

DESENVOLVIMENTO DE MODELO GEOMETALÚRGICO APLICADO À COMINUIÇÃO DO ITABIRITO COMPACTO DE SERRA AZUL¹

Fabrizio Bontempo²
Grazielle Gontijo³
Adriano Santos⁴
Everaldo Teixeira⁵
Rafael Brandão⁶

Resumo

A moagem Semi-Autógena (SAG) é uma alternativa atraente e flexível para processamentos de minérios competentes. No entanto, é responsável por grande parte dos custos operacionais de uma planta, o que torna importante conhecer a performance da moagem frente a variabilidade do minério em termos de fragmentação. Este trabalho tem como objetivo apresentar os resultados alcançados na caracterização tecnológica, que servirão de base para criação de um modelo geometalúrgico para itabiritos compactos. Foram utilizados 1350 amostras de 118 furos de sonda, das quais realizou-se ensaios de *Drop Weight Test* (DWT), *Work Index* (Wi) e *Point Load Test* (PLT). Os resultados de DWT mostraram que 13,6% destes apresentam Índice de Quebra (IQ) menor que amostra da planta piloto. Já os ensaios de Wi mostraram que 97% destes possuem Wi menor que da amostra piloto, o que indica baixa variabilidade do itabirito compacto e uma considerável correlação com a amostra utilizada na planta piloto que serviu de base para o dimensionamento da moagem. Os resultados de PLT irão subsidiar os estudos de fragmentação do Run of Mine (ROM), tendo em vista que diferentes distribuições granulométricas afetam diretamente a performance da etapa de moagem.

Palavras-chave: Itabirito compacto; Moagem SAG; Modelo geometalúrgico; Variabilidade.

GEOMETALLURGICAL MODEL DEVELOPMENT APPLIED FOR SERRA AZUL HARD ITABIRITE SERRA AZUL

Abstract

The Semi-Autogenous Grinding (SAG) is an attractive and flexible alternative to process hard ores, however, it is the main responsible for the operational costs in beneficiation plants. Thus, it is important to know the grinding performance and variability in terms of ore fragmentation. The present work aims to show the achieved results in technological characterization tests for creating a geometallurgical model. It was tested 1350 samples from 118 drill holes and run the Drop Weight Test (DWT), Work Index (WI) and Point Load Test (PLT). The DWT results showed that 13.6% of these tested samples have a Breakage Index lower than pilot plant sample and the Wi results showed that 97% of tested samples are lower than pilot test sample. These results indicate a low variability of hard itabirite and a significant correlation with the sample used in the pilot test that served as the basis to size the mills.

The PLT results will support ROM fragmentation studies once different size distributions directly affect the performance of the grinding.

Keywords: Hard Itabirite; SAG grinding; Geometallurgical modeling; Variability.

¹ Contribuição técnica ao 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 14º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 1º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 1 a 4 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engº de Minas, Gerente de Desenvolvimento Tecnológico MMX Mineração e Metálicos S/A. Belo Horizonte, MG, Brasil.

³ Engª Química, Engº Pleno Processo. MMX Mineração e Metálicos S/A. Belo Horizonte, MG, Brasil.

⁴ Engº de Minas, M.Sc, Coordenador Desenvolvimento Tec. MMX Mineração e Metálicos S/A. Belo Horizonte, MG, Brasil.

⁵ Engº de Minas, Engº Especialista Processo. MMX Mineração e Metálicos S/A. Belo Horizonte, MG, Brasil.

⁶ Graduando em Engenharia de Minas. MMX Mineração e Metálicos S/A. Belo Horizonte, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O depósito mineral de Serra Azul é do tipo BIF (Banded Iron Formation) composto essencialmente por itabiritos pertencentes à Formação Cauê. Na porção superficial, o itabirito friável é predominante, porém, o itabirito compacto compõe grande parte do depósito em profundidade. Devido a pouca alteração dessa rocha, há características físicas e químicas que a distingue do itabirito friável, como teor, compacidade, abrasividade, etc.

A Unidade de Serra Azul, localizada no Quadrilátero Ferrífero, atualmente é formada pelas minas Tico-Tico e Ipê, com beneficiamento do itabirito friável. O Projeto Expansão prevê aumento da capacidade de produção de minério de ferro, através do beneficiamento do itabirito compacto.

A Figura 1 apresenta o modelo geológico de Serra Azul, no qual pode-se observar o itabirito compacto em profundidade no corpo mineral.

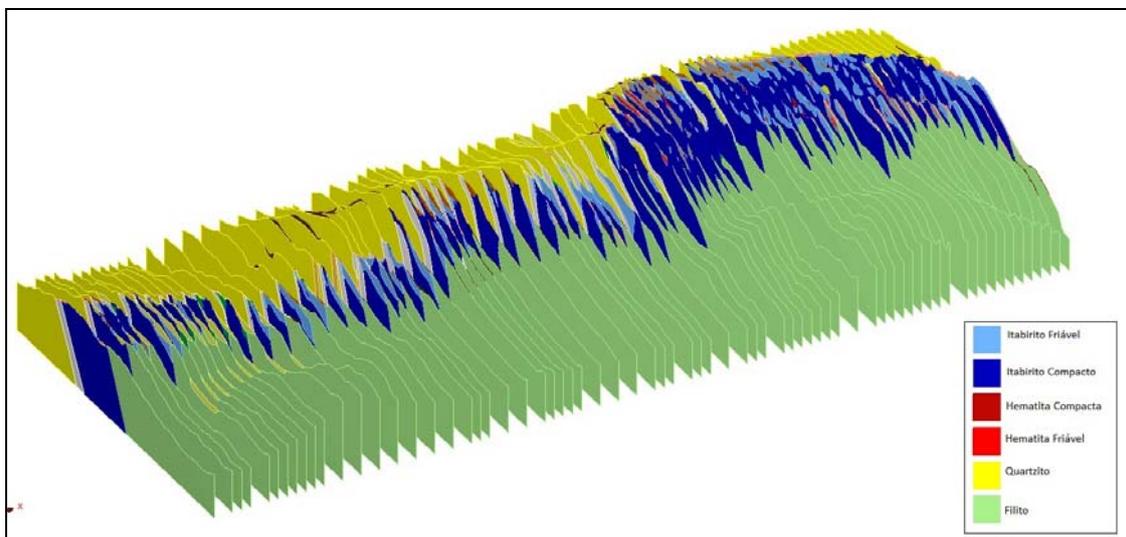


Figura 1: Modelo Geológico de Serra Azul

A rota prevista para o processamento do itabirito compacto é constituída essencialmente de britagem primária, moagem semi autógena (SAG), britagem de pebbles, moagem de bolas, flotação em células mecânicas, remoagem, flotação em colunas, espessamento e filtragem.

Segundo Wills,⁽¹⁾ aproximadamente 50% do custo operacional de uma planta é gasto na etapa de cominuição (energia, corpos moedores e operação). Dessa forma torna-se importante conhecer a performance das moagens SAG e Bolas frente a variabilidade do minério em termos de fragmentação.

Delgado⁽²⁾ descreve que a geometurgia é um estudo interdisciplinar que integra Geologia, Desenvolvimento Tecnológico e Metalurgia Extrativa. Logo, tem como foco classificar os litotipos dentro de um jazimento segundo seu comportamento frente a um tratamento minero-metalúrgico.

A aplicação da Geometurgia como ferramenta para analisar a variabilidade do minério na moagem é apresentado por Bulled,⁽³⁾ que estima a produtividade de um circuito com moagem SAG, moagem de bolas e britagem, a partir de parâmetros obtidos por teste em escala de bancada.

Delboni⁽⁴⁾ descreve que os ensaios resistência ao impacto ou DWT são empregados para avaliar características de amostras de minério quanto à cominuição. Em particular, trata-se de um método de caracterização consolidado

para avaliar a aplicação de moagem SAG. Através dos resultados, é possível analisar a competência do minério para geração de corpos moedores, o efeito do tamanho na resistência ao impacto e a tendência do minério em gerar fragmentos densos e competentes.

O ensaio de Compressão Pontual ou *Point Load Test* (PLT) é uma alternativa para a determinação da Resistência à Compressão. O índice fornece uma indicação da resistência do material ao esforço mecânico compressivo, mostrando o valor máximo de tensão que a rocha suporta antes da ruptura.

O PLT tem influência direta no modelamento de fragmentação do Run of Mine (ROM). A curva granulométrica do ROM depende do tipo de explosivo (densidade), propriedades da rocha como densidade, tamanho do bloco, Rock Quality Designation (RQD) e parâmetros de desmonte (diâmetro da perfuração, carga de explosivo, altura do bancada).

No que diz respeito à moagem de bolas, o ensaio clássico é o teste de Bond para determinação do índice de trabalho de Bond que é, em princípio, uma característica intrínseca do minério e pode ser utilizado no escalonamento de moinhos de bolas, em conjunto com uma série de fatores de eficiência.

O objetivo deste estudo é verificar a variabilidade do corpo de itabirito compacto e sua influência na etapa de cominuição. Para tal foram realizados testes como Point Load Test (PLT), Drop Weigh Test (DWT) e Work Índex (Wi) que irão corroborar para criação de um modelo geometalúrgico, utilizando-se diversas amostras distribuídas em profundidade e extensão ao longo do corpo de itabirito compacto.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

No estudo de variabilidade da competência do itabirito compacto foram realizados 90 ensaios de DWTs (Drop Weigh Test Simplificado) e PLT que foram complementados com 35 ensaios de Wi. Os ensaios foram originados de 1350 amostras que foram retiradas a cada 10 metros dos 118 furos de sonda.

A Figura 2 mostra a localização em planta das regiões estudadas.

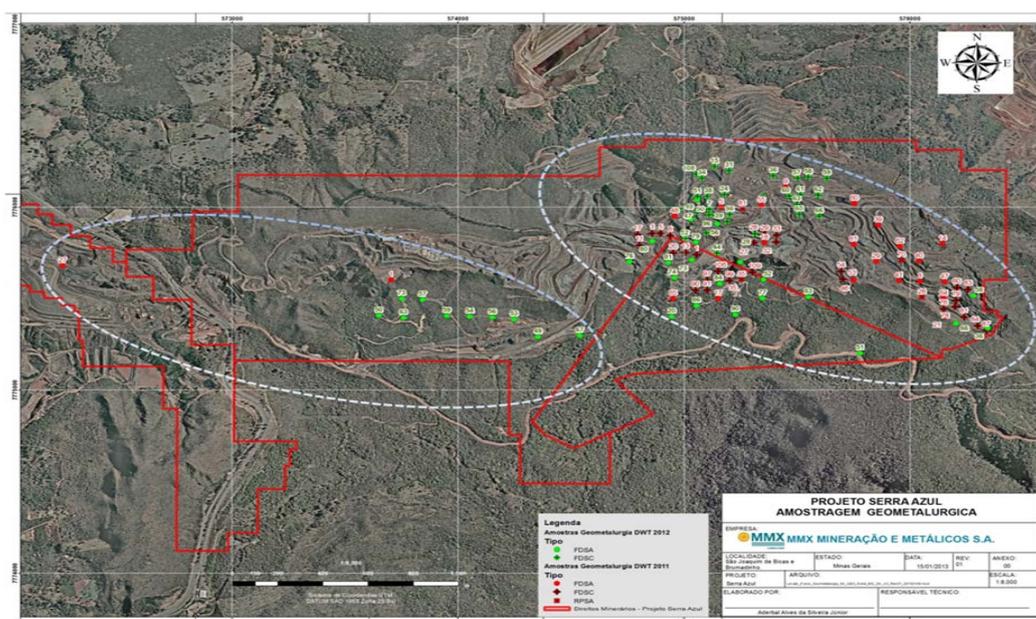


Figura 2: Localização em planta das regiões estudadas

Os ensaios de fragmentação por impacto executados neste trabalho seguiram os procedimentos descritos por Napier-Munn⁽⁵⁾ que estabelece que fragmentos sejam submetidos a impacto em cada uma das cinco faixas granulométricas a seguir:

- 63,0 - 53,0 mm
- 45,0 - 37,5 mm
- 31,5 - 26,5 mm
- 22,4 - 19,0 mm
- 16,0 - 13,2 mm

Assim, a partir dos fragmentos classificados, são preparados lotes compostos de fragmentos, que são submetidos ao impacto. Os ensaios são executados na Célula de Impacto e visam determinar os parâmetros descritivos da função paramétrica entre energia aplicada e a fragmentação resultante, mostrada a seguir:

$$t_{10} = A(1 - e^{-bE_{cs}})$$

Relação entre t_{10} e E_{cs} .

Onde,

t_{10} = Porcentagem passante na malha igual a 10% do tamanho original do fragmento;

E_{cs} = Energia específica aplicada ao fragmento de minério (kWh/t);

A, b = Parâmetros dependentes da resistência à quebra do minério.

e = Número de Euler

O material fragmentado proveniente de cada lote é então reunido e encaminhado ao peneiramento, do qual se obtém parâmetros selecionados de distribuição granulométrica. Assim, o produto dos parâmetros A e b, denominado Índice de Quebra (IQ) constitui-se em um índice singular de caracterização quanto ao impacto.

Amostras de testemunhos de sondagens, ou que apresentem limitações de massa e tamanho de fragmentos, impedem a realização de ensaios de impacto completos. Assim foram desenvolvidos outros ensaios de fragmentação por impacto, destacando-se o denominado Ensaio Sintético de Resistência ao Impacto.

Dessa forma, para que sejam comparáveis na mesma base, os resultados sintéticos devem ser ajustados por um fator, que é encontrado comparando-se os valores de IQ entre ensaio completo considerando todas as frações e os valores de IQ somente para a fração 22,4 - 19,0 mm.

A relação desenvolvida entre os ensaios completos e sintéticos realizados na mesma amostra são conhecidos como ensaios sintéticos corrigidos o Índice de Quebra Corrigido - IQc.

Os ensaios de Work index (Wi) foram realizados em moinhos de 12"x12". O índice representa a quantidade de energia necessária para moer minério com tamanho infinito, até que apresentasse P80 igual a 0,10 mm. Os testes seguiram a norma brasileira, a MB-3253 que detalha os procedimentos experimentais.⁽⁶⁾

Os ensaios de PLT são padronizados pela sugestão de método de ensaio da International Society of Rock Mechanics – ISRM.⁽⁴⁾

O ensaio pode ser realizado em corpos de prova cilíndricos, com a carga podendo ser aplicada na direção diametral como na direção axial. Quando o carregamento é realizado na direção diametral, o Índice de Carga Pontual (Is_{50}) é calculado a partir da carga aplicada para a ruptura e da dimensão do cilindro. Quando o carregamento é realizado na direção axial do cilindro ou em corpos de

prova irregulares o índice IS_{50} é calculado considerando-se o diâmetro equivalente D_e correspondente à circunferência com área igual a da seção do plano de ruptura.

O IS_{50} é usado para estimar o Uniaxial Compressive - UC_S médio (para um K entre 20 e 25) e ambos são medições de resistência da rocha. Estes índices são comumente utilizados nos modelos de fragmentação de desmonte de rochas, e também correlacionados com outros parâmetros de ruptura.

A Figura 3 apresenta todas as etapas de caracterização tecnológica para a criação do modelo geometalúrgico.

Paralelamente a esses estudos, foi realizado no Centro de Investigación Minera y Metalúrgica (CIMM),⁽⁷⁾ no Chile, um programa de testes pilotos de moagem SAG e de bolas com uma amostra de frente de lavra. O resultado desses testes foi objeto de comparação com os resultados dos testes em bancada e forneceu parâmetros para o dimensionamento dos equipamentos industriais.

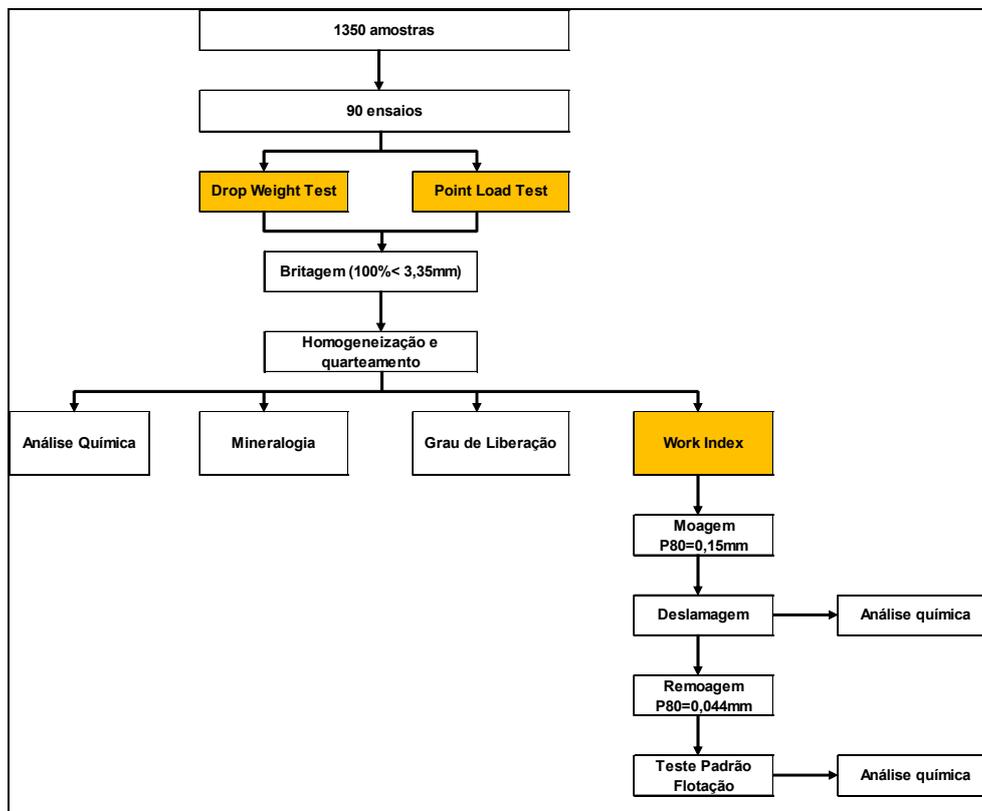


Figura 3: Caracterização tecnológica para a criação do modelo geometalúrgico.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A campanha de caracterização de DWT realizada incluiu um ensaio completo realizado com mesma amostra utilizada na planta piloto do CIMM e 90 ensaios sintéticos com amostras de itabirito compacto, resultando na seguinte equação de correlação.

$$IQ_{\text{corrigido}} = IQ_{\text{sintético}} + 6,86$$

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos para o ensaio completo.

Tabela 1. Resultados do Ensaio de Resistência ao Impacto e abrasão - amostra piloto CIMM

Amostra	Impacto				Abrasão		Densidade
	A	b	IQ	Classificação	t _a	Classificação	
Itabirito Compacto	64,75	0,55	35,6	ALT	0,20	MTAb	3,32

Os ensaios DWT sintéticos resultaram nos Índices de Quebra Corrigidos que foram dispostos em ordem crescente e subdivididos em suas respectivas classificações, sumarizados na Figura 4.

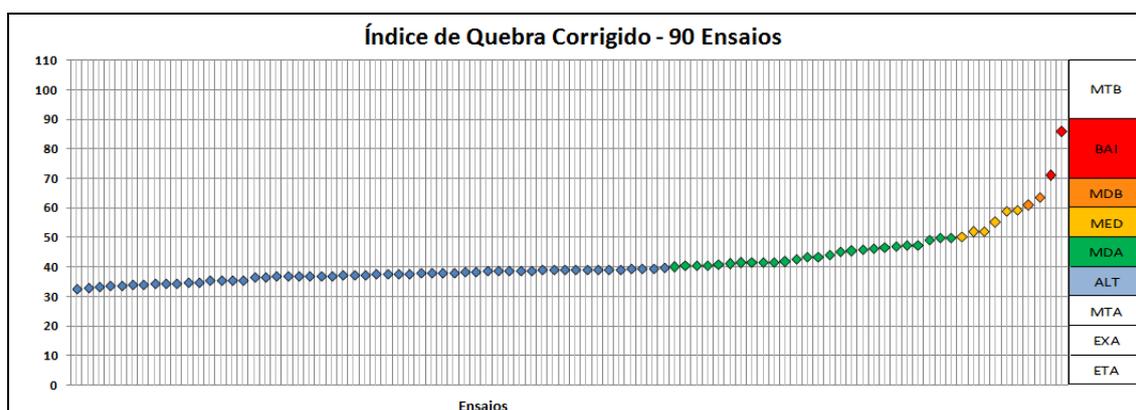


Figura 4: Resultados e classificação dos ensaios de DWT

A Figura 5 mostra o número total de ensaios e sua participação percentual para cada grupo.

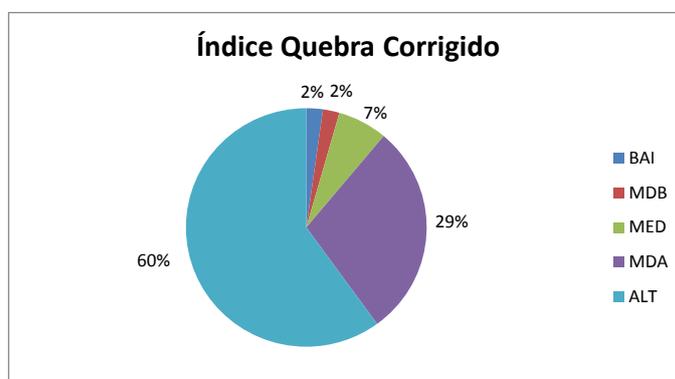


Figura 5: Divisão Percentual por Grupos dos Ensaios de Resistência ao Impacto.

Dentre os 90 ensaios de itabirito compacto, 54 (60%) foram classificados com resistência ao impacto alta, 26 (29%) como moderadamente alta, 7 (6%) como média, 2 (2%) como moderadamente baixa e 2 (2%) como baixa.

A amostra de minério de ferro da planta piloto apresentou resistência à fragmentação por impacto classificada como alta (IQ = 35,6). O histograma, apresentado na Figura 6 mostra que 13,6% dos ensaios apresentaram mais resistentes a fragmentação que a amostra testada na piloto do CIMM utilizada para o dimensionamento da Moagem SAG.

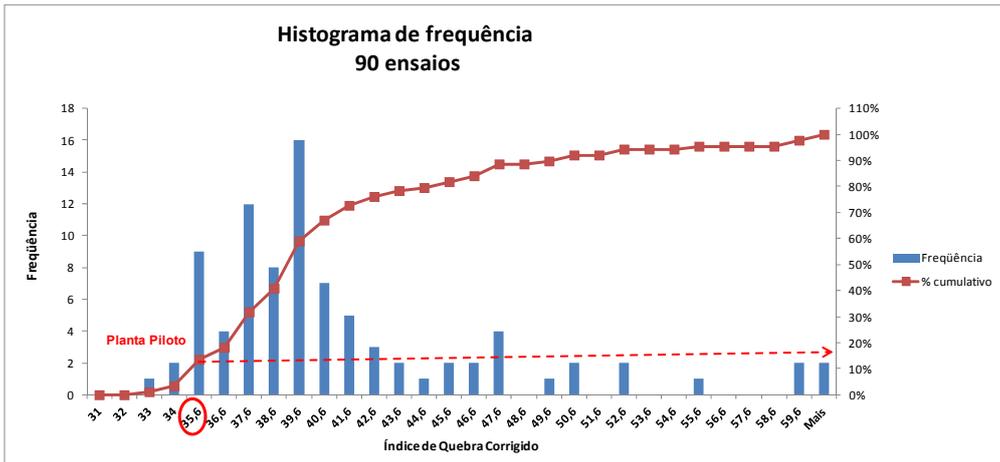


Figura 6: Histograma de frequência do Índice de Quebra Corrigido para 90 amostras.

Os Ensaios de Work Index foram dispostos em ordem crescente e sumarizados na Figura 7.

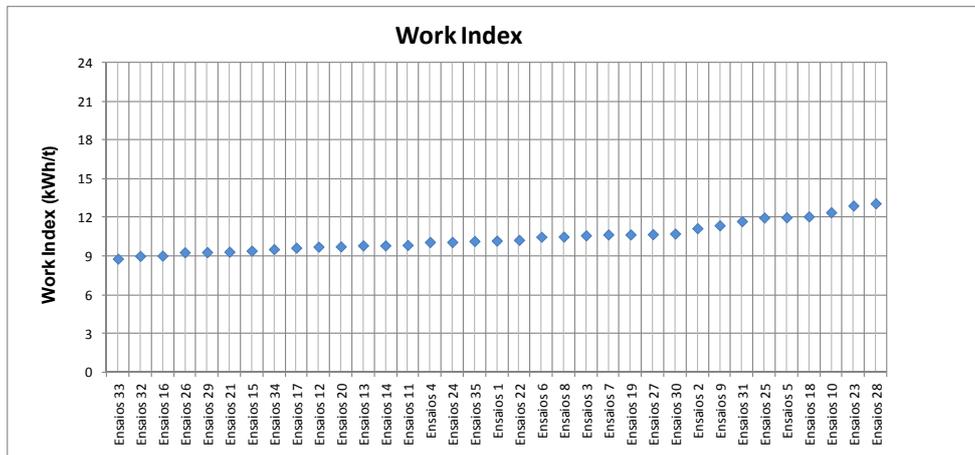


Figura 7: Resultados dos ensaios Wi.

A Figura 8 mostra o histograma de frequência dos resultados encontrados para os ensaios de Wi.

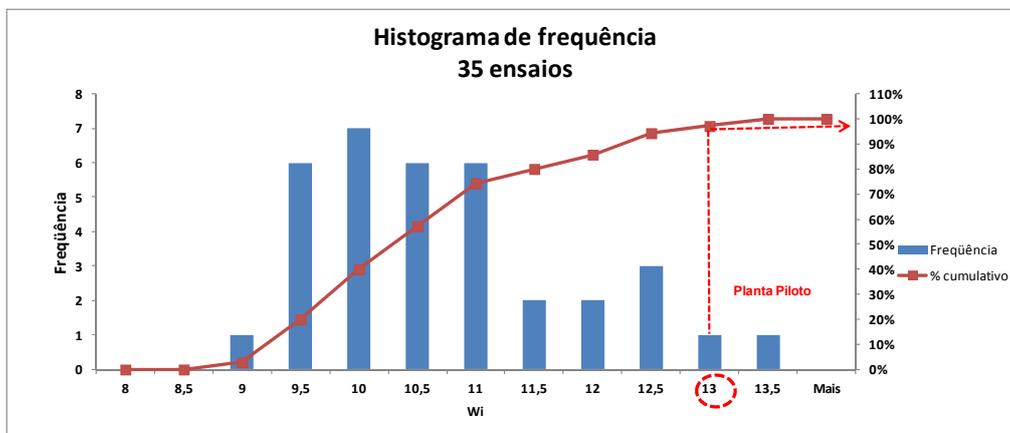


Figura 8: Histograma de frequência dos ensaios Wi.

Através do histograma de frequência, observa-se que cerca de 97% das amostras apresentaram W_i menor ou igual a 13kWh/t, que foi o resultado encontrado para amostra da planta piloto.

A Tabela 2 apresenta resumo estatístico dos resultados de W_i . A média dos resultados dos ensaios é da ordem de 10,5 kWh/t, valores mínimo de 8,8kWh/t e máximo de 13,08 kWh/t e baixo desvio padrão de 1,1.

Tabela 2: Dados ensaios de W_i

Parâmetro	W_i
Média	10,46
Desvio Padrão	1,1
Média +um desvio padrão	11,59
Média - um desvio padrão	9,33
Máximo	13,08
Mínimo	8,8

Os valores de IQ foram plotados em seções (Figura 9) e pode-se observar uma tendência de menor IQ à medida que a profundidade do corpo mineral aumenta. O suporte amostral variou da superfície do corpo mineral até 420 metros de profundidade.



Figura 9: Seção 575150 – Região H – Ensaio 21 - Valores de IQ.

A Figura 10 mostra o efeito da variação do UCs médio, obtido nos testes de PLT, na distribuição granulométrica do ROM para uma mesma razão de carga de explosivo (240g/t).

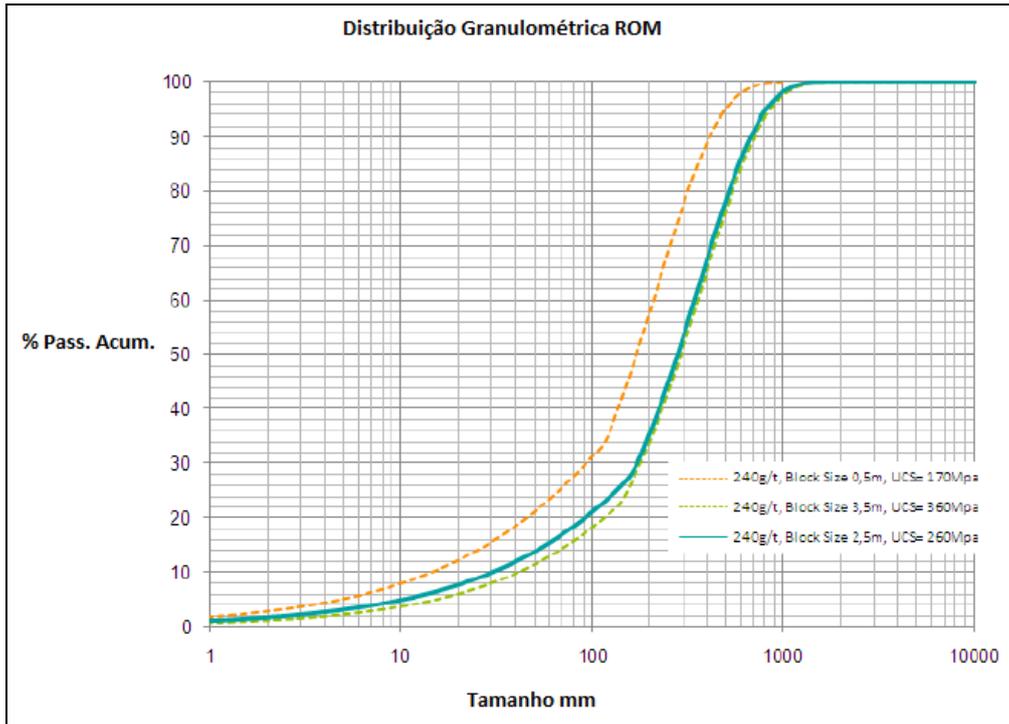


Figura 10: Efeito do UCs na distribuição granulométrica do ROM.⁽⁸⁾

O efeito da distribuição granulométrica do ROM foi avaliado nos testes pilotos do CIMM. A Figura 11 apresenta as distribuições granulométricas das amostras e a Tabela 3 apresenta o desempenho do circuito SAG para três diferentes distribuições granulométricas de alimentação.

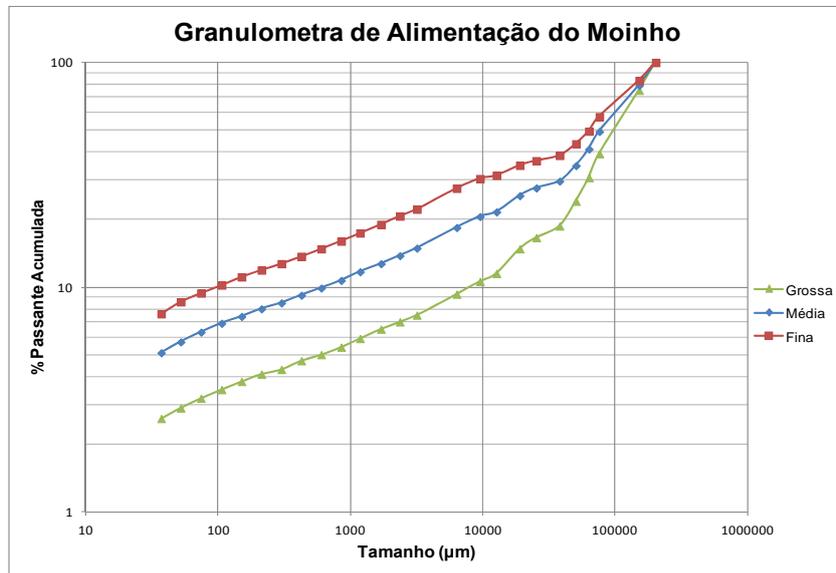


Figura 11: Distribuição granulométrica da alimentação do SAG.⁽⁷⁾

Tabela 3: Desempenho do circuito SAG para diferentes distribuições granulométricas⁽⁴⁾

Teste	Circuito	Amostra	Granulometria	% Pebble	Potência (kW)	Alimentação kg/h	Energia Específica (Kwh/t)	F80 (micrometro)	P80 (micrometro)
SAG -1	SABC-A	Compacto	Média	22,4	11,3	1621	6,97	154758	6020
SAG-5	SABC-A	Compacto	Fina	25,7	11,9	1890	6,30	142258	7292
SAG-6	SABC-A	Compacto	Grossa	28,8	12,0	1583	7,58	162560	7034

Os testes indicaram uma redução de energia específica de moagem de cerca de 20% ao comparar uma amostra de granulometria mais fina (F80 ~142mm) com uma amostra de granulometria mais grosseira (F80 ~162mm).

O UC_S calculado a partir do PLT é uma medida indireta da resistência à tenacidade, não podendo ser tratada como medida absoluta.

Estudos de fragmentação do ROM estão sendo desenvolvidos em conjunto com a Metso, utilizando-se os resultados de PLT e RQD (“Rock Quality Designation”), para que os resultados possam ser correlacionados com os estudos de cominuição (DWT, W_i). O resultado deste banco de dados é a obtenção de um modelo geometalúrgico que irá auxiliar nas operações de mina (desmonte) e usina na busca da máxima produtividade das instalações.

5 CONCLUSÃO

Dentre os 90 ensaios com itabirito compacto, 60% foram classificados como resistência ao impacto alta, 29% como moderadamente alta, 6% como média, 2% como moderadamente baixa e 2% como baixa.

A amostra do teste piloto apresentou alta resistência à fragmentação, com IQ de 35,6. Cerca de 13,6% dos ensaios apresentaram mais resistentes a fragmentação quando comparados com amostra piloto.

Os resultados foram plotados em seções e pode-se observar uma tendência de menor IQ à medida que a profundidade do corpo mineral aumenta. Estes valores são similares aos da amostra piloto.

O resultado de W_i médio é de 10,46 kWh/t com desvio padrão de 1,1, indicando assim uma faixa relativamente estreita de variação dos resultados entre os testes. Cerca 97% dos ensaios apresentaram W_i menor que a amostra bulk.

Para o universo amostral, os resultados de DWT e W_i indicaram baixa variabilidade do itabirito compacto e uma considerável correlação com a amostra utilizada na planta piloto e que serviu de base para dimensionamento da moagem.

Tendo em vista que diferentes distribuições granulométricas afetam diretamente o consumo energético da etapa de moagem recomenda-se um estudo detalhado de fragmentação do ROM tendo como base os resultados de PLT e RQD. Este estudo contribuirá para minimizar a variabilidade da curva granulométrica do ROM que garantirá uma melhor performance da britagem primária e moagem SAG.

REFERÊNCIAS

- 1 WILLIS, B.A. Mineral Processing Technology 5th Edition. Oxford: Pergamon Press, 1992. 855p.
- 2 Delgado, E. A. La Geometalurgia: Prospectiva en Minería y Formación Académica de Especialistas. Pontificia Universidad Católica del Perú, 2012
- 3 BULLED, D. Grinding Circuit Design for Adanac Moly Corp Using a Geometallurgical Approach. Technical Bulletin 2007
- 4 Delboni, H, Jr. Caracterização Tecnológica das amostras de minério de ferro de Serra Azul, Relatório Técnico MMX 2012.
- 5 NAPIER-MUNN, T. J. Mineral comminution circuits: their operation and optimisation. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 1996.
- 6 ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, MB-3253: Moinho de Bolas - determinação do índice de trabalho, Rio de Janeiro, set 1990.4p.
- 7 CIMM – Centro de Investigación Minera Y Metalurgica, Programa de Pruebas Piloto De Molienda SAG Y Molienda De Bola, 2011.
- 8 Metso, Avaliação do Circuito de Cominuição para Minério de Ferro Compacto, Relatório Técnico MMX 2010.