₈ FeSiO ₂	variable	
Zona de enriquecimiento secundario (o supérgeno)	Calcosina	Cu ₂ S	79,9
	Digenita	Cu ₉ S ₅	78,1
	Djurleita	Cu _{1,95-2} S	variable
	Covelina	CuS	66,5
	Cobre nativo	Cu ⁰	100
Zona primaria (o hipógena)	Calcopirita	CuFeS ₂	34,6
	Bornita	Cu ₅ FeS ₄	63,3
	Enargita	Cu ₃ AsS ₄	48,4
	Tenantita	Cu ₁₂ As ₄ S ₁₃	51,6
	Tetrahedrita	Cu ₁₂ Sb ₄ S ₁₃	45,8

De este modo, el cobre se encuentra asociado mayoritariamente a minerales sulfurados, y en una menor parte a minerales oxidados. Para su extracción desde los minerales que lo contienen y, debido a que los minerales sulfurados y oxidados tienen características distintas, se requieren procesos productivos diferentes.

10.1 Procesos Productivos del Cobre

De acuerdo con las características químicas de los minerales de cobre, las empresas mineras desarrollan tecnologías y procesos diferenciados para la recuperación de cobre a partir de minerales oxidados y sulfurados. Los procesos productivos son variados, siendo los más utilizados los siguientes:

- ▣ Proceso productivo de óxidos de cobre (Producto Cátodos de Cu). Figura 11.
- ▣ Proceso productivo de sulfuros de cobre (Producto Concentrado de Cu). Figura 12.
- ▣ Proceso productivo fundición concentrado de cobre (Producto Ánodos de Cu). Figura 13
- ▣ Proceso productivo electrorefinación de ánodos de cobre (Producto Cátodos de Cu). Figura 14

Figura 11 Proceso Productivo de Óxidos de Cu (Cátodos)

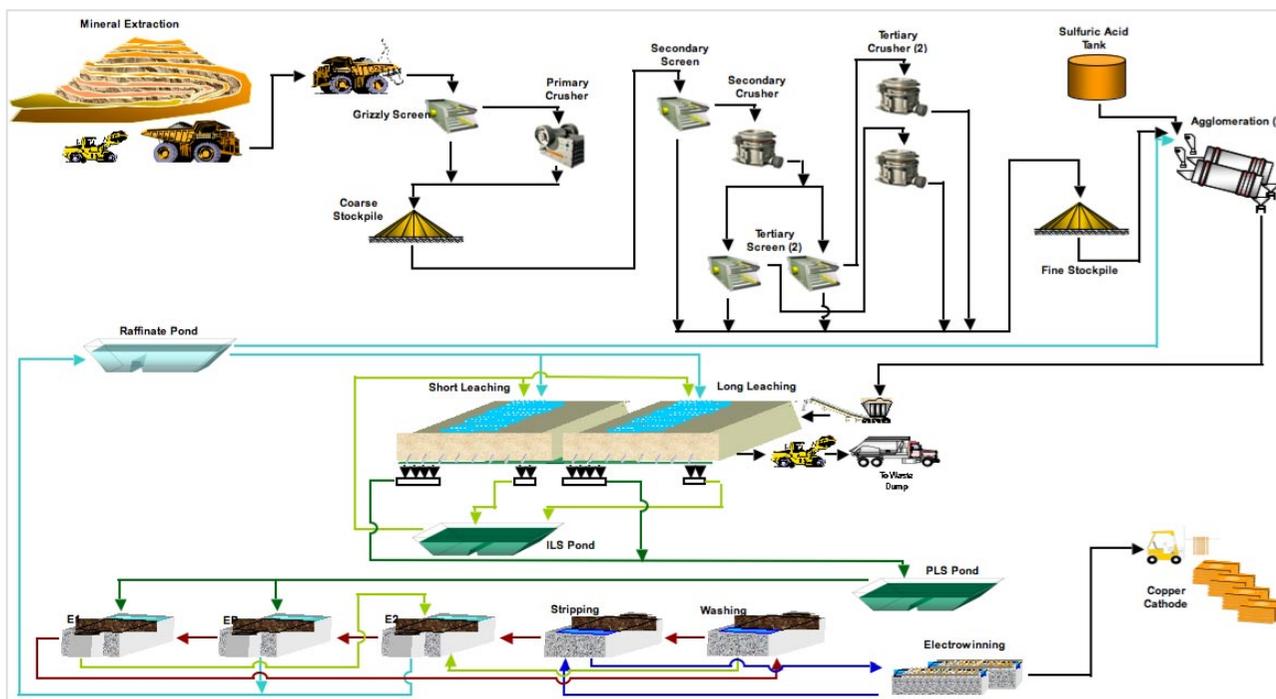


Figura 12 Proceso Productivo de Sulfuros de Cu (Concentrado)

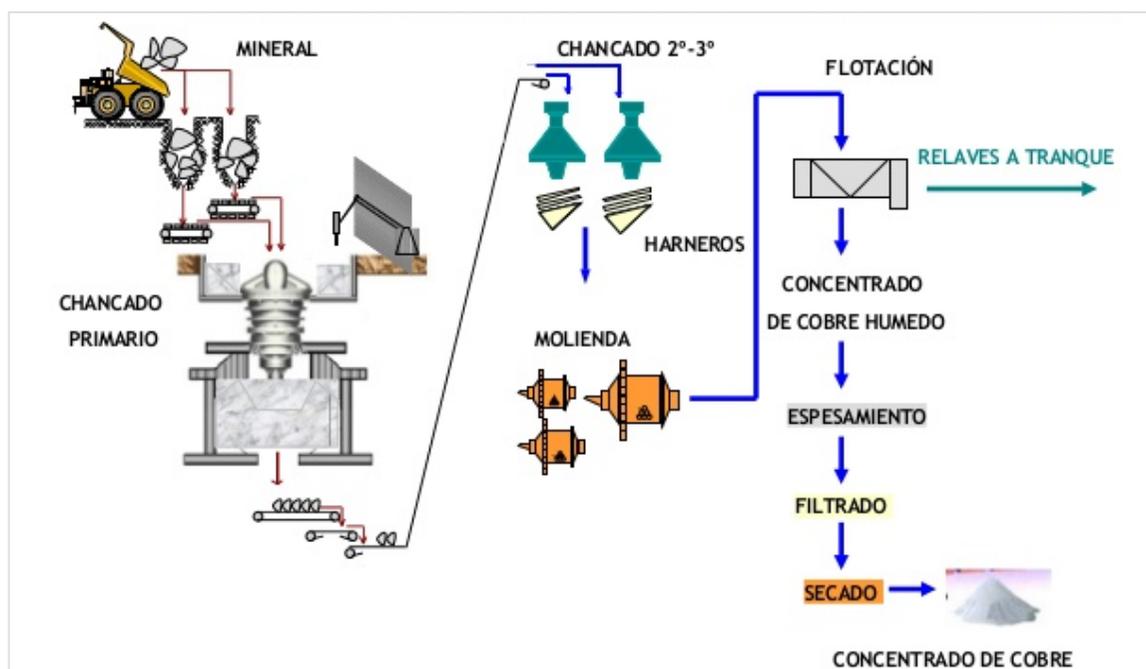


Figura 13 Proceso Productivo Fundición de Concentrado de Cu (Ánodos)

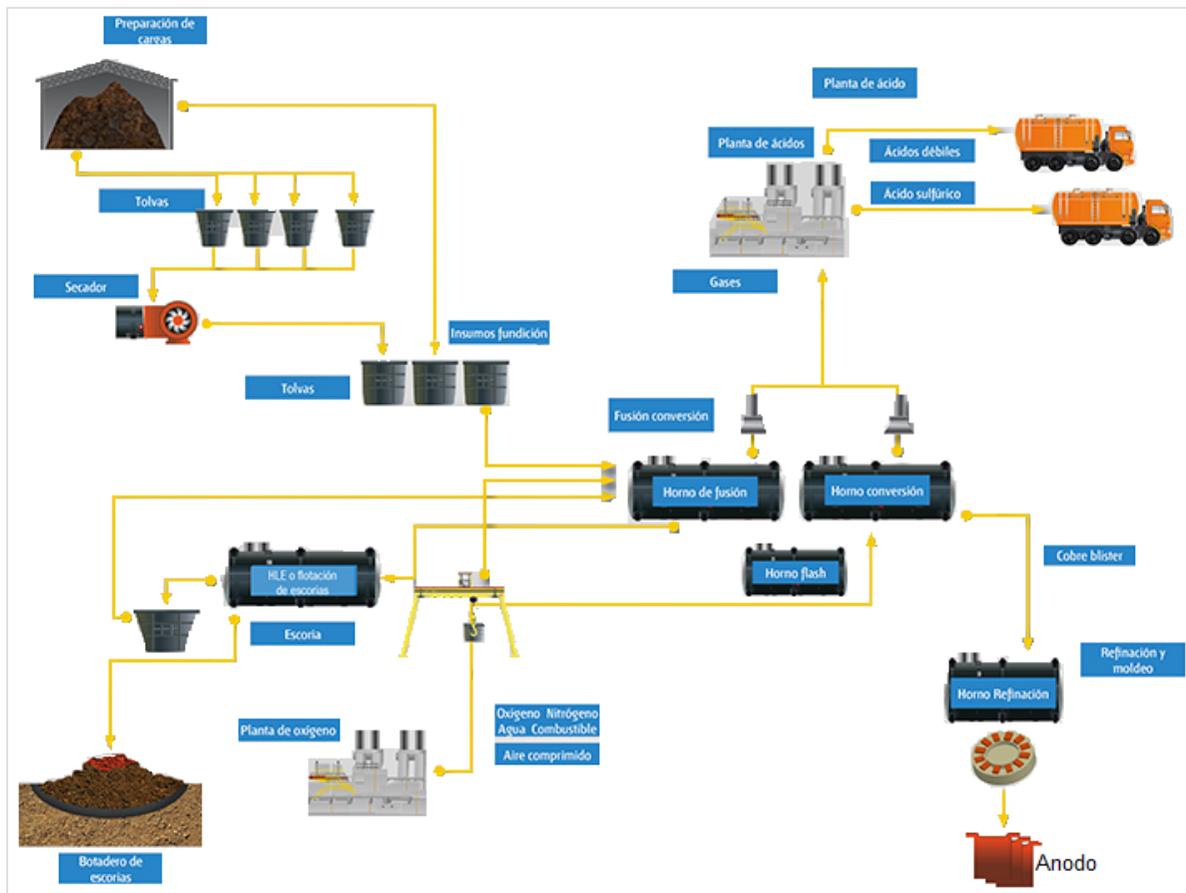
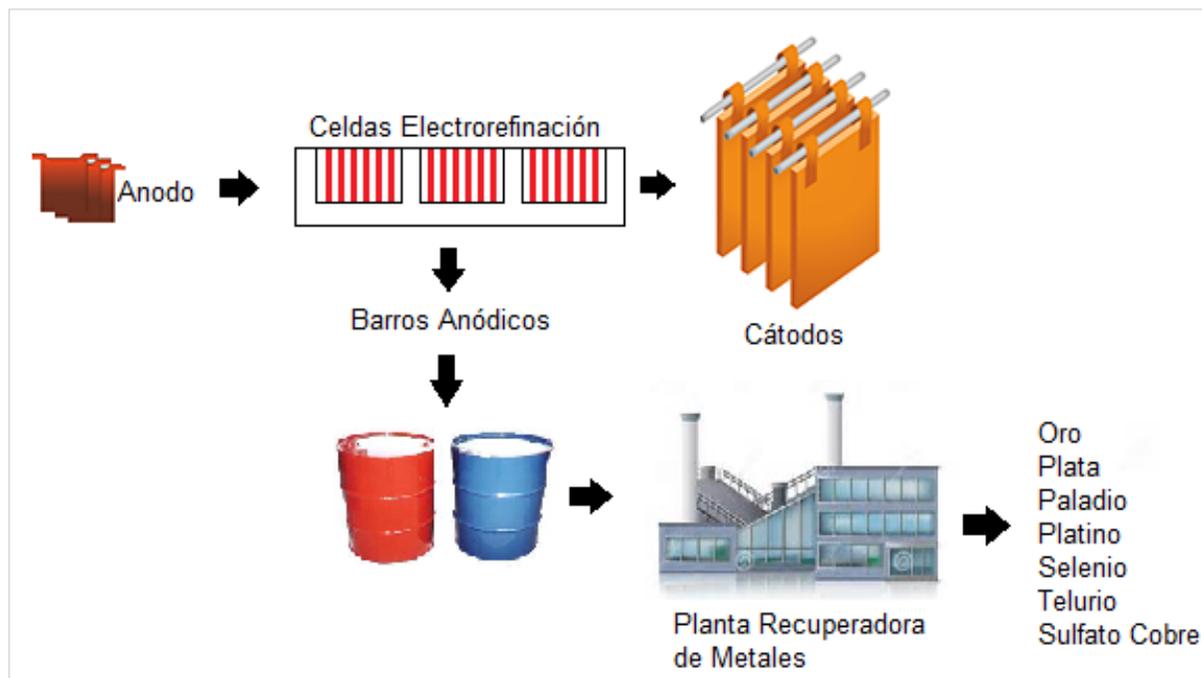


Figura 14 Proceso Productivo Electrorefinación de Ánodos de Cu (Cátodos)



Sección 11

PROCESO DE EXTRACCION

El objetivo del proceso de extracción es sacar la porción mineralizada desde el macizo rocoso de la mina. Ver figura 15.

El proceso se encuentra determinado por las formas de explotación del yacimiento:

✚ Explotación a rajo abierto.

✚ Explotación subterránea.

La elección del método de explotación de un yacimiento depende principalmente de una decisión económica y ambiental, considerando inversiones, costos y beneficios del proyecto a explotar, los cuales están directamente relacionados con los siguientes factores propios del yacimiento:

- Tipo de mineral
- Ubicación
- Tamaño
- Forma
- Topografía superficial
- Profundidad del cuerpo mineral
- Complejidad, calidad y distribución de la mineralización
- Características del macizo rocoso
- Calidad de la información de reservas
- Inversiones asociadas

También se deben considerar las políticas e intereses corporativos de la compañía que realizara la explotación.

Figura 15 Faena de extracción de mineral



11.1 Explotación a Rajo Abierto

La explotación de un yacimiento por el método de rajo abierto requiere de datos iniciales, provenientes de campañas previas de exploración o sondajes, los cuales son procesados de manera de obtener un modelo de bloques, que consistirá en una matriz tridimensional de bloques de dimensiones definidas por su largo y ancho, por lo general iguales, y alto, que corresponde a la altura de los bancos del futuro rajo. Dicha altura será definida principalmente en función de las características del yacimiento y la elección de los equipos de explotación. Ver figura 16.

Figura 16 Explotación a rajo abierto



Cada uno de estos bloques podrá guardar información relevante de datos como:

- 📊 Tipo de roca (geomecánica, estructura y litología)
- 📊 Leyes (del mineral principal y de sus subproductos)
- 📊 Datos económicos (costo extracción, de proceso, de venta y beneficio)

Luego se pasa a la etapa de diseño en la que se obtendrán los límites económicos de la explotación del llamado *pit final* (rajo final), además en esta etapa se pueden agregar los límites de las distintas etapas de la explotación, llamadas fases, las cuales definen la secuencia de explotación del yacimiento.

En la operación de una mina, intervienen varios equipos de trabajo, cuyas acciones deben ser coordinadas para lograr una alta eficiencia y seguridad en la faena.

- Geología: Entrega la información de las características físicas, químicas y mineralógicas del material a extraer.
- Planificación: Elabora el plan minero, considerando todas las variables (geología, operación, mantenimiento, costos, plazos, etc.) que intervienen en él.
- Operaciones: Realiza el movimiento de material en la mina (perforación, tronadura, carguío y transporte).
- Mantenimiento: Debe velar por la disponibilidad electromecánica de todos los equipos (perforadoras, palas, camiones, equipos auxiliares).
- Administración: Proporciona el apoyo en manejo de recursos humanos, adquisiciones, contratos, etc.
- Otros: Participan también asesores en materias de seguridad, medioambiente y calidad, para lograr el cumplimiento de las normas y orientaciones correspondientes a un trabajo seguro, limpio y de calidad.

El material que contiene una ley inferior a la ley de corte, es considerado estéril si no contiene metales y considerado mineral de baja ley, si tiene algo de metales recuperables a través de otro procedimiento.

El producto principal de este proceso es la entrega de mineral para ser procesado en la planta de beneficio.

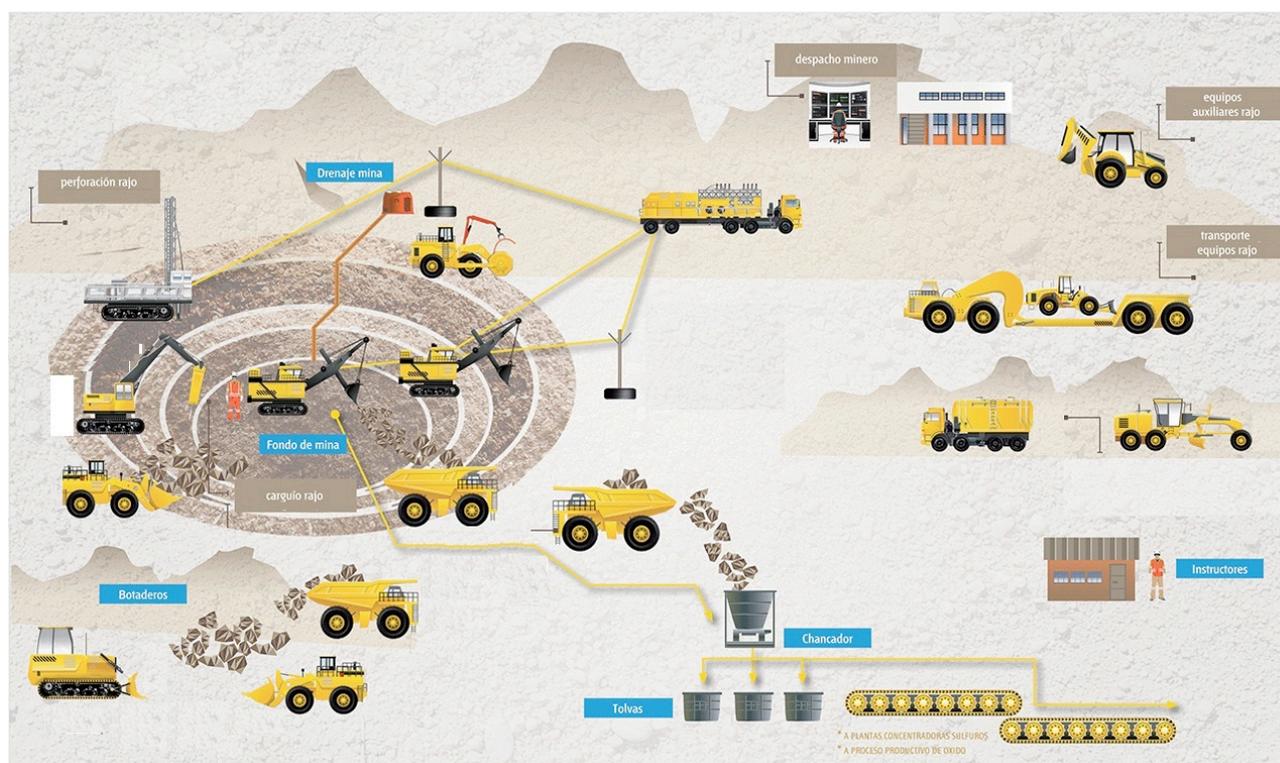
11.1.1 Construcción del Rajo

Un rajo se construye con un determinado ángulo de talud, bancos y bermas en las que se realiza el transporte y el carguío de los camiones.

Este tipo de extracción se utiliza cuando los yacimientos presentan una forma regular y están ubicados en la superficie o cerca de ésta, de manera que el material estéril que lo cubre pueda ser retirado a un costo tal que pueda ser absorbido por la explotación de la porción mineralizada.

Este sistema de extracción permite utilizar equipos de grandes dimensiones, ya que el espacio no está restringido como en el caso de las minas subterráneas, aunque su operación puede estar limitada por el clima, como es el caso de las minas ubicadas en la alta cordillera o la zona central del país. Ver figura 17.

Figura 17 Operaciones a rajo abierto



Las bermas deben tener un ancho tal que permita que se crucen dos camiones y el movimiento de las máquinas de carguío. El rajo se va construyendo en avances sucesivos, lateralmente y en profundidad. A medida que se va profundizando en la mina, se requiere ir ensanchándola para mantener la estabilidad de sus paredes.

11.1.2 Botaderos

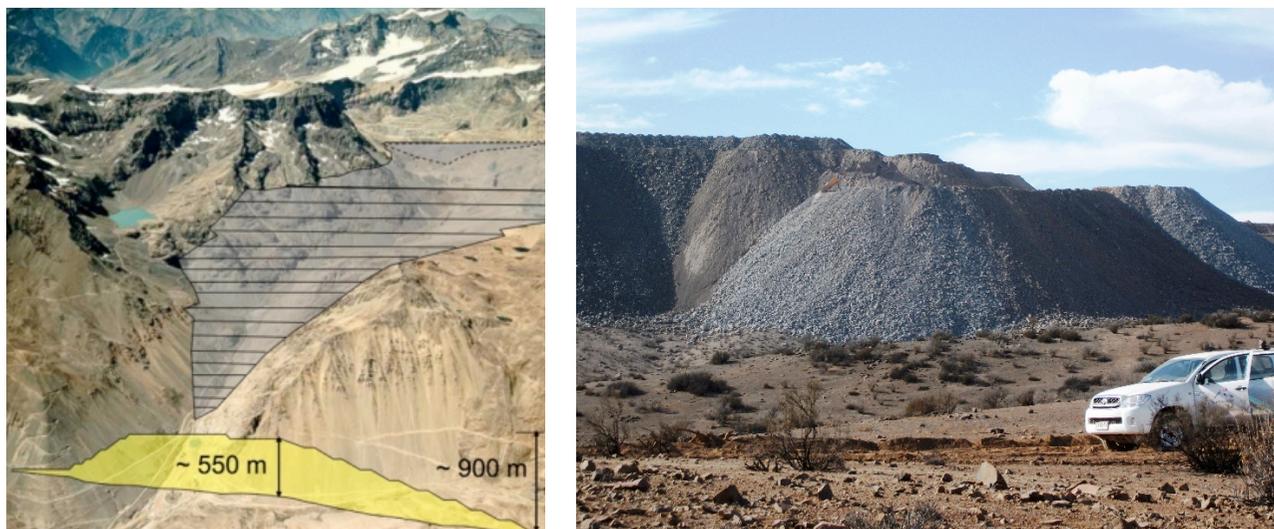
El material estéril extraído de la mina, debe ser dispuesto en lugares específicos y adecuados para este fin, por lo que tendremos que definir las características de estos lugares. Un buen lugar para un botadero lo constituirá el sector que cumpla de mejor manera todas las exigencias para su habilitación, tanto técnicas como económicas, de las cuales podemos mencionar las siguientes:

- La distancia media de transporte entre el punto de carga de los camiones en la mina y el lugar de descarga del material estéril (o botadero) debe ser la mínima posible, por una razón económica, ya que el rendimiento de los equipos de transporte es afectado por esta distancia.
- El lugar donde se depositarán los escombros o estéril debe ser geológica y geomecánicamente apto para ello, ya que la gran cantidad de material a depositar puede generar siniestros geomecánicos en el sector mismo (hundimiento) o en sectores aledaños (distribución de esfuerzos).
- El sector elegido debe carecer de importancia económica en el presente y en un futuro, es decir hay que comprobar la inexistencia de recursos utilizables en el sector (por ej. un yacimiento con bajo interés económico hoy, pero que puede ser interesante a futuro, o una reserva importante de agua, etc.).
- La utilización del sector elegido no debe significar un daño ambiental real o potencial, lo cual se garantizaría con un adecuado estudio al respecto.

Los botaderos se pueden realizar en: Ver figura 18.

- Botaderos en Laderas
- Botadero en Quebradas
- Botadero en Pilas o Tortas

Figura 18 Botadero en quebrada y en pilas



7.2 Operaciones Unitarias Del Procedo De Extracción

El proceso de extracción del mineral, está constituido por las siguientes operaciones unitarias:

- Perforación.
- Tronadura.
- Carguío.
- Transporte.
- Servicios Mina.

11.2.1 Perforación

El objetivo del proceso de perforación es hacer una cavidad definida dentro de la roca que será removida, para luego colocar el explosivo que más tarde será detonado. Ver figura 19.

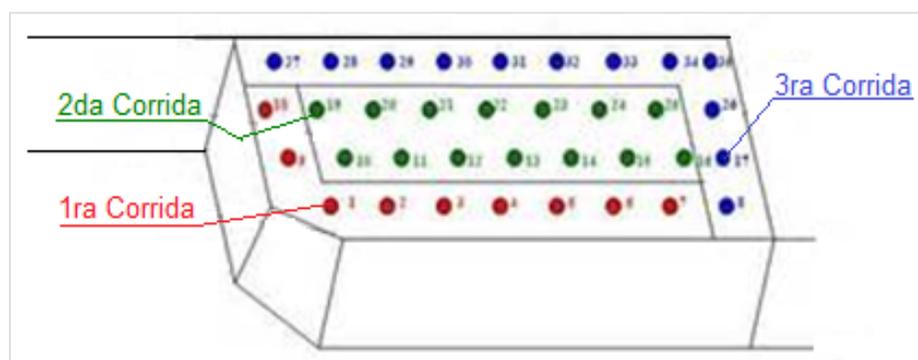
Una vez que se han definido los puntos a perforar (malla de tiro) se perforan las rocas según especificaciones de operación, malla, profundidad, diámetro e inclinación. El tipo de perforadora a utilizar tiene relación con las características físicas, geométricas y operacionales de la mina.

Las actividades a realizar son:

- Programación de la malla de tiro.
- Selección de los aceros a utilizar.
- Preparación de la zona de trabajo, topografía y limpieza.
- Posicionamiento de equipos en cada tiro.
- Perforación de cada tiro.
- Muestreo de detritus.
- Verificación de la calidad y cantidad de tiros perforados.
- Retiro del equipo del sector.

El costo de perforación que se obtenga en una operación en particular, dependerá de varios factores, entre ellos: Dureza de la roca, presencia de estructuras geológicas, calidad de los aceros, mantenimiento de los equipos y calidad de los operadores. De acuerdo a la experiencia práctica podemos indicar que los costos de perforación (incluyendo los de operaciones y mantenimiento), fluctúan entre un 10% y un 15% del costo global de la operación de la mina.

Figura 19 Operación de perforación en banco



11.2.1.1 Tronadura

El objetivo del proceso de tronadura es fragmentar la roca de tal manera que quede de un tamaño suficientemente pequeño, en general menor a 1 metro de diámetro, para ser cargada y transportada por los camiones mineros a botadero o a chancado primario, en donde se inicia el proceso de conminución. En esta operación se realiza la siguiente secuencia de actividades:

- Preparación de la zona de trabajo.
- Posicionamiento de camiones fabrica.

- Introducción del explosivo y los accesorios necesarios.
- Control de calidad del explosivo.
- Entacado de pozos.
- Amarre según secuencia especificada.
- Revisiones de seguridad en el sector.
- Aviso de polvorazo.
- Polvorazo o tronadura.
- Ventilación o limpieza del sector.
- Revisión de seguridad por tiros quedados o derrumbes.
- Quema de tiros quedados.
- Reducción secundaria en caso de ser necesaria.

Fundamentalmente lo que se hace es introducir el explosivo en los pozos de perforación, con sus respectivos accesorios. Se establece una secuencia de detonaciones entre los distintos tiros de la tronadura, de manera que la roca sea fragmentada en etapas partiendo de la cara expuesta del banco hacia adentro, con diferencias de tiempo de fracciones de segundo entre cada detonación.

La granulometría que se obtendrá depende de las características de la roca misma y de la energía que se le aplique, por lo que, si se desea una granulometría fina, hay que utilizar mayor cantidad de explosivos o aumentar la potencia de la tronadura. La proyección del material es también un tema muy importante, ya que lo deseable es que el material suelto quede en un área no muy grande, dispuesto espacialmente de modo que el equipo que se encargue de su manejo posterior pueda hacerlo en condiciones acordes a su diseño de operación. Generalmente el material tronado queda de las siguientes formas: Ver figura 20 y 21.

Figura 20 Disposición del material tronado en banco.

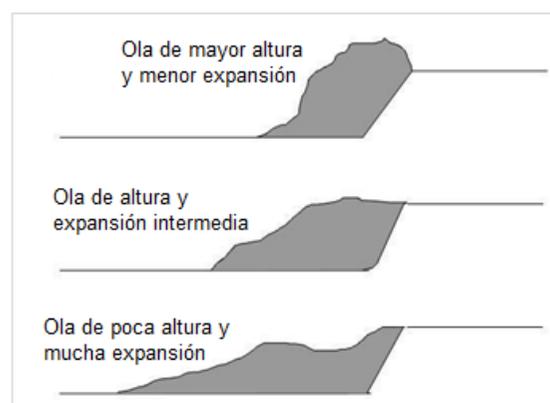


Figura 21 Material tronado en banco



La operación de tronadura se lleva entre un 8% a un 14% del costo global de operación de la mina.

11.2.1.2 Carguío

El objetivo de este proceso es cargar el material tronado en camiones de gran tonelaje mediante palas eléctricas, hidráulicas o cargadores frontales. Estos equipos llenan los camiones en una operación continuada desde que queda disponible el banco después de la tronadura. Ver figura 22.

Figura 22 Pala eléctrica de carguío



Las palas eléctricas tienen capacidad para cargar hasta 100 toneladas de material de una sola vez, por lo que realizan habitualmente *tres pases* para cargar un camión. Los cargadores tienen menor capacidad y en minas de gran tamaño solo son utilizados para trabajos especiales. Una pala grande necesita un frente de carguío mínimo de 65 metros de ancho y carga camiones que se van colocando alternadamente a cada lado de ella.

Se tiene la siguiente secuencia de actividades:

- Preparación de la zona de trabajo.
- Posicionamiento de equipos.
- Retirar el material tronado desde el frente de trabajo.
- Traspaso del material al equipo de transporte dispuesto para el traslado.

El costo de operación de este proceso varía entre el 10% y el 20% del costo mina, razón por lo que se debe garantizar un ambiente de operación apto para maximizar el rendimiento de estos equipos.

11.2.1.3 Transporte

Para el transporte del material, en los grandes yacimientos se utilizan actualmente camiones de gran tonelaje, por ejemplo 240, 300 o 340 toneladas. Estos camiones transportan el mineral desde el frente de carguío a sus diferentes destinos: Ver figura 23.

- El mineral con mejor ley a chancador primario
- El material estéril a botadero.
- El mineral de baja ley a botadero especial.

Figura 23 Camión de alto tonelaje para transporte



Se tiene la siguiente secuencia de actividades:

- Transporte del material a su lugar de destino a planta, a acopio o botaderos.
- Descarga del material.
- Retorno del equipo de transporte al punto de carguío si es necesario.

Esta es una de las operaciones de mayor costo debido a que es el proceso con mayor cantidad de equipos y menor rendimiento productivo por equipo. El costo de operación de este proceso varía entre el 35% y el 45% del costo mina, razón por lo que se debe garantizar un ambiente de operación apto para maximizar el rendimiento de estos equipos.

11.3 Sistemas de Explotación

El sistema de explotación será constituido por los diferentes equipos de extracción, carga y transporte y, según la continuidad del ciclo básico, se diferencian los siguientes sistemas:

11.3.1 Sistema Totalmente Discontinuo

La operación de extracción, con o sin tronadura, se lleva a cabo con equipos de operación local y el transporte se efectúa con camiones mineros CAEX. Es uno de los sistemas más utilizados en minería debido a su flexibilidad y versatilidad. En este caso el chancado primario esta fuera del rajo.

11.3.2 Sistema Mixto con Chancador Primario (Estacionario) Dentro de la Explotación

Una parte de la operación se realiza con medios semejantes al sistema anterior, hasta un chancador primario dentro de la explotación con lo que se consigue una granulometría adecuada para efectuar desde ese punto el transporte continuo por medio de bandas transportadoras. El chancador primario es estacionario y siempre tendrá la misma ubicación. En Chile existen varios rajos con este sistema de explotación.

11.3.3 Sistema Mixto Con Chancador Primario (Semi Móvil) Dentro de la Explotación

Conceptualmente es igual al sistema anterior, pero con mayor flexibilidad, ya que el chancador primario puede cambiarse de ubicación cada cierto tiempo de acuerdo a la planificación minera. En Chile se han realizado varios proyectos mineros de traslados de chancadores primarios, dentro del rajo de explotación. Operaciones mineras en Chile como Escondida y Collahuasi han realizado este tipo de proyectos en más de una oportunidad, siendo pioneras en este tipo de proyectos donde se han utilizado novedosos equipos de transporte. Ver figura 24 y 25.

Figura 24 Traslado de chancador primario semi móvil



Figura 25 Chancador móvil



11.4 Servicios Mina

El objetivo de estas operaciones es mantener la faena en condiciones operativas, garantizando que las operaciones unitarias se realicen con el mejor rendimiento y el mínimo riesgo. Ver figura 26.

Las principales actividades de los servicios mina son:

- Preparación de sellos para carguío.
- Construcción, habilitación y mantención de caminos y accesos.
- Mantención de Botaderos.
- Limpieza en sectores específicos.
- Manejo de materiales no mineros.
- Apoyo directo a operaciones de carguío y transporte.

Esta operación tiene costos que fluctúan entre un 12% y un 20% del costo global de la operación de la mina.

Figura 26 Equipos mantención de caminos mineros



11.5 Explotación Mina Subterránea

Un yacimiento se explota en forma subterránea cuando está cubierto con cantidades de material estéril que hacen inviable económicamente su extracción a rajo abierto. Su método se basa en construir túneles o labores en la roca, para acceder a las zonas mineralizadas y dar lugar a la formación de una red de niveles de hundimiento, producción y transporte. Las labores subterráneas pueden ser horizontales, verticales, inclinadas, conformando túneles, galerías, rampas, piques o chimeneas, ubicándose en los diferentes niveles que permiten fragmentar, cargar y transportar el mineral desde el interior de la mina hasta la planta, generalmente situada en la superficie.

Los túneles y piques subterráneos se construyen con explosivos puestos en perforaciones dispuestas de acuerdo a la forma que se quiere dar a la roca (túneles, piques o rampas, etc.). La tronadura se va realizando en secuencia, partiendo desde el centro hacia los bordes.

Una vez realizada la tronadura, se ventila, despeja y se extrae el material fragmentado. Para evitar derrumbes, se estabilizan las paredes y el techo del túnel, pique o rampa, utilizando una fortificación adecuada para cada tipo de terreno, la cual depende de las características de este y del uso que se le va a dar.

En una mina subterránea se tienen diferentes áreas que permiten el trabajo de extracción de mineral, actividades de apoyo y otras que cubren necesidades del personal durante la jornada de trabajo, las que se describen a continuación.

11.5.1 Producción

Esta área incluye los niveles de transporte, producción, hundimiento y ventilación, piques de traspaso y carguío de mineral.

11.5.2 Servicios e infraestructura

Incluye accesos principales, piques de transporte de personal, talleres de mantención, redes de agua y electricidad, drenajes, redes de incendios, oficinas, comedores, baños, policlínicos, bodegas, etc.

Existe una variedad de métodos de explotación subterránea, pero el más utilizado en la extracción de grandes yacimientos es el conocido como *hundimiento por bloques* (block caving). Este consiste en provocar el desprendimiento de una porción del macizo rocoso. Esto se hace socavando la base de una columna de roca mineralizada mediante el uso de explosivos, de manera que el resto de la columna se fragmente paulatinamente por efecto de la gravedad y se desplome hacia los puntos de extracción.

En general, en una mina subterránea de gran tamaño los bloques tienen dimensiones que fluctúan entre 100 y 200 metros de altura y un área basal de aproximadamente 60x90 metros, o sea, entre 1.000.000 y 2.500.000 toneladas por bloque. Cuando el hundimiento se produce en forma secuencial, por tajadas menores del bloque, se habla del método de *hundimiento por paneles* (panel caving).

11.5.3 Construcción de una Mina Subterránea

A diferencia de la explotación a rajo abierto, una mina subterránea extrae el mineral desde abajo hacia arriba, utilizando lo más posible la fuerza de gravedad para producir la fragmentación y el desplazamiento del mineral hacia los puntos de carguío. La otra diferencia importante es que en la mina subterránea no se extrae roca estéril, sino que debido a los altos costos que implica la construcción de túneles, la explotación se concentra preferentemente en las zonas de mineral.

En la minería subterránea existen diversos tipos de excavaciones, las cuales se realizan con distintos fines dependiendo de la función requerida. Las principales excavaciones y estructuras que se utilizan en la explotación subterránea son las siguientes:

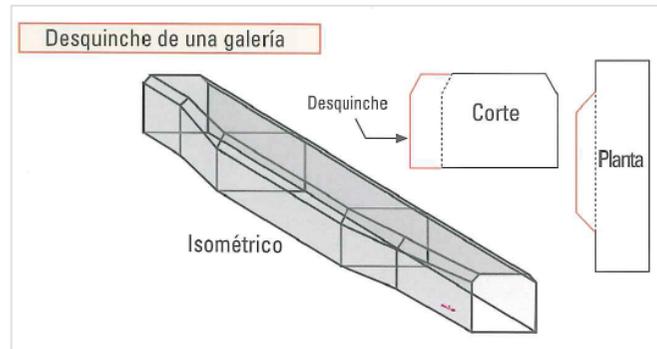
- Túnel



- Galería



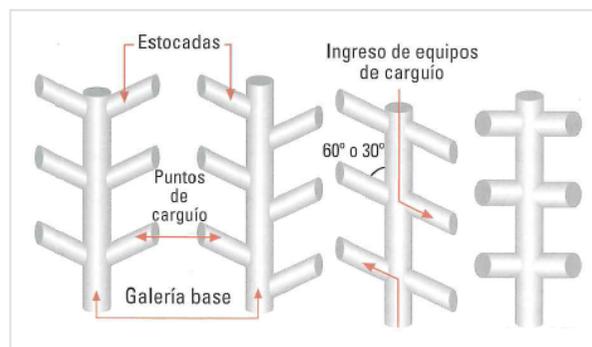
- Desquinche



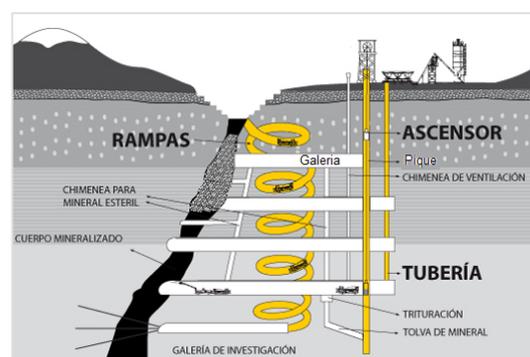
- Estocada



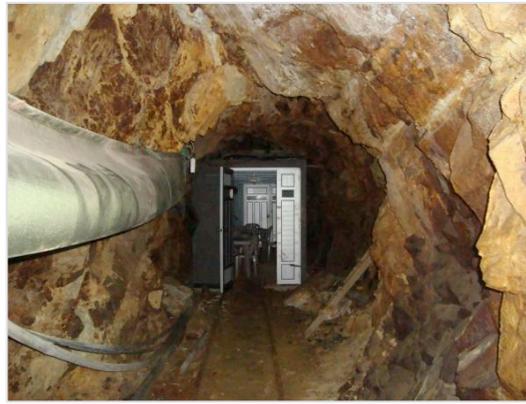
- Estocadas de Carguío



- Rampas



- Refugio



- Pique



- Chimenea



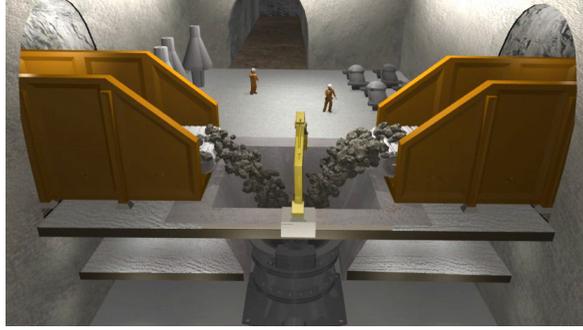
- Estación de Vaciado



- Parrilla y reducción secundaria



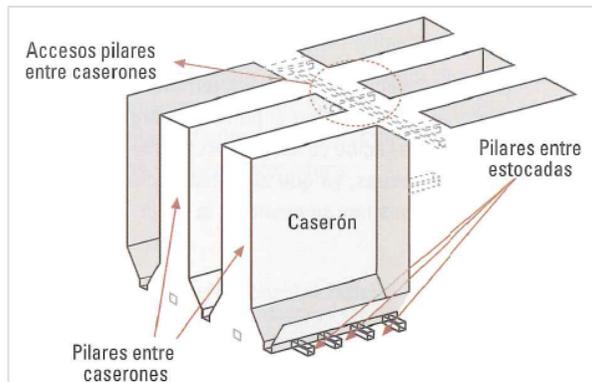
- Reducción Primaria



- Buzón



- Pilares y Caserones



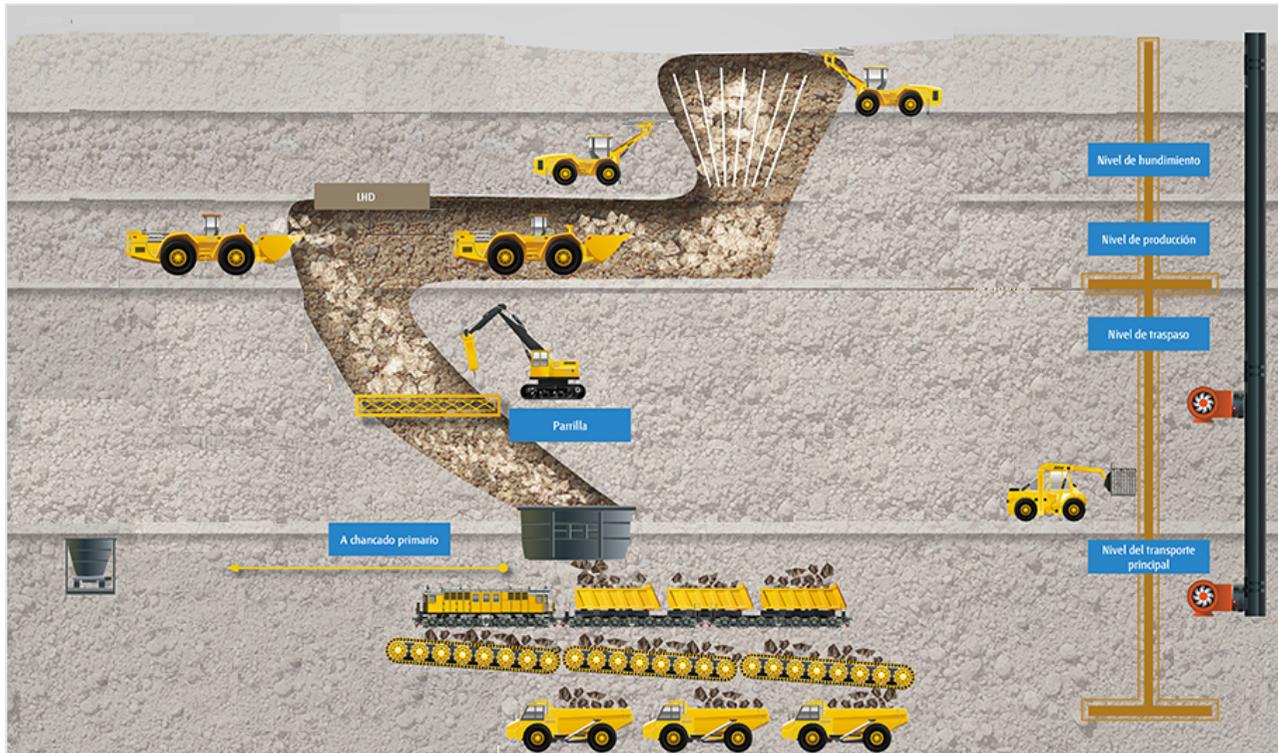
- Túnel Correa



11.5.4 Niveles

Es una galería horizontal caracterizada por una cota determinada por un nivel de referencia. Existen diversos tipos de niveles y subniveles determinados por su función. Ver figura 27.

Figura 27 Niveles en mina subterránea



Nivel de hundimiento: Corresponde al nivel en que se produce la socavación de la columna de mineral, que se logra haciendo una red de perforaciones hacia arriba que se disponen formando un abanico. En estas perforaciones se introducen explosivos, cuya tronadura produce la fragmentación total de la base del bloque hasta una cierta altura. Una vez retirado el material quebrado, el resto del macizo queda colgando hasta que se comienza a disgregar por efecto gravitacional y produce el hundimiento paulatino del total de la columna.

Nivel de producción: Corresponde al nivel de galerías desde las cuales es captado el mineral quebrado y traspasado hacia el siguiente nivel. Se sitúa entre 8 y 18 m por debajo del anterior, con el cual está comunicado mediante piques que captan, en forma de embudos, el mineral desde el nivel de hundimiento. En el nivel de producción, el mineral es traspasado hacia el nivel de transporte situado más abajo, mediante un trabajo manual o utilizando equipos especiales. En estos puntos llamados de vaciado, hay un sistema de parrillas que dejan pasar el mineral hasta cierto tamaño. Los fragmentos de roca que exceden este tamaño son reducidos mediante martillos picadores móviles o mediante tronadura secundaria, si es necesario.

Sub Nivel: Es una galería horizontal paralela a un nivel principal, encontrándose sobre o bajo el.

Subnivel de ventilación: Corresponde a una red de galerías que se ubican por debajo del nivel de producción. Éstas tienen por objetivo conducir aire fresco, captado desde la superficie por grandes extractores, hacia los lugares donde se está trabajando, y retirar el aire viciado (contaminado por los gases de tronadura y de equipos diésel) para expulsarlo a la superficie.

Niveles de traspaso: Corresponde a una serie de galerías y piques que permiten controlar el paso del mineral desde el nivel de producción hasta el nivel de transporte. En el caso de mineral grueso (duro), este mineral es enviado al chancador primario, ubicado dentro de la mina, donde se reduce su tamaño para permitir su transporte final. En algunos casos, es necesario reducir el tamaño de los bloques mayores (colpas). Para esto, se dispone de sistemas de martillos picadores fijos.

Nivel de transporte: En este nivel circula el ferrocarril de transporte de mineral, alguna correa de acarreo de mineral, buses de carga, vehículos menores y de servicios. Este es el túnel de mayor tamaño en la mina.

Nivel Base: Son las galerías que limitan un sector de explotación.

11.5.5 Fortificación

El objetivo de la fortificación es ayudar a la roca a recuperar en parte la capacidad de soporte perdida en la perforación y tronadora.

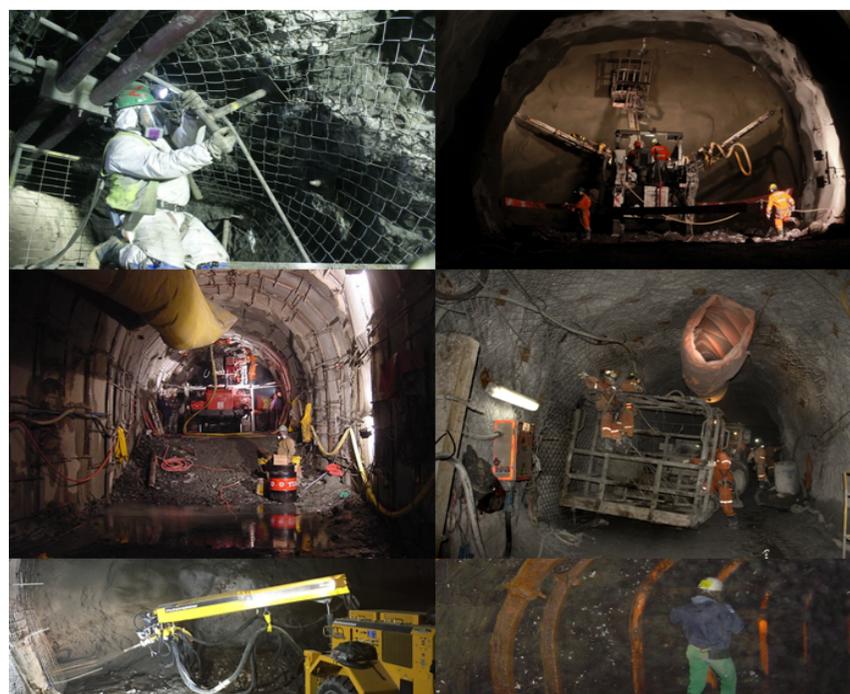
Las fortificaciones en los túneles de uso frecuente y prolongado, donde deben transitar personas y equipos, deben contar con un factor de seguridad mayor. En cambio, las fortificaciones de túneles de uso esporádico o donde no transita personal, tienen exigencias menores. La presión que se genera alrededor de una labor subterránea es mayor cuanto más profunda se ubique, ya que debe soportar una altura mayor de roca. Debido a esto, los túneles que se encuentran a mayores profundidades requerirán de fortificaciones con mayor resistencia.

El macizo rocoso puede ser diferente en distintos sectores en cuanto a su dureza y resistencia a los esfuerzos, lo que depende del tipo de roca, estructura o alteración. Una roca que se disgrega fácilmente requiere ser fortalecida totalmente; en cambio, una roca cohesionada de dureza media requiere de poca fortificación. Pero una roca cohesionada de alta dureza puede concentrar esfuerzos tan grandes que podrían provocar explosiones en sus paredes; por lo tanto, requiere una fortificación extrema.

Los materiales comúnmente usados para reforzar los túneles, piques o rampas son: Ver figura 28.

- Pernos de anclaje.
- Mallas de acero.
- Cables.
- Marcos de acero.
- Hormigón armado.
- Vigas de madera.
- Lechada de hormigón proyectado o shotcrete.

Figura 28 Labores de fortificación



11.5.1.1 Sistemas de Fortificación

De acuerdo a la *Guía Metodológica para Sistemas de Fortificación y Acuñaadura* del Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), existen dos tipos de fortificaciones:

🏗️ Fortificaciones rígidas.

🏗️ Fortificaciones flexibles.

Las fortificaciones rígidas corresponden a las que sostienen sin permitir ningún movimiento de la roca y deben ser resistentes para sujetar los bloques que puedan caerse, usadas solo en las bocas de las minas o sectores donde, por razones tectónicas, de mala calidad de la roca o explotaciones hundidas antiguas, se han perdido totalmente las propiedades resistentes de la roca.

Las fortificaciones flexibles, en tanto, permiten deformaciones de la roca con lo que se alivian los esfuerzos y, según indica el documento, al deformarse mejoran sus propiedades resistentes. Para realizar este proceso se utilizan diversos elementos, siendo el empernado el método más aceptado para sostenimiento provisional o definitivo. Para esto, se utilizan diferentes tipos de pernos de anclaje, que se clasifican en pernos anclados mecánicamente, anclados con resina o cemento y anclados por fricción. Los primeros (de anclaje con cabeza de expansión), utilizados en rocas medianamente duras, son los más comunes tanto en labores mineras como de ingeniería civil.

En cuanto a los pernos anclados con resina o cemento, el más común es el de barra de fierro o acero tratado que utiliza la resina o el cemento como un adherente. Dentro de los pernos anclados por fricción existen los Split set y Swellex. En ambos sistemas, la resistencia a la fricción para el deslizamiento entre la roca y el acero, sumado a la acción mecánica de bloqueo, es generada por la fuerza axial entre la superficie del barreno y el perno. Aunque los dos sistemas están descritos bajo un mismo denominador, solo el Split set es de fricción. En el caso del Swellex, combina la fuerza de fricción sumada al mecanismo de expansión del perno al interior del barreno que habitualmente tiene paredes irregulares. Esta situación genera una acción de bloqueo que permite obtener alta resistencia a la tracción.

Para el uso de estos elementos, existen empresas que ofrecen servicios *pull test* que permiten certificar en terreno la instalación de los pernos. Se trabaja bajo la norma ASTM 4435 (2008), que permite asegurar la estabilidad de los túneles y se recomienda probar el 5% de los pernos instalados en forma mensual. Los equipos utilizados en esta prueba deben estar calibrados en laboratorios certificados bajo norma ISO 17025.

Para la fortificación, también se utilizan mallas de acero, fabricadas con alambre de acero especial de alta resistencia, en diferentes grosores, que permiten una mayor distancia entre anclajes. Su uso es especialmente indicado en zonas comprometidas por estallidos de rocas o donde el macizo rocoso está muy alterado y, por lo tanto, fragmentado. El alambre está protegido contra la corrosión por una aleación especial cuatro veces superior al galvanizado habitual. En la construcción minera subterránea habitualmente se utilizan las mallas mineras electrosoldadas y las tejidas, trenzadas o de bizcocho. Las primeras se caracterizan por tener medidas y pesos conocidos, uniones más sólidas y terminaciones de alta calidad, mientras que las segundas se identifican por su flexibilidad y capacidad de absorber importantes cantidades de energía, dependiendo de su instalación, siendo muy eficiente en la retención de bloques pequeños inestables, provocados por eventos sísmicos, activaciones estructurales y otros. Para su instalación, se apegan a las paredes de la labor, siendo afirmadas con pernos de anclaje o con lechada (dependiendo de la durabilidad) y afianzadas a la superficie de la roca con planchuelas y tuercas. Entre una malla y otra deben ser traslapadas en sus bordes periféricos.

Por último, está el hormigón proyectado o shotcrete, que es un material transportado a través de una manguera, que se lanza neumáticamente, a alta velocidad, contra una superficie. La fuerza con que el hormigón o mortero llega a esta, hace que la mezcla se compacte logrando que se sostenga a sí misma, sin escurrir, incluso en aplicaciones verticales y sobre la cabeza. A pesar de ser un sistema relativamente nuevo, la tecnología de los equipos va avanzando y ya hay productos enfocados a mejorar la productividad, la facilidad de operación y fiabilidad.

Durante el proceso de fortificación, se puede utilizar la técnica del shotcrete para mejorar la impermeabilidad del túnel. Para cuando se realiza la primera capa de proyección de hormigón se dejan barbacanas (tipo planzas 1”) para liberar presiones de agua entre la pared de roca y el hormigón y se puede seguir avanzando”, para la fortificación final, se coloca una pintura impermeabilizante o una tela que cubra todo el perímetro del túnel para luego proyectar la segunda capa de shotcrete.

La teoría del sostenimiento por hormigón proyectado se basa en que todo macizo rocoso tiene una tensión interna estable, la que se ve alterada cuando, por efecto de la construcción del túnel, se efectúa una perforación en él y, por tanto, el ahora inestable punto de la excavación tratará de desplazarse en dirección de la menor fuerza, o sea, hacia el interior del túnel. Por eso, si las rocas quebradas alrededor del túnel están ligadas entre sí, la estabilidad se recupera, logrando que la roca se auto soporte.

11.5.6 Sistemas de Traspaso Gravitacional

Cuando se desarrollan galerías o excavaciones en distintos niveles, puede aprovecharse la energía gravitatoria para traspasar material de un nivel a otro, disminuyendo así gastos en transporte. Los sistemas de traspaso gravitacional más utilizados son los siguientes:

11.5.6.1 Sistema Gravitacional Integral

Aprovecha eficientemente la fuerza de gravedad para transportar el material en forma directa desde la fase de arranque hasta el nivel de transporte principal. Este sistema sólo es aplicable cuando la fragmentación primaria de la roca es muy buena.

11.5.6.2 Sistema Gravitacional con Control Granulométrico

Este sistema se caracteriza por contar con un nivel intermedio habilitado con parillas para el control granulométrico del material, antes de seguir hacia el nivel de transporte principal. En los puntos de control se realiza reducción secundaria del sobretamaño, ya sea por cachorro o reducción mecánica de martillos neumáticos.

11.5.6.3 Sistema Gravitacional con Carguío y Transporte

Este sistema incluye transporte horizontal del material antes o después del control granulométrico. Un ejemplo de esto es el sistema Scraper, que arrastra el material tronado desde los puntos de recepción hacia un punto de traspaso, aunque generalmente se utilizan otros sistemas más eficientes y modernos como el LHD.

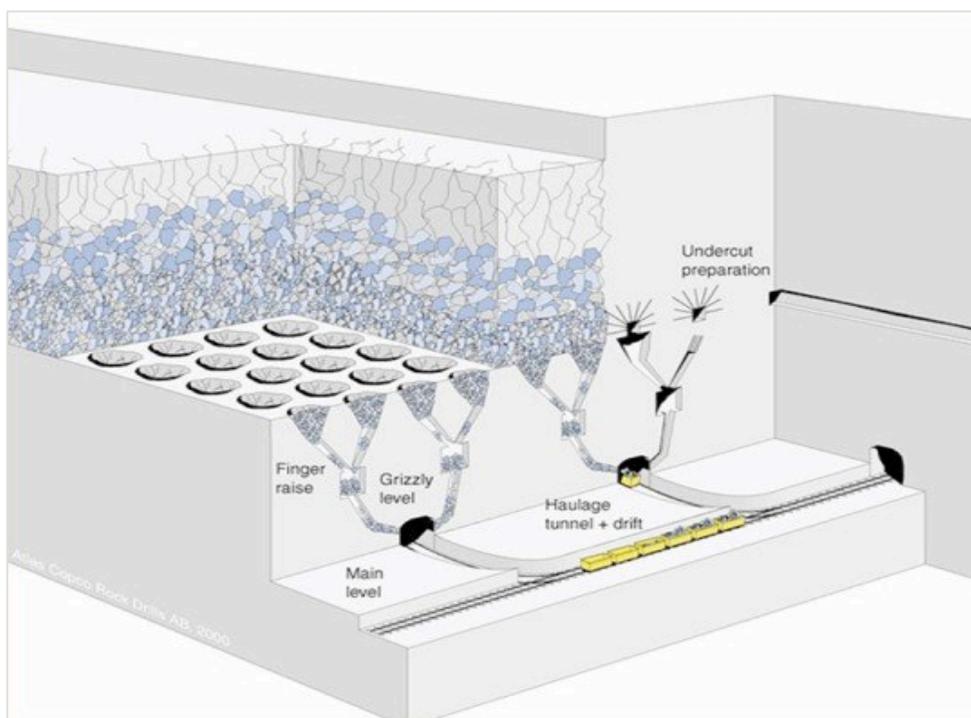
11.5.7 Hundimiento por Paneles o Panel Caving

El método de explotación por panel caving se define como el derrumbamiento de paneles por corte inferior, donde la roca se fractura y se rompe por sí sola debido a las tensiones internas, la baja resistencia a la tracción y efectos de la fuerza de gravedad. Por lo tanto, se requiere de un mínimo de perforación y tronadura en la explotación del mineral.

En este sistema de explotación el yacimiento se divide en paneles largos que incluyen varios bloques, siendo de esta forma una variación del hundimiento por bloques o block caving. En el sistema de hundimiento por bloques, cada bloque tridimensional de gran área basal cuadrada, se socava horizontalmente en su zona inferior, mediante tronadura, quedando de esta forma varios miles de toneladas de roca sin apoyo, lo que produce fracturas sucesivas que afectan al bloque por completo. Además, debido a las tensiones internas de la roca se produce la fragmentación del material en tamaños que pueden ser manejados a través de piques de traspaso o mediante equipos cargadores.

En este método de explotación, panel caving, se da como base el sistema de hundimiento por bloques o block caving que en realidad utilizan el mismo procedimiento. Pero en el block caving se explota por bloques, pudiendo elegirse por sus leyes y cambiarse de uno a otro sin mayores problemas si la infraestructura, dilución y estado tensional lo permiten; en cambio, en el panel caving se extrae todo el material por paneles que abarcan varios bloques, sin poder trasladarse de uno a otro. Ver figura 29.

Figura 29 Sistema panel caving



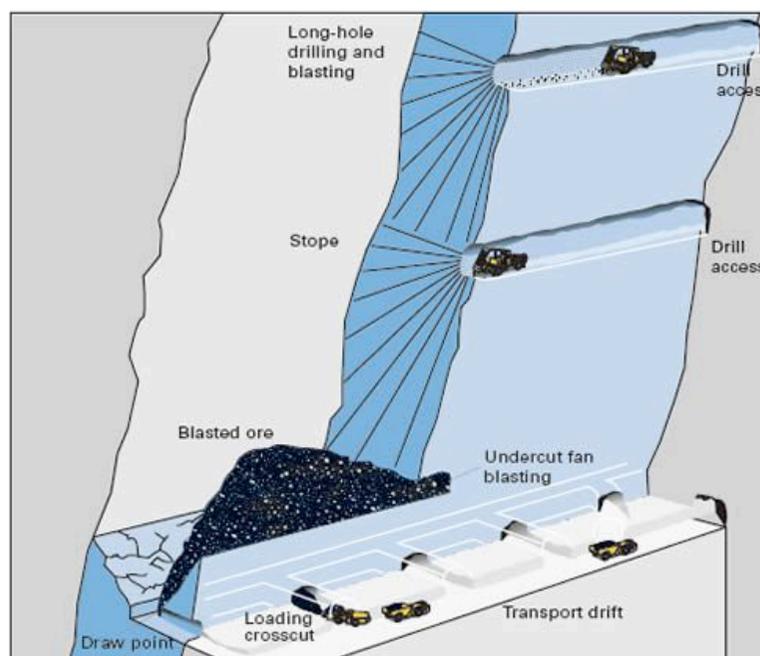
11.5.8 Sub Level Stopping

Este método consiste en la creación de caserones abiertos mediante la tronadura de grandes tajadas verticales de mineral, desde distintos subniveles de perforación. La forma de aplicación de este método varía para cuerpos macizos o vetas estrechas, pero las características generales de la roca deben ser de buena calidad, es decir, poseer paredes y techos firmes y estables. Generalmente se aplica en yacimientos verticales y que tengan formas y dimensiones regulares.

El sistema de recepción del mineral consiste en un conjunto de excavaciones que agrupa galerías, estocadas, piques, puntos de recepción de material, como zanjas, embudos y puntos de carguío. Para definir la altura del caserón se deben considerar sólo las condiciones del yacimiento, ya que el método en sí no tiene límite de altura. En general se abarca toda la altura de la mineralización con el fin de limitar el número de galerías bases de extracción a una sola en lugar de varias.

En cuanto al ancho del caserón, en general se abarca todo el espesor de la mineralización. Si se trata de cuerpos masivos se pueden crear varios caserones separados por pilares, que podrían ser recuperados con posterioridad utilizando el mismo método. Pero cabe mencionar que a pesar de contar con roca encajadora de buena calidad, las prácticas actuales no permiten tener anchos mayores a 25 mt. con longitudes de caserones sobre los 60 mt. y alturas efectivas sobre los 70 mt. Para poder realizar la máxima recuperación del yacimiento y no tener que dejar pilares de mineral entre caserones se procede a rellenar éstos con aplicaciones de cemento de tal forma que el caserón adyacente no esté afecto a la contaminación de caserón ya explotado. Ver figura 30.

Figura 30 Sistema sub level stopping



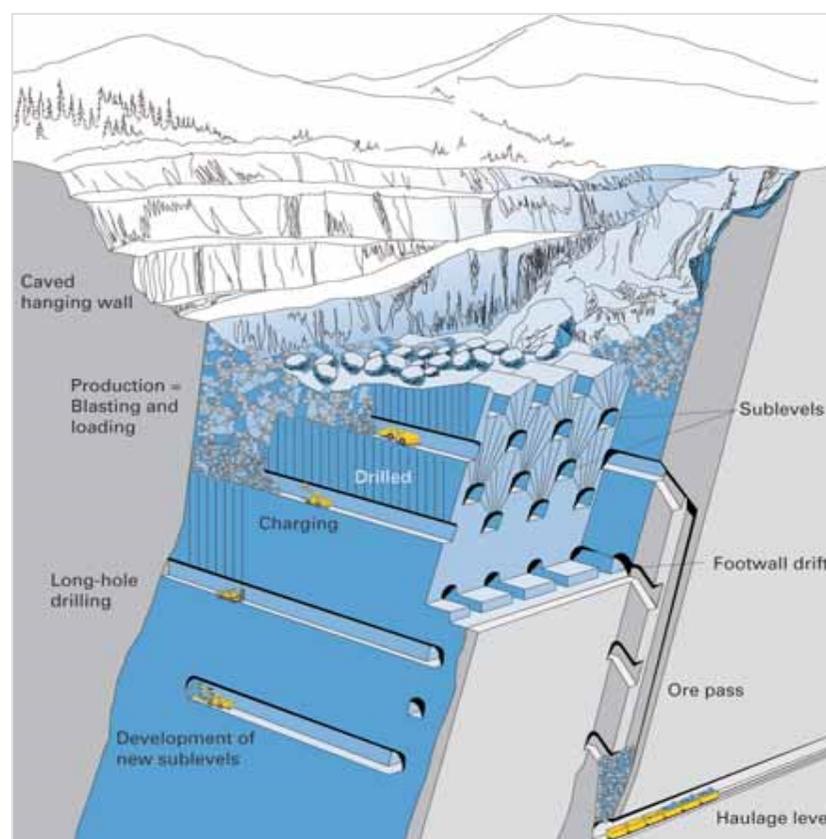
11.5.9 Sublevel Caving

El método consiste básicamente en la perforación de tiros en abanico desde subniveles en orden descendente, es decir, al comienzo de la explotación. Se debe producir el hundimiento desde el nivel superior, induciendo el hundimiento por medio de explosivos y, posteriormente, los niveles inferiores.

Se desarrolla en galerías paralelas, conocidas como galerías de producción, llamadas también cruzados de producción XP. Los subniveles se ubican uno sobre otro, a través del cuerpo mineralizado, quedando la explotación con una configuración geométrica simétrica. En la extracción por este método se produce el escurrimiento del material quebrado, el cual se comporta según lo que se conoce como flujo de material grueso. Esto hace que la producción provenga tanto de los frentes de extracción como de las labores de desarrollo realizadas en mineral. La extracción desde un frente de galería de producción continuara hasta que ingresa estéril en una cantidad tal, que la ley extraída ya no es conveniente económicamente. En este método, en que el frente de operación o extracción es móvil con respecto a la infraestructura de traspaso, la construcción de zanjas o embudos queda descartada.

Generalmente, el acceso a los subniveles se realiza por medio de rampas comunicadoras. Estos están conectados también por piques o chimeneas de traspaso al nivel de transporte principal, que generalmente se ubica bajo la base del cuerpo mineralizado. El método Sub Level Caving se aplica principalmente en cuerpos subverticales como vetas, brechas o diques. La configuración de los subniveles se puede adecuar a los distintos cuerpos y a formas irregulares. En cuerpos anchos se usa una configuración transversal y, cuando el cuerpo es angosto, las galerías deben girarse en la dirección del cuerpo adoptando una configuración longitudinal. En este método, a diferencia del block caving, los flujos de caja positivos son más tempranos, dado que el desarrollo y hundimiento de los niveles superiores permiten la pronta extracción de mineral, pero con el consiguiente tiraje, la dilución lateral y superior ingresa de la misma forma, pudiendo comprometer los correctos contenidos de mineral a extraer en los niveles inferiores. Es decir, una mala planificación en la secuencia de extracción producirá impactos en la ley de cabeza de la planta. Ver figura 31.

Figura 31 Sistema sub level caving



11.6 Proyecto Nuevo Nivel Mina El Teniente

Uno de los mayores proyectos en minería subterránea a realizar en Chile es el NNM de Codelco Chile con una inversión de US\$ 3.424 millones. Es uno de los cinco proyectos estructurales de Codelco, Nuevo Nivel Mina (NNM) consiste en ampliar la mina El Teniente en un sector más profundo del cerro (cota 1.880), sumando una nueva superficie de 2 millones 50 mil metros cuadrados y asegurando la continuidad operacional de la División El Teniente. Su plazo de ejecución es hasta el año 2020.

El proyecto NNM suma 2.020 millones de toneladas de *reservas*, con una *ley media* de cobre de 0,86% y una *ley media* de molibdeno de 0,022%, que se traducen –en un período de más de 50 años de operación contados desde el año 2018- en más de 17 millones de toneladas de cobre fino.

La configuración del proyecto contempla una explotación a través del sistema *panel caving*, con el 100% del área preacondicionada con *fracturamiento* hidráulico y un esquema de niveles típico de la mina El Teniente: hundimiento, producción, ventilación, acarreo y chancado. La diferencia es que, en este caso, el mineral va a ser sacado a superficie –al concentrador Colón- a través de un sistema de correas transportadoras.

Nuevo Nivel Mina permitirá mantener la capacidad de El Teniente en las actuales 137.000 toneladas por día (tpd), que equivalen a una producción en régimen en torno a 434.000 toneladas de cobre fino al año. Y deja abierta la opción, hacia el año 2020, de tomar la decisión de iniciar las obras necesarias para poder llegar a producir 180.000 tpd.

La infraestructura del Proyecto NNM se compara con lo realizado por los pioneros norteamericanos que en 1920 construyeron El Teniente 5 y su salida a Sewell (cota 2.280). También con el llamado Programa 280, ejecutado por la Braden Copper Co. en 1968, que desarrolló El Teniente 8 y su salida en Colón (cota 1.980).

Los accesos de NNM serán dos **túneles** paralelos de 9 kilómetros—uno para la entrada y salida de buses con trabajadores, y el otro para la correa transportadora de mineral, pista de servicios y vía alternativa para emergencias— que tomarán 4 años de trabajo y correrán por debajo de la cota del río Coya, para llegar al sector denominado Confluencia, en la altura de Caletones (cota 1.500).

El proyecto Nuevo Nivel Mina plantea un diseño de ingeniería orientado a mitigar los riesgos. Asimismo, reducirá de manera importante la exposición de las personas a situaciones riesgosas, ya que considera operaciones semiautomáticas comandadas desde salas de control ubicadas en el valle, a más de 50 kilómetros del área de trabajo.

Entre los años 2011 y 2018 el proyecto ejecutará 98.450 metros de túneles (desarrollos horizontales) y 3.454 metros de desarrollos verticales: chimeneas de ventilación y piques de traspaso.

El Nuevo Nivel Mina se desarrollará principalmente en tareas subterráneas al interior de la Cordillera de Los Andes, por lo que tiene un bajo impacto ambiental. Además, utiliza las actuales instalaciones de El Teniente, lo que no agrega nuevos efectos en el entorno. El Estudio de Impacto Ambiental -aprobado por la autoridad- considera un Plan de Rescate y Relocalización de Fauna, dirigido a especies en estado de conservación, especialmente orientado al impacto que pudieran tener las obras en superficie, como el nuevo camino.

Descripción del proyecto:



Sección 12

PROCESO DE CONMINUCION

Se usa el concepto de conminución para identificar los procesos que tienen que ver con la acción de reducción de tamaño de los minerales y que permiten liberar las especies valiosas contenidas en ellos. Según este concepto, la tronadora en la mina es el primer proceso de conminución en la línea de operaciones de mina y planta. Para el control metalúrgico, operacional y chequeo de las características de diseño de una planta de conminución de minerales, es importante contar con toda la información necesaria para realizar los balances de materiales en cada punto del proceso. Esto es importante, ya que es una manera indirecta de verificar que los equipos, habitualmente enlazados entre sí por un sofisticado sistema de automatización y control, se encuentren operando dentro de los márgenes de lo diseñado y poder detectar cualquier variación en algunos de los parámetros operacionales habituales, como puede ser, por ejemplo, la granulometría de alimentación y descarga de algún circuito del proceso o el porcentaje de sólidos de la pulpa en un determinado punto del proceso. De esta forma se podrá determinar de una manera rápida cuál es la fuente que está ocasionando el problema.

Desde la mina hasta las distintas etapas de chancado se estará operando en seco, sin agua. Desde la alimentación a la molienda en adelante, siempre se estará operando con pulpas, por lo que es de primordial importancia tener un amplio conocimiento sobre la ruta a seguir para obtener la información requerida para realizar y revisar los cálculos que se requieran, pero si no se cuenta con el equipo y la literatura necesaria, esto se puede volver muy complicado e implica invertir mayor tiempo en la realización de los cálculos de verificación.

El mineral proveniente de la mina tiene un tamaño variado, por lo que el objetivo del chancado, la primera etapa de la conminución a ejecutarse en la planta, es reducir el tamaño de los fragmentos de rocas enviados desde la mina hasta obtener un tamaño uniforme máximo de 1/2 pulgada, aproximadamente 1,27 cm. Para la reducción del tamaño se utilizan los chancadores, que son equipos mecánico-eléctricos de grandes dimensiones. En estos equipos, los elementos trituran la roca mediante movimientos de atrición y están contruidos en aleaciones especiales de acero de alta resistencia. Todo el manejo del mineral en la planta se realiza mediante correas transportadoras, desde la alimentación proveniente de la mina hasta la entrega del mineral como producto chancado a la etapa siguiente.

El objetivo de la conminución es la reducción del tamaño de las rocas. Según esto, la primera pregunta que surge es por qué la acción no se hace de una sola vez. Es decir, que un equipo tome una roca de mineral y lo convierta en fino en una sola etapa. Desafortunadamente, no se ha podido hasta la fecha desarrollar un equipo capaz de realizar todo el proceso de chancado de una sola vez, para todos los tipos de materiales. Por esto, en la mayoría de las aplicaciones son necesarias varias etapas de fragmentación y más de un equipo.

El hecho de que existan chancado y molienda y no sólo uno de ellos, responde a dos motivos muy claros: factibilidad técnica y económica. Existe un límite de tamaño de las partículas de mineral hasta donde los chancadores son eficientes y pasado este límite realizan muy poco trabajo en comparación con la energía consumida. Para este caso, de los tamaños más finos, existen los molinos que realizan la reducción de tamaño del mineral con un rendimiento mucho mejor que los chancadores. Lo que se debe hacer, en definitiva, es elegir los equipos adecuados que permitan conseguir la reducción de tamaño requerida y ubicarlos en un circuito de tal manera que juntos proporcionen la disminución de tamaño necesaria para el proceso siguiente.

La resistencia que opone el mineral a la fragmentación es fundamental, ya que afecta, por un lado, la razón de reducción de tamaño y, por otro, define qué tipo de máquina se debe utilizar para el trabajo requerido.

Un material con bajo índice de trabajo es fácilmente fragmentable, por lo que la razón de reducción del chancador es alta, disminuyéndose las etapas necesarias de fragmentación de la planta de chancado. Por el contrario, si un material tiene un índice de trabajo alto será imposible utilizar una abertura de salida muy estrecha, para no producir sobrecargas, con lo que se necesita mayor cantidad de etapas de fragmentación para alcanzar el tamaño de producto deseado.

De lo anterior se puede inferir que la resistencia a la fragmentación es una propiedad muy importante del mineral, a tratar y es fundamental determinarla. En el diseño del proceso de chancado es primordial conocer las características del mineral, ya que dependiendo de éstas habrá un tipo de chancador que resulte ser la mejor opción, un tipo de circuito característico, una cantidad de etapas de chancado óptima, etc.

Cuatro son los factores de importancia para la elección del chancador adecuado:

- 📊 El tipo de mineral a tratar.
- 📊 El tamaño de la alimentación.
- 📊 La capacidad.
- 📊 Las características requeridas para el producto final del chancado.

De estos factores, sólo los dos primeros están relacionados directamente con el mineral, ya que los otros tienen relación directa con la máquina escogida.

Como referencia, cabe destacar que las empresas proveedoras de equipos para chancado, tienen sus propios laboratorios de prueba en los cuales desarrollan los estudios de manera de definir el comportamiento de sus máquinas con el material en cuestión. Cada proveedor realiza las pruebas que estima convenientes para la aplicación en estudio, pudiendo presentarse el caso en que dos proveedores distintos realicen pruebas diferentes a base de su experiencia.

La veracidad de los resultados de las pruebas con respecto a la totalidad del material a chancar, dependerá de la representatividad de la muestra tomada. Los costos asociados a la toma de muestras se pueden comparar con los costos de obtener resultados errados; por ende, invertir en la correcta toma de muestras, es importante.

Cuando un chancador comienza a funcionar, su rendimiento va de acuerdo a la reducción entre la abertura de la cámara de alimentación y la abertura de su descarga. A medida que el material pasa por la cámara de chancado con el fin de ser reducido de tamaño y el equipo no consigue tal objetivo, se disminuye la abertura de la descarga del equipo de manera de alcanzar tal necesidad. Cuando un equipo chancador con su abertura más pequeña no puede reducir de tamaño el mineral con que se le alimente, es necesario definir otro equipo con el cual alcanzar la granulometría deseada. De aquí que exista habitualmente en las plantas de chancado etapas de chancado primario, secundario, terciario y eventualmente también una etapa de chancado cuaternario. El proceso de chancado sigue hasta que se llega al punto en el cual aún no se alcanza el tamaño deseado de liberación y donde los tamaños necesarios sólo se logran por medio de la molienda.

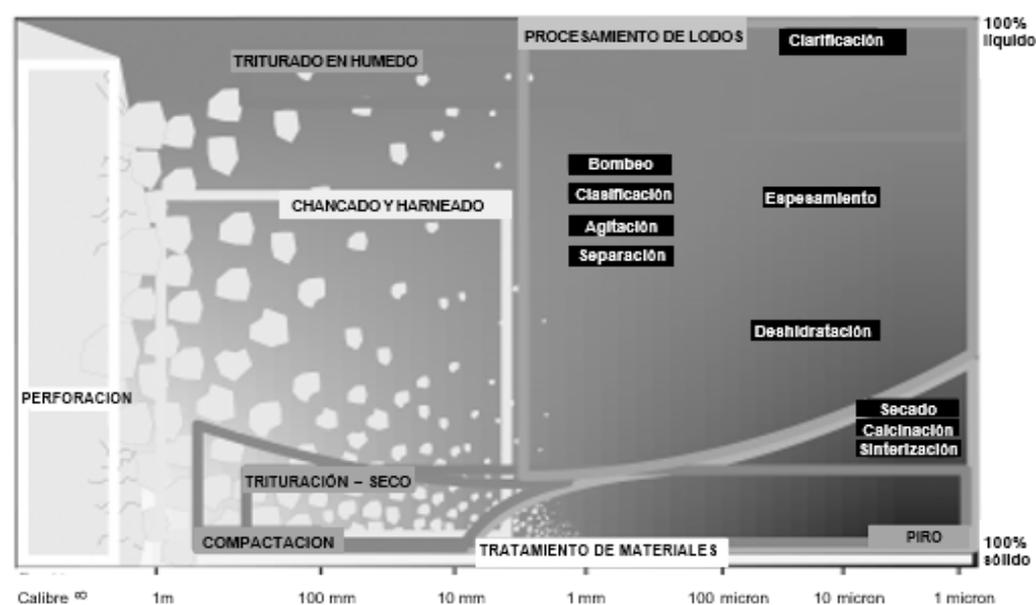
Cabe destacar que si se insiste en la utilización de un determinado equipo es posible que se logre reducir el tamaño hasta lo deseado, pero económicamente no es viable en razón a su pérdida de capacidad y mayor consumo de sus piezas de desgaste. Por este motivo es necesaria la existencia de los procesos de chancado y molienda, los que juntos logran el objetivo de la conminución, con lo cual el mineral con un tamaño y forma dados recién logra la liberación de la especie útil que se busca.

La reducción de tamaño de minerales se realiza normalmente para liberar los minerales de valor desde la roca donde están depositados. Esto significa que se debe lograr un tamaño de liberación, normalmente en un intervalo de 100 a 10 micrones. Si el material es no metálico como calcita, feldespato u otros, el valor está normalmente en la producción de polvo muy fino. Para poder maximizar el valor en la reducción de tamaño de rocas y minerales se necesitan chancado y molienda en varias combinaciones.

12.1 Aspectos Generales de Proceso

La meta en el procesamiento de minerales es producir el valor máximo de un material en bruto dado. Esta meta puede ser un producto chancado con cierto tamaño y forma o la recuperación máxima de metales desde un mineral metálico complejo. Las tecnologías para lograr tales metas son clásicas, complementarias y bien definidas. A continuación, éstas se presentan en el *Marco del Proceso de Minerales*, clasificadas de acuerdo a su interrelación en el tamaño del producto y el medio del proceso (seco o húmedo). Ver figura 32.

Figura 32 Tamaño de partícula y medio de proceso



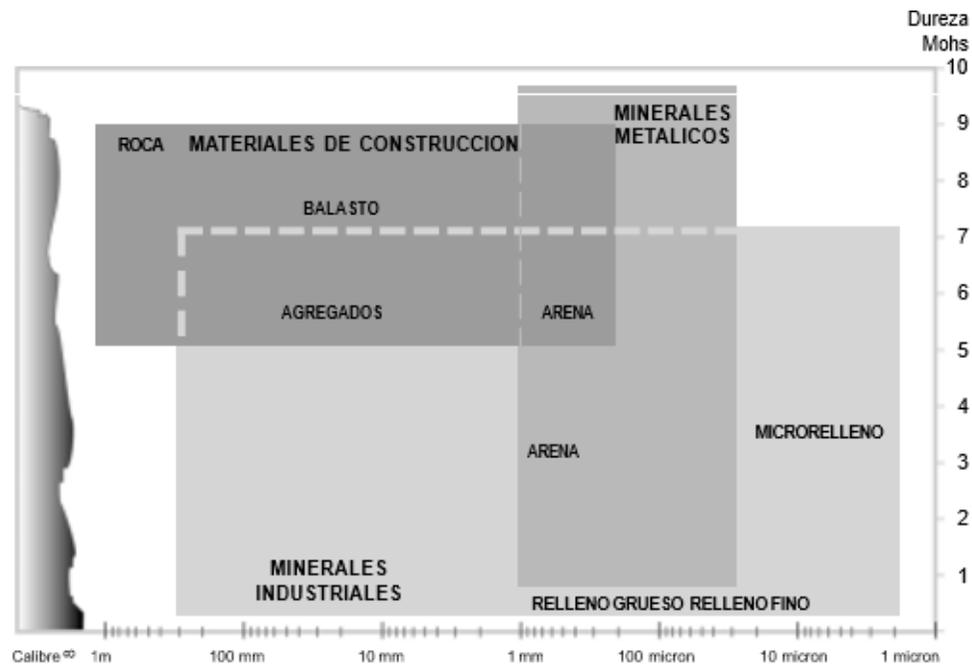
- **Perforación (y tronadura)**, es la tecnología para lograr la fragmentación primaria de los minerales “en terreno”. Este es el punto de partida para la mayoría de los procesos de minerales a excepción de los minerales naturales en forma de arena y gravilla.
- **Chancado y harneado**, es la primera etapa del proceso de reducción controlada de tamaño. Este es el proceso principal en la producción agregada y un proceso de preparación para seguir en la reducción de tamaño.
- **Trituración**, es la etapa de reducción de tamaño (seca o húmeda) donde se puede lograr el calibre de liberación para minerales individualmente. Siguiendo una mayor reducción de tamaño se produce arena (polvo mineral).
- **Procesamiento de lodos**, incluye las tecnologías de procesamiento en húmedo de las fracciones minerales.
- **Piroprocesamiento**, incluye las tecnologías para refinamiento de fracciones minerales por secado, calcinamiento o sinterización.
- **Tratamiento de materiales**, incluye las tecnologías de movimiento del proceso de flujo (seco), carga, transporte, apilamiento y alimentación.
- **Compactación de minerales**, incluye las tecnologías de movimiento y densificación de minerales por vibración, impacto y presión, principalmente utilizadas en aplicaciones de construcción.

12.2 Procesamiento de Minerales y Dureza

12.2.1 Tamaño y Dureza

Todas las operaciones tienen diferentes métodos de proceso debido a la dureza del mineral y la gama de tamaños. Es importante saber en qué “gama” estamos operando ya que esto afectará varios parámetros de proceso (grado de desgaste, tiempo activo, costos operacionales, etc.). El tamaño y la dureza juntos, dan información de interés. Figura 33.

Figura 33 Tamaño y dureza de partícula

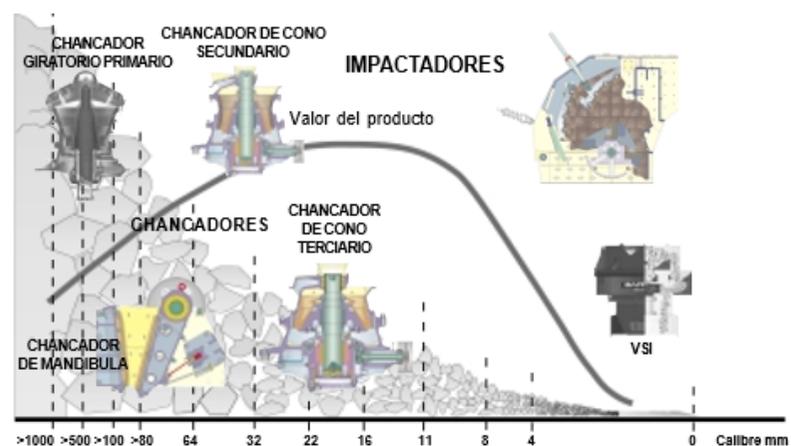


12.3 Reducción de Tamaño

12.3.1 Chancado de Rocas

La mayor operación en el procesamiento de minerales es por tonelaje. La meta es producir roca (o con menor frecuencia), fracciones de mineral para ser usada como relleno de roca o material de balasto para la producción de *concreto y asfalto*. Normalmente, los parámetros de calidad son la resistencia, el tamaño y la forma. Estas fracciones de tamaño, ver a continuación, están valoradas de acuerdo a intervalos definidos de tamaño y pueden lograrse solamente por chancado. Ver figura 34.

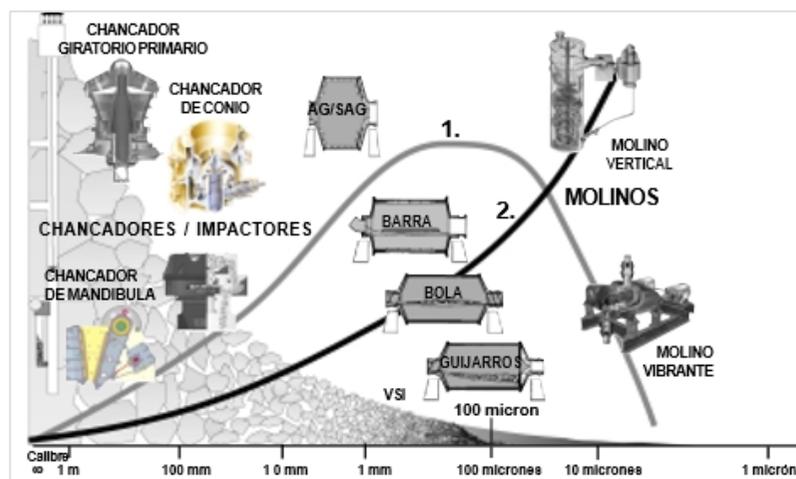
Figura 34 Chancado de rocas



12.3.2 Chancado y Trituración de Metales y Minerales

La reducción de tamaño de minerales se realiza normalmente para liberar los minerales de valor desde la roca donde están depositados. Esto significa que debemos lograr un tamaño de liberación, normalmente en un intervalo de 100 – 10 micrones, ver curva de valor 1. Si el material en *bruto* es un mineral simple (Calcita, Feldespato y otros), el valor está normalmente en la producción de polvo muy fino (relleno), ver curva de valor 2. Para poder maximizar el valor en la reducción de tamaño de rocas y minerales, ver a continuación, necesitamos chancado y triturado en varias combinaciones. Ver figura 35.

Figura 35 Chancado de Minerales

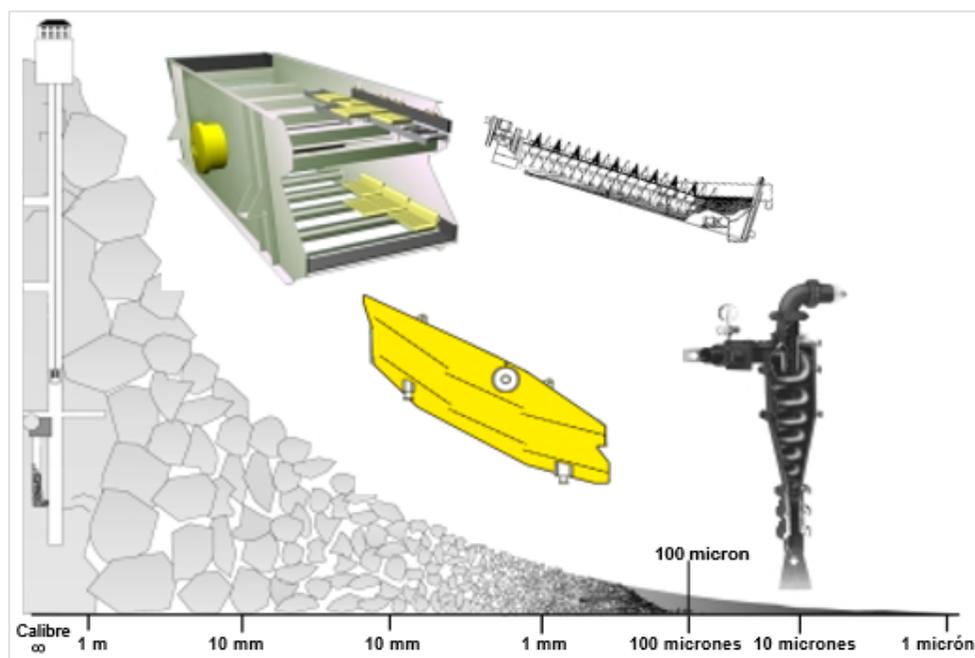


12.4 Control de Tamaño

Ni los chancadores, ni los molinos son muy precisos cuando se trata del tamaño correcto del producto final. La razón se encuentra en parte, en la variación de los compuestos de cristales de mineral (duro-suave, abrasivo – no abrasivo), y parte en el diseño y rendimiento del equipo.

El *control de tamaño* es la herramienta para refinar las fracciones de tamaño en las etapas de proceso y en el producto final. Para la parte más gruesa del proceso, se usan coladores (en la práctica sobre 12 mm). En la parte más fina tenemos que clasificar con clasificadores en espiral y/o hidrociclones. Ver figura 36.

Figura 36 Chancado de Minerales



12.5 Proceso de Reducción de Tamaño

Los minerales en forma de cristal tienen la tendencia de quebrarse en numerosos tamaños y formas cada vez que se les aplica fuerza. La dificultad de la reducción de tamaño está en el arte de limitar la cantidad de tamaños *sobredimensionados y de baja dimensión* que se producen durante la reducción. Si esto no está bajo control, el mineral seguirá su comportamiento de cristal natural, representado normalmente en una sobre representación de finos.

Por lo tanto, lo adecuado cuando se producen productos de calidad desde rocas o minerales (excepto rellenos), es mantener las curvas de reducción de tamaño con la mayor pendiente posible. Normalmente mientras más corta la fracción, mayor es su valor. Para lograr esta meta necesitamos el equipo correcto para reducir el tamaño en forma adecuada. Todos los equipos son diferentes cuando se trata de técnica de reducción, razón de reducción, tamaño de alimentación, etc, y tiene que combinarse en la forma más óptima para lograr o acercarse al intervalo de tamaño para el producto final.

12.6 Material de Alimentación

Todas las operaciones de reducción de tamaño, tanto en *chancado como en molienda* se determinan sin duda por las características de alimentación de los minerales (roca/mineral metálico), que circula hacia el circuito. Los parámetros clave que necesitamos son la capacidad de “chancado o molienda”, también llamado índice de trabajo o de bond, junto al “perfil de desgaste”, llamado índice de abrasión.

El índice de trabajo (W) en chancado influye sobre la reducción de tamaño, requerimiento de energía y estado de la máquina. El perfil de desgaste (A), en chancado influye sobre el grado de desgaste. Ver tabla 11.

Tabla 11 Índices de materiales

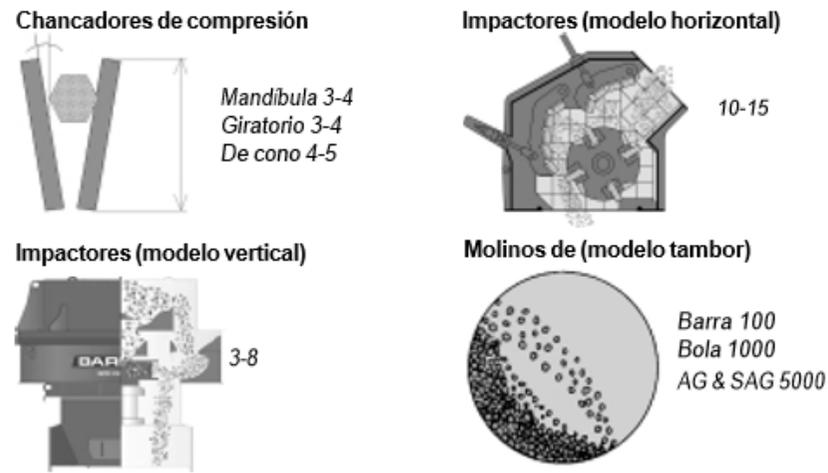
Material	Valor W	Material	Valor A
Basalto	20 ± 4	Basalto	0,200 ± 0,20
Diabasa	19 ± 4	Diabasa	0,300 ± 0,10
Dolomita	12 ± 3	Dolomita	0,010 ± 0,05
Min. de Hierro Hematita	11 ± 3	Min. de Hierro Hematita	0,500 ± 0,30
Min. de Hierro Magnetita	8 ± 3	Min. de Hierro Magnetita	0,200 ± 0,10
Gabro	20 ± 3	Gabro	0,400 ± 0,10
Gneiss	16 ± 4	Gneiss	0,500 ± 0,10
Granito	16 ± 6	Granito	0,550 ± 0,10
Vacia gris	18 ± 3	Vacia gris	0,300 ± 0,10
Caliza	12 ± 3	Caliza	0,001 – 0,03
Cuarcita	16 ± 3	Cuarcita	0,750 ± 0,10
Porfirio	18 ± 3	Porfirio	0,100 – 0,90
Arenisca	10 ± 3	Arenisca	0,600 ± 0,20
Sienita	19 ± 4	Sienita	0,400 ± 0,10

Otro factor importante, es la capacidad para atorarse, atascarse o atollamiento del mineral. Este depende de la aptitud de compactación del mineral y se puede determinar por la diferencia entre la densidad real y la densidad aparente del mineral.

12.7 Razón de Reducción

Tal como se pudo observar arriba, todas las operaciones de reducción de tamaño se realizan por etapas. Todos los equipos involucrados, chancadores o molinos tienen una relación diferente entre los tamaños de alimentación y descarga. Esto se llama *razón de reducción*. Ver figura 37.

Figura 37 Razón de reducción.



12.8 Chancado de Mineral Metálico y Minerales

En estas operaciones, el valor se logra en el producto fino, es decir bajo 100 micrones (malla 150). Normalmente, la reducción de tamaño por chancado es de importancia limitada más allá del tamaño tope del producto que se va a chancar. Esto significa que el número de etapas de chancado se puede reducir dependiendo del tamaño de alimentación que acepta la molienda primaria. Figura 38, 39 y 40.

Figura 38 Chancado de tres etapas

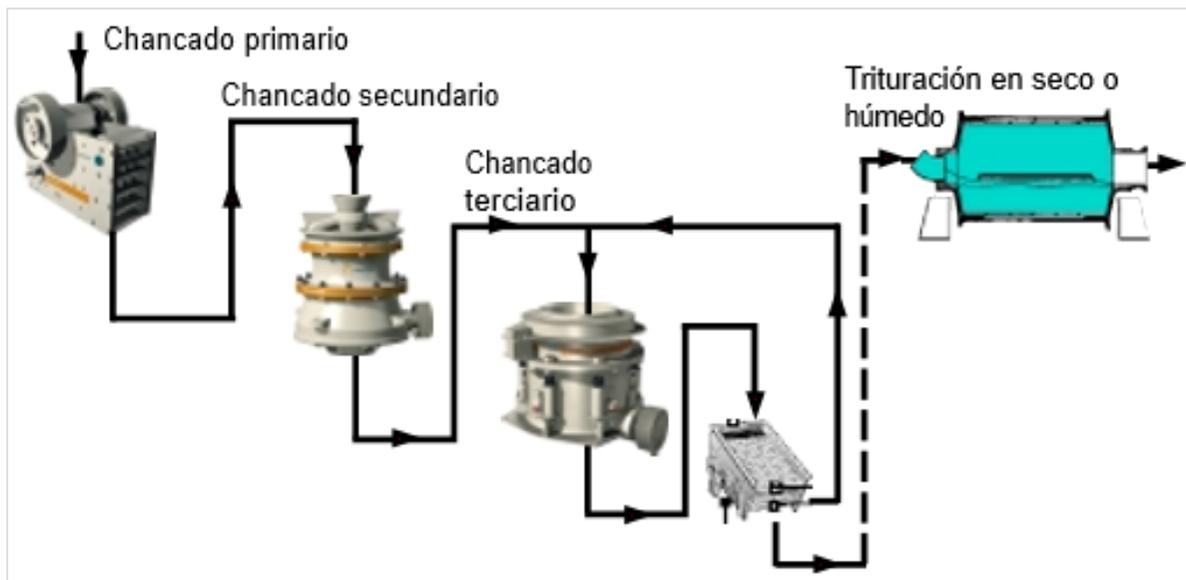


Figura 39 Chancado de dos etapas

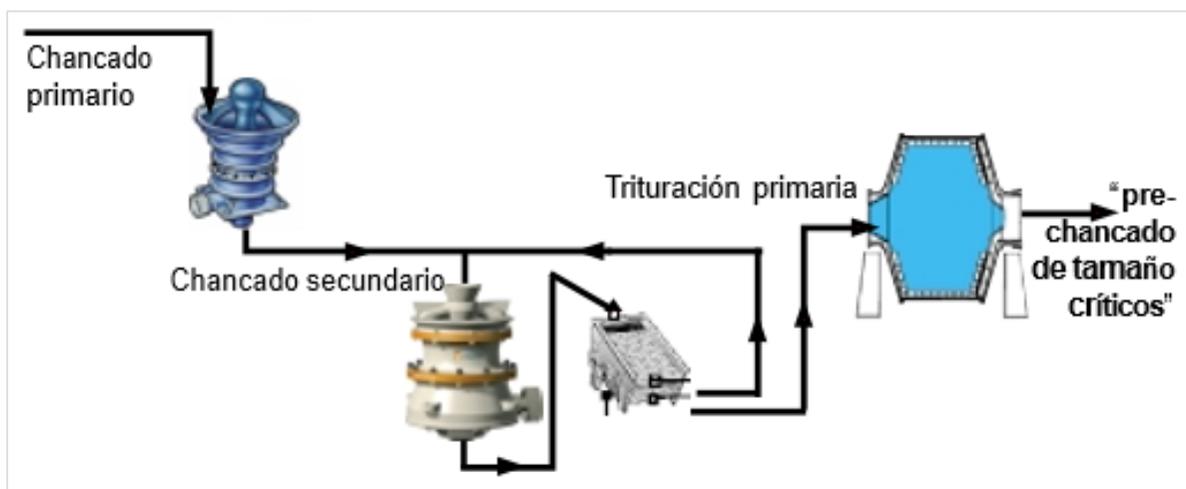
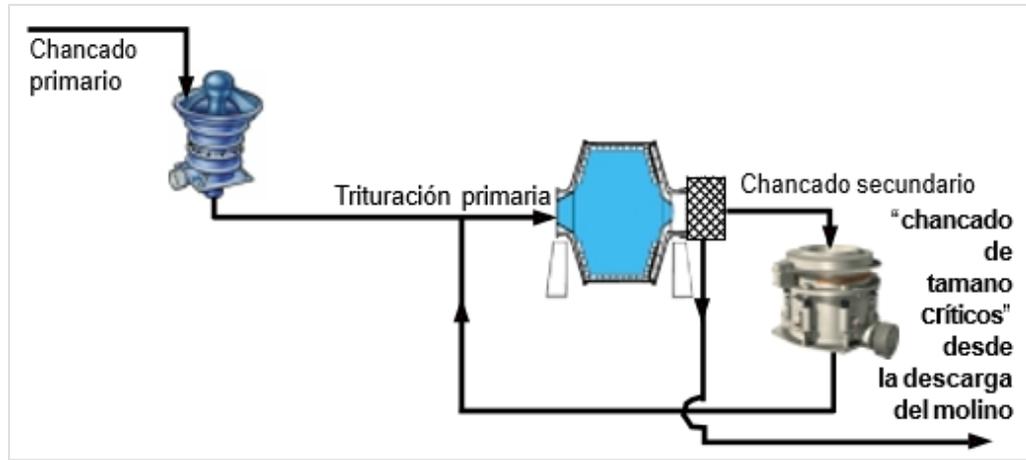


Figura 40 Chancado de una etapa



12.9 Relación de Reducción

Todos los chancadores tienen una tasa de reducción limitada en el sentido que la reducción de tamaño se va a realizar en etapas. La cantidad de etapas está guiada por el tamaño de la alimentación y el producto requerido de acuerdo a la siguiente formula:

$$\text{Tasa de Reducción Total} = \text{Tamaño de Alimentación} / \text{Tamaño de Producto}$$

Una vez obtenida la tasa de reducción total, se debe verificar la tasa de reducción parcial por etapa.

Ejemplo 1:

- Se tiene un material de alimentación de tamaño máximo 400 mm proveniente de voladura de roca (80% Bajo 400 mm).
- Se necesita un tamaño de producto de 16 mm.

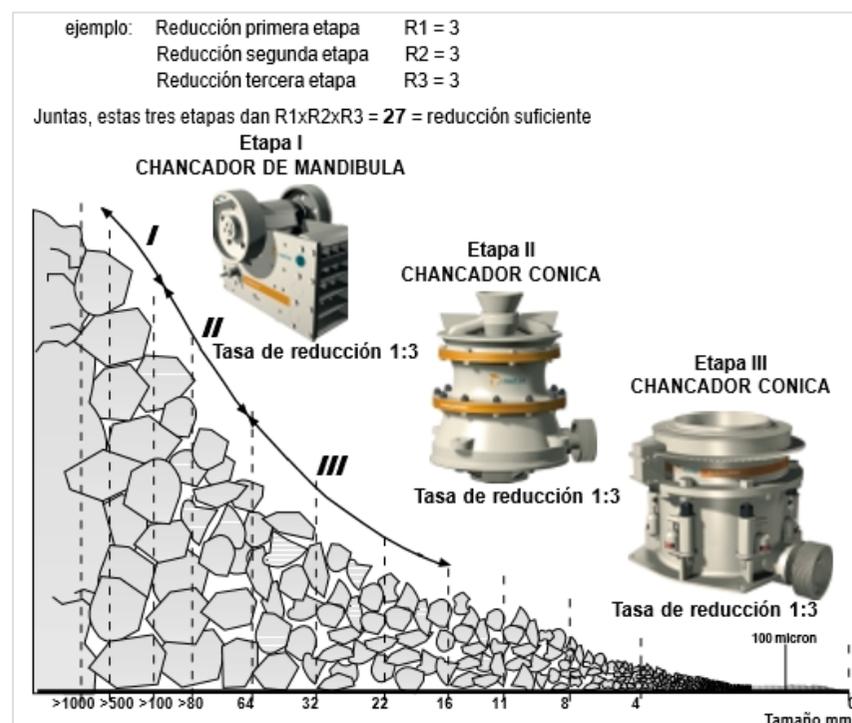
En el caso de una cantera podría ser un agregado para una composición granulométrica de una carpeta asfáltica.

En el caso de un mineral podría ser la alimentación de un molino de barras con un 80% bajo 16 mm.

$$\text{Tasa total de reducción} = 400/16 = 25 \text{ veces}$$

esto implica diseñar un circuito de chancado en etapas de acuerdo a la **tasa de reducción** de cada equipo. Ver esquema de la figura 41.

Figura 41 Chancado en 3 etapas



12.10 Chancado Primario

Al saber la cantidad de etapas de chancado ya podemos comenzar a seleccionar el chancador adecuado para cada etapa de reducción.

Dependiendo de:

- ✚ Condiciones operacionales.
- ✚ Tamaño de alimentación (Tamaño obtenido en la voladura de roca)
- ✚ Capacidad (Depende de la capacidad de alimentación)
- ✚ Dureza (Característica del mineral)
- ✚ Etc.

Siempre existen varias opciones posibles. En el caso de chancadores primarios, los más utilizados son los indicados en la figura 42.

Figura 42 Chancadores primarios.



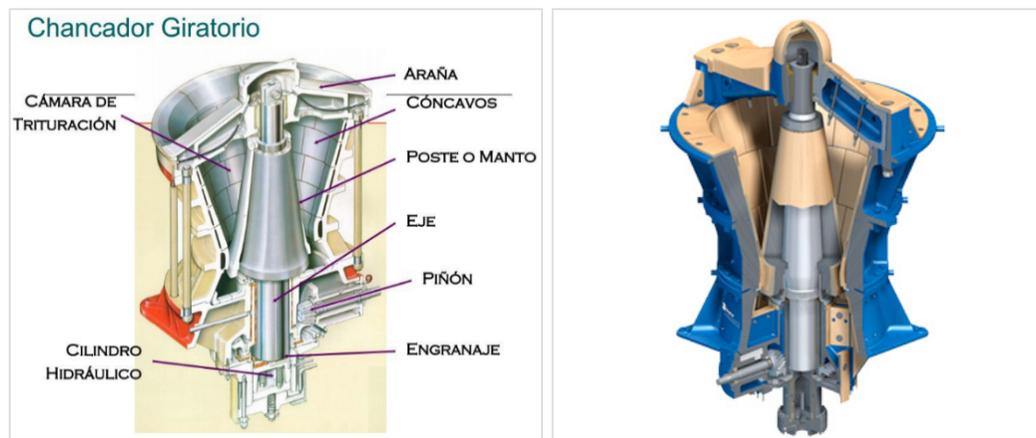
12.10.1 Dimensionamiento

Los chancadores primarios son normalmente dimensionados a partir de los siguientes datos:

- ✚ Tamaño máximo de alimentación (Tamaño promedio obtenido en la tronadura).
- ✚ Capacidad de procesamiento (Capacidad de alimentación desde la mina).

A cierto tamaño de alimentación, sabiendo su capacidad, podemos seleccionar la máquina adecuada. Ver figura 43.

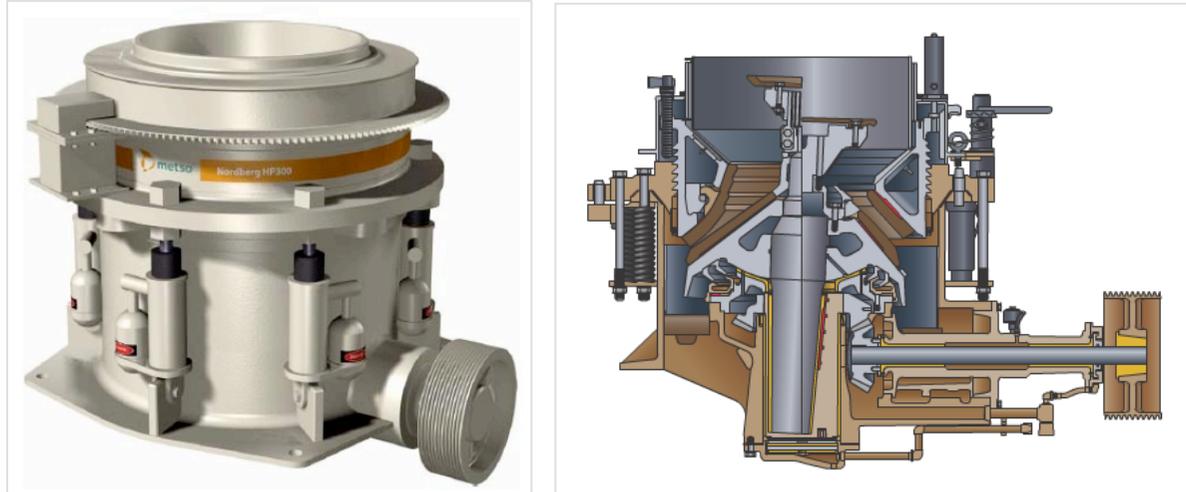
Figura 43 Chancador Primario



12.11 Chancado Secundario

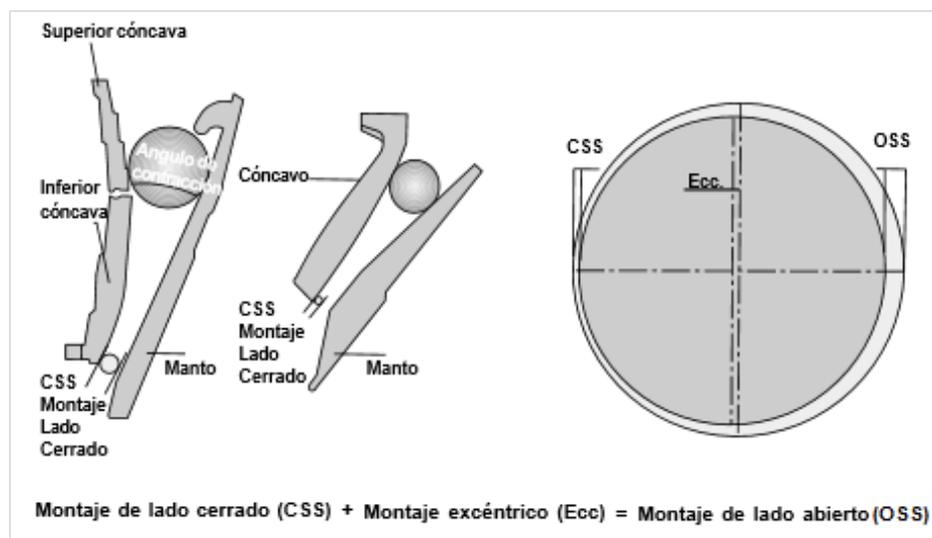
En un circuito de chancado de roca o minerales, normalmente, la segunda etapa comienza a tener importancia para el control del tamaño y la forma. Debido a esto, en la mayoría de los casos, se utilizan los chancadores de cono. Ver figura 44.

Figura 44 Chancador de cono



Comparado a otros chancadores, el chancador de cono cuenta con algunas ventajas que lo hace muy adecuado para la reducción de tamaño y forma aguas abajo en un circuito de chancado. La razón es la cámara de chancado y las posibilidades de cambiar el tamaño de la apertura de alimentación OSS (Size of open side) y la apertura de descarga CSS (Size of closed side) durante la operación. Ver figura 45.

Figura 45 Apertura de alimentación y descarga



Características:

- Toma de la cámara para adecuarse al calibre de alimentación.
- Cada dimensión de máquina cuenta con diferentes opciones de cámara (otros tipos de chancador no lo tienen)
- Cada cámara tiene cierto tamaño de alimentación v/s relación de capacidad.
- Un Ecc aumentado (en el mismo CSS), dará mayor capacidad, pero también una descarga más gruesa. Un CSS reducido mejora la **cubicidad**, pero también reduce la capacidad y aumenta el riesgo de obturación.
- Calibre aproximado de descarga:
Chancador de Cono 70-80% < CSS
Chancador Giratorio 55-60% < CSS

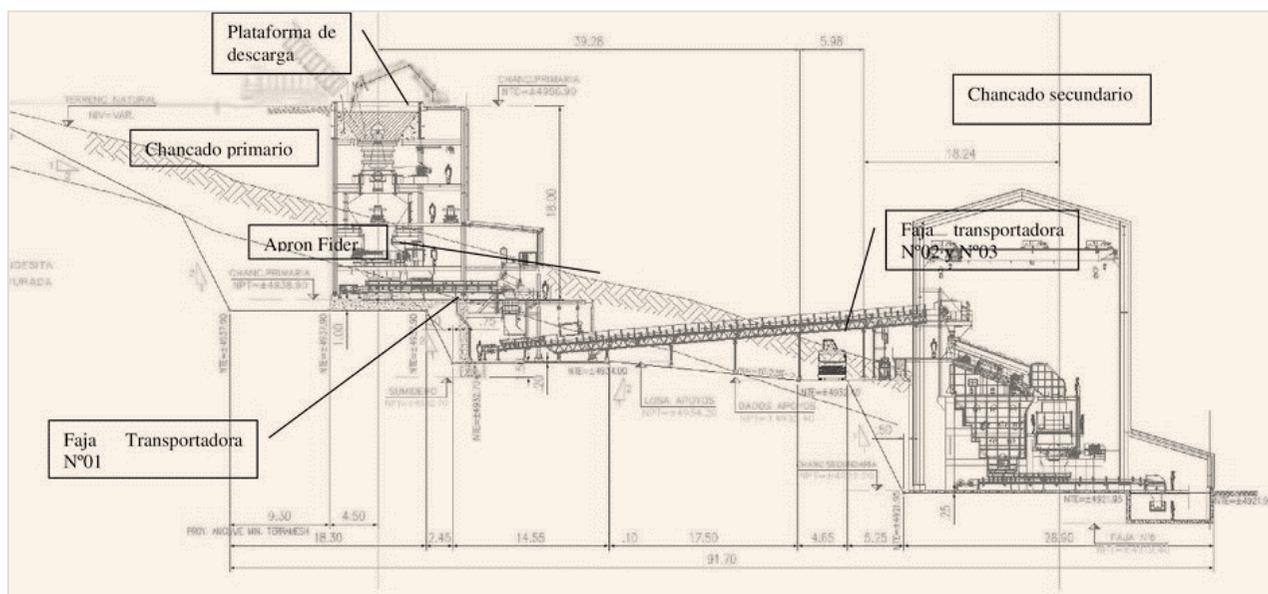
12.11.1 Dimensionamiento

Los chancadores secundarios son normalmente dimensionados a partir de los siguientes datos:

- Tamaño máximo de alimentación (Tamaño promedio de salida en chancado primario).
- Capacidad de procesamiento. (capacidad de alimentación desde chancado primario)

A cierto tamaño de alimentación, sabiendo su capacidad, podemos seleccionar la máquina adecuada. Ver figura 46.

Figura 46 Esquema de chancado secundario

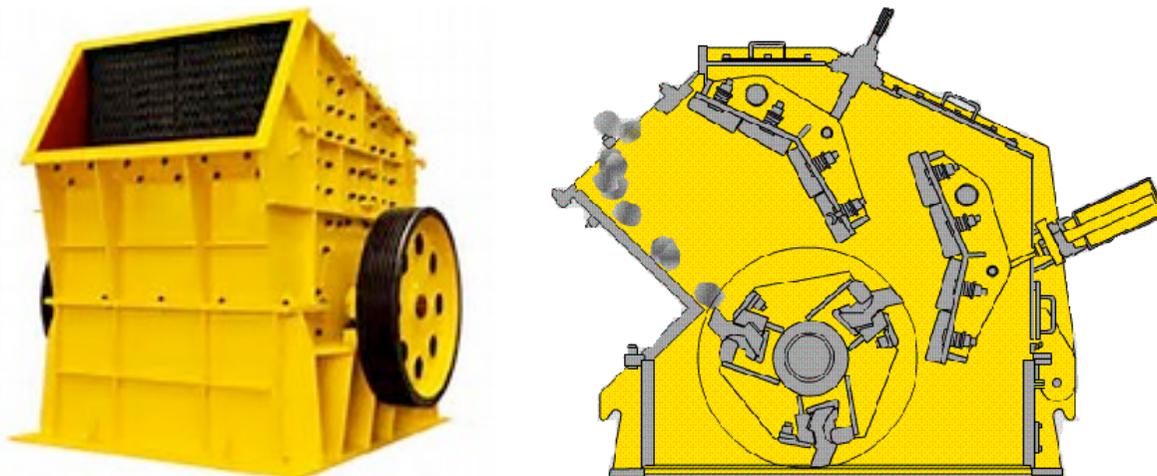


12.12 Chancado Terciario

Para muchos circuitos de chancado de roca, gravilla y minerales duros, la etapa de chancado final es de interés especial.

El *tamaño final* y la *forma* se realiza en esta etapa influyendo en el valor del producto final. Hay solo dos opciones para los circuitos de roca dura, los chancadores de cóno o los de impacto de eje vertical VSI (Vertical Impact Shaft). Ver figura 47.

Figura 47 Chancador de impacto VSI



12.12.1 Dimensionamiento

Los chancadores terciarios son normalmente dimensionados a partir de los siguientes datos:

- ✚ Tamaño máximo de alimentación (Tamaño promedio de salida en chancado secundario).
- ✚ Capacidad de procesamiento (capacidad de alimentación desde chancado secundario).
- ✚ Forma del producto (ajuste y velocidad de operación).

A cierto tamaño de alimentación, sabiendo su capacidad, podemos seleccionar la máquina adecuada.

12.13 Chancado en Húmedo previo a Molienda

Water Flush (Chorro de Agua), es un proceso de chancado patentado para producir un producto más escamoso y más fino por chancadores de cóno especialmente diseñados. El método está creado para aplicaciones mineras que comprenden:

- ✚ Chancado secundario.
- ✚ Manufacturación de arena.
- ✚ Chancado fino de mineral metálico previo a la lixiviación.

La descarga típica del chancador es un lodo o pulpa con 30 a 70% de sólidos. La alimentación escamosa se tranca fácilmente en el siguiente molino de trituración. Water Flush puede ser una alternativa al chancado convencional previo a las operaciones de molienda en aplicaciones con problemas de formación de tamaño críticos en los circuitos de molienda modelo AG/SAG y molino de pebbles. Ver figura 48.

Figura 48 Chancadora Wáter Flash



12.14 Harneros Clasificación en Seco

Los harneros son los equipos que se usan comúnmente en las etapas de chancado y molienda para control de tamaño por medio de la separación del mineral de alimentación en dos o más productos cada uno de tamaños similares entre sí. Esta separación se puede realizar en seco o en húmedo. Ver figura 49.

Figura 49 Harnero vibratorio

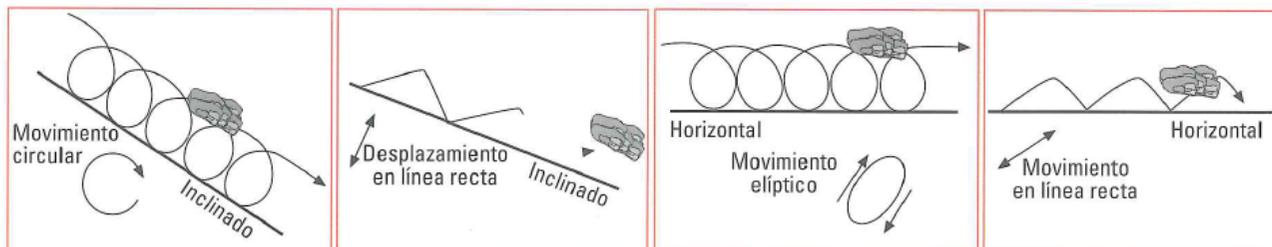


Es sabido que ni los chancadores ni los molinos son equipos demasiado exactos en su trabajo de reducción de tamaño y normalmente se generan muchas fracciones de diferentes tamaños que quedan mal clasificadas y presentes erróneamente en la fracción de oversize o descarga. Utilizando el control óptimo de tamaño a través de equipos de clasificación, el resultado puede mejorar tanto en cuanto a la capacidad, como al tamaño y forma de la partícula.

El rendimiento de los harneros se caracteriza por tres parámetros:

- 📏 Movimiento.
- 📏 Inclinación.
- 📏 Medios de clasificación.

Tipos de movimiento e inclinación de harneros:



12.14.1 Harneado por Estratificación

Formando un lecho de material sobre la malla de un harnero, el material se estratificará cuando el movimiento del harnero reduzca la fricción interna en el material. Esto significará que las partículas más finas podrán pasar entremedio de las de mayor tamaño, dando lugar a una separación notoria entre tamaños de partículas.

12.14.2 Harneado por Caída Libre

Si se utiliza la doble inclinación que se usa para estratificación, desde 10-15° hasta 20-30°, se tiene a las partículas pasando en caída libre y significa que no se está creando una capa de partículas en la malla del harnero. Las partículas se harnearán en forma directa a través de la malla, dando mayor capacidad o una instalación más compacta. Su uso óptimo es cuando una gran cantidad de finos tiene que ser retirada en forma rápida.

12.15 Modelos de harneros

Existen variados modelos de harneros que se pueden reducir a cuatro tipos, como los que se muestran a continuación. De éstos, el 80% de los que se usan mundialmente en minería son del tipo de harneros por estratificación de inclinación simple. Los demás son modelos de inclinación doble, triple o múltiple, en donde el colado por estratificación y caída libre se combinan para diferentes aplicaciones.

12.15.1 Inclinación simple (Figura 50)

- Harneado de estratificación.
- Movimiento circular.
- Inclinación de 15°.
- Se mantiene como líder para harneado selectivo.

Figura 50 Harnero de inclinación simple



12.15.2 Inclinación doble: (Figura 51)

- Harneado por caída libre.
- Compacto, su alta capacidad se paga por selectividad menor.
- Típico en circuitos de plantas de chancado.

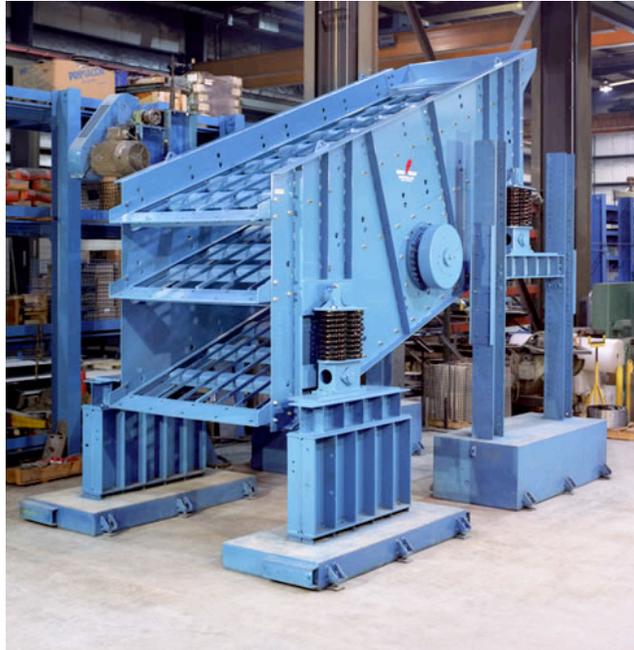
Figura 51 Harnero de inclinación doble



12.15.3 Inclinación triple: (Figura 52)

- Combina capacidad y selectividad.
- Harnero de control típico para fracciones de productos diferentes.

Figura 52 Harnero de inclinación triple



12.15.4 Inclinación múltiple: (Figura 53)

- Harnero efectivo de capa delgada.
- Popular en minería de carbón y metálica.

Figura 53 Harnero de inclinación simple



12.16 Selección de Medios de Clasificación

La selección del tamaño correcto y tipo de harnero es importante. De igual importancia es la selección del medio de harneo. Esto se relaciona no solo con una apertura correcta respecto al *tamaño de corte*, sino que al desgaste de operación de estos harneros. Así tenemos paneles de *Goma o Poliuretano*, ver tabla 12.

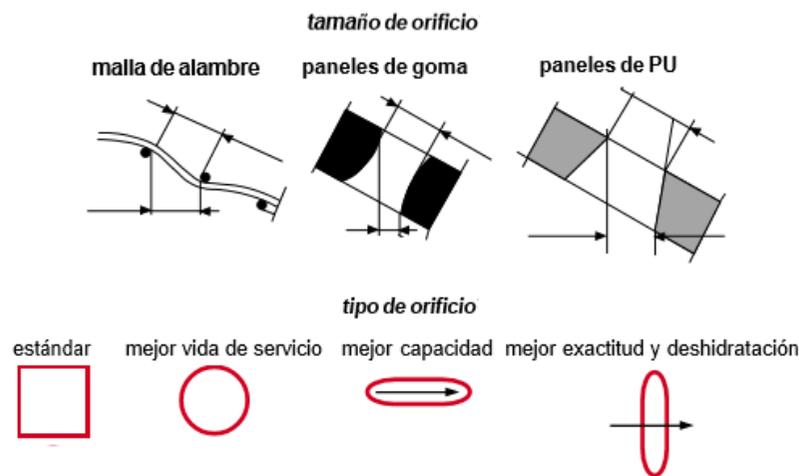
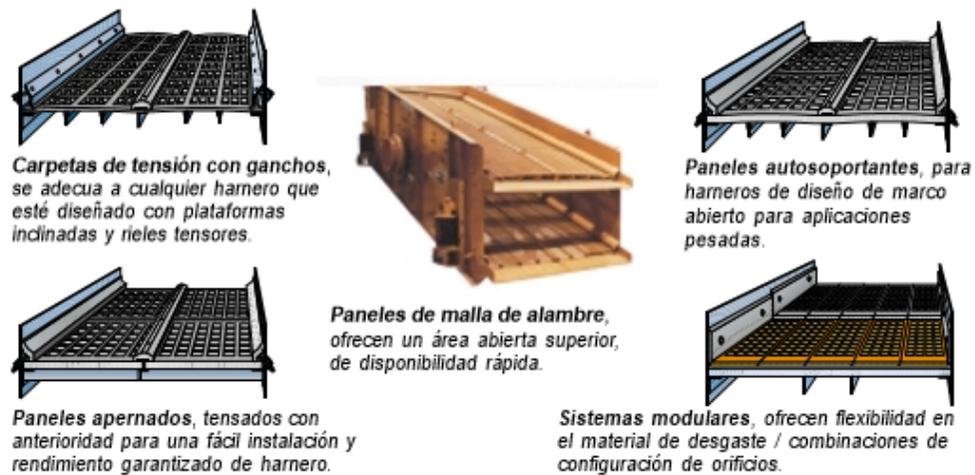
Tabla 12 Selección de paneles

Tamaño de alimentación	Seleccionar	Razón
> 35 mm seco	Goma 60 sh	Absorbe el impacto. Resistente a la abrasión por deslizamiento.
< 0-50 mm húmedo	Poliuretano	Muy bueno contra la abrasión por deslizamiento
< 40 mm seco/húmedo	Goma 40 sh (suave)	Muy flexible, evita el engravillado

12.16.1 Tipos de Panel

Existen varios tipos de paneles, con distintos tamaños y tipos de orificios. Figura 54 y tabla 13.

Figura 54 Tipos de paneles



Paneles con distintos tipos de orificios.

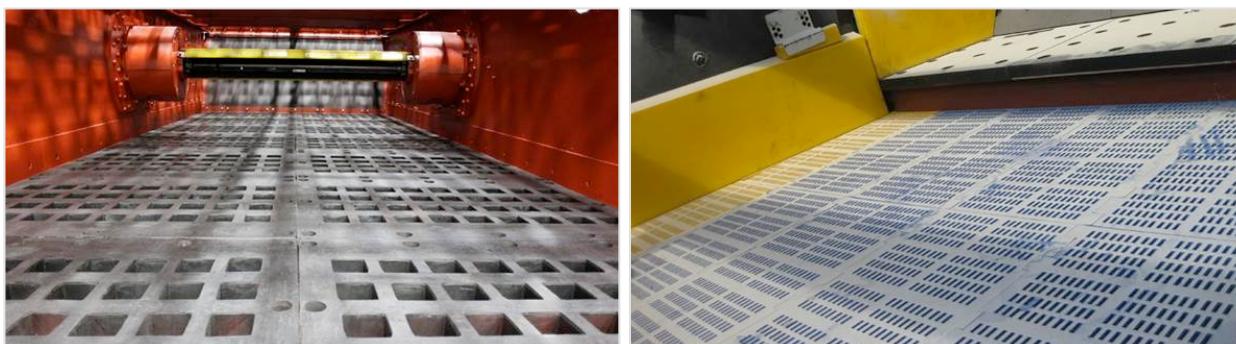


Tabla 13 Equivalencia en tamaño de partícula

Tamaño de partícula - Malla o Micrón					
Malla	Micrón	Malla	Micrón	Malla	Micrón
2½	8000	14	1180	80	180
3	6700	16	1000	100	150
3½	5600	20	850	115	125
4	4750	24	710	150	106
5	4000	28	600	170	90
6	3350	32	500	200	75
7	2800	35	425	250	63
8	2360	42	355	270	53
9	2000	48	300	375	45
10	1700	60	250	400	38
12	1400	65	212	500	25

12.16.2 Disposición de Harneros

Los harneros van dispuestos inmediatamente bajo la descarga de una correa transportadora o un equipo de chancado o trituración, o en cualquier lugar donde se requiera de un material clasificado. Ver figura 55, 56 y 57.

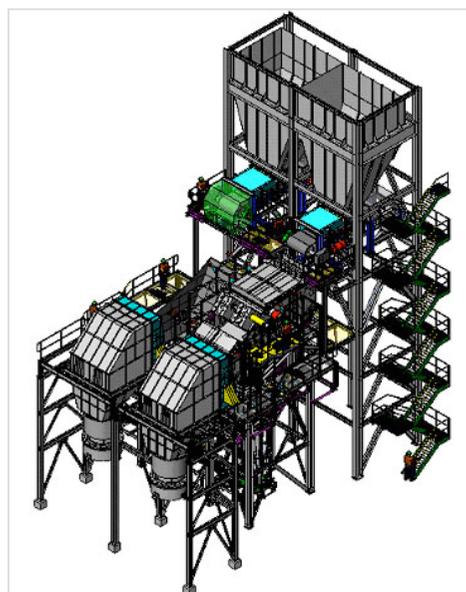
Figura 55 Disposición de harnero bajo correa transportadora



Figura 56 Disposición de harnero bajo molino de barras



Figura 57 Disposición de harnero bajo chancador



Sección 13

MANEJO DE MINERALES

El transporte de mineral en seco se realiza por medio de cintas o correas transportadoras. El transporte de material mediante cintas transportadoras data de aproximadamente el año 1795. Hoy en día las correas transportadoras se han convertido en el método más eficiente para el transporte de material. Su ventaja básica sobre otros tipos de transporte, como son los camiones, trenes, etc., es su variada aplicabilidad a los diferentes requerimientos de la industria. Las cintas transportadoras no tienen competencia en cuanto a capacidad de transporte. A una velocidad de 5 m/s y un ancho de cinta de 60 pulgadas se pueden descargar más de 100 toneladas métricas por minuto de material; esto quiere decir 6.000 ton/hr de material. Ver figura 58.

Figura 58 Sistema de correas transportadoras



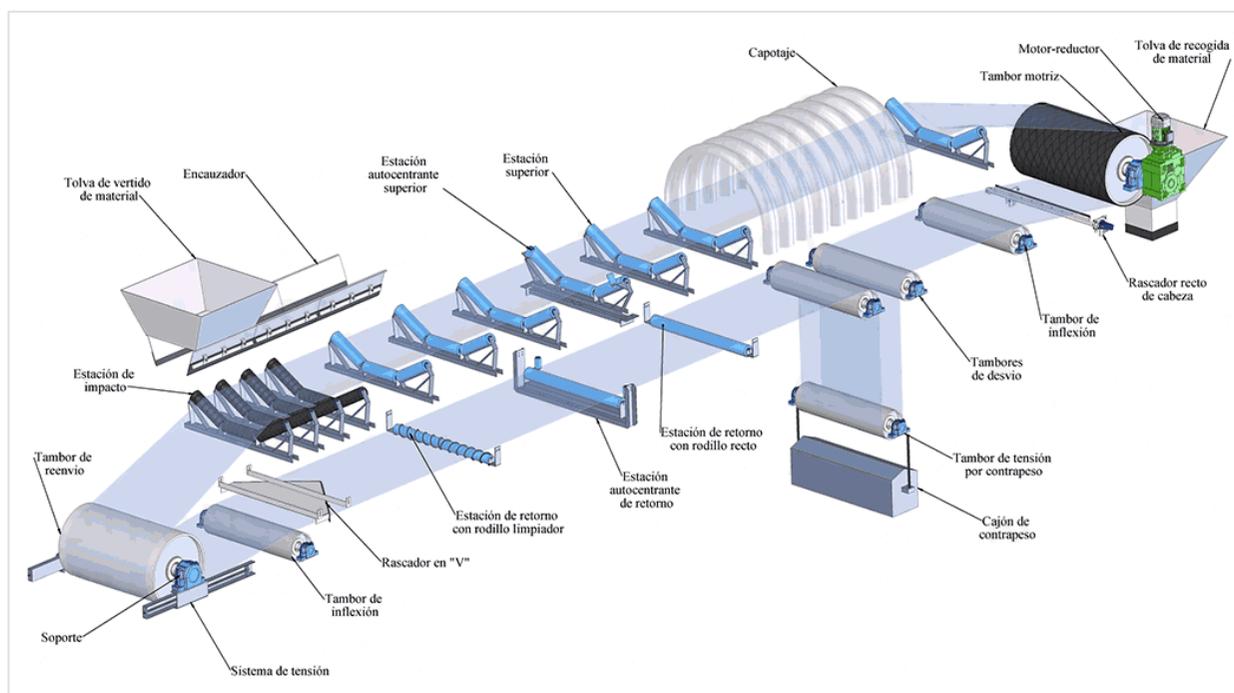
Las correas transportadoras pueden seguir la naturaleza del terreno, debido a la habilidad que poseen para seguir el curso de pendientes y gradientes, de hasta 18°. Con el desarrollo de tensiones elevadas, materiales sintéticos y/o miembros reforzados de acero, un tramo del transportador puede extenderse por millas de terreno con curvas horizontales y verticales sin ningún problema. El sistema de transportadores de cintas opera en su propia cama de polines, los cuales requieren un mínimo de atención. Su reparación o reemplazo es simple y fácil, y el costo de su mantención rutinaria es mínimo.

El bajo peso de carga y de la estructura de las correas transportadoras por metro lineal se consigue con un diseño estructural simple que permita atravesar terrenos escabrosos o pendientes muy pronunciadas. La estructura de las correas transportadoras requiere una pequeña excavación, permitiendo el afianzamiento a tierra de ésta, de la forma que se estime como la más conveniente. Debido a que la estructura es compacta, requiere un mínimo de protección.

La necesidad de múltiples puntos de descarga son características importantes en la minería o en excavaciones de frentes de operación de minas subterráneas, en donde dos o más puntos de alimentación de mineral pueden dirigirse a un mismo punto central de descarga. En el punto final de la descarga, el material puede ser enviado en diversas direcciones desde la línea principal. El material también puede ser descargado en cualquier punto a lo largo del transportador mediante la instalación complementaria para este efecto.

Las líneas modulares de correas transportadoras o transportadoras de cintas, pueden ser extendidas, acortadas o reubicadas con un mínimo de trabajo y tiempo. El diseño propio de los sistemas de correas transportadoras ha requerido reducir el control a botones de accionamiento en los diferentes tramos del transportador, y ha permitido que puedan ser supervisados desde los paneles permanentes de control operacional. La estructura y componentes básicos de una correa transportadora se indica en la figura 59.

Figura 59 Estructura y componentes típicos de una correa transportadora



13.1 Componentes de Correa Transportadora

Definición de componentes pertenecientes a las correas transportadoras:

Estructura Soportante: la estructura soportante de una correa transportadora está compuesta por perfiles tubulares o angulares, formando en algunos casos verdaderas puentes que se fijan, a su vez, en soportes o torres estructurales apernadas o soldadas en una base sólida.

Elementos deslizantes: son los elementos sobre los cuales se apoya la carga, ya sea en forma directa o indirecta, perteneciendo a éstos los siguientes:

Correa o banda o cinta: la correa o banda o cinta propiamente tal, que le da el nombre a estos equipos, tendrá una gran variedad de características, y su elección dependerá en gran parte del material a transportar, velocidad, esfuerzo o tensión a la que sea sometida, capacidad de carga a transportar, etc.

Polines: generalmente los transportadores que poseen estos elementos incorporados a su estructura básica de funcionamiento, son del tipo inerte, y la carga se desliza sobre ellos mediante un impulso ajeno a los polines y a ella misma.

Elementos motrices: el elemento motriz de mayor uso en las correas transportadoras es el del tipo eléctrico, variando sus características según la exigencia a la cual sea sometido. Además del motor, las poleas, los engranajes, el motorreductor, son otros de los elementos que componen el sistema motriz.

Elementos tensores: es al elemento que permitirá mantener la tensión en la correa o banda, asegurando el buen funcionamiento del sistema.

Tambor motriz y de retorno: la función de los tambores motrices o de retorno es funcionar como poleas, las que se ubicarán en el comienzo y fin de la cinta transportadora. Para su selección se tomarán en cuenta factores como: potencia, velocidad, ancho de banda, entre otros.

13.2 Selección de una Correa Transportadora

Para la correcta selección de la correa transportadora, además de tenerse en cuenta todo lo analizado para los componentes estructurales y no estructurales de un sistema transportador, se deben considerar otros factores que definiremos a continuación.

Existe una gran variedad de compuestos para las cubiertas de las correas transportadoras y los mismos son seleccionados en función de su compatibilidad con el servicio que la correa debe cumplir y con el medio ambiente dentro del cual debe operar. Los elastómeros más comúnmente utilizados en la fabricación de las correas transportadoras son goma, PVC y uretano. Cada uno de estos materiales posee ventajas y desventajas. Por ejemplo, para el transporte de minerales muy abrasivos la correcta selección recae sobre correas de goma por su excelente resistencia a la abrasión y gran resiliencia, eventualmente puede utilizarse también el uretano. Para el caso de minerales no abrasivos como el carbón o el potasio, granos, productos de la madera, etc., el PVC posee un excepcional desempeño. Particularmente en el caso de correas de tejido sólido de poliéster y PVC, donde la cobertura está formada por PVC y fibras superficiales de la carcasa de poliéster que son sacrificables y le dan gran resistencia a la superficie de la correa.

La característica de retardante de llama de una cobertura es altamente deseable en aquellos casos donde la seguridad es punto fundamental en la selección de la correa, tal como minería subterránea. Tanto la goma como el PVC pueden ser formulados de modo tal que posean esta característica.

La característica antiestática de una correa es importante para aquellos casos donde el ambiente de operación presente peligro de deflagración por descargas estáticas de energía. Tanto la goma como el PVC cumplen perfectamente con estos requisitos si son fabricados para tal fin.

Para transportadores sobre cama continua, es importante que la cara inferior de la correa posea un bajo coeficiente de fricción.

Para la selección de la cubierta es importante también considerar la reacción química o resistencia que ésta presente a elementos tales como aceites, ácidos, grasas animales, ozono, etc.

El rango de temperatura dentro del cual opera una correa es importante, porque cada compuesto tiene diferentes resistencias a temperaturas máximas y mínimas de operación.

13.3 Sistemas de Carga en Correas Transportadoras

Una correcta selección de la forma de depositar la carga sobre la correa asegura un prolongamiento de la vida de la misma, ya que es en esta zona de carga donde la correa sufre los mayores problemas de desgaste y sobreesfuerzo. Normalmente la transferencia del material transportado hacia la correa se realiza a través de lo que se conoce como *chute de carga*. Ver figura 60.

Figura 60 Chute de carga normal



Para el diseño de la misma y de todos los elementos del sistema que intervienen en la carga de la correa, se deben tener en cuenta algunas consideraciones:

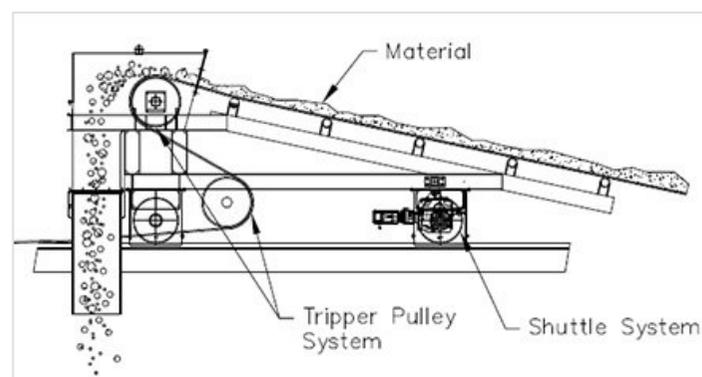
- Que el material transportado entre en contacto con la correa en la misma dirección de marcha y a la misma velocidad que aquella, evitando desgastes prematuros.
- Reducir al mínimo la altura de caída del material sobre la correa, para evitar daños prematuros en la cobertura de la misma.
- Que el material transportado se deposite en forma centrada sobre la correa, para que la misma no se vea sometida a esfuerzos laterales que ocasionan desgaste y no tienda a desviarse lateralmente, lo que ocasiona problemas serios de alineamiento.
- En transportadores inclinados la zona de carga debe ser horizontal.
- En cargas con alto peso específico se deben utilizar rodillos portantes amortiguadores en la zona de carga.
- Si el material transportado presenta diferentes granulometrías, es aconsejable la utilización de un harnero en la descarga a la correa de modo que permita que la parte más fina del material se deposite primero sobre la correa, haciéndole de colchón a la parte de granulometría más gruesa.
- La apertura del chute hacia la salida de la carga debe ser divergente en la dirección de marcha de la correa, favoreciendo con ello el acomodamiento de la carga sobre la correa y evitando que el material se atore a la salida de la parte metálica del chute.
- La estructura metálica de la tolva o su chute de descarga nunca debe estar en contacto con la correa, para evitar daños mecánicos sobre la misma. La distancia mínima entre armazón de tolva y correa (faldón o guardera) no debe ser menor a 20 a 30 mm. Esta distancia indicada debe ir creciendo en el sentido de marcha de la correa para evitar que los materiales de granulometría alta se atasquen entre la estructura y la correa.
- Es recomendable el uso de faldones laterales tomados de la estructura metálica de la tolva o chute y en contacto con la correa para aquellos casos de materiales de granulometría fina. Estos faldones o guarderas deben ser de caucho, sin inserciones de tela, con espesores que oscilan entre los 5 a 10 mm. Los mismos deben ser regulables en cuanto a su acercamiento o alejamiento de la correa para poder ir compensando desgastes. El largo de estos faldones o guías laterales de goma va a depender de la velocidad de alimentación y del plano de operación del transportador. Como regla general para transportadores horizontales se toma un largo equivalente a la distancia que recorre la correa en 1,4 a 1,6 segundo. Para transportes inclinados el largo de la guía debe ser mayor como así también para aquellos casos donde la velocidad de caída del material sea menor a la velocidad de la correa. También, como regla general, puede decirse que las guías deben llegar hasta el punto donde la velocidad de la carga y la de la correa se igualen.
- Los tríos de rodillos ubicados debajo de la zona de carga deben tener menor distancia entre ellos que en el resto del transportador. Para el caso de transportadores con deslizamiento sobre camas, es recomendable que, en la zona de carga, la cama sea reemplazada por rodillos horizontales con poca separación entre ellos para evitar deteriorar la banda por el impacto producido por la carga del material.
- En caso de cargas irregulares que hacen que la correa vaya en algunos tramos con carga total y en otros completamente vacía, ocasionando problemas de alineamiento, es recomendable el uso de alimentadores que logren uniformar la carga, sobre todo el largo de la correa. El tipo de alimentadores a utilizar va a depender del tipo de carga de que se trate y pueden ser de plancha inclinada por arrastre, de anillo sin fin, barras, cadena, correa, pudiendo ser fijos, vibratorios o rotativos. La tolva o chute de carga de mineral a la correa transportadora debe estar ubicada siempre después de la distancia de transición respecto del tambor de reenvío en el sentido de marcha de la correa.

13.4 Sistemas de Descarga de Correas Transportadoras

Lo más frecuente es que una correa transportadora sea descargada en el tambor de accionamiento, normalmente terminal o de cabeza, idealmente sobre un colchón de mineral de una tolva o chute de descarga o en forma directa sobre otra correa transportadora a través de una tolva o chute de descarga que permite seleccionar la dirección de caída hacia uno u otro lado. En estos casos el material describe una trayectoria perfectamente calculable que permite a los proyectistas diseñar los flujos de material. Esta trayectoria va a depender de la granulometría del material, el grado de adherencia de éste con la correa y de la velocidad de la correa, entre otros factores.

La descarga puede ser realizada también a través de un sistema de tambores dobles denominado carro de descarga o tripper. Consiste en una estructura fijada a la correa transportadora en un plano más elevado, donde se montan los dos tambores, el superior más avanzado respecto al sentido de marcha y el inferior más atrasado respecto al mismo sentido. Estos trippers pueden ser fijos o móviles. En el primer caso la descarga se produce en un punto predeterminado del sistema y puede ser realizada hacia ambos lados del equipo transportador a través de tolvas con salidas direccionales. Estas tolvas también permiten la alternativa de que la carga vuelva a ser depositada sobre la misma correa, luego de abandonado el sistema, y continúe su trayectoria normal hacia otro tripper fijo o hacia el final del transportador. Ver figura 61.

Figura 61 Tripper de descarga



En los carros móviles la estructura se encuentra montada sobre ruedas que le permiten desplazarse sobre rieles laterales a lo largo del transportador y descargar el material en cualquier punto del mismo.

El movimiento del carro puede ser realizado a través de motorización propia, por la misma correa o por cable.

13.5 Fundamentos de Diseño Correas Transportadoras

Muchos ingenieros y diferentes usuarios de correas transportadoras o transportadores de cinta, están familiarizados con la teoría y los fundamentos de la transmisión por correa. Un análisis de los aspectos generales de los transportadores de cintas permite determinar que la transmisión por correa provee de una base para el diseño de los transportadores de cintas y elevadores de cintas. En ambos transportadores la transmisión por correa es transmitida por fricción entre la cinta y los tambores o poleas de accionamiento. Ciertamente otros elementos del diseño, que también colaboran con el sistema de transmisión, son determinantes tanto en la potencia de la transmisión como en la cantidad de material transportado. La similitud entre ambos casos permite analizar y discutir si los fundamentos del diseño de cintas están restringidos específicamente tanto a los transportadores como elevadores.

13.5.1 Información Requerida Para el Diseño y Selección de una Correa Transportadora

Son muchas las consideraciones a ser tenidas en cuenta para la correcta selección de una correa transportadora. A continuación, se brinda una lista de los datos a obtener para la selección final, debiéndose considerar que a veces es necesario modificar un requerimiento a los efectos de satisfacer otro más importante.

- 1) Esquema de la instalación.
- 2) Material transportado.
 - Denominación del producto.
 - Descripción.
 - Densidad.
 - Granulometría.
 - Presencia de aceite o grasas y químicos.
 - Temperatura del producto.
 - Necesidad de resistencia al fuego y antiestaticidad.
 - Humedad.
 - Grado de abrasión.
 - Temperatura ambiente.
- 3) Capacidad máxima de transporte.
- 4) Ancho de la correa.
- 5) Distancia entre centros de tambores.
- 6) Desnivel entre centros de tambores.
- 7) Diámetro de tambores de mando y reenvío.
- 8) Mando.
 - Tambor simple o tambor doble.
 - Angulo de abrace de la correa al tambor.
 - Superficie del tambor de mando, recubierta o no.
 - Localización del mando.
 - Tipo de arranque empleado.
- 9) Sistema tensor.
 - Tipo.
 - Localización.

10) Rodillos portantes o polines.

- Material de construcción.
- Diámetro.
- Angulo de la cuna.
- Número de polines por estación.
- Distancia entre estaciones.

11) Polines de retorno.

- Material de construcción.
- Diámetro.
- Distancia entre polines.

12) Velocidad de la correa.

13) Potencia instalada.

14) Sistema de carga.

- Esquema.
- Tipo.
- Altura de caída.
- Angulo de caída.

15) Sistema de descarga.

- Esquema.
- Tiempo.

16) Horas de trabajo al día.

17) Sistema de empalme.

18) Mínima temperatura ambiente promedio.

13.5.2 Tipos de Correas Transportadoras

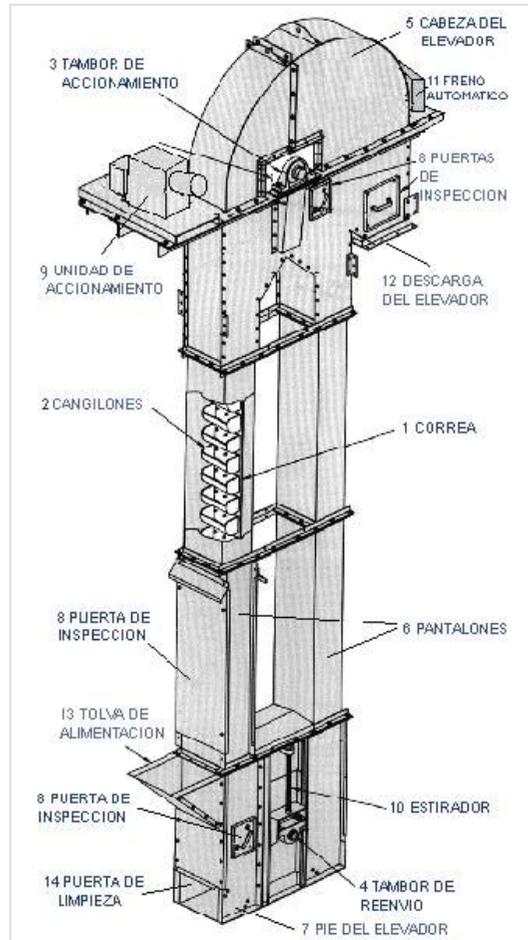
Existen variados tipos de correas transportadoras y una variación de los mismos, pero los principales son: Ver figura 62 y 63.

- Cinta transportadora.
- Elevador de capachos.
- Tornillo helicoidal.

Figura 62 Tornillo helicoidal



Figura 63 Elevador de capachos



PROCESO DE MOLIENDA

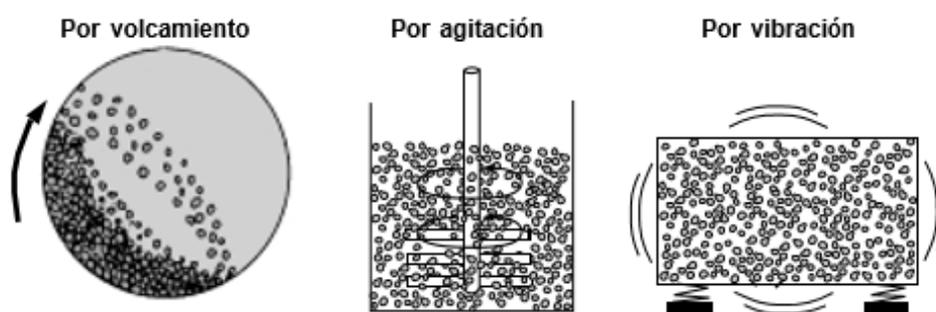
La reducción de tamaño por chancado tiene una limitación de tamaño para los productos finales. Si necesitamos mayor reducción, digamos 5-20 mm, deberemos utilizar el proceso de *molienda*. La molienda es un proceso de reducción a polvo o pulverización utilizando las fuerzas mecánicas de impacto, compresión, corte y frotamiento de la roca. Las dos finalidades principales para un proceso de molienda, son:

- ❖ Liberar minerales individuales atrapados en los cristales de la roca (mineral metálico) y subsecuentemente dar paso al enriquecimiento en forma de separación.
- ❖ Producir finos (o relleno) desde fracciones de mineral aumentando la superficie específica.

Existen tres métodos de molienda: Ver figura 64.

- 📊 Por volcamiento.
- 📊 Por agitación.
- 📊 Por vibración.

Figura 64 Métodos de molienda



14.1 Molienda Convencional

La liberación de las especies minerales es el proceso unitario de mayor relevancia práctica en todo circuito de procesamiento de minerales, por cuanto demanda la principal inversión de capital, incide fuertemente en los costos unitarios del proceso metalúrgico determina la capacidad máxima de tratamiento e influye en la rentabilidad de la operación.

A pesar de su reconocida ineficiencia energética frente a lo que hoy día se conoce, los molinos de bolas, que operan en circuito cerrado con clasificadores hidráulicos, han sido la alternativa tecnológica tradicionalmente seleccionada para molienda fina de minerales, sea en etapas únicas o múltiples, integrados con molinos de barras o molinos SAG.

La principal ventaja para el uso de los sistemas convencionales de conminución con chancado-molienda (*chancadores primarios, secundarios, terciarios, cuaternarios, molinos de barras, molinos de bolas*) reside en el menor consumo de energía respecto a los procedimientos no convencionales (*molienda autógena, molienda semiautógena*). Esto debido a que las operaciones de trituración presentan mayor eficiencia en aplicación de energía en relación a su aplicación en molienda que posee mecanismos que generan significativa pérdida de energía por acción entre medios moledores y los revestimientos.

Los procesos de reducción de tamaño se cuantifican en términos de la energía consumida durante la operación misma del equipo de conminución. Este enfoque resulta ser bastante lógico, ya que tales operaciones son las responsables en gran medida del elevado costo, por consumo de energía, de las operaciones involucradas en el procesamiento de minerales. De esta manera, la información es interpretada casi exclusivamente en términos de relaciones empíricas de energía versus reducción de tamaño o más conocidas como las *Leyes de la Conminución*.

La molienda convencional se realiza en dos etapas, utilizando habitualmente 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.

14.1.1 Tipos de Molinos

14.1.1.1 Molienda Autógena(AG)

La molienda autógena se describe como aquella molienda en la que no se usan medios de molienda de acero (bolas o barras), sino el mismo material que está siendo molido. La atracción de la molienda autógena es que reduce los costos de operación que proviene principalmente del rebajado consumo de acero, eliminación de la contaminación química por el hierro desgastado, disminución en el uso de reactivos químicos. Así mismo se ha detectado un consumo de potencia de 5 a 25% mayor por tonelada de mineral molido en molienda autógena, comparada con la molienda clásica.

La molienda autógena (AG) o semi-autógena (SAG), es empleada en molienda primaria. La molienda de pebbles (rechazo) es normalmente utilizada en molienda secundaria.

Ventajas de los molinos AG: Ver figura 65.

- Mejora la estructura del mineral obtenido.
- Buena liberación con un mínimo de finos.
- Reducción de instalaciones de manejo, clasificación, almacenamiento intermedio, etc. (Ahorro de equipos).
- Relaciones de reducción de 1000:1 (suprimiendo varias etapas de chancado y molienda).
- Reducción de costes de mantenimiento.
- Contaminación de la carga baja.

Figura 65 Molino AG



14.1.1.2 Molino SAG (semiautógena)

Es un molino de gran capacidad que recibe material directamente del chancador primario con diámetros entre 20 y 35 centímetros, a partículas con diámetros entre 150 y 155 micrones. El molino tiene en su interior bolas de acero de manera que, cuando el molino gira, el material cae y se va moliendo por efecto del impacto. La mayor parte del material que sale de este molino pasa a la etapa de flotación para obtener el concentrado de cobre, y una menor proporción vuelve a la molienda en el molino de bolas para seguir moliéndolo. Ver figura 66.

Los Molinos SAG (Molino semiautógeno) son empleados en molienda primaria. Utilizan una combinación de mineral y una pequeña cantidad de bolas de acero (entre el 4 y el 15 % del volumen del molino). Los mejores rendimientos se encuentran cuando el porcentaje varía entre el 6 y el 10 %.

La molienda semi-autógena pasó a ser parte esencial de la producción en las principales mineras de cobre del mundo, porque procesa grandes caudales de mineral supliendo a varios subprocesos de líneas productivas anteriores.

La mayor parte del material que sale de este molino pasa a la etapa de flotación para obtener el concentrado de cobre, y una menor proporción vuelve a la molienda en el molino de bolas para seguir moliéndose hasta conseguir el tamaño requerido para la etapa siguiente.

Se han venido diseñando los molinos autógenos y semiautógenos para molienda de minerales en plantas de alta capacidad de tratamiento. La molienda autógena se produce cuando no se utiliza ningún medio de molienda externo y es el propio mineral el que actúa como tal. El molino semiautógeno es una variante del mismo molino autógeno, pero que utiliza una carga mínima de bolas. Los molinos SAG se han utilizado principalmente en las plantas de procesamiento de oro, cobre y platino con usos también en el plomo, zinc, plata, y níquel.

Figura 66 Molino SAG



Los tamaños de los molinos de SAG diseñados, fabricados y puestos en operación en las diferentes plantas a través del mundo alcanzan ya tamaños de 18' de largo con 38' de diámetro con potencias de hasta 27.000 HP. Los molinos SAG ofrecen hoy día un

sistema de lubricación hidrostática y pueden acomodar un arreglo engranado o sin engranaje de la impulsión. Los molinos SAG son típicamente diseñados con parrillas de descarga y revestimientos metálicos para su cilindro y tapas.

La instalación de un molino SAG es una innovación de los últimos 20 años. Son equipos de mayores dimensiones y más eficientes que los anteriores y debido a su gran capacidad acortan el proceso de chancado y molienda. Muelen rocas más grandes, que vienen directamente del chancador primario.

El mineral se recibe directamente desde el chancador primario con un tamaño cercano a las 8 pulgadas y se mezcla con agua y cal. Aquí el mineral es reducido de tamaño gracias a la acción del mismo material mineralizado y por la acción complementaria de bolas de acero que se adicionan al interior del molino, bolas de 5 pulgadas de diámetro que aproximadamente ocupan el 12% de su capacidad. Dado el tamaño y la forma del molino, estas bolas son lanzadas en caída libre cuando el molino gira, logrando un efecto conjunto de chancado y molienda más efectiva y con menor consumo de energía, por lo que, el utilizar este equipo, no se requieren las etapas de chancado secundario ni terciario.

La mayor parte del material molido en el SAG va directamente a la etapa siguiente, la flotación, es decir, tiene la granulometría requerida bajo los 180 micrones, y una pequeña proporción debe ser enviado a un molino de bolas.

Una vez solucionados los problemas mecánicos y operativos iniciales de estos nuevos molinos, como la estabilidad de operación y la rotura de blindajes, entre otros problemas, se da comienzo a un aumento en los tamaños de los molinos que no ha parado hasta la fecha, habiéndose alcanzado diámetros de hasta 12 mt.

El desarrollo de la molienda autógena ha sido menos impetuoso, debido quizás a que estos molinos requieren características específicas del mineral a moler, que limitan su aplicación. Mientras que los molinos SAG pueden operar prácticamente con cualquier tipo de mineral al contar con una cierta carga de bolas y trabajan en circuito con un molino secundario de bolas.

Los molinos SAG producen en su descarga una fracción *crítica* que debe ser triturada en un chancador de cono para evitar la sobrecarga del molino, que de otro modo provocaría la recirculación de este tamaño crítico. En cualquier caso, la descarga de los molinos SAG debe ser clasificada en dos o tres fracciones, mediante harneros vibrantes que suelen ser dotados de vibración lineal y de disposición casi horizontal, tratando de reducir la altura de la instalación, ya que el molino descarga directamente sobre el harnero y la fracción fina con el agua de molienda debe ser recogida con un grupo de bombeo instalado debajo del harnero, lo cual obliga a costosas obras civiles. En ocasiones, para reducir la altura de las fundaciones, la descarga del molino SAG o AG es bombeada directamente hasta la alimentación del harnero, colocándose ésta sobre el nivel de la boca de alimentación del molino, reduciendo así la altura de las fundaciones.

No es tarea sencilla la elección de la abertura de la malla de clasificación del harnero, ya que por un lado debe clasificar a un tamaño relativamente fino, entre 3 mm y 12 mm, y por otro debe recibir altos tonelajes. Además, la superficie de harneado debe ser lo más resistente posible a la abrasión para maximizar la disponibilidad de este equipo, lo que obliga al empleo de elastómeros, con menor superficie libre de paso que las mallas de acero. Es un trabajo duro, con frecuencia no muy valorado al momento del diseño, y que ha sido causa de grandes problemas que provocan fuerte disminución de la disponibilidad del circuito de molienda provocada por un equipo complementario que puede ser considerado como una inversión menor.

14.1.1.3 Molino de Barras

Molino de Barras es una máquina formada por un cuerpo cilíndrico de eje horizontal que posee en su interior barras cilíndricas de acero sueltas, con una longitud aproximadamente igual a la del cuerpo del molino. Gira gracias a que tiene una corona en su estructura, la cual está acoplada a un piñón accionado por un motor generalmente eléctrico. A medida que gira el molino, las barras se elevan, rodando por las paredes, hasta alcanzar una altura determinada y luego caen sobre el material, con un efecto cascada. La rotura del material que se encuentra en el interior del cuerpo del cilindro y en contacto con las barras, es generada por frotamiento entre barras y superficie del cilindro, o entre barras, y por percusión como consecuencia de la caída de las barras desde cierta altura.

El material entra por el eje, en un extremo del cilindro y sale por el otro extremo o por el medio del cilindro, según las distintas formas de descarga: por rebalse (se emplea en molienda húmeda), periférica central y final (se emplean tanto en molienda húmeda como en seca).

Estos molinos son los encargados de la molienda fina, en la cual el material pasa por un tamiz de malla de 1 mm² de sección. La relación longitud/diámetro se encuentra acotada entre 1,2/1 y 1,6/1, los diámetros mayores oscilan entre 3 y 4 metros. La velocidad usual se encuentra entre el 60% y 68% de la *crítica*, la máxima puede alcanzar hasta el 70%. Ver figura 67.

De los tres tipos principales de molinos de barras que han existido en operación, solamente el molino con *descarga por overflow* es el de uso común hoy día. Los molinos de barras con molienda húmeda son los que se utilizan normalmente en las plantas de procesamiento de mineral. La molienda de barras en seco sólo se utiliza en algunas áreas muy específicas; sin embargo, se enfrenta con problemas y debe ser evitado excepto donde sea absolutamente necesario. Los molinos de barras funcionan a una velocidad más baja que los molinos de bolas puesto que las barras sólo ruedan y no se levantan para caer en cascadas, como ocurre en el caso de los molinos de bolas. Para una molienda equivalente un molino de barras consume menos acero que un molino de bolas, debido a la velocidad más baja y mejor contacto entre los medios de molienda y el mineral. La carga de barras dentro del molino se debe mantener en buenas condiciones de trabajo, y las barras rotas y usadas deben ser sacadas y eliminadas. Los molinos de barras requieren generalmente mayor atención del operador. Es importante que las barras se mantengan esencialmente paralelas unas a otras. Si las barras se alinean mal, se pierde la acción de molienda y, más importante que ello, se favorece el enredo entre las barras.

La velocidad de operación de un molino de barras está determinada por la velocidad periférica de la carga dentro del molino.

$$PS = 3,14 * D * RPM$$

Donde:

PS = Velocidad periférica (pies/minuto).

D = Diámetro interno del molino (pies)

RPM = Velocidad operación molino (rpm).

Generalmente los molinos de barras operan a una velocidad periférica entre 280 y 480 pies/ min. Los molinos de barras trabajan normalmente con un volumen de carga entre 35 y 65 % en volumen. Los límites en el nivel de la carga son fijados por el nivel de la abertura del *trunnion* de descarga del molino y por el nivel de carga máxima que no provoque que las barras dentro del molino se enreden.

Figura 67 Molino de Barras



14.1.1.4 Molino de Bolas

El molino de bolas es el molino industrial de uso más común, El molino de bola es una máquina eficaz para moler muchas piedras o rocas en polvo fino molino. Esta máquina de molienda es ampliamente utilizada en productos de silicato, nuevos materiales de construcción, cemento, fertilizante, el hierro y metales no ferrosos, vidrio y cerámica, materiales a prueba de fuego, y otras industrias.

El molino de bolas funciona entre 35% a 45% de nivel de llenado. Su medio de molienda está constituido por bolas de acero forjado, y generalmente opera en circuito cerrado con un clasificador.

Su principal característica es que permite pulverizar material más fino que otros tipos de molino. Esto es debido a que las bolas presentan más superficie de contacto con el mineral lo que permite alcanzar con mayor facilidad partículas más finas. Para molienda primaria se emplean bolas de 50mm a 100mm y para molienda secundaria bolas de 20mm a 50mm.

Los molinos de bolas constan con una descarga, una alimentación, una transmisión (motor desacelerador, engranaje de transmisión, control eléctrico) entre otros. Ver figura 68.

Los molinos de bolas son cilindros metálicos cuyas paredes están revestidas con corazas fabricadas en aleaciones de acero cromo-manganeso mejoradas, cuyas dimensiones interiores son hasta 16 pies x 24 pies, es decir, 4,9 m de diámetro por 7,3 m de largo, cuyo volumen interior está ocupado en un 36% de su capacidad por un collar de bolas de acero desde 1,0 hasta 3,5 o 4,0 pulgadas de diámetro, las cuales son los elementos de molienda. En un proceso que dura aproximadamente unos 20 minutos para, cada partícula de mineral que debe ser molida, el 80% del mineral es reducido a un tamaño máximo de 180 micrones.

La velocidad de rotación de los molinos de bolas está usualmente entre 4 a 20 rpm dependiendo del diámetro del molino. A mayor diámetro del molino menor velocidad de rotación. Si la velocidad de rotación es muy alta la fuerza centrífuga hace que las bolas se adhieran al cilindro del molino. La velocidad a la cual el molino empieza a operar como centrífuga es llamada *velocidad crítica*. Los molinos de bolas normalmente operan en un rango de velocidad crítica entre 65% y 75%. La velocidad crítica de un molino de bolas es:

$$CS = 76,63 \sqrt{D}$$

Donde:

CS = Velocidad crítica del molino (rpm/min)

D = Diámetro interno del molino (pies)

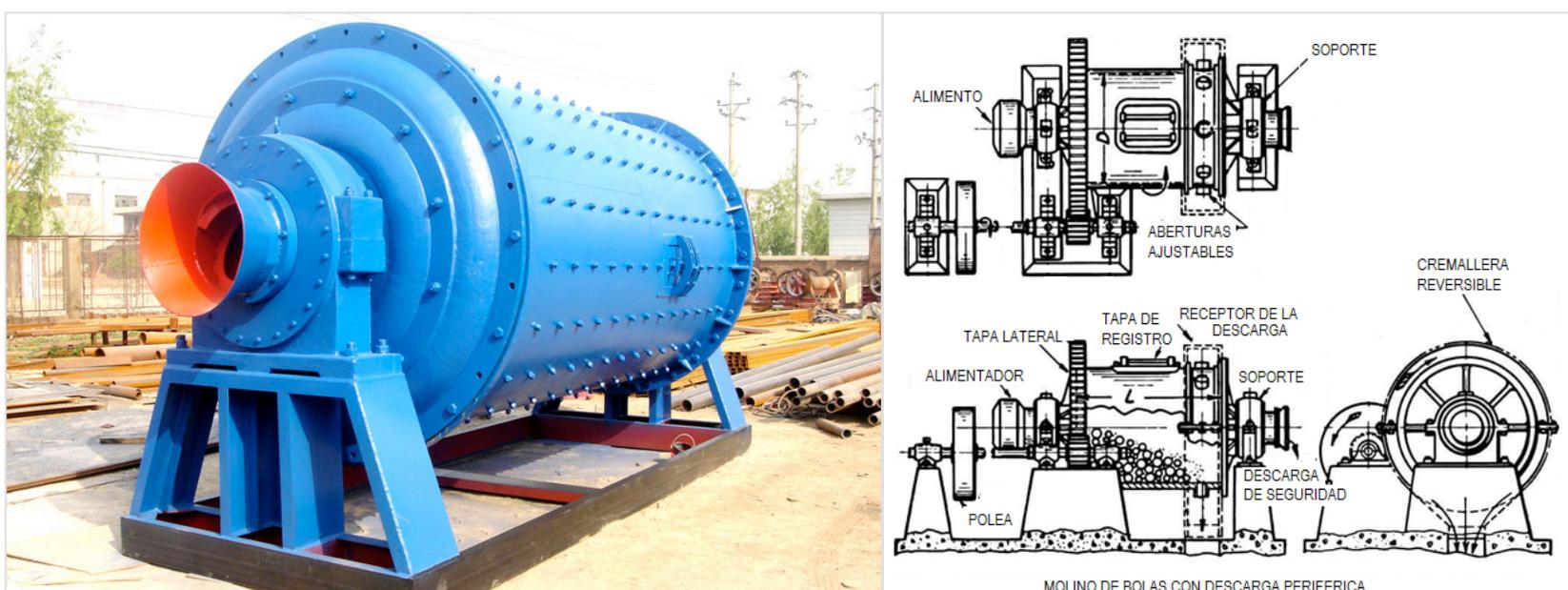
La velocidad crítica se utiliza para la determinación de la velocidad de funcionamiento ideal del molino de bolas.

Los molinos de bolas están diseñados para moler el mineral de hasta ¼” pulgada y llevarlo a un tamaño de partícula entre 20 a 75 micrones. Para obtener una eficiencia razonable los molinos de bolas deben operar en circuito cerrado con recirculación del sobretamaño obtenido. Habitualmente para clasificar el producto de los molinos de bolas en molienda de minerales se usan hidrociclones, pero también se conocen aplicaciones con horneros, clasificadores de espiral y clasificadores de aire.

Los revestimientos de los molinos, compuestos por corazas y lifters que dan a la superficie interior del molino un determinado perfil que hace levantar las bolas como medio moledor y al mismo tiempo avanzar el mineral hacia la descarga del molino. Van apernados al casco del molino y se deben sustituir cuando se desgastan y/o pierden el efecto levantador de las bolas. El molino gira y la molienda se realiza por efecto de cascada de bolas de acero al cromo o manganeso que cayendo desde una altura determinada producen el efecto de molienda o reducción de tamaño por efecto del impacto contra el mineral mezclado con agua.

Los molinos de bolas eran usados habitualmente, hace 30 años y más, en los circuitos barras-bolas como molinos de molienda secundaria para el producto de descarga del molino de barras. Hoy en forma regular son diseñados en los circuitos de molienda como molienda primaria, reemplazando el anterior circuito barras-bolas. Hoy, además, sigue siendo usado como molino de remolienda de los concentrados rougher de la flotación primaria.

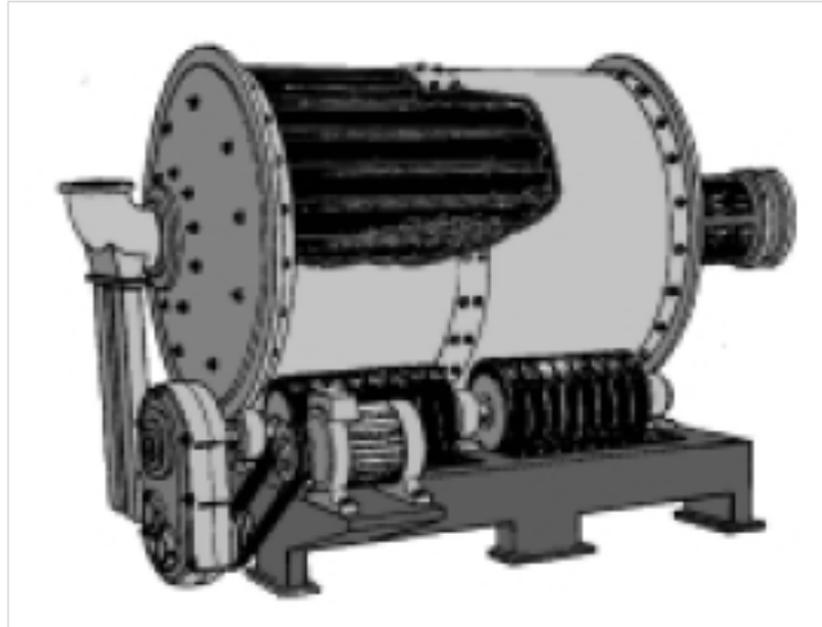
Figura 68 Molino de Bolas



14.1.1.5 Molino de Bolas con Rodillos de Goma

El molino de bolas con rodillo de gomas utiliza un medio de rodillos de caucho para su accionamiento. Ver figura 69.

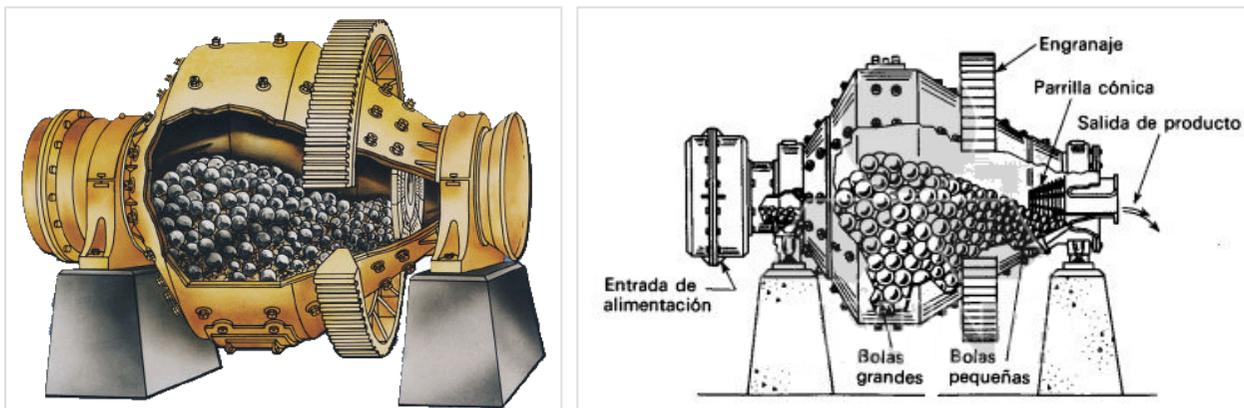
Figura 69 Molino de bolas con rodillos de goma



14.1.1.6 Molino de Bolas Cónico

El molino de bolas cónico, pertenece a la familia de molino de bolas con la particularidad que hacia el extremo de la descarga su geometría es cónica. Con esto favorece la graduación de la carga de bolas, para una óptima reducción de tamaño de partículas. Trabaja en seco o medio húmedo y solo se encuentra en tamaños pequeños e intermedios. Ver figura 70.

Figura 70 Molino de bolas cónico



14.1.1.7 Molino Vertical

En los molinos verticales, las bolas suben por medio de un tornillo vertical y caen por gravedad fuera de la circunferencia del tornillo. En esta maquinaria, la energía es usada solamente para subir las bolas no para moler. La molienda es hecha por la gravedad de la caída de las bolas y su impacto con otras bolas durante la caída por gravedad. Debido a que las bolas caen por la fuerza de gravedad, las bolas tienen que ser lo suficientemente grandes en su tamaño como para aplastar tanto las partículas de cal como las de arenillas. El tamaño normal de las bolas en este tipo de molino es de 1" de diámetro. Ver figura 71.

Figura 71 Molino vertical



Los molinos de verticales han demostrado ser más eficiente que los molinos de bolas en procesos de molienda con material grueso de hasta 6 mm y con productos finos por debajo de 20 micras. Este molino es la referencia para aplicaciones de remolienda de concentrados, aunque su implantación para proceso de gruesos a gran escala está siendo más paulatina. Los reparos de aplicar un molino vertical en procesos de molienda primarios y secundarios se deben en gran parte a que se necesitan más molinos para obtener la misma producción que se lograría con un solo molino de bolas de gran tamaño.

14.1.1.8 Molino de Medio Agitado

Los molinos horizontales tradicionales se han utilizado durante décadas en etapa de molienda fina, sin embargo, los molinos verticales agitados se han convertido recientemente en la opción preferida para aplicaciones en etapas de remolienda y molienda fina. Se ha desarrollado una línea de molinos verticales agitados, para una amplia gama de aplicaciones, lo que complementa su gama convencional. El molino vertical es agitado por un tornillo helicoidal doble conectado al sistema motriz por su parte superior, el que se encuentra sumergido en el medio de molienda. El medio de molienda más común son las bolas de acero, pero se pueden utilizar también bolas cerámicas, cylpebs y pebbles naturales. Desde 2014, operan tres molinos verticales modelo CSM1200 de 1200kW de potencia instalada, en la División Chuquicamata de Codelco. Estos equipos reemplazaron a los molinos de remolienda convencional existentes en la planta concentradora. Ver figura 72.

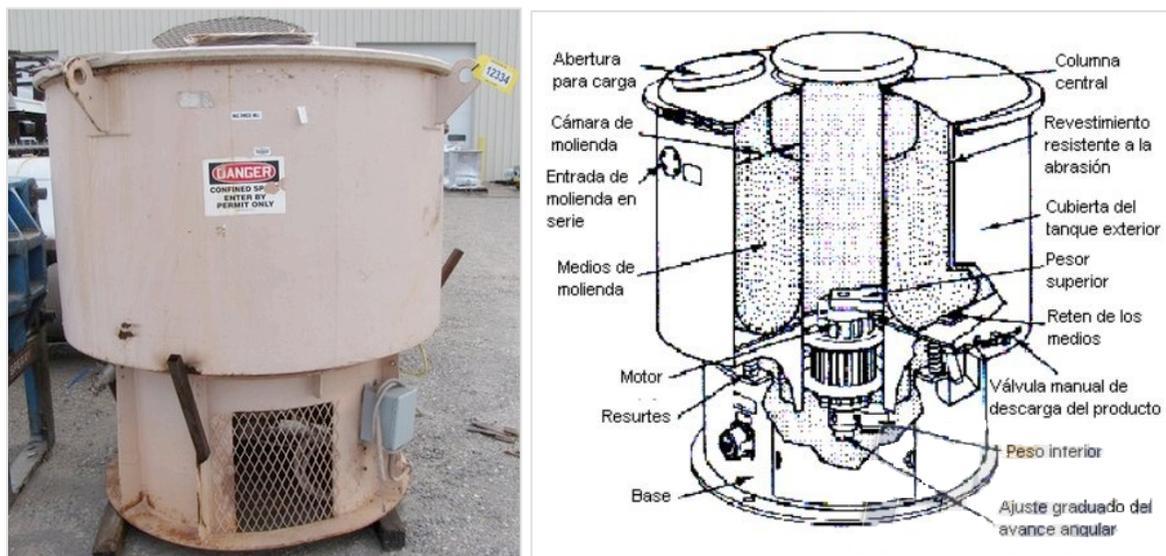
Figura 72 Molino de medio agitado



14.1.1.9 Molino Vibratorio

Los molinos vibratorios son trituradoras montadas en pedestal, que se cargan por la parte superior, que vibran por medio de un motor montado en la base y que tiene funcionamiento excéntrico. La cámara de trituración tiene un soporte de resortes para reducir al mínimo la vibración al piso. La trituración se lleva a cabo por medio de la vibración tridimensional a una frecuencia aproximada de 20 Hz de los medios contenidos, que generalmente son esferas o cilindros de alúmina. Figura 73.

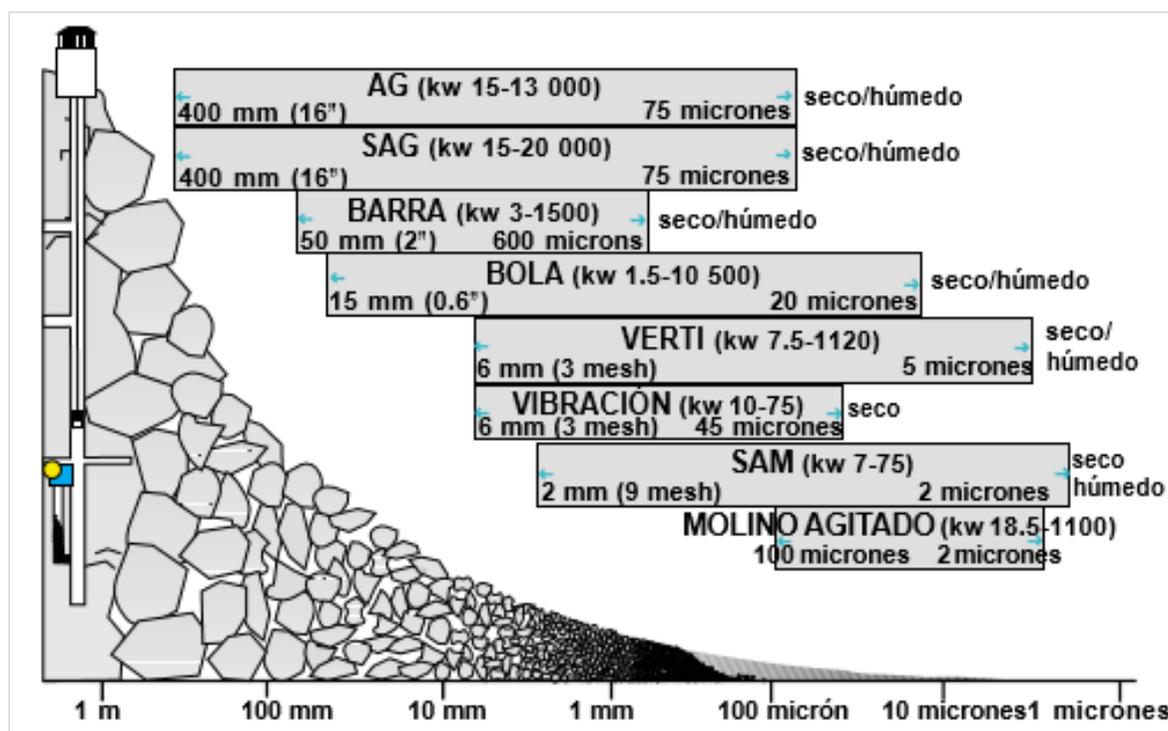
Figura 73 Molino vibratorio



14.1.2 Tasa de Reducción

Debido al diseño, hay una restricción en el tiempo de retención del material que va pasando. En la molienda, ya que se produce en espacio más “abierto”, el tiempo de retención es mayor y puede ser fácilmente ajustado durante la operación. A continuación, se muestran los rangos de reducción de tamaño y potencia para los diferentes tipos de molienda. Ver figura 74.

Figura 74 Tasa de reducción de molinos.



En la práctica, la reducción de tamaño por molienda también se realiza en etapas optimizadas.

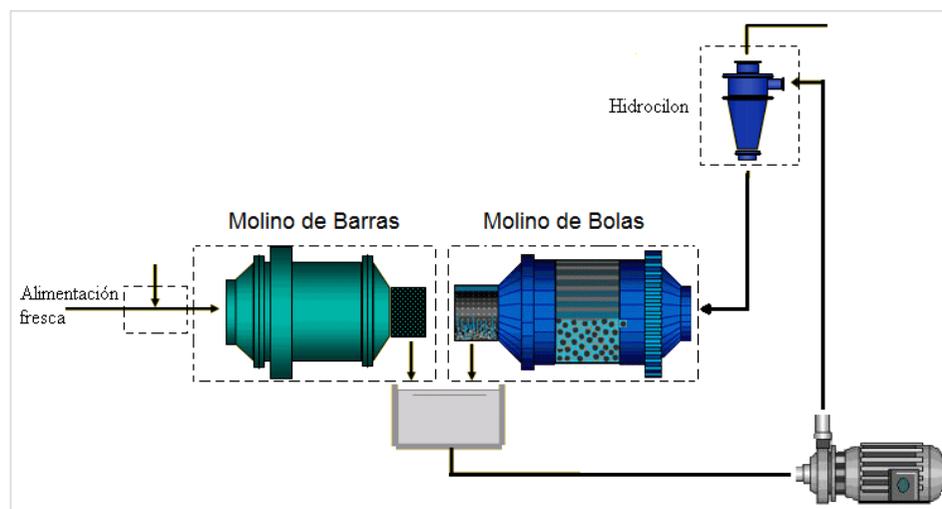
14.1.3 Circuitos de Molienda

A continuación, se mostrará en forma muy general los circuitos típicos más comúnmente usados en la minería metálica Chilena.

14.1.3.1 Circuito 1: Molino de Barras y Molino de Bolas

Considerando la alimentación de mineral producido en las etapas de chancado, la molienda de barras recibe mineral con un tamaño con un F80 entre 25 y 30 mm o entre 1" y 1 1/4" y lo debe reducir hasta tamaños de producto con un P80 entre 0,3 a 2 mm equivalente entre malla 8 y malla 48. En un circuito cerrado barras – bolas en el cajón de alimentación a ciclones de la sección, se juntan a descarga del molino de barras y la descarga del molino de bolas. La descarga de gruesos de la batería de ciclones alimenta al molino de barras de manera de conseguir un producto final de la sección de barras – bolas con un tamaño del orden de 60% a 65% - malla 200. Ver figura 75.

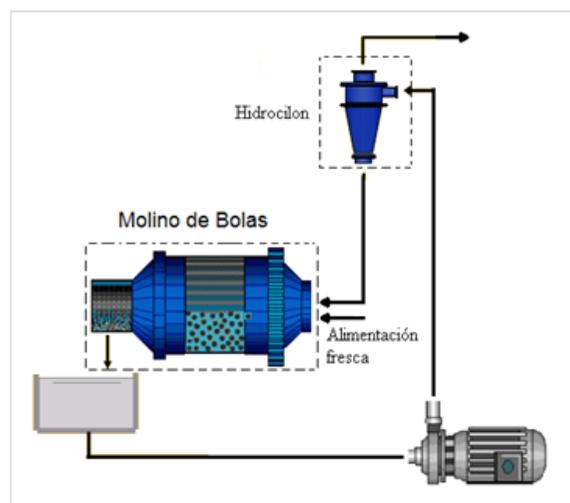
Figura 75 Circuito barras - bolas



14.1.3.2 Circuito 2: Molino Unitario

Es el circuito más simple de implementar y hoy día más comúnmente usado para operaciones medianas y pequeñas, aunque, no es el más eficiente para la molienda de minerales. Se alimenta con un mineral similar al del circuito barras – bola convencional con tamaños de mineral con F80 de 15 mm y más fino. Es un molino que en algunos casos recibe más de un tipo de alimentación de manera de aprovechar de mejor forma el tamaño de producto final deseado en torno a 55% a 65% - malla 200. Este circuito de molino unitario tiende a producir mayor cantidad de finos, pero tiene la desventaja de la menor capacidad de tratamiento como sistema unitario, el que habitualmente es superado por otros circuitos hoy día más eficientes desde el punto de vista del balance capacidad y consumo de energía. Ver figura 76.

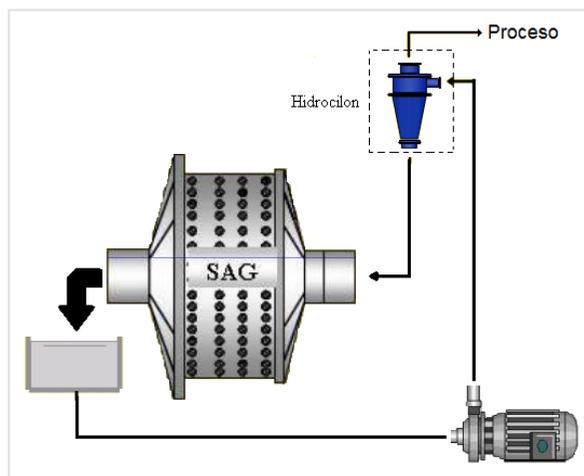
Figura 76 Circuito molino unitario



14.1.3.3 Circuito 3: Un molino SAG

Este circuito fue con el que se inició el desarrollo de los molinos AG y SAG hacia los años 80, pero con el correr de los años y a la luz de las experiencias conseguidas con las primeras operaciones industriales implementadas fue sufriendo algunas modificaciones tendientes a agregar etapas complementarias para conseguir su tarea de molienda de minerales. La gran ventaja de este diseño de equipos de molienda es su alta capacidad de tratamiento y la eliminación de al menos dos etapas de chancado, toda vez que este molino es alimentado directamente con el producto de un solo chancador giratorio ubicado directamente en la mina. Con este desarrollo de molienda se aumentó tanto la capacidad de tratamiento como la gama de aplicaciones, pero al mismo tiempo ha tenido que soportar mayores costos por mayor desgaste de bolas y revestimientos. De todas maneras, su diseño para operaciones mineras seguirá dependiendo de las características de moliendabilidad del mineral y del tamaño del producto deseado. Curiosamente este circuito es más común en operaciones de EEUU y Canadá que en Chile. Ver figura 77.

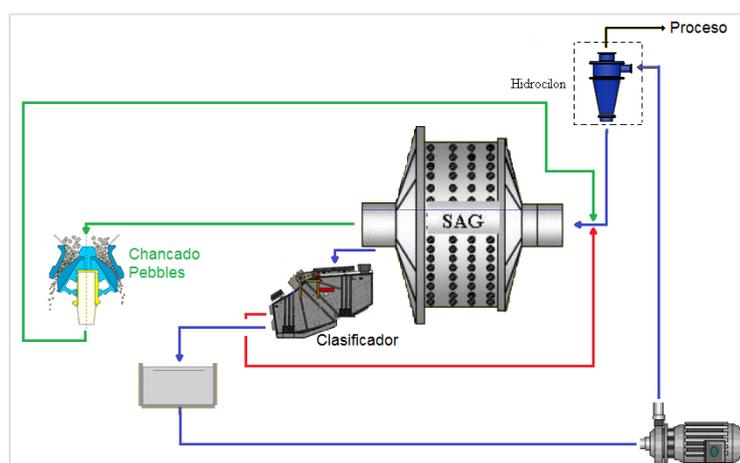
Figura 77 Circuito un molino SAG



14.1.3.4 Circuito 4: Un Molino SAG y un Chancador

Para los casos más comunes que se han ido implementando desde que apareció la tecnología de molienda AG y SAG se ha ido generando la condición de que los minerales alimentados directamente desde un chancador primario del tipo giratorio crea un tamaño crítico de guijarros que no se muelen y solo se redondean dentro del molino a los cuales se les denomina *Pebbles*. Esto se ha solucionado poniendo parrillas a la descarga del molino con orificios adecuados para eliminar estos elementos y triturarlos por separado en un chancador de conos exclusivo para estos pebbles. De esta forma el circuito original de un molino SAG solo se adapta mejor para entregar los niveles de producto que se requieren de una sección de molienda. Ver figura 78.

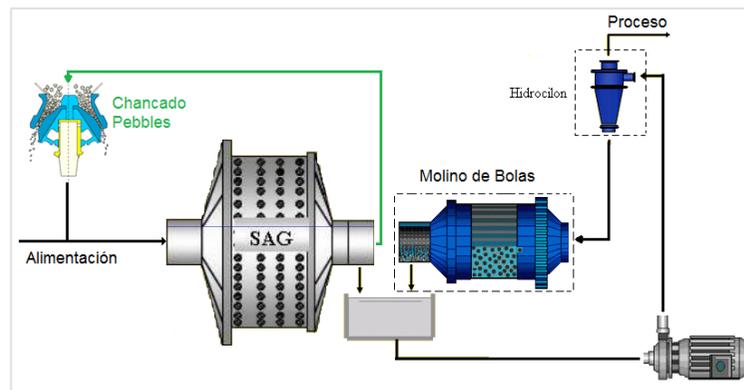
Figura 78 Circuito SAG más chancador



14.1.3.5 Circuito 5: SAG + Molino de Bolas + Chancador

Este circuito es similar al circuito anterior, al cual se ha agregado un molino de bolas como etapa de molienda secundaria, manteniendo el chancador de pebbles. Es sin lugar a dudas el circuito que más éxito ha tenido sobretodo en operaciones con mineral de mayor dureza. El molino de bolas permite corregir el producto muy grueso que genera el molino SAG y de esta forma lo hace ser más versátil para diferentes operaciones. Ver figura 79.

Figura 79 Circuito Autógeno más molino de bolas más chancador



PROCESO DE CLASIFICACION

Para un control de partículas más finas que 1 mm, nos estamos desplazando de la gama de colador convencionales.

La clasificación es el proceso de separación de partículas por tamaño en dos o más productos según su comportamiento en el aire o en el agua (líquidos).

15.1 Métodos de clasificación

- Clasificación en Húmedo con Hidrociclones utilizando separación por fuerza centrífuga cubriendo una gama de tamaño de 100 – 10 micrones (típico)
- Clasificación en Húmedo con Clasificadores en Espiral utilizando separación por gravedad cubriendo una gama de tamaño de 100 – 1000 micrones (típico).
- Clasificación en Seco utilizando separación por fuerza centrífuga cubriendo la gama de 150 – 5 micrones (típico).

15.1.1 Hidrociclones

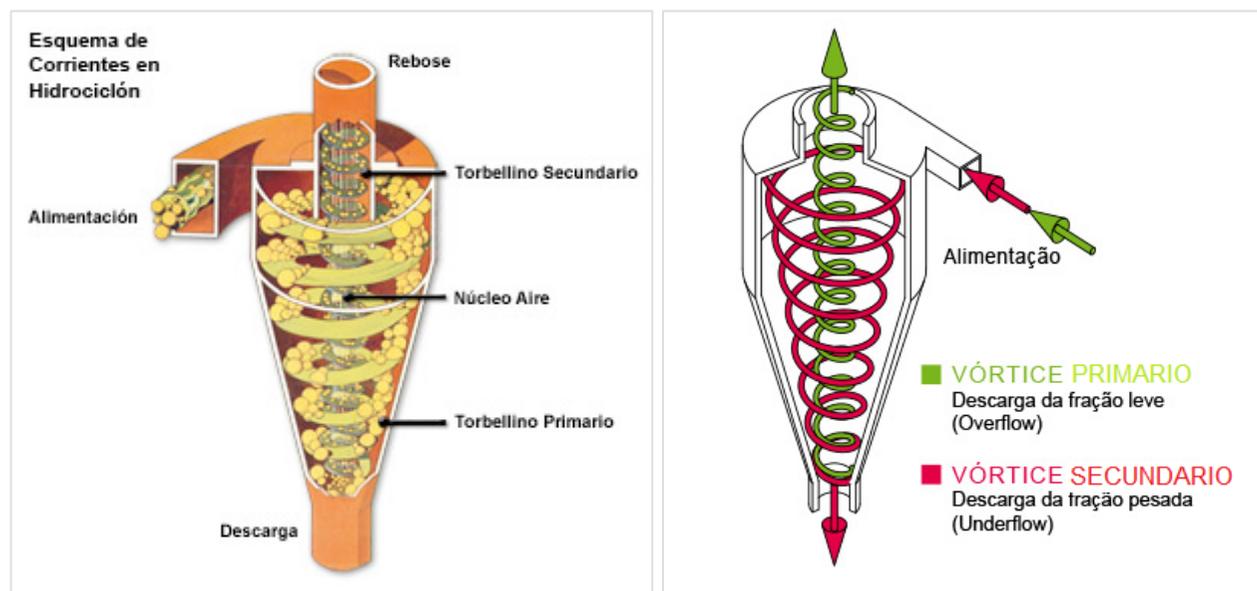
La separación por sedimentación de partículas se da en la naturaleza en cualquier lago o estanque donde se introduce agua turbia. Las partículas se posan en el fondo, formando un sedimento que posee un grado de espesado en relación con la concentración de la alimentación (feed), mientras que el agua sobrante es clarificada y eliminada como flujo superior (overflow). Los estanques artificiales que realizan esta misma función son denominados espesadores o clarificadores. Si el caudal de agua que atraviesa el estanque es tan grande que las partículas más finas no tienen suficiente tiempo para su sedimentación, éstas son evacuadas junto con el flujo superior (overflow), originándose una clasificación en dos fracciones: gruesa y fina. Este tipo de clasificación en húmedo se llama clasificación por corriente; la fuerza que genera este tipo de separación es la gravedad. Los mismos fenómenos ocurren en una suspensión en rotación, donde fuerzas centrífugas mucho mayores producen los efectos de separación por aumento del grado de sedimentación. Los equipos que se emplean normalmente para este propósito, son las centrífugas con camisa maciza, y los hidrociclones pueden ser considerados como una centrífuga de camisa maciza, en la cual ésta permanece fija, mientras que la rotación de la suspensión es producida por la propia alimentación al ciclón tangencialmente y a presión. Dependiendo del grado de recuperación de sólidos deseado en el flujo inferior (underflow), el hidrociclón puede actuar como clarificador o clasificador. Los rechazos son espesados, en cualquier caso. Los hidrociclones son, sin lugar a dudas, junto con las bombas centrífugas, los equipos más difundidos en la industria del tratamiento de minerales.

15.1.1.1 Teoría Operacional

El trabajo de un hidrociclón consiste en, la suspensión de alimentación forma un torbellino primario a lo largo de la superficie interior de la pared de las partes cilíndrica y cónica, dirigiéndose al exterior a través del vértice cónico. Al ser este estrecho, solamente una parte de la corriente es evacuada como flujo inferior (underflow), transportando las partículas gruesas o inclusive todos los sólidos con ella. La mayoría del líquido (que ha sido limpiado por la sedimentación de los sólidos en el torbellino primario, o bien que transporta las partículas finas sobrantes con él), es forzado a abandonar el ciclón a través de la tobera del flujo superior

(overflow) formando un torbellino secundario ascendente alrededor del núcleo de la carcasa. En el interior del núcleo se crea una depresión, que recoge todo el aire que ha sido transportado como burbujas o disuelto en el agua de alimentación. También el vapor creará esta visible columna central de aire. Debido al incremento de la velocidad tangencial en el torbellino secundario, las altas fuerzas centrífugas generadas traen consigo una eficientísima separación secundaria. Las partículas finas rechazadas sedimentan radialmente y se unen al torbellino primario; la mayoría de estas partículas son evacuadas finalmente a través de la boquilla formada por el vértice del cono. Por consiguiente, la separación dentro de un hidrociclón tiene lugar como resultado de estos dos procesos, y el punto de corte final será determinado principalmente por la aceleración centrífuga del torbellino secundario interior. Ver figura 80.

Figura 80 Operación del hidrociclón



15.1.1.2 Usos de Hidrociclones en Minería

15.1.1.2.1 Espesado

Esta denominación se refiere a la eliminación de la mayor cantidad de agua para producir un escurrido de los sólidos. El verdadero espesado apunta a la recuperación de todos los sólidos, resultando una clarificación del líquido, pero como en la práctica, y debido a que los agentes floculantes no pueden ser utilizados, en los hidrociclones, como acelerantes de la sedimentación, la recuperación de peso (mass recovery) es limitada y el resultado es un flujo superior turbio, es decir, lo que tiene lugar en el ciclón es un deslamado. La construcción de diques de residuos con hidrociclones es un ejemplo muy conocido de esta técnica.

15.1.1.2.2 Deslamado

En esta operación el objeto es eliminar las partículas finas junto con el flujo superior. Esto es a menudo necesario para mejorar el producto para procesos posteriores, tales como flotación, separación magnética en húmedo, filtración, etc. En plantas químicas, los ciclones en deslamado se usan frecuentemente para eliminar el agua después de un proceso de cristalización; los cristales finos, son evacuados con el flujo superior, siendo reciclados al cristalizador donde actúan como núcleos para la formación de un nuevo cristal.

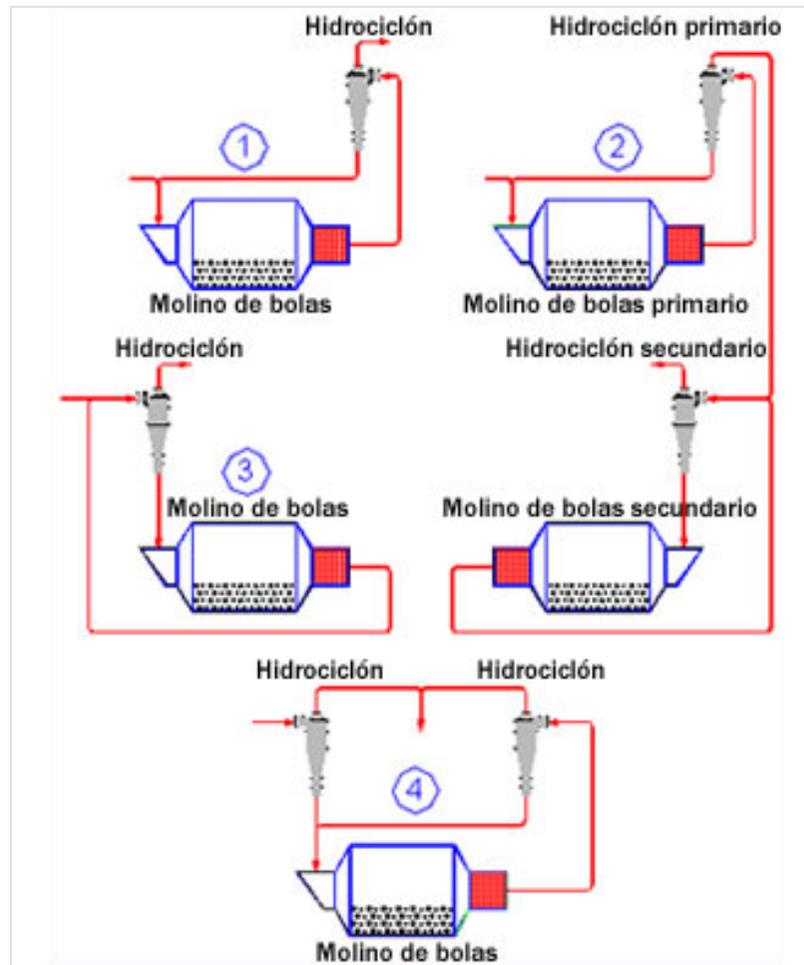
15.1.1.2.3 Refinado

En el refinado, el flujo superior es el producto final y pequeñas cantidades de partículas superiores al tamaño deseado son evacuadas con el flujo inferior.

15.1.1.3 Circuitos Cerrados de Molienda

Los ciclones de deslamado y refinado se usan a menudo juntos con procesos de molienda. La configuración del hidrociclón en conjunto con molinos de vía húmeda presenta varias secuencias, ver figura 81.

Figura 81 Circuitos de hidrociclones en molienda



Generalmente los circuitos de clasificación utilizan baterías de hidrociclones. Ver figura 82.

Figura 82 Batería de hidrociclones



Sección 16

TRANSPORTE HIDRAULICO

En todos los procesos industriales húmedos, la tecnología apropiada es el transporte hidráulico de sólidos, avanzando el proceso entre las diferentes etapas de mezcla:

- Mezcla sólido / líquido.
- Separación sólido / sólido.
- Separación sólido / líquida.

Los sólidos pueden ser elementos de cualquier característica, como:

- Duro.
- Grueso.
- Pesado.
- Abrasivo.
- Cristalino.
- Afilado.
- Pegajoso.
- Escamoso.
- Largo.
- Fibroso.
- Flotante.
- Etc.

En definitiva, cualquier elemento o material se puede transportar de manera hidráulica. En la mayoría de las aplicaciones de transporte hidráulico, el líquido es solamente el medio de transporte. En el 98% de las aplicaciones industriales y mineras, el líquido es agua. Otros tipos de líquidos pueden ser soluciones químicas como ácidos y cáusticos, alcohol, líquidos de petróleo liviano (kerosene), etc.

16.1 Lodo (Pulpa)

La mezcla de sólidos y líquidos es normalmente llamada *lodo* o *pulpa*. El lodo se puede describir como un medio de dos fases (líquido / sólido). El lodo mezclado con aire (común en muchos procesos químicos), se describe como un medio de fluido de tres fases (líquido / sólido / gas).

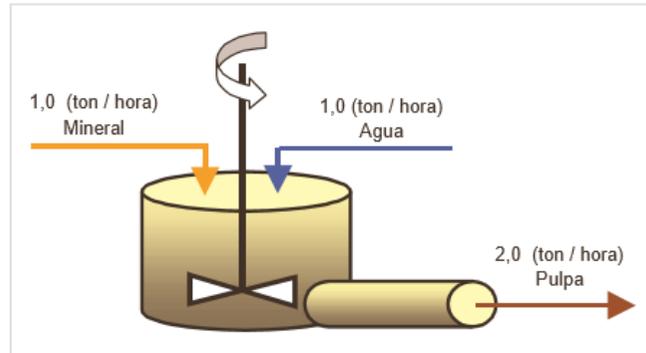
En minería cuando se trabaja con pulpas se trata de una mezcla de mineral con agua y es necesario expresar la proporción relativa en que se encuentran el mineral y el agua. Así la pulpa resultante se puede caracterizar por las siguientes definiciones:

16.1.1 Concentración de Sólidos en Peso (CP)

Corresponde al porcentaje que tiene el peso o flujo másico del mineral, respecto del peso o flujo másico de la pulpa. Es decir:

$$CP = (\text{Flujo másico de mineral} / \text{Flujo másico de la pulpa}) * 100$$

Ejemplo 1:



Solución:

$$CP = (\text{Flujo másico de mineral} / \text{Flujo másico de la pulpa}) * 100$$

$$CP = (1,0 / 2,0) * 100$$

$$CP = 50\%$$

Dependiendo del tipo de operación metalúrgica, hay rangos de CP en los que se obtiene los mejores resultados. Por ejemplo, en las operaciones de molienda convencional, es normal que la concentración de sólidos en peso sea del orden de 70 – 80 %. En una flotación primaria, este rango es del orden de 30 – 35 %, y en una flotación de limpieza de 25 a 30 %.

16.1.2 Concentración de Sólidos en Volumen (CV)

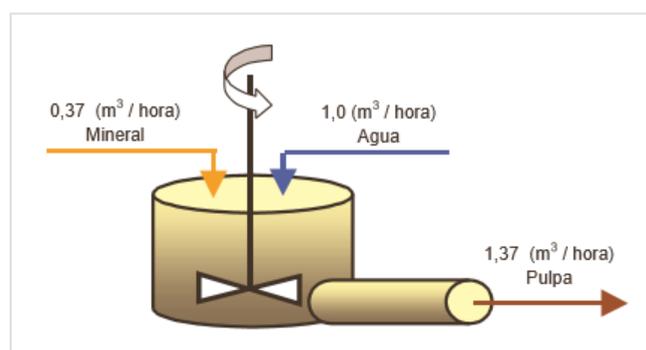
Corresponde al porcentaje que tiene el volumen o flujo volumétrico del sólido, respecto del flujo o flujo volumétrico de la pulpa. Es decir:

$$CV = (\text{Flujo volumétrico de mineral} / \text{Flujo volumétrico de la pulpa}) * 100$$

Ejemplo 2: Calcule el CV de la pulpa, si el mineral tiene una densidad de 2,7 (ton/m³).

Solución:

Si el mineral tiene una densidad de 2,7 (ton/m³), entonces 1 (ton/hora) de mineral equivale a 0,37 (m³/hora), y 1 (ton/hora) de agua equivale a 1 (m³/hora). Se tiene el siguiente esquema:



Así:

$$CV = (\text{Flujo volumétrico de mineral} / \text{Flujo volumétrico de la pulpa}) * 100$$

$$CV = (0,37 / 1,37) * 100$$

$$CV = 27\%$$

16.1.3 Densidad de Pulpa (DP)

La densidad de pulpa es probablemente el parámetro que se controla más frecuentemente en una planta, por lo sencillo que resulta determinarla al utilizar una Balanza Marcy. También en este caso se puede establecer rangos en los que se obtiene los mejores resultados según sea la operación metalúrgica.

Se define como la razón entre el peso o flujo másico de una pulpa, y su peso o flujo volumétrico.

$$DP = (\text{Flujo másico de la pulpa} / \text{Flujo volumétrico de la pulpa})$$

Por lo tanto, siguiendo con el ejemplo 1 y 2:

Solución:

$$DP = (\text{Flujo másico de la pulpa} / \text{Flujo volumétrico de la pulpa})$$

$$DP = (2,0 \text{ ton/hora} / 1,37 \text{ mt}^3/\text{hora})$$

$$DP = 1,46 \text{ ton/mt}^3$$

16.1.4 Dilución (DI)

Se define como la razón entre el peso o flujo másico del agua, y el peso o flujo másico del mineral.

$$DI = \text{Flujo másico del agua} / \text{Flujo másico del mineral}$$

Por lo tanto, siguiendo con el ejemplo 1 y 2:

Solución:

$$DI = (\text{Flujo másico del agua} / \text{Flujo másico del mineral})$$

$$DI = (1,0 \text{ ton/hora} / 1,0 \text{ ton/hora})$$

$$DI = 1,0$$

16.1.5 Humedad (HU)

La definición de humedad se utiliza cuando en la pulpa la proporción de agua es pequeña, tal como ocurre, por ejemplo, con un mineral que llega a la planta, o un concentrado de planta después de una etapa de filtrado. Existen dos definiciones:

$$\begin{aligned} \text{HU (húmeda)} &= (\text{Peso del agua} / \text{Peso de la muestra húmeda}) * 100 \\ \text{HU (seca)} &= (\text{Peso del agua} / \text{Peso de la muestra seca}) * 100 \end{aligned}$$

Ejemplo 3:

Se tiene un embarque de 10 toneladas de concentrado con un 10 % de Humedad en Base Húmeda. Calcular su humedad en base seca.

Solución:

Humedad base húmeda,

$$\text{HU (húmeda)} = (\text{Peso del agua} / \text{Peso de la muestra húmeda}) * 100$$

$$\text{HU (húmeda)} = (1 \text{ ton.} / 10 \text{ ton.}) * 100$$

$$\text{HU (húmeda)} = 10\%$$

Humedad base seca, se está transportando 1 tonelada de agua y 9 toneladas de mineral.

$$\text{HU (seca)} = (\text{Peso del agua} / \text{Peso de la muestra seca}) * 100$$

$$\text{HU (seca)} = (1 \text{ ton.} / 9 \text{ ton.}) * 100$$

$$\text{HU (seca)} = 11,1\%$$

Sección 17

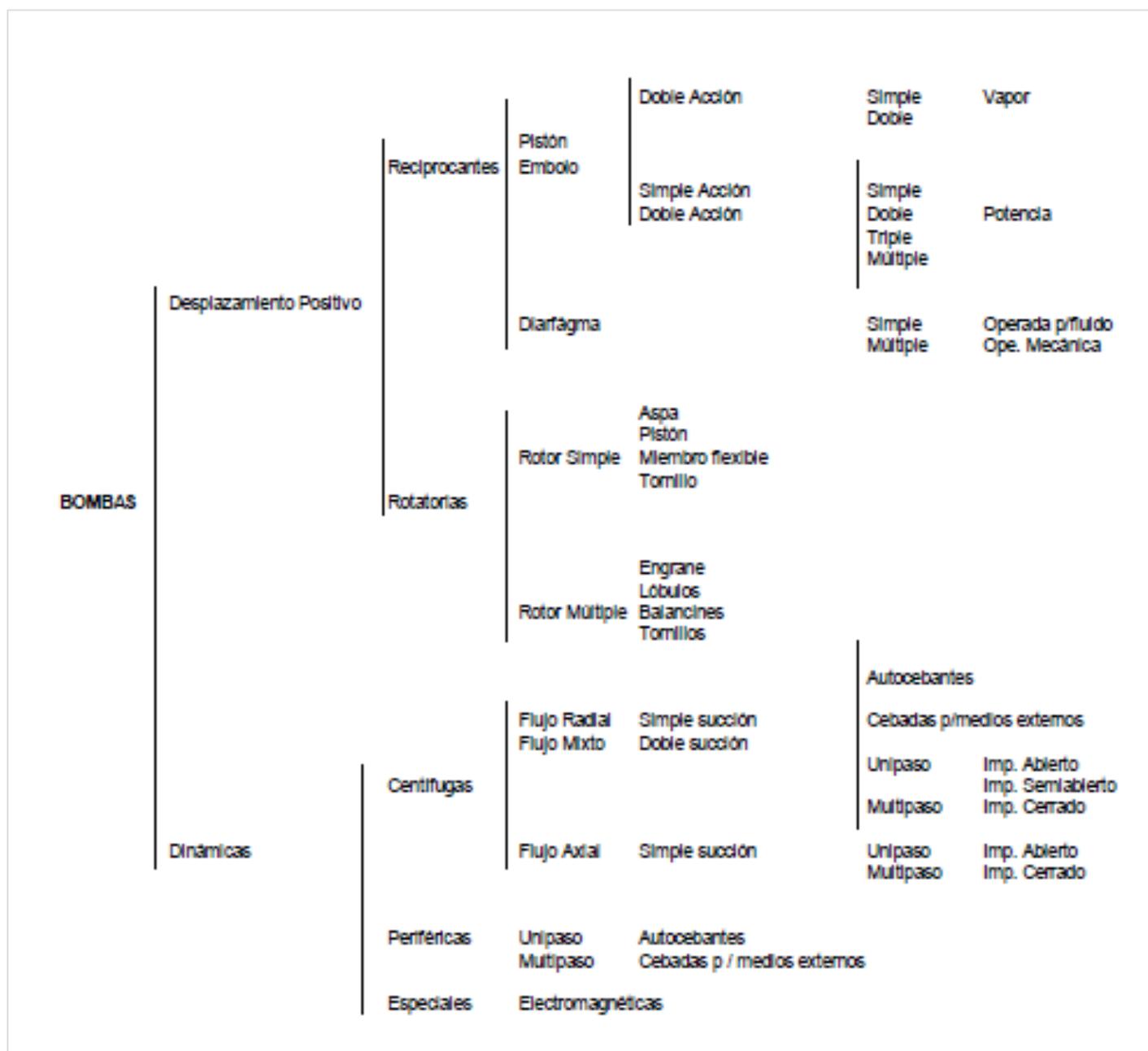
SISTEMAS DE BOMBAS

Hay una diversidad de mecanismos de bombeo (bombas), cuya capacidad, diseño y aplicación cubren un amplio rango que va desde pequeñas unidades utilizadas para dosificación de cantidades mínimas, hasta bombas centrífugas que son capaces de manejar grandes volúmenes para surtir de agua a las grandes concentraciones urbanas. Su variedad de diseños cubre desde diferentes principios de operación, hasta bombas especiales para manejo de sustancias tan diversas como el agua, metales fundidos, concreto, etc., gastos diferentes y materiales de construcción.

17.1 Tipos y Aplicaciones de Bombas

Debido a la diversidad de bombas ya mencionadas, hay muchas formas de clasificar las bombas. Por rangos de volúmenes a manejar, por fluidos a mover, etc. Sin embargo, la clasificación más general es en función de la forma en que las bombas imprimen el movimiento al fluido, separándose en dos tipos principales. Ver figura 83.

Figura 83 Tipos de bombas



La clasificación anterior, nos permite apreciar la gran diversidad de tipos que existen y si a ello agregamos materiales de construcción, tamaños diferentes para manejo de gastos y presiones sumamente variables y los diferentes líquidos a manejar, etc., entenderemos la importancia de este tipo de máquina.

La bomba es el equipo más utilizado en minería y se utilizan todos a casi todos los tipos de bombas, en diferentes sistemas de bombeo como:

- Bombas para Circuitos de Trituración
- Bombas para Espuma (Lodos de flotación)
- Bombas para Sumideros de Piso
- Bombas para Relave
- Bombas para Alimentación de Hidrociclón
- Bombas para Alimentación de Filtro de Presión
- Bombas para Alimentación de Prensa de Tubo
- Bombas para Medios Densos (Pulpa)
- Bombas para Fines Generales (mineral)
- Bombas para Cal y Fango Cáustico
- Bombas para Pulpa de Rechazo (Conteniendo Arena)
- Bombas para Transporte de Escoria
- Bombas para Efluentes de Depurador en Húmedo
- Bombas para Transporte de Polvo de Hierro
- Bombas para Lodos Ácidos
- Bombas para Salmueras
- Bombas para Cáusticos
- Bombas para Agua de Mina (con Sólidos)
- Bombas para Agua de Mar
- Etc.

Dentro de estos sistemas los tipos de bombas más comúnmente utilizadas son las llamadas centrífugas, rotatorias y reciprocantes.

17.2 Bombas Centrífugas

La fuerza centrífuga es la base del principio de operación de las bombas centrífugas. Imaginando un impulsor en reposo dentro del agua. Si dicho impulsor se pone a girar, el agua saldrá impulsada entre los álabes del mismo. A medida que el agua es arrojada fuera de los álabes, más agua llega al centro del impulsor, por ser ésta la zona de menor presión; por ello es ahí donde generalmente se coloca la succión. Al continuar girando el impulsor, más agua es expulsada y más agua llega al centro del impulsor, manteniéndose así un flujo continuo, sin variaciones de presión; estas son las características principales de las bombas centrífugas. Si el impulsor se coloca dentro de un envolvente o carcasa, el flujo es dirigido hacia donde es requerido, para lograr de ésta manera el objetivo deseado.

Algunas de las características de estas bombas son las siguientes:

- Descarga de flujo continuo, sin pulsaciones.
- Puede bombear todo tipo de líquidos, sucios abrasivos, con sólidos, etc.
- Altura de succión máxima del orden de 4.5 metros de columna de agua.
- Rangos de presión de descarga hasta de 150 kg/cm².
- Rangos de volúmenes a manejar hasta de 20,000 m³/hr.

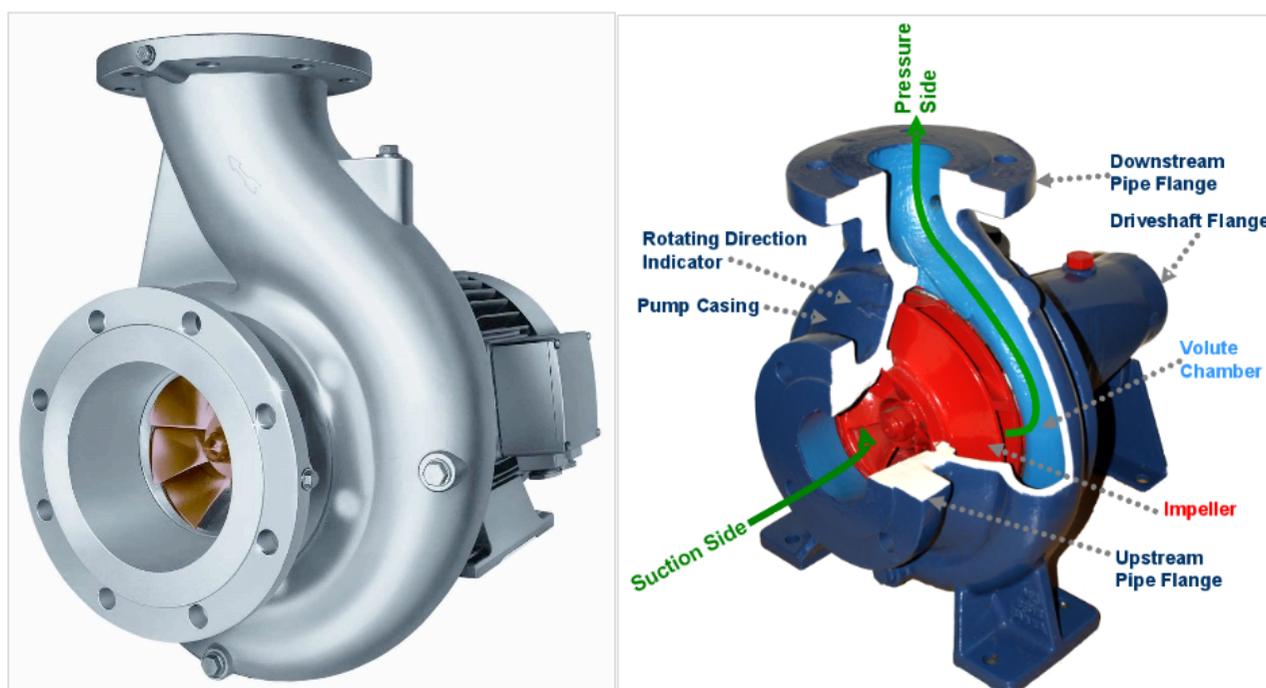
El impulsor es el corazón de la bomba centrífuga, pues es el componente que imprime la velocidad al fluido; consiste en un cierto número de aspas o álabes curvados con una forma tal que permite un flujo continuo del fluido a través de ella. El diseño de los impulsores se hace en función del fluido a bombear, pudiendo ser abiertos, semicerrados y cerrados. Ver figura 84.

Figura 84 Tipos de impulsores



La carcasa de la bomba, también puede ser de diferentes diseños, tiene la función de hacer la conversión de energía cinética o de velocidad que se imparte al fluido por el impulsor, en energía de presión o potencial. Existen dos tipos básicos de carcasas: de tipo espiral y de tipo difusor. En la carcasa de tipo espiral (voluta), el impulsor descarga el fluido en un área que se expande gradualmente, disminuyendo así la velocidad para irse convirtiendo en energía de presión. Ver figura 85.

Figura 85 Carcasa tipo espiral



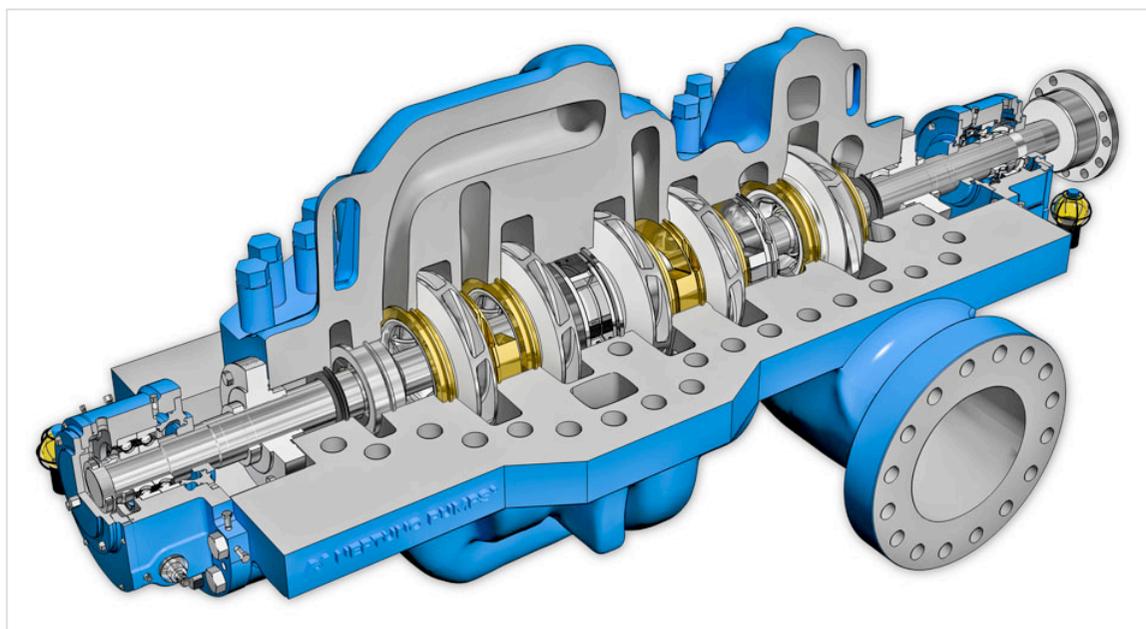
La carcasa de tipo difusor, se basa en unas guías estacionarias con una trayectoria definida, que va ampliando el área desde el impulsor hacia la propia carcasa, haciendo también la conversión de energía cinética (velocidad) a energía potencial en el flujo (presión). Este tipo de carcasa es más utilizado en bombas de varias etapas. Ver figura 86.

Figura 86 Carcasa tipo difusor



Si la combinación de carga (presión que se tiene que vencer con la bomba) que se requiere es mayor de la que se puede desarrollar con un solo impulsor, se puede hacer una combinación de ellos, con el flujo en serie donde el primer impulsor descarga a la succión del segundo, y así sucesivamente; en éstos casos el gasto se mantiene constante a lo largo de los distintos impulsores, pero la presión va adicionándose de impulsor en impulsor. Estas bombas se conocen como multietapas o de varias etapas. A diferencia de otros tipos de bombas, las centrífugas, operan a velocidad constante proporcionan un flujo desde 0 hasta su valor máximo, en función de la carga, diseño propio y condiciones de succión. Ver figura 87.

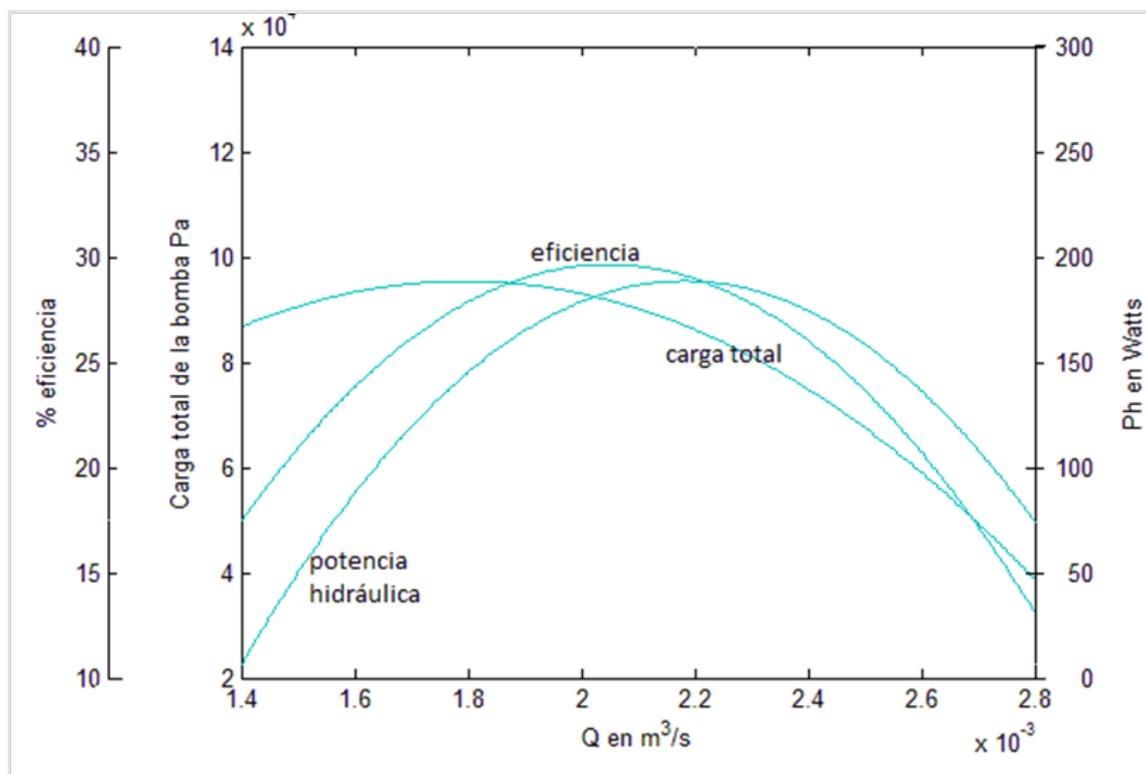
Figura 87 Bomba multietapa



Existen curvas características, típicas, de bombas centrífugas, donde se puede interrelacionar la presión de descarga (carga), capacidad, potencia requerida y eficiencia de operación de la bomba.

La presión requerida del sistema se obtiene de la combinación de la carga estática más la presión diferencial del sistema. La curva de pérdidas de fricción es la suma de las pérdidas producidas en tuberías, conexiones y válvulas. Ya que la carga por fricción varía en proporción cuadrática al flujo, la curva característica es generalmente una parábola. Analizando en forma sobrepuesta las curvas de capacidad - carga de la bomba con la carga del sistema, se obtienen los puntos de capacidad y carga en las cuales la bomba podrá operar para ese sistema en particular. Ver figura 88.

Figura 88 Curvas características



17.3 Bombas Rotatorias

Las bombas rotatorias, en sus diferentes variedades, se consideran de desplazamiento positivo, pues su principio de operación está basado en un transporte directo del fluido de un lugar a otro. Los elementos rotatorios de la bomba crean una disminución de presión en el lado de succión, permitiendo así que una fuerza externa (en ocasiones la presión atmosférica) empuje al fluido hacia el interior de una cavidad; una vez llena ésta, los elementos rotatorios, en su propia rotación, arrastran o llevan el fluido que quedó atrapado en la mencionada cavidad, formada por la parte rotatoria de la bomba y la carcasa (estacionaria), siendo empujado hacia la descarga, forzándose a salir. El fluido así es desplazado de la entrada hacia la salida en un movimiento físico de traslación. Ver figura 89.

Figura 89 Bombas rotatorias



Los tipos de bombas rotatorias más comunes son las llamadas de engranes, tanto externos como internos, bombas de lóbulos y bombas de tornillo. Algunas de las características de las bombas rotatorias son las siguientes:

- Producen flujo continuo, sin pulsaciones.
- Su capacidad de succión es de 0.65 atmósferas (6.5 m de col. de agua).
- Su capacidad de flujo es generalmente de bajo rango.
- Su rango de presión de descarga es medio, del orden de 20 kg/cm² máximo.

Por sus características de operación, la capacidad de manejo de flujo en una bomba rotatoria, está en función de su tamaño y velocidad de rotación. Pueden usarse para líquidos con cualquier índice de viscosidad, pero son bombas sensibles a la presencia de abrasivos, por la gran fricción que hay entre los engranes o lóbulos y el fluido. En particular su rango de fluidos más adecuado, son los de alta viscosidad como grasas, mezclas, pinturas, etc. También, por su adecuado control de volúmenes en función de la velocidad, son adecuadas para usarse como bombas dosificadoras de productos que deben ser medidos con precisión.

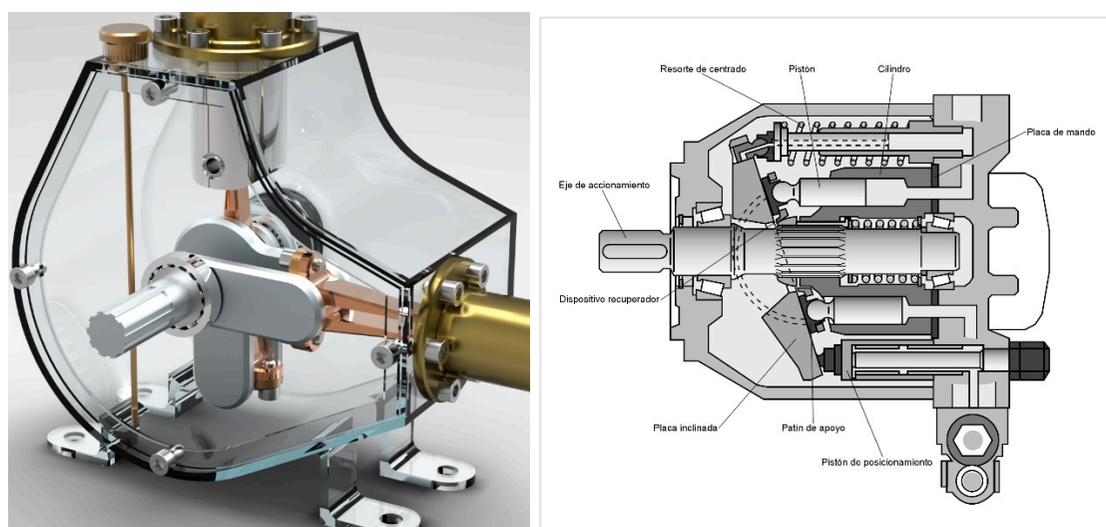
De los diferentes tipos de bombas rotatorias, las más conocidas y simples son las llamadas de engranes. Otra variedad, son las llamadas de tornillo, que pueden tener 1, 2 o hasta 3 tornillos, dependiendo de la capacidad y presión requerida. Existen modificaciones como las llamadas de *cavidad viajera*, consistente en un rotor con forma de tornillo helicoidal, mientras que el estator tiene un espiral doble opuesto al espiral del rotor. Los espacios entre rotor y estator atrapan el material, y en cada revolución lo mueven continuamente hacia la descarga.

17.4 Bombas Reciprocantes

Como su nombre lo indica, producen el bombeo de fluidos con base a un movimiento reciprocante de uno o varios pistones, siendo por ello también bombas de desplazamiento positivo.

La bomba reciprocante tiene la particularidad de producir un flujo pulsante en función del movimiento de su(s) pistón(es). Su capacidad máxima de succión recomendada es de 0.65 atmósferas (6.5 metros de columna de agua) (aunque teóricamente pueden succionar a 1 atmósfera), y pueden construirse para trabajar a presiones hasta de 1,000 kg/cm². Ver figura 90.

Figura 90 Bombas reciprocantes



Por sus características, su aplicación es amplia donde se requieren altas presiones, o volúmenes controlados de fluido, por lo que se usan mucho en líquidos de alta viscosidad y en el campo de medición y dosificación. Las bombas reciprocantes no hacen succión en los fluidos a manejarse. Al avanzar el pistón se hace una reducción de presión en la cámara de succión, requiriéndose de una fuerza externa (generalmente la presión atmosférica) que empuja el fluido a la cámara.

La capacidad o flujo a manejarse por la bomba está en función de la velocidad, y existe una interrelación entre la temperatura y la viscosidad del fluido, que afectan también la capacidad en el manejo del fluido.

La eficiencia varía dependiendo del tamaño, diseño y su aplicación. Dado que el suministro del líquido es función del barrido del pistón en el cilindro (carrera), y el número de carreras realizadas en una unidad de tiempo, pero como se descarga un volumen real menor al teórico por deficiencias en el llenado del cilindro, en operación real de las válvulas, fugas en el pistón, la eficiencia volumétrica se define como la relación que existe entre la descarga real y la descarga ideal (desplazamiento del pistón) siendo del orden del 95%.

17.5 Bombas de Pulpa

En teoría, no existen limitaciones para lo que se pueda transportar de manera hidráulica. En la práctica, las limitaciones en el flujo para una instalación de Bomba de pulpa son desde 1 m³ / hora (4 GPM) hasta 20000 m³ / hora (88000 GPM). El límite menor se determina por la caída de eficiencia para bombas menores, el límite mayor se determina por el aumento dramático de costos para grandes Bombas de pulpa. Por definición, las bombas de pulpa son versiones pesadas y robustas de bombas centrífugas, capaces de funcionar en trabajos duros y abrasivos.

El término bomba de pulpa cubre varios tipos de bombas centrífugas de trabajo pesado, utilizadas para el transporte de sólidos. Una terminología más precisa es utilizar la clasificación por sus aplicaciones en procesos mineros:

- Bombas de Espuma: definen por aplicación el tratamiento de lodos espumosos, principalmente en flotación.
- Bombas de Transferencia de Carbón: definen el transporte hidráulico apaciguado de carbón en circuitos CIP (carbón en pulpa) y CIL (carbón en lixiviación).
- Bombas de Sumidero: un nombre establecido típico de bombas que operan desde el piso de sumideros y casetas de bombas sumergidas, pero con rodamientos y transmisión secos.
- Bombas Sumergibles: la unidad completa, incluida la transmisión, está sumergida.

Los diseños de Bombas de Lodos se seleccionan y proveen de acuerdo a las condiciones de desgaste:

- Altamente abrasivo
- Abrasivo
- Medianamente abrasivo

Tipos de bombas para pulpa:



Bomba de Pulpa

Bomba c/Revestimiento de Goma

Bomba de Sumidero

Bomba Vertical de Estanque

Bomba Vertical de Espuma

Sección 18

PROCESO DE AGITACION

El agitador o acondicionador, es un tanque generalmente metálico – también puede ser de concreto – de fondo plano y con la parte de arriba abierta, que cuenta con un sistema de agitación en base a una hélice o dos, dependiendo de la aplicación. Son equipos que habitualmente no giran a mucha velocidad y es por ello que usan un sistema de reducción. Su velocidad de rotación es de entre 40 a 60 revoluciones por minuto (RPM). Se usan para mantener los sólidos en suspensión, es decir que agitan, homogenizan, mezclan o acondicionan una pulpa, de tal modo que quede lista para entrar en contacto con los reactivos y minimizar tiempos de flotación. En caso que el tanque del agitador sea de metal este se sostendrá en una estructura metálica que descansará en dados de concreto, mientras que si el tanque es de concreto este solo se elevará sin necesidad de mayores dispositivos de sostenimiento.

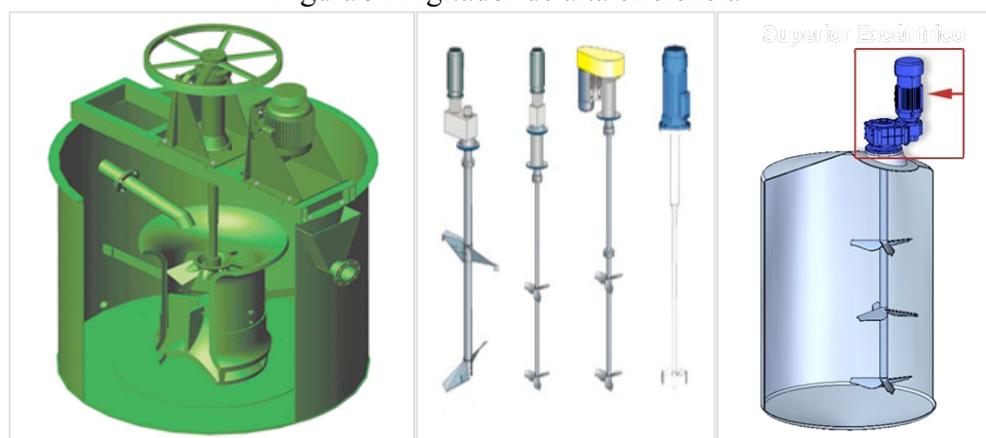
La parte mecánica de este equipo está compuesta por un eje con uno o dos hélices o impellers– dependiendo del tipo de pulpa y la sollicitación –, una caja reductora o gearbox y un motor eléctrico. En caso de tener dos hélices, una de ellas pateará hacia arriba mientras que la segunda lo hará hacia abajo, esto con la finalidad de dinamizar más los elementos.

Además, cuenta con un puente metálico en el cual se ubican el motor y su reductor. En el tanque de acero al carbono y que en ocasiones puede tener revestimientos de algún tipo de polímero, tiene baffles que son una especie de escamas utilizadas para optimizar el comportamiento flúodinámico de la pulpa, mejorar el mezclado y también el tiempo de residencia.

Los agitadores son equipos que se diseñan dependiendo del proceso y las condiciones propias de éste: es decir las características del metal, la humedad, su PH, la abrasión del material y el tiempo de residencia de la pulpa, por lo que se puede concluir que para cada sollicitud hay un equipo específico. Ver figura 91.

De igual modo, los acondicionadores tienen alarmas o switches que en el caso de activarse detienen el equipo. Además, cuenta con ductos de alimentación y descarga, y se recomienda que para su adecuado funcionamiento se revise la caja reductora, la lubricación del equipo y se observe con frecuencia el comportamiento de la transmisión.

Figura 91 Agitador de alta eficiencia



Sección 19

PROCESO DE FLOTACION

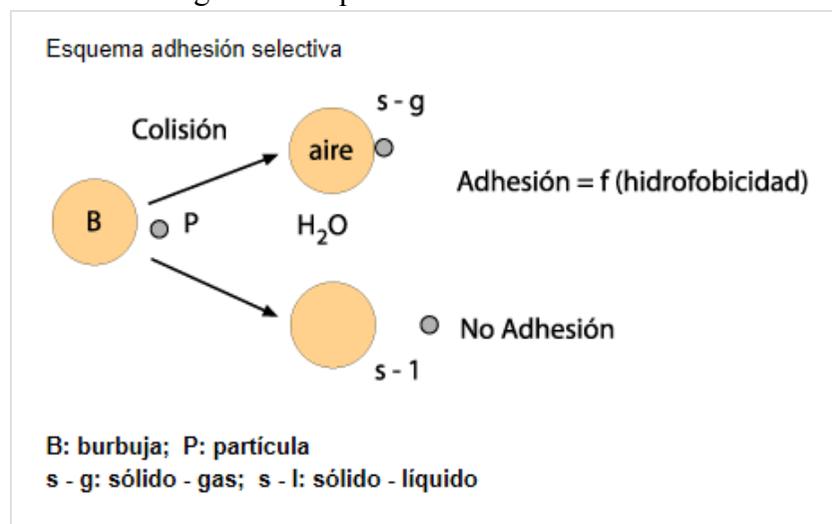
La flotación se define como un proceso físico-químico de tensión superficial que separa los minerales sulfurados del metal de otros minerales y especies que componen la mayor parte de la roca original. Durante este proceso, el mineral molido se adhiere superficialmente a burbujas de aire previamente insufladas, lo que determina la separación del mineral de interés.

La adhesión del mineral a estas burbujas de aire dependerá de las propiedades hidrofílicas (afinidad con el agua) y aerofílicas (afinidad con el aire) de cada especie mineral que se requiera separar de las que carecen de valor comercial y que se denominan gangas.

En la etapa previa (molienda), se obtiene la roca finamente dividida y se le incorporan los reactivos para la flotación. El propósito es darle el tiempo necesario de residencia a cada uno de los reactivos para conseguir una pulpa homogénea antes de ser utilizada en la flotación. Con la pulpa (o producto de la molienda) se alimentan las celdas de flotación.

Al ingresar la pulpa, se hace burbujear aire desde el interior y se agita con un aspa rotatoria para mantenerla en constante movimiento, lo que facilita y mejora el contacto de las partículas de mineral dispersas en la pulpa con los reactivos, el agua y el aire, haciendo que este proceso se lleve a cabo en forma eficiente. Ver figura 92.

Figura 92 Esquema de adhesión selectiva



Pocas partículas de especies minerales tienen flotabilidad natural. Es decir, no forman una unión estable burbuja-partícula. Esto dificulta el proceso de flotación y hace necesario invertir las propiedades superficiales de las partículas minerales. Para ello deben mutar su condición hidrofílica a propiedades hidrofóbicas mediante el uso de un reactivo colector. Además, es necesario que posean el tamaño adecuado para asegurar una buena liberación de las especies minerales.

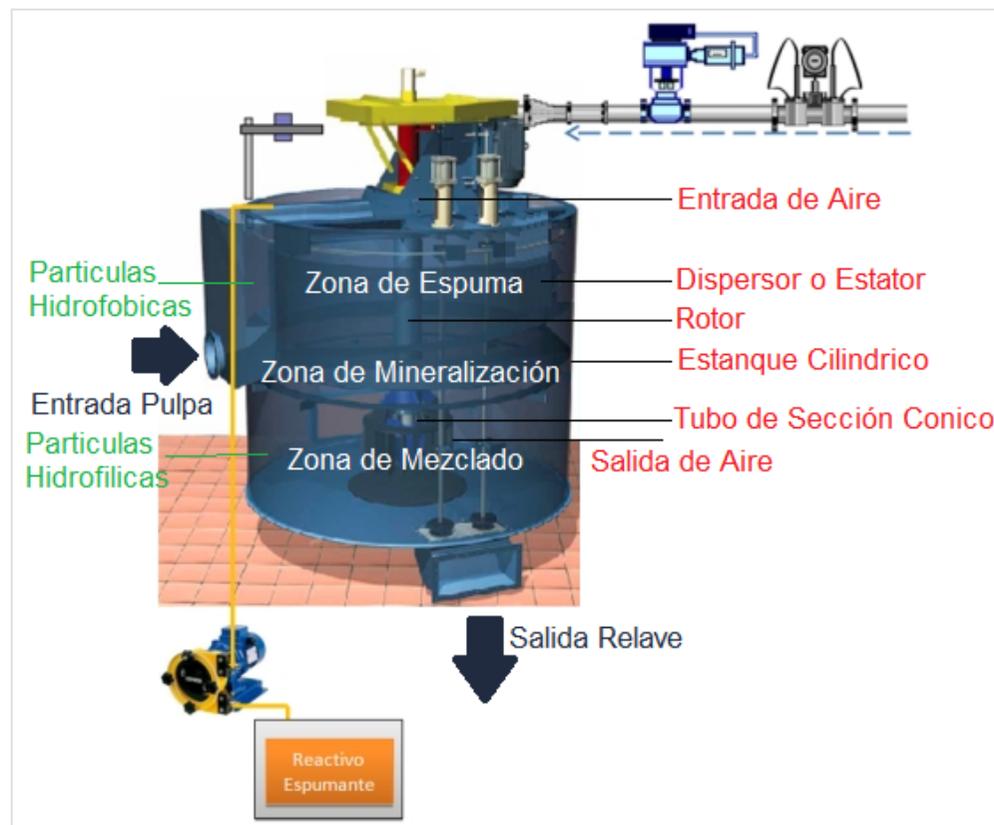
19.1 Celdas de Flotación

Hoy en día en procesos mineros se utilizan tres tipos de celdas de flotación:

- Celdas Mecánicas: Es el tipo más común caracterizadas por un impulsor mecánico que agita la pulpa y la dispersa. Ver figura 93.

- Celdas Neumáticas: Carecen de impulsor, utilizan aire comprimido para agitar y airear la pulpa.
- Celdas de Columna: Se caracterizan por tener un flujo en contracorriente de las burbujas de aire con la pulpa y de las burbujas mineralizadas con el flujo de agua de lavado.

Figura 93 Esquema de celda de flotación mecánica.



Las burbujas de aire generadas con la agitación de la pulpa y el aire insuflado en el fondo de las celdas, arrastran consigo hacia la superficie los minerales sulfurados hacia donde rebasan por el borde de la celda hacia canaletas que las conducen hacia otras celdas, bombas o espesadores, desde donde esta pulpa es enviada a la etapa siguiente. El proceso es reiterado en varios ciclos, de manera que cada ciclo va produciendo un producto cada vez más concentrado. En uno de estos ciclos se puede realizar un segundo proceso de flotación para recuperar el concentrado de un segundo metal de interés, con el mismo mecanismo anterior, pero utilizando reactivos y acondicionadores de pH distintos, pudiendo así obtenerse dos concentrados de dos metales de interés económico. La primera flotación se denomina flotación colectiva, donde el concentrado contiene 2 o más componentes, y la segunda flotación selectiva donde se efectúa una separación de compuestos complejos en productos que contengan no más de una especie individual. Un ejemplo de esto es la flotación de cobre y de molibdenita.

Pocas partículas de especies minerales tienen flotabilidad natural. Es decir, no forman una unión estable burbuja-partícula. Esto dificulta el proceso de flotación y hace necesario invertir las propiedades superficiales de las partículas minerales. Para ello deben mutar su condición hidrofílica a propiedades hidrofóbicas mediante el uso de un reactivo colector. Además, es necesario que posean el tamaño adecuado para asegurar una buena liberación de las especies minerales.

Los minerales que flotan se mantienen en una espuma estable en la parte superior de la celda de flotación, de donde son retirados por rebase para formar el concentrado.

19.2 Tipos de Reactivos

Durante la etapa de molienda, a la pulpa se le agregan reactivos específicos para pasar a la etapa de flotación:

Reactivos espumantes: alteran la tensión superficial de líquidos. Su estructura les permite agruparse hasta formar otra fase distinta del resto del fluido, formando una espuma que separa el mineral del resto de la ganga. Su objetivo es producir burbujas resistentes, de modo que se adhiera el mineral de interés.

Reactivos colectores: favorecen la condición hidrofóbica y aerofílica de las partículas de sulfuros de los metales que se quiere recuperar, para que se separen del agua y se adhieran a las burbujas de aire. Deben utilizarse seleccionando el mineral de interés para impedir la recuperación de otros minerales.

Reactivos depresantes: se utilizan para provocar el efecto inverso al de los reactivos colectores, esto es, para evitar la recolección de otras especies minerales no deseadas en el producto que se quiere concentrar y que no son sulfuros.

Modificadores de pH: sirven para estabilizar la acidez de la pulpa en un valor de pH determinado, proporcionando el ambiente adecuado para que el proceso de flotación se desarrolle con eficiencia. Las burbujas de aire generadas arrastran consigo hacia la superficie los minerales sulfurados, rebasando el borde de la celda de flotación hacia canales donde esta pulpa es enviada a la etapa siguiente.

19.3 Etapas del Proceso de Flotación

La flotación contempla tres fases:

-  Fase sólida: corresponde a las materias que se quiere separar (material mineral).
-  Fase líquida: es el medio en que se llevan a cabo dichas separaciones.
-  Fase gaseosa: se refiere al aire inyectado en la pulpa para poder formar las burbujas, que son los centros sobre los cuales se adhieren las partículas sólidas.

Los productos de la flotación contienen habitualmente entre un 50% y 70% de sólidos. Gran parte del agua contenida en las pulpas producidas por la flotación es retirada en los espesadores de concentrado y cola, los que realizan simultáneamente los procesos de sedimentación y clarificación. El producto obtenido en la descarga de los espesadores de concentrado puede contener entre 50% y 65% de sólidos. El agua remanente en estos concentrados espesados es posteriormente retirada mediante filtros hasta obtener un valor final que va desde un 8% hasta un 10% de humedad en el producto final. Este último es la alimentación para la siguiente etapa.

SEDIMENTACION Y ESPESAMIENTO

La sedimentación es la separación de partículas sólidas en suspensión de un líquido que se verifica por asentamiento gravitacional. Tales operaciones pueden dividirse en espesamiento y clarificación. Aunque se rigen por principios semejantes, estos procesos difieren en que el objetivo primario del espesamiento es incrementar la concentración de sólidos, mientras que la clarificación sirve para separar los sólidos de una corriente relativamente diluida.

Las separaciones de clarificación se caracterizan por la sedimentación que tiene lugar sin que haya interfase claramente definida entre el líquido limpio y el sedimento y que como consecuencia la capacidad está limitada por la cantidad de sólidos que puede ser aceptada en el rebase. Las operaciones de espesamiento, por otra parte, se caracterizan por una interfase agua limpia y sólidos con lo cual la capacidad está limitada por las condiciones de descarga inferior.

Se utilizan dos criterios para especificar un equipo de sedimentación: área superficial y profundidad. El área superficial debe ser suficientemente grande para asegurar que la velocidad ascendente del líquido que sale por el rebase no sea mayor que la velocidad de asentamiento de la partícula de más lento asentamiento que deba recuperarse. El área de un clarificador se determina manteniendo muestras de pulpa en una probeta graduada durante diferentes lapsos de tiempo y retirando el líquido situado en la parte superior para efectuar el análisis de sólidos en suspensión. En realidad, el clarificador es un clasificador y debe analizarse como tal, es decir, describiendo su rendimiento en términos de una curva de rendimiento. Las áreas de los espesadores también se evalúan examinando las pulpas en probetas graduadas, en este caso, analizando la velocidad a la que desciende la interfase entre el agua clara y el sólido.

Para optimizar el tiempo de residencia durante el proceso de sedimentación se utilizan aditivos floculantes. Un floculante es una sustancia química comúnmente orgánica que aglutina sólidos en suspensión una vez efectuada su coagulación, provocando su precipitación. Existen floculantes sólidos y líquidos. Estos son mezclados con las soluciones

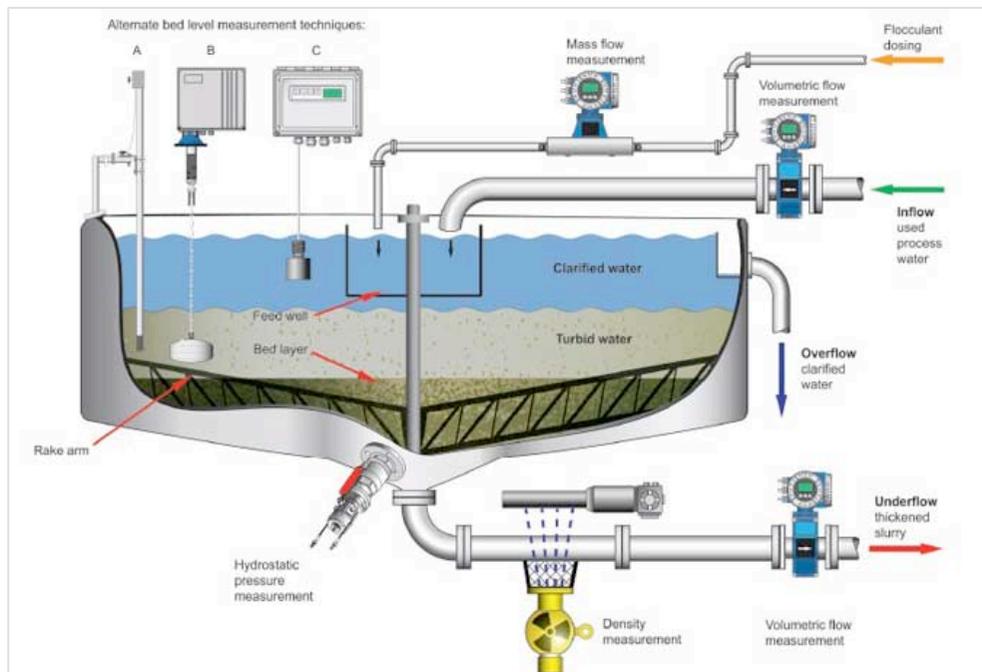
20.1 Espesadores

Un espesador sirve para sacar el agua de una pulpa; es decir, para *espesar el material*. Toda la estructura es metálica y trabaja bajo el principio de gravedad o sedimentación, pues los sólidos van hacia el fondo y el agua se va hacia arriba. Está conformado por un reductor o un gearbox, que en realidad sirve no solo para variar la velocidad sino más bien para brindar mayor fuerza al torque en el fondo del tanque. En su parte superior tiene un motor hidráulico ligado a su propio reductor. Este motor hidráulico tiene una cierta velocidad y un cierto torque, y gracias al gearbox esa velocidad se disminuye. Las velocidades en las rastras son bien bajas, casi imperceptibles, y gracias a ello lo que se obtiene es una cama de sólidos.

Al igual que el agitador también tiene un eje, pero ya no con hélices sino con rastras de acero al carbón, las cuales tienen una especie de aletas que han sido diseñadas para realizar el trabajo de arrastrar los sólidos al centro. Es decir que en vuelta y vuelta van llevando los sólidos hasta el centro del espesador.

De acuerdo a la dimensión del tanque y la cantidad de la pulpa, hay casos en los que en un solo espesador hay un sistema con tres reductores, y eso se usa para ejercer más fuerza en el torque. Ver figura 94.

Figura 94 Esquema de espesador



Dentro de los componentes de los espesadores se pueden apreciar agitadores y rastras, un eje principal, motor, puente de metal para el mantenimiento y ubicación de los sistemas electromecánicos, caja reductora y un tanque de acero al carbón, que generalmente tiene la forma de un embudo, y cuya profundidad varía dependiendo de la cantidad de líquidos que se quiera recuperar. Ver figura 95.

Figura 95 Eje y rastra de espesador



En este equipo la pulpa ingresa al tanque y el espesador separa los líquidos de los sólidos, luego los sólidos se descargan por la parte inferior del tanque. Su mecanismo de agitación está diseñado para que haga una vuelta cada 13 o 12 minutos. Es muy lento, de tal manera que los sólidos comienzan a sedimentarse. Para optimizar este proceso un floculante adecuado es muy importante.

Asimismo, los espesadores cuentan con instrumentos que indican el torque, porque a medida que se van sedimentando los sólidos el torque va aumentando. Entonces ese torque es medido y controlado por instrumentos que indican cuando el espesador está sobrecargado, siendo necesario un mantenimiento normal de los sistemas hidráulicos y electromecánicos.

En conclusión, un espesador lo que hace es generar una pulpa con mayor densidad, recuperar agua, y por ello se pueden usar en las plantas concentradoras para espesar los *concentrados finales* y después pasarlos a una etapa de secado con el objetivo de tener un

menor contenido de humedad en el concentrado final. También se pueden utilizar para recuperar agua en el caso de *relaves*; desde ese punto de vista es un equipo ideal porque ayuda a recircular el agua en el proceso.

Hay que anotar que existen tres tipos de espesadores:

- ✚ Espesadores High Rate Thickeners o HRT.
- ✚ Espesadores High Compression Thickeners o HCT.
- ✚ Espesadores Paste Thickeners o PT.

Los tres trabajan bajo el mismo principio y tienen el objetivo de crear sólidos y recuperar agua, pero la diferencia entre ellos es que unos harán más sólidos que otros, pues la concavidad de su tanque – distinta en cada tipo – determinará los sólidos que se concentrarán y la cantidad de agua que se recuperará.

20.1.1 Espesador High Rate Thickeners HRT

Método pionero de espesamiento y clarificación, incluye avances tales como brazos de rastrillo triangulares de perfil bajo para reducir el torque del rastrillo. Posee sistemas de espesamiento para auto-diluir la alimentación mientras optimiza el rendimiento y el consumo de floculante. El deshidratador reduce la cantidad de espuma que se forma en la superficie de los espesantes e incorpora zonas interconectadas superior e inferior para mejorar aún más el rendimiento. Utiliza la química de floculación para aumentar dramáticamente las tasas de sedimentación (0,35-1,5 t / m²h). Ofrece un flujo inferior consistente y de alta densidad. Ver figura 96.

Figura 96 Espesador High Rate Thickeners HRT



20.1.2 Espesador High Compression Thickeners HCT

El espesador High Compression Thickeners consigue un underflow de mayor densidad. El equipo ha sido diseñado con una huella más pequeña y paredes más altas que el espesador de alta velocidad o espesantes convencionales. El HCT reacciona relativamente rápido a los cambios y puede ser automatizado, con control basado en el inventario de sólidos constante. Se adapta mejor a procesos relativamente consistentes. Utiliza la química de la floculación para aumentar dramáticamente las tasas de sedimentación (0,35-1,5 t / m²h). Consigue un flujo inferior consistente y de mayor densidad que los espesantes de alta velocidad. Ver figura 97.

Aplicaciones Típicas

- Relaves.
- Dispositivo carga acoplada (CCD).
- Soluciones pre y post lixiviación.
- Lodos de arenas minerales.
- Soluciones de arcilla.

Figura 97 Espesador High Compression Thickeners HCT



20.1.3 Espesadores Paste Thickeners PT

El espesador PT obtiene la máxima densidad de subflujo con un límite de fluencia superior a 200 Pa. El espesante de pasta, tiene un alto flanco y pendiente pronunciada y reacciona con relativa rapidez a las cambiantes condiciones del proceso. El sistema puede utilizar la automatización, con el control basado en el inventario consistente de sólidos para lograr la densidad requerida de subflujo.

El espesante de pasta se beneficia de condiciones de alimentación relativamente estables. Produce un flujo inferior de mayor densidad que los espesantes de alta compresión, típicamente un 2 a un 5 por ciento más p/p, con una tensión de fluencia de hasta 200 Pa. Trabaja en procesos en los que se requiere un alto nivel de deshidratación, tales como trenes de decantación de corriente de carga acoplada (CCD), plantas de relleno de pasta y eliminación de relaves superficiales. Ver figura 98.

Figura 98 Espesador Paste Thickeners PT



Finalmente, para la construcción de los agitadores y espesadores es preciso que se inspeccionen con perfección todos los elementos que la conformarán. Desde una adecuada inspección a las soldaduras utilizando tintes penetrantes y radiografías, y realizando pruebas al vacío de las juntas de las soldaduras; hasta numerosas pruebas neumáticas a las planchas de refuerzo de las boquillas. Así también se deberá observar la perfecta verticalidad y redondez de los tanques, como el torqueo de los pernos y la adecuada disposición de los sistemas electromecánicos e hidráulicos. Según las características de la pulpa, y otras variables, el tanque se puede construir en base a diferentes materiales como el ASTM 24° tipo 2304 (dúplex), ASTM 240 tipo 316L y acero al carbono, especialmente ASTM A36. Además, por utilizarse en la flotación, los procesos fisicoquímicos, la recuperación de minerales, su concentración o separación desde especies de diferente mineralización - aprovechando las propiedades de hidrofobicidad natural o inducidas, mediante reactivos químicos (colectores, espumantes, modificadores) - estos equipos son seguros, rentables y demuestran una excelente productividad en la minería. Su uso significa velocidad en la flotación, eficiencia en la obtención de minerales y ahorros importantes en la recuperación y recirculación de las aguas en los procesos, al tiempo que los adecuados mantenimientos pueden garantizar una vida útil bastante prolongada.

20.2 Clarificador

La diferencia entre un clarificador y un espesador es sutil ya que visualmente parecen iguales. Fundamentalmente, se usan espesadores y clarificadores para depositar sólidos, lo que resulta en la separación de líquidos y sólidos. Los espesadores se utilizan para concentrar los líquidos, mientras que los clarificadores se utilizan para purificar líquidos. Ver figura 99 y 100.

El espesador le dará un underflow de alta densidad mientras que un clarificador no. El desbordamiento del clarificador suele ser más limpio o claro que el desbordamiento del espesador. Los clarificadores, dependiendo de la aplicación se pueden utilizar para recuperar agua de proceso inmediatamente reutilizable, así como la extracción de finos y otros materiales.

Figura 99 Esquema general de un clarificador

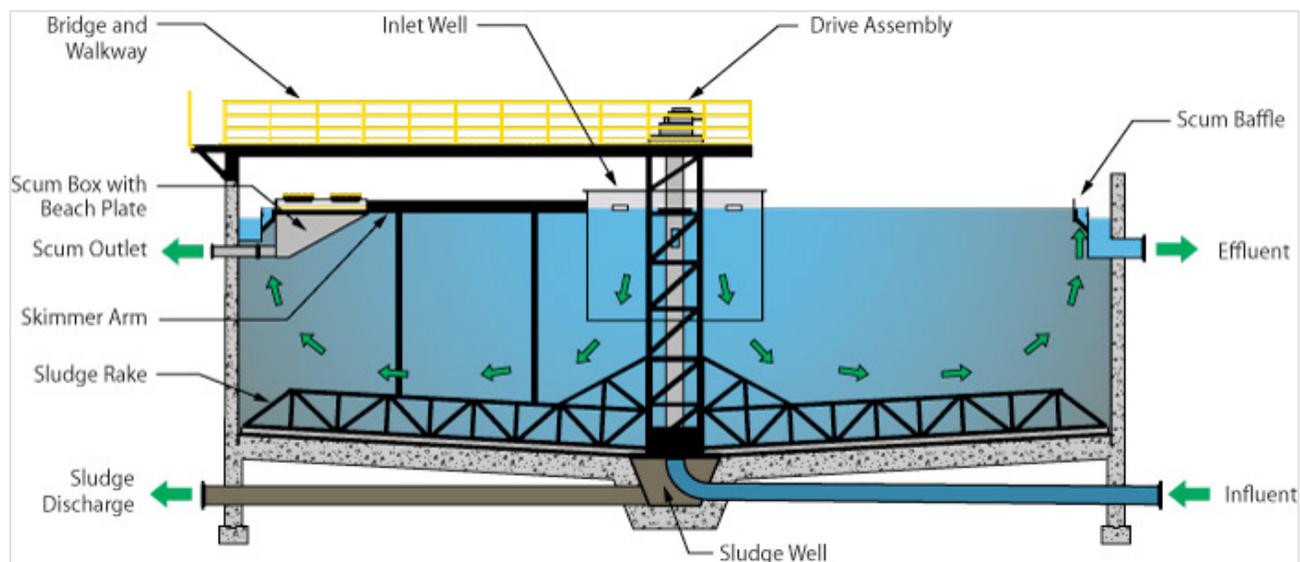
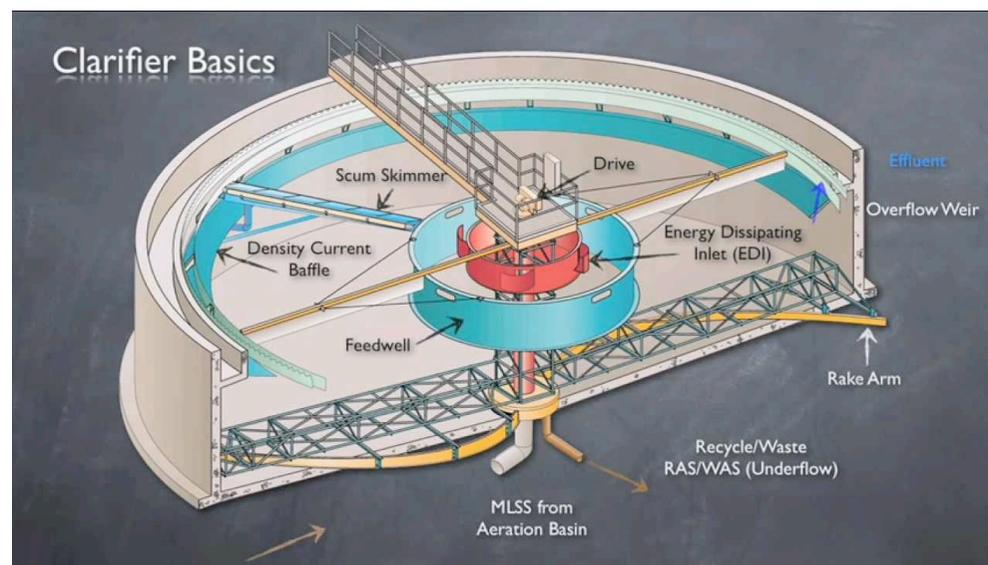


Figura 100 Esquema general de un clarificador



PROCESO DE FILTRACION

Se denomina filtración al proceso unitario de separación de sólidos en una suspensión por medio de un medio mecánico poroso, también llamados tamiz, criba, cedazo o filtro. En una suspensión en un líquido mediante un medio poroso, retiene los sólidos mayores del tamaño de la porosidad y permite el paso del líquido y partículas de menor tamaño de la porosidad. Generalmente al medio mecánico poroso usado para la separación mecánica se le llama filtros, tamices, cedazos, criba, mallas o telas.

El patrón de clasificación de los procesos de filtración es diverso y se puede realizar en función de los siguientes criterios:

- ❖ El mecanismo de filtración
- ❖ La naturaleza de la mezcla
- ❖ La meta del proceso
- ❖ El ciclo operacional
- ❖ La fuerza impulsora

En general, estas categorías no se excluyen mutuamente y los procesos de filtración suelen clasificarse principalmente de acuerdo al *mecanismo*, a la *fuerza*, al *ciclo* y a continuación según los demás factores adicionales.

En procesos mineros la filtración es la operación de extracción mecánica de líquidos de las pulpas para obtener sus sólidos y/o recuperación de un líquido de valor, en una concentración adecuada para:

- ❖ Seguir procesando
- ❖ transporte
- ❖ Aglomeración
- ❖ Disposición
- ❖ Recuperación de líquidos de valor

A continuación, se muestran los equipos principales utilizados en la etapa de filtración dependiendo de la granulometría del producto a tratar.

21.1 Filtración Gravimétrica

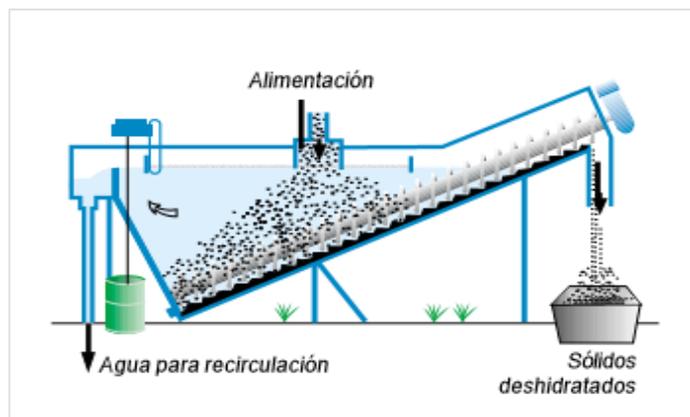
Cuando las partículas de sólido en una pulpa son demasiado gruesas para que las fuerzas capilares *atrapen* el agua, el uso de la gravedad es suficiente para extraer el agua y permitir el transporte de sólidos.

21.1.1 Filtro de Espiral

Es un filtro apto para sólidos gruesos cuyas características generales son: Ver figura 101.

- Alimentación de hasta 1% de sólidos por peso.
- Flujos de 10 —1.000 m³/h (44-44.000 USGPM).
- Humedad de producto aproximada de 30%.
- Gran depósito de sedimentación.

Figura 101 Filtro de espiral

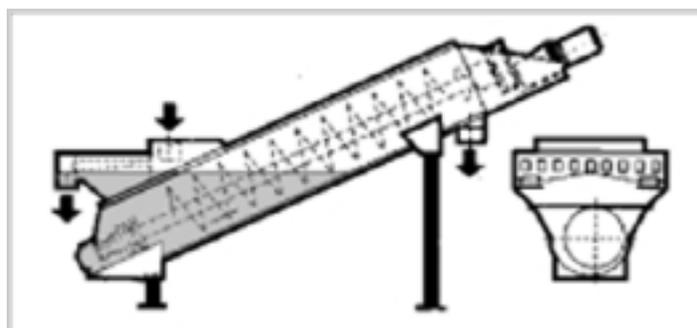


21.1.2 Tornillo de Arena

Esta es una versión más simple del filtro de espiral, se utiliza principalmente para arena natural. Estas arenas normalmente se clasifican y las partículas bajo 10-50 micrones se extraen, lo que significa que el depósito de sedimentación es muy limitado comparado con el filtro de espiral. Sus características generales son: Ver figura 102.

- Relación de alimentación de arena: 1:3 de agua aproximadamente.
- Capacidad de 6-95 m³/h.
- Contenido de remanente de humedad: 20-25%.
- Inclinación de tornillo de aproximadamente 25°.

Figura 102 Filtro tornillo de arena

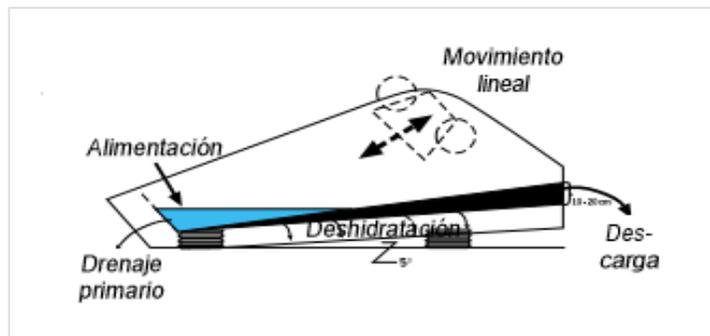


21.1.3 Colador de Filtración

El colador de filtración es una versión de un harnero en movimiento lineal, desplazando los sólidos hacia arriba en una placa inclinada, a una inclinación de 5°, La deshidratación se produce en la cama de arena en movimiento. Sus características generales son: Ver figura 103.

- Solamente es para arena.
- La alimentación contiene un máximo de % de sólidos por peso.
- Contenido de remanente de humedad: 13-17% de agua por peso.
- Capacidad de 70-190 ton/hr (arena) y 5-55 ton/hr (carbón).

Figura 103 Colador de filtración

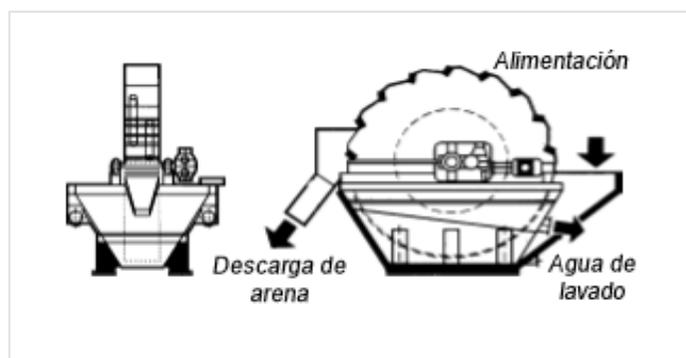


21.1.4 Rueda de Filtración

Esta rueda se utiliza principalmente en el dragado de arena natural y gravilla. La máquina cuenta con un dispositivo de drenaje simple en las cubetas de extracción de arena. Por consiguiente, el contenido de agua se puede reducir hasta un 15-18% a pesar de que la alimentación contenga cierta cantidad de finos. El depósito es limitado, lo que significa que la máquina es sensible a flujos de altos volúmenes. Sus características generales son: Ver figura 104.

- Tamaño de alimentación típico, 0-2 mm.
- Velocidad variable, como opción.
- Flujo de alimentación 1.500 —2.400 mafh.

Figura 104 Rueda de filtración



21.2 Filtración por Presión

A medida que las partículas se vuelven más finas, aumenta la resistencia hacia su extracción y en esa condición, la filtración por gravedad no se puede utilizar. Se debe usar la **presión**. Creando una presión diferencial a través de una torta (medio filtrante) de sólidos, se puede extraer el líquido de dos formas:

1. Deshidratación por compresión.
2. Deshidratación por soplado.

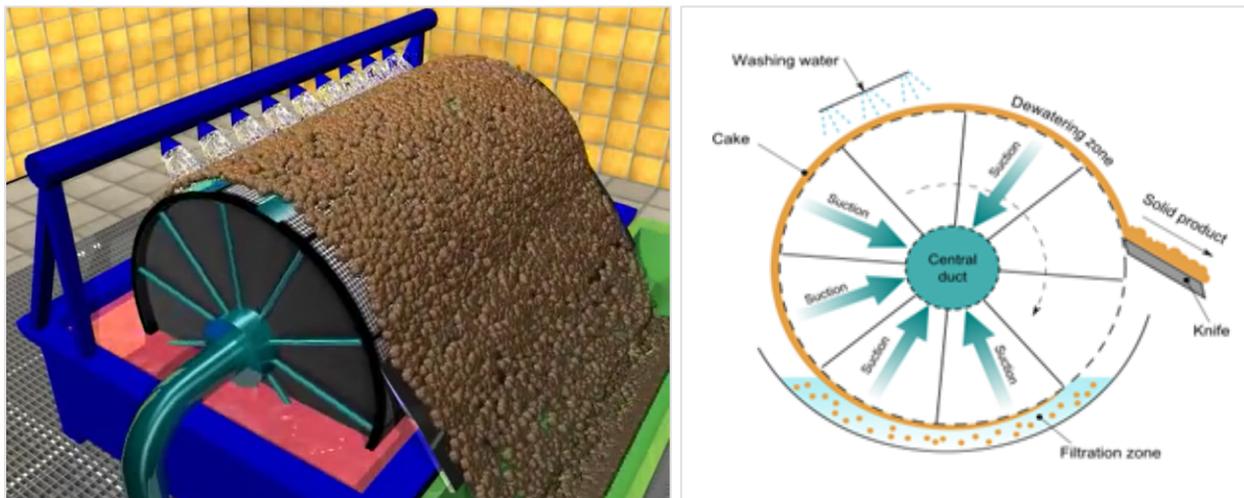
En la Deshidratación por compresión, lo que se hace es suplantarlo el líquido en una torta por partículas.

En la Deshidratación por soplado, lo que se hace es suplantarlo el líquido en una torta por aire. Para realizar el soplado se utilizan **filtros de vacío**, en cambio para realizar la compresión, se utilizan **filtros de presión de placas verticales**. Los filtros de tubo, utilizan principalmente la compresión, aunque en algunos casos, usan una combinación de compresión y aire depurado.

21.2.1 Filtros de Vacío de Tambor

La filtración de vacío es la forma más simple de deshidratación por soplado. Un diferencial de presión creada por un vacío aplicado al interior del tambor de filtro, hace que el aire fluya a través del filtro y por consiguiente extrae el agua contenida. Los sólidos se retienen en una tela de filtro y son desplazados hacia el punto de descarga por rotación del tambor. Ver figura 105.

Figura 105 Filtro de Tambor

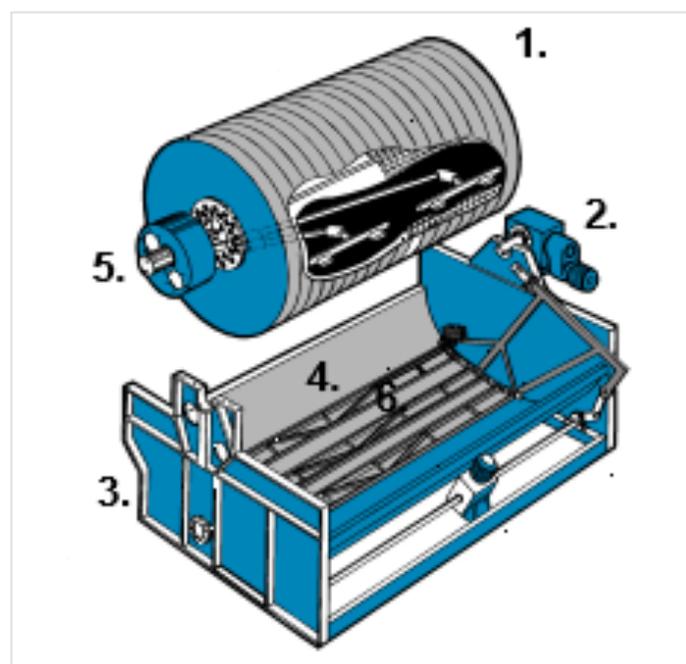


Ha sido el filtro de vacío de mayor uso en las plantas de filtrado y secado. Se compone de:

21.2.1.1 Tambor (figura 106)

1. Tambor con sistema de filtro de paño montado sobre rejillas de segmento con tuberías de drenaje interno.
2. Transmisión del tambor con velocidad variable.
3. Estructura de soporte.
4. Estanque con gran capacidad.
5. Cabezal de vacío con dispositivo de sello para conectar el tambor rotatorio e la tubería de vacío estacionaria.
6. Agitador para suspensión de partículas en el estanque.

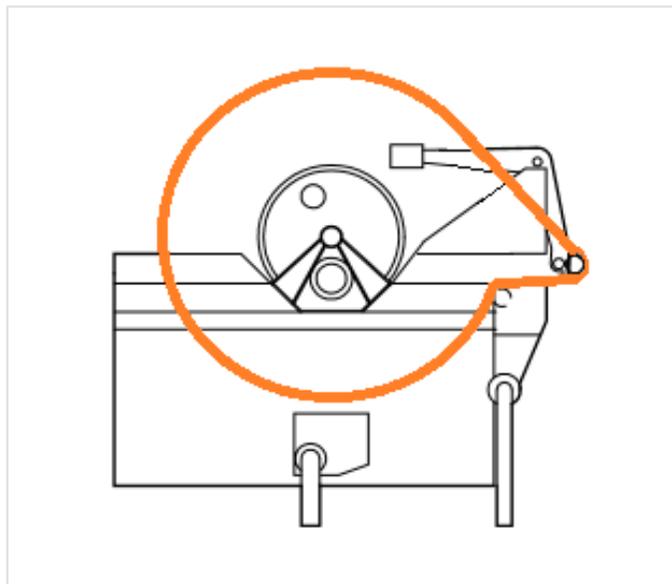
Figura 106 Filtro del Tambor



21.2.1.2 Correa del Tambor (Figura 107)

El filtro de la correa de descarga del tambor es similar a la versión de tambor estándar, excepto que la tela va separada del tambor y le permite pasar sobre un sistema de descarga. El diseño permite el lavado de la tela y es preferido para la deshidratación de lodos que contienen partículas finas que producen una aglutinación de filtro pegajosa y difícil de descargar.

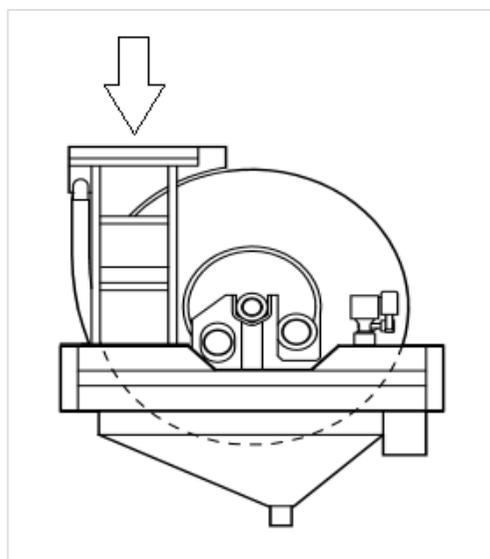
Figura 107 Correa del Tambor



21.2.1.3 Alimentación Superior del Tambor (Figura 108)

Este se ha diseñado para deshidratar lodos que contienen partículas más gruesas. El principio de alimentación superior promueve la segregación de partículas más gruesas formando una capa previa en la tela del filtro y por consiguiente aumenta la tasa de filtración.

Figura 108 Alimentación del Tambor



21.2.2 Filtro de Presión de Placa Vertical

El filtro de presión es de tipo *presión mediana*, operando en el orden de una fluctuación de 6-10 bar. La máquina se atiende principalmente en el concepto de deshidratación por *soplado*, en donde el agua es desplazada por medio de aire a medida que pasa por la torta del filtro con la penetración de aire a través de un sistema de poros. La fuerza motriz de este método de filtración es la

presión diferencial a través de la torta. Una mayor caída de presión creará una tasa de deshidratación más alta y menor humedad residual. Ver figura 109.

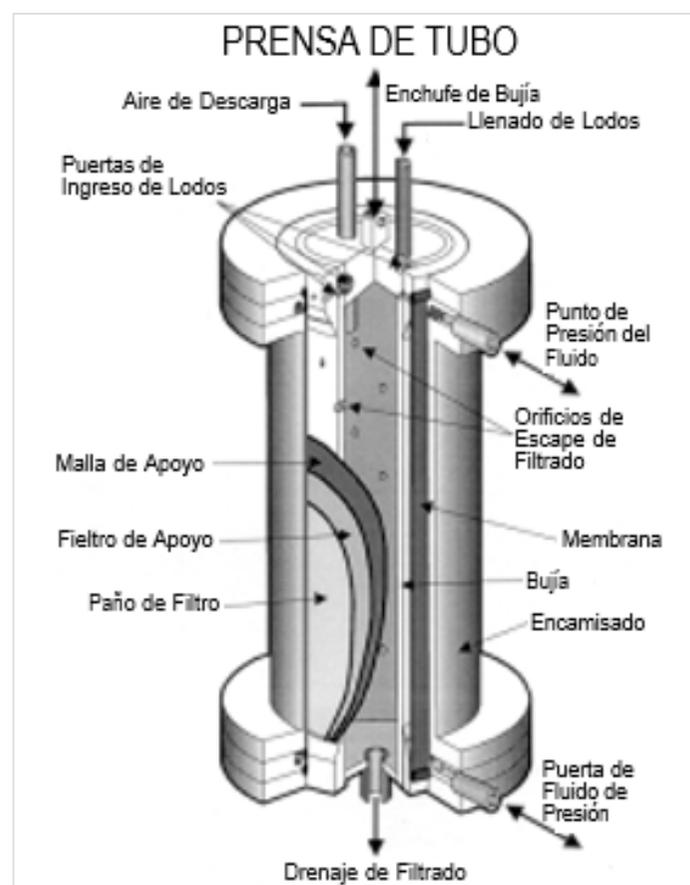
Figura 109 Filtro de placa vertical



21.2.3 Filtro de Tubo

A medida que las partículas se vuelven más finas, el sistema de filtro de prensa se sobrecarga por la fuerte adherencia de partículas al agua debido a las fuerzas capilares extremadamente poderosas. La única manera de continuar con la deshidratación mecánica es cambiarse a diferencias de mayor presión a lo largo de la torta del filtro. Esto se debe realizar en un *filtro de tubo*, ya que el filtro convencional de presión no puede aguantar esta presión. Aplicando una presión más alta o fuerza motriz al proceso de filtración, se puede producir una torta de filtro más seca con mejores características de tratamiento. El filtro de tubo opera a presiones de hasta 140 bar (2.000 psi) y ha sido diseñado originalmente para la deshidratación de lodos de caolín fino. Desde entonces ha sido aplicado a variadas operaciones de filtración difíciles. Ver figura 110.

Figura 110 Filtro de tubo



21.2.4 Filtro de Discos

El filtro de discos cerámicos, es un filtro muy utilizado en la actualidad en plantas de minería metálica en Chile. El principio de operación es por medio de una presión de vacío generada en cada uno de los discos en aquella sección que está en contacto con la solución a filtrar. El disco también está dividido en secciones y el medio filtrante es una lámina de cerámica de microporos. Es muy utilizado en los puertos de embarque de concentrado de cobre procesando la pulpa que llega por medio de un mineroducto. Ver figura 111 y 112.

Figura 111 Filtro de discos



Figura 112 Esquema de discos



Sección 22

PROCESO DE SECADO

Existen varios tipos de operaciones térmicas, que se diferencian entre sí por la metodología seguida en su procedimiento; puede ser por eliminación de agua de una solución mediante el proceso de ebullición en ausencia de aire; también puede ser por eliminación de agua mediante adsorción de un sólido, y por reducción del contenido de líquido en un sólido, hasta un valor determinado mediante evaporación en presencia de un gas. Los sólidos recuperados pueden tener formas diferentes como escamas, gránulos, cristales, polvo, tablas o láminas continuas y poseer propiedades muy diferentes.

El producto que se procesa térmicamente puede soportar temperaturas elevadas o bien requiere un tratamiento suave a temperaturas bajas o moderadas. Así el procesamiento térmico se clasifica normalmente de acuerdo a la temperatura de operación en los siguientes rangos generales:

Térmico Bajo (100 - 200°C) utilizado para secar, evaporar líquidos de sólidos y secado. Tipos de equipos:

- Secadores Giratorios de Calor Directo.
- Secadores Giratorios de Calor Indirecto.
- Secadores de Tubo de Vapor.
- Secadores de Tornillo de Calor Indirecto.
- Secadores de Cama de Fluidos.

Térmico Mediano (850 – 950°C) utilizado para calcinamiento, esponjamiento de arcilla, quemado de cal y quemado de arena de fundición. Tipos de equipos:

- Hornos de Secado Giratorios de Calor Directo.
- Hornos de Secado Giratorios de Calor Indirecto.
- Hornos de Secado Vertical.
- Hornos de Secado de Cama de Fluidos.

Térmico Alto (1300 - 1400°C) utilizado para peletización de concentrados de mineral de hierro y calcinamiento de carbón de petróleo. Tipos de equipos:

- Horno de Secado Giratorio de Calor Directo.

22.1 Secadores Directos

La transferencia de calor para la desecación se logra por contacto directo entre los sólidos húmedos y los gases calientes. El líquido vaporizado se arrastra con el medio de desecación; es decir, con los gases calientes. Los secadores directos se llaman también secadores por convección.

22.2 Secadores Indirectos

El calor de desecación se transfiere al sólido húmedo a través de una pared de retención. El líquido vaporizado se separa independientemente del medio de calentamiento. La velocidad de desecación depende del contacto que se establezca entre el material mojado y las superficies calientes. Los secadores indirectos se llaman también secadores por conducción o de contacto.

PROCESO DE HIDROMETALURGIA

Es la rama de la metalurgia que cubre la extracción y recuperación de metales usando soluciones líquidas, acuosas y orgánicas. Se basa en la concentración de soluciones en uno a varios elementos de interés metales, presentes como iones, que por reacciones reversibles y diferencias físicas de las soluciones son separados y aislados de forma específica. Como resultado se obtiene una solución rica en el ion de interés y con características propicias para la próxima etapa productiva.

En general los metales extraídos por esta técnica son provenientes de los minerales anteriormente lixiviados en medios sulfato, cloruro, amoniacal, etc. Metales como *cobre, níquel, vanadio, cromo y uranio*, son extraídos de esta forma. Por ese último metal se dio comienzo a la Hidrometalurgia durante el auge de la industria nuclear apoyada económicamente por la segunda guerra y posteriormente guerra fría.

Los procesos *hidrometalúrgicos* normalmente operan a temperaturas bajas en el rango de 25 a 250 °C. Las presiones de operación pueden variar de unos pocos kPa (kilopascales) en vacío, hasta presiones tan altas como 5000 kPa.

El punto fuerte de la hidrometalurgia radica en la gran variedad de técnicas y combinaciones que pueden ser usadas para separar metales una vez que han sido disueltos a la forma de iones en solución acuosa.

El proceso hidrometalúrgico más importante es el colado, mediante el cual el mineral deseado se va disolviendo selectivamente, aunque comúnmente también son frecuentes los procesos de lixiviación y biolixiviación dentro de la metalurgia contemporánea.

La hidrometalurgia se desarrolla en general en tres etapas sucesivas:

- ❖ Primera etapa, lixiviación que consiste en la disolución selectiva de los metales en una solución acuosa, desde los minerales que los contienen.
- ❖ Segunda etapa, consiste en el procesamiento y transformación de los metales disueltos en el medio acuoso producido en la etapa anterior, mediante agentes externos que permiten la purificación y/o concentración de los metales que se busca producir.
- ❖ Tercera etapa consiste en la recuperación selectiva de los metales disueltos en el medio acuoso generado. Esta etapa es conocida como precipitación, la cual genera como producto final, el metal, ya sea en forma pura o como parte de un compuesto que lo contiene.

En el proceso físico químico de la lixiviación, intervienen agentes lixiviantes sobre el mineral que actúan como disolventes de los metales, los que quedan contenidos y disueltos en la solución acuosa.

En la purificación u/o concentración están comprendidos los procesos de adsorción con carbón activado y los procesos de extracción con resinas de intercambio iónico o resinas líquidas (SX).

En la precipitación están comprendidos los procesos de precipitación por cristalización o cementación, precipitación por reducción de gases a presión y la precipitación electrolítica (electroobtención EW y electrodeposición ER).

Uno de los procesos hidrometalúrgicos más conocidos son los aplicados a la obtención de cobre conocido como sistema LIX-SX-EW.

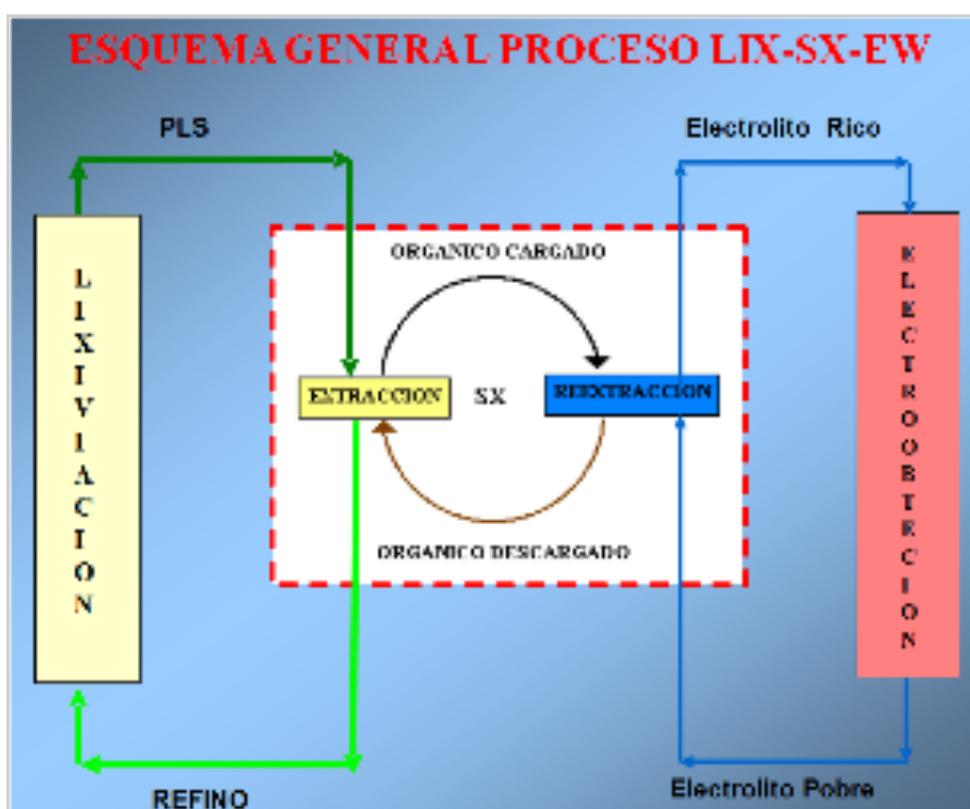
23.1 Sistema LIX / SX / EW

Hoy en día es común encontrar plantas de procesamiento de minerales mediante LIX-SX-EW que cuentan con lixiviación en pilas para minerales de tipo óxidos y sulfuros secundarios en el rango de 0,3 a 1,5 % de cobre y lixiviación en botaderos (incluyendo sulfuros primarios) con minerales que se encuentran en el rango de 0,1 a 0,5 % de cobre. Ver figura 113.

La técnica de extracción por solventes en conjunto con electro-obtención (EW) de cátodos, ha significado un avance sustancial en la minería del cobre, logrando hacer posible económicamente la explotación de yacimientos de baja ley, que hasta hace pocos años se consideraba inviables.

El proceso de extracción por solventes (SX) se ha aplicado con gran éxito en la minería, partiendo desde los años 40 con la extracción del uranio y su uso con fines bélicos en la segunda guerra mundial, esta técnica ha sido aprovechada con fines hidrometalúrgicos a una serie de especies metálicas como: Cu, Ni, Zn, Mo, Wo, V, tierras raras, metales del grupo del platino, entre otros. Sin embargo, fue en los años 60 con la invención de los extractantes tipo hidroxioximas cuando su uso se dio en gran escala en la recuperación del cobre desde soluciones ácidas. Las soluciones de lixiviación que actualmente se utilizan en extracción por solventes está en el rango de 0,5 a 8 g/L de cobre con temperatura entre 15 a 25 °C. Chile se ha convertido en un importante productor de cátodos vía procesos hidrometalúrgicos, la cual desplazó en el año 1997 a la producción de cátodos electrorefinados y refinados a fuego en el país. El auge del proceso SX-EW comienza a partir del año 1994, ya que antes de 1993 la producción no superaba las 160.000 ton anuales por esta vía, situación que posteriormente se incrementó exponencialmente, superando en menos de cinco años el millón de toneladas anuales.

Figura 113 Esquema General del Proceso



23.2 Procesos de Lixiviación

Es un proceso de lavado que se realiza a minerales oxidados y sulfurados, que tiene por objetivo recuperar total o parcialmente las especies solubles de metal, desde un mineral en una solución acuosa, mediante la acción de agentes químicos.

Para el caso de minerales oxidados de cobre, el agente lixivante más utilizado es el ácido sulfúrico, esto gracias a su selectividad, disponibilidad, costo y su capacidad de manejo y transporte. El mecanismo de disolución del agente actúa de tres formas:

 Físico

 Químico

 Electroquímico

El mecanismo actuante dependerá del tipo de mineral, es decir de su estructura.

El mecanismo *físico* se produce en minerales que poseen un tipo de enlace *iónico*, es decir no hay una reacción química involucrada, un ejemplo puede ser la disolución del NaCl (Sal) en agua, la cual al ser agitada en un reactor genera iones de sodio y cloruro disueltos en agua.

El mecanismo *químico* se produce en minerales que poseen un tipo de enlace *iónico* o *covalente*, a mayor grado de enlaces covalentes en el mineral, más aceptable será para la disolución química. Por ejemplo, la sílice (ganga) es muy covalente e insoluble en condiciones normales de lixiviación. Así se pueden presentar varios mecanismos químicos en el mineral:

- Neutralización
- Acomplejamiento
- Desplazamiento
- Oxidación
- Protonación

Los minerales que se disuelven por mecanismo químico son:

- Óxidos de cobre
- Sulfuros
- Sulfatos
- Carbonatos

El mecanismo electroquímico se produce en minerales conductores o semiconductores, tales como los sulfuros de cobre primario y secundario. La disolución del sólido aumenta con la concentración del reactante y con la temperatura. El mecanismo electroquímico se caracteriza por que existe en ellos una transferencia de electrones en distintas zonas del sólido o entre el sólido y un ion en la solución (ánodo - cátodo).

23.3 Métodos de Lixiviación

Existe una variedad de métodos de lixiviación, que dependen fundamentalmente de las características del mineral. Los procesos más habituales son:

- 🏗️ Lixiviación in situ.
- 🏗️ Lixiviación pilas y botaderos.
- 🏗️ Lixiviación en bateas.
- 🏗️ Lixiviación por agitación
- 🏗️ Lixiviación bacteriana de sulfuros de baja ley.

En la tabla 14 se pueden ver sus rangos de aplicación y resultados generales.

Tabla 14 Procesos de Lixiviación

Rangos de Aplicación y resultados	Métodos de Lixiviación			
	En Botaderos	En Pilas	Percolación	Agitación
Ley del mineral	Baja ley	Baja-media	Media-alta	Alta ley
Tonelaje	grande	Gran a mediano	Amplio rango	Amplio rango
Inversión	mínima	media	Media a alta	alta
Granulometría	Corrido de mina	Chancado grueso	Chancado medio	Molienda húmeda
Recuperaciones típicas	40 a 50 %	50 a 70%	70 a 80%	80 a 90 %
Tiempo de tratamiento	Varios años	Varias semanas	Varios días	horas
Calidad de soluciones	Diluidas (1-2 gpl Cu)	Diluidas (1-6 gpl Cu)	Concentradas (20-40 gpl Cu)	Medianas (5-15 gpl Cu)
Problemas principales en su aplicación	-recuperación incompleta, -reprecipitación de Fe y Cu, -canalizaciones, -evaporación - pérdidas de soluciones - soluciones muy diluidas.	-recuperación incompleta, -requiere de grandes áreas, - canalizaciones, - reprecipitaciones, - evaporación.	- bloqueo por finos, - requiere de más inversión, - manejo de materiales, -necesidad de mayor control en la planta.	- molienda, - lavado en contracorriente, - tranque de relaves, - inversión muy alta, - control de la planta es más sofisticado.

23.3.1 Lixiviación in Situ

La lixiviación in situ, como su nombre lo indica, corresponde al proceso a través del cual se aplican soluciones directamente sobre el mineral ubicado en su lugar de origen, sin someterlo a labores de extracción minera, existiendo dos modalidades según su ubicación respecto del nivel freático de las aguas subterráneas.

23.3.1.1 Lixiviación In Situ Gravitacional

Se aplica a yacimientos ubicados por sobre el nivel freático de las aguas subterráneas. En este caso las soluciones deben moverse por gravedad, lo que requiere de minerales con condiciones de alta permeabilidad en su origen, o con una fragmentación previa, como pueden ser aquellos yacimientos que ya fueron fracturados en una explotación minera anterior del tipo subterránea, con hundimiento por bloque (block caving) e idealmente con accesos operativos inferiores que permitan la recolección más expedita de las soluciones que fluyen concentradas por gravedad. Ver figura 114.

Figura 114 Lixiviación in situ gravitacional



23.3.1.2 Lixiviación In Situ Forzada

Se aplica a yacimientos inaccesibles ubicados debajo del nivel freático de aguas subterráneas, en cuyo caso se hace uso de la permeabilidad interna de la roca, de las temperaturas y de las altas presiones que se generan a varios cientos de metros de profundidad. Para ello se inyectan soluciones lixiviantes a través de pozos inyector, similares a los utilizados en la extracción del petróleo, y se succiona desde una batería de pozos cosechadores distribuidos geométricamente, de tal forma de estimular el paso de las soluciones a través de la roca del yacimiento, forzando así su disolución y recuperando las soluciones desde la superficie.

Resulta evidente que las filtraciones y pérdidas de soluciones constituyen parte importante de las ineficiencias de este proceso.

Esta técnica se ha utilizado en la recuperación de diversas sales fácilmente solubles, como son los yacimientos de halita, NaCl, silvina, KCl, minerales de uranio y algunos fosfatos.

23.3.2 Lixiviación en Bateas

Lixiviación en bateas (o por percolación) consiste en una solución de riego que circula a través de un lecho de mineral que se deposita previamente en depósitos de hormigón. Este proceso debe ser alimentado con minerales de ley alta-media, para que el proceso de lixiviación sea en tiempos de residencia razonablemente cortos, con el objetivo de amortizar la inversión inicial de la infraestructura para el proceso (estanques de hormigón con revestimiento antiácido). Ver figura 115.

Figura 115 Bateas de lixiviación



23.3.3 Lixiviación por Agitación

La lixiviación por agitación (en comparación con otros métodos de lixiviación), da las mejores recuperaciones en menor período de tiempo. Se utiliza preferiblemente para el mineral no poroso o mineral que libera demasiado fino, o con mayor contenido de arcilla. En este método, el mineral pasa por un proceso de molienda para formar una pulpa, que se trata en estanques de agitación. Ver figura 116.

Figura 116 Estanques agitadores de lixiviación



23.3.4 Lixiviación Bacteriana

La lixiviación bacteriana o biolixiviación es un proceso en el cual se emplean microorganismos para disolver los minerales, liberando un metal de valor presente en un mineral o en un concentrado, que con métodos convencionales sería muy difícil de extraer. La biolixiviación es el proceso convencional de lixiviación, catalizado biológicamente, pero aplicado a los minerales sulfurados, ante la necesidad de aumentar la cinética de su disolución. De esta manera la biolixiviación es un proceso químico, mediado por el agua y oxígeno atmosférico y un proceso biológico, mediado por microorganismos.

A escala comercial la biolixiviación es aplicada para la recuperación de cobre y uranio por lixiviación y de oro mediante un pretratamiento de minerales refractarios, que recibe el nombre de biooxidación. La tecnología de biolixiviación también ha sido probada en laboratorios para sulfuros de cobalto, galio, molibdeno, níquel, zinc y plomo (Brierley J.A., 2001).

Las bacterias que intervienen en los procesos de lixiviación son generalmente autótrofas 🌐, aeróbicas 🌐 y quimiosintéticas 🌐. Esta última característica, las hace capaces de oxidar minerales para producir el ión férrico y ácido sulfúrico, necesarios para las reacciones de biolixiviación. El ión férrico, es un agente fuertemente oxidante, que permite oxidar los minerales de sulfuro de cobre a sulfato de cobre que es soluble. Debido a esto, también se les llama microorganismos sulfo y ferro-oxidantes.

Su capacidad autótrofa les permite sintetizar sus componentes celulares a partir de compuestos inorgánicos, como la fijación del CO₂ de la atmósfera. Se alimentan de los minerales de los que obtienen energía y realizan esta tarea como parte de sus procesos metabólicos. También se caracterizan por ser organismos que viven en condiciones extremas (extremófilos), en este caso, las normales de los minerales: pH ácido y altas concentraciones de metales.

Todas estas características les confieren la clasificación de bacterias y arqueas quimilitoautotróficas ferro-sulfo oxidantes. Uno de sus principales exponentes es la bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans*, aislada por primera vez desde las aguas de una mina de carbón, cuyo descubrimiento se dio a conocer en 1947 (Colmer, A.R. y Hinkle, M.E, 1947). Así fue como se encontró la primera bacteria identificada capaz de lixiviar el cobre. Ver tabla 15.

La *Acidithiobacillus ferrooxidans*, ha sido la bacteria más estudiada para biolixiviación y por consiguiente de la que existe mayor información, sin embargo existen otros microorganismos identificados que solubilizan minerales sulfurados, como los que se encuentran en la Tabla 2.x, donde se entrega una lista de microorganismos reconocidos con importancia comercial en operaciones biohidrometalúrgicas como también aquellas que únicamente pueden ser exploradas en pruebas de laboratorio pero que parecen ser prometedoras a futuro.

Existe un proceso interesante para biolixiviación patentado por BioCOP®, desarrollado por BHP Billiton en Sudáfrica y aplicado en Chile. Su objetivo es procesar concentrados de minerales sulfurados de cobre con un contenido importante de arsénico, impureza que impide la vía de la pirometalurgia, y se utilizan bacterias termófilas que disminuyen los tiempos de recuperación de cobre.

Tabla 15 Microorganismos utilizados en biolixiviación

Microorganismos	Fuente energética	pH	Temperatura (°C)
Thiobacillus ferrooxidans	Fe ⁺² , U ⁺⁴ , S ⁰	1.5	25 - 35
Thiobacillus thiooxidans	S ⁰	2.0	25 - 35
Leptospirillum ferrooxidans	Fe ⁺²	1.5	25 - 35
Sulfolobus	S ⁰ , Fe ⁺² , C orgánico	2.0	> a 60
Acidiphilium cryotum	C orgánico	2.0	25 - 35
Th. Intermedius	S ⁰ , S ⁻² , C orgánico	2.5	30
Th. Napolitanas	S ⁰ , S ₂	2.8	30
Th. Acidophilus	S ⁰ , S ⁻²	3.0	
Th. Thioparus	S ⁰ , S ⁻²	3.5	
Thiobacillus TH2 y TH3	Fe ⁺² , S ⁻²	6.0	50
Metallogenium sp.	Fe ⁺²	4.5	
Heterotrofos	C orgánico		25 - 40

Fuente: Web CODELCO.

Existe un proceso interesante para biolixiviación patentado por BioCOP®, desarrollado por BHP Billiton en Sudáfrica y aplicado en Chile. Su objetivo es procesar concentrados de minerales sulfurados de cobre con un contenido importante de arsénico, impureza que impide la vía de la pirometalurgia, y se utilizan bacterias termófilas que disminuyen los tiempos de recuperación de cobre.

23.3.5 Lixiviación en Botaderos

La lixiviación en botaderos o *dump leaching* o *run of mine* (ROM) consiste en el tratamiento de minerales de muy baja ley, que normalmente se generan de las explotaciones de todos los yacimientos y corresponden a aquella fracción de mineral que queda con leyes por debajo de la ley de corte (estéril mineralizado) habitualmente depositado en quebradas o planicies cercanas a la mina. En otros casos se trata de rípios de antiguas operaciones de lixiviación abandonadas, las que por sus contenidos de leyes dejadas en épocas antiguas con procesos menos eficientes pasan a ser interesantes después de pasados los años.

Los ciclos de estas operaciones son habitualmente largos, cercanos a un año, con bajas recuperaciones, entre 40% y 60%, y con bajos costos de operación. Ver figura 117.

Figura 117 Lixiviación en Botadero



23.3.6 Lixiviación en Pilas

La lixiviación en pilas es el método hidrometalúrgico más importante en la extracción de cobre. La lixiviación en pilas es similar a la operación que se lleva a cabo con los botaderos, a diferencia de que en este caso el mineral tiene una ley más alta y por ello económicamente paga mejor su procesamiento incorporando una planta de chancado previa, con etapas de chancado primario, secundario y terciario. En este método se hace necesario aglomerar los finos generados, de forma de restituir la permeabilidad al lecho de mineral a una similar a la que tiene el mineral sin chancar que se usa en los botaderos.

23.3.6.1 Aglomeración y Curado

En la lixiviación en pilas a diferencia de otros tipos de lixiviación, el mineral a lixiviar tiene una ley relativamente alta y, por lo tanto, económicamente paga por un tratamiento más complejo a través de una planta de chancado al menos de tipo secundario y usualmente, terciario. Cuando se usa una granulometría más fina, entonces se hace necesario aglomerar los finos para restituir la permeabilidad al lecho de mineral que se va a lixiviar. Adicionalmente al agua, cuando se lixivian minerales de cobre, se aprovecha de agregar ácido concentrado, para efectuar el curado ácido.

Esta secuencia combinada de operaciones, en que la lixiviación en pilas, se realiza sobre un mineral finamente chancado, aglomerado con agua y curado con ácido concentrado, se conoce como *proceso de lixiviación TL* y su uso se ha generalizado para el tratamiento de minerales de cobre ya sean oxidados o sulfurados.

23.3.6.2 Curado Acido

Si se considera la adición de una solución lixivante en la parte superior de una pila de mineral, se puede ver que inicialmente esta solución presenta condiciones de Eh (potencial redox) y de pH (ácidos) correspondientes al campo de estabilidad de ion Cu^{2+} .

Sin embargo, si el mineral que se está tratando presenta una ganga reactiva o moderadamente reactiva, a medida que progresa la lixiviación ácida en un frente descendente, el ácido se va consumiendo. Lo mismo ocurrirá si la altura del lecho de mineral es mayor, tal que el ácido se consuma antes de llegar a la parte inferior de la pila. En estos casos se tiene un frente de reacción que impone una acelerada variación, en sentido negativo, del valor de Eh y un aumento de pH.

Si la velocidad de la reacción de la solución con el mineral y la ganga es mayor que la velocidad de reposición del ácido, entonces se puede llegar a perder la totalidad de los iones férricos y, en breve, a consumir la totalidad de los iones hidrógeno (protones

disponibles para la lixiviación). Con esto, las condiciones de Eh – pH de la solución de lixiviación ya dejaran de estar en el dominio del campo de estabilidad del ion Cu^{2+} , y pasaran al campo de estabilidad de la crisocola, el cobre nativo o la calcosina. En este punto la solubilidad del cobre es menor que 10^{-6} molar, es decir insignificante.

La rápida neutralización de ácido en la solución de lixiviación causado por la reactividad de la ganga provoca un verdadero frente de acidez descendente. En la parte superior de éste frente se tiene todavía acidez suficiente como para estar en el campo de estabilidad del ion Cu^{2+} . En la parte inferior el Eh ha cambiado desde 0.6 – 0.5 a 0.1 – 0 volt, y la solubilidad del cobre cae bruscamente desde 0.1 molar (unos 6/l), a 10^{-6} molar, es decir una caída de unos 5 órdenes de magnitud.

Si el frente de ácido se produce más bien arriba en el lecho del mineral, la baja solubilidad del cobre en las soluciones neutralizadas puede conducir a una precipitación de todo el cobre disuelto en la parte superior. Los precipitados más corrientes en estos casos incluyen cobre nativo, delasofita y calcosina. Solo si la neutralización se produce en la parte inferior del lecho del mineral puede ocurrir que el cobre disuelto no alcance a reprecipitarse, pero queda en evidencia que será muy difícil realizar la disolución del cobre remanente en las zonas de más abajo de la pila de mineral.

Resulta claro entonces que es indispensable que el ácido este distribuido lo más uniformemente posible a lo largo del camino de las soluciones de lixiviación. Idealmente debe haber un ambiente de acidez lo más uniforme posible, en todo el camino de las soluciones lixiviantes. Sin embargo, eso obligaría alternativamente a:

- Agregar exceso de ácido en las soluciones de entrada, con el riesgo de un mayor consumo global.
- Limitar la altura de las pilas del lecho del mineral que se someten a lixiviación.
- Aceptar menores recuperaciones en el conjunto.

Para solucionar este punto específico, se ha ideado incorporar un pretratamiento con ácido concentrado al mineral que se va a colocar en el lecho de minerales a lixiviar. Este ácido es uniformemente distribuido, previo a su ubicación en la pila, logrando con esto una dosificación a la medida de cada requerimiento, ya sea por parte de los minerales del yacimiento, o parte de la ganga.

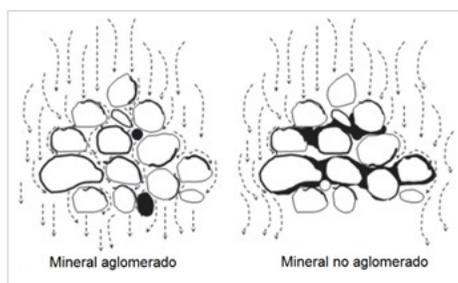
Además, la distribución anticipada del ácido permite que este reaccione sobre todas y cada una de las partículas del mineral, logrando una acción de transformación de las especies minerales de cobre que están próximas a la superficie, normalmente en sulfato de cobre. Con este método se ha logrado inhibir la disolución de algunas especies indeseables de la ganga como el aluminio y la sílice (SiO_2).

Cuando, una vez armada la pila, se aplica la solución de lixiviación propiamente tal, estas se encuentran en toda la trayectoria a través del lecho de mineral, ya acidulada y, en muchos casos, sin consumir una mayor cantidad de ácido se limitan a disolver el sulfato de cobre ya producido por el pretratamiento ácido. *Este pretratamiento con ácido concentrado ha recibido el nombre de curado ácido.*

23.3.6.3 Aglomeración

El proceso de aglomeración tiene como objetivo preparar el material mineralizado para la lixiviación, de manera de asegurar un buen *coeficiente de permeabilidad* de la solución. Un factor crítico a veces no suficientemente investigado y que en muchos casos ha conducido a fallas o al cierre de las plantas en operación, es la *permeabilidad*. Ver figura 118.

Figura 118 Aglomeración de mineral



La permeabilidad es dependiente de las características físicas del material en cuanto a proporción de poros, la que depende a su vez, de la proporción entre lamas (granulometrías inferiores a 5-10 micrones) finos (granulometrías inferiores a 100-150 micrones) y gruesos, y del método de formación de las pilas o depósitos.

Con proporciones del 10-20% de estos materiales finos, pueden existir problemas de permeabilidad y si no se asegura la permeabilidad en los lechos de lixiviación, no hay percolación, ni contactos, disolución ni extracción de valores, debido a que los finos segregan y forman áreas ciegas que disminuyen la percolación, se favorece la compactación en la formación de las pilas y puede ocurrir que estas partículas se vayan al fondo de la pila impidiendo el flujo uniforme de la solución enriquecida.

De esta forma, los efectos de una proporción inadecuada de finos pueden influir en aumentar innecesariamente el tiempo de lixiviación (residencia) y con ello aumentar el consumo de reactivos, provocar una menor extracción de soluciones mineralizadas y hasta hacer que un proyecto sea inviable.

Para solucionar estos inconvenientes y asegurar un buen proceso de lixiviación es recomendable la eliminación de finos. Para ello se puede proceder de la siguiente manera:

- Realizar un análisis granulométrico y químico del metal valioso por fracciones, y realizar cortes teóricos a diferentes tamaños. Un rechazo del 40-50 % en peso del material, con sólo una pérdida de 5-10% en metal (dependiendo de su valor), podría ser económicamente viable, aunque no es normal. Por ejemplo, si en un yacimiento el oro y la plata están bastante distribuidos en todas las fracciones, se pierde valor con cualquier corte y rechazos de peso aceptables.
- Realizar la separación de tamaños finos y gruesos, efectuándose la lixiviación estática sólo en estos últimos, normalmente con leyes más bajas y la lixiviación dinámica con los finos, normalmente enriquecidos. Existen casos en que por este sistema se ha logrado una mayor y más rápida recuperación que por una íntegra lixiviación estática.
- Realizar una aglomeración, que es el procedimiento más empleado en la actualidad. En términos generales, la aglomeración consiste en un procedimiento que permite la unión de varias partículas finas a otras de mayor tamaño.

La aglomeración se puede efectuar tanto en medio ácido como en medio alcalino (básico), con las particularidades que se describen a continuación:

Medio ácido: Este medio es típico de la lixiviación de minerales de cobre y uranio, el mismo lixivante ácido se puede emplear como aglomerante, generalmente en forma de ácido sulfúrico concentrado. Se ha propuesto también el empleo de aglomerantes ácidos sólidos, como los sulfatos (yeso), pero no es normal, aparte de los efectos perniciosos de las posibles incrustaciones por precipitación posterior en pilas y tuberías.

Medio alcalino: El caso más típico es la aglomeración de minerales de oro y plata. En este caso los aglomerantes son normalmente cemento y cal. El cianuro en forma líquida y a alta concentración, se emplea más bien como agente de humedecimiento durante la aglomeración.

23.3.6.3.1 Equipos de aglomeración

El equipo más utilizado para aglomerar, es el tambor aglomerador. Éste consiste en un cilindro metálico revestido interiormente con neopreno o goma antiácida provisto de levantadores para lograr una más efectiva acción de rodado de la carga, e incluyendo en el centro las tuberías perforadas para el suministro del agua, siempre agregada primero, para humedecer el mineral, y luego, algo más al interior del tambor, para el suministro del ácido con concentrado, tal como se muestra en la figura 119.

Figura 119 Tambor Aglomerador



Una variante frecuente consiste en reemplazar el agua, y parte del ácido, usando soluciones pobres del proceso: refino de la planta de extracción por solventes y/o la sangría de electrolito de la electrodeposición. En estos casos debe cuidarse de evitar que restos de orgánico atrapado por arrastre en el SX, ingresen al tambor, pues suele degradarse con el ácido concentrado y termina por contaminar todo el circuito de SX. Para evitar este efecto indeseable previamente a su ingreso al tambor, las soluciones pobres deben pasarse por una columna de carbón activado.

23.3.6.4 Aglomeración de Minerales de Oro

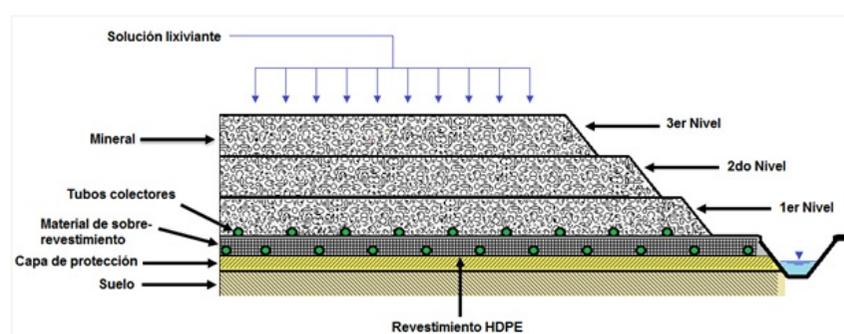
Para el tratamiento de los minerales de oro también se usan pilas de lixiviación, con similares métodos de aglomeración, carguío, impermeabilización del sustrato receptor y regadío. En estos casos también se realiza un acondicionamiento y aglomeración previa, utilizando, eso sí, agua con cal y frecuentemente cemento. De esta manera, se acondiciona el lecho en pH alcalino y se proporciona una excelente permeabilidad, incluso para el tratamiento en pilas de granulometrías muy finas como son los relaves de flotación. Después de fraguar la cal y el cemento, se termina de proporcionar una excelente rigidez a los aglomerados, ya que los puentes líquidos son eventualmente reemplazados por puentes sólidos formados con el cemento, que permite incluso el tránsito sobre ellos con equipos livianos. El resto de los sistemas, tanto de riego como de recolección de soluciones, son similares al caso de la lixiviación con ácido.

23.3.6.5 Pilas de Lixiviación Estáticas (Multi-Lift)

El mineral de cobre es apilado, en alturas que usualmente superan los cinco metros, con áreas superficiales que van desde 0.1 a 1 km². El lixiviante que contiene H₂SO₄ es aplicado en la superficie de la pila, desde donde percola a través del lecho mineral, disolviendo los minerales de cobre, para producir una solución enriquecida de cobre (PLS), que es colectada en una superficie inclinada e impermeable que se encuentra debajo de la pila, para ser transportada por medio de tuberías hasta la poza de soluciones ricas, y posteriormente a los circuitos de extracción por solventes y electro-obtención.

Las pilas estáticas (multi-lift) consisten en un apilamiento de un nivel inicial sobre una superficie impermeable, después de que dicho nivel se ha lixiviado, se apilan nuevos niveles sobre los anteriores. Cada nivel tiene una altura de entre 5 a 8 m y la altura total de la pila puede llegar hasta los 200 m. Ver figura 120.

Figura 120 Pila estática



23.3.6.6 Pilas Dinámicas (On/Off)

El mineral es apilado en un sólo nivel, aproximadamente de entre 7 a 8 metros, construidos sobre una base impermeable. El material es removido después de ser lixiviado y reemplazado por mineral nuevo. Ver figura 121.

Figura 121 Pila dinámica



23.3.6.7 Riego de la Pila

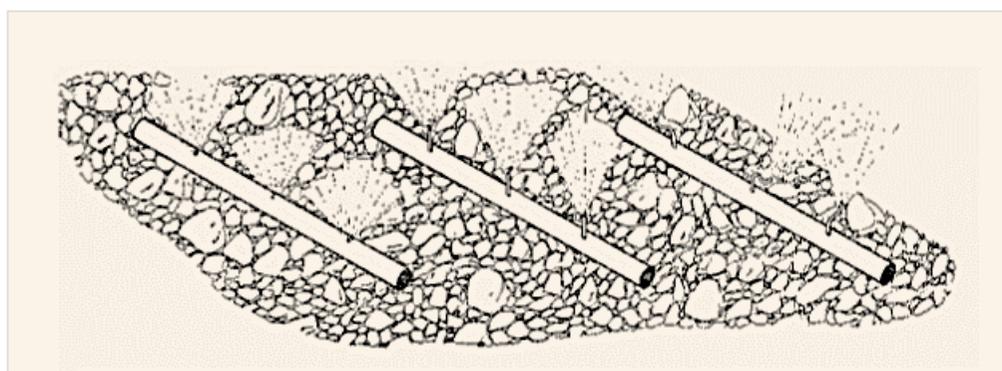
El riego de las pilas se puede realizar fundamentalmente por dos procedimientos:

- 🌧️ Riego por aspersión.
- 🌧️ Riego por goteo.

En la industria se utiliza generalmente una tasa de riego del orden de 10 a 20 lt/hr por mt². El riego debe ser homogéneo sobre toda la superficie.

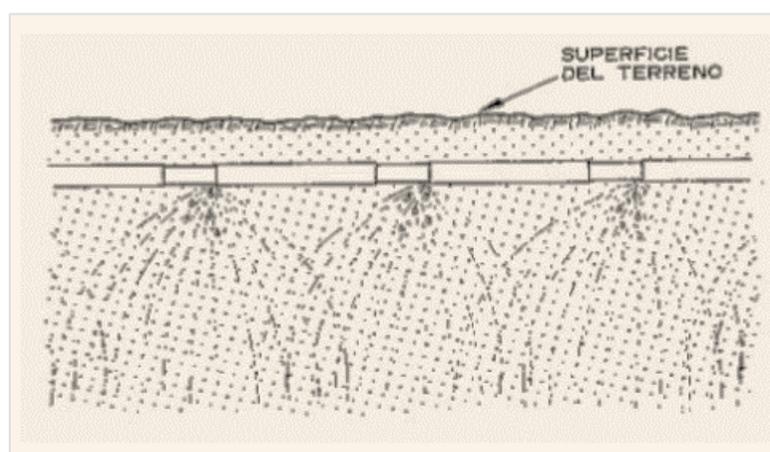
El riego por aspersión consiste en la implementación de una red de tuberías superficiales con aspersores ubicados cada cierta cantidad de superficie. La red de tubería y los aspersores son portátiles y se van reubicando cada cierto tiempo de residencia del material. Ver figura 122.

Figura 122 Riego por aspersión



El riego por goteo consiste en la implementación de una red de tuberías superficiales las cuales están equipadas con goteros específicos para el gasto de solución de riego. Este sistema de tuberías también es portátil y se va reubicando cada cierto tiempo de residencia del material. Este sistema es recomendable en caso de escasas soluciones de riego y cuando existen bajas temperaturas. Ver figura 123.

Figura 123 Riego por goteo



23.4 Proceso De Extracción Por Solventes (SX)

La extracción por solventes (SX), es uno de los procesos más efectivos y económicos para purificar, concentrar y separar los metales valiosos que se encuentran en las soluciones enriquecidas, provenientes de procesos de lixiviación.

Este proceso encuentra su principal aplicación en la producción de cobre, específicamente en la separación selectiva de metales, que luego se recuperan mediante el proceso de electroobtención (EW), a través de soluciones de sulfato de cobre. También se utiliza para la recuperación de uranio, vanadio, molibdeno, zirconio, tungsteno, renio, elementos de tierras raras, metales preciosos, cadmio, germanio, berilio y boro, entre otros.

Básicamente, la extracción por solventes es una operación de transferencia de masa en un sistema de dos fases líquidas. Se llama también *intercambio iónico* líquido y se fundamenta en el principio por el cual un soluto o ion metálico puede distribuirse en cierta proporción entre dos solventes inmiscibles, uno de los cuales es usualmente acuoso y el otro un solvente orgánico como benceno, kerosene, cloroformo o cualquier solvente inmiscible al agua.

Lo anterior es posible debido a que ciertos *reactivos químicos orgánicos*, tienen un alto grado de afinidad selectiva con determinados iones metálicos, formando compuestos organometálicos y a su vez, no tienen casi ninguna afinidad con iones contaminantes tales como iones de hierro, calcio, magnesio, aluminio, etc.

Por esta razón, la principal aplicación de la extracción por solventes es la separación selectiva de metales. La posterior obtención de dichos metales se realiza mediante un proceso de electro obtención aplicada a soluciones de sulfato de cobre.

23.4.1 Ion de Cobre

El cobre, es un elemento químico, de símbolo Cu, con número atómico 29; uno de los metales de transición e importante metal *no ferroso*. Su utilidad se debe a la combinación de sus propiedades químicas, físicas y mecánicas, así como a sus propiedades eléctricas y su abundancia.

La mayor parte del cobre del mundo se obtiene de los *sulfuros minerales* como la calcocita, covelita, calcopirita, bornita y enargita. Los minerales oxidados son la cuprita, tenorita, malaquita, azurita, crisocola y brocantita. La ley del mineral empleado en la producción de cobre ha ido disminuyendo regularmente, conforme se han agotado los minerales más ricos y ha crecido la demanda de cobre.

El cobre es el primer elemento del subgrupo 1B de la tabla periódica y también incluye los otros metales de acuñación, plata y oro. Su átomo tiene la estructura electrónica $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^1$. El bajo potencial de ionización del electrón $4s^1$ da por resultado una remoción fácil del mismo para obtener cobre (I), o ion cuproso, Cu^+ , y el cobre(II), o ion cúprico, Cu^{2+} , se forma sin dificultad por remoción de un electrón de la capa 3d. El peso atómico del cobre es 63.546. tiene dos isótopos naturales estables ^{63}Cu y ^{65}Cu . También se conocen nueve isótopos inestables (radiactivos). El cobre se caracteriza por su baja actividad química. Se combina químicamente en alguno de sus posibles estados de valencia. La valencia más común es la de 2+ (cúprico), pero 1+ (cuproso) es también frecuente; la valencia 3+ ocurre sólo en unos cuantos compuestos inestables.

23.4.2 Objetivos del Proceso SX

El proceso de extracción por solventes (SX), se incorpora como parte de un sistema integral de recuperación de hidrometalurgia. En la mayoría de los casos, al integrar el proceso de SX en un círculo metalúrgico se busca cumplir los siguientes objetivos:

- La separación y purificación de uno o más metales de interés de las soluciones que los contienen, las que suelen tener impurezas. La separación consiste en extraer el o los metales deseados desde soluciones o a la inversa, extraer las impurezas de la solución, dejando el o los metales deseados en ella.

- Concentración de los metales disueltos para disminuir los volúmenes a procesar y así reducir los costos del proceso siguiente (EW para el caso del cobre).
- Transferencia de los metales disueltos desde una solución acuosa compleja a otra solución acuosa diferente, que simplifique el proceso siguiente.

La incorporación de la extracción por solventes dentro de la metalurgia es de gran interés para el desarrollo de las siguientes operaciones específicas:

- La recuperación selectiva de un solo metal desde una solución de lixiviación, liberándolo de sus impurezas y concentrándolo de manera que facilite su posterior recuperación. Por ejemplo, en la lixiviación del cobre, la extracción por solventes se realiza en las soluciones de lixiviación diluidas e impuras, con el fin de traspasar el cobre a una solución de electrolito puro y concentrado, que permita realizar la electroobtención.
- La separación conjunta de varios metales desde una solución, ya que ciertos elementos químicos como el Cu/Ni/Co, o del V/U/Ti, presentan una similitud de propiedades químicas. Mediante la extracción por solventes se separan conjuntamente para su posterior separación diferencial.

La purificación de soluciones:

- La extracción por solventes permite extraer las impurezas dañinas o contaminantes de una solución para dejarla limpia como solución de partida. Por ejemplo, este método se aplica en la purificación de los descartes de electrolitos de refinera de cobre, al eliminar el Fe, As y otras impurezas, lo que limpia la solución y la devuelve al círculo principal.
- Dado que en la lixiviación ocurre la disolución de otros componentes minerales que se encuentran en la pila, es indispensable realizar la purificación de las soluciones como una etapa previa a la electroobtención del metal.

23.4.3 Etapas y Mecanismos SX

La extracción por solventes consiste en un proceso de purificación y concentración de soluciones basada en la separación del elemento de interés desde las soluciones de lixiviación. Para ello se utiliza un medio extractante líquido de alta selectividad al elemento a separar, pero inmiscible en dicha solución.

En el proceso global de la extracción por solventes se distinguen tres momentos fundamentales, que consisten en:

- El líquido extractante se agrega a la solución primaria y se conecta con el ion metálico, que queda formando parte del extractante.
- Enseguida, este complejo extractante (ion metálico) es separado de la solución y llevado a una solución secundaria en el ion metálico.
- En esta solución secundaria se produce la re-extracción o descarga, es decir, el elemento de interés es nuevamente devuelto a una solución acuosa, pero exento de impurezas, óptima para el proceso siguiente de electroobtención.

En general, en el proceso de extracción por solventes se reconocen dos etapas fundamentales:

Etapa de Extracción.

Etapa de Reextracción o Stripping (descarga).

Las dos etapas, extracción y reextracción, pueden ser consideradas una como la inversa de la otra.

23.4.4 Procedimiento Básico

Los sistemas de extracción por solventes tienen tres componentes básicos:

Soluto a Extraer.

Solvente Acuoso.

Extractante Orgánico.

El proceso de extracción por solventes se basa en la reacción reversible de intercambio iónico que tiene lugar entre dos fases inmiscibles, la fase orgánica que corresponde al reactivo extractante disuelto en un diluyente orgánico, y la fase acuosa que corresponde a la solución. Se pone en contacto la solución de lixiviación o fase acuosa con el reactivo orgánico o fase orgánica, y se mezcla fuertemente por agitación. El reactivo orgánico contiene una molécula extractante, el que tiene una alta afinidad por el ion metálico que se quiere recuperar. Este ion de interés es transferido desde la fase acuosa o solución de lixiviación a la orgánica, a través de la interfase de los dos líquidos no inmiscibles.

Al mezclarse las fases acuosa y orgánica, el equilibrio se irá dando paulatinamente, debido a que la transferencia de masa dentro de un reactor depende de los siguientes factores:

- Tiempo de residencia.
- Área de interfaces acuosa/orgánica.
- Potencial químico en la interfase.

El equilibrio de la reacción es el factor más importante en el proceso de intercambio iónico y esto depende del tamaño de los equipos utilizados, la energía consumida en la agitación y otros factores que afecten en la totalidad de los costos del proceso.

La mezcla resultante por la agitación se deja decantar para que se separe en dos capas o fases:

- Fase Extracto o Fase Cargada.
- Fase Acuosa o de Refino.

La *fase superior* corresponde a la capa orgánica, que se mantiene allí debido a su menor peso específico. En esta fase orgánica, que se conoce como *fase cargada o fase extracto*, se encuentra retenido el ion metálico de interés formando un complejo *orgánico-metalico*.

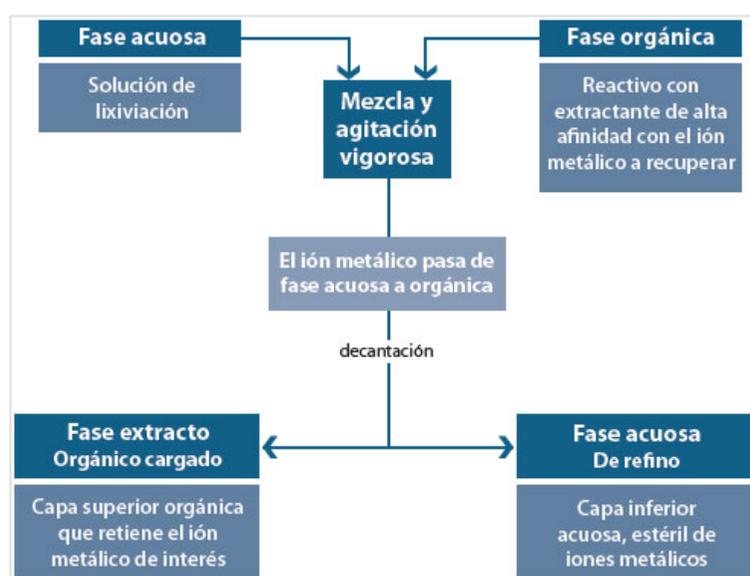
La *fase inferior*, denominada fase acuosa o de refino, es una solución estéril respecto de iones metálicos y tiene un peso específico mayor al de la fase orgánica.

23.5 Etapa de Extracción (Carga del Reactivo)

La solución impura proveniente de la lixiviación (PLS) en fase acuosa, rica en iones de cobre y con una acidez baja (pH entre 1,4 y 1,9), se introduce en mezcladores especiales donde se contacta con la fase orgánica de muy bajo contenido de cobre, llamado orgánico descargado.

Como ambas fases son inmiscibles, para realizar la extracción y mezcla, es necesario aplicar una acción mecánica (agitación) de elementos externos que proporcionan la energía necesaria para este propósito. Al mezclarse ambas fases ocurre una transferencia de la especie metálica disuelta en la fase acuosa, la que se desplaza químicamente con el reactivo extractante en la fase orgánica hasta alcanzar el respectivo equilibrio químico. Así, se genera una fase orgánica cargada con la especie metálica de interés y una solución acuosa descargada o refino. Ver figura 124.

Figura 124 Etapa de extracción



23.6 Etapa de Reextracción (Descarga del Reactivo)

La etapa de reextracción del reactivo consiste en la recuperación de la especie metálica desde la fase orgánica, con la regeneración simultánea de las capacidades extractivas de la fase orgánica, lo que permite ser reutilizada en otra extracción. En síntesis, de la etapa de reextracción se obtiene una solución de orgánico descargado sin cobre, que es recirculado a la etapa de extracción, y una solución rica en iones de cobre de baja acidez (electrolito rico), la que es enviada a la siguiente etapa, la electroobtención. La solución que recupera el ion metálico en la etapa de reextracción es electrolito pobre.

23.7 Configuraciones de SX

En la hidrometalurgia del cobre, las configuraciones más usadas en la extracción por solventes son etapas en serie de extracción, lavado y descarga, como:

- 2 Etapas de extracción, 1 etapa de lavado y 2 etapas de descarga. Figura 125.
- 2 Etapas de extracción, 1 etapa de lavado y 1 etapa de descarga. Figura 126.

En algunos casos se agrega una o más etapas de extracción en paralelo y, en otras, la etapa de lavado no se utiliza.

23.8 Reactivos Extractantes

El principal constituyente del solvente o fase orgánica es el reactivo orgánico o extractante, aquel que tiene la capacidad de formar complejos orgánicos con el elemento que se desea extraer. En un principio, estos agentes extractantes estaban limitados para funcionar de acuerdo con un rango de pH y concentración de cobre en las soluciones que se trataban, pero en la actualidad se utilizan en un rango más amplio de soluciones provenientes de lixiviación.

Figura 125 Configuración 2 Extracción – 1 Lavado - 2 Descarga

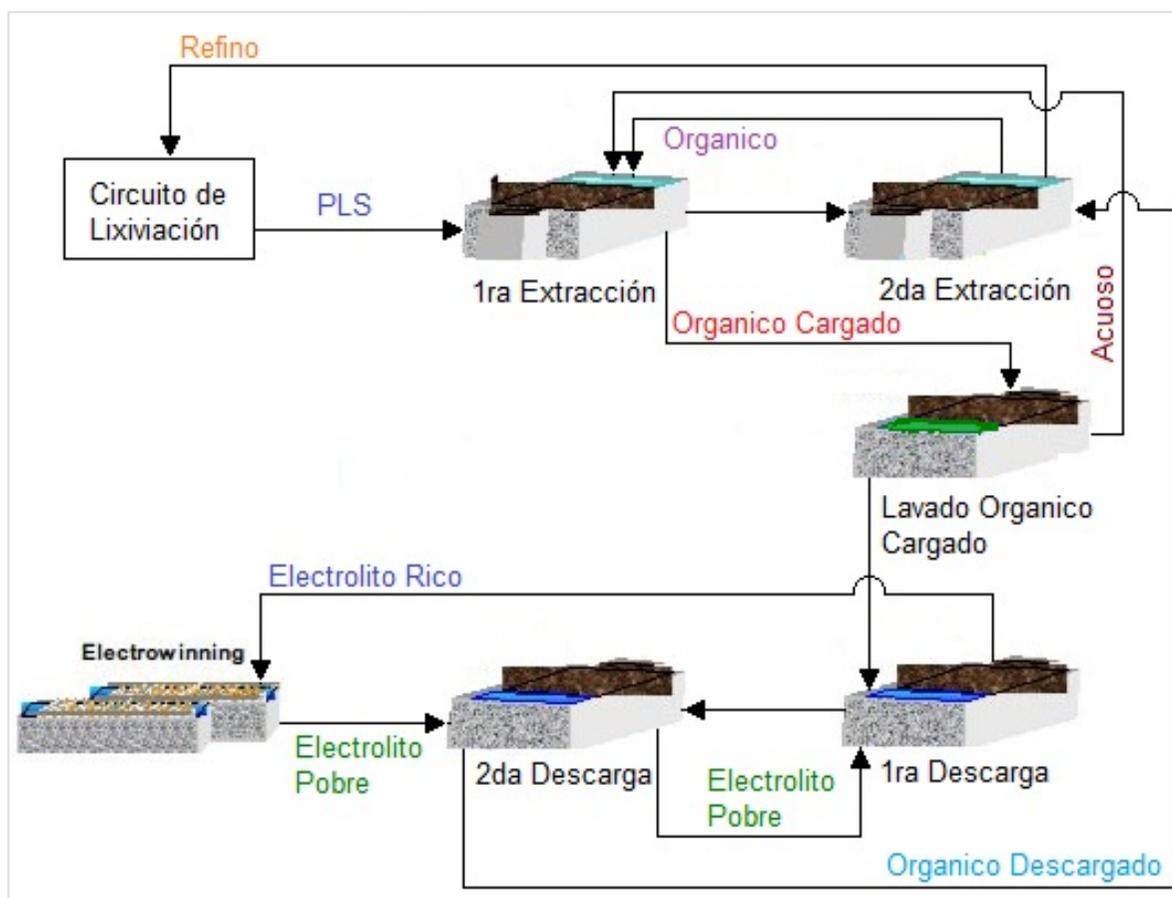
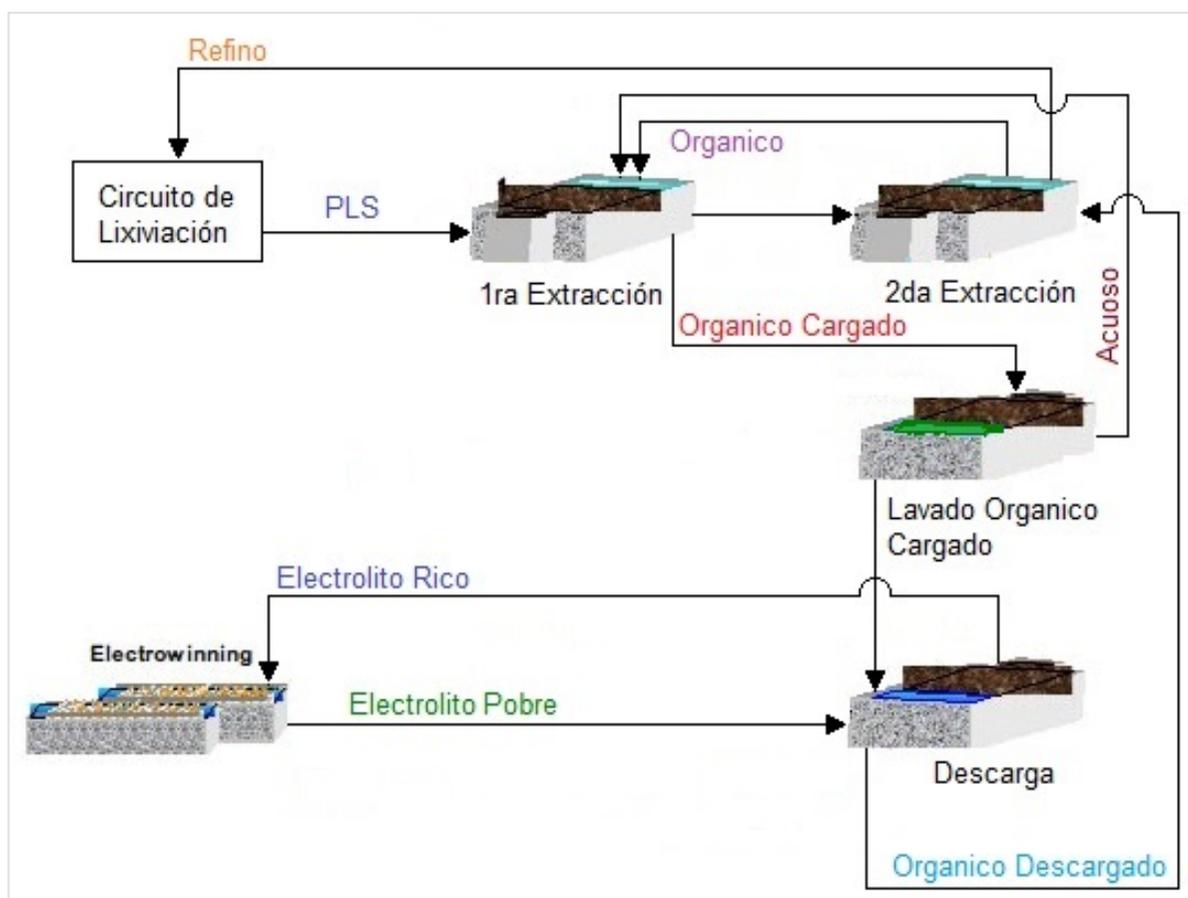


Figura 126 Configuración 2 Extracción – 1 Lavado - 1 Descarga



Existe una amplia gama de propiedades que son usadas como patrón para seleccionar un extractante en particular. Es necesario considerar que es poco probable que exista un reactivo que reúna todas las propiedades que se desean, ya que a menudo éstas se encuentran en contraste unas de otras. Al momento de seleccionar un reactivo como agente de extracción, deben considerarse los siguientes aspectos:

- Facilidad de obtención del reactivo.
- Costo del reactivo.
- Alta solubilidad en el diluyente orgánico a usar.
- Baja solubilidad en sistemas acuosos.
- Fácil formación de complejos con el metal de interés.
- Rápida reacción entre el metal de interés y el reactivo para formar el complejo.
- Alta solubilidad de este complejo en fase orgánica.
- Baja solubilidad del complejo en fase acuosa.
- Alta selectividad por el metal de interés.
- Fácil recuperación del metal desde la fase orgánica.
- Fácil regeneración del extractante.
- Propiedades físicas apropiadas para la transferencia de masa y separación de fases (baja densidad y viscosidad y alta tensión interfacial).
- Estabilidad química, bajo las condiciones de uso.
- Seguro en el uso, es decir, alto punto de inflamación, baja toxicidad y poco volátil.
- Estabilidad a fluctuaciones de temperatura ambiente.
- No tóxico para las bacterias que ayudan a la lixiviación en canchas.

En la siguiente tabla 16 se presenta un listado en que se muestra el nombre y la respectiva descripción química de algunos reactivos extractantes, usados en diversas aplicaciones industriales para recuperación de metales por SX.

Tabla 16 Principales extractantes utilizados SX

Alamine	Tricaprilamina
Cyanex 272	Ácido (di-2,4,4 - trimetil - Pentil fosfínico)
Cyanex 301	Ácido (bis-2,4,4 - trimetil - gentil fosfino ditioico)
Cyanex 302	Ácido (bis 2,4,4 - Trimetil - pentil Monotiososfínico)
DBBP	di - butil - butil fosfato
D2EHPA	Ácido di - 2 - etil - hexil fosfórico
EHEHPA	Ácido di - 2 - etil - hexil fosfónico - mono - 2 etil - hexil - éster
HDDNS	Ácido di - dodecil naftalensulfónico
Hostarex Dk - 16	C16H22O2
Kelex 100	7 - (5,5,7,7 tetrametil - 1 octan - 3 - il) - 8 hidroxiquinolína
Lix 54	Fenil - alquil β - diketona
Lix 70	Oxima de 2 - hidroxí - 3 cloro - 5 - nonil benzofenona
MIBK	Metil - iso - butil - quejona
NPPA	Ácido nonil fenil fosfórico
SME 529	Oxima de 2 - hidroxí - 5 - nonil acetofenona
TBP	Tri - butil fosfato
TNOA	Tri - n - Octilamina
Topo	Óxido de tri - n - Octilfosfina

Los modernos reactivos extractantes de cobre son predominantemente hidroxioximas, las que funcionan como agentes *quelantes* de los cationes de cobre de la solución, formando un compuesto de cobre orgánico soluble en parafina. Tienen una amplia utilización en la extracción de cobre desde soluciones de lixiviación con ácido sulfúrico.

Este tipo de extractantes realiza una *quelación*, es decir forman estructura de anillos que envuelven a la molécula de extractante como una ligazón selectiva para el ión metálico, dejando los restantes cationes en solución. Por tanto, los extractantes tipo quelantes son capaces de formar un compuesto orgánico con el metal de interés.

De la reacción de extracción - reextracción con este tipo de extractantes, puede deducirse que se produce un intercambio de iones en los que la molécula extractora orgánica entrega dos protones a cambio de un catión de cobre. Así, la reacción de extracción genera ácido, por lo que el refino queda lo suficientemente ácido para ser devuelto a la etapa de lixiviación.

23.8.1 Pérdidas de Extractante

Las pérdidas de extractantes tienen gran importancia en la viabilidad económica de una planta. Estas ocurren principalmente por evaporación, solubilidad o entrapamiento durante el procesamiento. Así como la solubilidad es sensible al pH, las pérdidas también son dependientes de la acidez y, más aún, teniendo fases acuosas alcalinas. Ver Tabla 17.

Tabla 17 Perdida de extractante según pH solución

Metal extraído	Extractante	pH de extracción	Pérdidas (ppm)
Cu	Kelex 100	1 - 2	10
Cu	Lix 64 N	1,5 - 2	4 - 15
Co	V 911	7,7	100
Co	D2 EHPA	5,5 - 6,5	30
Ni	Ácido Nafténico	4,0	90
Ni	Ácido Nafténico	6,5	900
Ni	V 911	7,0	900 - 300
HF	MIBK	1,5 M NCl	20.000
Tierras raras	D2 EHPA	2,0	7
U	Amina Ternaria	1,5 - 2,0	4 - 15
U	TDP	2,0	25 - 40

23.8.2 Reactivos Diluyentes Usados en SX

Los diluyentes y modificadores corresponden a otros componentes de la fase orgánica, que tienen funciones específicas en la optimización del proceso de extracción. En un círculo de extracción por solventes (SX) la fase orgánica normalmente está conformada por uno, dos o tres componentes: el extractante, el diluyente y algún modificador. Por lo general, el diluyente es el componente de la fase orgánica que está presente en mayor proporción dentro de ella.

Los diluyentes se utilizan para disminuir la viscosidad de la fase orgánica para que fluya fácilmente y contribuya al contacto entre las dos fases. También se usan para reducir la excesiva concentración del extractante orgánico activo. Al igual que en el caso de los agentes extractantes, el diluyente debe cumplir ciertos requisitos.

Entre los más importantes se señalan los siguientes:

- Ser capaz de disolver el extractante y de mantenerlo en solución.
- Tener baja viscosidad y densidad.
- Tener estabilidad química.
- Presentar baja solubilidad en la fase acuosa.
- Poseer un alto punto de inflamación, baja toxicidad y baja tasa de evaporación.

Dado que el diluyente es un componente importante y mayoritario de la fase orgánica, todo operador de planta SX debe realizar las máximas pruebas de control de calidad a cualquier nuevo embarque de diluyente que llegue a su circuito SX. Las pruebas de control de calidad deben reflejar adecuadamente todas las propiedades críticas o que sean consideradas más importantes para el éxito de la operación.

El mejor diluyente para un determinado sistema de SX puede no ser el más recomendable para un sistema de SX diferente. Cada operador de planta, debe preocuparse de solicitar la asesoría de especialistas para estudiar varios diluyentes antes de determinar cuál es el más adecuado para sus propias condiciones de operación y localización de la planta.

Normalmente, el diluyente se puede comportar como un compuesto químicamente inerte, pero existen ocasiones, como en el proceso de SX para cobre y uranio, en que el diluyente también influye en el comportamiento del reactivo y puede ser un participante esencial en el éxito o eventuales dificultades operacionales del proceso.

Cuando el diluyente interactúa con el reactivo en la fase orgánica puede favorecer la polimerización del reactivo y restar así parte de los componentes activos dentro de la fase orgánica. Otros diluyentes producen el efecto contrario, lo que en los casos de extracción por intercambio catiónico se puede detectar midiendo la constante dieléctrica del diluyente. El menor valor resultante es el que da las mejores extracciones.

Los diluyentes para SX más usados a escala industrial son:

- Benceno (no se usa actualmente por ser cancerígeno).
- Hexano.
- Keroseno.
- Cloroformo.
- Tetracloruro de carbono.

23.8.3 Reactivos Modificadores

Corresponden a cualquier producto orgánico que al ser añadido y disuelto en la fase orgánica altera el comportamiento de un determinado reactivo de SX. Los modificadores tienen como función optimizar la separación de las fases, mejorar la coalescencia, aumentar la solubilidad de complejo metálico y evitar la formación de una tercera fase. Los modificadores son capaces de:

- Actuar sobre la separación de fases, para facilitar la coalescencia y disminuir los arrastres.
- Participar en el control de la generación de crudo y/o terceras fases, lo que favorece la solubilidad del complejo orgánico - metálico en la fase orgánica cargada.
- Estabilizar la molécula del reactivo, lo que permite su utilización indefinida al reducir su degradación.

Por ejemplo, en el proceso SX del cobre se añaden como modificadores al reactivo principal, que es una oxima, alcoholes de cadena larga, fenoles y ésteres.

23.9 Solución Acuosa

La solución acuosa normalmente es rica en lixiviación y corresponde a la fase portadora del metal o de los metales que interesa procesar por extracción; se denomina PLS (Pregnant Liquor Solution). Luego de ser procesada por extracción SX, cambia de denominación a solución pobre o refino y suele ser enviada de regreso a la lixiviación.

Existen cuatro características o propiedades del PLS, las que pueden ser controladas o modificadas de manera de lograr una más eficiente separación o purificación del metal mediante SX:

- Acidez libre.
- Potencial de óxido-reducción expresado por el nivel de Eh.
- Concentración de aniones que forman complejos como cloruro, sulfato y cianuro.
- Temperatura, la que influye directamente en el equilibrio de la extracción, las cinéticas de transferencia del metal, la solubilidad de las especies extraídas, la separación de fases y en las pérdidas por atrapamiento y arrastre.

23.10 Equipamiento Básico de Extracción por Solvente

A partir de la solución de lixiviación que se han desarrollado a escala industrial, los procesos de extracción de cobre por solventes ponen en contacto la solución lixiviada con el disolvente sin carga, lo que se realiza en varias etapas (al menos dos), en que mezcladores y sedimentadores funcionan en contracorriente, dispuestos y arreglados de manera de asegurar que el disolvente orgánico entrante (sin carga) tenga un contacto final con la solución acuosa cargada, la que al salir quedará con muy baja concentración de cobre, el refino, el que retornará a la operación de lixiviación para uso posterior.

La transferencia de la fase orgánica recientemente cargada a la fase acuosa, se realiza contactando el orgánico con el electrolito agotado o electrolito pobre fuertemente ácido, lo que se desarrolla en una serie de etapas (una, dos o hasta tres) en contracorriente, en mezcladores y sedimentadores. Después de la etapa final de agotamiento, la fase orgánica estéril vuelve a la sección de extracción. Después de mezclar el electrolito enriquecido con electrolito pobre, para obtener la concentración justa de cobre.

23.11 Electroobtención (EW)

La precipitación por reducción electrolítica, comúnmente conocida como electroobtención o electrodeposición, es uno de los procedimientos actuales más sencillos para recuperar (en forma pura y selectiva) metales que se encuentren en solución.

La electroobtención es particularmente interesante en el proceso de producción de cobre, ya que prácticamente todo el cobre de uso industrial a nivel mundial, requiere del grado de pureza establecido por los estándares del cobre electrolítico.

Básicamente, este proceso consiste en recuperar el metal desde una solución de lixiviación debidamente acondicionada (solución electrolito), y depositarlo en un cátodo, utilizando un proceso de electrólisis.

Para ello se hace circular a través de la solución electrolito, una corriente eléctrica continua de baja intensidad entre un ánodo (la solución misma) y un cátodo. De esta manera, los iones del metal de interés (cationes) son atraídos por el cátodo (polo de carga negativa) depositándose en él, y las impurezas quedan disueltas en el electrolito y también precipitan en residuos o barros anódicos.

La electroobtención es un proceso de una gran importancia económica, ya que permite recuperar metales como cobre, oro y plata a partir de recursos lixiviables que de otra forma serían inviábiles.

Los nuevos procesos de purificación y concentración de soluciones lixiviadas, como la extracción por solventes (SX) en el caso del cobre y el carbón activado (CA) para el oro, han permitido ampliar el ámbito de aplicación de la electroobtención a la recuperación de estos metales. Tanto es así que algunos metales como el Zinc, dependen casi exclusivamente de la electroobtención para lograr una recuperación que sea económicamente viable. A su vez, esta tecnología también es una alternativa muy competitiva para tratar minerales combinados de cobre-cobalto y níquel-cobalto. En la siguiente tabla 18 se muestra los metales recuperables vía electrólisis, con el tipo de cátodo usado y la solución del electrolito en cada caso.

Tabla 18 Metales Recuperables por Electrólisis

Metal	Electrolito	Cátodo	Comentario
Antimonio	Soda y sulfuro de sodio	Acero	
Cadmio	Solución de sulfato	Aluminio	Subproducto de recuperación de Zn.
Cromo	Solución de sulfato	Hastelloy	
Cobalto	Solución de sulfato	Acero inoxidable	Producido junto al cobre en Zaire.
Cobre	Solución de sulfato	Acero inoxidable	Soluciones de lixiviación de alta ley o tras la extracción por solventes.
Galio	Solución de sodio (NaOH)	Acero inoxidable	Subproducto de la producción de aluminio desde bauxita.
Manganeso	Solución de sulfato	Acero inoxidable	
Níquel	Solución de sulfato	Níquel o acero inoxidable	
Oro	Solución de cianuro	Lana de acero	
Plata	Solución de nitrato	Plata o grafito	
Telurio	Solución de sodio (NaOH)	Acero inoxidable	
Zinc	Solución de sulfato	Aluminio	
	Solución de sodio (NaOH)	Acero inoxidable	Producción de zinc en polvo.

23.11.1 Celdas Electrolíticas de EW

Para realizar el proceso de electroobtención se requiere de instalaciones especializadas llamadas celdas electrolíticas equipadas con sistema de circuitos eléctricos para hacer circular una corriente eléctrica continua de baja intensidad.

Para que el proceso se realice eficientemente se requiere considerar los siguientes aspectos:

23.11.1.1 Configuración de Circuitos

Para proveer de la corriente continua que requiere el proceso de electrólisis, se utilizan equipos rectificadores de corriente que mantienen constantes las características del flujo eléctrico. La tecnología de los rectificadores ha evolucionado siendo actualmente la norma el uso de *transfo-rectificadores tristorizados*, lo que ha hecho a estos equipos más accesibles y económicos. Los requerimientos de filtros para el control de corrientes armónicas constituyen en la actualidad los mayores factores del aumento de costos de estos rectificadores. Los filtros se utilizan para lograr un mejor efecto con dos unidades (celdas de electroobtención), en vez de una sola.

23.11.1.2 Conexiones Eléctricas

Normalmente, las conexiones eléctricas de las celdas de electroobtención son muy sencillas, ya que se intenta disminuir los trayectos, en corriente continua y alta tensión, desde los rectificadores de corriente hasta los bancos de celdas electrolíticas.

23.11.1.3 Barras Conductoras de Cobre de Sección Rectangular

En general, la conexión se hace con paquetes de estas barras, apernadas y con distanciadores que permitan la circulación interna de aire para la mejor refrigeración. Estas son conocidas con su nombre en inglés bus bars. Al poner las celdas en serie, se requiere sólo una conexión en los extremos del banco de celdas. Si al término del primer banco, éstas se conectan con un solo conductor a otro banco paralelo a su lado, el recorrido desde el rectificador disminuye aún más.

Este tipo de conexiones es la más usada en la mayoría de las instalaciones para electroobtención de cobre. De esta forma, varias unidades similares constituyen las diversas secciones de una operación más grande.

Ejemplos:

- Dos secciones separadas por un patio central de trabajo, plantas de EW de Quebrada Blanca, Mantoverde, Lince y Santa Bárbara (con una capacidad de producción entre 45.000 y 8.0000 toneladas de cátodos de cobre al año).
- Sólo una sección, como en las operaciones de EW de Lo Aguirre, Dos Amigos, Biocobre y El Teniente (con una capacidad de producción de 25.000 toneladas de cátodos de cobre al año).
- Cuatro secciones, como en las plantas de operación de El Abra y Radomiro Tomic (con una capacidad de producción de más de 200.000 toneladas de cátodos de cobre al año).

23.11.1.4 Barra Triangular

En este caso la conexión eléctrica es en serie, con una barra triangular (de 2 a 2,5 cm de arista) que sirve de apoyo y contacto en su eje afilado, para los ánodos de una celda y los cátodos de la celda contigua. Este es el sistema más utilizado.

23.11.1.5 Otros Perfiles

Recientemente, se han incorporado otros perfiles para la barra de contacto, tipo "hueso para perro" o dogbone, pero la más usada sigue siendo la de perfil triangular. Los aisladores interceldas, que separan y apoyan los ánodos y cátodos, se conocen como camping-boards.

23.11.1.6 Recomendaciones de Uso

Como los cátodos de un lado y los ánodos de la celda contigua, están todos conectados en paralelo a través de esta barra de contacto, es importante un buen y constante aseo de los contactos.

También, se debe comprobar uno a uno los respectivos apoyos, ya que los electrodos deben recibir la misma corriente. Cuando unos reciben más corriente que otros, se producen densidades de corriente muy diferentes, que inducen el crecimiento de dendritas, que pueden provocar cortocircuitos y calentar las barras y contactos hasta incluso llegar a derretir los apoyos de los aisladores de plástico. Para detectar estos puntos anómalos se pueden usar un gaussmetro, detectores de temperatura con visores infrarrojos, o bien el monitoreo de voltaje de cada celda. Lo importante es corregir rápidamente la anomalía para maximizar la eficiencia de corriente. Mediante estas observaciones se puede determinar las características de la conexión de los electrodos de dos celdas contiguas.

Por su parte, la circulación de la corriente de ánodo a cátodo a través del electrolito, se puede determinar mediante el movimiento de los cationes en la solución, y por medio de las barras y los contactos de apoyo, a través de la circulación de los electrones en el sólido conductor.

23.12 Diseño y Materiales Para Celdas Electrolíticas

Industrialmente, hay una gran variedad de celdas electrolíticas. La fabricación y selección de ellas depende de factores tales como:

- 🚧 Tipo de electrolito, si es acuoso o de sales fundidas.
- 🚧 Tipo de cátodo, si es líquido o sólido, o bien si es compacto, esponjoso o particulado.
- 🚧 Tipo de proceso, si es electroobtención (EW) o electrorrefinación (ER).

En soluciones acuosas, las celdas de EW y de ER convencionales varían muy poco entre sí, lo que no sucede en otros casos como los que veremos a continuación.

23.12.1 Celdas Para Procesamiento de Sales Fundidas

Para las sales fundidas, la situación es muy diferente de un caso a otro, considerando si el metal se puede depositar en un líquido más pesado o más liviano que el electrolito mismo. Es así que para cada situación se requiere un diseño específico.

Por ejemplo, la producción del aluminio es diferente a otros casos de sales fundidas, ya que los ánodos son consumibles.

23.12.2 Celdas Para Lecho Particulado Fluidizado

Desde hace años, los lechos de material particulado como concentrados de sulfuros, cementos agranallados, mata agranallada y recortes de recuperación secundaria de metales, son un desafío interesante para la electrólisis directa, que evite los pasos intermedios, ya sea por vía pirometalúrgica o por lixiviación y purificación.

En estos casos se logran altas densidades de corriente, de 10 a 100 veces las alcanzadas en los sistemas convencionales, debido al permanente movimiento y fricción de las partículas, lo que ayuda a despolarizarlas, y desprende los eventuales residuos de la disolución del ánodo de partida. Por ejemplo, el azufre elemental de un sulfuro.

En este caso, los tamaños de las instalaciones son menores, lo que incide en disminuir significativamente los costos de capital de inversión. Sin embargo, aún las aplicaciones son escasas, a nivel piloto y sin divulgación masiva.

Existe también un sistema de circulación independiente de un electrolito anódico (anolito) y de un electrolito catódico (catolito), ambos separados por una membrana conductora o diafragma.

23.12.3 Celda Para Producción Directa de Láminas de Metal

Mediante este tipo de celdas se puede lograr en forma directa y continua la preparación de una lámina de cobre electrolítico. Esta celda contiene un cátodo en forma de tambor, parcialmente sumergido en el electrolito de la celda, y que gira con velocidad variable de acuerdo al espesor de la lámina que se desea obtener.

23.12.4 Celda Cilíndrica Para Electroobtención de Oro

El procesamiento de concentración de oro por carbón activado, termina con la recuperación electrolítica del oro, usando como electrolito la solución de elución de carbón. En estos casos, se usa un ánodo inerte de acero y un cátodo, compuesto de un conductor inserto con lana de acero colocada en un contenedor apropiado.

23.12.5 Celda Convencional Para Electrólisis en Medio Acuoso

El diseño de celdas electrolíticas para medios acuosos varía muy poco, ya que en general se trata de ánodos y cátodos suspendidos verticalmente, frente a frente unos de otros. Las diferencias tienen que ver con el uso final, según se trate de electroobtención (EW) o de electrorrefinación (ER).

En EW es más necesario renovar y agitar el electrolito frente a las placas, ya que con la nueva solución se renueva el metal para la depositación. En cambio, en la electrorrefinación, el metal se renueva y recorre sólo el espacio entre placa y placa, por lo que la agitación requerida en el baño es bastante menor: basta con movimiento convectivo y de agitación suave en la renovación normal del electrolito.

En el caso de la EW de cobre, cerca del fondo de las celdas electrolíticas existe un anillo de distribución de soluciones, que consiste en una cañería perimetral con una perforación frente a cada espacio interplaca ánodo-cátodo.

En ambos casos debe cuidarse de reservar un cierto espacio en el fondo de la celda para la acumulación y evacuación de los residuos de ánodos en el caso del EW, y de barras anódicas, en la ER.

En ambos casos (EW y ER), y tanto para cobre como níquel, se debe cuidar el ingreso y distribución del electrolito en las celdas para evitar la contaminación de los cátodos con la remoción accidental de las impurezas acumuladas en el fondo de la celda.

En la EW de oro y plata, cuando se escoge un diseño rectangular convencional, se suele usar como cátodo un canastillo (paralelepípedo rectangular) relleno con esponja o virutilla de acero. En esencia, este cátodo no difiere de otros cátodos verticales.

23.12.6 Materiales

Se ha desarrollado con el tiempo un progreso significativo en los materiales de construcción de celdas convencionales, así como de las cañerías y bombas. A principios del siglo XX, las celdas eran de concreto revestidas de una protección estanca (lámina de plomo soldado). En la década de los '70 se introdujeron los revestimientos de membrana de plástico resistente al calor y a los productos químicos del electrolito (entre ellas, el paraliner). A fines de los años '80 se consolidó el uso de un nuevo producto: el hormigón polimérico, que es un hormigón formado por resina de poliéster -que actúa como ligante-, y arena de cuarzo -que actúa como carga-, que permitió eliminar los revestimientos de membranas y hacer celdas monolíticas prefabricadas, de una sola pieza. En la actualidad, se han introducido materiales plásticos de creciente resistencia química y térmica, así como aceros inoxidable especiales donde hay casos como el del titanio, cuyo costo se ha reducido considerablemente.

23.13 Eficiencia y Densidad de Corriente

El concepto de eficiencia de corriente corresponde a la relación que se establece entre el metal efectivamente depositado y el que debiera depositarse, de acuerdo con la cantidad de corriente eléctrica aplicada.

A diferencia de lo que ocurre en EW, en la práctica industrial de la ER, las eficiencias de corriente efectivas, pueden ser muy altas (entre 95 y 98%), ya que se trata de un proceso con muy pocas reacciones secundarias que puedan hacer mal uso de dicha energía.

En la EW, hay muchas reacciones posibles (tanto catódicas como anódicas), potencialmente competitivas a la reacción principal, de modo que la desviación del 100% de uso teórico de la corriente se explica por varias razones. Otra causa de aparente ineficiencia suele ser la pérdida de corriente por cortocircuitos (entre ánodo y cátodo, así como entre celda y celda) o por fugas de corriente a través de las estructuras de la nave electrolítica o de las propias celdas. Muchas plantas en operación tienen fugas de corriente sin percibirlo, y combaten la supuesta ineficiencia de corriente, pensando en una causa electroquímica, cuando en realidad se trata de una falla estructural, o de simple mantención y limpieza.

Los rangos de densidades de corriente aplicadas se distinguen en:

23.13.1 Sistemas de Sales Fundidas

Alcanzan fácilmente los 10 y 15 kA/m² (kilo amperes por metro cuadrado). Ello se debe a factores como la gran conductividad que se logra a altas temperaturas, la ausencia de limitaciones físicas para el desplazamiento de la corriente y el uso directo de ella en el baño electrolítico, sin posibilidad de fugas.

23.13.2 Soluciones Acuosa

Están entre 200 y 300 A/m², particularmente en los casos de EW y ER de cobre y níquel. Si las geometrías de los electrodos son distintas entre sí, puede haber diferentes densidades en el ánodo en relación al cátodo (desde el punto de vista práctico, la que interesa es la catódica).

Una manera de aumentar la densidad en forma considerable en estos sistemas acuosa, se encuentra en el uso de electrodos particulados y en efectuar la electrólisis en un lecho fluidizado. Si bien, esta tecnología ha sido profusamente investigada, hasta ahora, no ha alcanzado aplicaciones industriales de relevancia.

PROCESO DE PIROMETALURGIA

Aproximadamente el 90% del cobre primario mundial se extrae desde minerales sulfurados. Estos minerales, por ser difícilmente explotables por métodos hidrometalúrgicos, como lo son los óxidos, son tratados en su gran mayoría por técnicas pirometalúrgicas a partir de sus concentrados.

Para lograr este objetivo es necesario separar el elemento cobre del hierro, azufre y otras impurezas contenidas en el concentrado a través de un proceso pirometalúrgico que se caracteriza por realizarse a altas temperaturas (1.150-1.300 °C).

Para incrementar progresivamente la ley o contenido de cobre del material sometido a fundición, el proceso pirometalúrgico considera fases consecutivas de *Fusión, Conversión y Refinación*. Así se logra que la pureza inicial de 30% a 40% contenida inicialmente en el concentrado, se incremente progresivamente hasta 99,5% en el ánodo.

De las fases consecutivas, la fusión y la conversión son las más importantes por lo determinantes que resultan en el proceso general.

La fusión tiene por objetivo concentrar el metal a recuperar, mediante una separación de fases de alta temperatura: una sulfurada rica en el metal y otra oxidada o pobre en él.

La conversión elimina el azufre y el hierro presentes en la fase sulfurada, mediante oxidaciones del baño fundido para obtener un cobre final relativamente puro.

Hoy en día el proceso de fundición se realiza en once etapas:

1. Recepción y manejo de materias primas e insumos.
2. Secado de concentrados.
3. Tostación parcial de concentrados.
4. Alimentación de concentrados al horno de fusión.
5. Fusión de concentrados.
6. Limpieza de escorias.
7. Granallado de eje alta ley y escorias.
8. Preparación y manejo de eje de alta ley.
9. Conversión de eje de alta ley.
10. Refinación y moldeo de ánodos.
11. Plantas de limpieza de gases.

En la figura de una secuencia clásica de etapas pirometalúrgicas se muestra el rango aproximado de temperaturas involucradas. Ver figura 127 y 128.

En su forma clásica, hay una secuencia alternada de etapas endotérmicas y exotérmicas, siendo las más relevantes por su tamaño las correspondientes a la fusión y la conversión. Secuencialmente, también hay un aumento paulatino de la temperatura del sistema fundido.

Figura 127 Etapas proceso de fundición

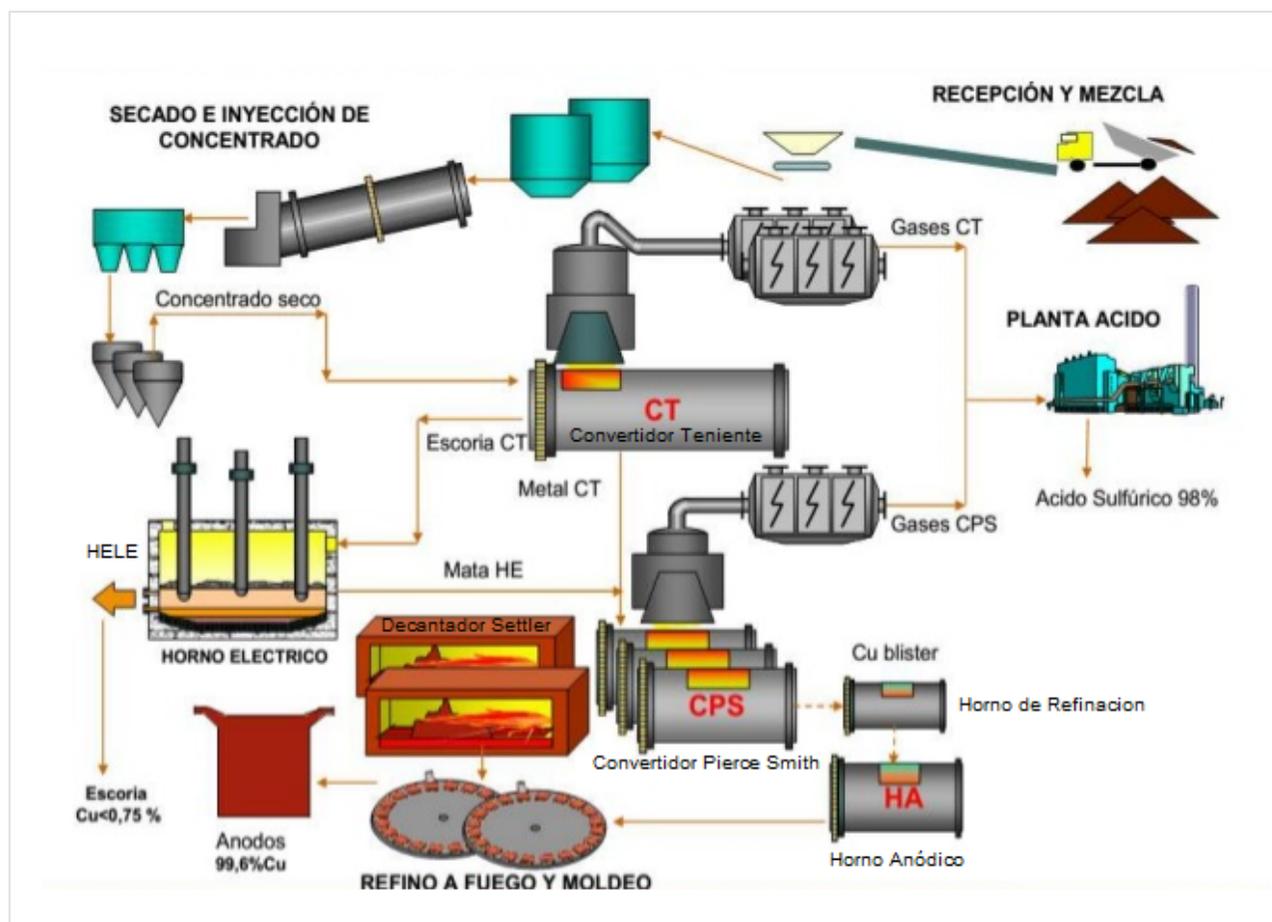
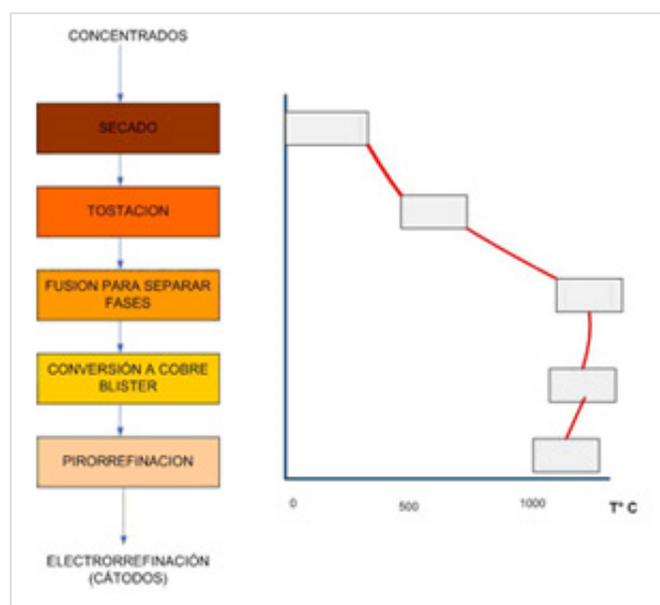


Figura 128 Temperaturas etapas del proceso de fundición



24.1 Etapas del Proceso

24.1.1 Recepción y Manejo de Materias Primas e Insumos

El proceso se inicia con la recepción y almacenamiento de los fundentes y otros insumos en áreas especiales para el concentrado. Estos materiales, que son transportados por vía marítima o terrestre, tienen un contenido de humedad que varía entre un 6% a 8% y proviene de distintas fuentes de abastecimiento. Se descargan mediante correas transportadoras tubulares o similares para evitar derrames y daños al medio ambiente.

Un equipo extrae el concentrado desde las camas de almacenamiento hacia el domo de mezcla. La operación normal permite que mientras una de las camas se está llenando, la otra se encuentre descargando a la planta. El domo de mezcla, cuya geometría es una semiesfera metálica cerrada, debe tener capacidad suficiente para algunos días de operación y estar ubicado en las inmediaciones del área de secado. El domo prepara mediante una correa circular interna una mezcla homogénea de concentrado, para dar la estabilidad operacional requerida por el proceso de fusión.

24.1.2 Secado de concentrados

El concentrado húmedo proveniente del domo de mezcla, es almacenado en tolvas desde donde ingresa a las líneas de secado de cada equipo de fusión que cuenta con secadores calefaccionados con vapor de agua. En esta etapa la humedad original del concentrado (entre 6% y 8%) se reduce a niveles que oscilan entre 0,2% y 0,3%.

El concentrado va reduciendo sus niveles de humedad a medida que avanza dentro un tambor metálico. En el interior circula vapor a temperatura de 180°C, por un serpentín que permite la transferencia de calor por radiación y convección. El calor requerido para el secado es suministrado por vapor saturado, a una presión de 20 bares, proveniente desde calderas de recuperación de calor de los gases generados en el proceso de fundición y que se encuentran asociadas a los respectivos hornos de fusión y conversión.

Los vahos producidos por el proceso de secado, compuestos por aire de purga (vapor de agua desprendido del concentrado y polvo arrastrado), pasan a un filtro de mangas donde se recuperan las partículas en suspensión, para ser dirigidas a las tolvas de almacenamiento de concentrado seco. Los vahos limpios son descargados a la atmósfera. El vapor condensado producto del proceso es conducido por cañerías a un estanque recuperador de condensados para su reutilización.

Debido a que la temperatura de operación del secador es de 180 °C, no se generará emisión de SO₂ al ambiente, ya que el azufre solo reacciona con el oxígeno a una temperatura superior a los 300 °C. En algunos casos puntuales, el grado de humedad del concentrado a tratar se convierte en un parámetro importante, como en la alimentación a los procesos de fusión flash, en los que el concentrado es transportado suspendido en aire enriquecido o en oxígeno. Así, los procedimientos Outokumpu e INCO consideran una etapa de secado de concentrado en un *secador rotatorio* previo a su tratamiento.

Outokumpu y el *convertidor teniente* en particular, necesitan grados de humedad inferiores al 0,2%.

24.1.3 Tostación parcial de concentrados

La tostación consiste en la oxidación parcial de los sulfuros del concentrado y en la eliminación parcial del azufre de éste como SO₂ y ocurre según reacciones sólido-gaseosas, a temperaturas de 500 a 800 °C, dependiendo de los productos que se desea obtener. La fase gaseosa contiene normalmente O₂ y SO₂ en la alimentación y productos y cantidades menores de gases SO₃ y SO₂, dependiendo de las reacciones de oxidación.

24.1.4 Alimentación de Concentrados al Horno de Fusión

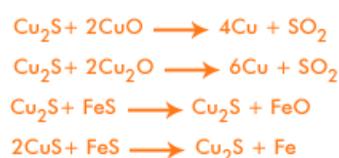
Una vez alcanzado el nivel de humedad requerido, el concentrado es descargado por gravedad desde los secadores y transportado en forma neumática a tolvas intermedias. En ellas se encuentran, simultáneamente, los polvos recuperados de diferentes partes del proceso de fusión y el concentrado seco proveniente de los secadores. Junto a cada tolva intermedia hay una tolva de

almacenamiento de cuarzo fino; el cuarzo es requerido como fundente para la formación de escoria producida por las unidades de conversión del eje alta ley (FCF) y, en menor cantidad, escoria proveniente de la refinación anódica y materiales recuperados de limpieza de canales, ductos y otros.

El concentrado seco, en conjunto con el cuarzo y en la dosificación adecuada, se extrae por un círculo neumático operado en fase densa que lo conduce por una cañería hasta el quemador del *Horno Flash* o de fusión inmediata, de tecnología Outokumpu.

24.1.5 Fusión de Concentrados

El objetivo de esta etapa es formar una fase de sulfuros líquidos, compuesta principalmente por calcosina (Cu_2S), covelina (CuS), calcopirita (CuFeS_2), pirita (FeS_2) y bornita (Cu_5FeS_4). En lo posible, debe contener todo el cobre alimentado, y otra fase oxidada líquida adherida a la anterior, llamada escoria, ojalá exenta de cobre, compuesta principalmente de silicatos de hierro. Los silicatos de hierro y los fundentes forman la escoria. La *mata* de cobre contiene sulfuros de cobre y hierro, algunos metales preciosos y otros elementos a nivel de trazas. La escoria, pobre en el metal, es caracterizada y descartada directamente o sometida a una etapa adicional de recuperación del metal, si su contenido es alto. La mata, en cambio, pasa a una etapa posterior de conversión por oxidación. Los concentrados sulfurados de cobre son básicamente combinaciones, en proporciones variables, de sulfuros de hierro y cobre mezclados con ganga silíceo ácido o básica. Las reacciones que tienen lugar en el *horno de fusión* (HF) transcurren entre estos constituyentes del concentrado y los fundentes, y corresponden principalmente a la reducción de los óxidos de cobre por el sulfuro cuproso y a la sulfuración de los óxidos de cobre por el sulfuro ferroso. Todo el sulfuro de cobre se descompone de acuerdo con las siguientes reacciones:



La tecnología HF corresponde a un proceso de *fusión - conversión* continua de concentrados, desarrollado por Outokumpu, que aprovecha el calor generado en las reacciones del oxígeno presente en el aire del proceso, con los sulfuros de hierro contenidos en el concentrado alimentado al reactor.

Dependiendo principalmente de las características mineralógicas o químicas del concentrado, de los flujos y enriquecimientos en oxígeno del aire soplado, se generarán importantes cantidades de calor en el reactor, suficientes para tener un proceso totalmente autógeno, donde se funden, además, materiales fríos de recirculación con cobre o carga fría, generada en el proceso productivo y utilizada para regular la temperatura en el horno.

Los *productos generados* en este proceso son una fase rica en cobre, conocida como *eje de alta ley*, con un 62%-70% de cobre, una escoria con un 1%-2% de cobre y 8%-12% de Fe_3O_4 , y una corriente continua de gases con un 30%-35% de SO_2 en la salida del horno. Concentración que dependerá principalmente del enriquecimiento en oxígeno del aire de proceso.

La escoria generada en el HF es evacuada por un pasaje de sangría ubicado en el extremo opuesto al punto de extracción del metal blanco, transferida por gravedad a través de una canaleta inclinada, cerrada, refrigerada y recubierta por material refractario, a un

horno eléctrico de Limpieza de Escoria (en adelante HELE) para recuperar su contenido de cobre. Ambas canaletas, tanto la que conduce la escoria al HELE, como la que conduce el metal blanco a la etapa de granallado, se encuentran totalmente confinadas de tal forma que los gases y vahos emanados por la extracción o sangrado de los productos (metal blanco y escoria), sean captados y conducidos mediante ventilación a un sistema de limpieza de gases secundarios, donde un filtro de mangas recupera las partículas en suspensión (las que luego son recirculadas como carga fría al HF. Luego, los gases y vahos son neutralizados y emitidos a la atmósfera.

Respecto de los gases metalúrgicos primarios producidos en el proceso (ricos en SO₂), éstos salen del HF por una torre refrigerada y pasan a una caldera donde se enfrían hasta alcanzar una temperatura de 350 °C. Transfieren su calor por radiación y convección a los tubos de la caldera para producir vapor saturado de 60 bar de presión, que se utiliza en múltiples aplicaciones como un medio calefactor en procesos de intercambio de calor. Los gases primarios, limpios en partículas y ricos en SO₂, son forzados por un ventilador de tiro inducido y conducido a la **planta de limpieza de gases** y el dióxido de azufre es utilizado en la producción de ácido sulfúrico. El accionar de este ventilador permite inducir el flujo de gases a través del horno y asegurar que no existirán fugas de gases con contenido de SO₂ al entorno.

El proceso de fusión ocurre a temperatura de 1.200 °C, en un sistema fundido, con suspensión de partículas sólidas en el baño, correspondiente a compuestos de alto punto de fusión (léase sílice, magnetita, entre otros).

La reacción de producción de mata y escoria podemos representarla por:



Donde:

Mata: Cu₂S, FeS, fundamentalmente.

Escoria: FeO, Fe₃O₄, SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO, Cu₂O, otros

Gas: O₂, SO₂, N₂, CO, CO₂, H₂, H₂O, otros.

24.1.6 Limpieza de Escorias

La escoria fundida producida por el HF es alimentada al HELE por la gravedad a través de una canaleta cerrada y ventilada. La reducción del contenido de Fe₃O₄ permite mejorar las propiedades fisicoquímicas de la escoria optimizándose la separación y, en consecuencia, la sedimentación de las partículas de cobre. Así se logra la separación de las dos fases fundidas presentes: metal blanco con un contenido de cobre de 70% y escoria descartable con un contenido de cobre de alrededor de 0.70%.

Los gases generados en el HELE son captados y conducidos a un incinerador que permite asegurar la quema total del carbón remanente no utilizado. Posteriormente, son mezclados con aire del sistema de ventilación del horno y con los gases secundarios de proceso. Esta mezcla es enfriada y conducida a un sistema de limpieza que permite la recuperación de material particulado. Los gases además de limpiados son neutralizados previo a su emisión a la atmósfera.

24.1.7 Granallado de Eje de Alta Ley y Escorias

En las operaciones modernas de fundición no se considera el transporte de materiales fundidos entre las etapas de fusión y conversión, lo que reduce al mínimo las emisiones fugitivas. Esto se consigue con la inclusión de etapas de granallado y molienda que permitan transportar materiales en estado sólido.

El proceso realizado en las plantas de granallado consiste en la granulación del material fundido, ingresa por la parte superior del pit o módulo de granulación y cae gravitacionalmente al fondo de éste. Durante esta caída el material fundido entra en contacto con agua pulverizada por un sistema de boquillas, con lo que el material se solidifica en pequeños gránulos, que caen en el fondo del pit de granulación junto con el agua inyectada. El material es recogido por un elevador de capachos perforados y luego pasa por un harnero vibratorio, donde se separa el sobretamaño una alta tasa de escurrimiento del agua. Las aguas utilizadas en el proceso de granallado (agua industrial) son condensadas y recirculadas en su totalidad dentro del mismo proceso, lo que genera una mínima emisión de vapor de agua.

24.1.8 Preparación y Manejo de Eje de Alta Ley

El eje de alta ley granallado proveniente del HF se acumula en el domo de almacenamiento. Una correa circular instalada al interior del domo permite la homogeneización requerida por el proceso de conversión. Desde el domo, el eje de alta ley es transferido mediante un equipo dosificador y una correa alimentadora móvil, a una etapa de molienda y secado constituida por líneas en serie con una unidad de conversión.

Adyacente a la tolva de eje de alta ley se encuentra una tolva de cal fina, material requerido como fundente para la formación y licuación de la escoria producida en el proceso de conversión. La alimentación del eje de alta ley al quemador se efectúa por medio de un sistema de pesaje gravimétrico (loss-in-weight feeder). Las tolvas de cal y polvos poseen su propio sistema de pesaje (loss-in-weight feeder). Un sistema neumático, (air slide) transporta la mezcla dosificada y pesada al quemador del horno de conversión.

24.1.9 Conversión de Eje de Alta Ley

En la etapa de conversión, el sulfuro ferroso se oxida formando dióxido de azufre, mientras que el óxido ferroso se une con la sílice y cal para formar escoria, esencialmente ferrítica. El calor de formación de esta escoria, junto con el producido en la oxidación del azufre y el hierro, es suficiente para mantener los diferentes materiales en estado fundido.

Cuando se ha oxidado todo el azufre asociado con el hierro, el eje de alta ley (sulfuro cuproso) también se oxida y, tan pronto como se ha formado una cantidad apreciable de óxido cuproso, éste reacciona con el sulfuro cuproso para formar cobre blíster y dióxido de azufre, según las siguientes reacciones que ocurren hasta que se consume prácticamente todo el azufre:



Respecto de las impurezas presentes en el eje de alta ley, una parte importante del arsénico, antimonio, plomo y zinc se volatiliza en forma de óxidos, mientras que la plata y el oro permanecen en el cobre blíster.

La tecnología de conversión considerada en esta descripción de una fundición moderna corresponde a Hornos Flash u Hornos de Conversión Inmediata Outokumpu / Kennecott (FCF). Los principales insumos requeridos en el proceso de conversión son: cal fina (95% CaO promedio), oxígeno técnico (95% O₂, en promedio) y aire de distribución. El enriquecimiento del aire en proceso es 70% de oxígeno promedio.

En la torre de reacción se encuentra el quemador donde se alimenta la carga. Una lanza central, con aire enriquecido, facilita su distribución con la consecuente reacción del sulfuro contenido, lo que genera el calor de fusión requerido para el correcto funcionamiento del proceso. El material se funde de manera instantánea (flash) produciendo cobre blíster, escoria y gases metalúrgicos con altos contenidos de SO₂ (35%-45%). La temperatura de la reacción exotérmica alcanza hasta los 1.450 °C y el calor generado es transferido a los productos fundidos, gases metalúrgicos y al sistema de refrigeración de la torre constituido por elementos de cobre refrigerados por agua, insertos en el revestimiento refractario de la misma.

El calor retirado desde el horno por las chaquetas de cobre refrigeradas por agua, con circuito cerrado de agua tratada e intercambiadores de calor, es eliminado mediante un sistema secundario que no considera torres de enfriamiento, sino una solución radiactiva conectiva mediante el uso de refrigeradores aleteados y ventiladores de aire forzado.

Los materiales fundidos son depositados en el decantador (settler) del FCF, que corresponde a una estructura metálica rectangular revestida interiormente de refractarios y elementos de enfriamiento similares a los de la torre de reacción, pero con geometría distinta. Estos materiales son evacuados desde settler, una vez que la separación de fases (blíster y escoria) esté claramente definida debido a su diferencia de densidades y pesos específicos.

El decantador del horno posee placas de sangría para blíster y placas de escoria. Estas canaletas que tienen una plancha metálica de acero refrigerada y recubierta con ladrillo refractario, son selladas y ventiladas para evitar el escape de gases y mantener la temperatura adecuada para el sangrado.

La producción de cobre blíster alcanzará un contenido promedio de cobre de 99.0%. La secuencia de sangría del blíster fundido está configurada de acuerdo a la disponibilidad operacional de los hornos de ánodos.

La escoria producida en el FCF es evacuada mediante canaletas selladas, de características similares a las utilizadas para el blíster, hacia una etapa de granallado. Dado el contenido metálico de la escoria granulada (17.6% de cobre), es transferida por camiones al área de almacenamiento de concentrados para su reprocesamiento como carga fría al HF.

24.1.10 Refinación y Moldeo de Ánodos

24.1.10.1 Rueda de Moldeo

El cobre blíster obtenido de la etapa de conversión aún contiene impurezas y materiales valiosos tales como plata, oro, arsénico, antimonio, bismuto y hierro, por lo que debe ser refinado en los hornos anódicos.

La operación de los hornos de refinación es cíclica (batch) y está constituida por las siguientes etapas:

- Llenado,
- Oxidación
- Escoriado
- Reducción
- Vaciado.

Cada horno opera de forma secuencial, de acuerdo con las cinco etapas mencionadas. Completada la carga del horno, se inicia la etapa de oxidación, que permite remover el sulfuro contenido en el blíster hasta un nivel de 50 ppm. Para tal efecto se inyecta al baño fundido aire enriquecido con oxígeno. Adicionalmente se renuevan otras impurezas contenidas en el cobre blíster, inyectándose vía toberas, si es necesario, pequeñas cantidades de cal, que permiten la formación de una escoria que se descarta por sangrado y posteriormente es recirculado.

Una vez limpio el cobre, se inicia la etapa de reducción del nivel de oxígeno presente en el baño fundido, mediante la inyección de gas natural fraccionado con vapor de aire. Así se obtiene cobre anódico con un contenido de cobre de un 99,6%. El cobre anódico se extrae del horno de ánodos por una canaleta cubierta, a la rueda de moldeo que va girando, produciéndose la solidificación del ánodo fundido por contacto con el aire ambiente. Un equipo especialmente diseñado, toma automáticamente los ánodos solidificándolos y los deposita en estanques longitudinales de enfriamiento con agua. Desde los estanques, los ánodos son sacados por un montacargas y depositados en un área dedicada. Ver figura 129.

Figura 129 Rueda de moldeo fundición Chuquicamata



24.1.11 Plantas de Limpieza de Gases

El objetivo de estas plantas de limpieza es acondicionar los gases metalúrgicos primarios para su utilización como insumo en la producción de ácido sulfúrico (H_2SO_4). Los gases emitidos por el HF (Horno de Fusión Convertidor Teniente) están compuestos principalmente por SO_2 , humo, vapores metálicos y partículas de cobre arrastradas. Los gases provenientes del FCF (Horno Flash), están compuestos fundamentalmente de SO_2 y material particulado.

Ambos gases primarios, luego de pasar por los respectivos precipitadores electrostáticos, se juntan en una cámara de mezcla común desde donde son conducidos a las plantas de limpieza de gases.

El proceso de producción de ácido sulfúrico se lleva a cabo en tres fases:

- 📌 Purificación de gases.
- 📌 Oxidación catalítica de SO₂/SO₃.
- 📌 Absorción.

La etapa de purificación o limpieza de gases tiene por objetivo acondicionar el gas, retirando todos aquellos compuestos cuya presencia pueda significar una merma en la eficiencia de producción de ácido sulfúrico o un daño al catalizador. Para ello, se contará con una torre de lavado que permitirá el enfriamiento y limpieza de sólidos y humos metálicos arrastrados; una sección de precipitadores de neblina húmeda y una torre de secado, donde son mezclados con aire de dilución hasta alcanzar un contenido medio de 14% de SO₂, apto para ser enviado a la sección de contacto u oxidación.

El proceso de limpieza de gases genera un residuo líquido, que contendrá la totalidad del arsénico y trazas de otros elementos metálicos volatilizados en la fundición y presente en los gases sometidos a tratamiento. Este ril será conducido a la *planta de tratamiento integral de efluentes industriales*.

Bibliografía

1. Portal Minero; Manual general de minería y metalurgia. ICHM. Sonami 2006.
2. Metso Minerals; Conocimientos básicos en el procesamiento de minerales, Edición 2004.
3. Domic, Esteban; Hidrometalurgia: Procesos, fundamentos y aplicaciones, 2001
4. Bustillo Revuelta, M.; López Jimeno, C. Recursos minerales. tipología, prospección, evaluación, explotación, mineralurgia, impacto ambiental. Entorno Gráfico S.L. (Madrid). 1996.
5. Evans, A.M. Ore geology and industrial minerals: An introduction. Blackwell Science, 1993.
6. Lunar, R.; Oyarzun, R. Yacimientos minerales: técnicas de estudio, tipos, evolución metalogénica, exploración. Ed. Centro de Estudios Ramón Areces. 1991.
7. Smornov, V.I. Geología de yacimientos Minerales. Mir. 1982.
8. Vázquez Guzmán. F. Geología económica de los recursos minerales. Fundación Gómez Pardo (Madrid). 1997.
9. Luis Marín Escalona, Aglomerado y curado en el proceso de lixiviación de minerales 2007.
10. B. Stoces, Elección y crítica de los métodos de explotación en minería. Barcelona 1963.

Estudios

1. Biolixiviación: desarrollo actual y sus expectativas; Cochilco 2009.

Presentaciones

1. Hernan Barros; Ingeniería de Procesos de la Industria Minera; UTEM 2014.