MOPE
PROCESSOS MINERAIS
Novas ideias para um novo tempo

CONCENTRAÇÃO SELETIVA

Nova Estratégia para Concentração de Minérios de Cobre

Fevereiro, 2018

Introdução

MOPE propõe uma mudança de foco perante as significativas perdas de competitividade da mineração do Cobre, que são, dentre outras: diminuição de teores y de reservas; disseminação de pequenos depósitos; elevado custo de energia; falta de água; problemas logísticos; restrições socioambientais e menores preços das *commodities*. A opção seguida nestes últimos 40 anos tem sido pelo gigantismo, privilegiando grandes fabricantes de equipamentos e agredindo o meio ambiente com excesso de rejeitos.

Nesta apresentação é discutida e questionada a estratégia de concentração de Cobre que tem-se seguido durante estes últimos 40 anos, particularmente no caso chileno. São expostos os problemas de hoje e propomos uma solução técnica. O diagnostico e a eventual solução que aqui indicamos, em geral, é aplicável a diversos tipos de minério, não apenas cobre, e inclusive óxidos – no que corresponde à fragmentação e pré-concentração a seco.

O Problema

Mediante uma equivocada caracterização, suportada por critérios muito teóricos e pouco representativos (como Wi, t10, P80, teor de cabeça e outros) tem-se perdido a capacidade para entender o minério (e a sua ganga) que vive dentro do depósito e o que este expressa quando é corretamente fragmentado. Junto com isso tem-se perdido o contato entre a realidade geológica do depósito e as operações unitárias que são utilizadas no seu tratamento.

O minério não é tratado da forma que ele precisa. Existe o conceito equivocado de que qualquer rocha que é retirada da mina deve chegar por obrigação até a Concentradora.

Os problemas aqui apontados servem para quase todos os tipos de minério e não apenas Cobre, que sofrem redução no Teor de cabeça e, eventualmente, aumento de dureza.

Algumas Consequências

Nestes últimos anos, com raras exceções, se observam sérios problemas na posta em marcha de novos projetos na América Latina. Uns não atingem a sua capacidade nominal, outros com dificuldades para recuperar água dos rejeitos, outros com dificuldades para filtrar o concentrado, outros onde o minério resultou muito diferente do planejado (mais pobre, mais duro ou mais friável, com mais impurezas, com argilas em excesso, etc.). No Brasil esta situação tem sido extremamente grave, inclusive em projetos de minério de ferro, supostamente a “especialidade” local.

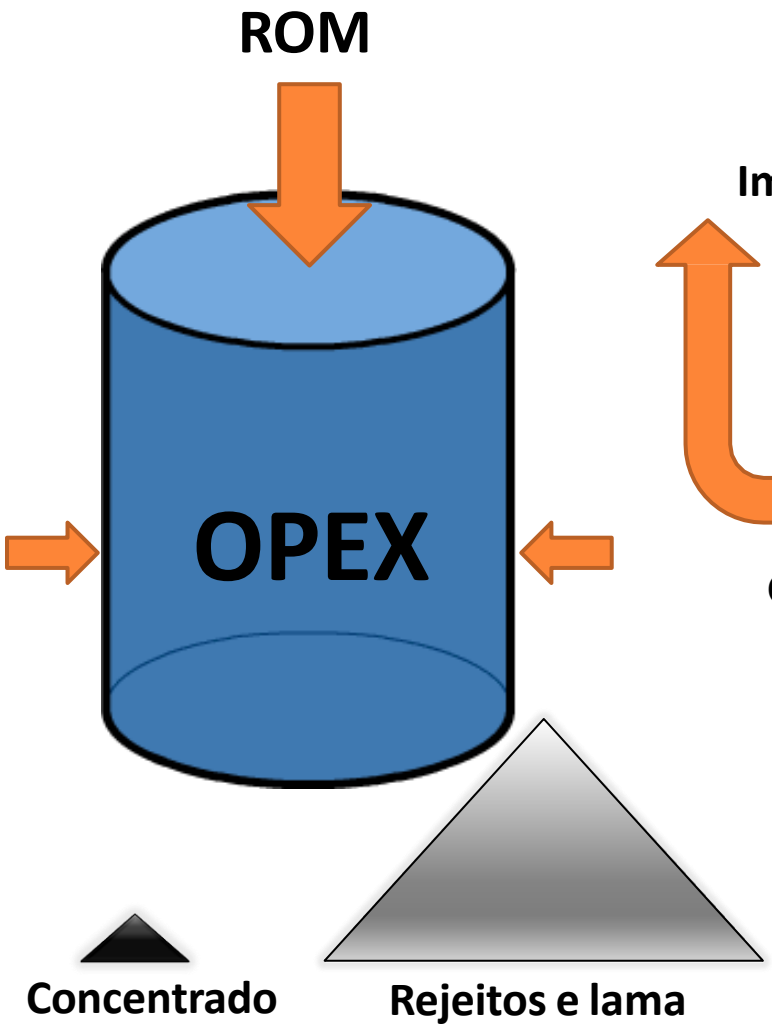
O conceito de startup que simbolizava o curto tempo entre a posta em marcha e a plena produção foi substituído, ao longo destes anos, pelo termo “ramp-up”, que é, no idioma inglês, apenas uma desculpa para a “não explicação” sobre por que projetos demoram meses ou até anos para operar mais ou menos próximos do que o investidor imaginou, ou foi convencido a acreditar.

A Fragmentação do Minério

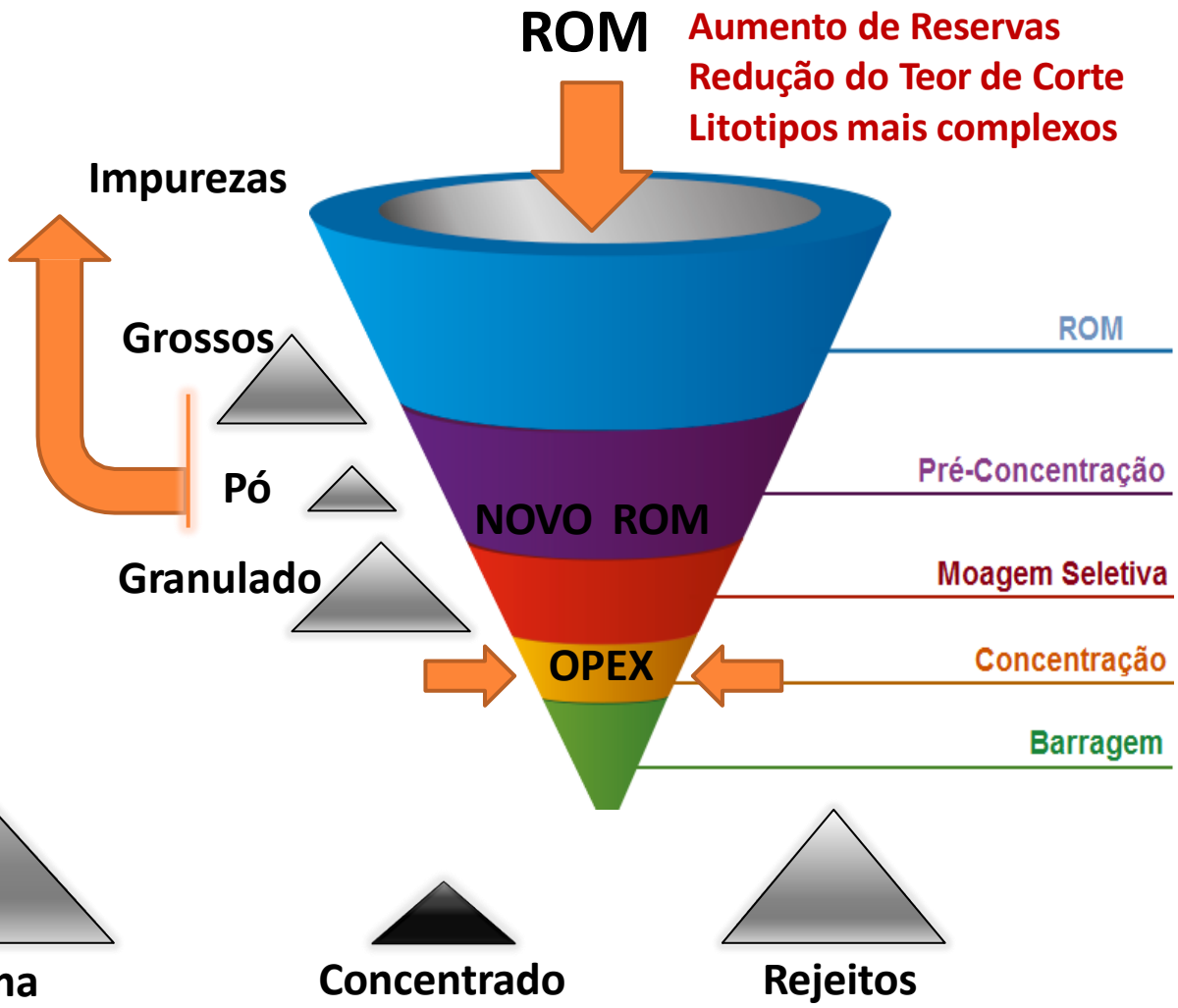
Há diversas formas de aplicar energia para fragmentar um minério. Quando o minério é relativamente heterogêneo, a melhor força a ser aplicada é o impacto. No laboratório é utilizado o moinho de martelos e, em projetos industriais, é recomendado o VSI, Barmac (Metso) ou similar. A etapa de moagem que se segue recebe um minério mais brando, adequado para forças menos intensivas de cominuição, gastando menos energia.

Muitos se surpreenderiam se conhecessem a potencialidade que o minério oferece quando é bem fragmentado e, ainda, como são fáceis e rápidos os testes que o comprovam. Depois de uma boa fragmentação existem chances de pré-concentrar o minério, a seco, antes de seguir para a usina. Lamentavelmente, essa prática não é comum.

O CONCEITO QUE SUPORTA A SOLUÇÃO



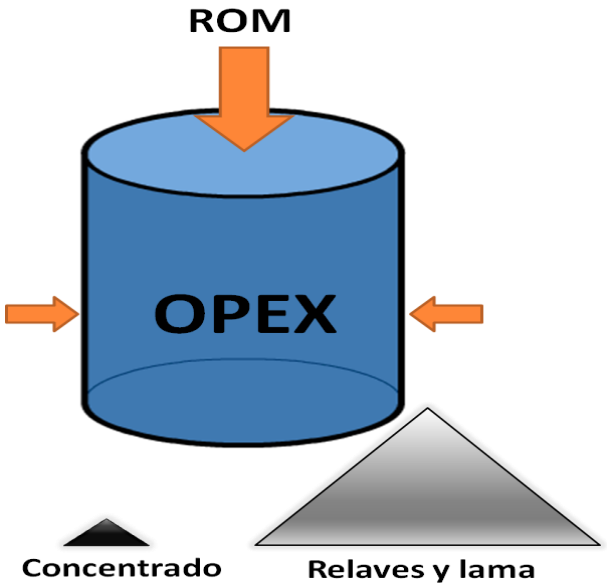
PROCESSO ACTUAL



CONCENTRAÇÃO SELETIVA

Cominuição Equivocada

A estratégia “de moer tudo e flotar tudo” (e ainda com tecnologia SAG – o cavalo de Troia dos fabricantes dentro da mineração) está chegando ao seu limite, pois este caminho não consegue contrapor-se à redução implacável dos teores de Cobre nos diversos depósitos, através do tempo, e ao aumento do preço da energia. Isso vale para toda a mineração.

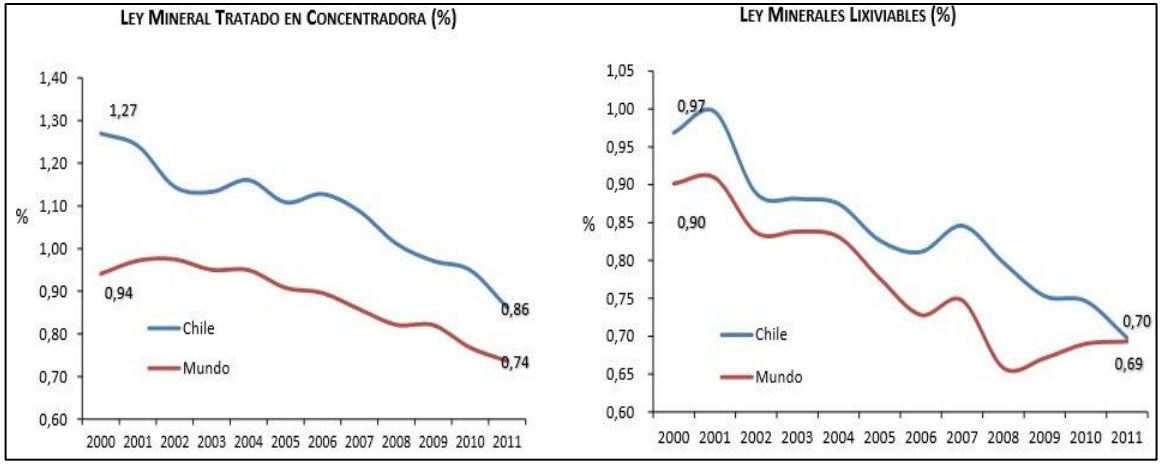


Em operacções correntes o moinho SAG poderia ser adaptado para moagem pé-primária

A queda vertiginosa dos teores de Cobre

Os menores teores tem obrigado às companhias que operam no Chile a destinar uma maior quantidade de recursos para manter os níveis de produtividade dos depósitos, com um teor muito mais baixo. Desde 1992 os teores de Cobre diminuíram em 46%, passando de 1,61% para 0,87% Cu. Esta cifra se compara desfavoravelmente com a redução de 23% que anotou este indicador no restante do mundo, após cair de 1,45% para 1,12%. A "*Comisión Chilena del Cobre*" confirma esta tendência em dezembro de 2012, como ilustrado abaixo para o período 2000/2011.

O principal depósito de BHP no Chile e também o maior produtor do mundo: Escondida, tem visto diminuir de 3% para 1,2% o seu teor de cobre, desde que iniciou as suas operações



Cochilco, "Minería y Productividad", Dezembro 2012

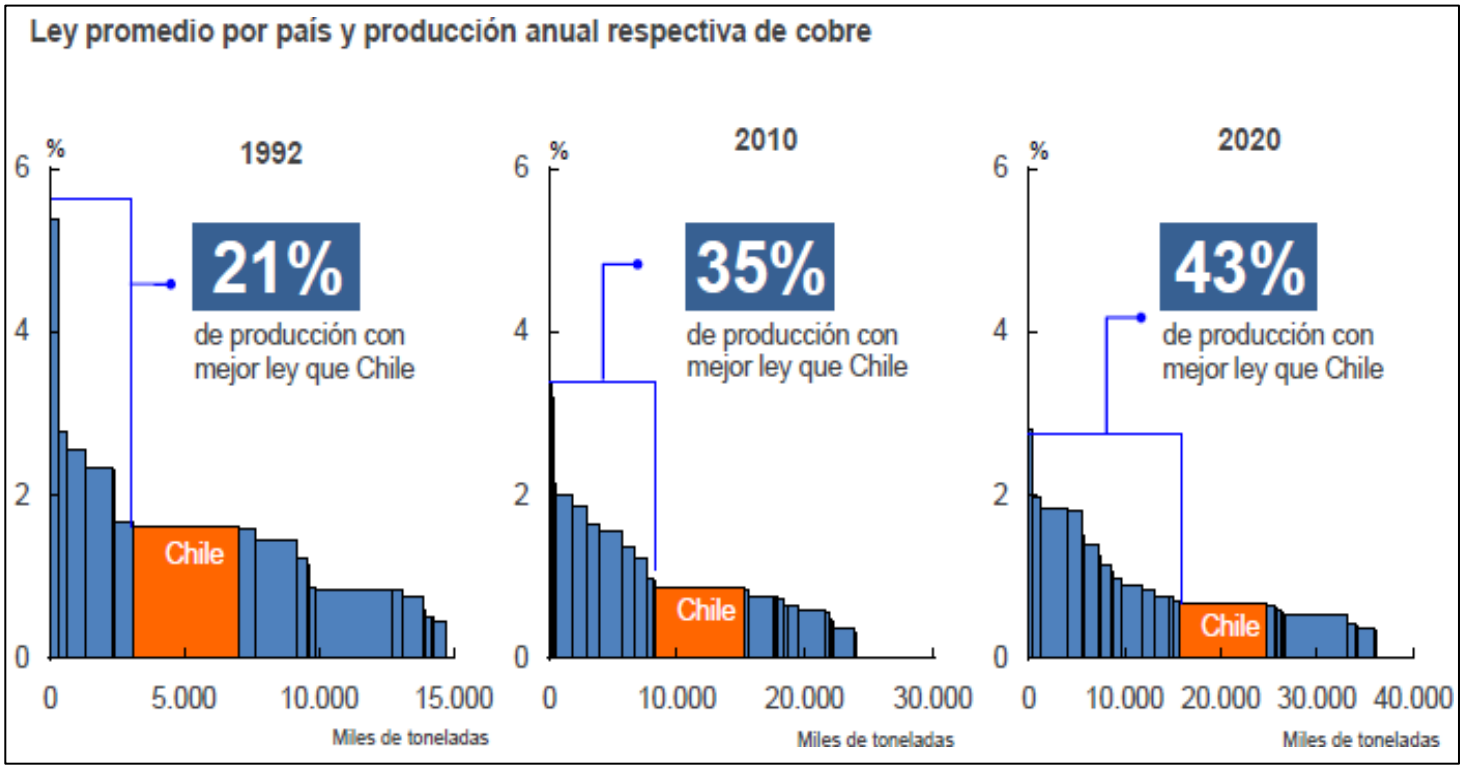
Perda de Competitividade da Mineração Chilena

Por causa da queda mais acentuada nos seus teores de cobre, as mineradoras chilenas, a partir de 2009, ficaram menos competitivas que as suas concorrentes, no restante do mundo, como afirma o "*Consejo Minero*". Chile está saindo do quartil das mais eficientes.

Consejo Minero, Competitividad y Productividad, Agosto 2013

Perda de Competitividade da Mineração Chilena (cont.)

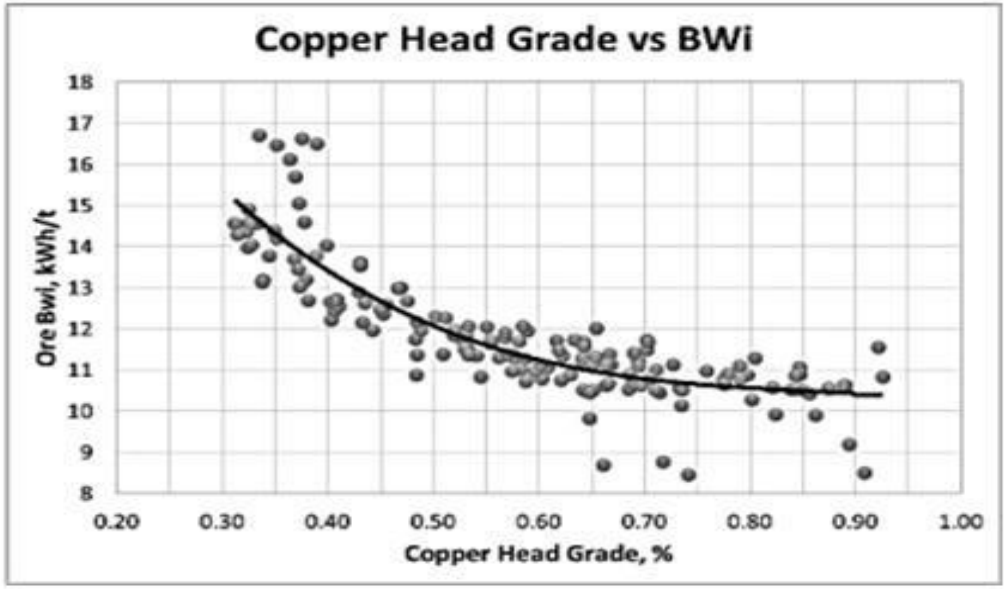
O anterior é ratificado pela “Comisión Chilena del Cobre (Cochilco)”. Chile não está mais entre os produtores eficientes de Cobre, sendo superado pela media mundial, e a tendência é de piorar dramaticamente.



Consejo Minero, Competitividad y Productividad, Agosto 2013

Cai o Teor e Aumentam os Custos

Junto com a queda vertiginosa do teor de Cobre, para maior desgraça, aumenta junto com isso a dureza do minério e, por tanto, o consumo de energia. A dramática redução do teor de Cobre não traz apenas aumento de custo em forma inversamente proporcional, mas aumenta também o custo operacional direto da concentradora, por tonelada tratada.



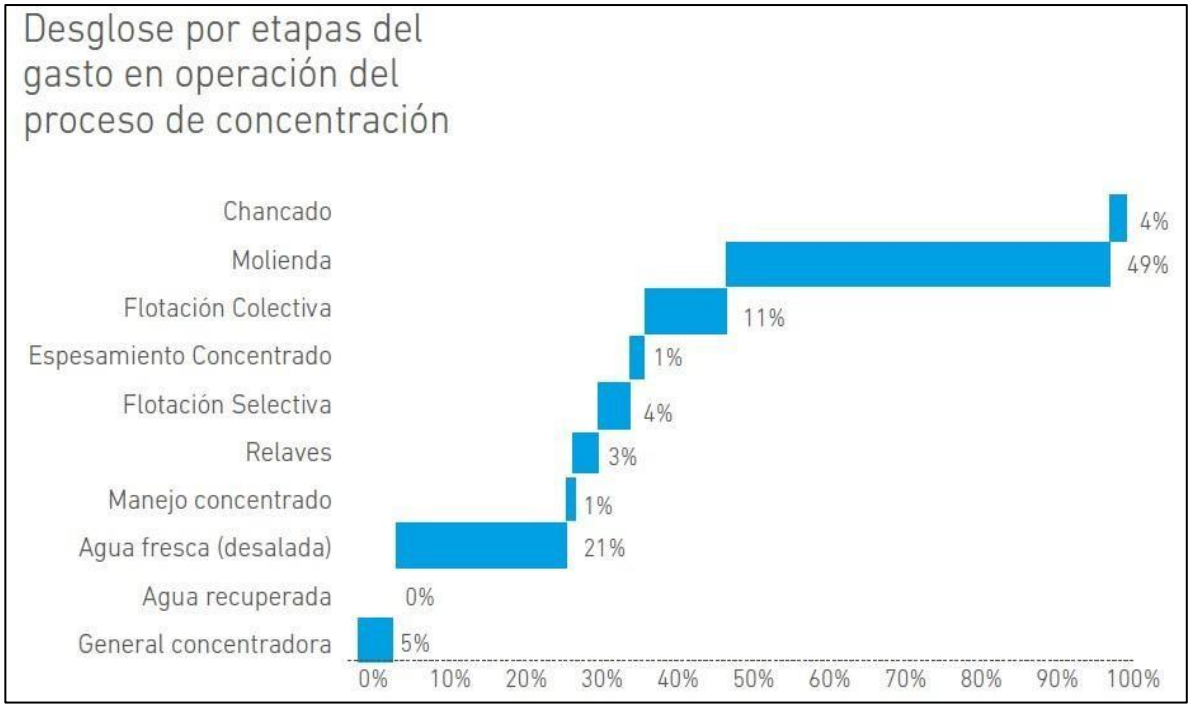
SAG CONFERENCE VANCOUVER 2015

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

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

Custos de Produção Concentradoras Chile

Estudo recente coordenado pela “Fundación Chile (Roadmap Tecnológico 2015-2035)” mostra que a etapa de moagem consome quase a metade dos custos de uma concentradora de sulfetos de cobre.

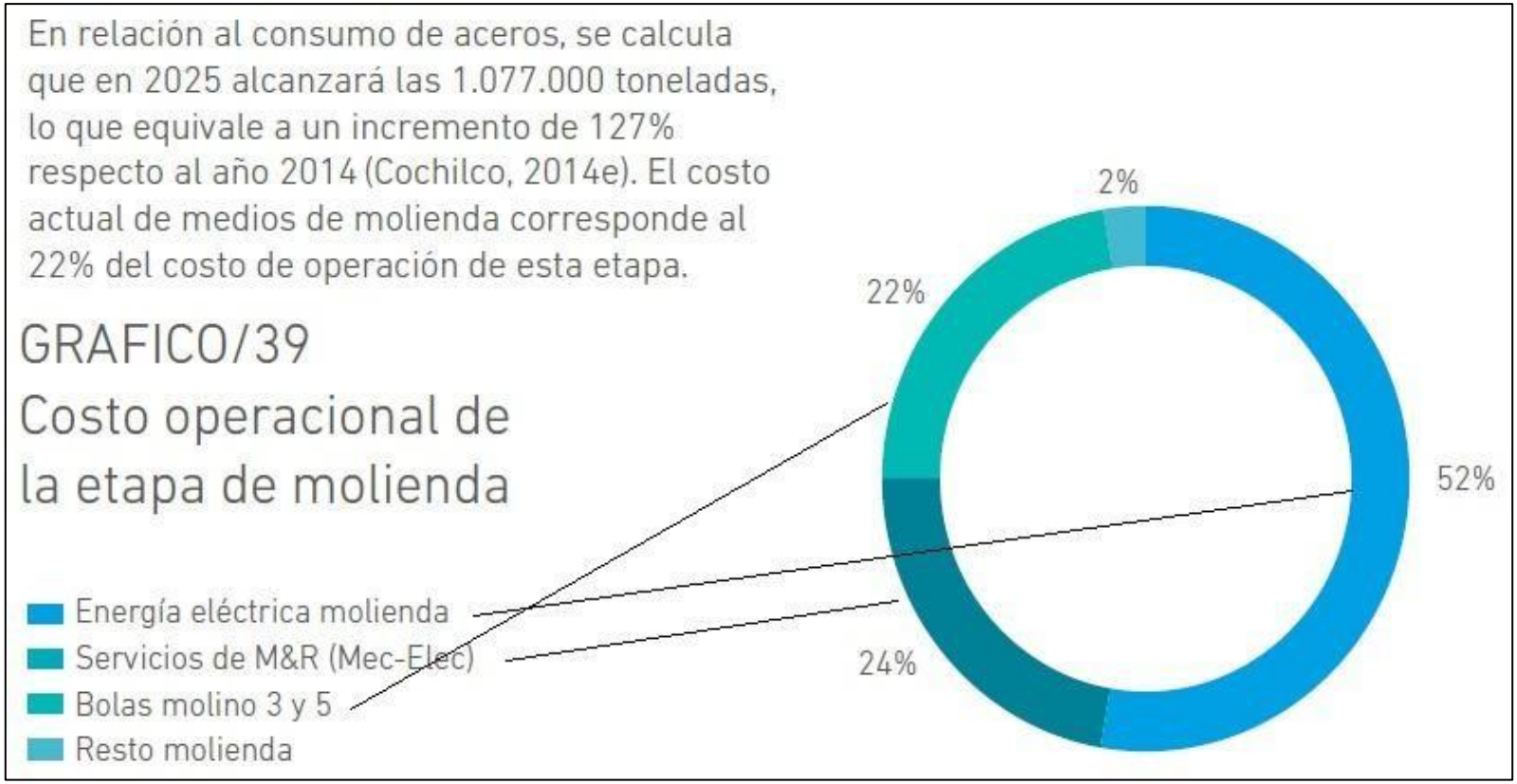


Fundación Chile, Roadmap Tecnológico para 2015-2035

Observa-se a melhor opção de aprofundar na britagem (fragmentação seletiva), reduzir drasticamente o custo de moagem e, principalmente, reduzir a massa tratada (com maior teor) produzindo uma queda radical no custo operacional.

Custos de Produção Concentradoras Chile (Cont.)

Pela sua parte, o principal custo da moagem está no consumo de energia elétrica, justamente por causa da equivocada utilização de moagem SAG.



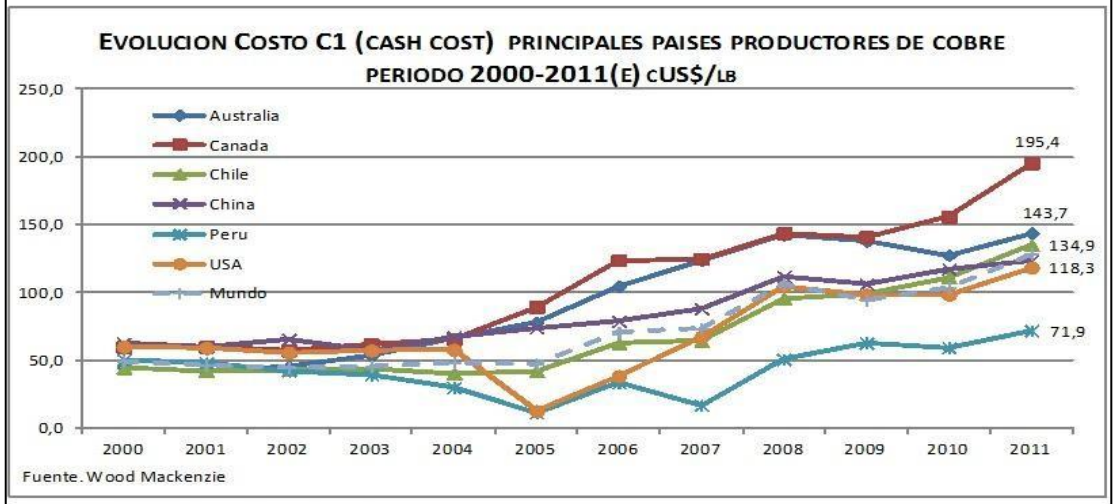
Fundación Chile, Roadmap Tecnológico para 2015-2035

Custos de Produção Concentradoras Chile (Cont.)

Levando em conta tudo o anterior (menores teores, maior consumo e preço da energia - em parte por conta da maior dureza derivada dos menores teores) os custos operacionais de base (chamados C1), aumentaram três vezes em apenas 10 anos, para o caso Chileno.

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

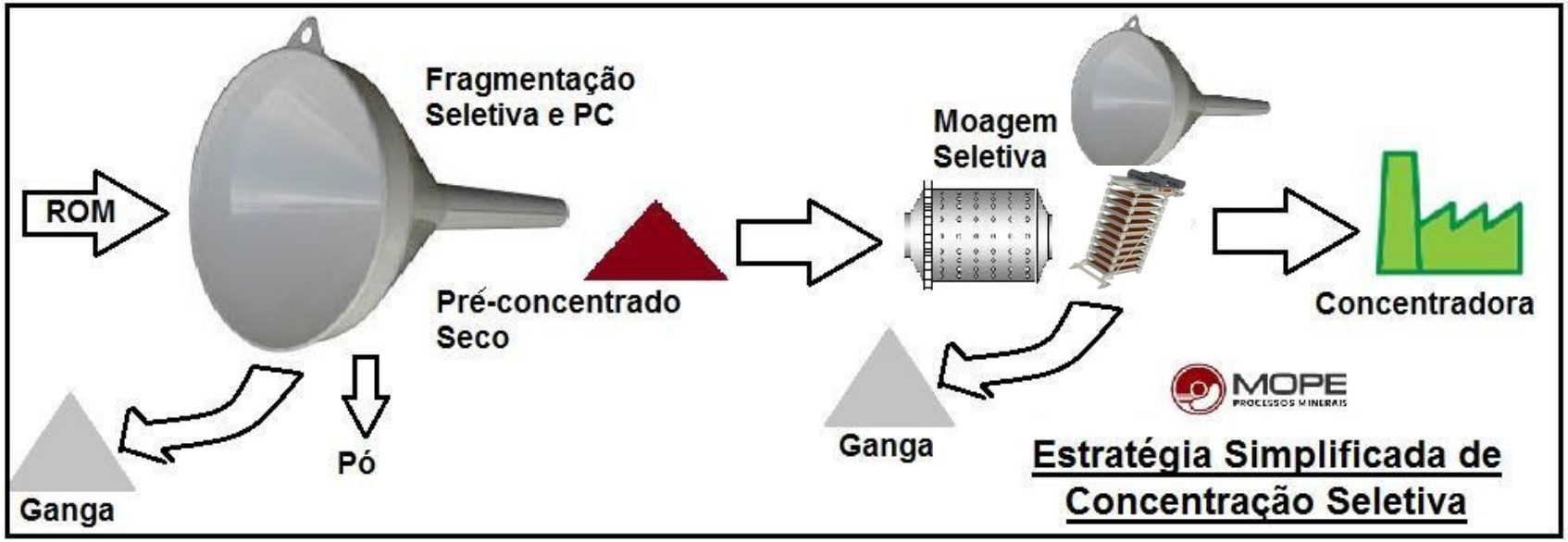
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Australia	44,9	41,9	45,7	53,6	66,0	78,0	104,6	123,7	142,7	137,7	127,5	143,7
Canada	60,0	60,2	57,3	61,8	65,8	89,4	123,9	124,9	143,9	140,8	155,7	195,4
Chile	44,5	42,2	42,9	43,7	40,4	42,1	62,8	64,3	95,7	98,6	111,2	134,9
China	62,8	60,5	65,6	57,0	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

A Concentração Seletiva

No Chile, lamentavelmente, os laboratórios metalúrgicos e consultoras estão dirigidos a estudos de cominuição pensando em minérios homogêneos, onde equivocadamente se supõe que qualquer fragmento possui idêntica composição que a rocha original. MOPE estabeleceu convênios com laboratórios e plantas piloto, no Chile e no Brasil para estudar a aplicação desta nova abordagem para qualquer tipo de minério. .



Começando com uma boa Fragmentação

Minério de Cobre foi fragmentado em britador de mandíbulas para observar a distribuição metálica por faixa granulométrica (XXIII ENTMME, Brasil, 2009).

Após o minério ser britado finamente se observa que acima de 1,4 mm quase 1/3 da massa contém apenas 10,58% do cobre. Se o minério tivesse 0,86%Cu, o passante em 1,4 mm teria 1,15%Cu. O retido ficaria com apenas 0,28%Cu, provavelmente mais baixo que o teor de corte na mina. O depósito de rejeitos cairia para 1/3 do seu tamanho, (faltando ainda avaliar a moagem seletiva).

Um britador de impacto maximizaria a separação (fragmentação seletiva), reduzindo ainda mais o conteúdo de cobre na massa 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**

Fragmentação Seletiva

As operações de britagem podem ser mais ou menos seletivas dependendo da força utilizada. O HPGR aplica elevada pressão para toda a rocha, “procurando um F80 específico”, ignorando a seletividade na fragmentação. Em britadores de mandíbulas e de cone, a força é aplicada de forma mais aleatória (sem pressão localizada), apenas para “reduzir de tamanho”.

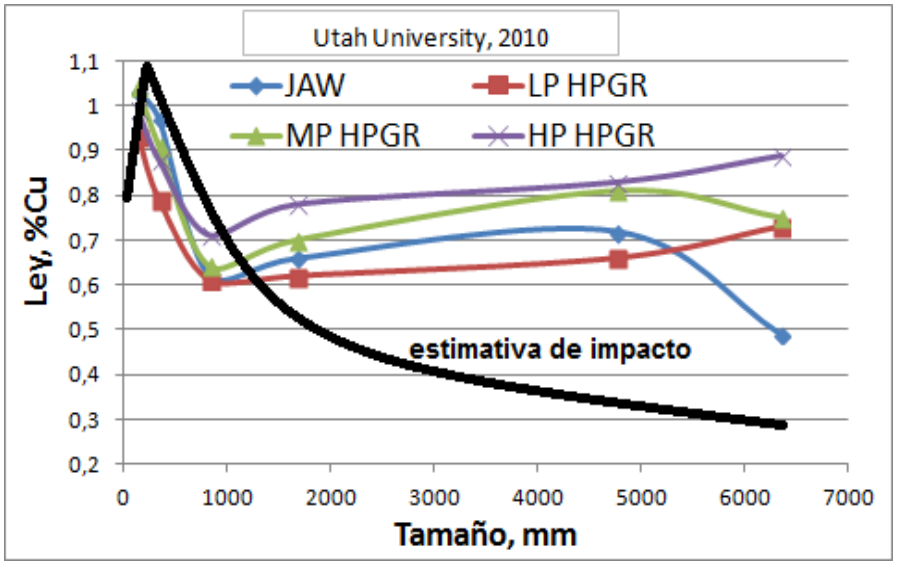
Já um britador de impacto é extremamente seletivo, aplicando a ação de cominuição em função da característica específica (tamanho do grão, densidade e dureza relativa) de cada um dos diversos componentes da rocha, com o objetivo de “liberar” o minério de interesse.

A ação do impacto é como extrair os grãos de amendoim sem quebra-los desnecessariamente. A fragmentação seletiva libera adequadamente a ganga do minério de interesse, com o máximo P80 quanto possível.

Fragmentação Seletiva do Minério de Cobre

Estudos de fragmentação com HPGR em três pressões diferentes e em britador de mandíbulas (Universidade de Utah, 2010) mostram que a seletividade da fragmentação diminui junto com o aumento de pressão, ou seja, na medida em que o material é tratado de forma mais homogênea.

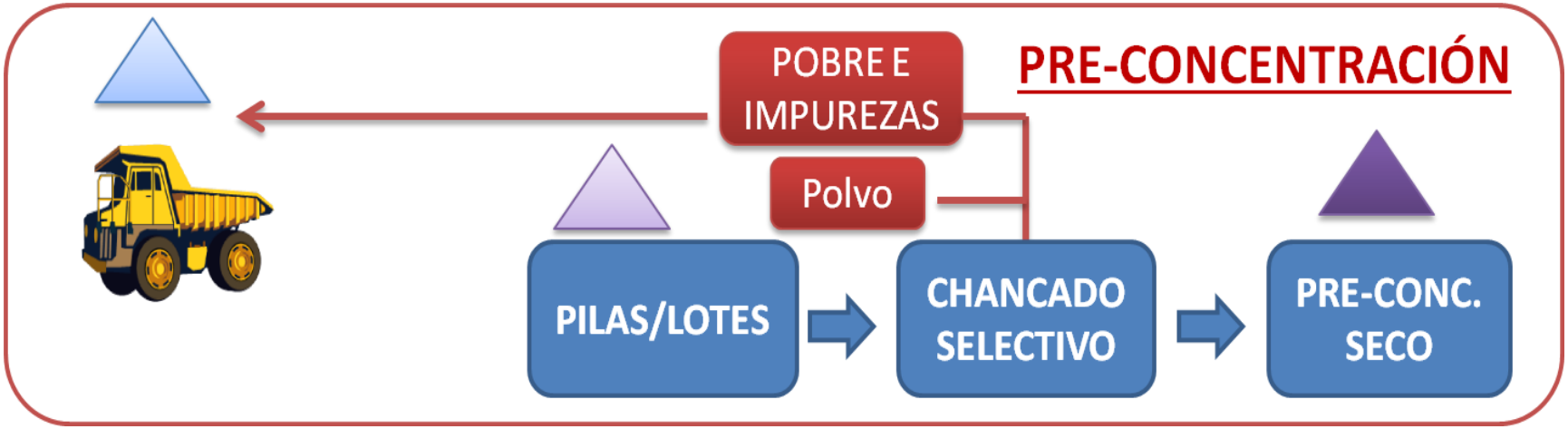
Size	%Cu, Head Grade From Copper Sulfide			
	Jaw	Low Pressure HPGR	Medium Pressure HPGR	High Pressure HPGR
+1/4"	0.49	0.73	0.75	0.89
1/4 x 4M	0.72	0.66	0.81	0.83
4 x 10M	0.66	0.62	0.7	0.78
10 x 20M	0.62	0.61	0.64	0.71
20 x 40M	0.97	0.79	0.91	0.88
40 x 100M	1.03	0.93	1.04	0.99



Com linha preta se ilustra o efeito que causaria um britador de impacto na distribuição do teor de cobre por tamanho. Quanto mais heterogêneo for o minério mais massa poderia ser retirada e devolvida para a mina, inclusive com menor %Cu que o teor de corte da mina, evitando o seu transporte para a concentradora e “enriquecendo” o novo ROM.

Fragmentação Seletiva de Minério de Cobre

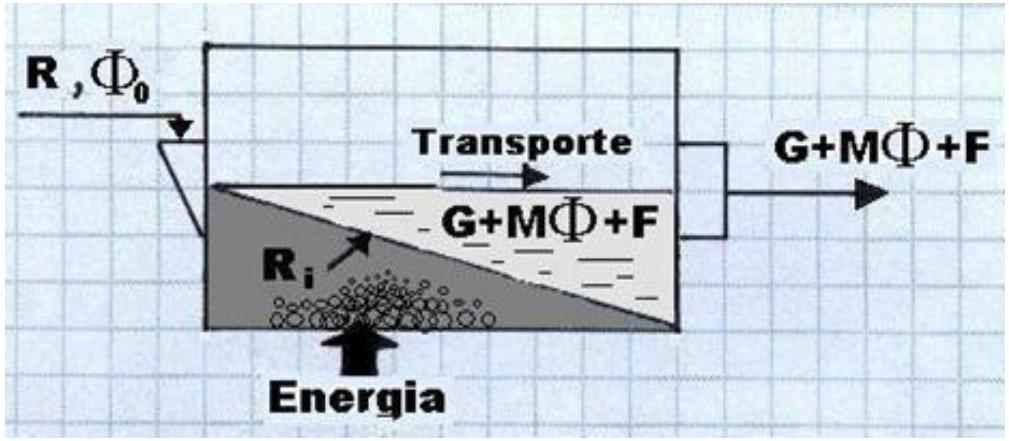
Por exemplo, é possível que depois da britagem fina (preferencialmente por impacto) possa ser descartado material grosseiro e pó. Normalmente, a poeira traz consigo um elevado teor de impurezas e, ao mesmo tempo que complica as operações de concentração (ao converter o pó em lama), cria dificuldades de desaguamento y recuperação de água..



A usina de britagem fina (etapa terciária com britador de impacto), gera um pré-concentrado pronto para alimentar a usina de moagem e concentração

MOAGEM SELETIVA

O próprio minério ajuda a comandar a sua cominuição externando peculiaridades junto com a liberação dos minerais inseridos na rocha, e essas peculiaridades deven ser aproveitadas em beneficio da seletividade e dos menores custos.



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

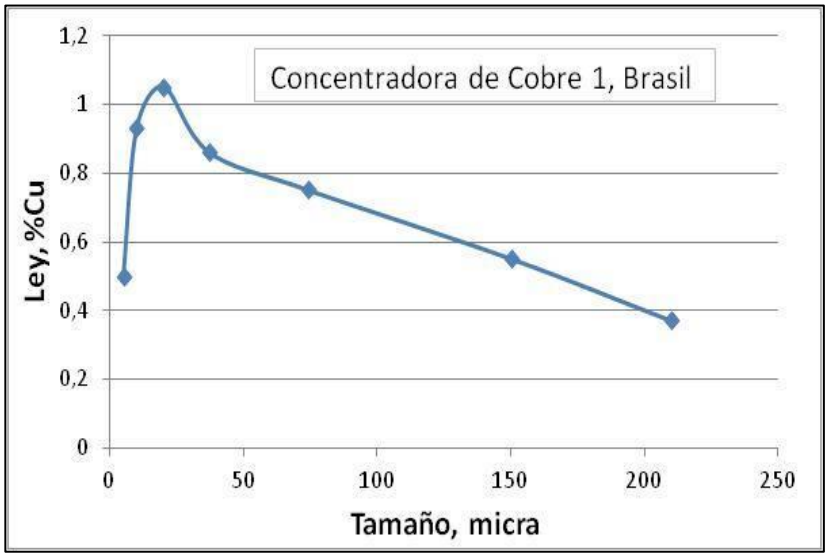
CONCEITO

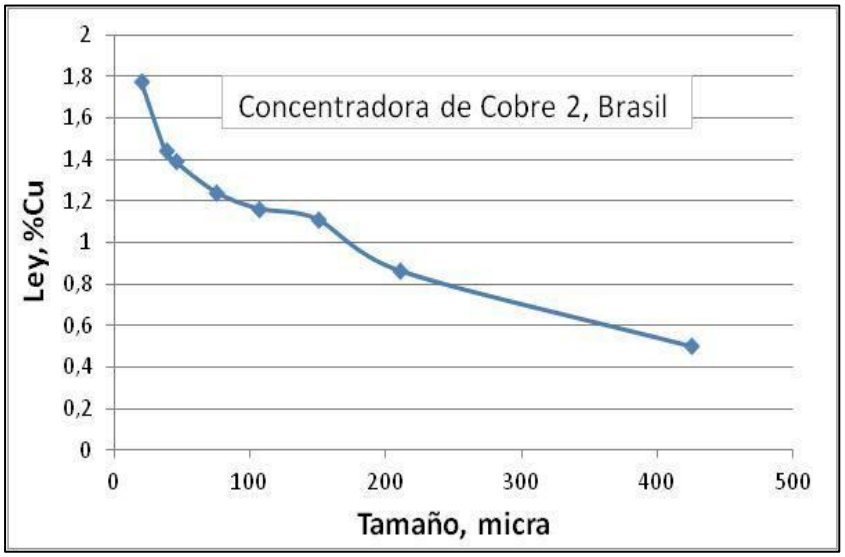
Dentro do moinho, sedimentam as partículas maiores e/ou mais pesadas, sendo moídas preferencialmente, ou seja, em forma "seletiva".

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

Seletividade em Operações de Moagem

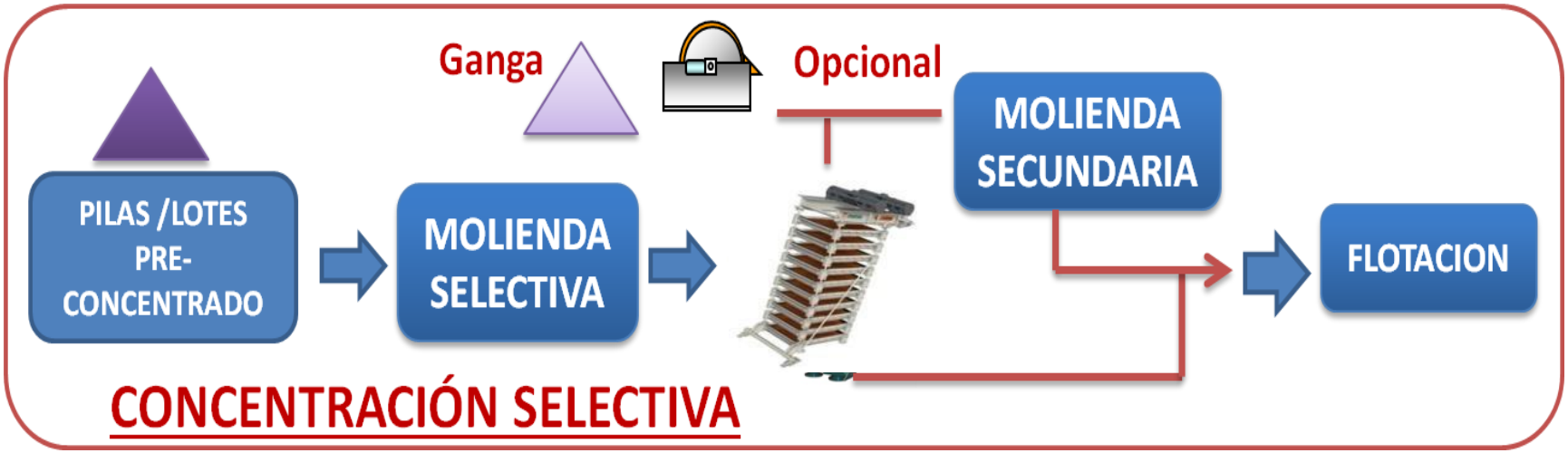
Mesmo numa moagem convencional (moinho de bolas em circuito fechado com hidrociclones) já existe uma significativa seletividade no produto moído, como os exemplos ilustrados abaixo para a alimentação da flotação em duas grandes concentradoras de Cobre no Brasil. Esta seletividade pode ser significativamente melhorada com técnicas de moagem seletiva.





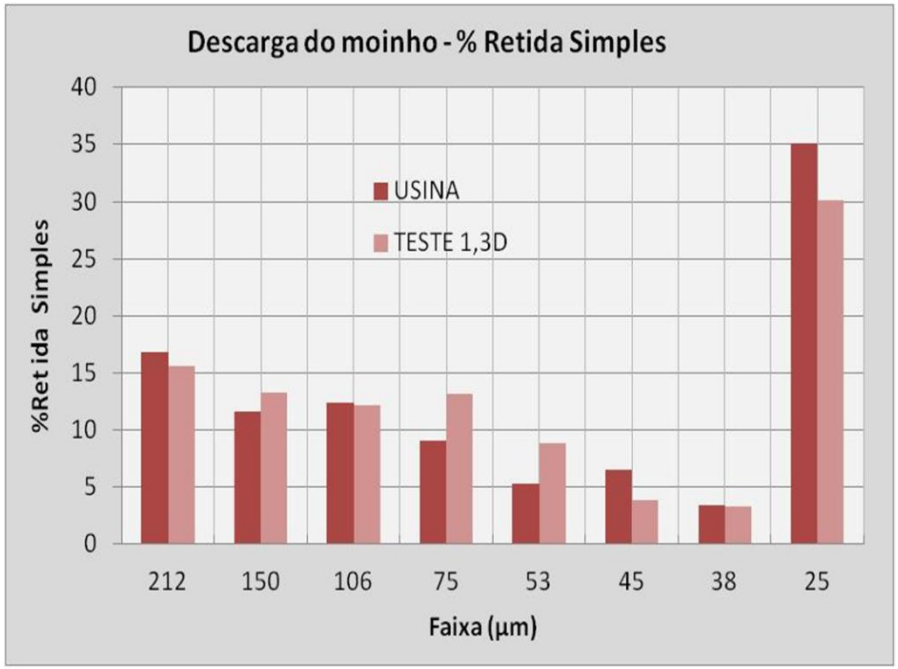
Seletividade em Operações de Moagem

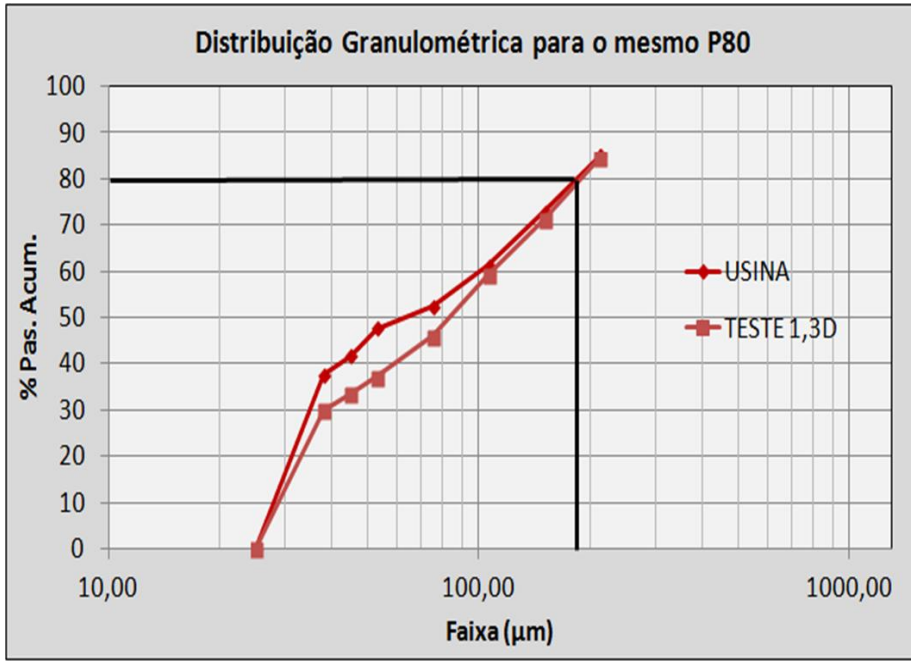
A usina de moagem e concentração poderia ser de menor tamanho e com elevada taxa de produtividade; O moinho SAG, em plantas existentes, poderia ser adaptado para operar como mogem pré-primária.



Haveria baixo consumo de água (menor que na moagem convencional em circuito fechado) e menor geração de rejeitos ultra finos, o que melhoraria as taxas de sedimentação de rejeitos e de filtragem do concentrado, ao reduzir a super moagem

Moagem Seletiva Minério de Cobre, 2013





A moagem seletiva é mais eficiente nos tamanhos intermediários, reduzindo a proporção de material grosseiro e, também, gerando menos ultra finos.

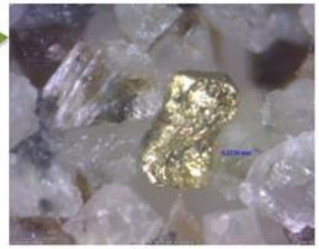
Moagem Seletiva Minério de Cobre, 2013

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

Na moagem seletiva, a <u>liberação</u> de sulfetos começa a ocorrer em tamanho mais grosseiro que o observado na planta, com moagem em circuito fechado.

Para o mesmo P80, a moagem seletiva permite que 84,37% da massa esteja pronta para flotar em condições aceitáveis de liberação, contra apenas 59,24% de massa gerada pelo atual modo convencional de moagem.

Moagem Seletiva Minério de Cobre, 2013

O concentrado de flotação Rougher era de 8 a 10%Cu, e foi para mais de 20%Cu no teste de concentração seletiva. A mesma situação foi comprovada na usina industrial, ao abrir um dos circuitos de moagem.

A moagem seletiva "mói" menos, mas libera mais, o que permite melhorar a seletividade da flotação e a recuperação geral da usina 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

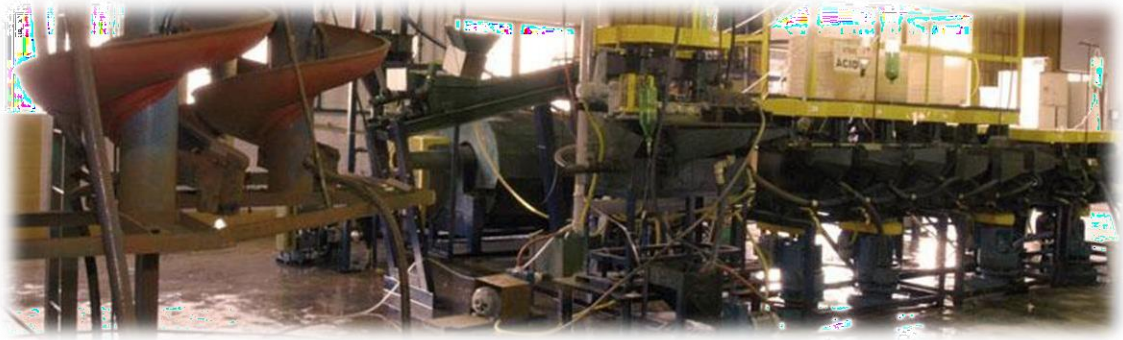
Moer menos é mais!

MOPE – SUPORTE EXPERIMENTAL

MOPE define as necessidades de testes metalúrgicos, estabelece procedimentos, acompanha e avalia os trabalhos experimentais necessarios para o suporte dos projetos que idealiza. Contamos com laboratórios associados no Chile e no Brasil.

SUPORTE EXPERIMENTAL

MOPE acompanha, com microscopia digital e olhar de "engenharia de processos" a liberação e tamanho de grãos dos minerais de interesse e da ganga.



MOPE – TESTES DE CONCENTRAÇÃO SELETIVA

Fragmentação Seletiva e caracterização

Cobber Magnético a seco

Respeitando e explorando a heterogeneidade do minério

Algumas opções de concentração

Moagem Seletiva

Peneiramento HF

Retido

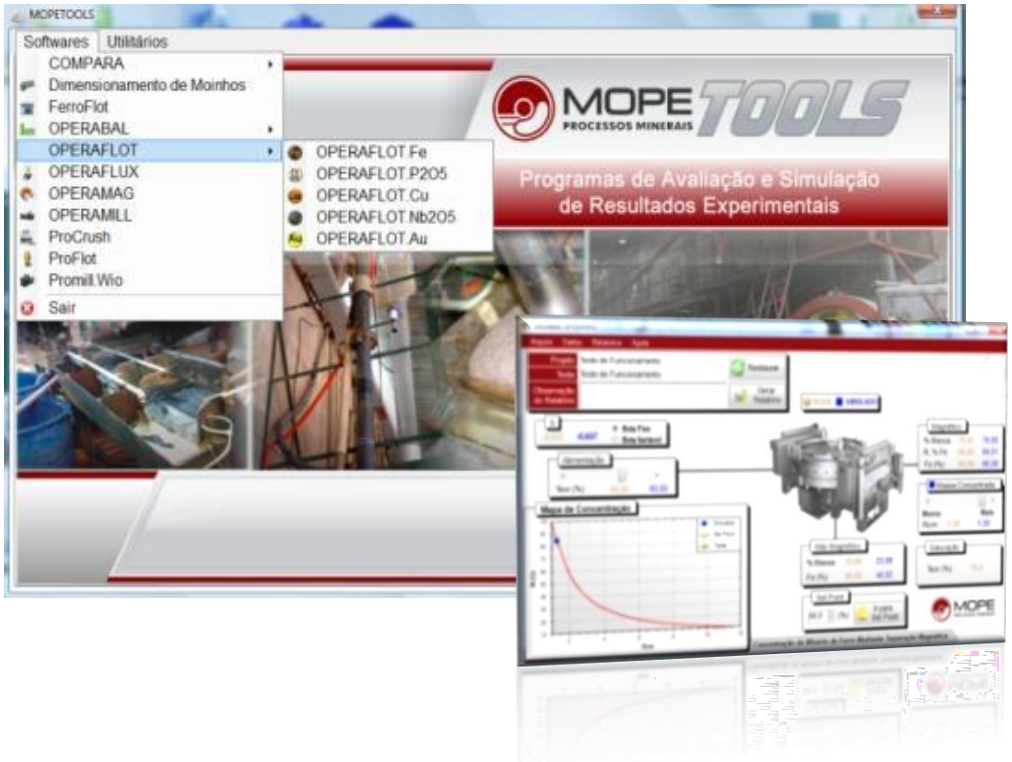
Passante

MOPE – FERRAMENTAS DE CÁLCULO

MOPE, com base no MODELO OPERACIONAL da sua autoría, desenvolveu modelos e possui ferramentas para o escalonado industrial dos resultados experimentais obtidos para diversas operações unitárias, com fins de projeto. Também, MOPE simula equipamentos em operação, inclussive com ferramentas avançadas de controle online.

FERRAMENTAS DE CÁLCULO

MOPETOOLS é um pacote de ferramentas de uso interno, todas desenvolvidas com base no **modelo operacional**, para cálculos e simulações de diversas operações unitárias.



RESUMO DA NOVA ESTRATÉGIA

Testes de fragmentação seletiva

Testes de moagem seletiva e pré-concentração

Melhor rota de processos. Otimização de concentradoras

Circuitos Abertos Peneiras HF ao invés de ciclones

PRÉ-CONCENTRAÇÃO

MINA

- Mais Reservas;
- Cava otimizada;
- Menor relação E/M;
- Flexibilidade operacional.

USINA

- Menor tamanho (< CAPEX);
- Menor taxa (t/h);
- Minério mais rico y macio*;
- Alimentação estável;
- Redução radical de OPEX.

REJEITOS

- Menos Rejeitos finos;
- Menores problemas ambientais.

** Por causa da fragmentação seletiva*

Melhor desempenho, com mínimos CAPEX, OPEX y menores riscos ambientais

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

Também no Chile