

# CONCENTRACIÓN SELECTIVA

Nueva tendencia en el Beneficio de Minerales



# CONCENTRACIÓN SELECTIVA

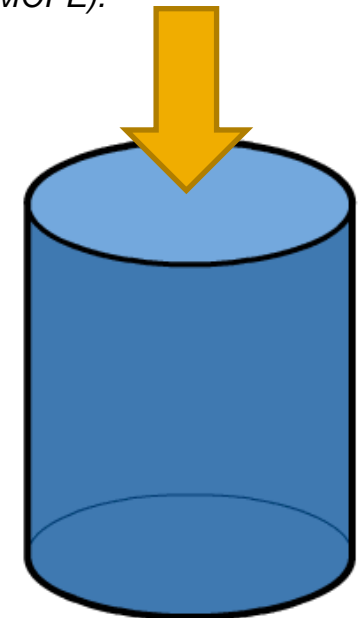
MOPE propone un cambio de foco ante las naturales pérdidas de competitividad de la minería, que son, entre otras: disminución de leyes y de reservas; diseminación de pequeños depósitos; elevado costo de energía; falta de agua; problemas logísticos; restricciones socio-ambientales y menores precios de 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.

El camino aquí propuesto, de **Concentración Selectiva**, apunta para la mínima Concentradora con la mínima generación de residuos finos, focalizando ahora en la conminución selectiva y pre-concentración del mineral, priorizando la mejor fragmentación y liberación de ganga y ahorrando mucho dinero en las Concentradoras, reduciendo los problemas ambientales. Proyectar y operar una planta con este concepto reduciría significativamente el uso de capital y los costos de operación, así como el periodo de ramp-up.

# ALGUNOS NÚMEROS

Si una planta fue implantada para producir 25 millones de toneladas por año de concentrado de mineral de hierro y, a lo largo del tiempo (como es de regla general) la ley del ROM empieza a caer, parece evidente que la concentradora deberá ser ampliada y la cantidad de relaves generados aumentará asustadoramente, 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	<b>0</b>	70	25	1359	<b>0</b>
50	5.285	<b>17</b>	60	25	2114	<b>56</b>
45	5.765	<b>27</b>	55	25	2594	<b>91</b>
40	7.047	<b>56</b>	45	25	3876	<b>185</b>
35	8.345	<b>84</b>	38	25	5174	<b>281</b>
30	9.909	<b>119</b>	32	25	6738	<b>396</b>

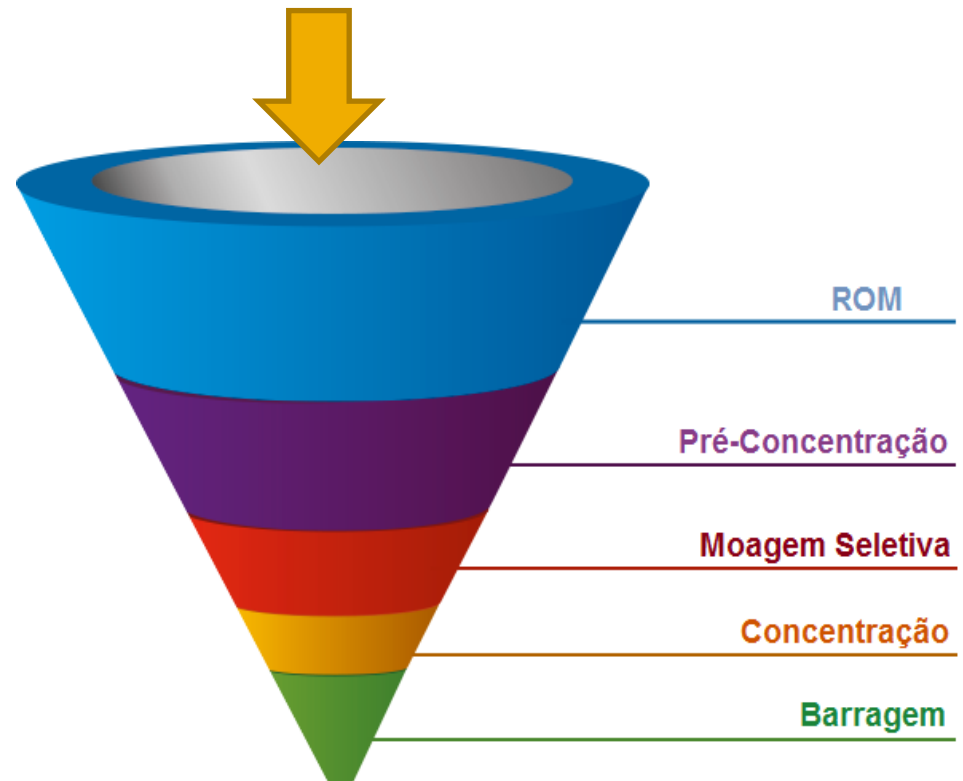


**Se gasta más, apenas en procesar y depositar más ganga**

# INVIRTIENDO LA LÓGICA ACTUAL

Debe ser evaluada la conminución selectiva y la pre-concentración, enriqueciendo la ley de alimentación y reduciendo la masa alimentada en la medida en que se avanza a las operaciones más caras de concentración, todavía, reduciendo los problemas ambientales.

Muchos se sorprenderían si conocieran la potencialidad que el mineral ofrece cuando es bien fragmentado y, además, lo fácil y rápido que son los testes que lo comprueban.



Mínimos CAPEX, OPEX y mínima generación de residuos finos

# LA NUEVA ESTRATEGIA

Testes de fragmentación selectiva



## PRE-CONCENTRACIÓN



Testes de molienda selectiva y pre-concentración

Mejor ruta de procesos.  
Optimización de concentradoras



Circuitos Abiertos  
Harneros HF en vez de ciclones

## 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

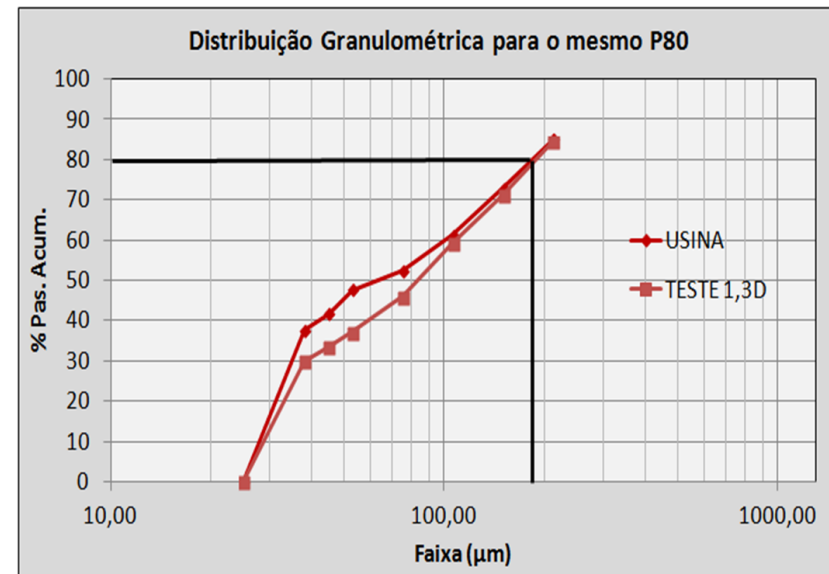


# PARADIGMAS A ROMPER

# PARADIGMAS A ROMPER

MOPE presenta una nueva filosofía para el beneficio de minerales, que envuelve nuevos conceptos para la pesquisa metalúrgica e ingeniería conceptual. Para eso, es necesario cuestionar algunas metodologías y/o paradigmas, que nortean los trabajos experimentales y de desarrollo de proyectos, en estos últimos 40 años.

**P80** – Esta forma de evaluar el tamaño medio del flujo carece del debido cuidado en detalles, principalmente en su relación con la liberación del mineral y su forma de fragmentación. Así, un mineral puede presentar el mismo P80, molido en batelada, en circuito cerrado con ciclones, en circuito abierto (selectivo) y etc., donde cada uno de estos resultados conduce a un grado de liberación muy diferente.

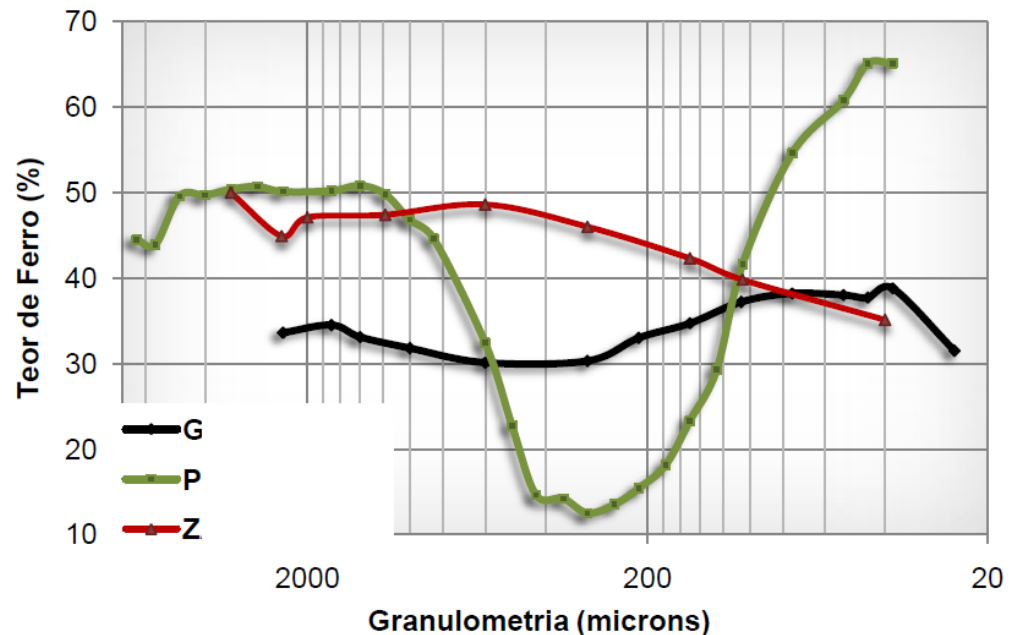


**Mismo P80, mas diferente  
distribución granulométrica**

## PARADIGMAS A ROMPER (Cont.)

**Ley de cabeza** – La evaluación de la ley media del flujo también carece del debido cuidado, principalmente en su relación con la distribución del mineral de interés dentro de las diversas fajas granulométricas, todavía, dependiendo de la forma más o menos selectiva de su fragmentación. Así, un mineral puede presentar una determinada ley de cabeza, mas el contenido de mineral de interés viene distribuido en forma particular y preferencial dentro del flujo.

**Ley de Fe por tamaño en tres diferentes minerales de hierro, con la misma “ley de cabeza”**

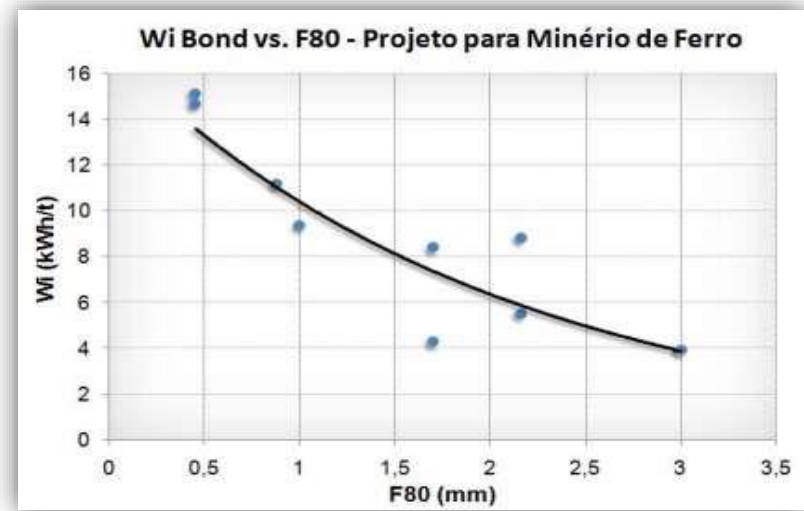
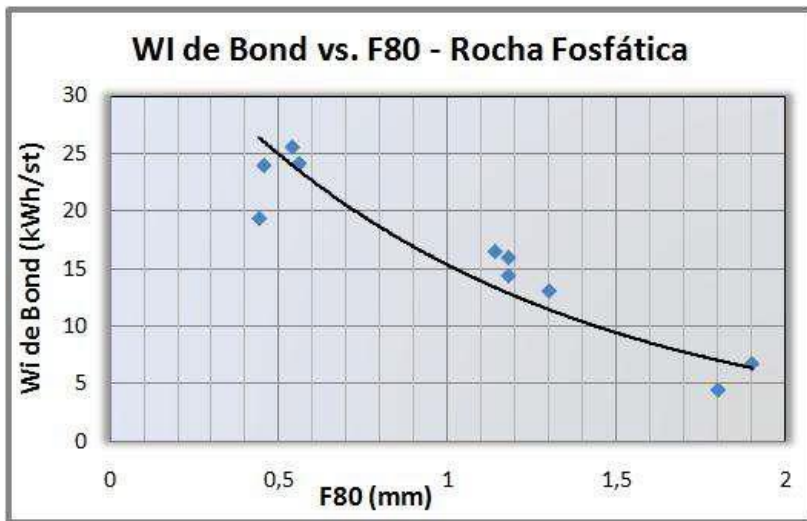


Comparação da granuloquímica de Ferro para três diferentes depósitos.



## PARADIGMAS A ROMPER (Cont.)

**Wi, ley de Bond** – El valor de Wi no es una constante, como establecido por F. Bond. Se observa que el valor de Wi varía conforme el valor de F80 del teste, contrariando la “Ley de Bond”. Así, para una operación de molienda más grosera, el Wi es más bajo que para una molienda secundaria, donde el F80 es generalmente menor que 0,5 mm. En minerales más heterogéneos este aspecto es crucial y conduce a serios errores en el dimensionamiento de circuitos de molienda.



**Para minerales más pobres y/o heterogéneos, MOPE estableció un método en planta piloto para la obtención del Work Índice Operacional (Wio)**

## PARADIGMAS A ROMPER (Cont.)

### • Circuitos Cerrados

Los circuitos cerrados son extremadamente ineficientes, principalmente los circuitos con 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

## PERU

72% de aumento de Producción

## 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/día	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

XXXVIII  
Convención  
Minera  
2007 MINING CONVENTION  
EXTMIN 2007  
10 años (years)

INSTITUTO  
DE INGENIEROS  
DE MINAS  
DEL PERU

### TRABAJO TÉCNICO

“CIRCUITOS ABIERTOS - ALTERNATIVA DE MEJORA EN LA PERFORMACE METALURGICA EN CONCENTRADORAS”

Hermes Vilchez Méndez

Empresa Minera Los Quenuales - Iscaycruz

## PARADIGMAS A ROMPER (Cont.)

Existen numerosos otros paradigmas o prácticas que, mediante este nuevo concepto de **Concentración Selectiva**, quedarán obsoletos en poco tiempo.

- Uso de hidrociclones como equipos de clasificación de tamaño en circuitos cerrados de molienda;
- Exceso de Factores de “Eficiencia” en nuevos proyectos;
- “Factor de proyecto “excesivo, en muchos proyectos;
- Buscar la máxima recuperación másica y metalúrgica del proyecto a cualquier costo;
- Utilización de costosos “patios de homogeneización” en la alimentación de Concentradoras;
- Otros diversos conceptos, discutidos a lo largo de esta presentación.





# MITOS TECNOLÓGICOS

Mientras 100 toneladas R.O.M. avanzan por el flujo principal de la planta, 200 están de vuelta por las correas transportadoras en el chancado, 600 son bombeadas en la contramano por el circuito de molienda y, en las operaciones siguientes, el exceso de dilución en pulpas llega a duplicar o hasta triplicar el caudal (y el volumen de los equipos). Además, decenas de toneladas recirculan inocuamente por la Concentradora, disfrazando el desempeño de las operaciones envueltas y perjudicando los resultados metalúrgicos.

**Quien no conoce bien las operaciones las esconde con cargas circulantes**



**Proyecto de Concentradora**



## MITOS TECNOLÓGICOS (Cont.)

**SAG** – Los argumentos que históricamente favorecieron la evaluación de molinos SAG frente a los sistemas convencionales de conminución están con los días contados. No existe, en la práctica industrial, reducción de consumo de energía ni de costos de operación en general, como era imaginado en los teóricos testes de evaluación, en la etapa de proyecto, cuando eran colocados en ridículo los tradicionales sistemas de chancado, favoreciendo el SAG. El sistema convencional fue y continua siendo más económico, principalmente con los actuales precios de la energía eléctrica.

### **Moagem SAG – Acabou o Mito?**

Artículo de capa en la Revista  
**Minérios & Minerales**, Ed. 290  
Septiembre/Octubre 2006



## MITOS TECNOLÓGICOS (Cont.)

**SAG** – Proyectos SAG implantados recientemente en Brasil, con rarísima excepción, resultaron en problemas operacionales y comerciales. Muchas sorpresas desagradables pueden ser todavía esperadas en la implantación de molinos SAG en diversos nuevos proyectos, que afortunadamente todavía no salen del papel. En la minería brasileña, este ha sido el mayor mito tecnológico en los últimos años, propiciado por los grandes fabricantes de equipos.

Las concentradoras viven todavía en la edad media, sin ciencia fenomenológica de base, que explique sus operaciones unitarias y, si no mejora, merece convivir con paradigmas, “tablitas” de fabricantes, “mitos tecnológicos” y permitiendo la entrada de caballos de Troya dentro de las plantas.



## MITOS TECNOLÓGICOS (Cont.)

Existen numerosos otros mitos tecnológicos o prácticas que, mediante este nuevo concepto de **Concentración Selectiva**, quedarán obsoletos en poco tiempo.

- Gigantismo en proyectos;
- Circuitos de Molienda Semi Autógena;
- Flotación “Scavenger” sin nueva liberación;
- Elevada carga de bolas en molinos;
- Molienda en sistema: “high energy” (máxima aplicación de energía al molino);
- Elevada dilución en pulpas, que hacen aumentar el volumen de los equipos y/o reducir el tiempo de residencia del flujo;
- Otros diversos conceptos, discutidos a lo largo de esta presentación.





A photograph of an industrial laboratory setting. The scene is filled with various pieces of machinery, including large metal funnels, pipes, and complex structures. A prominent yellow safety railing is visible in the background. A white box with the word "ACIDO" is attached to one of the machines. The floor is wet and reflective. The text "TRABAJOS EXPERIMENTALES" is overlaid in large, bold, yellow letters across the center of the image.

# TRABAJOS EXPERIMENTALES

# FRAGMENTACIÓN SELECTIVA

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.



## CONCEPTO

Extraer los granos de maní sin quebrarlos desnecesariamente.

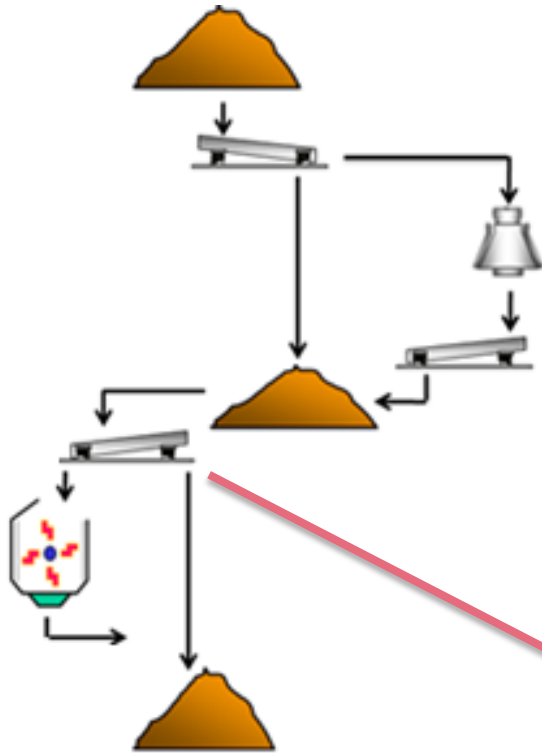
Liberar adecuadamente la ganga y el mineral de interés con el máximo P80 posible

## FRAGMENTACIÓN SELECTIVA (Cont.)

**MUESTRA:** Alrededor de 20 Kg de material grosero (del tipo descargado por un chancador primario), debajo de 100 mm. Sirve también testigo de sondaje, para estudios de Concentración Selectiva en nuevos proyectos.



## FRAGMENTACIÓN SELECTIVA (Cont.)



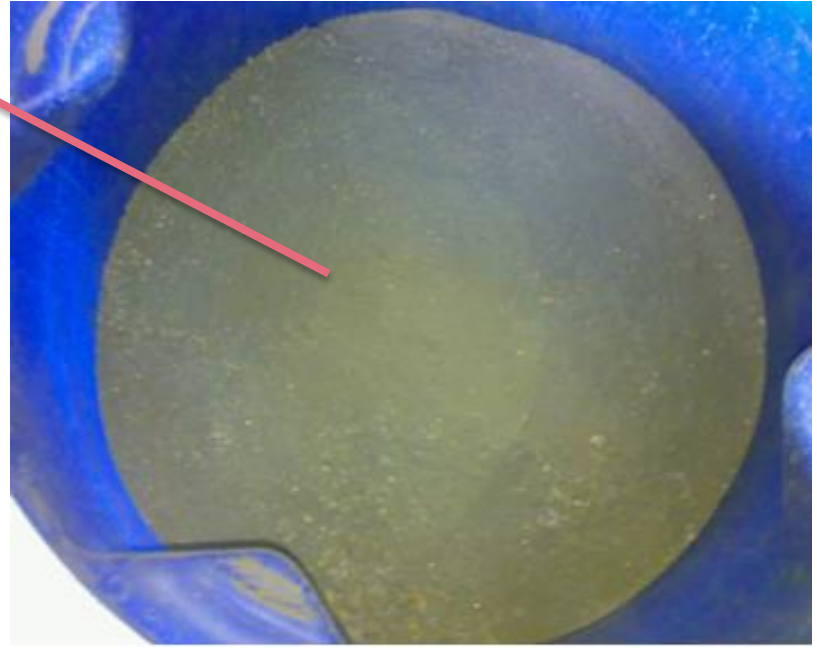
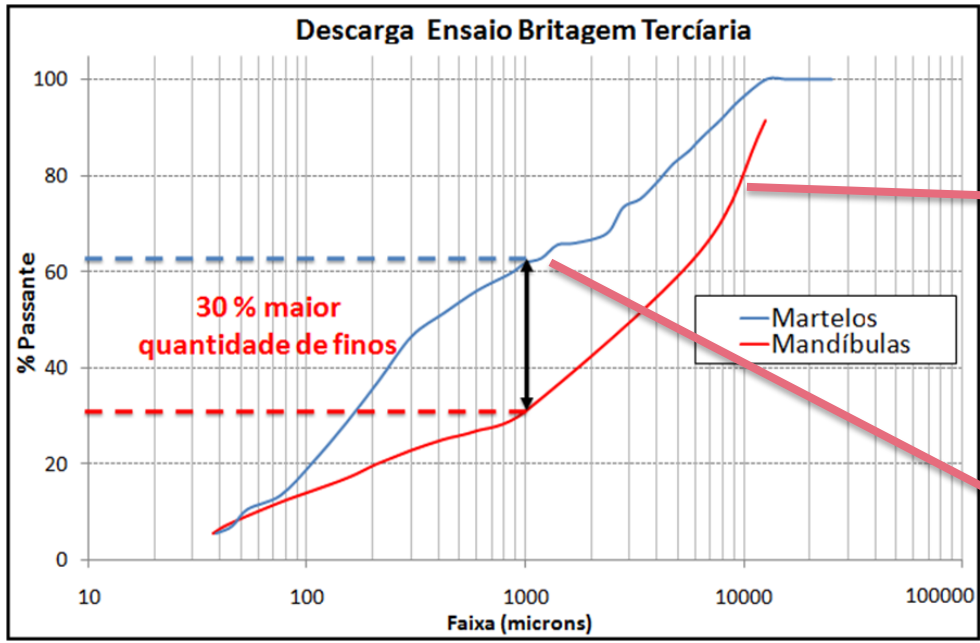
*Clasificación y chancado secundario*



*Clasificación y chancado de impacto*

Las mallas de harneo y la abertura de descarga del molino de martillo deben ser definidos para cada caso

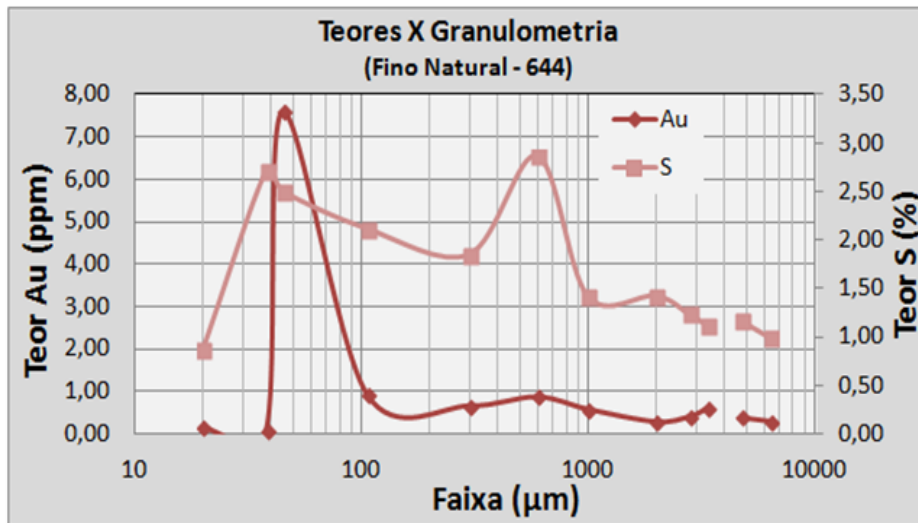
# FRAGMENTACIÓN SELECTIVA (Cont.)



En el ejemplo arriba, de mineral de hierro, la fragmentación selectiva, mediante impacto, genera 30% más de finos debajo de 1 mm que el chancado terciario convencional.

## FRAGMENTACIÓN SELECTIVA – PRE-CONCENTRACIÓN

Después de la fragmentación selectiva es posible que haya oportunidad de pre-concentrar el mineral, antes de alimentar la planta. Esta pre-concentración podría ocurrir por causa de la distribución granuloquímica del mineral de interés, que permitiría descartar alguna parcela del flujo (polvo, gruesos, etc.) y, también, por causa de otra propiedad como la susceptibilidad magnética.



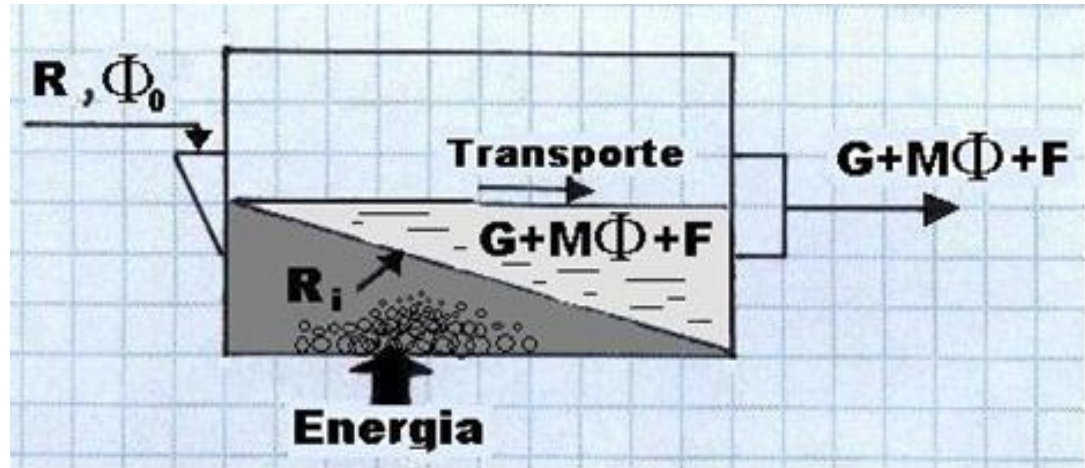
Testes para mineral de Oro (Brasil, 2015). Material arriba de 1 mm podría ser eventualmente descartado, antes de entrar a la concentradora



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

# MOLIENDA SELECTIVA

El propio mineral ayuda a comandar su conminución exteriorizando peculiaridades junto con la liberación de las substancias insertas 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)*

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



## CONCEPTO

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

## MOLIENDA SELECTIVA (Cont.)

**TEST:** Dependiendo de la dureza y de los objetivos (P80 y liberación), el test es efectuado en forma continua, en circuito abierto, en molino de 0,6m x 0,9m, con tasas que pueden ir de 150 hasta 1000 Kg/h (de acuerdo con nuestra experiencia en más de una docena de trabajos ejecutados para diversos minerales).





## MOLIENDA SELECTIVA (Cont.)

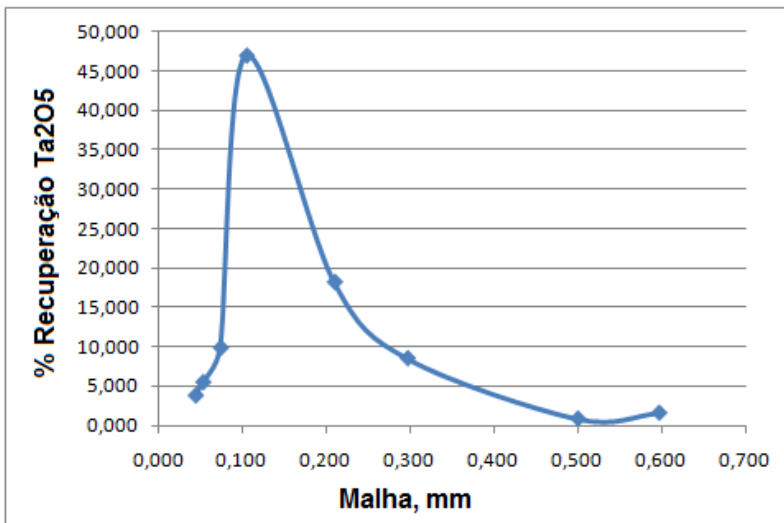
Los trabajos son acompañados por profesionales de MOPE, desde su planificación, ejecución, muestreo y evaluación de resultados.



Con base en parámetros del test: F80, P80, velocidad de rotación del molino, carga de bolas y etc., es calculado el Wio (work índice operacional) del mineral en las condiciones testadas. (Programa **PROMILL** de MOPE)

## MOLIENDA SELECTIVA (Cont.)

El mineral, al ser molido selectivamente presenta más liberación, con el mismo o hasta mayor P80 que el obtenido en una molienda convencional, en circuito cerrado con hidrociclones. En determinados casos, el uso de harneros de alta frecuencia permitiría dividir el flujo para otras operaciones o para el descarte eventual de alguna fracción grosera del flujo.



La molienda selectiva presenta una distribución preferencial (selectiva) para cada uno de los diversos componentes, dentro de las fajas granulométricas

# HERRAMIENTAS DE MOPE



El **MODELO OPERACIONAL** desarrollado por el Ingeniero Alexis Yovanovic, desde 1987, y publicado en dos libros de su autoría, proveen la base para las soluciones MOPE.

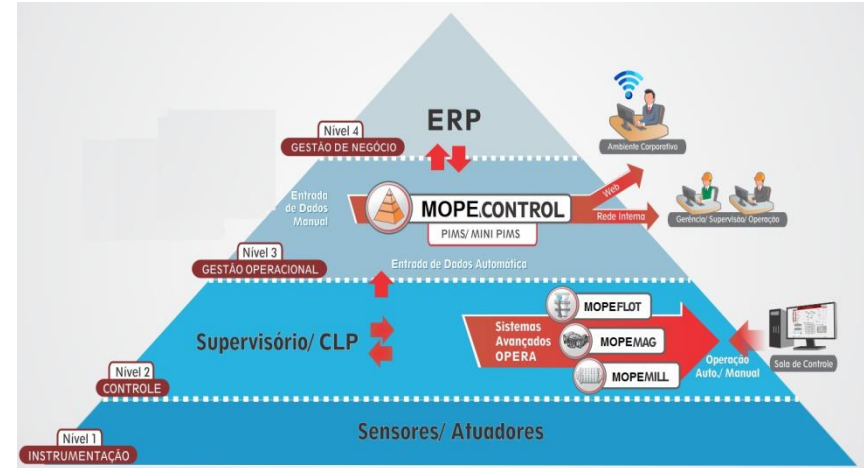
MOPE cuenta con dos microscopios digitales, que permiten evaluar liberación y tamaño de granos de los minerales de interés y de la ganga.



Alianza y base operacional con laboratorios con convenio, en Chile y Brasil.



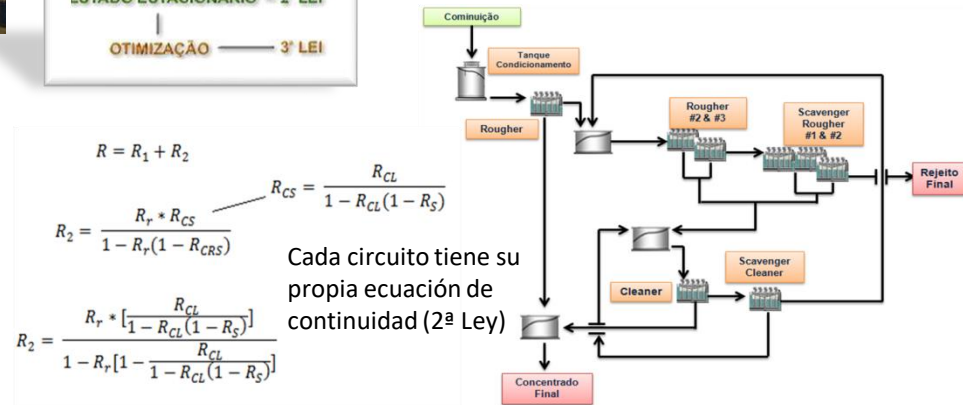
**MOPETOOLS** es una caja de herramientas de uso interno, todas desarrolladas con base en el **modelo operacional**, para cálculos y simulaciones de diversas operaciones unitarias.



Línea original de soluciones avanzadas de optimización y control



Modelo fenomenológico original para evaluación, simulación y optimización de diversas operaciones unitarias de beneficio de minerales.





# ALGUNOS CASOS DE SUCESO

# MINERAL DE HIERRO (2010)



Proyecto Pedra de Ferro (Bamin) – Premio Excelencia de la Revista Mineral & Minérios en 2010

**REDUCCIÓN DE 50% DE CAPEX Y 66% DE OPEX (En relación a proyecto convencional original)**



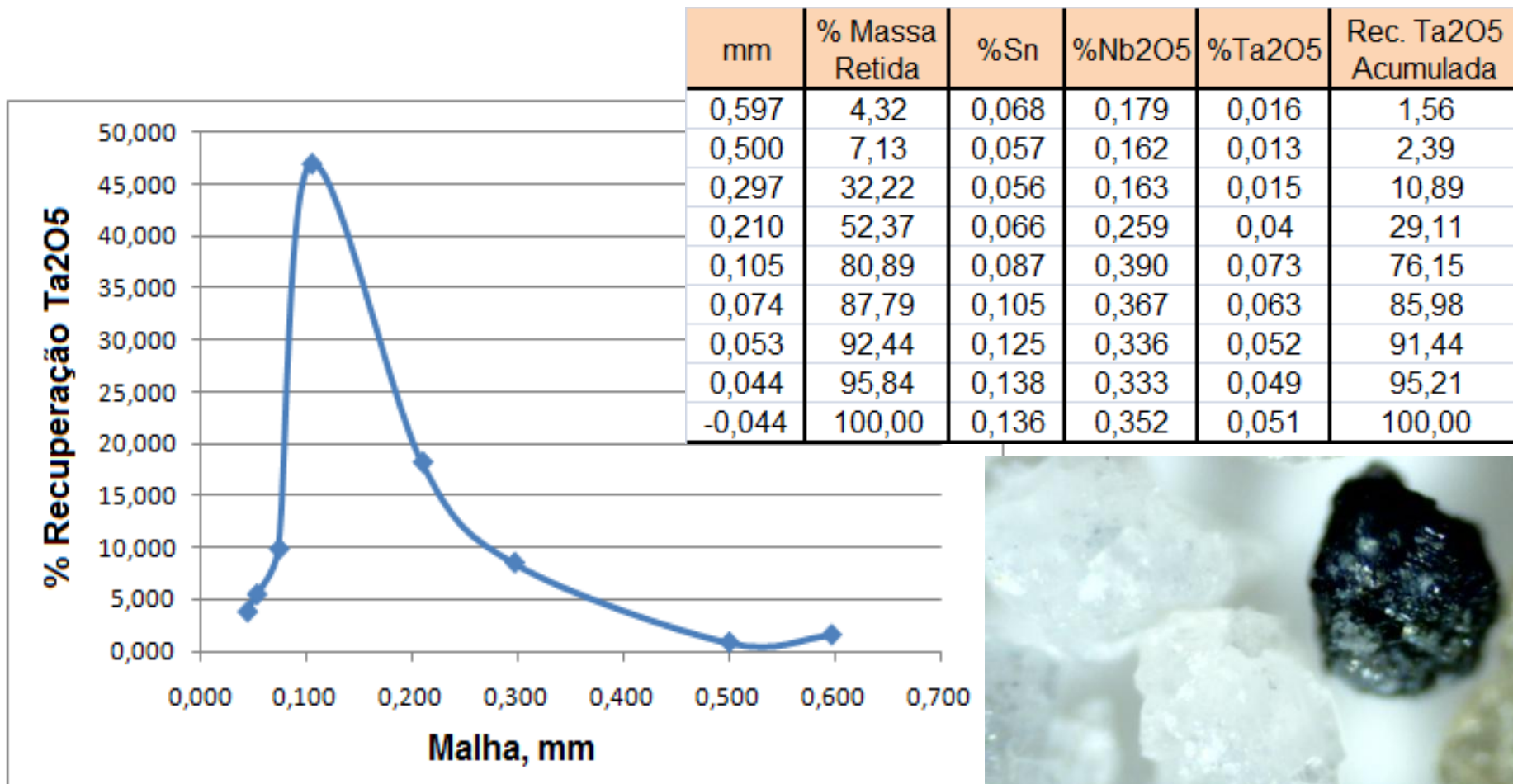
Compilation and historic evaluation of 3 years of metallurgical research

# MOLIENDA SELECTIVA CASITERITA, 2010



Granos groseros de cuarzo liberado

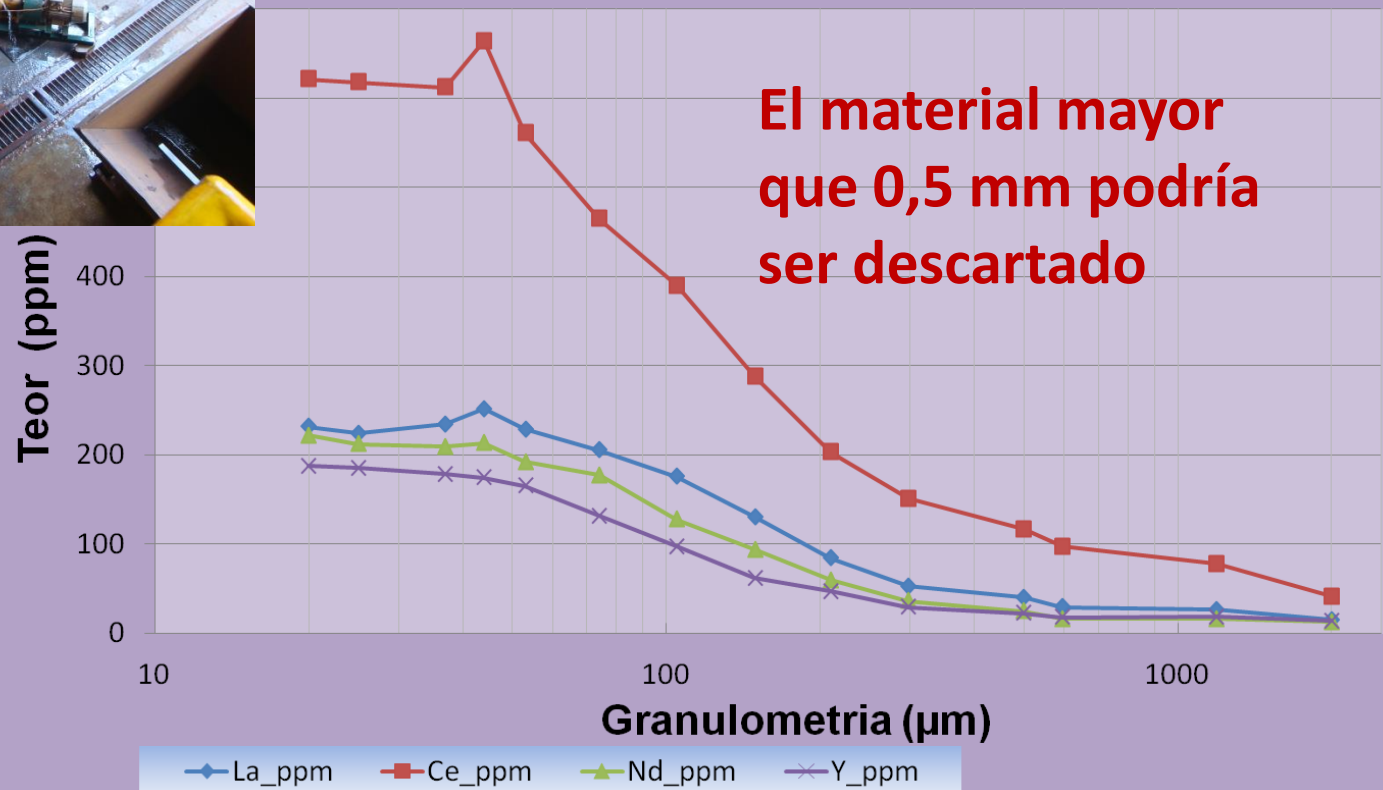
# MOLIENDA SELECTIVA TANTALITA, 2011



# MOLIENDA SELECTIVA TIERRAS RARAS, 2012

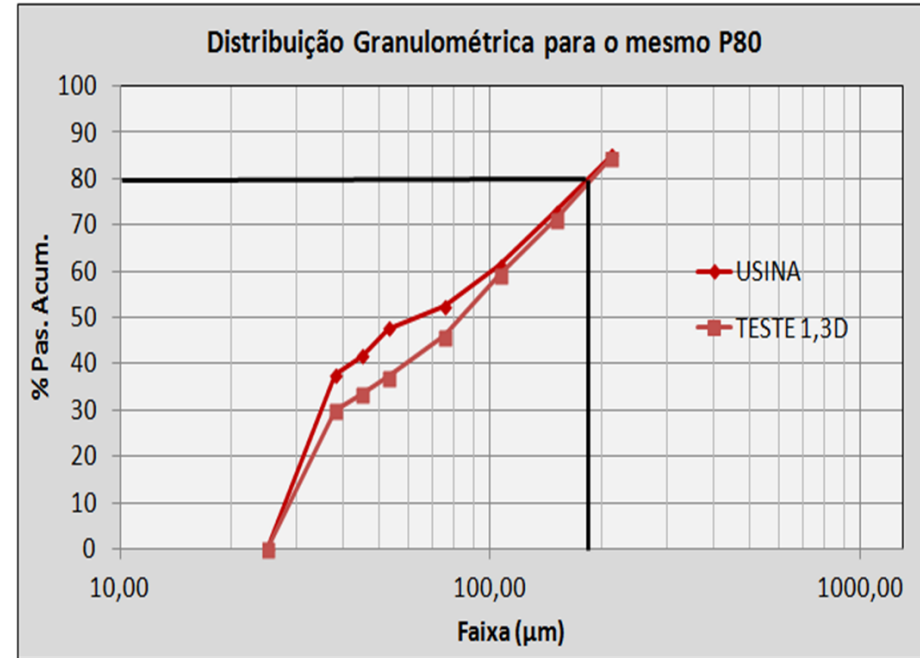
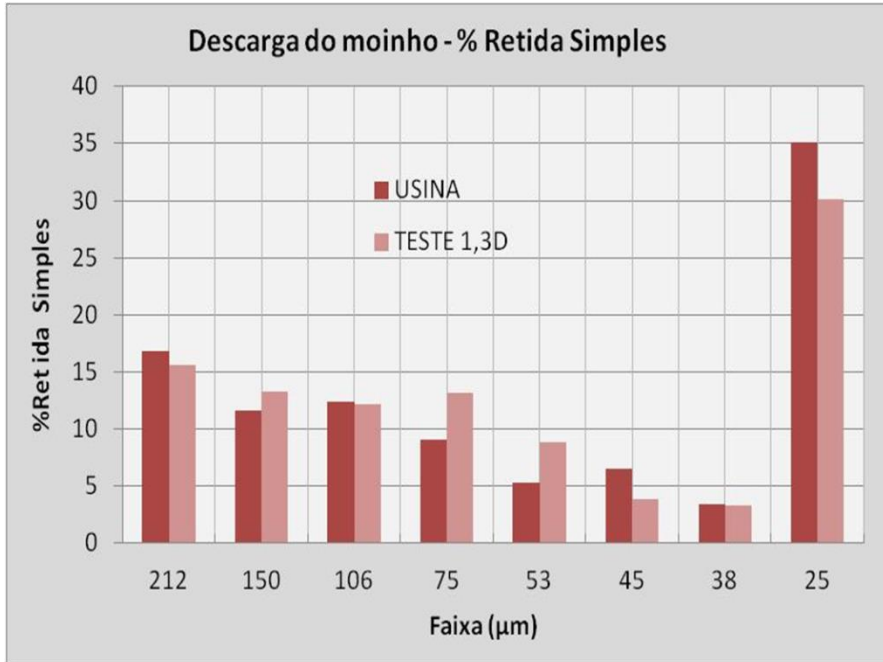


Granulometria x Teor La, Ce, Nd e Y





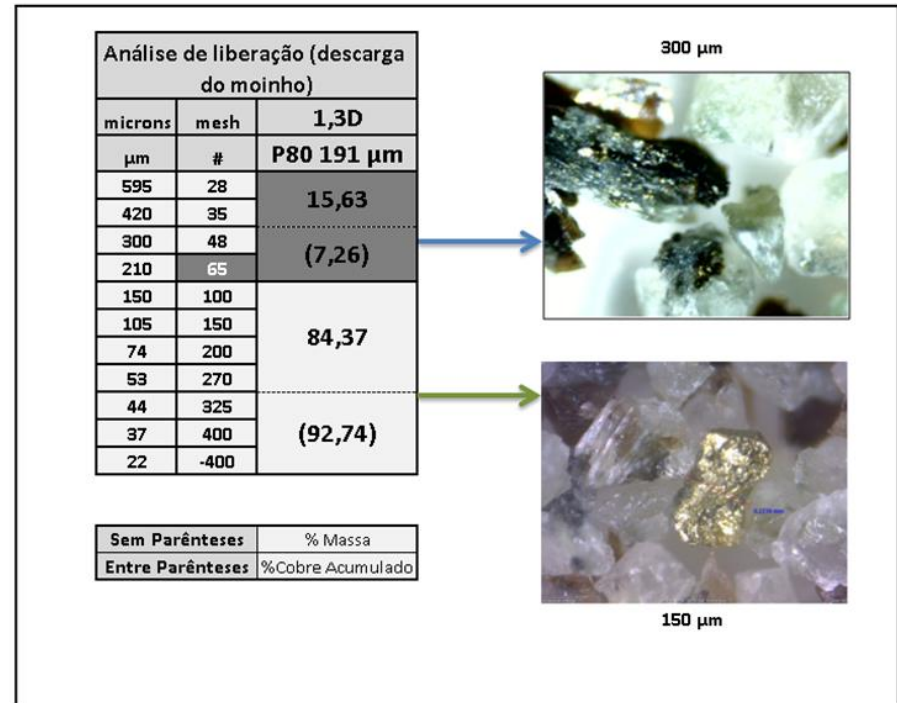
# MOLIENDA SELECTIVA MINERAL DE COBRE, 2013



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

# MOLIENDA SELECTIVA MINERAL 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		
105	150		84,37
74	200	59,24	
53	270		
44	325		
37	400	(79,76)	(92,74)
22	-400		



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



El concentrado de flotación Rougher era de 8 a 10%Cu y fue para más de 20%Cu en el test de concentración selectiva. 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.

## CONCENTRACIÓN SELECTIVA DE WILLEMITA, 2014



Producto del chancado 3º

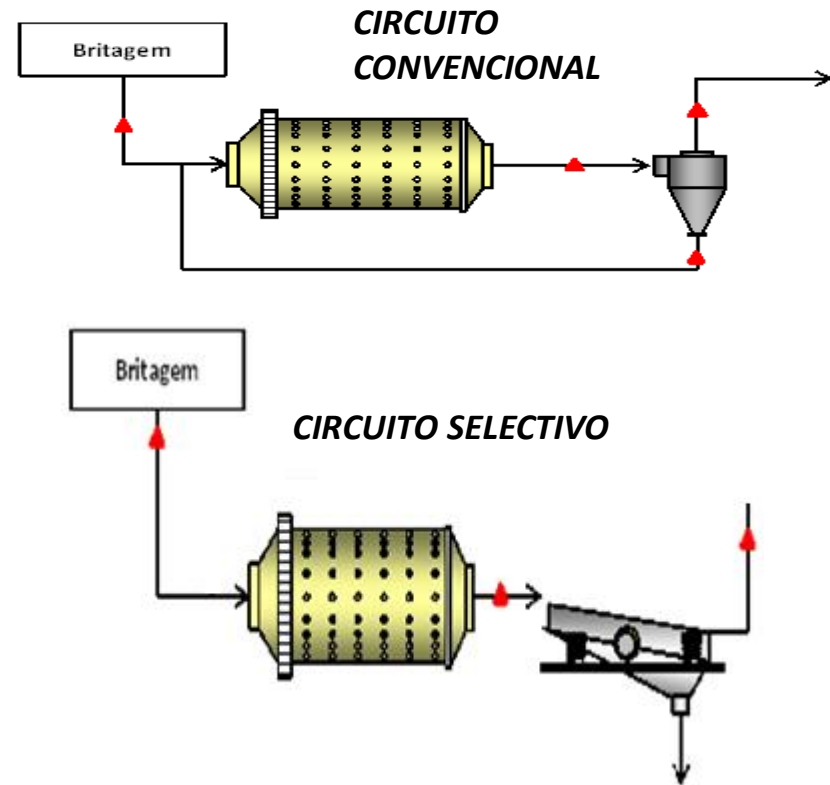
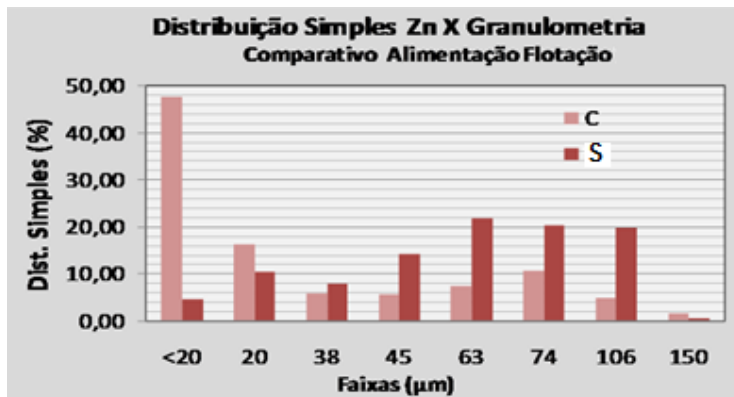
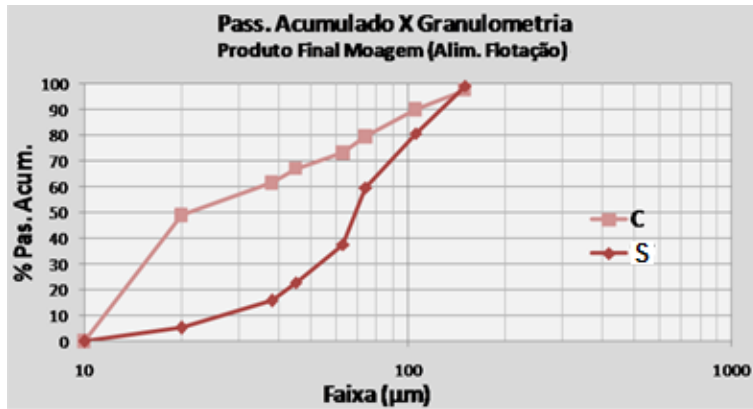


Descarga de la molienda selectiva

Después de la fragmentación selectiva (a seco) surgió la oportunidad para recuperación de magnetita granulada, antes de la molienda.

La concentración final podrá ocurrir sin necesidad de moler todo el material abajo de 0,15 mm para alimentar la flotación.

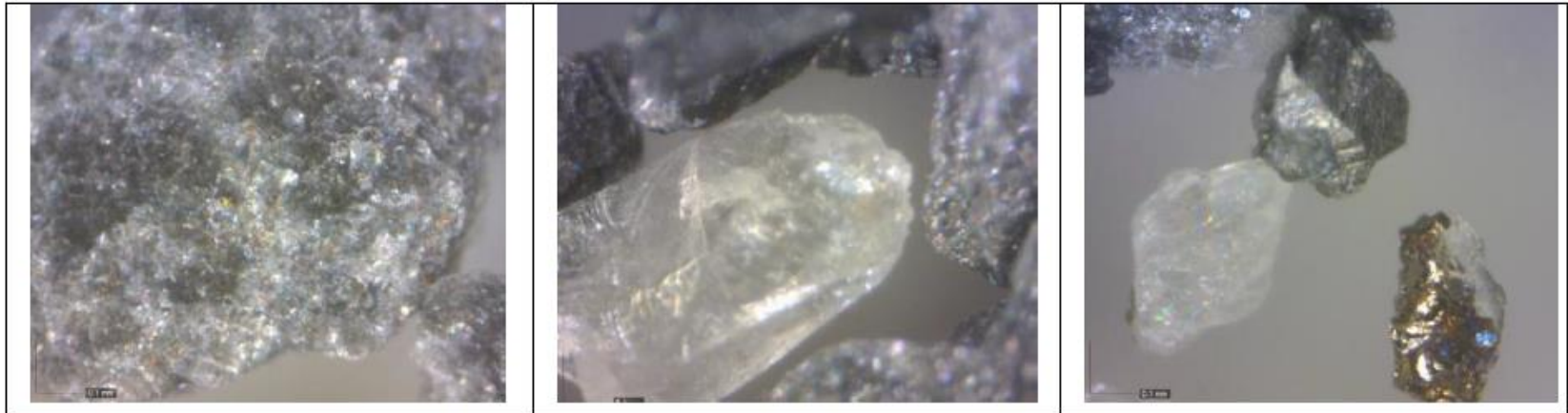
# CONCENTRACIÓN SELECTIVA DE WILLEMITA, 2014



El circuito S (Selectivo, con harnero HF) es más eficiente que el circuito C (convencional), tanto en consumo energético como en la calidad del producto molido.

El material molido en forma selectiva presenta una distribución más uniforme de zinc, en cuanto el del circuito convencional presenta casi 50% del zinc contenido en el flujo ultra fino (<20 µm)

# FRAGMENTACIÓN SELECTIVA MINERAL DE ORO, 2015



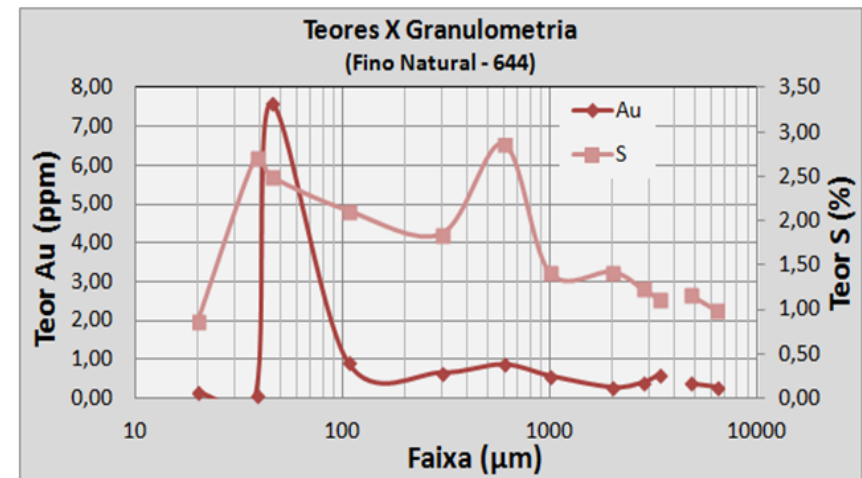
0,6 a 1 mm

0,3 a 0,6 mm

0,1 a 0,3 mm

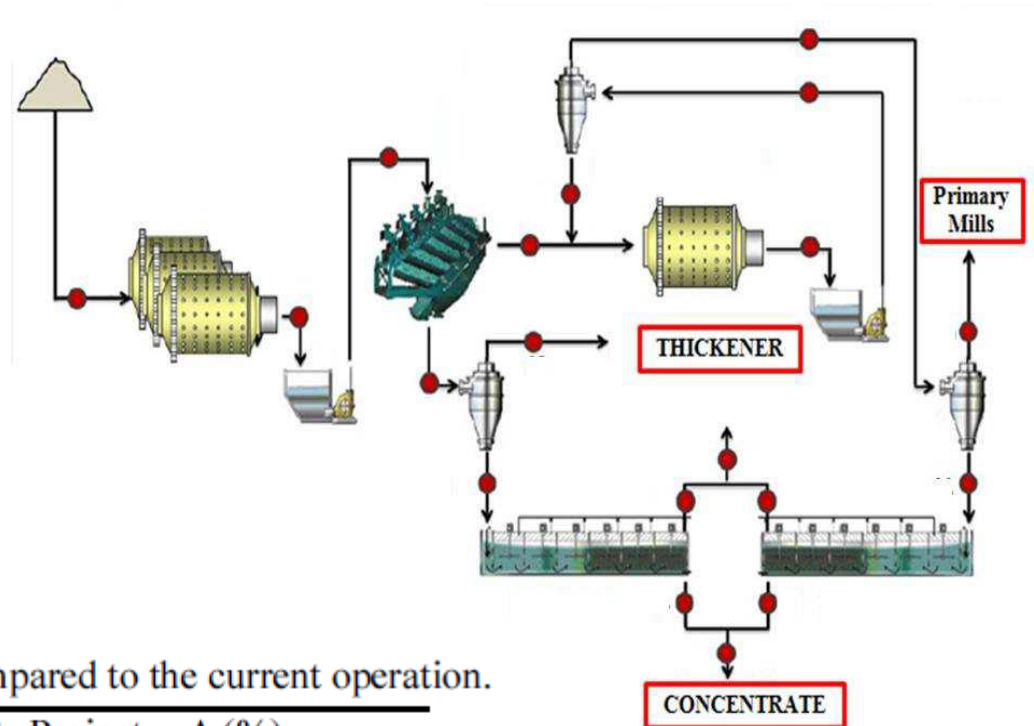
*Liberación do minério*

La fragmentación selectiva lleva el Oro para las parcelas más finas del flujo, permitiendo el eventual descarte de ganga grosera, antes de entrar al molino



# CONCENTRACIÓN SELECTIVA MAGNESITA, 2015

Testes en planta piloto ejecutados por MOPE en 2015. Mediante las alteraciones propuestas en la concentradora (en operación) habría un 20% de incremento en la producción de concentrado, además de diversas mejoras de desempeño, de costos y de control operacional de la planta.

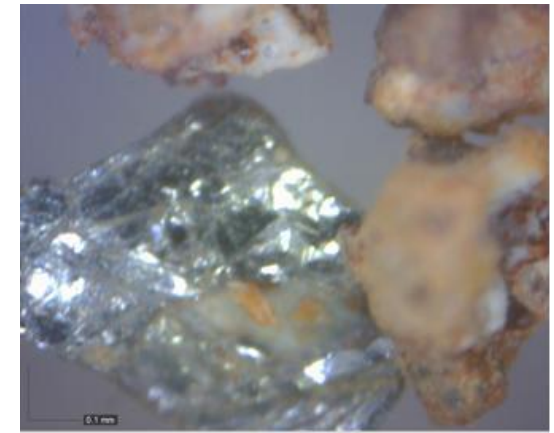
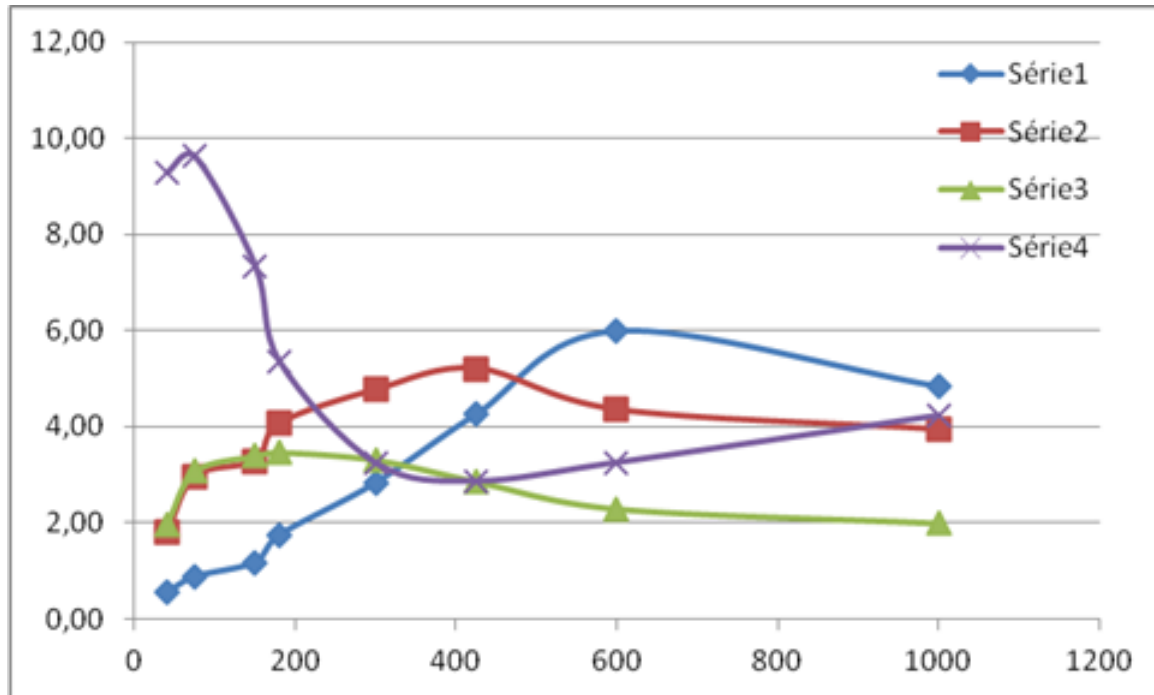


Capacity of the selective milling plant compared to the current operation.

	Current	Project	$\Delta$ (%)
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 <sup>3</sup> /h)	236	175	-26

El proyecto fue implantado en el año 2017 aumentando la capacidad de producción en 27%

# CONCENTRACIÓN SELECTIVA MINERAL DE GRAFITO, 2016



Las cuatro muestras presentan diferente distribución granulo química. Inclusive en tamaños groseros, el grafito se encuentra bien liberado, al punto que fue flotado directamente, sin moler.



# CONCENTRACIÓN SELECTIVA MINERAL DE GRAFITO, 2016



Al moler el material, por causa del exceso de arcilla es generada una pulpa viscosa que inhibe la flotación (figura izquierda).

En compensación, al flotar directamente, gracias a la excelente fragmentación selectiva del material, fue obtenida una flotación con alta selectividad y recuperación metalúrgica de carbono entre 85 a 90% (figura a la derecha).

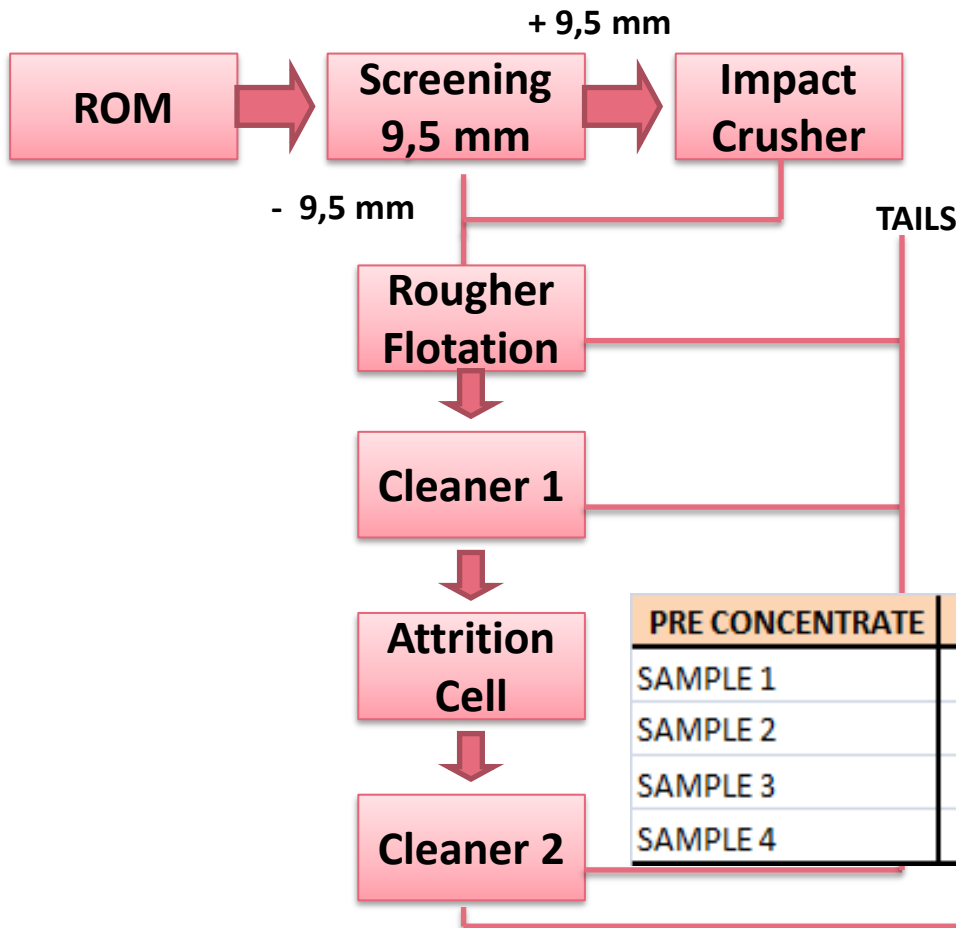


**Concentrado  
Rougher**



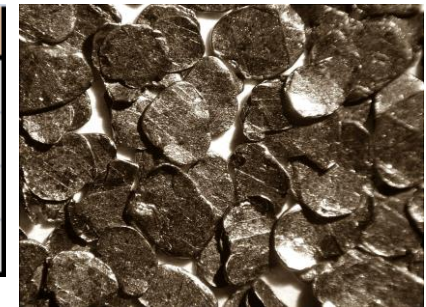
# CONCENTRACIÓN SELECTIVA MINÉRIO DE GRAFITA, 2016

El proyecto considera dos unidades independientes: a) Pre-concentración, cerca de cada mina; y b) planta de producción de flakes.



El pre-concentrado sería enviado para una planta refinadora, obteniendo flakes de gran tamaño y refinando el flujo 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	<b>68,86</b>	67,09



# RESUMEN



Ni siempre todo lo que sale de la Mina debe llegar hasta las operaciones más caras de la planta concentradora.

Caracterización  
Geometalúrgica  
Innovadora

**PRE-CONCENTRACIÓN**

Optimización  
Mina y Planta



**PRE-CONCENTRACIÓN**  
La pieza que faltaba



**Rua Califórnia, 281/103 - Bairro Sion  
Belo Horizonte, Minas Gerais  
CEP 30315-500  
+55 31 3285-3923  
[contato@modeloperacional.com.br](mailto:contato@modeloperacional.com.br)**



**Alexis Yovanovic | Diretor**  
+55 (31) 3285 3923 +55 (31) 98474 3655  
[ayovanovic@modeloperacional.com.br](mailto:ayovanovic@modeloperacional.com.br)  
[www.modeloperacional.com.br](http://www.modeloperacional.com.br)  
skype:apyovanovic

**También  
en Chile**