



## **CAPÍTULO 12: PROCESAMIENTO DE MINERALES**

### **12.1. INTRODUCCIÓN**

La forma en que los metales se encuentran en la corteza terrestre y como depósitos en el lecho de los océanos, depende de su reactividad con su medio ambiente, particularmente con oxígeno, azufre y dióxido de carbono. El oro y los metales del grupo del platino se encuentran principalmente en estado nativo o forma metálica. La plata, el cobre y el mercurio se encuentran en forma nativa y también en forma de sulfuros, carbonatos y cloratos. Los metales más reactivos se encuentran siempre en forma de compuestos, tales como los óxidos o sulfuros de hierro y los óxidos y silicatos de aluminio y berilio. Los compuestos que se encuentran en la naturaleza son conocidos como *minerales*, a muchos de los cuales se les ha dado un nombre de acuerdo a su composición, por ejemplo galena (sulfuro de plomo  $PbS$ ), esfalerita (sulfuro de zinc  $ZnS$ ), casiterita (óxido de estaño  $SnO_2$ ), pirita (sulfuro de hierro  $FeS_2$ ), calcopirita (sulfuro de cobre y hierro  $CuFeS_2$ ).

Los minerales por definición son sustancias inorgánicas que poseen composición química y estructura atómica definidas. Sin embargo, se permite cierta flexibilidad a esta definición. Muchos minerales exhiben isomorfismo, que es la sustitución de átomos de un elemento en la estructura cristalina por otro átomo similar sin afectar la estructura atómica. Por ejemplo, el olivino es un mineral que tiene como composición química  $(Mg,Fe)_2SiO_4$ , y la razón entre los átomos de Mg y Fe es variable de un olivino a otro, manteniendo la razón con los átomos de Si y O. Los minerales pueden exhibir también polimorfismo, que implica que diferentes minerales tienen la misma composición química, pero diferencias muy marcadas en las propiedades físicas debido a diferencias en la estructura cristalina. Así, los minerales grafito y diamante tienen exactamente la misma composición, estando formados completamente por átomos de carbón, pero tienen propiedades extremadamente diferentes debido al ordenamiento de los átomos de carbón en las redes del cristal.

El término mineral es usado a menudo en un sentido más extenso para incluir cualquier valor económico que es extraído de la tierra. Así el carbón, la tiza, las arcillas y el granito no están dentro de la definición de mineral, aunque en sentido popular se les da esa condición. Tales materiales son, de hecho, *rocas*, las cuales no son homogéneas en composición química ni física, como lo son los minerales, y consisten de una variedad de minerales y forman gran parte de la corteza terrestre. El granito, por ejemplo, el cual es una de las rocas ígneas más abundantes, esto es una roca formada por el enfriamiento de material fundido o *magma* dentro de la corteza terrestre, está compuesta de tres constituyentes minerales principales, feldespato, cuarzo y mica. Estos tres componentes minerales homogéneos ocurren en proporciones variadas en diferentes partes de la misma masa de granito. Los yacimientos minerales, tanto metalíferos como no metálicos, son acumulaciones o concentraciones de una o más sustancias útiles que en su mayoría están distribuidos escasamente en la corteza exterior de la tierra.



Los elementos que entran en la composición de los materiales de los yacimientos minerales provienen de las rocas de corteza terrestre exterior o bien de masas fundidas (magmas) que se enfriaron y formaron las rocas ígneas. Originariamente, todos los elementos, salvo los que pueden haber persistido de la primitiva atmósfera, han derivado de magmas o rocas ígneas de la corteza exterior rocosa de la tierra. De los 106 elementos conocidos, sólo 8 están presentes en la corteza terrestre en cantidades superiores a 1%, y el 99.5% de la corteza terrestre (considerando 16 km de profundidad) está formado por los siguientes 13 elementos:

➤ Oxígeno ➤ Silicio ➤ Aluminio ➤ Hierro ➤ Calcio ➤ Potasio ➤ Magnesio  
➤ Titanio ➤ Fósforo ➤ Hidrógeno ➤ Sodio ➤ Carbono ➤ Manganeseo

Los elementos restantes, que constituyen tan sólo el 0.5% de la corteza terrestre, comprenden todas las sustancias preciosas y útiles, tales como el platino, oro, plata, cobre, plomo, zinc, estaño, níquel y otros. De esta forma es evidente que han sido necesarios diversos procesos geológicos de concentración para juntar estos pocos elementos en depósitos minerales explotables (yacimientos minerales). Los minerales que constituyen la masa de la corteza terrestre también son poco numerosos. Se conocen más de 1600 especies minerales, de las cuales unas 200 están clasificadas como minerales de importancia económica.

## **12.2. MATERIALES DE YACIMIENTOS METÁLICOS**

Los yacimientos metalíferos representan, en general, concentraciones extremas de metales que primitivamente estaban dispersos. Los metales de interés están generalmente unidos químicamente a otros formando las *menas minerales*; las que a su vez, aparecen entremezcladas con minerales no metálicos (o materia rocosa) denominados *ganga*. La mezcla de las menas minerales y la ganga constituye la *mena*, que generalmente se presenta en forma de rocas.

De esta forma, las menas minerales son los minerales que pueden utilizarse para obtener uno o más metales. En su mayoría son minerales metálicos, tales como la calcopirita, que se extrae para la obtención de cobre. Unos pocos son minerales no metálicos, tales como la malaquita, la bauxita o la cerusita, minerales de cobre, aluminio y plomo, respectivamente. Un mismo metal se puede extraer de diferentes minerales. Así, existen varias clases de mineral de cobre, tales como la calcosina, bornita, calcopirita, cuprita, cobre nativo y malaquita: uno solo o varios de éstos pueden estar presentes en un yacimiento. Asimismo, de una sola mena mineral se puede obtener más de un metal: por ejemplo de la estannita se obtiene estaño y cobre a la vez. Por consiguiente, un depósito mineral puede dar varios metales a partir de varias menas.

Los metales de interés económico se obtienen de diferentes fuentes. La mayor parte del oro existente en el mundo procede de oro nativo; por consiguiente, su separación de los minerales que lo acompañan es un proceso relativamente sencillo, y no planteaba problemas serios de extracción ni siquiera a los antiguos. En cambio, la plata no sólo procede del metal nativo sino también de combinaciones con azufre y otros elementos. Lo mismo puede decirse del cobre, el plomo, el zinc y la mayoría de los otros metales. La mayor parte del hierro utilizado en la industria se obtiene a partir de combinaciones

de ese metal con el oxígeno. De estas sencillas combinaciones se ha abastecido el género humano de los metales deseados durante más de 2000 años. En la Tabla 1 se presentan algunas menas minerales importantes de varios metales.

**Tabla 1.** Listado de menas minerales más comunes.

Metal	Mena mineral	Composición	% de metal
Oro	Oro nativo	Au	100
	Calaverita	Te <sub>2</sub> Au	39
	Silvanita	Te <sub>2</sub> (Au,Ag)	-
Plata	Plata nativa	Ag	100
	Argentita	Ag <sub>2</sub> S	87
	Querargirita	AgCl	75
Hierro	Magnetita	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	72
	Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	70
	Limonita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·H <sub>2</sub> O	60
	Siderita	FeCO <sub>3</sub>	48
Cobre	Cobre nativo	Cu	100
	Bornita	Cu <sub>5</sub> FeS <sub>4</sub>	63
	Brocantita	CuSO <sub>4</sub> ·3Cu(OH) <sub>2</sub>	62
	Calcosita	Cu <sub>2</sub> S	80
	Calcopirita	CuFeS <sub>2</sub>	34
	Covelina	CuS	66
	Cuprita	Cu <sub>2</sub> O	89
	Enargita		48
	Malaquita	CuCO <sub>3</sub> ·Cu(OH) <sub>2</sub>	57
	Azurita	2 CuCO <sub>3</sub> ·Cu(OH) <sub>2</sub>	55
	Crisocola	CuSiO <sub>3</sub> ·2H <sub>2</sub> O	36
	Plomo	Galena	PbS
Cerucita		PbCO <sub>3</sub>	77
Anglesita		PbSO <sub>4</sub>	68
Zinc	Blenda	ZnS	67
	Smithsonita	ZnCO <sub>3</sub>	52
	Hemimorfita	ZnSiO <sub>5</sub> H <sub>2</sub>	54
	Cincita	ZnO	80
Estaño	Casiterita	SnO <sub>2</sub>	78
	Estannita	Cu <sub>2</sub> S·FeS·SnS <sub>2</sub>	27
Níquel	Pentlandita	(Fe,Ni)S	22
	Garnierita	(Ni,Mg)SiO <sub>3</sub> H <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O	-
Cromo	Cromita	Cr <sub>2</sub> FeO <sub>4</sub>	68
Manganeso	Pirolusita	MnO <sub>2</sub>	63
	Psilomelana	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·xH <sub>2</sub> O	45
Aluminio	Bauxita	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2H <sub>2</sub> O	39
Antimonio	Estibina	Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	71
Bismuto	Bismutita	Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	81
Cobalto	Esmaltita	CoAs <sub>2</sub>	28
Mercurio	Cinabrio	HgS	86
Molibdeno	Molibdenita	MoS <sub>2</sub>	60
	Wulfenita	MoPbO <sub>4</sub>	39
Wolframio	Wolframita	WO <sub>4</sub> (Fe,Mn)	76
	Huebnerita	WO <sub>4</sub> Mn	76
	Scheelita	WO <sub>4</sub> Ca	80



Los minerales de ganga son las materias no metálicas asociadas a un depósito. Usualmente se desechan al proceder al tratamiento del mineral. Comúnmente, la ganga contiene tan sólo minerales no metálicos, pero técnicamente pueden serlo, tales como la pirita, que usualmente se desechan por inútiles.

La Tabla 2 presenta algunos minerales de ganga comunes.

**Tabla 2.** Listado de minerales de ganga comunes.

Clase	Nombre	Composición
Óxidos	Cuarzo	SiO <sub>2</sub>
	Bauxita	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2H <sub>2</sub> O
	Limonita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·H <sub>2</sub> O
Carbonatos	Calcita	CaCO <sub>3</sub>
	Dolomita	(Ca,Mg)CO <sub>3</sub>
	Siderita	FeCO <sub>3</sub>
	Rodocrosita	MnCO <sub>3</sub>
Sulfatos	Baritina	BaSO <sub>4</sub>
	Yeso	CaSO <sub>4</sub> +H <sub>2</sub> O
Silicatos	Feldespato	
	Granate	
	Rodonita	MnSiO <sub>3</sub>
	Clorita	
	Minerales arcillosos	
Varios	Fluorita	F <sub>2</sub> Ca
	Apatita	(FCa)(PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> Ca <sub>4</sub>
	Pirita	FeS <sub>2</sub>
	Marcasita	FeS <sub>2</sub>
	Pirrotita	Fe <sub>1-x</sub> S
	Arsenopirita	FeAsS

### 12.3. MENA MINERAL

El término mena se utiliza a menudo, en términos generales, para designar cualquier cosa extraída de una mina. Técnicamente es un agregado de minerales y ganga, a partir del cual pueden extraerse uno o más metales. Por lo tanto, para ser mena la materia debe ser beneficiable, lo cual hace que tenga una importancia económica lo mismo que geológica. El procesamiento de un mineral (su beneficio) depende de la cantidad y precio del metal, y también del coste de extracción, procesamiento, transporte y venta del producto. A su vez, esto depende en parte del emplazamiento geográfico del yacimiento.

Lo que constituye una mena puede depender también de la ganga o de los constituyentes menores. Ciertos materiales sólo pueden ser explotados beneficiosamente por su contenido metálico si puede utilizarse una parte de la ganga. La presencia de pequeñas cantidades de bismuto, cadmio o arsénico pueden hacer perder el valor a los depósitos de plomo, zinc o cobre valiosos en sí mismos.



Las proporciones relativas de los minerales de mena y de ganga varían enormemente. En las menas corrientes predomina en gran cantidad la ganga. De esta forma, es costoso fundir una gran masa de ganga para obtener el metal contenido en una mena. Por ello existe una primera etapa de reducción de tamaños y concentración, donde se logra obtener un producto denominado *concentrado*, en el que se encuentra la mayor parte del contenido metálico, y otro denominado *relave* o *cola*, en el que permanece la ganga. Así, dependiendo del caso, de 5 a 30 toneladas de mineral provenientes de la mina darán 1 tonelada de concentrados que contienen la mayor parte de las especies metálicas del lote original. Luego el concentrado se funde para obtener su contenido metálico, ahorrando con ello el coste de tratamiento de 4 a 29 toneladas de ganga inútil. Por consiguiente, la etapa de concentración es de vital importancia para determinar si un material es mena o no. De este modo, la ganga puede desempeñar un papel tan importante como los minerales de mena.

Por otro lado, la cantidad de metal que debe estar presente en un depósito mineral para constituir una mena, depende evidentemente del precio del metal. Durante los períodos en que están bajos los precios de los metales, sólo las menas que tengan un contenido metálico superior al normal pueden clasificarse como minerales. Inversamente, cuando el precio del metal sube, muchos materiales que anteriormente no tenían valor pasan a convertirse en buen mineral.

Las menas pueden producir un solo metal (menas simples) o varios (menas compuestas). Las menas que generalmente se explotan para producir un solo metal son las de hierro, aluminio, cromo, estaño, mercurio, manganeso, wolframio y algunos minerales de cobre. Las menas de oro pueden producir solamente oro, pero la plata está comúnmente asociada a él. Sin embargo, se extrae mucho oro como subproducto de otros minerales. Las menas que comúnmente rinden dos o tres metales son las de oro, plata, cobre, plomo, zinc, níquel, cobalto, antimonio y manganeso. Algunas menas complejas pueden rendir hasta cuatro o cinco metales, tales como cobre-oro-plata-plomo, plata-plomo-zinc-cobre-oro, estaño-plata-plomo-zinc o níquel-cobre-oro-platino. Muchos metales menores no se obtienen directamente de sus menas sino en forma de subproducto de las menas de otros metales durante las operaciones de fundición y refinado. Tal es el caso del molibdeno, arsénico, bismuto, cadmio, selenio y otros. Son asociaciones comunes de metales en las menas: oro y plata; plata y plomo; plomo y zinc; plomo, zinc y cobre; cobre y oro; hierro y manganeso; hierro y titanio; níquel y cobre; cobre y molibdeno; zinc y cadmio; etc.

El contenido metálico de una mena se llama *ley* o *tenor*, y generalmente se expresa en porcentaje o (como en los metales preciosos) en onzas o gramos por toneladas. La ley para que un depósito mineral sea considerado de interés económico, varía con el precio del metal, con el coste de producción, con la presencia de menas de diferentes metales y también con el tipo de mena del metal presente. Cuanto más elevado es el precio de un metal, más bajo es el contenido metálico necesario para que sea beneficiable. La mayoría de los minerales de hierro deben tener, para ser beneficiable, un contenido de 35 a 50% de hierro, mientras que un mineral de cobre necesita contener tan sólo 0.8% de cobre. El contenido de metal no necesita tener un límite superior; cuanto más rico, mejor. Por el contrario, el límite inferior está fijado por consideraciones de orden



económico, y varía según la naturaleza y magnitud de un depósito, su emplazamiento, el precio del metal y el coste de extracción.

## 12.4. PRODUCCIÓN DE METALES EN CHILE

Chile es el mayor productor de cobre del mundo. La Tabla 3 muestra un resumen de los principales yacimientos productores de cobre en Chile y su producción oficial durante los últimos años. A septiembre de 1998 la estadística oficial de producción de cobre indicaba un acumulado de 2.705.058 toneladas de cobre fino.

**Tabla 3:** Producción oficial de cobre en Chile durante los 90's, en miles de toneladas de cobre fino.

		<b>Producción de Cobre en Chile</b>								
		Miles de toneladas de cobre fino								
		1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
<b>Minería Estatal</b>										
División Chuquicamata		680,7	641,4	628,2	616,7	606,2	610,2	632,3	650,2	650,2
División Salvador		95,0	91,1	85,0	84,1	82,6	85,9	89,9	88,3	88,1
División El Teniente		300,5	278,8	314,2	304,7	308,9	322,8	344,7	343,2	338,6
División Andina		119,1	114,2	128,9	133,9	136,4	145,8	154,4	145,5	164,0
División Radomiro Tomic									4,0	161,9
<b>Total</b>		<b>1.195,3</b>	<b>1.125,5</b>	<b>1.156,3</b>	<b>1.139,4</b>	<b>1.134,1</b>	<b>1.164,7</b>	<b>1.221,3</b>	<b>1.231,2</b>	<b>1.402,8</b>
<b>Minería Privada Independiente</b>										
Mantos Blancos		72,5	78,5	69,4	74,9	77,5	76,0	122,4	132,9	138,1
Disputada de las Condes		112,2	107,2	131,9	181,4	187,7	198,5	200,7	202,4	215,9
Escondida		8,9	298,4	336,1	388,8	483,6	466,9	841,4	932,7	867,6
Los Pelambres				16,9	21,6	23,4	23,0	22,9	22,6	9,0
Lince				13,5	20,2					
Michilla						26,8	56,4	63,0	62,7	62,1
Candelaria						30,9	150,3	136,8	155,7	215,0
Cerro Colorado						21,3	36,4	59,3	60,3	75,0
Quebrada Blanca						6,9	46,4	67,7	66,8	71,1
Zaldivar							22,4	77,5	96,2	135,0
El Abra								51,0	194,1	198,7
El Indio		26,8	26,6	24,8	28,4	31,5	34,6	34,7	32,1	27,8
Collahuasi										48,1
Lomas Bayas										19,3
<b>Total</b>		<b>220,4</b>	<b>510,7</b>	<b>592,6</b>	<b>715,3</b>	<b>889,6</b>	<b>1.110,9</b>	<b>1.677,4</b>	<b>1.958,5</b>	<b>2.082,7</b>
<b>Otros Independiente</b>		<b>30,4</b>	<b>28,7</b>	<b>35,4</b>	<b>46,6</b>	<b>77,6</b>	<b>86,5</b>	<b>88,8</b>	<b>104,9</b>	<b>118,3</b>
<b>Enami</b>		<b>142,0</b>	<b>149,4</b>	<b>148,4</b>	<b>154,1</b>	<b>118,6</b>	<b>126,5</b>	<b>128,3</b>	<b>97,4</b>	<b>83,1</b>
<b>Total Privada</b>		<b>392,8</b>	<b>688,8</b>	<b>776,4</b>	<b>916,0</b>	<b>1.085,8</b>	<b>1.323,9</b>	<b>1.894,5</b>	<b>2.160,8</b>	<b>2.284,1</b>
<b>Total País</b>		<b>1.588,1</b>	<b>1.814,3</b>	<b>1.932,7</b>	<b>2.055,4</b>	<b>2.219,9</b>	<b>2.488,6</b>	<b>3.115,8</b>	<b>3.392,0</b>	<b>3.686,9</b>

Fuente: Comisión Chilena del Cobre, SONAMI

En la Tabla 4 se presenta los resultados de producción de oro en Chile, durante los últimos años y la Tabla 5, la respectiva a plata.

**Tabla 4:** Producción oficial de oro en Chile durante los 90's, en kilos de oro fino.

Producción de Oro en Chile									
kg de fino									
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Gran Minería	1.826,7	1.971,2	2.214,4	2.217,3	2.813,9	2.764,2	2.468,3	1.290,5	3.151,4
Mediana Minería	24.628,0	25.635,8	31.015,8	30.321,4	35.030,7	41.069,7	50.001,2	47.506,2	40.295,2
Pequeña Minería	1.048,7	1.272,4	1.242,5	1.098,8	941,3	751,5	704,6	662,4	337,6
<b>Total</b>	<b>27.503,4</b>	<b>28.879,4</b>	<b>34.472,7</b>	<b>33.637,5</b>	<b>38.785,9</b>	<b>44.585,4</b>	<b>53.174,1</b>	<b>49.459,1</b>	<b>43.784,2</b>

**Tabla 5:** Producción oficial de plata en Chile durante los 90's, en kilos de plata fina.

Producción de Plata en Chile									
kg de fino									
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Gran Minería	275.317,0	228.043,0	223.910,0	235.305,0	278.745,0	295.791,0	267.530,0	247.682,0	306.716,0
Mediana Minería	366.480,5	439.839,1	793.335,7	731.240,7	700.871,9	742.376,5	877.162,3	840.325,9	1.028.108,7
Pequeña Minería	12.805,3	8.457,0	7.577,0	3.522,2	3.387,8	2.930,0	2.310,1	3.303,5	2.016,1
<b>Total</b>	<b>654.602,8</b>	<b>676.339,1</b>	<b>1.024.822,7</b>	<b>970.067,9</b>	<b>983.004,7</b>	<b>1.041.097,5</b>	<b>1.147.002,4</b>	<b>1.091.311,4</b>	<b>1.336.840,8</b>

## **12.5. REDUCCIÓN DE TAMAÑOS DE PARTÍCULAS DE MINERAL**

Las partículas de especies útiles presentes en una mena, tienen tamaños de decenas de micrómetros ( $1\text{mm} = 1000\ \mu\text{m}$ ), lo que pone un grado de dificultad a los procesos de extracción. Por ello, una primera etapa a la que se ve expuesta la mena mineral es a la reducción de tamaños, cuyo objetivo es lograr separar físicamente las partículas útiles de la matriz de ganga que los contiene.

La etapa de extracción de la mena desde el yacimiento se inicia con la definición de las características de explosión que se debe dar a un frente determinado. De esta forma ocurre la primera etapa de reducción de tamaño de las partículas de mineral. El producto de este proceso, producto de la mina, tiene un tamaño máximo de 1.5 metros en los yacimientos correspondientes a la gran minería. Este material es transportado a la planta de procesamiento de minerales, ya sea a través de camiones de gran capacidad, correas transportadoras o una combinación de ambas, si el yacimiento se explota a tajo abierto ("open pit") y a través de carros de ferrocarril, cargadores frontales LHD o una combinación de ambas, si el yacimiento se explota en forma subterránea.



**Figura 1:** Vistas de pala para cargío de mineral y de camión para el transporte de minerales al interior de un yacimiento.

Posteriormente, una vez que el mineral se encuentra en la planta de procesamiento de minerales, es sometido a diferentes etapas de reducción de tamaño mecánico. De esta forma el chancado es la primera etapa de la reducción de tamaño, después de la explosión destructiva. Generalmente es una operación en seco y usualmente se realiza en dos o tres etapas, existiendo en algunos casos hasta cuatro etapas.

El chancado se realiza mediante máquinas pesadas que se mueven con lentitud y ejercen presiones muy grandes a bajas velocidades. La fuerza se aplica a los trozos de roca mediante una superficie móvil o mandíbula que se acerca o aleja alternativamente de otra superficie fija capturando la roca entre las dos. Una vez que la partícula grande se rompe, los fragmentos se deslizan por gravedad hacia regiones inferiores de la máquina y son sometidas de nuevo a presiones sufriendo fractura adicional.

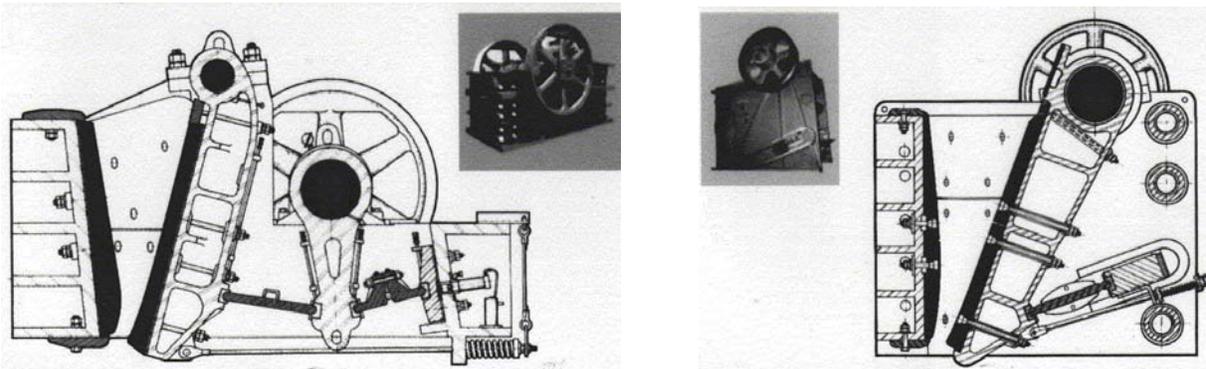
Las chancadoras pueden clasificarse básicamente de acuerdo al tamaño del material tratado con algunas subdivisiones en cada tamaño de acuerdo a la manera en que se aplica la fuerza.

1. La chancadora primaria o gruesa trata el material que viene de la mina, con trozos máximos de hasta 1.5 m (60 plg) y lo reduce a un producto en el rango de 15 a 20 cm (6 a 8 plg). Normalmente este material va a una pila de almacenamiento.
2. La chancadora secundaria toma el producto de la chancadora primaria y lo reduce a su vez a un producto de 5 a 8 cm (2 a 3 plg).
3. La chancadora terciaria toma el producto de la chancadora secundaria y lo reduce a su vez a un producto de 1 a 1.5 cm (3/8 a 1/2 plg) que normalmente va a una etapa de molienda.

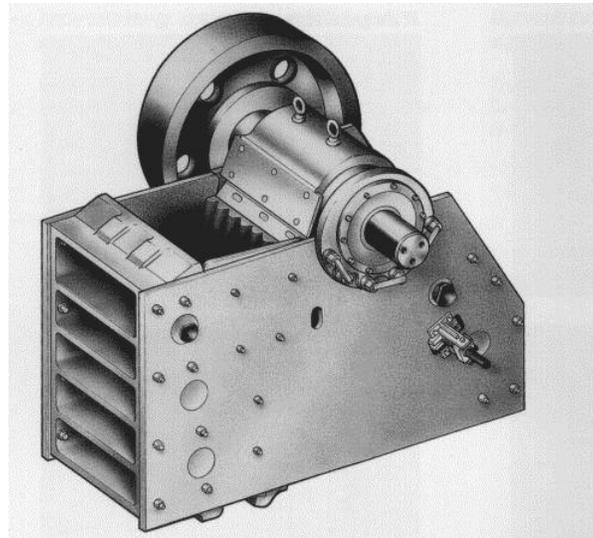
En el chancado primario de minerales se utilizan principalmente chancadoras de mandíbula o giratorias. En el secundario chancadoras giratorias o más comúnmente chancadoras de cono. Mientras que en el chancado terciario se utilizan casi universalmente chancadoras de cono. Alternativamente, cuando existe chancado cuaternario, las chancadoras utilizadas son de cono.

La característica más distintiva de una chancadora de mandíbula son las dos placas que se abren y cierran como mandíbulas de animal. Están construidas en un bastidor en forma de caja, uno de cuyos extremos es la cámara de chancado que contiene una placa o mandíbula fija que es en realidad el extremo de la caja y una placa móvil que es empujada contra la roca con enorme fuerza. Estas provistas de una excéntrica y una palanca que tienen una tremenda ganancia mecánica, las que proporcionan la fuerza bruta necesaria para producir el chancado. Un volante de masa periférica adecuada proporciona el momento necesario para mantener una velocidad casi constante durante el ciclo y en alguna parte del mecanismo está el eslabón débil que actúa como un fusible de poder para proteger la máquina en el caso de esfuerzos extremos. Generalmente el bastidor de la chancadora es fabricado de acero fundido, a veces reforzado con barras de acero, y toda la cámara de chancado, es decir ambas mandíbulas y los dos lados laterales están equipados con revestimiento reemplazables. Estos revestimientos, que sufren casi todo el desgaste son hechos de acero al manganeso.

Las chancadoras de mandíbula se clasifican de acuerdo al método de pivotar la mandíbula móvil. En la chancadora tipo Blake, la mandíbula es pivotada en la parte superior y por lo tanto, tiene un área de entrada fija y una abertura de descarga variable. En la chancadora Dodge, la mandíbula tiene el pivote en la parte inferior, dando un área de admisión variable pero un área de descarga fija. La chancadora Dodge está restringida a uso en laboratorio, donde se requiere exactitud en el tamaño de las partículas y nunca se usa para trabajo pesado porque se atora con facilidad. Las chancadoras Tipo Blake se presentan en chancadoras Blake de doble palanca y chancadoras Blake de palanca simple, las que se pueden observar en la Figura 2.



**Figura 2:** Secciones transversales de chancadoras Blake de doble palanca y palanca simple.

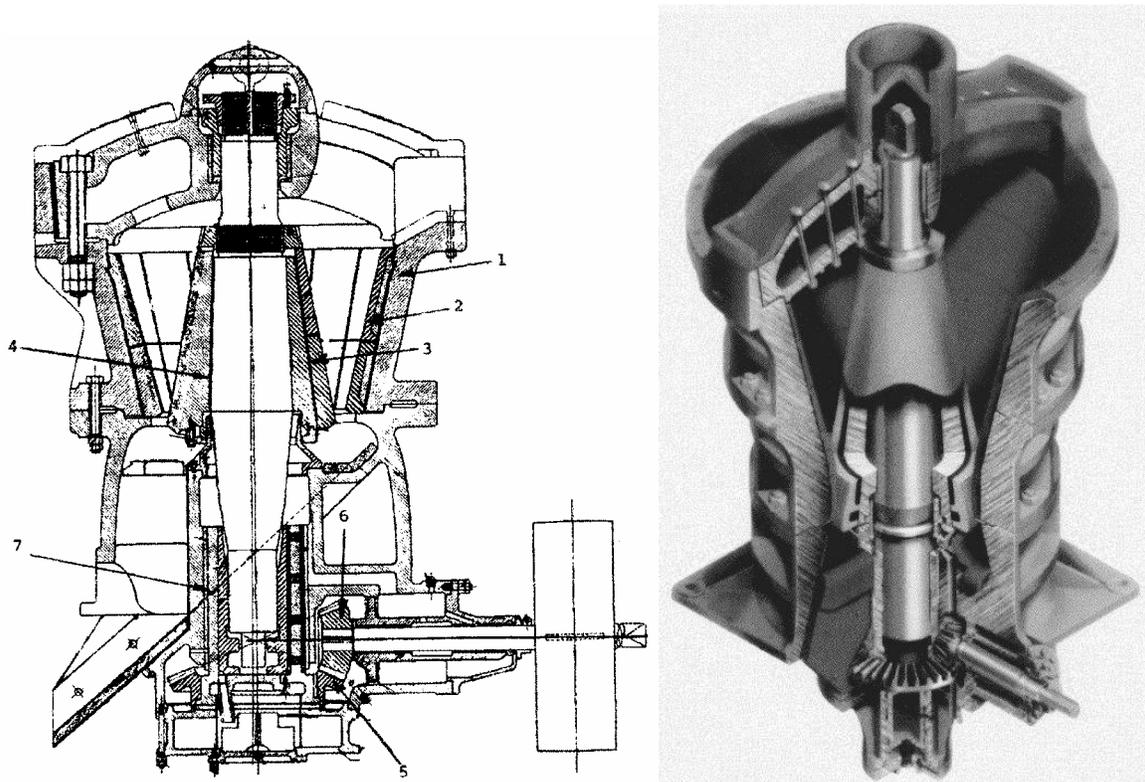


**Figura 3:** Vista general de una chancadora de mandíbulas de palanca simple.

Por otro lado, las chancadoras giratorias son usadas principalmente para chancado primario, aunque se fabrican unidades para reducción más fina que pueden usarse para chancado secundario. La chancadora giratoria, Figura 4, consiste de un largo eje vertical o árbol que tiene un elemento de molienda de acero de forma cónica, denominada cabeza el cual se asienta en un mango excéntrico. El árbol está suspendido de una araña y a medida que gira, normalmente entre 85 y 150 rpm, describe una trayectoria cónica en el interior de la cámara de chancado fija, debido a la acción giratoria de la excéntrica. Al igual que en la chancadora de mandíbula, el movimiento máximo de la cabeza ocurre cerca de la descarga. El árbol está libre para girar en torno a su eje de rotación en el mango excéntrico, de modo que durante el chancado los trozos de roca son comprimidos entre la cabeza rotatoria y los segmentos superiores del casco, y la acción abrasiva en dirección horizontal es despreciable.

En cualquier sección cuadrada de la máquina hay en efecto dos sets de mandíbulas, abriéndose y cerrándose. Debido a que la chancadora giratoria chanca durante el ciclo completo, su capacidad es mayor que la de una chancadora de mandíbulas de la misma boca y generalmente se prefiere en aquellas plantas que tratan tonelajes grandes de material (hoy existen equipos capaces de procesar hasta 20.000 tph). Las chancadoras giratorias más grandes frecuentemente trabajan sin mecanismos de alimentación y se alimentan directamente por camiones.

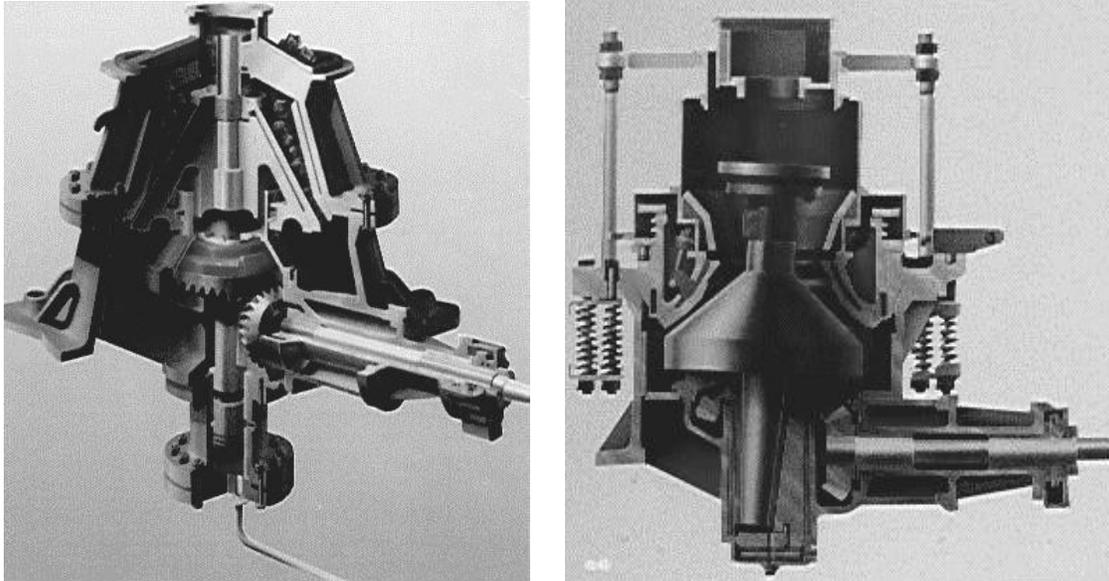
El casco exterior de la chancadora es construido de acero fundido o placa de acero soldada. El casco de chancado está protegido con revestimientos o cóncavos de acero al manganeso o de hierro fundido blanco (Ni-duro) reforzado. Los cóncavos están respaldados con algún material de relleno blando, como metal blanco, zinc o cemento plástico, el cual asegura un asiento uniforme contra la pared. La cabeza está protegida con un manto de acero al manganeso. El manto está respaldado con zinc, cemento plástico, o, más reciente, con resina epóxica. El perfil vertical con frecuencia tiene forma de campana para ayudar al chancado de material que tiene tendencia al atorado.



**Figura 4:** Sección transversal de una chancadora giratoria. (1) Bastidor principal, (2) Cóncavos, (3) Manto, (4) Eje principal, (5) Engranaje, (6) Piñón, (7) Excéntrica.

En la segunda etapa de reducción mecánica, las chancadoras secundarias son más livianas que las máquinas primarias, puesto que toman el producto chancado en la etapa primaria como alimentación, siendo el tamaño máximo normalmente menor de 6 ó 8 plg de diámetro y, puesto que todos los constituyentes dañinos que vienen en el mineral desde la mina, tales como trozos metálicos, madera, arcilla y barro han sido ya extraídos, el material es más fácil de manejar. Las chancadoras secundarias también trabajan con alimentación seca y su propósito es reducir el mineral a un tamaño adecuado para molienda o chancado terciario si es el que el material lo requiere.

Las chancadoras usadas en chancado secundario y terciario son esencialmente las mismas excepto que para chancado terciario se usa una abertura de salida menor. La chancadora de cono es una chancadora giratoria modificada. La principal diferencia es el diseño aplanado de la cámara de chancado para dar alta capacidad y alta razón de reducción del material. El objetivo es retener el material por más tiempo en la cámara de chancado para realizar mayor reducción de éste en su paso por la máquina. El eje vertical de la chancadora de cono es más corto y no está suspendido como en la giratoria sino que es soportado en un soporte universal bajo la cabeza giratoria o cono.

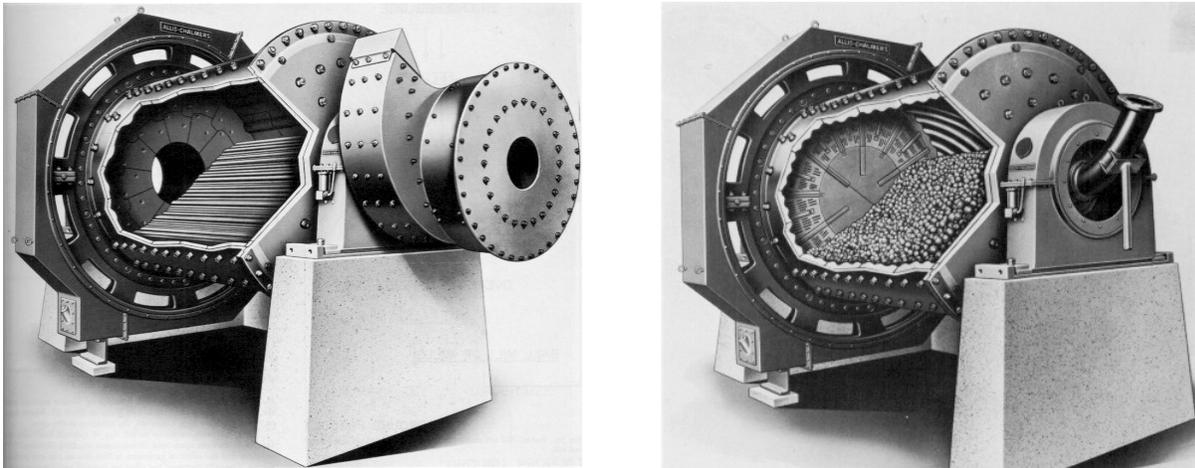


**Figura 5:** Esquema de acción de operación de un chancador de cono y corte transversal del cuerpo del chancador.

El producto final de las etapas de chancado tienen un tamaño menor a  $\frac{1}{2}$  plg. Para llegar a los tamaños indicados anteriormente, decenas de micrómetros, se realizan nuevas etapas de reducción de tamaños, denominadas molienda. La molienda se realiza habitualmente en cilindros rotatorios que contienen diferentes medios moledores en su interior, los que son levantados por la rotación del cilindro, para fracturar las partículas minerales por medio de la combinación de diferentes mecanismos de fractura, como son impacto y abrasión principalmente. Los medios de molienda pueden ser el mismo mineral (molinos autógenos), medios no metálicos naturales o manufacturados (molinos de pebbles) o medios metálicos manufacturados (molinos de barras o molinos de bolas).

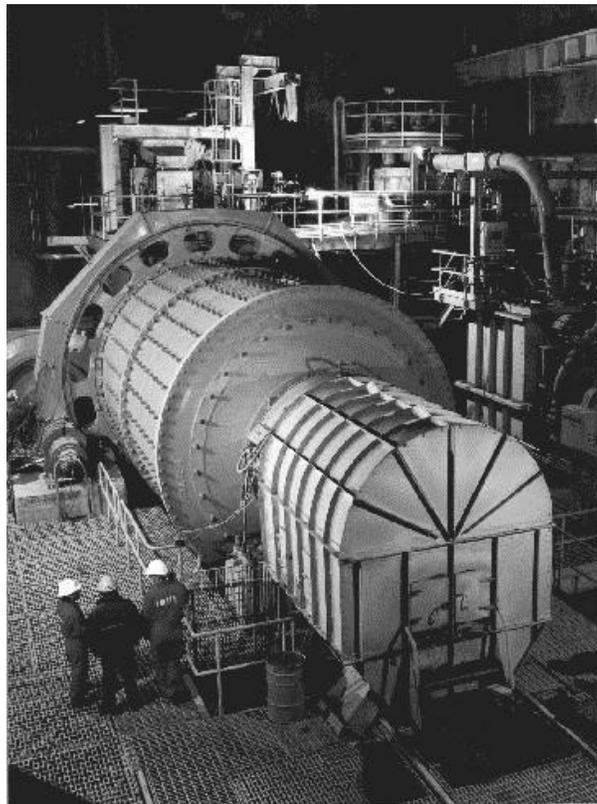
En general el término molino rotatorio incluye molinos de barras, molinos de bolas, molinos de guijarros y molinos autógenos. El molino rotatorio posee una forma cilíndrica o cónica - cilíndrica, que rota en torno a su eje horizontal. La velocidad de rotación, el tipo de revestimiento y la forma y tamaño de los medios de molienda son seleccionados para proveer las condiciones deseadas de operación para cada aplicación específica de molienda.

La alimentación al molino rotatorio se realiza a través del orificio del muñón de entrada. El método de descarga del producto varía dependiendo del diseño de la descarga del molino. El método de descarga rápida o por rebalse permite al mineral molido pasar a través del orificio del muñón de salida del molino. En un molino con parrilla de retención al interior del molino, el mineral debe ser molido a un tamaño tal que las partículas puedan pasar a través de la parrilla. En este tipo de descarga, se pueden alcanzar velocidades de descarga intermedias y/o lentas. Los molinos rotatorios convencionales (a diferencia de los molinos autógenos o semiautógenos) tienen una razón entre el largo y el diámetro del cilindro del molino, mayor a 1.5.



**Figura 6:** Vista esquemática del interior de molinos de barras y de bolas.

Por otro lado, en la molienda autógena (AG), rocas de hasta 8 plg o más son alimentadas a un molino cilíndrico, cuya característica física principal es que el diámetro es 2 a 3 veces su largo. La palabra autógena indica que la molienda ocurre debido a la propia acción de caída de las colpas minerales desde una altura cercana al diámetro del molino, es decir, no se emplea otro medio de molienda adicional que la roca misma.



**Figura 7:** Molino de bolas de División Andina de Codelco-Chile.

Por lo tanto, la carga de alimentación debe contener una fracción gruesa con la suficiente calidad y competencia como medio de molienda (dureza), para impactar y friccionar las fracciones de menor granulometría de la carga hasta reducir sus tamaños. La molienda semiautógena (SAG) es una variación del proceso de molienda autógena, es la más frecuente en la práctica y en ella se adicionan medios de molienda metálicos al molino. El nivel volumétrico de llenado de bolas varía normalmente de 4 a 14 % con respecto al volumen interno del molino. Estos molinos son de gran tamaño y alta capacidad de procesamiento (sobre 28 pies de diámetro y más de 6.000 HP de potencia instalada).

Actualmente existen 20 molinos semiautógenos en operación en el país, representando una potencia instalada total cercana a los 138,000 kW y una capacidad de tratamiento de diseño de alrededor de 367,000 t/d. A nivel mundial, los molinos más grandes en operación hoy en día son, en función de los mayores fabricantes:

- ♦ Fuller : 36 x 14 pies, con 11,900 kW de potencia
- ♦ Svedala : 40 x 20 pies, con 18,000 kW de potencia.

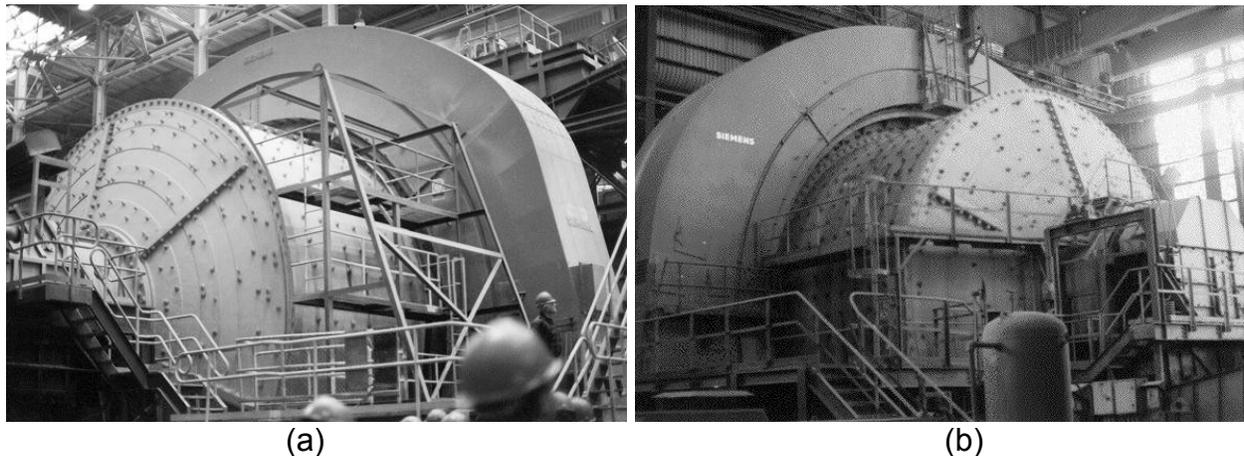
En fabricación se encuentran:

- ♦ Fuller : 36 x 17.25 pies, con 14,900 kW de potencia

Y ya se tienen diseños desarrollados para molinos:

- ♦ Fuller : 42 x 20 pies, con 25,000 kW de potencia
- ♦ Svedala : 44 x 23 pies, con 26,000 kW de potencia.

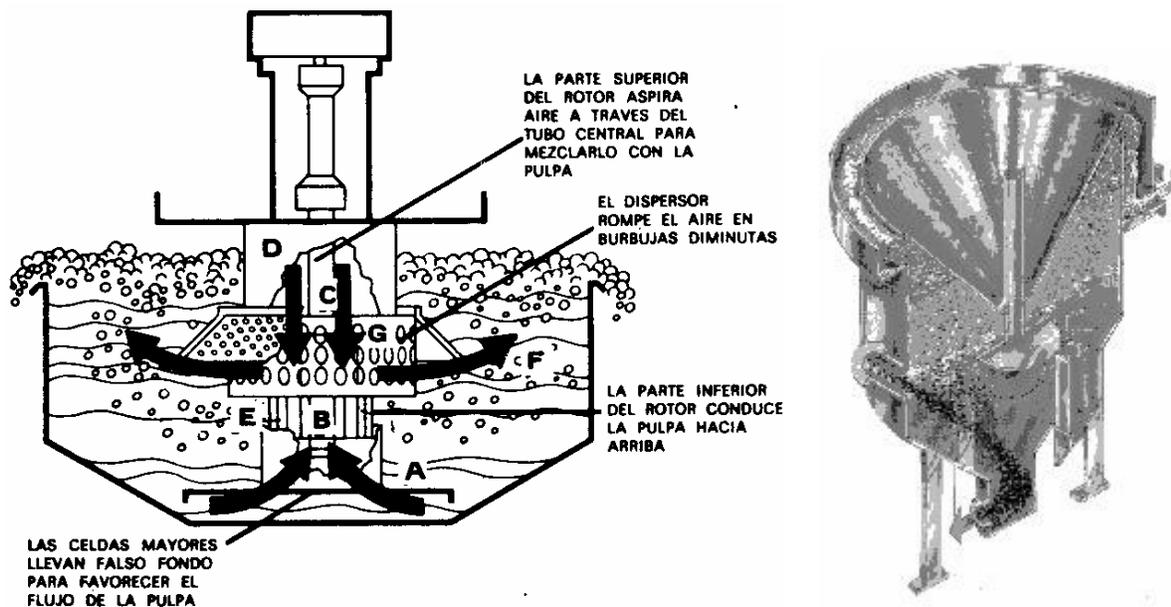
En la Figura 8 se muestran: uno de los molinos semiautógenos de División Chuquicamata de Codelco-Chile, de 32 pies de diámetro y el molino semiautógeno de División El Teniente de Codelco-Chile, de 36 pies de diámetro



**Figura 8:** (a) Molino semiautógeno de 32 pies de diámetros (9.75 m) y 17 pies de largo (5.2 m), que opera en División Chuquicamata de Codelco-Chile, con capacidad para procesar 27.500 toneladas de mineral al día. (b) Molino semiautógeno de 36 pies de diámetro (10.97 m) y 17 pies de largo (5.2 m), que opera en División El Teniente de Codelco-Chile, con capacidad para procesar 25.000 toneladas de mineral por día.

## 12.6. CONCENTRACIÓN DE MINERALES

Una vez molido el mineral, es llevado a etapas de concentración, siendo la más común para la recuperación de cobre, la flotación. Esta consiste en la separación selectiva de las partículas útiles de la ganga, aprovechando las propiedades de mojabilidad de éstas. Una partícula cuya superficie no sea mojable, se denomina hidrofóbica, y por el contrario si el agua se adhiere a su superficie, entonces es hidrofílica. Estas propiedades pueden ser naturales o inducidas a través del uso de reactivos químicos, conocidos como colectores. De esta forma, una partícula hidrofóbica que se encuentra en una mezcla de mineral con agua, será retirada de allí a través de su adhesión a una burbuja de aire, que la llevará hasta la superficie. Las máquinas de flotación (celdas de flotación) actúan bajo este principio, por lo que deben ser lo suficientemente eficientes para mantener las partículas en suspensión en la mezcla de estas con agua, y deben generar el número y tamaño de burbujas adecuado para lograr la adhesión de las partículas hidrofóbicas, levantarlas hasta la superficie y lograr su separación del resto de la masa de partículas hidrofílicas.



**Figura 9:** Cortes esquemáticos de celdas de flotación Wemco tradicional y Outokumpu SK.

Los productos de las etapas de concentración son dos: un concentrado cuya masa es mucho menor a la masa de alimentación, pero cuya ley es mayor a la ley de alimentación y un relave que contiene la mayor parte de la ganga y una pequeña fracción de especie útil. Esta última define la eficiencia del proceso, mientras menor sea, más eficiente ha sido la separación entre la especie útil y la ganga. Es lógico esperar, que no existe al día de hoy un proceso que asegure una eficiencia del 100%.