MOPE
PROCESSOS MINERAIS

CONCENTRAÇÃO SELETIVA

Nova tendência no Beneficiamento de Minérios

Setembro 2016

CONCENTRAÇÃO SELETIVA

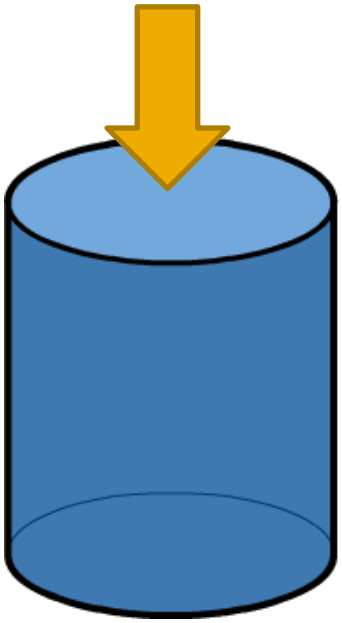
MOPE propõe uma mudança de foco perante as naturais perdas de competitividade na mineração, quais são, dentre outras: diminuição de teores e de reservas; disseminação de pequenos depósitos; elevado custo da energia; falta de água; problemas logísticos; restrições socioambientais e menores preços das *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.

O caminho aqui proposto, de ***Concentração Seletiva***, aponta para a mínima Usina com a mínima geração de resíduos finos, focando agora na cominuição seletiva e pré-concentração do minério, priorizando a melhor fragmentação e liberação de ganga, poupando muito dinheiro nas Plantas Concentradoras e reduzindo os problemas ambientais. Projetar e operar uma planta com este conceito reduziria significativamente o emprego de capital e os custos de operação, assim como o período de ramp-up.

ALGUNS NÚMEROS

Se uma usina for implantada para produzir 25 milhões de toneladas por ano de concentrado de minério de ferro e, ao longo do tempo (como é de regra geral) o teor do ROM começar a cair, parece evidente que a usina deverá ser ampliada e a quantidade de rejeitos gerados aumentará assustadoramente, como ilustrado a seguir *(estimativa MOPE).*

MANTENDO A PRODUÇÃO DE CONCENTRADO DE FERRO						
Teor, %Fe	Alim., t/h	Ampliação Usina, %	Recup. Mássica, %	Concentrado Mtpa	Rejeito, t/h	% aumento de rejeito
55	4.530	**0**	70	25	1359	**0**
50	5.285	**17**	60	25	2114	**56**
45	5.765	**27**	55	25	2594	**91**
40	7.047	**56**	45	25	3876	**185**
35	8.345	**84**	38	25	5174	**281**
30	9.909	**119**	32	25	6738	**396**

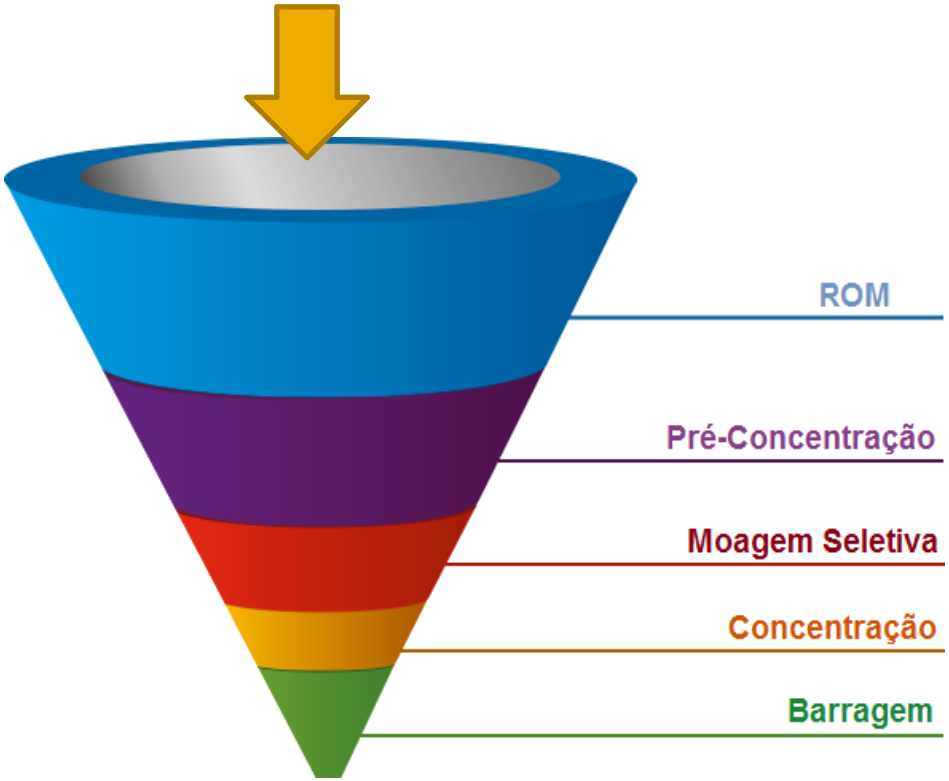


Se gasta mais, apenas em processar e depositar mais rejeitos

INVERTENDO A LÓGICA ATUAL

Deve ser avaliada a cominuição seletiva e a pré-concentração, enriquecendo o teor de alimentação e reduzindo a massa alimentada na medida em que se avança para as operações mais caras de concentração, todavia, reduzindo os problemas ambientais.

Muitos se surpreenderiam se conhecessem a potencialidade que o minério oferece quando é bem fragmentado e, ainda, o fáceis e rápidos que são os testes que o comprovam.



Mínimos CAPEX, OPEX e mínima geração de resíduos finos

A 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*

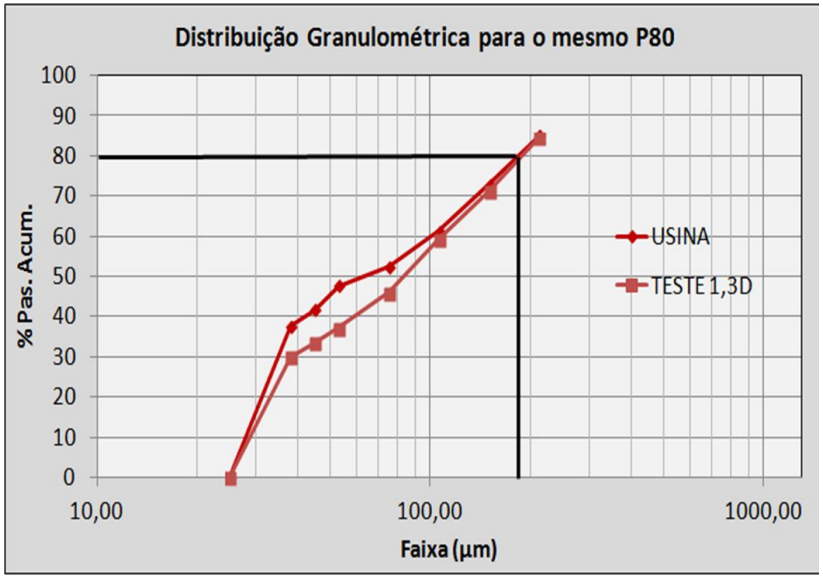
Melhor desempenho, com mínimos CAPEX, OPEX y menores riscos ambientais

PARADIGMAS A ROMPER

PARADIGMAS A ROMPER

MOPE apresenta uma nova filosofia para o beneficiamento de minérios, que envolve novos conceitos para a pesquisa metalúrgica e engenharia conceitual. Para isso, é necessário questionar algumas metodologias e/o paradigmas, que orientam os trabalhos experimentais e de desenvolvimento de projetos nestes últimos 40 anos.

P80 – Esta forma de avaliar o tamanho médio do fluxo carece de um devido cuidado em detalhes, principalmente na sua relação com a liberação do minério e a sua forma de fragmentação. Assim, um minério pode apresentar o mesmo P80, moído em batelada, em circuito fechado com ciclones, em circuito aberto (seletivo) e etc., onde cada um de estes resultados conduz a um grau de liberação muito diferente.

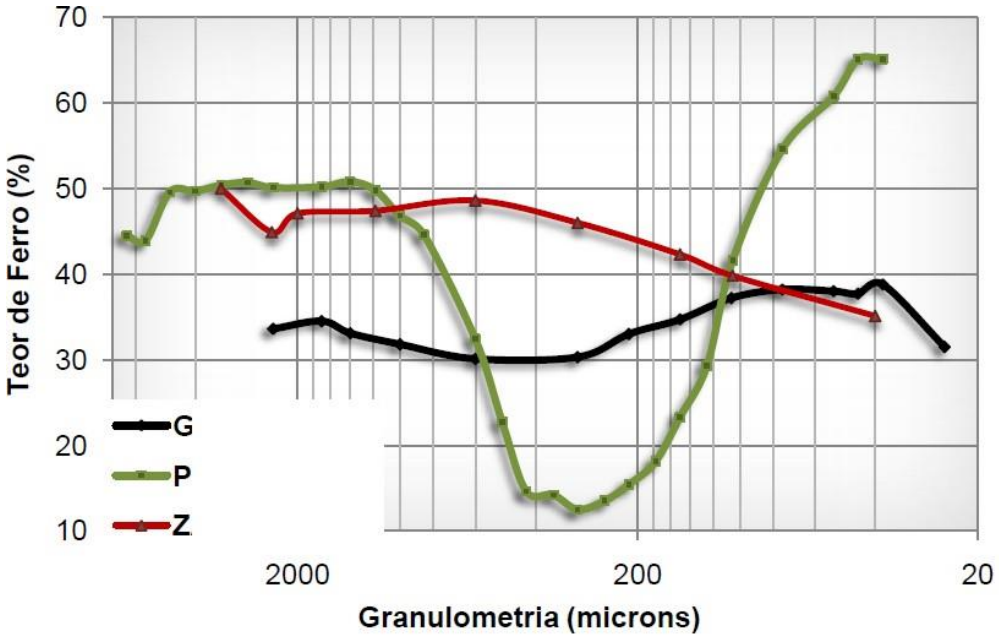


Mesmo P80, mas diferente distribuição granulométrica

PARADIGMAS A ROMPER (Cont.)

Teor de cabeça – A avaliação do teor médio do fluxo também carece do devido cuidado, principalmente na sua relação com a distribuição do minério de interesse dentro das diversas faixas granulométricas, todavia, dependendo da forma mais ou menos seletiva da sua fragmentação. Assim, um minério pode apresentar um determinado teor de cabeça, mas o conteúdo de mineral de interesse vem distribuído em forma particular e preferencial dentro do fluxo.

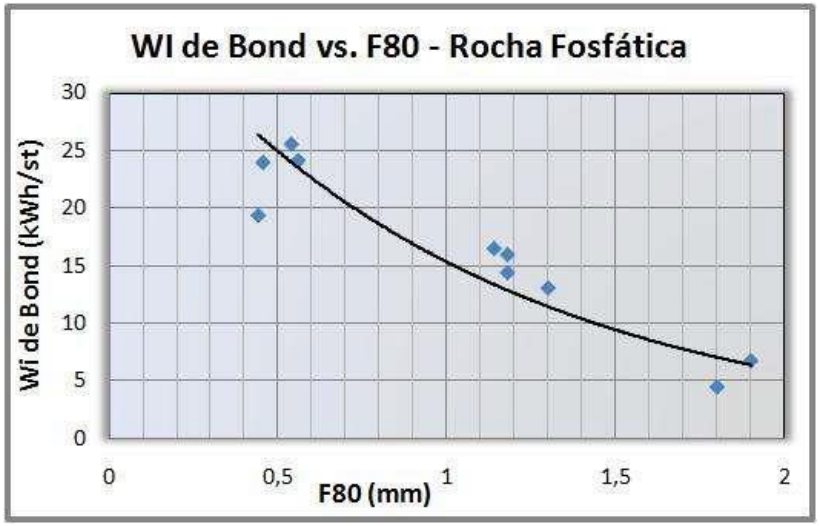
Teor de Fe por tamanho em três diferentes minerais de ferro, com o mesmo "teor de cabeça"

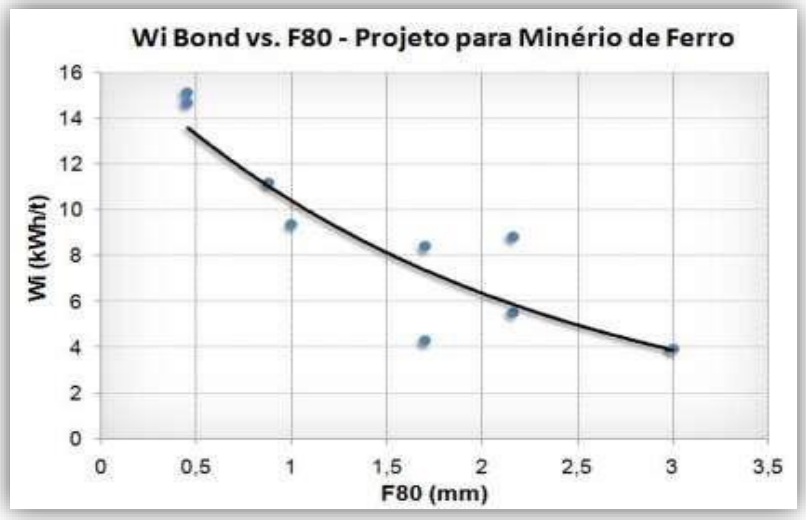


Comparação da granuloquímica de Ferro para três diferentes depósitos.

PARADIGMAS A ROMPER (Cont.)

Wi, lei de Bond – O valor de Wi não é uma constante, como estabelecido por F. Bond. Observa-se que o valor de Wi varia conforme o valor de F80 do teste, contrariando a "Lei de Bond". Assim, para uma operação de moagem mais grosseira, o Wi é menor que para uma moagem secundária, onde o F80 é geralmente menor que 0,5 mm. Em minérios mais heterogêneos este aspecto é crucial e conduz a sérios erros no dimensionamento de circuitos de moagem.





Para minérios mais pobres e/ou heterogêneos, MOPE estabeleceu um método em planta piloto para a obtenção do Work Índex Operacional (Wio)

PARADIGMAS A ROMPER (Cont.)

- **Circuitos Fechados**

Os circuitos fechados são extremamente ineficientes, principalmente os circuitos com hidrociclones.

Molienda de Mineral de Hierro

Kirkenes, Molino de Bolas 21' x 32' (Noruega)

Item	Abierto	Cerrado (Otros molinos de la Planta)
Nivel de Bolas % Vol	22 %	35 – 40 %
Producto – 208 micras	82,4 %	80%
Consumo de Bolas, g/t	653	759
Consumo de Liners, g/t	44	66
Consumo Específico, kWh/t	7,9	10,22

PERÚ

72% de aumento de Produção

XXVIII Convención Minera
28th MINING CONVENTION
EXTEMIN 2007
INSTITUTO DE INGENIEROS DE MINAS DEL PERÚ

TRABAJO TÉCNICO

"CIRCUITOS ABIERTOS - ALTERNATIVA DE MEJORA EN LA PERFORMACE METALURGICA EN CONCENTRADORAS"

Hermes Vilchez Méndez

Empresa Minera Los Quenuales - Iscaycruz

Molienda de Sulfuros de Cobre

Copperhill, Molino de Bolas 7' x 10' (EEUU)

Item	Abierto	Cerrado
Carga de Bolas, tons	35	55
Nivel de Bolas, % Vol	29%	45%
Producción, ton/dia	2.250	2.130
Potencia Aplicada, HP	370	490
Consumo de Bolas, lb/ton	0,84	1,02
Molienda Sulfuros – 200#	65%	62%
Molienda Ganga – 200#	35%	40%
Colas Flotación, % Cu	0,068	0,08
Colector, lb/ton	0,28	0,34

PARADIGMAS A ROMPER (Cont.)

Existem numerosos outros paradigmas ou práticas que, mediante este novo conceito de **Concentração Seletiva**, quedarão obsoletos em pouco tempo.

- Uso de hidrociclones como equipamentos de classificação de tamanho em circuitos fechados de moagem;
- Excesso de Fatores de "Eficiência" em novos projetos;
- "Fator de projeto" excessivo, em muitos projetos;
- Buscar a máxima recuperação mássica e metalúrgica do projeto a qualquer custo;
- Utilização de dispendiosos "pátios de homogeneização" na alimentação de usinas concentradoras;
- Outros diversos conceitos, discutidos ao longo desta apresentação.

MITOS TECNOLÓGICOS

MITOS TECNOLÓGICOS

Enquanto 100 toneladas R.O.M. avançam pelo fluxo principal da usina, 200 estão de volta pelos transportadores de correia na britagem, 600 são bombeadas na contramão pelo circuito de moagem e, nas operações seguintes, o excesso de diluição em polpas chega até duplicar ou até triplicar a vazão (e o volume dos equipamentos). Ainda, dezenas de toneladas reciclam inocuamente pela Concentradora, disfarçando desempenho das operações e prejudicando os resultados metalúrgicos.

Proyecto de Concentradora

Quem não conhece bem as operações esconde-as com cargas circulantes.

MITOS TECNOLÓGICOS (Cont.)

SAG – Os argumentos que historicamente favoreceram a avaliação de moinhos SAG perante os sistemas convencionais de cominuição estão com os seus dias contados. Não existe, na prática industrial, redução de consumo de energia nem de custos de operação em general, como era imaginado nos teóricos testes de avaliação, na etapa de projeto, quando eram colocados em ridículo os tradicionais sistemas de britagem, favorecendo o SAG. O sistema convencional foi e continua sendo mais econômico, principalmente com os atuais preços da energia elétrica.

Moagem SAG – Acabou o Mito?
Artígo de capa na Revista
Minérios & Minerales, Ed. 290
Setembro/Outubro 2006

MITOS TECNOLÓGICOS (Cont.)

SAG – Projetos SAG implantados recentemente no Brasil, com raríssima exceção, resultaram em problemas operacionais e comerciais. Muitas surpresas desagradáveis podem ser ainda esperadas na implantação de moinhos SAG em diversos novos projetos, que afortunadamente ainda não saíram do papel. Na mineração brasileira, este tem sido o maior mito tecnológico nos últimos anos, propiciado pelos grandes fabricantes de equipamentos.

As usinas de concentração vivem ainda na idade média, sem ciência fenomenológica de base, que explique as suas operações unitárias e, se não melhorar, merece continuar convivendo com paradigmas, "tabelinhas" de fabricantes, "mitos tecnológicos" e permitindo a entrada de cavalos de Troia dentro das usinas.

MITOS TECNOLÓGICOS (Cont.)

Existem numerosos outros mitos tecnológicos ou práticas que, mediante este novo conceito de **Concentração Seletiva**, ficarão obsoletos em pouco tempo.

- Gigantismo em projetos;
- Circuitos de Moagem Semi Autógena;
- Flotação “Scavenger” sem nova liberação;
- Elevada carga de bolas em moinhos;
- Moagem em sistema: “high energy” (máxima aplicação de energia ao moinho);
- Elevada diluição em polpas, que fazem aumentar o volume dos equipamentos e/ou reduzir o tempo de residência do fluxo;
- Outros diversos conceitos, discutidos ao longo desta apresentação.

TRABALHOS EXPERIMENTAIS

FRAGMENTAÇÃO SELETIVA

Há diversas formas de aplicar energia para fragmentar um minério. Quando este é relativamente heterogêneo, a melhor força a ser aplicada é o impacto. Em laboratório é utilizado 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 macio, adequado para forças menos intensivas de cominuição, gastando menos energia.

CONCEITO

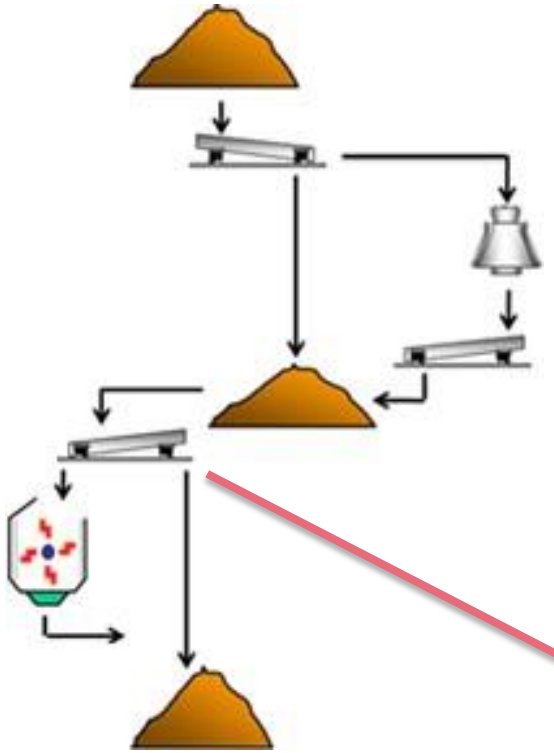
Extrair os grãos de amendoim sem quebra-los desnecessariamente.

Liberar adequadamente a ganga e o mineral minério de interesse com o máximo P80 quanto possível.

FRAGMENTAÇÃO SELETIVA (Cont.)

AMOSTRA: Ao redor de 20 Kg de material grosseiro (do tipo descarregado por um britador primário), abaixo de 100 mm. Serve também testemunha de sondagem, para estudos de Concentração Seletiva em novos projetos.

FRAGMENTAÇÃO SELETIVA (Cont.)

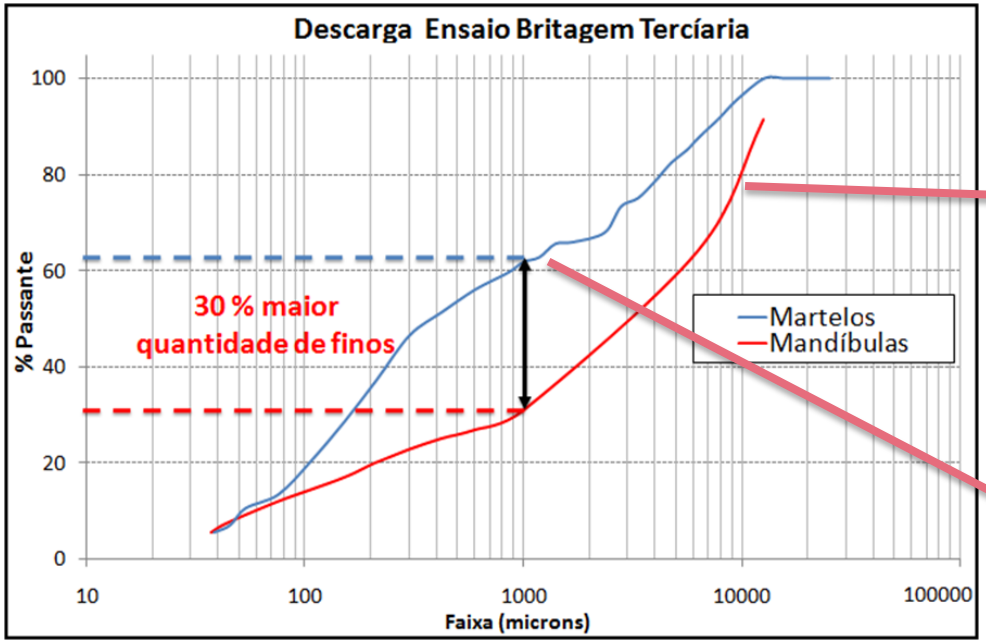


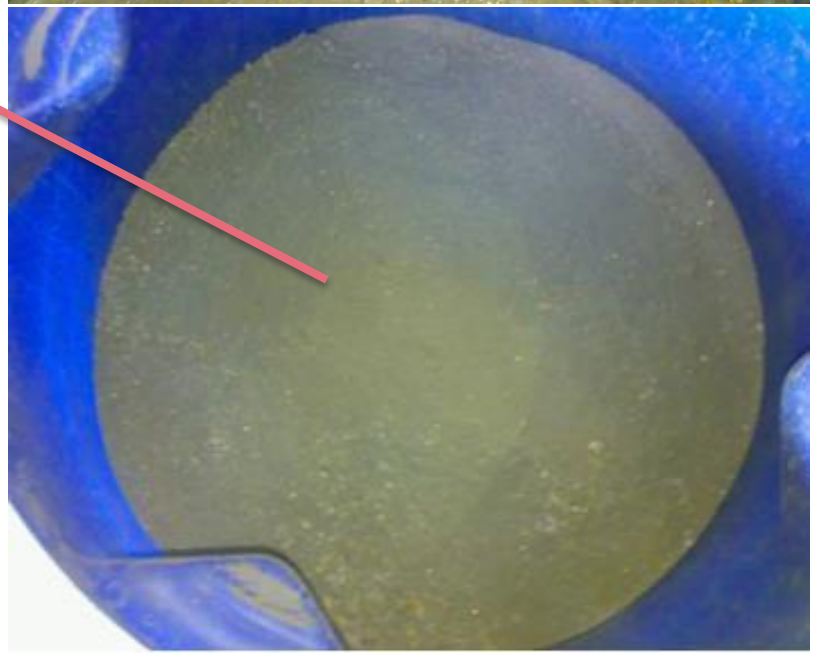
Classificação e britagem secundária

Classificação e britagem de impacto

As malhas de peneiramento e a abertura de descarga do moinho de martelo devem ser definidos para cada caso.

FRAGMENTAÇÃO SELETIVA (Cont.)

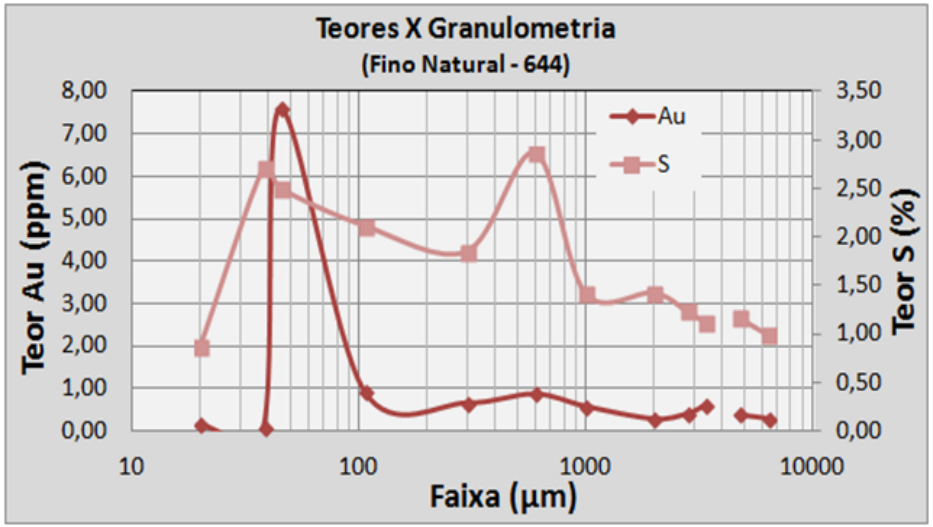




No exemplo acima, de minério de ferro, a fragmentação seletiva mediante impacto gera 30% a mais de finos abaixo de 1 mm que o britador terciário convencional.

FRAGMENTAÇÃO SELETIVA – PRÉ-CONCENTRAÇÃO

Após a fragmentação seletiva é possível que haja oportunidade de pré-concentrar o minério, antes de alimentar a usina. Esta pré-concentração poderia ocorrer por causa da distribuição granuloquímica do minério de interesse, que permitiria descartar alguma parcela do fluxo (pó, grossos, etc.) e, ainda, por causa de outra propriedade como a susceptibilidade magnética.

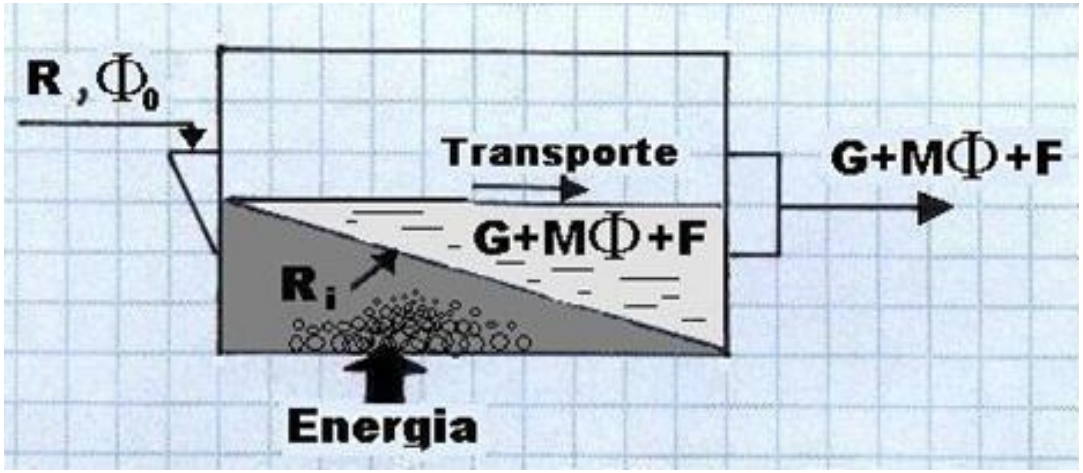


Testes para minério de Ouro (Brasil, 2015). Material acima de 1 mm poderia ser eventualmente descartado, antes de entrar à usina concentradora

Separação magnética a seco (cobber) de material fragmentado (Brasil, 2012)

MOAGEM SELETIVA

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



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

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

CONCEITO

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

MOAGEM SELETIVA (Cont.)

TESTE: Dependendo da dureza e dos objetivos (P80 e liberação), o teste é efetuado em forma continua, em circuito aberto, em moinho de 0,6m x 0,9m, com taxas que podem ir de 150 até 1000 Kg/h (de acordo com a nossa experiência em mais de uma dúzia de trabalhos executados para diversos minérios).

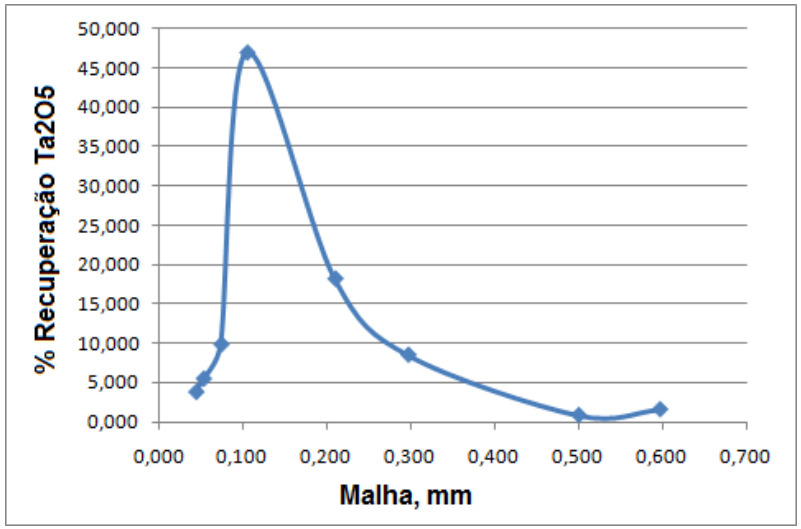
MOAGEM SELETIVA (Cont.)

Os trabalhos são acompanhados por profissionais da MOPE, desde o seu planejamento, execução, amostragem e avaliação de resultados.

Com base em parâmetros do teste: F80, P80, velocidade de rotação do moinho, carga de bolas e etc., é calculado o Wio (work índex operacional) do minério nas condições testadas.
(Programa **PROMILL** da MOPE)

MOAGEM SELETIVA (Cont.)

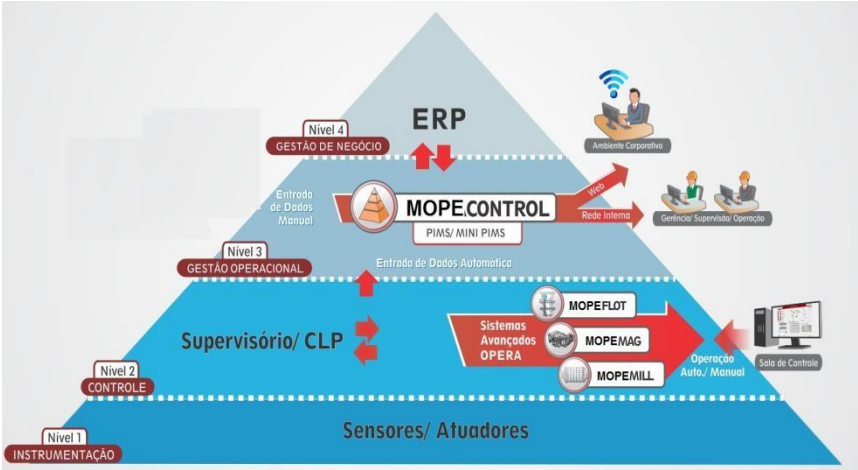
O minério, ao ser moído seletivamente apresenta maior liberação, com o mesmo ou até maior P80 que o obtido numa moagem convencional, em circuito fechado com hidrociclones. Em determinados casos, o uso de peneiras de alta frequência permitiría dividir o fluxo para outras operações ou para o descarte eventual de alguma fração grosseira do fluxo.



A moagem seletiva apresenta uma distribuição preferencial (seletiva) para cada um dos diversos componentes, dentro das faixas granulométricas.

FERRAMENTAS DA MOPE

O ***MODELO OPERACIONAL*** desenvolvido pelo Eng. Alexis Yovanovic desde 1987 e publicados em dois livros de autoria própria fornecem a base para as soluções MOPE.



Linha original de soluções avançadas de otimização e controle

MOPE conta com dois microscópios digitais, que permitem avaliar liberação e tamanho de grãos dos minérios de interesse e da ganga.

Parceria e base operacional com laboratórios conveniados, no Chile e no Brasil.

Modelo fenomenológico original para avaliação, simulação e otimização de diversas operações unitárias de beneficiamento de minérios.

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

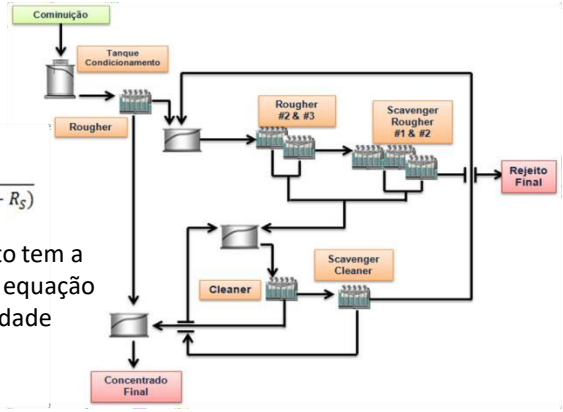
$$R = R_1 + R_2$$

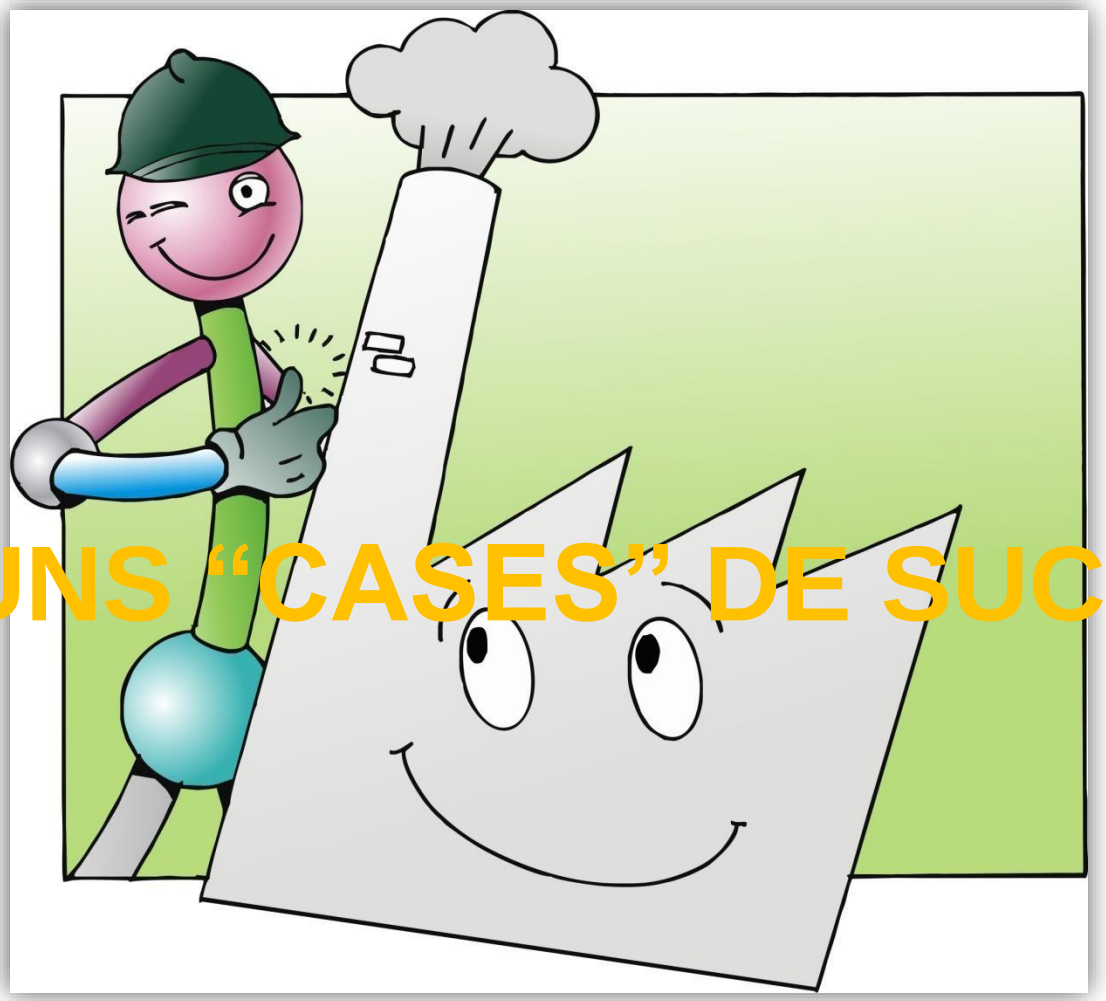
$$R_{CS} = \frac{R_{CL}}{1 - R_{CL}(1 - R_S)}$$

$$R_2 = \frac{R_r * R_{CS}}{1 - R_r(1 - R_{CRS})}$$

$$R_2 = \frac{R_r * \left[\frac{R_{CL}}{1 - R_{CL}(1 - R_S)}\right]}{1 - R_r\left[1 - \frac{R_{CL}}{1 - R_{CL}(1 - R_S)}\right]}$$

Cada circuito tem a sua própria equação de continuidade





ALGUNS “CASES” DE SUCESSO

MINÉRIO DE FERRO (2010)

Projeto Pedra de Ferro (Bamin) – Prêmio Excelência da Revista Mineral & Minérios em 2010

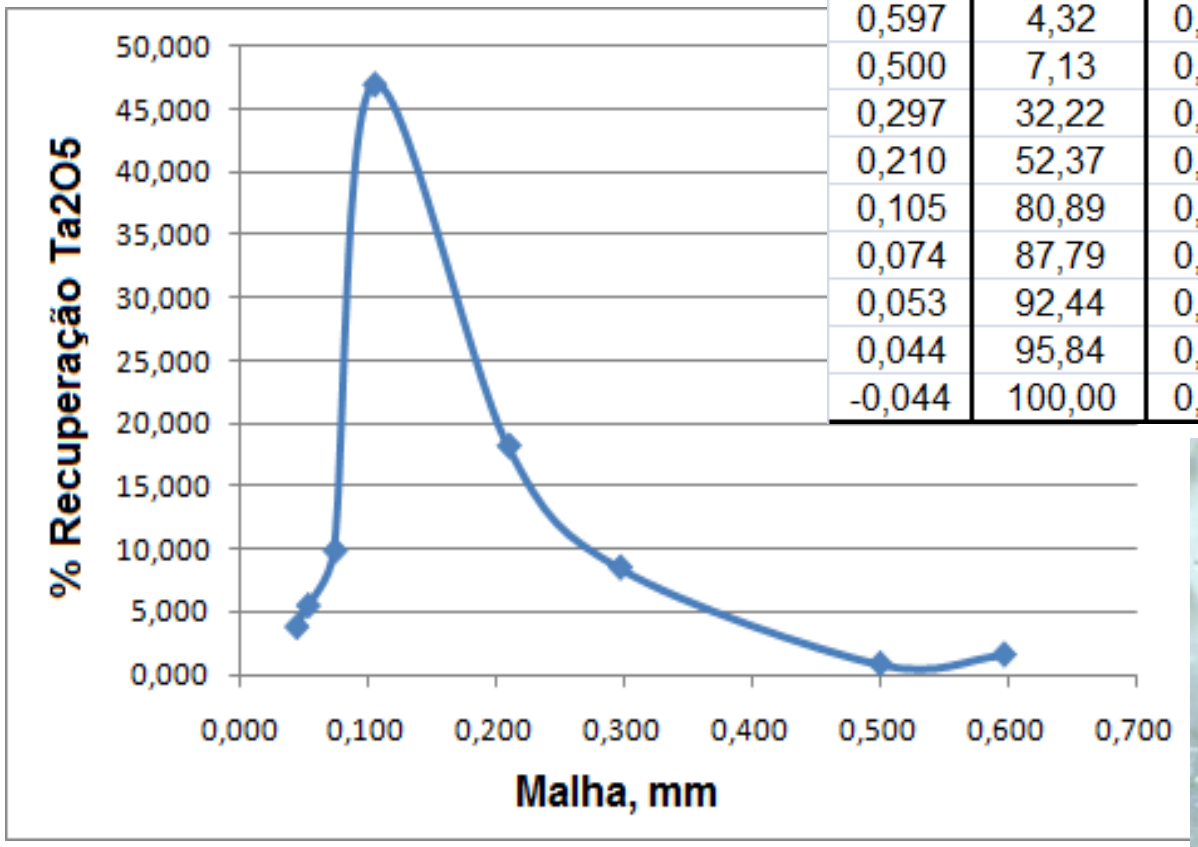
REDUÇÃO DE 50% DE CAPEX E 66% DE OPEX (Em relação a projeto convencional original)

Compilation and historic evaluation of 3 years of metallurgical research

Estudo executado por MOPE entre 2008 e 2009

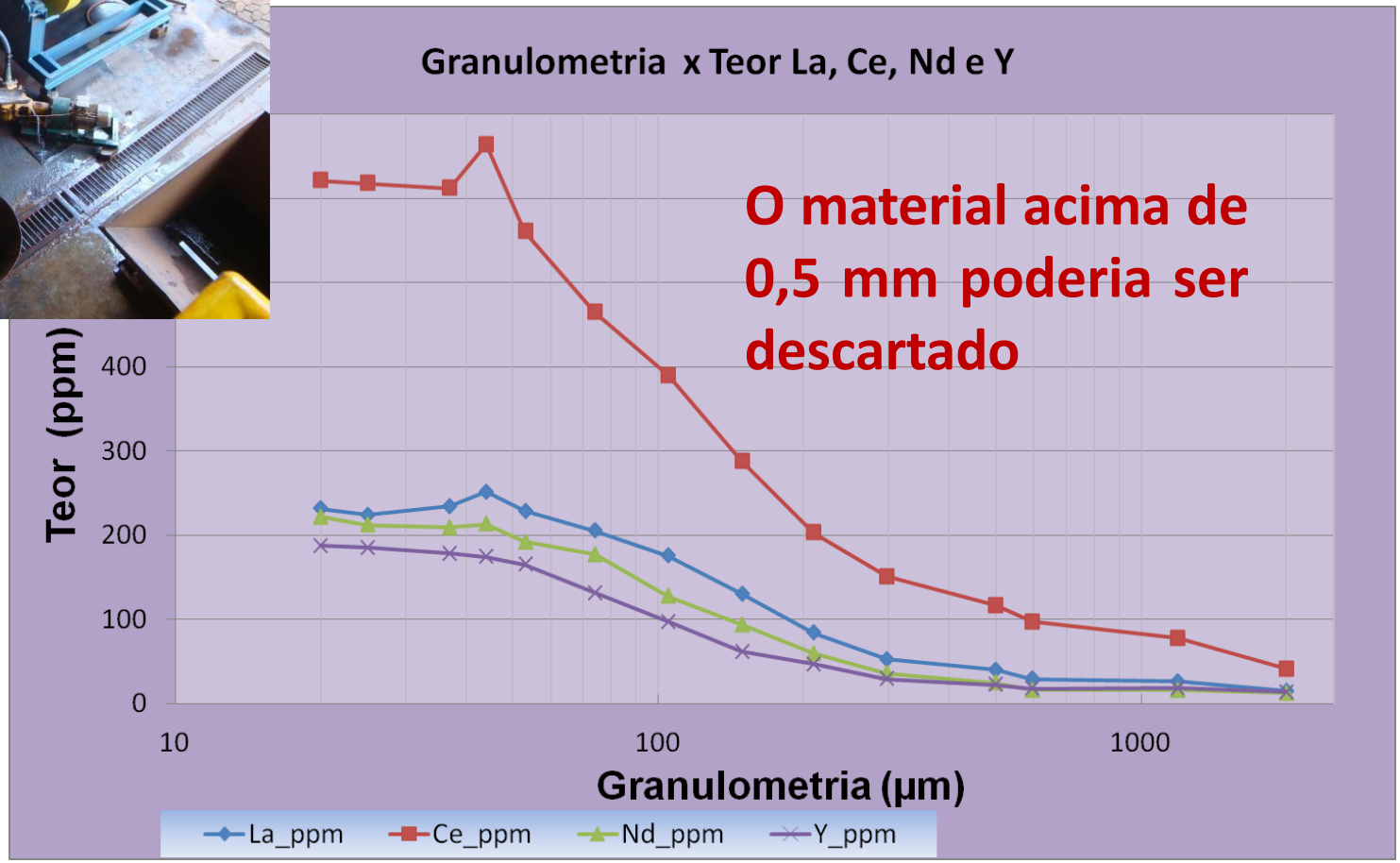
MOAGEM SELETIVA CASSITERITA, 2010

MOAGEM SELETIVA TANTALITA, 2011

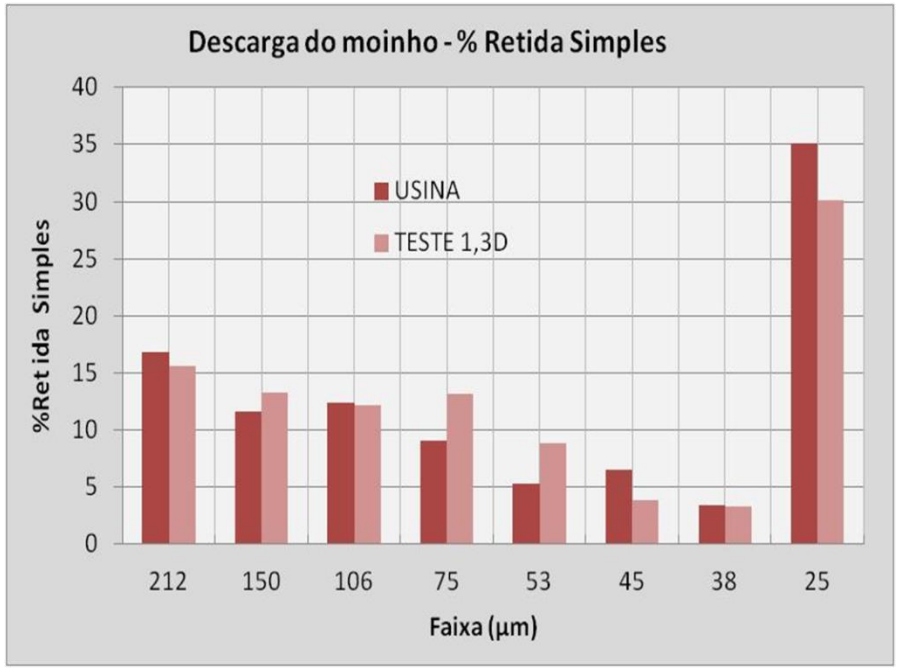


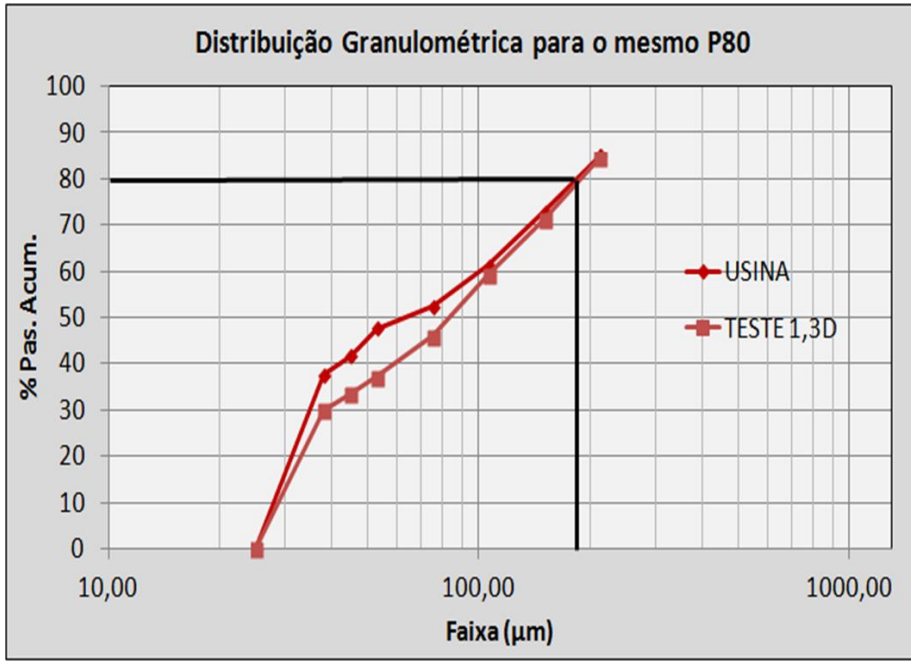
mm	% Massa Retida	%Sn	%Nb2O5	%Ta2O5	Rec. Ta2O5 Acumulada
0,597	4,32	0,068	0,179	0,016	1,56
0,500	7,13	0,057	0,162	0,013	2,39
0,297	32,22	0,056	0,163	0,015	10,89
0,210	52,37	0,066	0,259	0,04	29,11
0,105	80,89	0,087	0,390	0,073	76,15
0,074	87,79	0,105	0,367	0,063	85,98
0,053	92,44	0,125	0,336	0,052	91,44
0,044	95,84	0,138	0,333	0,049	95,21
-0,044	100,00	0,136	0,352	0,051	100,00

MOAGEM SELETIVA TERRAS RARAS, 2012



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.

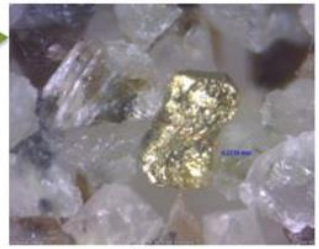
MOAGEM SELETIVA MINÉRIO DE COBRE, 2013

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.

CONCENTRAÇÃO SELETIVA DE WILLEMITA, 2014

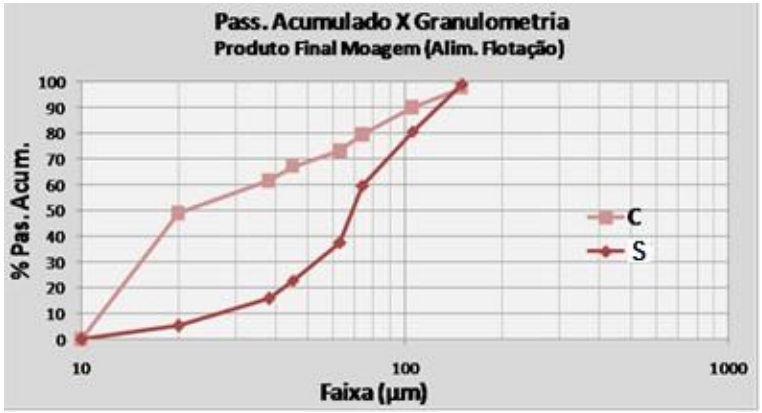
Produto da britagem 3ª

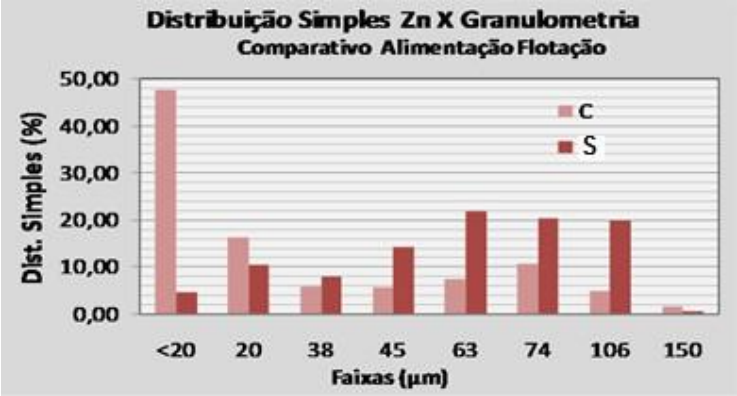
Descarga da moagem seletiva

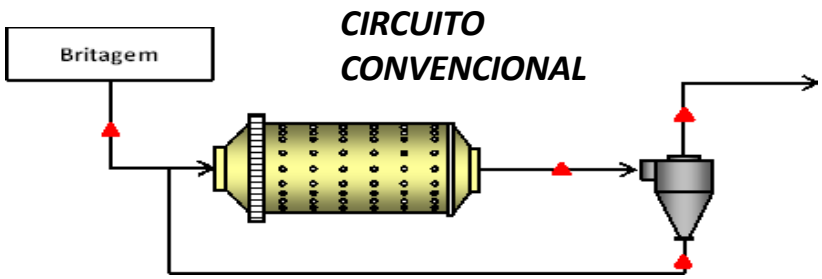
Depois da fragmentação seletiva (a seco) surgiu a oportunidade para recuperação de magnetita granulada, antes da moagem.

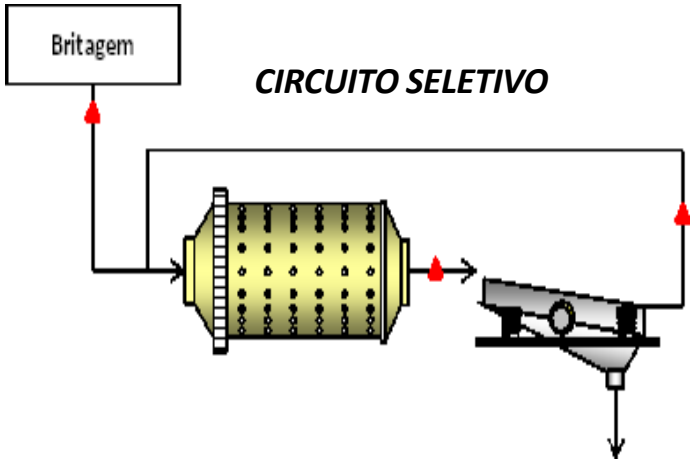
A concentração final poderá ocorrer sem necessidade de moer todo o material abaixo de 0,15 mm para alimentar a flotação.

CONCENTRAÇÃO SELETIVA DE WILLEMITA, 2014









O circuito S (Seletivo, com peneira HF) é mais eficiente que o circuito C (convencional), tanto no consumo energético como na qualidade do produto moído.

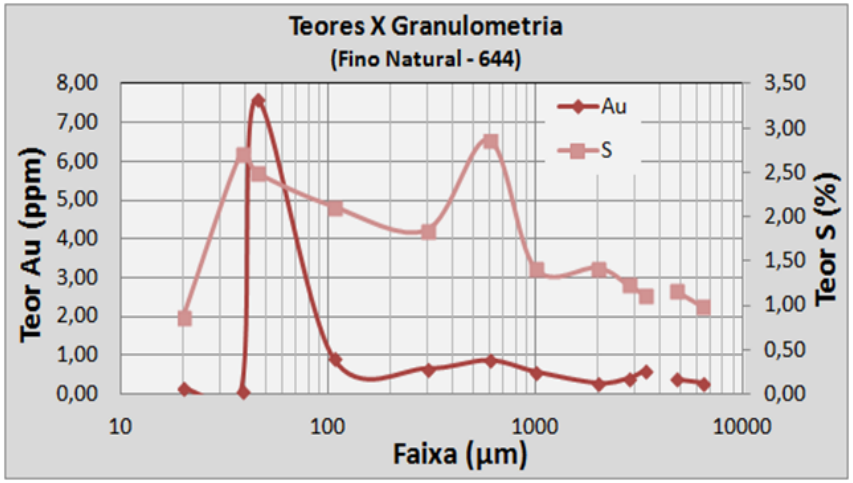
O material moído em forma seletiva apresenta uma distribuição mais uniforme de zinco, enquanto o do circuito convencional apresenta quase 50% do zinco contido no fluxo ultra fino (<20 µm)

FRAGMENTAÇÃO SELETIVA MINÉRIO DE OURO, 2015

0,6 a 1 mm | 0,3 a 0,6 mm | 0,1 a 0,3 mm

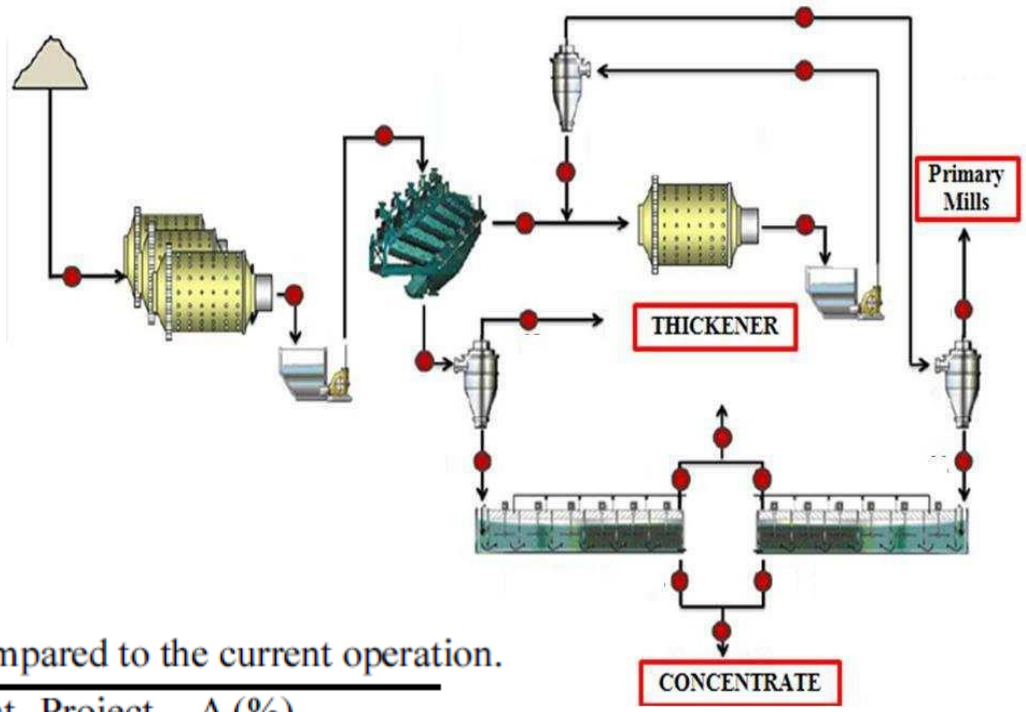
Liberação do minério

A fragmentação seletiva leva o Ouro para as parcelas mais finas do fluxo, permitindo o eventual descarte de ganga grosseira, antes de entrar ao moinho



CONCENTRAÇÃO SELETIVA MAGNESITA, 2015

Testes em escala piloto executados pela MOPE em 2015. Mediante as alterações propostas na concentradora (em operação) haveria um 20% de incremento na produção de concentrado, além de diversas melhorias no desempenho geral de custos e de controle operacional da usina.



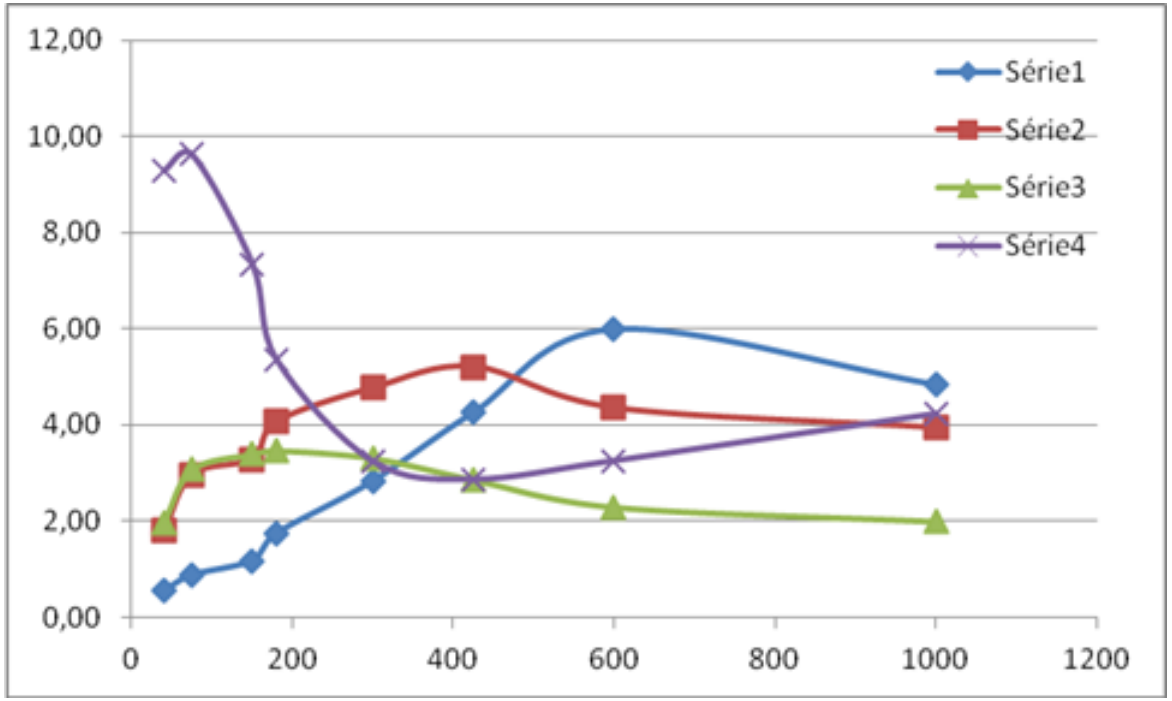
Capacity of the selective milling plant compared to the current operation.

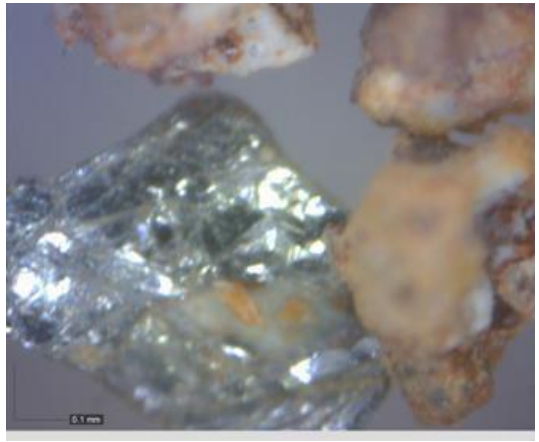
	Current	Project	Δ (%)
Feed (t/h)	90	100	+11
Production (t/h)	74	89	+20
Tailings (t/h)	16	11	-14
Mass Recovery (%)	82	89	+8.5
Water Consumption (m^3/h)	236	175	-26

O projeto foi implementado no ano 2017 aumentando a capacidade de produção em 27%

IMPC 2016: XXVIII International Mineral Processing Congress Proceedings - ISBN: 978-1-926872-29-2

CONCENTRAÇÃO SELETIVA MINÉRIO DE GRAFITA, 2016





As quatro amostras apresentam diferente distribuição granulo química. Inclusive em tamanhos grosseiros, a grafita se encontra bem liberada, ao ponto que foi flotada diretamente, sem moer.

CONCENTRAÇÃO SELETIVA MINÉRIO DE GRAFITA, 2016

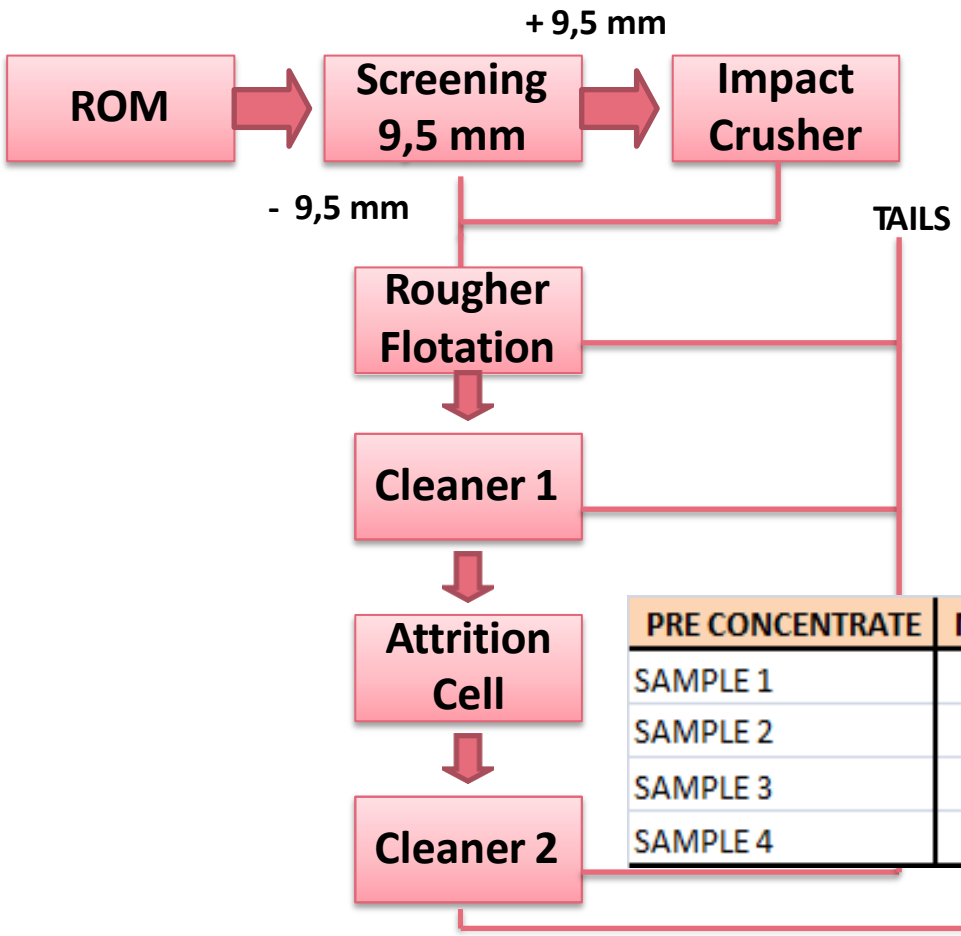
Ao moer o material, por causa do excesso de argila é gerada uma polpa viscosa que inibe a flotação (figura esquerda).

Em compensação, ao flotar diretamente, graças à excelente fragmentação seletiva do material, foi obtida uma flotação com alta seletividade e recuperação metalúrgica de carbono entre 85 e 90% (figura à direita).

Concentrado Rougher

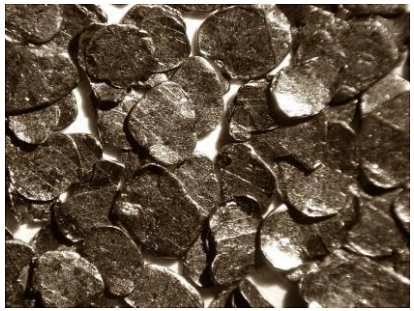
CONCENTRAÇÃO SELETIVA MINÉRIO DE GRAFITA, 2016

O projeto considera duas unidades independentes: a) Pré-concentração, perto de cada mina; e b) usina de produção de flakes.



O pré-concentrado seria enviado para uma planta de refino, obtendo flakes de grande tamanho e refinando o fluxo fino (powder).

PRE CONCENTRATE	Mass, %	%C	%Recovery
SAMPLE 1	4,07	93,53	85,93
SAMPLE 2	3,7	86,85	78,19
SAMPLE 3	2,5	90,96	79,79
SAMPLE 4	5,67	68,86	67,09



RESUMO

Nem sempre tudo o que sai da Mina deve chegar até as operações mais caras da usina concentradora.

Caracterização Geometalúrgica Inovadora

PRÉ-CONCENTRAÇÃO

Otimização Mina e Usina

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