

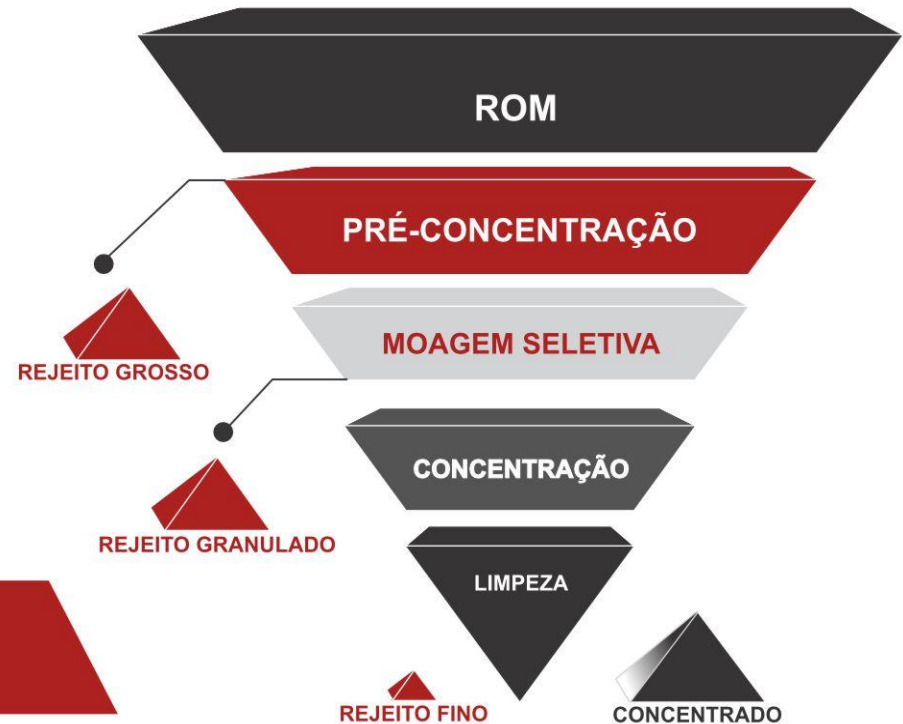


**MOPE**  
PROCESSOS MINERAIS

**NOVAS IDEIAS PARA UM NOVO TEMPO**

# CONCENTRAÇÃO SELETIVA

Nova Estratégia para Concentração de Minério de Ouro



Setembro , 2016

# Introdução

A MOPE propõe uma mudança de foco perante as significativas perdas de competitividade da mineração de Ouro, que são, dentre outras: diminuição de teores e 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 nos últimos 40 anos tem sido pelo gigantismo, privilegiando grandes fabricantes de equipamentos e agredindo o meio ambiente com excesso de rejeitos.

Nessa apresentação é discutida e questionada a estratégia de concentração de Ouro (na parte relativa ao beneficiamento mecânico) que tem-se seguido durante estes últimos 40 anos, incluindo exemplos do Chile e do Brasil. São expostos os problemas de hoje e propomos uma solução técnica. O diagnóstico e a eventual solução que aqui indicamos, em geral, é aplicável a diversos tipos de minério, não apenas ouro.

## O Problema

Mediante uma equivocada caracterização, suportada por critérios muito teóricos e pouco representativos (como  $W_i$ ,  $t_{10}$ ,  $P_{80}$ , 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 Ouro, que sofrem redução no Teor de cabeça e, eventualmente, aumento de dureza.



## Algumas Consequências

Embora o maior preço de mercado, a mineração de Ouro apresenta um quadro muito mais grave que a mineração de Cobre, perante o aumento dos custos, a queda de teor, o aumento do preço da energia e os problemas ambientais. No cobre, a usina mata um elefante para tirar deste uma pulga (o cadáver do elefante vai para a barragem, reduzido a carne moída). Já o minério de Ouro, deve pegar uma bactéria que habita na pulga, devendo matar tanto o elefante como a pulga, enviando ambos para a barragem, na forma de lama e rejeito ultrafino com restos de cianeto.

Apenas o melhor preço do Ouro no mercado é que tem permitido enfrentar este desafio aumentando a taxa de tratamento e os custos, mas, chega um momento que isso não mais adianta. Algumas minas estão sacrificando o seu teor de corte, para manter elevados teores de cabeça, rifando com isso as suas reservas. Alguns grandes projetos tem sido paralisados por restrições ambientais.

## A Fragmentação do Minério

Há diversas formas de aplicar energia para fragmentar um minério e, quando este é relativamente heterogêneo, a melhor força a aplicar é o impacto. Em escala de laboratório é utilizado o moinho de martelos e, em projetos industriais, é recomendado o britador do tipo VSI, Barmac (da Metso) ou similar. A etapa de moagem que se segue receberia um minério mais friável, adequado para forças menos intensivas de cominuição, consumindo menos energia.

Muitos ficariam surpresos se conhecessem a potencialidade que o minério oferece quando este é bem fragmentado e, ainda, como são simples e rápidos os testes que assim o comprovam. Depois de uma boa fragmentação existem enormes chances de pré-concentrar o minério “a seco”, elevando assim o teor antes de prosseguir para a usina. Lamentavelmente essa prática não é muito comum. A MOPE está ajudando a estabelecer estes procedimentos experimentais, em convênios com laboratórios, no Chile e Brasil.





# Cominuição Equivocada

A tecnologia SAG (o cavalo de Tróia dos fornecedores de equipamentos) está evidenciando os seus erros históricos, tanto pela estratégia equivocada de utilizar um caríssimo equipamento de moagem para executar o que uma simples britagem faria, com 4 ou 5 vezes menos energia, como pelo fato também equivocado de querer levar todo o minério para um determinado tamanho, sem questionar a sua heterogeneidade. Isso vale para todo o universo da Mineração.



## Cominuição Equivocada (cont.)

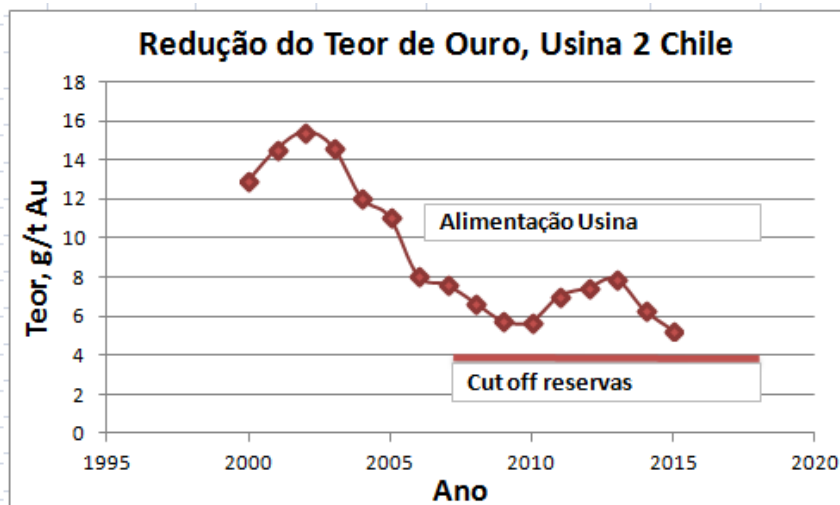
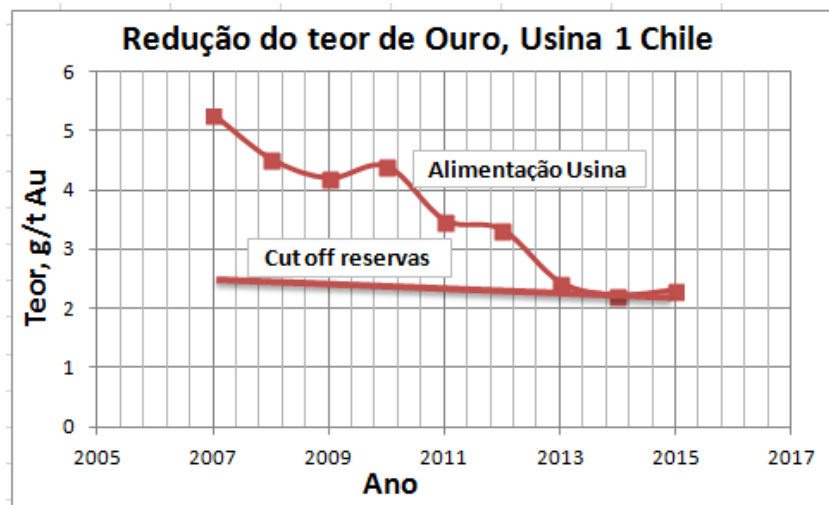
Para tentar mitigar o erro cometido ao ter implantado um moinho SAG, além de incluir britadores secundários na alimentação ou colocar britadores de pebbles, alguns tentam utilizar mais explosivos na mina, para maximizar a fragmentação. Ou seja, é feito de tudo para defender a errada decisão pelo SAG, gastando ainda mais. Alguns novos projetos tem observado esta situação e extirparam o moinho SAG do seu projeto original (há vários casos no Brasil, para diversos tipos de minério), mas, há alguns que, sem compreender o conceito de seletividade na cominuição, têm trocado o moinho SAG por um equipamento também inadequado, como o HPGR, que é próprio para minérios homogêneos, onde há pouca seletividade na fragmentação.

A história do beneficiamento de minérios, nestes últimos 40 anos, tem seguido ondas globais que levaram as mineradoras para a construção de projetos de cada vez maior tamanho, com elevados CAPEX e OPEX, suportados apenas pelos bons preços do mercado. Essa fase acabou!.



## A significativa redução dos teores de Ouro

Como acontece com qualquer bem mineral, ao longo do tempo, a tendência é de redução dos teores dos depósitos e, se nada for feito, também no minério alimentado às plantas concentradoras. Esta redução afeta também as reservas, ao manter elevados teores de corte para mitigar o efeito da queda de teor na usina e, ainda, pela expansão das unidades de produção para tratar mais massa para produzir a mesma quantidade de ouro metálico. Ou seja, sobe o custo e diminui a produtividade, ainda com um grande esforço de capital para bancar a expansão das unidades concentradoras.

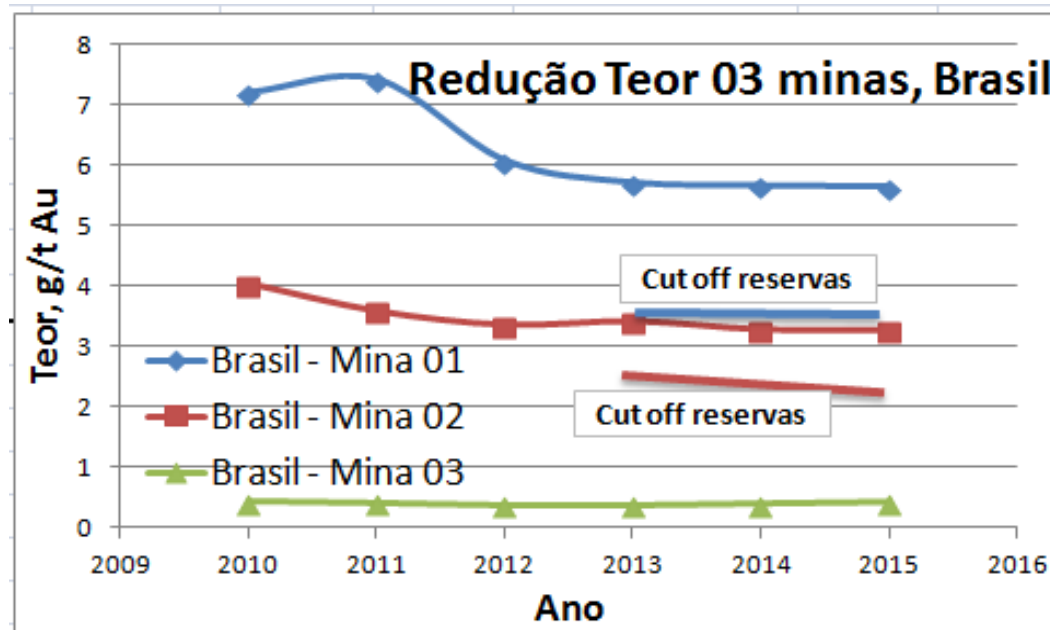


A queda de teor de Ouro em duas mineradoras chilenas



## A significativa redução dos teores de Ouro (cont.)

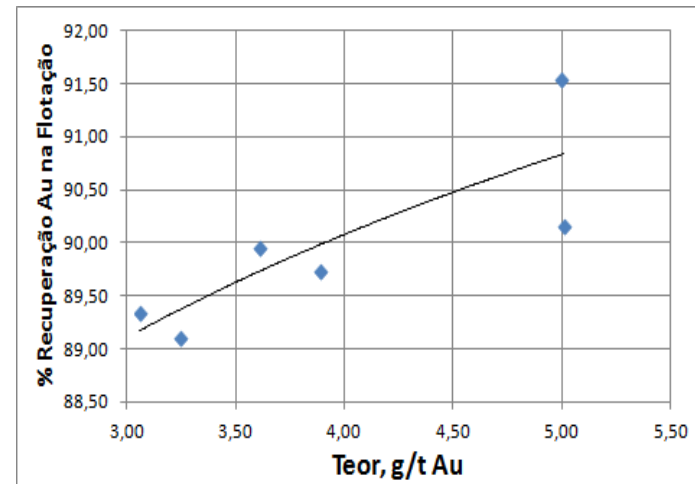
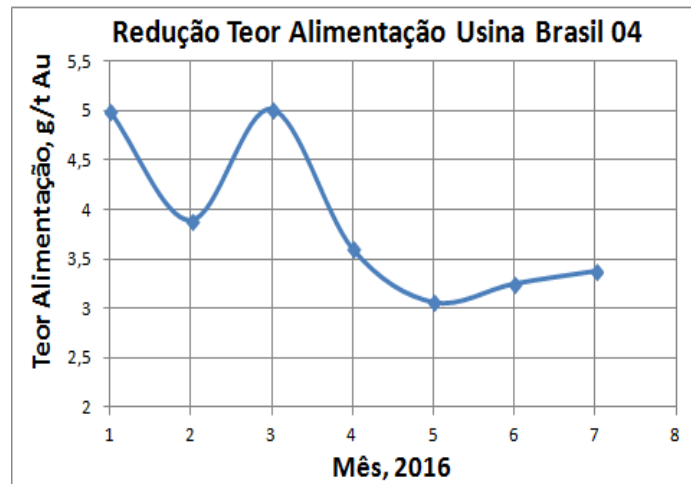
A redução de teor nos depósitos brasileiros não tem se mostrado tão dramática quanto no caso chileno, embora a tendência para o futuro próximo seja inevitável. No caso da usina 02, há muito proximidade entre o cut-off da mina com o teor que alimenta a planta. A mina 03 opera com um dos teores de Ouro mais baixos do mundo e, até agora, tem conseguido ser competitiva graças à enorme escala de produção.



A queda de teor de Ouro em três mineradoras brasileiras

## A significativa redução dos teores de Ouro (cont.)

Um estudo recente executado pela MOPE evidenciou uma queda vertiginosa no teor de Ouro na alimentação de uma usina concentradora em Minas Gerais, apenas durante estes primeiros meses de 2016. Obviamente, a recuperação metalúrgica de Ouro na flotação também caiu de forma significativa. Ao invés de investir na ampliação das usinas, para tratar cada vez mais minério (embora mais pobre) recomendamos trabalhar na fragmentação seletiva e pré-concentração do minério, para elevar o teor de cabeça, adaptando as mesmas instalações existentes para uma **Concentração Seletiva**.



## Redução da produtividade em Concentradoras de Ouro

Para lidar com a queda de teor, a política seguida durante estes últimos anos tem sido a ampliação das unidades concentradoras, para tratar mais minério, apenas para manter a produção de ouro metálico no final de cada ano.

Na figura abaixo, a partir de dados obtidos nos balanços anuais, onde se resume o desempenho histórico da usina 01 (Chile), observa-se que a ampliação a partir de 2012 permitiu uma leve redução do custo de produção, mas apenas até um determinado momento em que o teor de ouro cai ainda mais, voltando a subir o custo e, ainda, reduzindo levemente a produção de ouro metálico.

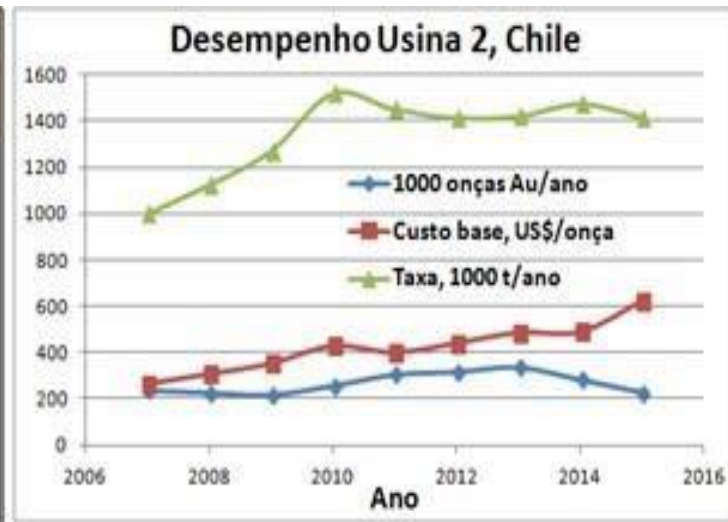
HISTÓRICO DE PRODUCCIÓN Usina 01, Chile					
Año	t usina x 1000	Ley g/t Au	%Recup.	Producción onzasx1000	OPEX, US\$/oz
2007	74	5,28	81,7	10,7	243
2008	472	4,53	84,2	64,6	398
2009	723	4,21	82,3	91,9	373
2010	778	4,41	83,7	105,6	416
2011	920,4	3,5	84	102,7	591
2012	902,8	3,34	81,1	103,8	797
2013	1755	2,45	76,1	118,6	747
2014	1730	2,23	80,8	119,6	617
2015	1857	2,32	81,1	112,6	712



## Redução da produtividade em Concentradoras de Ouro

Na Usina 02, depois de dois projetos consecutivos de expansão, hoje cai a produção de ouro metálico e se observa a tendência de elevação do custo de produção. Qual seria o passo seguinte, investir numa nova ampliação? Terão que moer mais ganga?. É enfrentado o custo de produção e mantida a produção de ouro metálico quase que apenas com base na expansão física da usina, para tratar mais minério. Até recentemente, a estratégia das mineradoras estava baseada apenas na ampliação das usinas. Acreditamos que esse paradigma possa mudar.

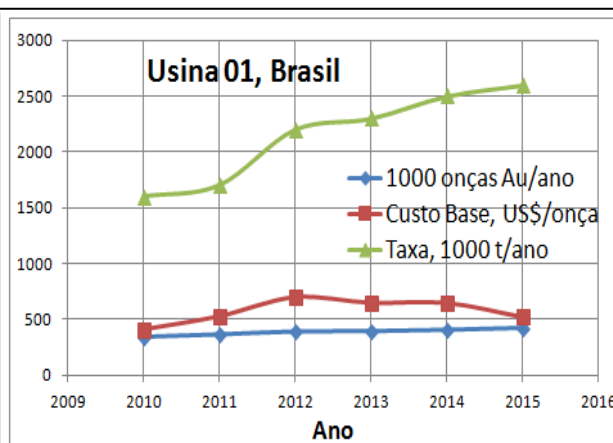
HISTÓRICO DE PRODUCCIÓN USINA 02, Chile					
Año	t usina x 1000	Ley g/t Au	%Recup.	Producción onzasx1000	OPEX, US\$/oz
2007	999	7,64	94,2	235	265
2008	1125	6,73	91,9	225	308
2009	1272	5,79	91,3	216	353
2010	1522	5,74	91,1	257	428
2011	1452	7,05	93	306	400
2012	1415	7,47	93,5	318	440
2013	1422	7,94	93	338	485
2014	1476	6,36	93,3	283	488
2015	1418	5,32	93,6	227	621



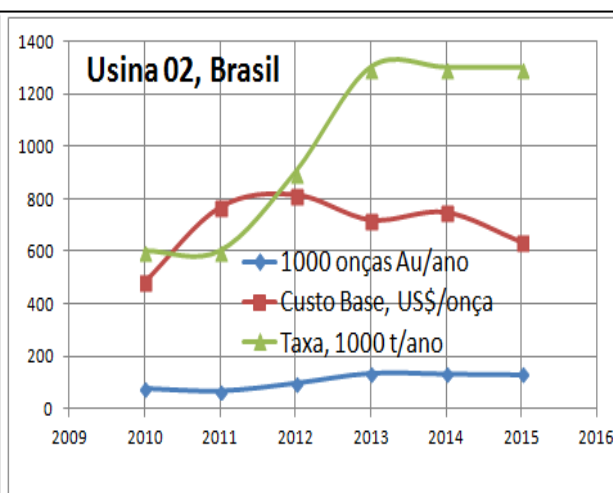
## Redução da produtividade em Concentradoras de Ouro

Nas usinas brasileiras o problema é similar, como ilustrado a seguir.

HISTÓRICO DE PRODUÇÃO USINA 01, Brasil					
Año	t usina x 1000	Ley g/t Au	%Recup.	Producción onzasx1000	OPEX, US\$/oz
2010	1600	7,21	83,1	338	407
2011	1700	7,43	81,0	361	525
2012	2200	6,07	82,4	388	696
2013	2300	5,7	84,6	391	646
2014	2500	5,65	80,9	403	644
2015	2600	5,63	81,5	421	518



HISTÓRICO DE PRODUÇÃO USINA 02, Brasil					
Año	t usina x 1000	Ley g/t Au	%Recup.	Producción onzasx1000	OPEX, US\$/oz
2010	600	4,05	89,8	77	481
2011	600	3,59	88,2	67	767
2012	900	3,36	91,9	98	816
2013	1300	3,42	88,0	138	719
2014	1300	3,28	89,8	135	748
2015	1300	3,27	88,0	132	635

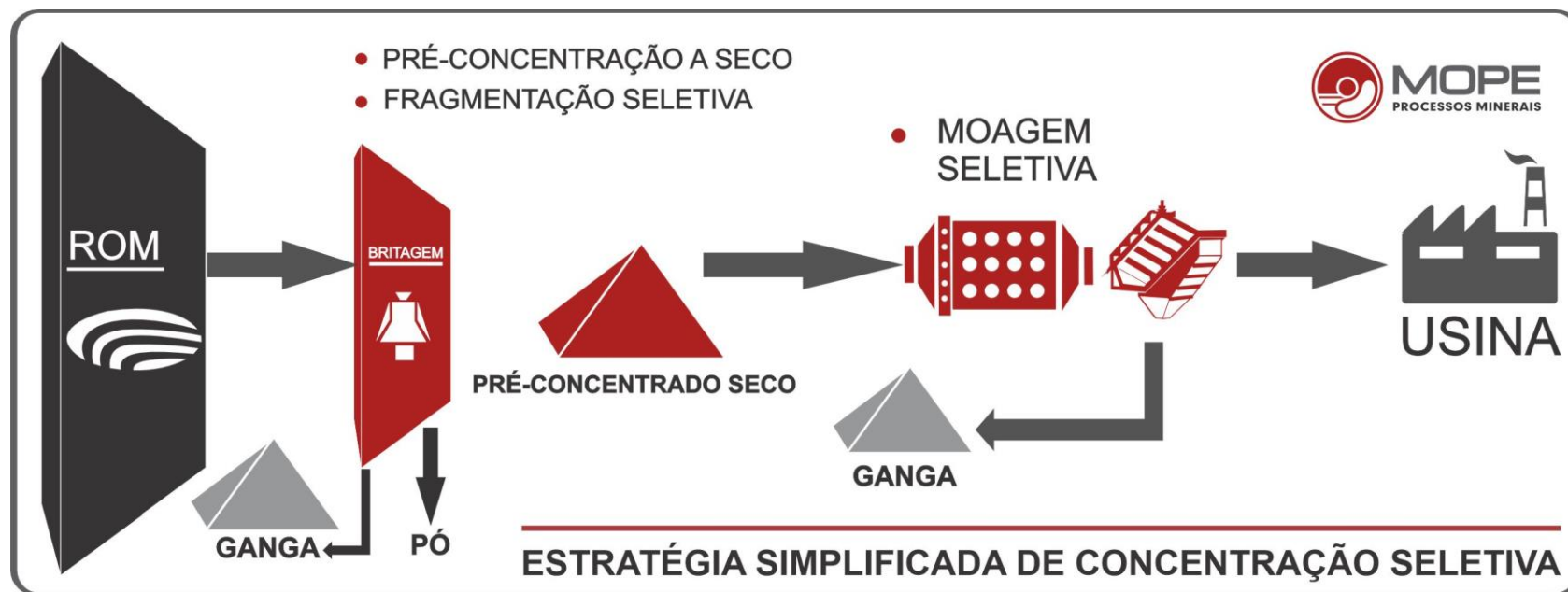




## A Concentração Seletiva

No Chile, em geral, os laboratórios metalúrgicos e consultoras estão dirigidos a estudos de cominuição pensando em minérios homogêneos, onde erradamente se supõe que qualquer fragmento possui idêntico teor médio da rocha original.

Hoje contamos com a parceria de laboratórios e plantas piloto, no Chile e Brasil para estudar a aplicação desta nova abordagem, para qualquer tipo de minério. .



## 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.

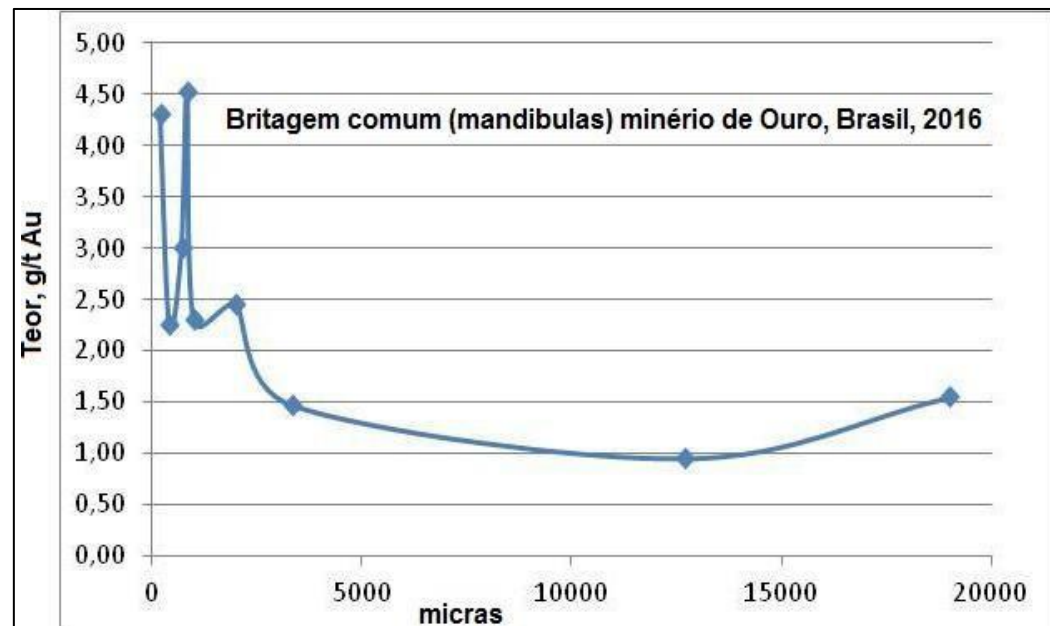


A ação do impacto é como extrair os grãos de amendoim sem quebrá-los desnecessariamente. A fragmentação seletiva libera adequadamente a ganga do minério de interesse, com o máximo P80 quanto possível.

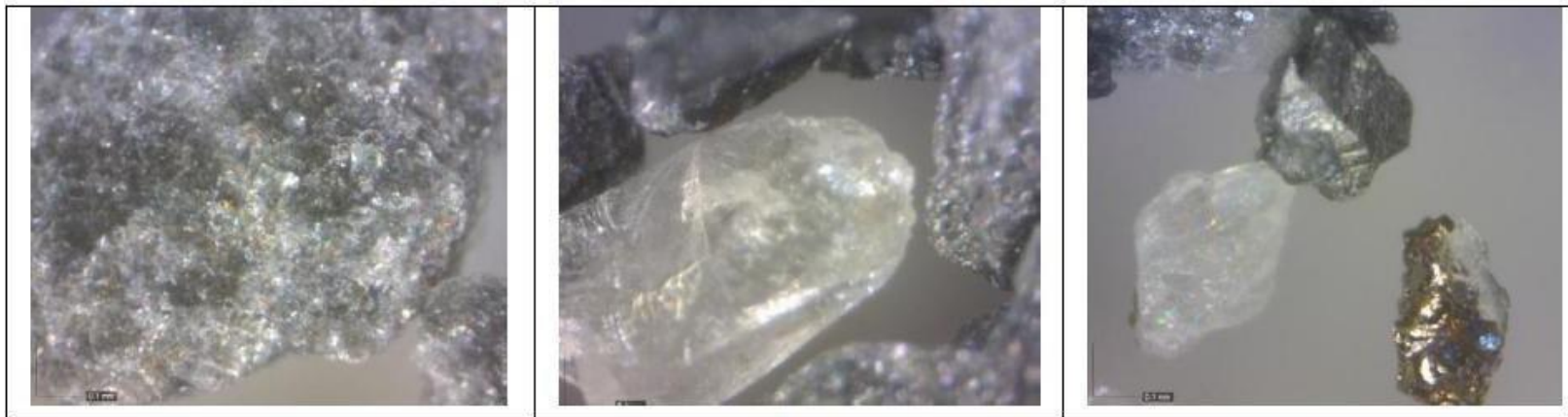
## Fragmentação Seletiva do Minério de Ouro

Mesmo tendo sido britado em britador de mandíbulas, o minério apresentado no exemplo abaixo mostra que muita ganga poderia ser descartada se o produto da britagem fosse peneirado, por exemplo, em ¼ de polegada (6300 µm). Numa operação de moagem existe comumente uma significativa seletividade no produto, principalmente em moagem em circuito aberto (ou com baixa % de carga circulante), e baixo enchimento de bolas, que definimos como moagem seletiva.

Quanto mais heterogêneo for o minério mais massa poderia ser retirada e devolvida para a mina, inclusive com menor %Au que o teor de corte da mina, evitando o seu transporte para a concentradora e “enriquecendo” o novo ROM.



## FRAGMENTAÇÃO SELETIVA MINÉRIO DE OURO, 2015



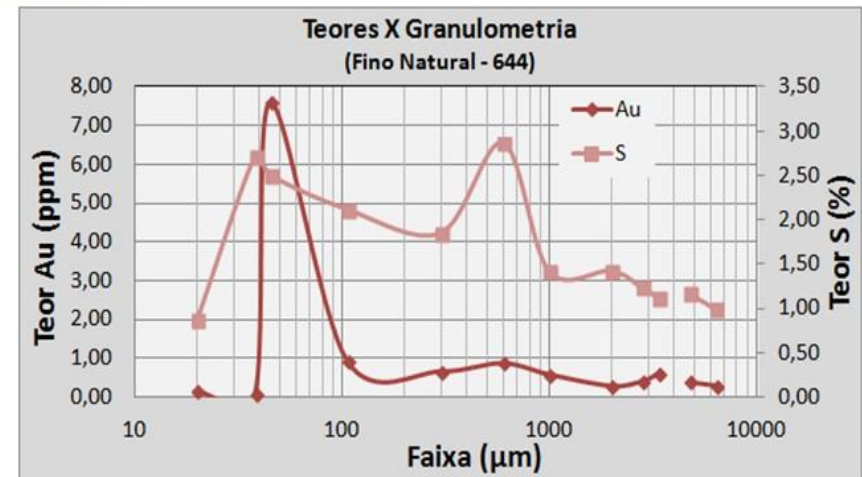
0,6 a 1 mm

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





# 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.

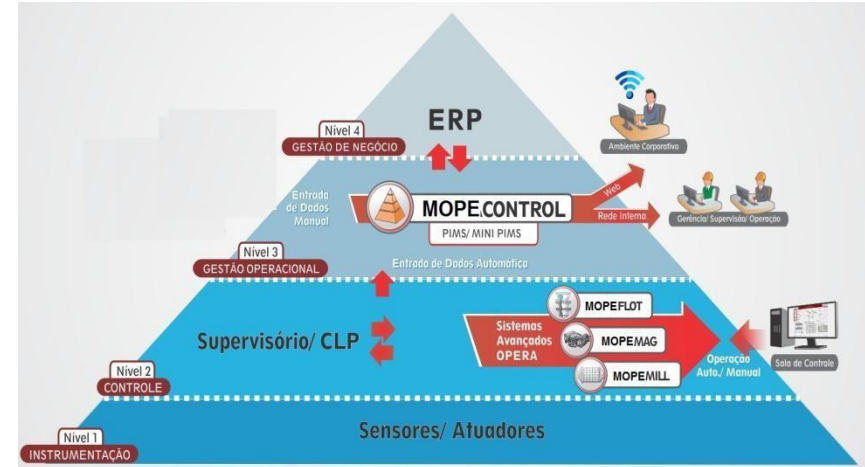
MOPE conta com dois microscópios digitais, que permitem avaliar liberação e tamanho de grãos dos minérios de interesse e da ganga.



Parceria e base operacional no laboratório da Fundação Gorceix (Ouro Preto, MG)



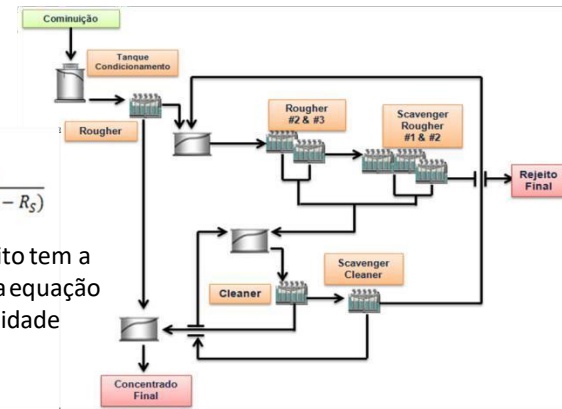
O MOPETOOLS é uma caixa de ferramentas de uso interno, todas desenvolvidas com base no **modelo operacional**, para cálculos e simulações de diversas operações unitárias.



Linha original de soluções avançadas de otimização e controle



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



$$R = R_1 + R_2$$

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

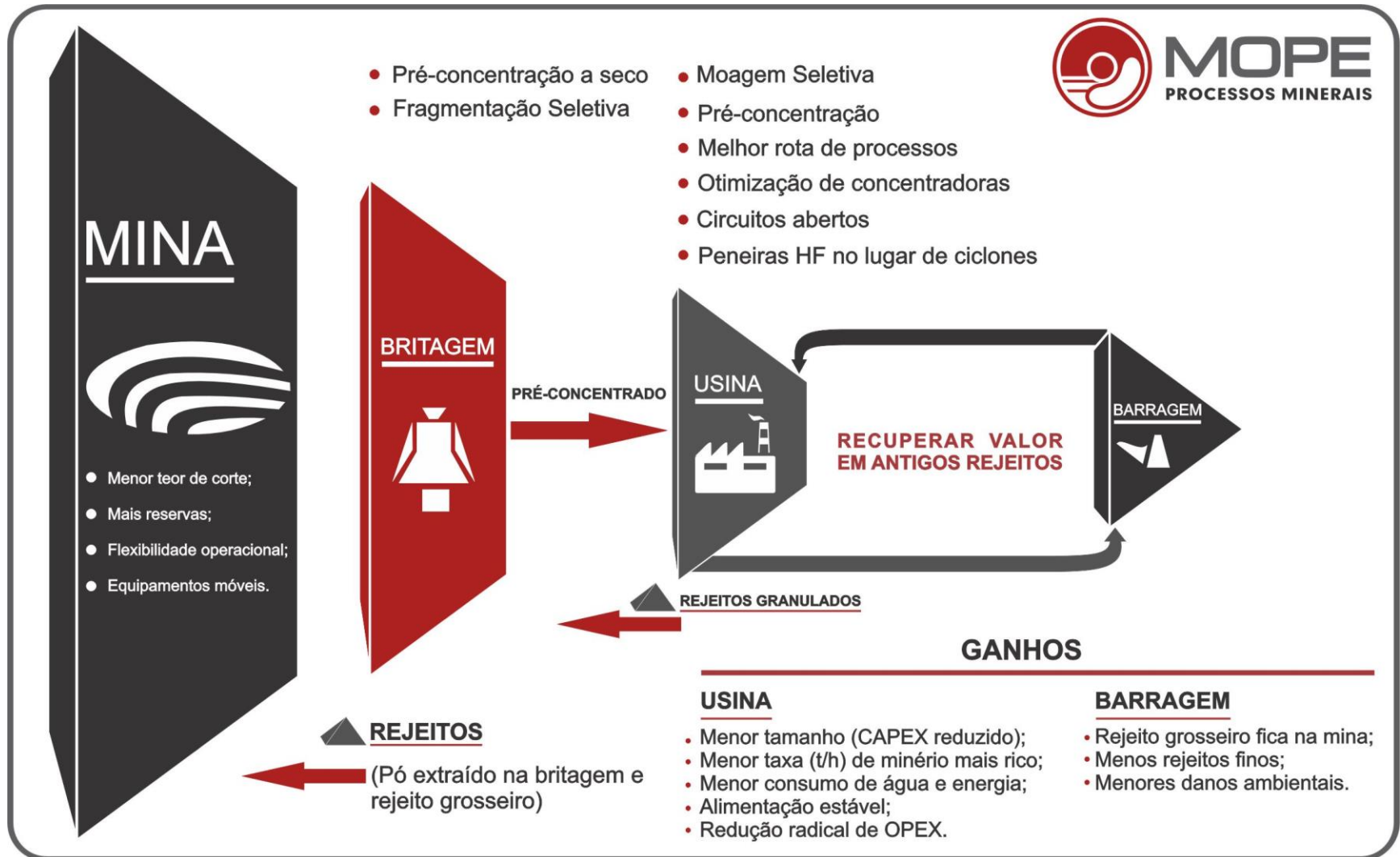
$$R_2 = \frac{R_r * R_{CS}}{1 - R_r(1 - R_{CRS})}$$

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

Cada circuito tem a sua própria equação de continuidade



## RESUMO DA NOVA ESTRATÉGIA



Melhor desempenho, com mínimos CAPEX/OPEX e menores riscos ambientais.

# PRÉ-CONCENTRAÇÃO

A peça que faltava!



---

Alexis Yovanovic | Diretor Técnico

Rua Califórnia, 281 / 103 - Sion - BH/MG

Tel.: +55. 31. 3285-3923 | 31. 98413-4077

[ayovanovic@modeloperacional.com.br](mailto:ayovanovic@modeloperacional.com.br)

[www.modeloperacional.com.br](http://www.modeloperacional.com.br)

