MOPE
PROCESSOS MINERAIS
Nuevas ideas para un nuevo tiempo

CONCENTRACIÓN SELECTIVA

Nueva Estrategia para Concentración de Minerales de Cobre

Febrero, 2018

Introducción

MOPE propone un cambio de foco ante las significativas pérdidas de competitividad de la minería del Cobre, que son, entre otras: disminución de leyes y de reservas; diseminación de pequeños depósitos; elevado costo de energía; falta de agua; problemas logísticos; restricciones socio-ambientales y menores precios de las *commodities*. La opción seguida en estos últimos 40 años ha sido por el gigantismo, privilegiando grandes fabricantes de equipos y agrediendo el medio ambiente con exceso de relaves.

En esta serie será discutida y cuestionada la estrategia de concentración de Cobre que se ha seguido durante estos últimos 40 años, particularmente el caso chileno. Son expuestos los problemas de hoy y proponemos una solución técnica. El diagnostico y la eventual solución que aquí indicamos, en general, es aplicable a diversos tipos de mineral, no apenas cobre, e inclusive óxidos - en lo que corresponde a fragmentación y pre-concentración a seco.

El Problema

Mediante una caracterización equivocada, soportada por criterios muy teóricos y poco representativos (como Wi, t10, P80, Ley de cabeza y otros) se ha perdido la capacidad para entender el mineral (y su ganga) que vive dentro del depósito y lo que este expresa cuando es correctamente fragmentado. Junto con eso se ha perdido el contacto entre la realidad geológica del depósito y las operaciones unitarias que son empleadas en su tratamiento.

El mineral no es tratado de la forma que él precisa. Existe el concepto equivocado de que cualquier roca que es retirada de la mina debe llegar por obligación hasta la Concentradora.

Los problemas aquí apuntados sirven para casi todos los tipos de mineral y no apenas Cobre, que sufren reducción en la Ley de cabeza y, eventualmente, aumento de dureza.

Algunas Consecuencias

En estos últimos años, con raras excepciones, se observan serios problemas en la puesta en marcha de nuevos proyectos en América Latina. Unos no alcanzan su capacidad nominal, otros con dificultades para recuperar agua de los relaves, otros con dificultades para filtrar el concentrado, otros donde el mineral resultó muy diferente de lo planificado (más pobre, más duro o más friable, con más impurezas, con arcillas en exceso, etc.). En Brasil esta situación ha sido extremamente grave, inclusive en proyectos de mineral de hierro, supuestamente la “especialidad” local.

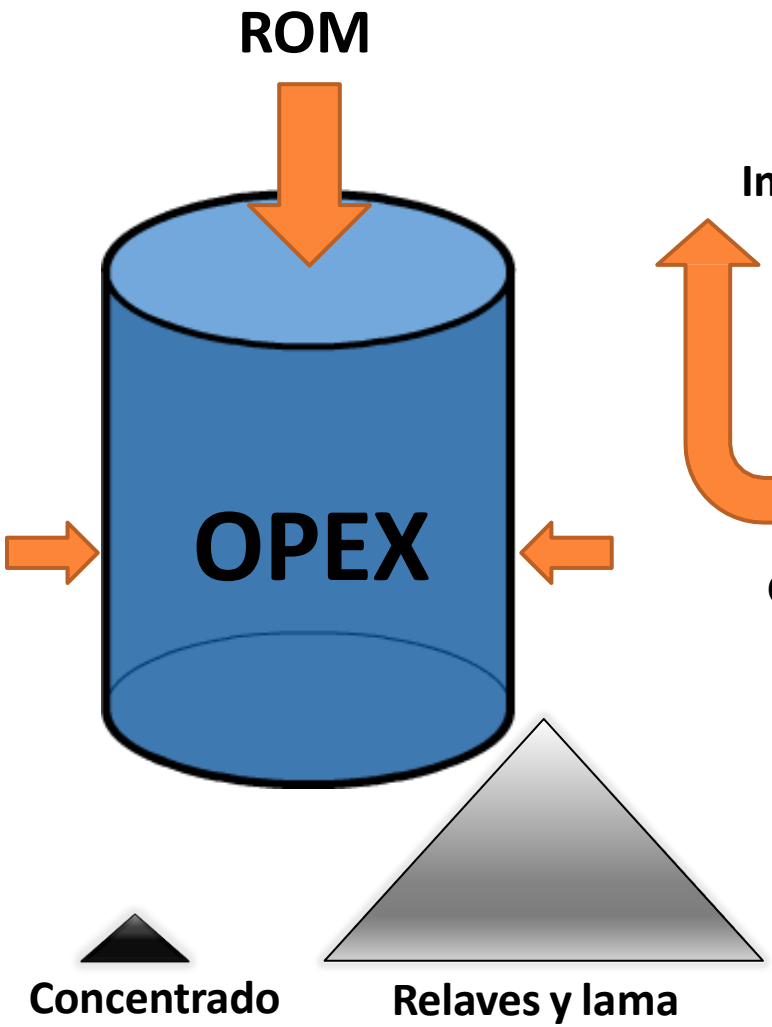
El concepto de start-up que simbolizaba el corto tiempo entre la puesta en marcha y la plena producción fue substituido, a lo largo de estos años, por el término “ramp-up”, que es en idioma inglés apenas una disculpa para la “no explicación” sobre por qué proyectos demoran meses o hasta años para operar más o menos próximos de lo que el inversionista imaginó, o fue convencido a creer.

La Fragmentación del Mineral

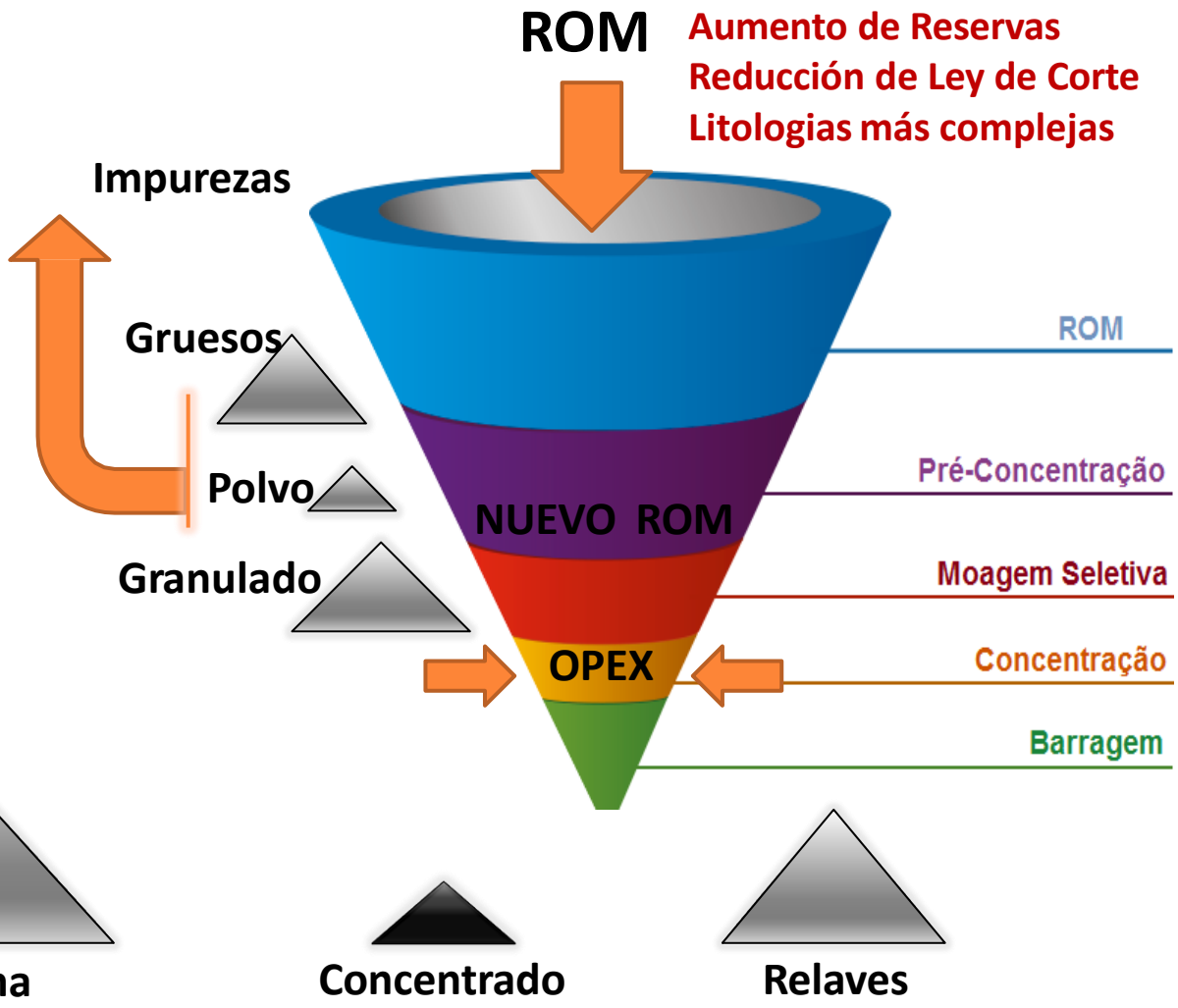
Hay diversas formas de aplicar energía para fragmentar un mineral. Cuando este es relativamente heterogéneo, la mejor fuerza a ser aplicada es el impacto. En laboratorio es usado molino de martillos y, en proyectos industriales, es recomendado el VSI, Barmac (Metso) o similar. La etapa de molienda que sigue recibe un mineral más blando, adecuado para fuerzas menos intensivas de conminución, gastando menos energía.

Muchos se sorprenderían si conociesen la potencialidad que el mineral ofrece cuando es bien fragmentado y, todavía, como son fáciles y rápidos los testes que lo comprueban. Después de una buena fragmentación existen chances de pre-concentrar el mineral, a seco, antes de seguir para la planta. Lamentablemente, esa práctica no es común.

EL CONCEPTO QUE SOPORTA LA SOLUCIÓN



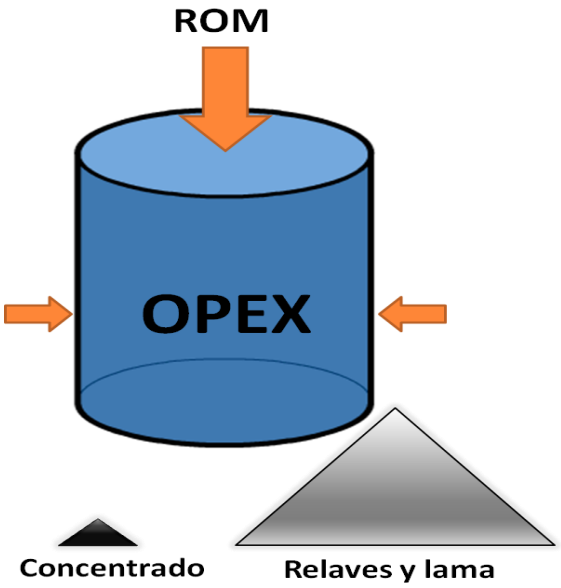
PROCESO ACTUAL



CONCENTRACIÓN SELECTIVA

Conminución Equivocada

La estrategia “de moler todo y flotar todo” (y todavía con tecnología SAG - el caballo de Troya de los fabricantes dentro de la minería) está llegando a su límite, pues este camino no consigue contrarrestar la reducción implacable de las leyes de Cobre en los diversos depósitos, a través del tiempo, y el aumento del precio de la energía. Eso vale para toda la minería.

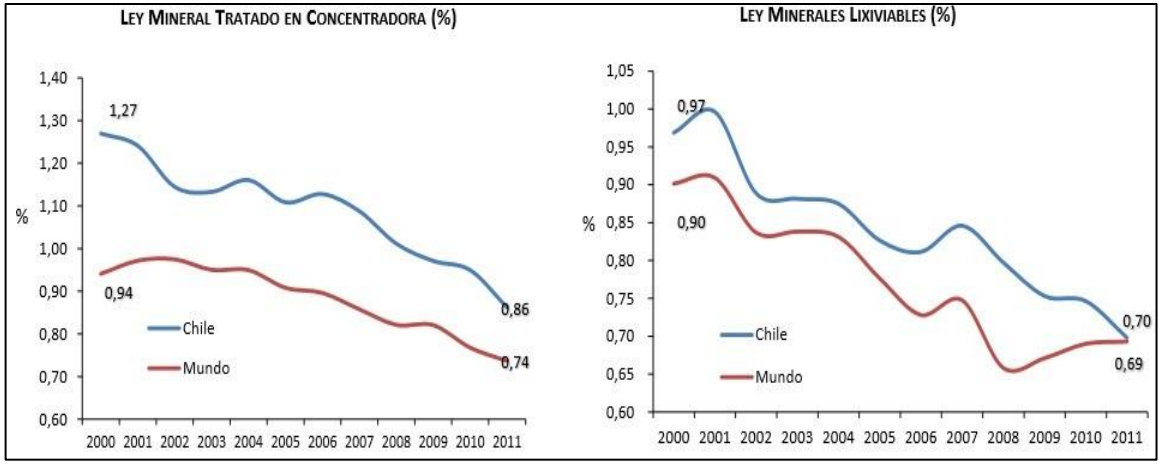


En operaciones corrientes el molino SAG puede ser adaptado para molienda pre-primaria

La Caída Vertiginosa de las Leyes de Cobre

Una menor ley ha obligado a las compañías que operan en Chile a destinar una mayor cantidad de recursos para mantener los niveles de productividad de los yacimientos, con una ley mucho más baja. Desde 1992 las leyes del metal rojo disminuyeron en 46%, pasando de 1,61% a 0,87%. Esta cifra se compara desfavorablemente con la reducción de 23% que anotó el indicador en el resto del mundo, tras pasar de 1,45% a 1,12%. La Comisión Chilena del Cobre confirma esta tendencia en diciembre de 2012, como ilustrado abajo para el periodo 2000/2011.

El principal yacimiento de BHP en Chile y también mayor productor del mundo, Escondida, ha visto disminuir de 3% a 1,2% su ley de cobre desde que inició sus operaciones



Cochilco, Minería y Productividad, Diciembre 2012

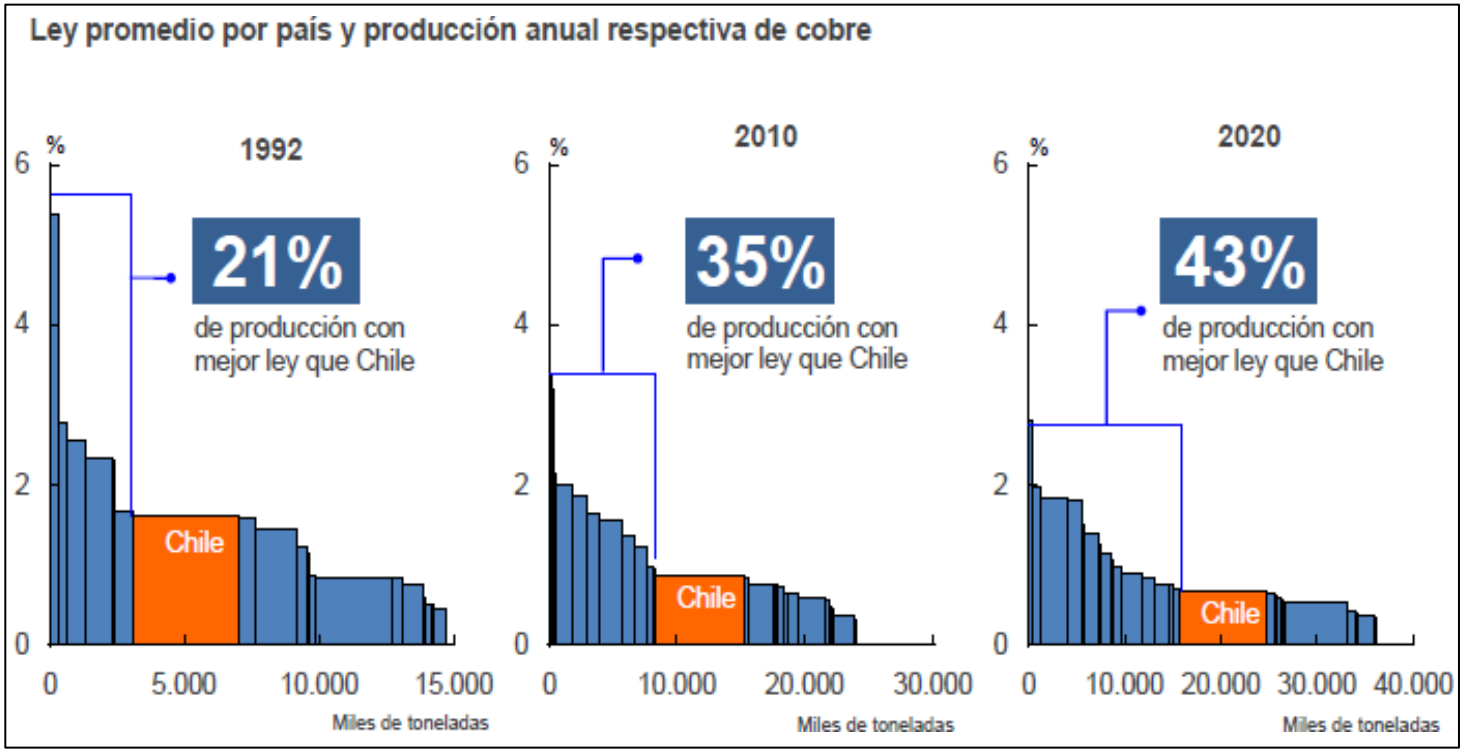
Pérdida de Competitividad de la Minería Chilena

Por causa de la caída más acentuada en sus leyes de cobre, las mineras chilenas, a partir de 2009, quedaron menos competitivas que sus concurrentes, en el resto del mundo, como afirma el Consejo Minero. Chile está saliendo del cuartil de las más eficientes.

Consejo Minero, Competitividad y Productividad, Agosto 2013

Pérdida de Competitividad de la Minería Chilena (cont.)

Lo anterior es ratificado por la Comisión Chilena del Cobre (Cochilco). Chile no está más entre los productores eficiente de Cobre, siendo superado por la media mundial, y la tendencia es de empeorar dramáticamente.

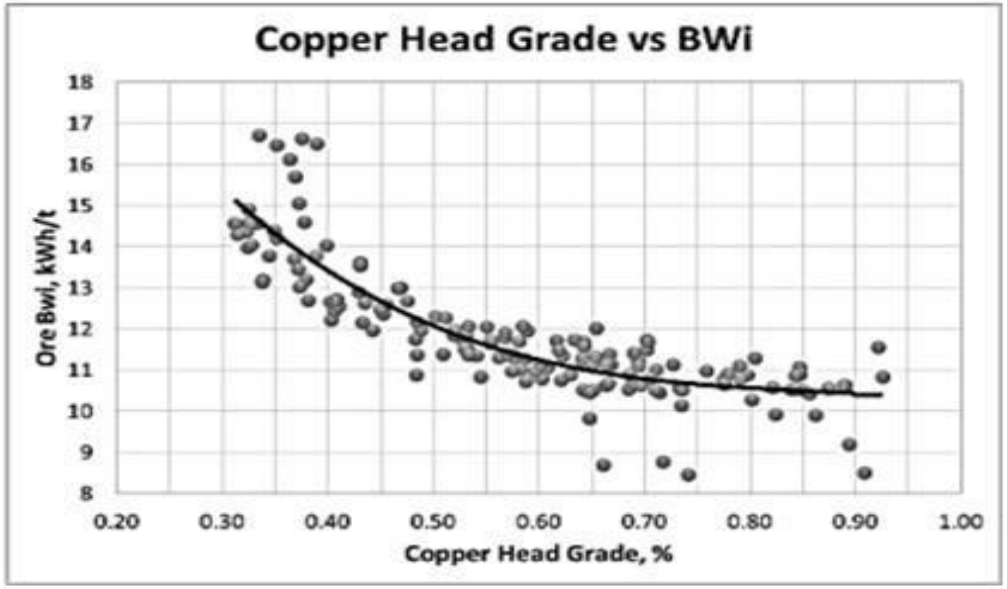


Consejo Minero, Competitividad y Productividad, Agosto 2013

Cae la Ley y Suben los Costos

Junto con la caída vertiginosa de la ley de Cobre, para mayor desgracia, aumenta junto con eso la dureza del mineral y, por lo tanto, el consumo de energía. La dramática reducción de la ley de Cobre no trae apenas aumento de costo en forma inversamente proporcional, mas aumenta también el costo operacional directo de la concentradora, por tonelada tratada.

.



SAG CONFERENCE VANCOUVER 2015

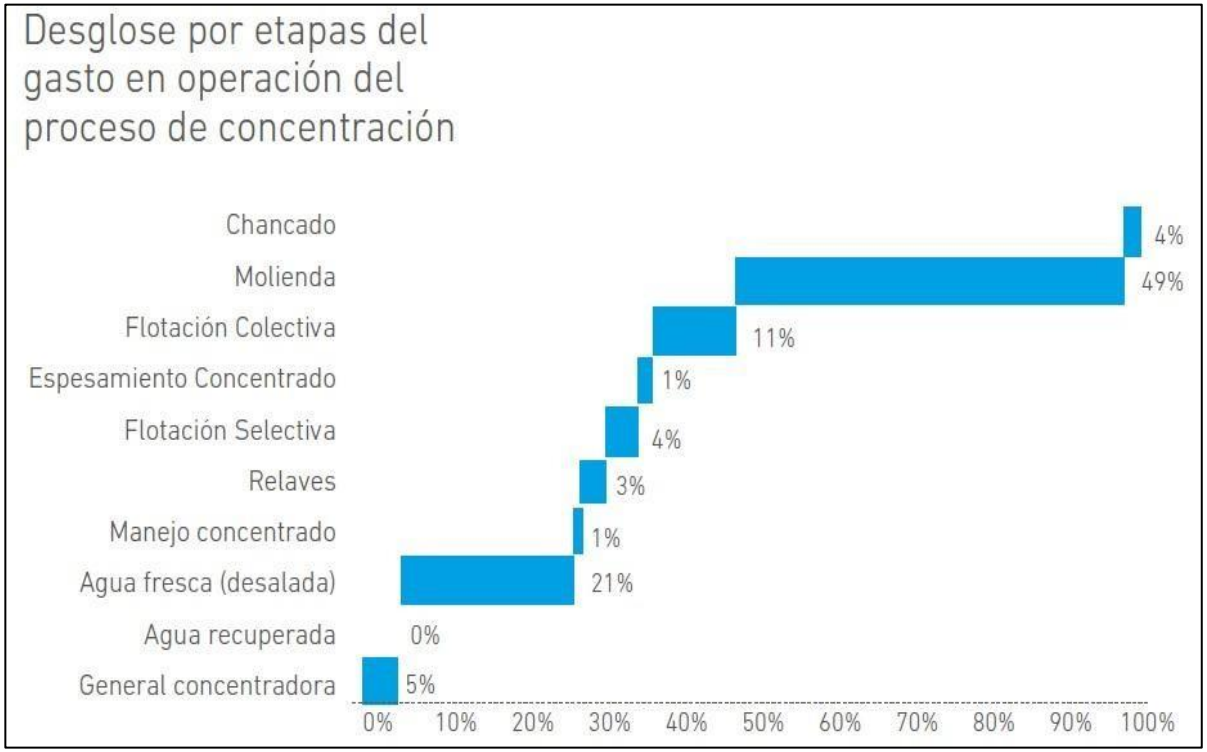
BATU HIJAU MILL THROUGHPUT OPTIMIZATION: MILLING CIRCUIT CONFIGURATION STRATEGY BASED ON ORE CHARACTERIZATION

*F. Wirfiyata, and A. Maclean, G. Khomaeni

Costos de Producción Concentradoras Chile

Estudio reciente coordinado por la Fundación Chile (Roadmap Tecnológico 2015-2035) muestra que la etapa de molienda consume casi la mitad de los costos de una concentradora de sulfuros de cobre.

.

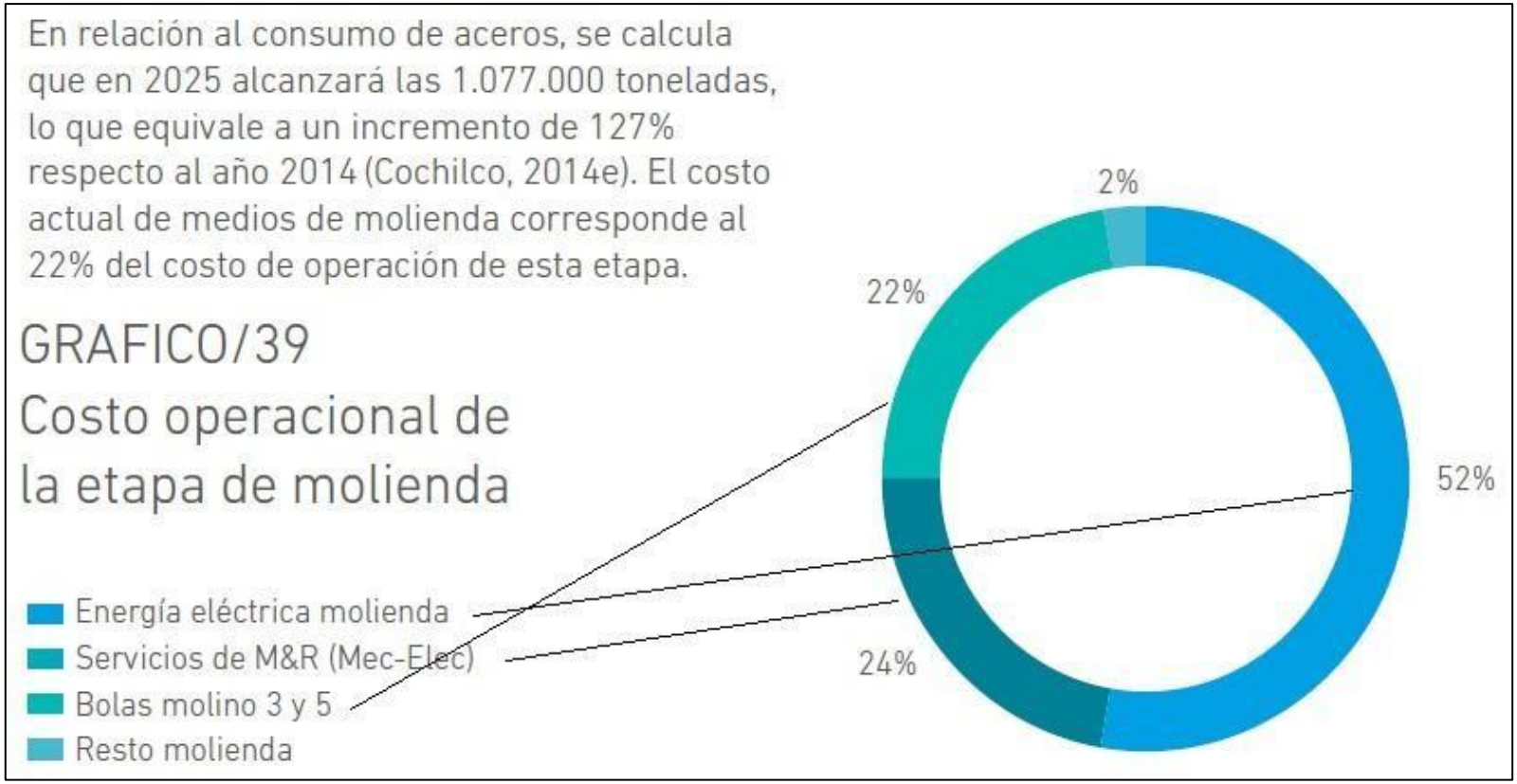


Fundación Chile, Roadmap Tecnológico para 2015-2035

Se observa la mejor opción de profundizar en el chancado (fragmentación selectiva), reducir drásticamente el costo de molienda y, principalmente, reducir la masa tratada (con mayor ley) produciendo una caída radical en el costo operacional.

Costos de Producción Concentradoras Chile (Cont.)

Por su parte, el principal costo de molienda está en el consumo de energía eléctrica, justamente por causa de la equivocada utilización de molienda SAG.



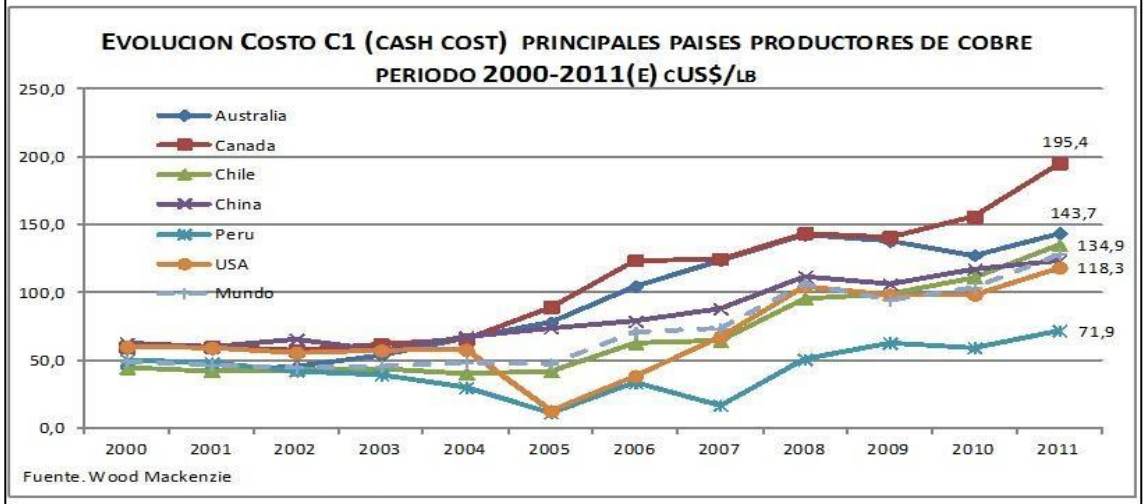
Fundación Chile, Roadmap Tecnológico para 2015-2035

Costos de Producción Concentradoras Chile (Cont.)

Llevando en cuenta todo lo anterior (menores leyes, mayor consumo y precio de la energía - en parte por cuenta de la mayor dureza derivada de las menores leyes) los costos operacionales de base (llamados C1), aumentaron tres veces en apenas 10 años, para el caso Chileno.

EVOLUCION COSTO C1 (CASH COST) PRINCIPALES PAISES PRODUCTORES DE COBRE
cUS$/Lb

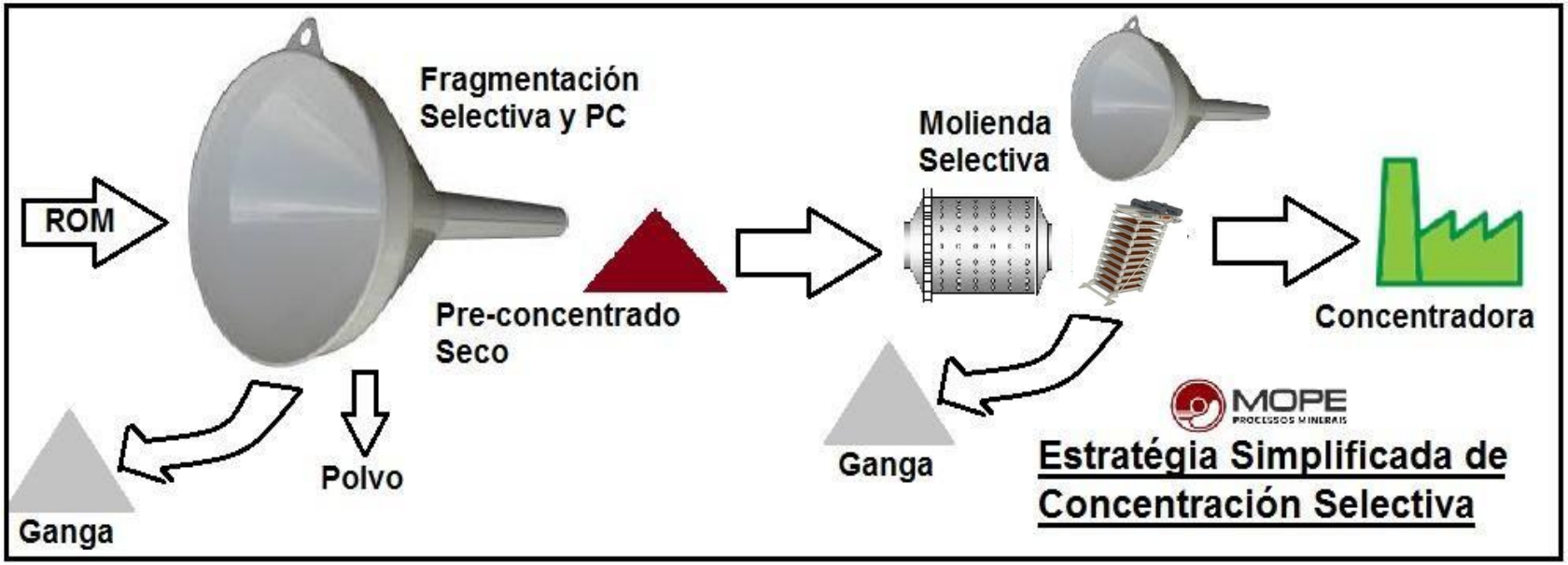
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Australia	44,9	41,9	45,7	53,6	66,0	78,0	104,6	123,7	142,7	137,7	127,5	143,7
Canada	60,0	60,2	57,3	61,8	65,8	89,4	123,9	124,9	143,9	140,8	155,7	195,4
Chile	44,5	42,2	42,9	43,7	40,4	42,1	62,8	64,3	95,7	98,6	111,2	134,9
China	62,8	60,5	65,6	57,0	67,5	74,0	78,8	88,0	111,9	106,4	117,3	123,6
Peru	50,5	48,2	42,3	39,3	30,0	11,4	33,5	17,0	50,7	62,9	59,3	71,9
USA	60,1	59,1	55,8	57,4	58,0	12,7	38,6	67,4	104,6	98,4	98,5	118,3
Mundo	49,3	46,6	44,7	45,6	48,4	47,3	70,8	73,6	106,6	94,5	103,6	128,4



En base a Información de Wood Mackenzie

La Concentración Selectiva

En Chile, lamentablemente, los laboratorios metalúrgicos y consultoras están dirigidos a estudios de conminución pensando en minerales homogéneos, donde equivocadamente se supone que cualquier fragmento posee idéntica composición que la roca original. MOPE estableció convenios con laboratorios y plantas piloto, en Chile y Brasil para estudiar la aplicación de este nuevo abordaje para cualquier tipo de mineral. .



Comenzando con una buena Fragmentación

Mineral de Cobre fue fragmentado en chancador de mandíbulas para observar la distribución metálica por faja granulométrica (XXIII ENTMME, Brasil, 2009).

Después de chancado finamente se observa que arriba de 1,4 mm casi 1/3 de la masa contiene apenas 10,58% del cobre total. Si el mineral tuviese 0,86%Cu, el pasante en 1,4 mm tendría 1,15%Cu. El retenido quedaría con 0,28%Cu, probablemente más bajo que la ley de corte en la mina. El embalse de relaves caería para 1/3 de su tamaño, (faltando todavía la molienda selectiva).

Un chancador de impacto maximizaría la separación (fragmentación selectiva), reduciendo el contenido de cobre en la masa descartada

Peneira (mm)	Retido (%)	Distr. Cu (%)	Distr. Cu / Distr. Granul.
2,000	9,39	**1,75**	**0,19**
1,400	23,55	**8,84**	**0,38**
0,850	20,62	**15,89**	**0,77**
0,710	4,13	**4,31**	**1,04**
0,500	8,28	**8,71**	**1,05**
0,355	6,28	**8,03**	**1,28**
0,210	8,35	**11,42**	**1,37**
0,150	5,02	**7,68**	**1,53**
0,105	3,85	**5,16**	**1,34**
0,074	2,66	**6,45**	**2,43**
0,053	1,21	**3,84**	**3,17**
-0,053	6,65	**17,92**	**2,69**

Fragmentación Selectiva

Las operaciones de chancado pueden ser más o menos selectivas dependiendo de la fuerza utilizada. El HPGR aplica elevada presión para toda la roca, “buscando un F80 específico”, ignorando la selectividad en la fragmentación. En chancadoras de mandíbulas y de cono, la fuerza es aplicada de forma más aleatoria (sin presión localizada), apenas para “reducir de tamaño”.

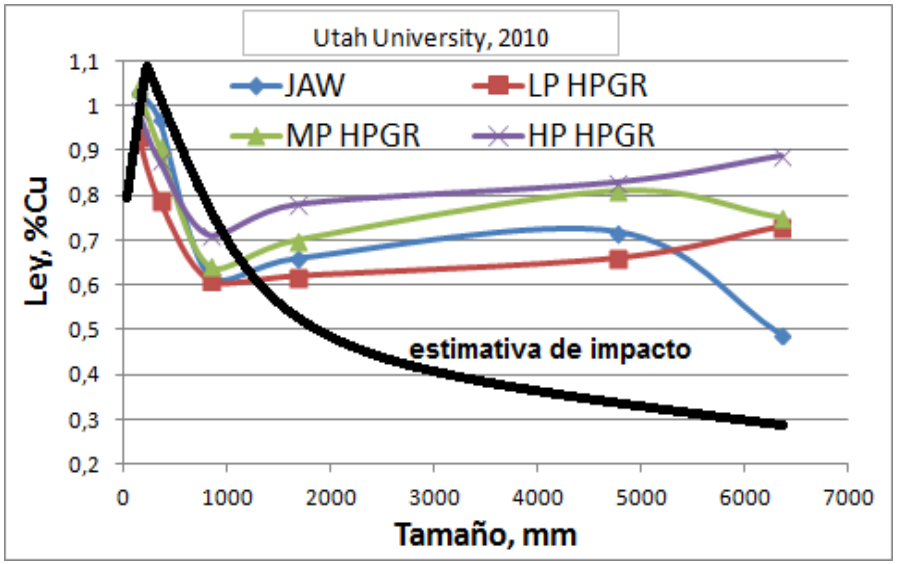
Ya un chancador de impacto es extremamente selectivo, aplicando la acción de conminución en función de la característica específica (tamaño de grano, densidad y dureza relativa) de cada uno de los diversos componentes de la roca, con el objetivo de “liberar” el mineral de interés.

La acción de impacto es como extraer los granos de maní sin quebrarlos desnecesariamente. La fragmentación selectiva libera adecuadamente la ganga del mineral de interés, con el máximo P80 posible.

Fragmentación Selectiva de Mineral de Cobre

Estudios de fragmentación con HPGR en tres presiones diferentes y en chancador de mandíbulas (Universidad de Utah, 2010) muestran que la selectividad de la fragmentación disminuye junto con el aumento de presión, o sea, en la medida en que el material es tratado de forma más homogénea.

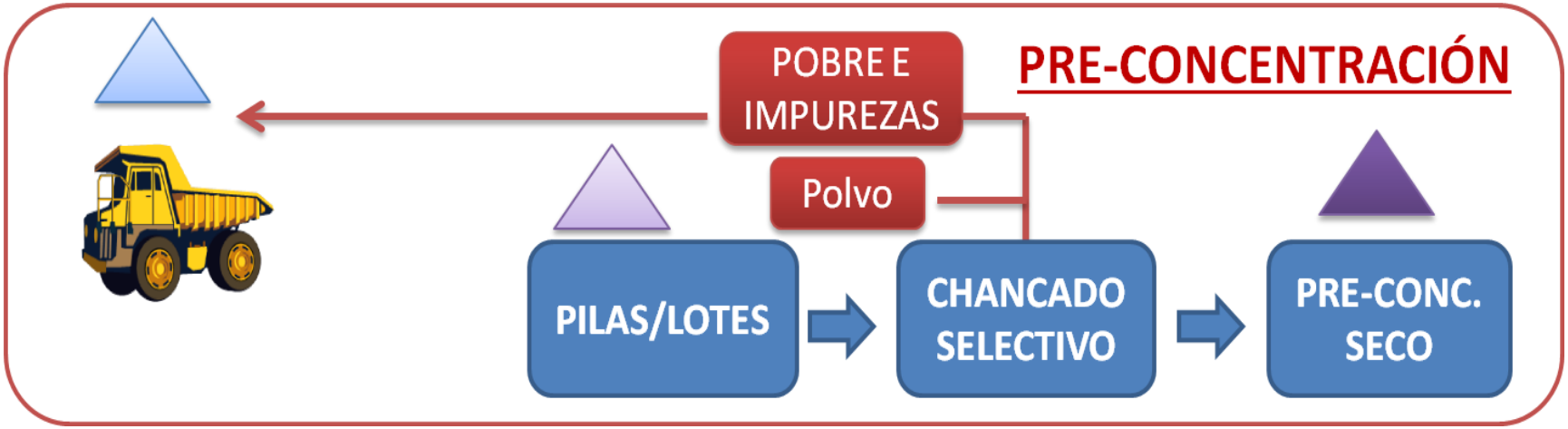
Size	%Cu, Head Grade From Copper Sulfide			
	Jaw	Low Pressure HPGR	Medium Pressure HPGR	High Pressure HPGR
+1/4"	0.49	0.73	0.75	0.89
1/4 x 4M	0.72	0.66	0.81	0.83
4 x 10M	0.66	0.62	0.7	0.78
10 x 20M	0.62	0.61	0.64	0.71
20 x 40M	0.97	0.79	0.91	0.88
40 x 100M	1.03	0.93	1.04	0.99



En línea negra se ilustra el efecto que causaría un chancador de impacto en la distribución de la ley de cobre por tamaño. En cuanto más heterogéneo el mineral más masa podría ser retirada y devuelta para la mina, inclusive con menor %Cu que la ley de corte de la mina, evitando su transporte para la concentradora y “enriqueciendo” el nuevo ROM

Fragmentación Selectiva de Mineral de Cobre

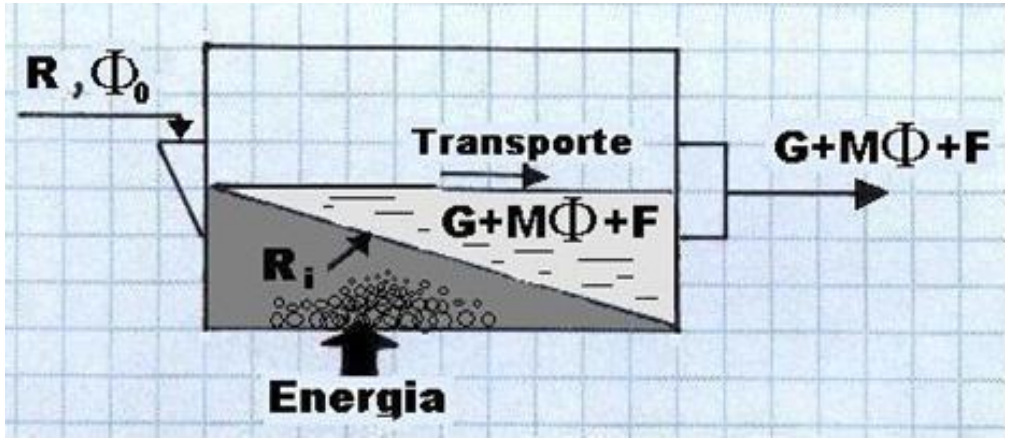
Por ejemplo, es posible que después del chancado fino (preferencialmente por impacto) pueda ser descartado material grosero y el polvo. Normalmente, el polvo trae consigo una elevada ley de impurezas y, al mismo tiempo que complica las operaciones de concentración (al convertirse en lama), crea dificultades de desaguado y recuperación de agua..



La planta de chancado fino (etapa terciaria con chancador de impacto), genera un pre-concentrado, pronto para alimentar la planta de molienda y concentración

MOLIENDA SELECTIVA

El próprio mineral ayuda a comandar su conminución exteriorizando peculiaridades junto con la liberación de los minerales insertos en la roca, y esas peculiaridades deben ser aprovechadas en beneficio de la selectividad y de los menores costos.



Del libro: "Engenharia da Cominuição e Moagem em Moinhos Tubulares" (A. Yovanovic, Brasil, 2006)

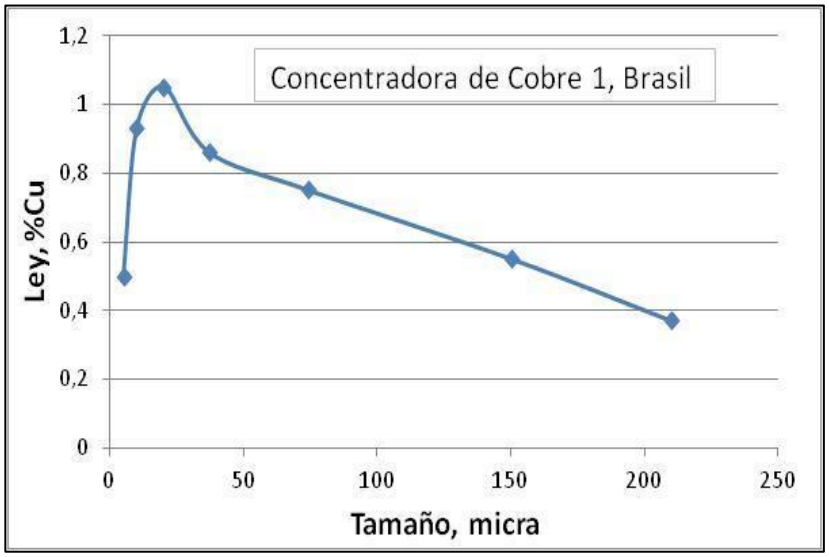
CONCEPTO

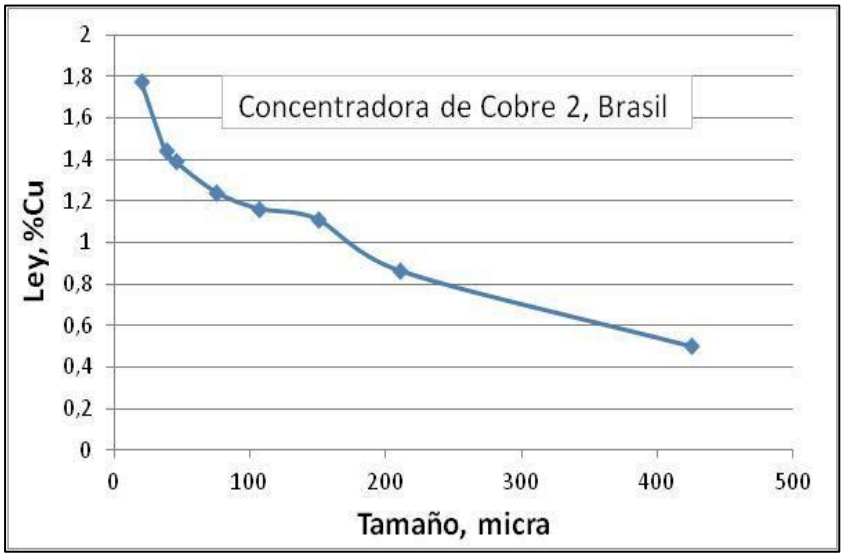
Dentro del molino, sedimentanlas partículas mayores y/o más pesadas, siendo molidas preferencialmente, o sea, en forma "selectiva".

Mineral	Gravidade Específica
Ganga	2,8
Willemita	3,9 – 4,2
Hematita/Goethita	5,3
Sulfetos*	5,0 – 7,0

Selectividad en Operaciones de Molienda

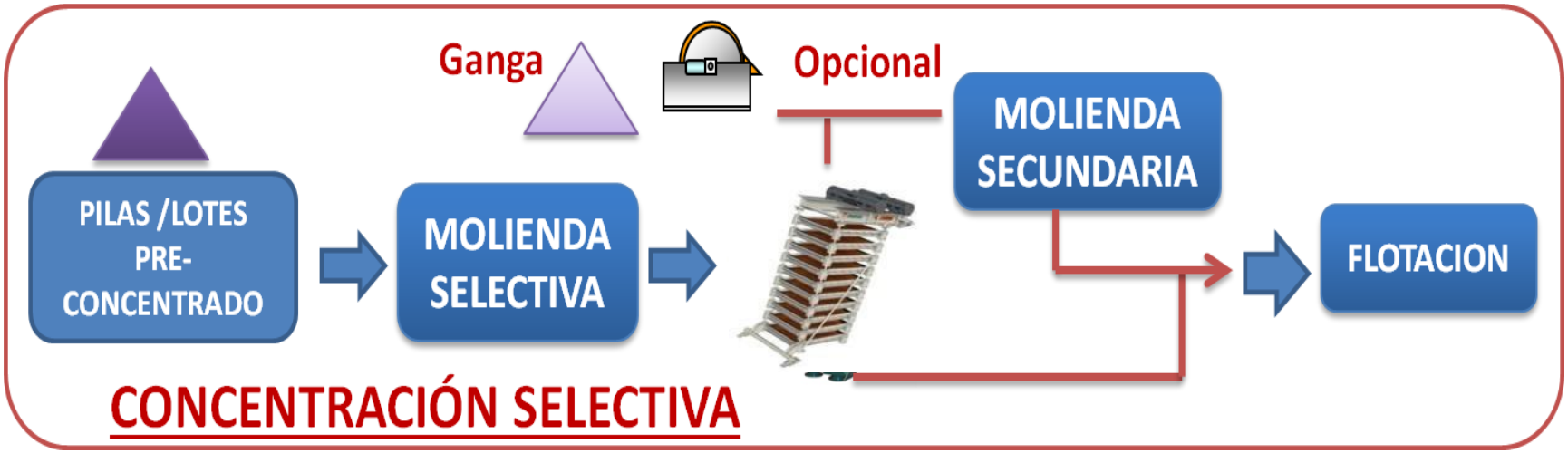
Mismo en una molienda convencional (molino de bolas en circuito cerrado con hidrociclones) ya existe una significativa selectividad en el producto molido, como los ejemplos ilustrados abajo para la alimentación a flotación en dos grandes productoras de Cobre en Brasil. Esta selectividad puede ser significativamente mejorada con técnicas de molienda selectiva.





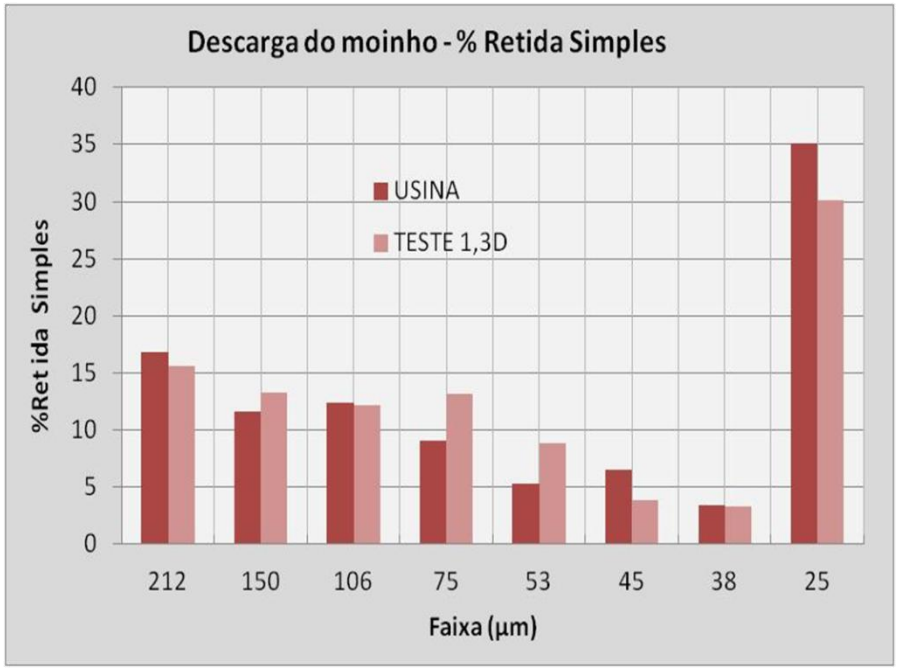
Selectividad en Operaciones de Molienda

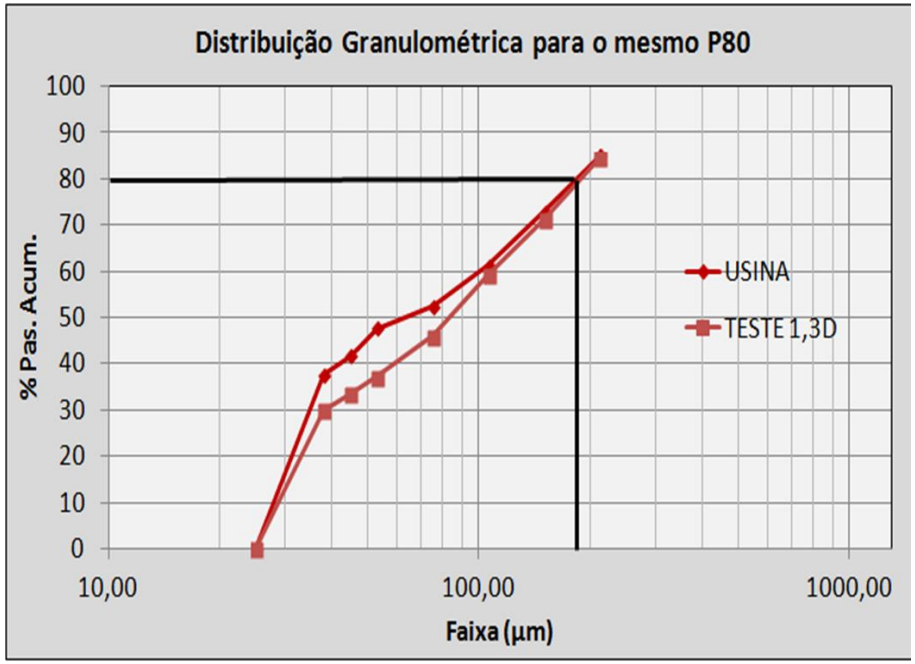
La planta de molienda y concentración podría ser de menor tamaño y con elevada tasa de productividad; El molino SAG, en plantas existentes, podría ser adaptado para operar como molienda pre-primaria.



Habría bajo consumo de agua (menor que en la molienda convencional en circuito cerrado) y menor generación de relaves ultra finos, que mejoraría las tasas de sedimentación de relaves y de filtrado del concentrado, al reducir la súper molienda

Molienda Selectiva Mineral de Cobre, 2013





La molienda selectiva es más eficiente en los tamaños intermediarios, reduciendo la proporción de material grosero y, también, generando menos ultra finos.

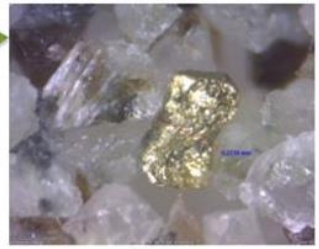
Molienda Selectiva Mineral de Cobre, 2013 (cont.)

Análise de Liberação (Descarga do Moinho)			
microns	mesh	Usina	1,3D
µm	#	P80 195 µm	P80 191 µm
595	28	40,76	15,63
420	35		
300	48		(7,26)
210	65	(20,24)	
150	100		84,37
105	150		
74	200	59,24	
53	270		
44	325	(79,76)	(92,74)
37	400		
22	-400		

Análise de liberação (descarga do moinho)		
microns	mesh	1,3D
µm	#	P80 191 µm
595	28	15,63
420	35	
300	48	(7,26)
210	65	
150	100	84,37
105	150	
74	200	
53	270	
44	325	(92,74)
37	400	
22	-400	

Sem Parênteses	% Massa
Entre Parênteses	%Cobre Acumulado

300 µm



150 µm

En la molienda selectiva, la liberación de sulfuros empieza a ocurrir en tamaño más grosero que lo observado en planta, con molienda en circuito cerrado.

Para el mismo P80, la molienda selectiva permite que 84,37% de la masa esté pronta para flotar en condiciones aceptables de liberación, contra apenas 59,24% de masa generada por la actual forma convencional de molienda.

Molienda Selectiva Mineral de Cobre, 2013 (cont.)

El concentrado de flotación Rougher era de 8 a 10%Cu y fue para más de 20%Cu en el test de flotación. Esa situación fue comprobada en la planta, al abrir uno de los circuitos de molienda.

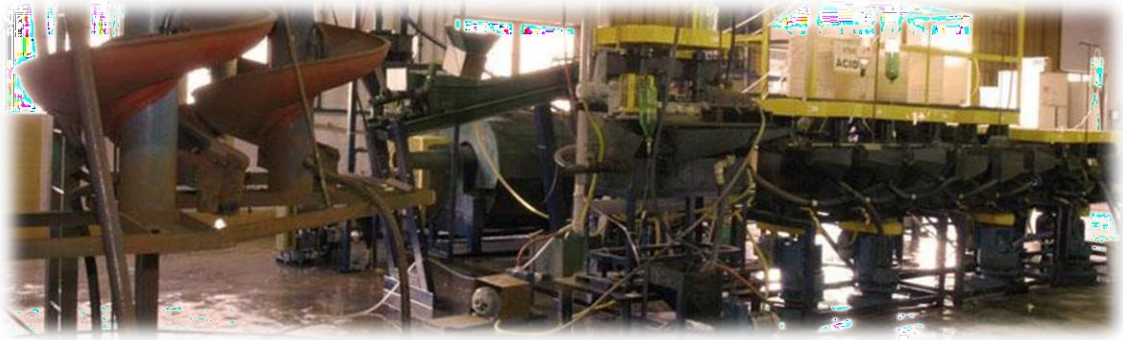
La molienda selectiva "muele" menos, mas libera más, lo que permite mejorar la selectividad de la flotación y la recuperación general de la concentradora.

TEST INDUSTRIAL 2013			
CIRCUITO	% Bolas	P80, µm	%Cu Colas
CERRADO	35	196	0, 169
ABIERTO	**25**	**252**	**0,141**
ABIERTO	**25**	**287**	**0,144**
ABIERTO	25	370	0,207

Moler menos es más!

MOPE – SOPORTE EXPERIMENTAL

MOPE define las necesidades de testes metalúrgicos, establece procedimientos, acompaña y evalúa los trabajos experimentales necesarios para el soporte de los proyectos que idealiza. Contamos con laboratorios asociados en Chile y Brasil.



SOPORTE EXPERIMENTAL

MOPE acompaña, con microscopia digital y mirada de “ingeniería de procesos” la liberación y tamaño de granos de los minerales de interés y de la ganga.

MOPE – TESTES DE CONCENTRACIÓN SELECTIVA

Fragmentación Selectiva y caracterización

Cobber Magnético a seco

Respetando y explorando la heterogeneidad del mineral

Algunas opciones de concentración

Retenido

Molienda Selectiva

Harneado HF

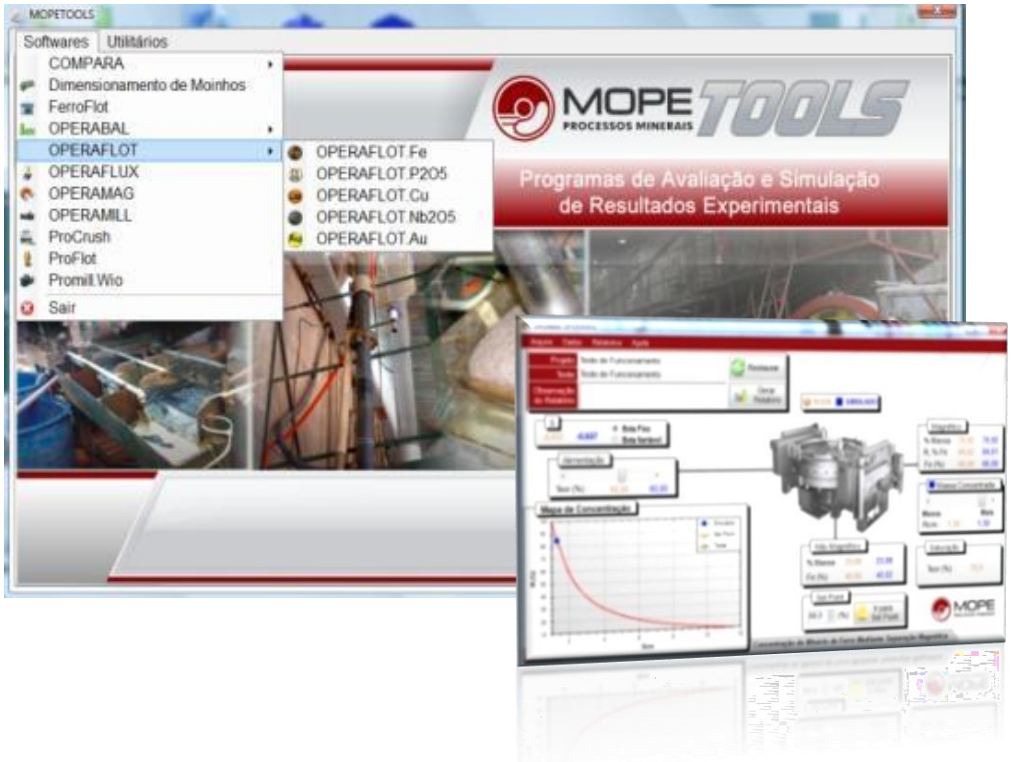
Pasante

MOPE – HERRAMIENTAS DE CÁLCULO

MOPE, con base en el MODELO OPERACIONAL de su autoría, desarrolló modelos y posee herramientas para el escalonamiento industrial de los resultados experimentales obtenidos para diversas operaciones unitarias, con fines de proyecto. También, MOPE simula equipos en operación, inclusive con herramientas avanzadas de control online.

HERRAMIENTAS DE CÁLCULO

MOPETOOLS es una caja de herramientas de uso interno, todas desarrolladas con base en el **modelo operacional**, para cálculos y simulaciones de diversas operaciones unitarias.



RESUMEN DE LA NUEVA ESTRATEGIA

Testes de fragmentación selectiva

Testes de molienda selectiva y pre-concentración

Mejor ruta de procesos. Optimización de concentradoras

Circuitos Abiertos Harneros HF en vez de ciclones

PRE-CONCENTRACIÓN

MINA

- Más Reservas;
- Pit optimizado;
- Menor relación E/M;
- Flexibilidad operacional.

PLANTA

- Menor tamaño (< CAPEX);
- Menor tasa (t/h);
- Mineral más rico y blando*;
- Alimentación estable;
- Reducción radical de OPEX.

RELAVES

- Menos Relaves finos;
- Menores problemas ambientales.

** Por causa de la fragmentación selectiva*

Mejor desempeño, con mínimos CAPEX, OPEX y menores riesgos ambientales

MOPE
PROCESSOS MINERAIS

Rua Califórnia, 281/103 – Bairro Sion
Belo Horizonte, Minas Gerais
CEP 30315-500
+55 31 3285-3923
contato@modelooperacional.com.br

Alexis Yovanovic | Diretor
+55 (31) 3285 3923 +55 (31) 98474 3655
ayovanovic@modelooperacional.com.br
www.modelooperacional.com.br
skype:apyovanovic