

## MODELAGEM GEOMETALÚRGICA E OTIMIZAÇÃO E INTEGRAÇÃO DE PROCESSOS\*

Rodrigo Sales<sup>1</sup>  
Michael Wortley<sup>2</sup>  
Kimberly Caron<sup>3</sup>  
Rodrigo Hayashida<sup>4</sup>  
Ana Soares<sup>5</sup>

### Resumo

Os principais objetivos de um projeto de Integração e Otimização de Processos (PIO – Process Integration and Optimisation) é de auxiliar no desenvolvimento de uma estratégia integrada de desmonte e cominuição que minimize o custo total por tonelada processada nas etapas de lavra e cominuição das operações, minimize o consumo de energia e maximize a taxa de processamento, produção de metais e lucro da empresa. O projeto consiste na revisão de práticas operacionais, auditoria e amostragem, benchmarking, modelagem e simulações das operações de perfuração e desmonte e cominuição. Isto permite uma análise holística das operações para identificar oportunidades de melhorias e desenvolver estratégias integradas e otimizadas de operação da mina-à-planta. O projeto incluiu o sistema exclusivo da Metso, SmartTag™, para rastrear o minério dos furos de desmonte na mina até a planta concentradora com o objetivo de correlacionar os tipos de minério e de desmonte com os resultados de desempenho da planta. O sistema de modelamento geometalúrgico automatizado chamado GeoMetso™ utiliza a tecnologia de rastreamento de minério SmartTag™ para coletar continuamente dados de desempenho da planta e atualizar automaticamente os modelos preditivos e o modelo de blocos em tempo real. Este sistema é a base para a implementação, validação e melhoria contínua das estratégias integradas e otimizadas de operação, além de auxiliar na reconciliação da mina-à-planta e planejamento de lavra.

**Palavras-chave:** Geometalurgia; SmartTag™; GeoMetso™; Simulação.

### GEOMETALLURGICAL MODELLING AND PROCESS INTEGRATION AND OPTIMISATION

#### Abstract

The main objectives of Metso's Process Integration and Optimisation are to aid in the development of an integrated mining and milling strategy that minimises the overall cost per ton for the mining and milling stages of clients operation, minimises energy consumption, and maximises throughput, metal production and company profit. Metso's consulting projects uses the unique SmartTag™ system to track ore from the blast holes in the mine to the concentrator in order to link ore type and blasting outcomes to plant performance. Review of operating practices, audits and surveys, benchmarking, modelling and simulation are conducted for the current drill and blasting and comminution processes. This enables holistic analysis of the operation to identify opportunities for improvement and develop integrated and optimised operating strategies from the mine to the plant. An automated geometallurgical modelling system called Geometso™ uses the SmartTag™ system to link the mine block model, plant performance from the process control system, and geometallurgical models in real time. This system forms the basis for implementation, validation, and continuous improvement of the integrated and optimised operating strategies besides mine to mill reconciliation, and further blast optimization.

**Keywords:** Geometallurgy; SmartTag™; GeoMetso™; Simulation.

- <sup>1</sup> Eng. eletricista, bacharelado, eng. de produtos, Process Optimization - PRO, Metso Brasil, Sorocaba, SP, Brasil.
- <sup>2</sup> Engenheiro eletricista, bacharelado, gerente global de produtos, Process Optimization - PRO, Metso Austrália, Brisbane, Queensland, Austrália.
- <sup>3</sup> Engenheira de Minas, mestrado, engenheira de minas, Process Optimization - PRO, Metso Austrália, Brisbane, Queensland, Austrália.
- <sup>4</sup> Engenheiro de Minas, bacharelado, gerente de tecnologia de processo, Process Optimization - PRO, Metso Brasil, Sorocaba, SP, Brasil.
- <sup>5</sup> Engenheira de Minas, mestrado, engenheira de tecnologia de processo, Process Optimization - PRO, Metso Brasil, Sorocaba, SP, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

A metodologia do projeto de Integração e Otimização de Processos da Metso envolve o desenvolvimento de estratégias de operação e controle integradas da mina à planta para minimizar o consumo de energia e maximizar a taxa de processamento, produção de metais e lucro da empresa. O processo de otimização tem início com a caracterização do minério para definir os domínios do corpo de minério que apresentem comportamentos similares ao longo dos processos de desmonte e de cominuição. O sistema de rastreamento de minério SmartTag™, é usado para rastrear o minério caracterizado na mina através dos britadores e finalmente até os moinhos. Com as características do minério conhecidas, auditorias detalhadas de perfuração e desmonte e amostragens completas das operações de processamento são realizadas para desenvolver modelos específicos para cada operação (desmonte, cominuição, separação). O plano de fogo é otimizado para os diferentes domínios de desmonte com o objetivo de produzir uma fragmentação consistente do ROM para todos os tipos de minério e para maximizar a produtividade e a eficiência da cominuição nas operações subsequentes.

O Sistema SmartTag™ também é utilizado para melhorar a exatidão e a capacidades preditiva do modelamento geometalúrgico e atualizar automaticamente o modelo de blocos. Esses dados são comparados automaticamente com as previsões do modelo e atualizados no modelo de blocos em tempo real. Como resultado, o modelo de blocos é continuamente refinado com dados reais da planta, eliminando a necessidade de dispendiosos testes adicionais de caracterização do minério. Dados mais precisos no modelo de blocos melhoram o planejamento de lavra, e a planta recebe um aviso prévio do tipo de minério prestes a ser processado. Ajustes podem então serem feitos nos planos de fogo e nos parâmetros operacionais para otimizar o processo.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Caracterização do Minério

A metodologia de otimização começa com a caracterização mineral em termos de resistência e estrutura e propriedades de cominuição. Os dados de caracterização mineral são usados para definir os 'domínios' (contendo minério com propriedades similares) que devem se comportar de modo semelhante durante o desmonte.

Estrutura é uma medida das fraturas naturais e descontinuidades no maciço rochoso e é determinada pelas falhas e fraturas in-situ e podem ser quantificadas pelo parâmetro de designação de qualidade da rocha (RQD - Rock Quality Designation), mapeando frequência de fraturas e falhas. A resistência de rocha pode ser medida com testes laboratoriais, como o índice de carga pontual (PLI -Point Load Index, IS50), parâmetros de quebra do teste JK Drop Weight (A, b, ta) ou do teste SMC Drop Weight Index (DWi). A resistência à compressão uniaxial (UCS) é a medida fundamental de resistência da matriz rochosa e pode ser estimada a partir dos valores de PLI para reduzir a necessidade de testes em laboratório.

Em termos gerais, a resistência da rocha (dureza) controla a quantidade de finos gerados no desmonte, e a estrutura do maciço rochoso tem impacto na geração de grossos na distribuição de tamanho do ROM resultante. O plano de fogo pode ser otimizado para os diferentes domínios de desmonte com o objetivo de produzir uma

fragmentação consistente do ROM que irá maximizar a produtividade e a eficiência da cominuição nas operações subsequentes de cominuição.

## 2.2 Modelo e Simulações de Fragmentação do Desmonte

Otimizar a fragmentação do ROM resultante do desmonte é essencial para alcançar e manter a máxima performance dos circuitos de cominuição e a operação global. O modelo de fragmentação do desmonte desenvolvido pela Metso, que é sensível aos principais parâmetros que afetam o desempenho do desmonte, é calibrado com os dados de resistência e estrutura do maciço rochoso e parâmetros do plano de fogo, tais como afastamento e espaçamento do polígono auditado. A medição da distribuição granulométrica real do ROM produzido pelo desmonte auditado através de análise de imagens é utilizada para calibrar as frações mais grossas da curva. Resultados do modelo de fragmentação do desmonte são comparados com os finos amostrados na correia do produto do britador primário e com os resultados da distribuição granulométrica obtido através da análise de imagens conforme Figura 1. Uma limitação desta técnica de medição por análise de imagens para determinar a distribuição granulométrica do ROM é sua baixa precisão na fração de finos, por conseguinte, a distribuição granulométrica da amostragem da correia do produto do britador primário é utilizada para corrigir a fração de finos da curva do modelo de fragmentação.

As previsões do modelo devem apresentar boa correlação com os valores medidos em ambas as extremidades grossa e fina da distribuição granulométrica. Isto demonstra que o modelo é bastante preciso na predição da fragmentação do ROM, e adequado para estudos de simulação.

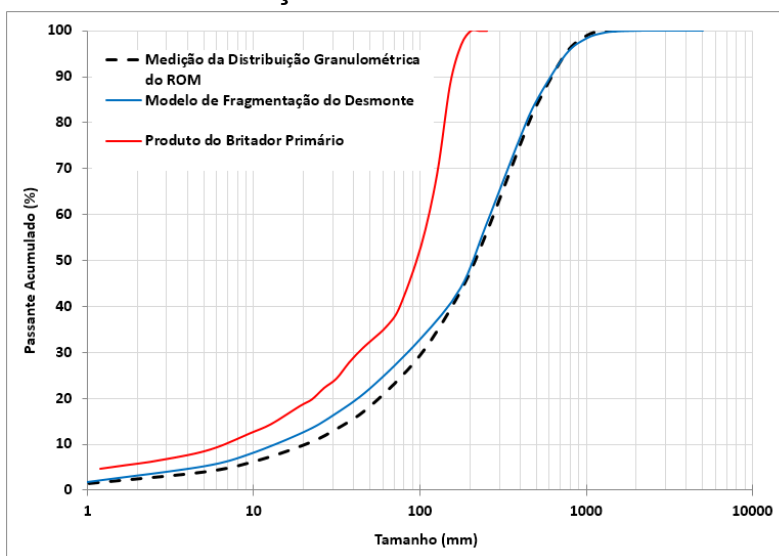


Figura 1. Modelo de fragmentação do desmonte calibrado.

## 2.3 SmartTag™ - Sistema de Rastreamento de Minério

Para vincular o desempenho do processo com a caracterização do minério e os resultados do desmonte, o minério do polígono auditado é rastreado da mina através dos processos subsequentes usando o sistema SmartTag™.

O sistema SmartTag™ permite o rastreamento de parcelas de minério a partir da mina, através do britador e, finalmente, até os moinhos, como mostra a Figura 2. As SmartTags™ são construídas em torno de transponders de rádio-frequência - RFID

passivos. Como não possuem bateria interna elas podem permanecer nas pilhas de estocagem por longos períodos. As SmartTags são detectadas quando passam por antenas em pontos críticos antes da moagem e fornecem informações valiosas sobre a movimentação do minério e tornam possível vincular os dados espaciais associadas com o minério na mina, com os dados com base no tempo da planta.

As SmartTags™ são inseridas na coluna do tampão de cada furo de desmonte do polígono auditado. A origem de cada SmartTag™ é salva com o seu número de identificação único (ID). Quando as SmartTags e o minério associado passam pelas antenas na planta, o sistema registra automaticamente o tempo de detecção com o ID da SmartTag, assim, a origem do minério sendo processado num dado momento é conhecida. Isso garante que o minério do polígono auditado seja o mesmo alimentado durante as amostragens de planta, e permite correlações entre a origem do minério e desempenho do processo.

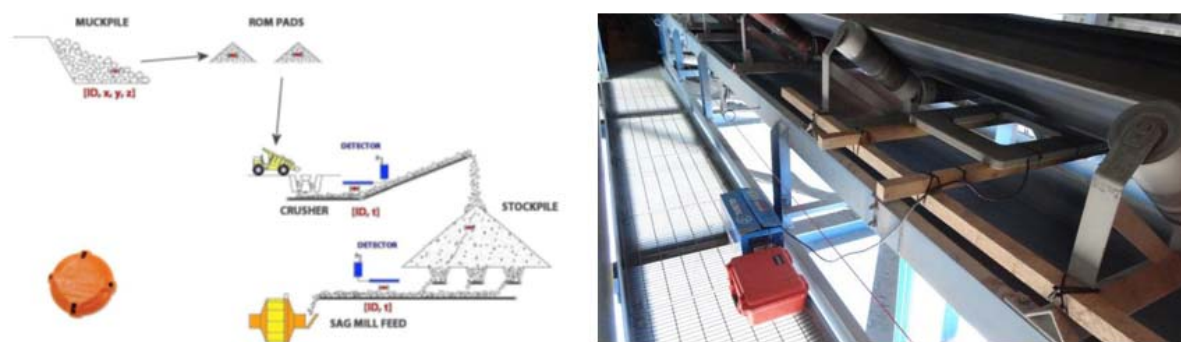


Figura 2. Rastreamento de Minério com as SmartTags.

## 2.4 Modelo e Simulações do Circuito de Cominuição

Uma amostragem completa do circuito de cominuição é conduzida quando o circuito está processando o minério proveniente do polígono auditado conforme indicado pelo sistema de rastreamento SmartTag™. O objetivo da amostragem é obter os dados necessários para calibrar os modelos matemáticos para cada um dos equipamentos principais, avaliar o desempenho de processo e determinar oportunidades de melhoria.

A medição e a caracterização da dureza e moabilidade de um minério com testes laboratoriais são importantes para a avaliação e modelagem do circuito de cominuição. Os testes comuns incluem: o teste JK Drop Weight com parâmetros (A, b,  $t_a$ ) ou o SMC Drop Weight Index (DWi) para medir a resistência a quebra por impacto; o Índice de Energia SAG (SPI); e o Índice de Trabalho de Bond para moinhos de bolas e barras para medir a moabilidade.

Os parâmetros  $A*b$  e  $t_a$  são determinados a partir do teste DWT. O valor  $A*b$  caracteriza o minério em termos de resistência à quebra por impacto e o valor  $t_a$  caracteriza o minério em termos de resistência à abrasão. O teste de BWi de bolas é realizado considerando uma malha de abertura igual a 106  $\mu$ m e indica a dureza do minério em relação à moagem de bolas (moabilidade).

## 2.5 GeoMetso™ - Modelamento Geometalúrgico Automatizado

O conceito de geometalurgia integra as disciplinas de geologia, mineração e metalurgia, com o objetivo de desenvolver estratégias operacionais proativas em

função da variabilidade do minério. A modelagem geometalúrgica requer uma compreensão detalhada das propriedades relevantes do minério, e modelos de como essas propriedades de minério afetarão o desempenho do desmonte, britagem, moagem e das fases de separação, em termos de taxa de produção, recuperação e teor do concentrado - produto. Este é o fundamento dos modelos preditivos e de previsão de produção; relacionar o desempenho da planta com as propriedades de minério. Os modelos preditivos dependem de dados de caracterização do minério e da coleta destes dados, que é um trabalho intensivo e caro, portanto, muitas vezes escassamente distribuídos por todo o depósito de minério.

Além disso, na maioria das operações de mineração é difícil manter o controle de um bloco de 1.000 m<sup>3</sup> de minério (e suas características geotécnicas) a partir do desmonte, através das pilhas de ROM, pilhas de estocagem, e circuitos de britagem e moagem. A incerteza resultante das características de alimentação faz qualquer abordagem empírica para a modelagem geometalúrgica difícil.

O sistema SmartTag™ permite o minério (e suas características) ser rastreados através do processo com precisão. Uma extensão deste sistema, o GeoMetso™, fornece uma ligação entre a origem do minério (e as características) com os dados de desempenho da planta através do sistema de controle de processo e atualiza automaticamente os modelos preditivos e modelo de blocos em tempo real. O conceito GeoMetso™ está representado esquematicamente na Figura 3. Domínios de minério iniciais são definidos com base em testes de caracterização de minério preliminares e modelos preditivos são desenvolvidos para cada operação da unidade. Volumes de minério são rastreados continuamente da mina ao processo usando a tecnologia SmartTag™ e quando associados aos dados de processo coletados a partir do sistema de controle fornecem informações reais de desempenho da planta (taxa de produção, recuperação, teor, etc) para cada tipo de minério e condições de desmonte.

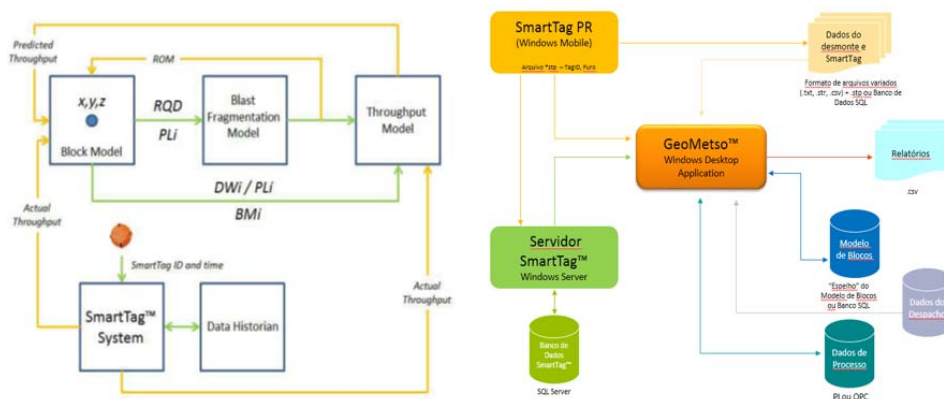


Figura 3. Esquemáticos do GeoMetso™.

Isto elimina a necessidade de testes adicionais de caracterização do minério e melhora a precisão e a capacidade preditiva dos modelos geometalúrgicos que foram desenvolvidos. Tendo uma melhor compreensão do impacto dos tipos de minério no desempenho, pode-se melhorar o planejamento da mina em longo prazo e prever o investimento de capital em equipamentos com a devida antecedência. Em curto prazo, a planta de processamento recebe notícias antecipadas sobre o(s) tipo(s) de minério que serão processados, podendo-se ajustar as condições de operação para otimizar o desempenho do circuito. Uma imagem típica da interface do software GeoMetso™ é mostrada na Figura 4.

O sistema GeoMetso™ permite estabelecer regras para capturar os dados de processo com base no tempo de detecção de SmartTag™ em um determinado ponto

de detecção. Quando uma SmartTag™ é detectada em um destes pontos, é feita uma média dos dados de processo escolhidos durante um período de tempo definido. Um "offset" ou desvio pode ser inserido no tempo de detecção da SmartTag™, podendo ser adiado (positivo) ou antecipado (negativo) no tempo. Os dados de processo são capturados para mais e para menos, da metade do período de tempo definido para o cálculo da média após a detecção de cada SmartTag™. Isto é mostrado graficamente na Figura 5.

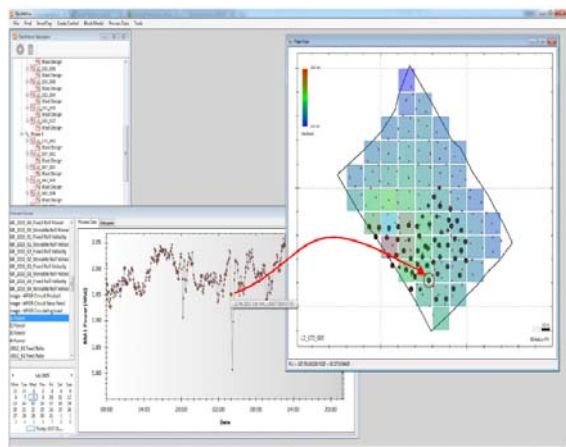


Figura 4. Interface do software GeoMetso™.

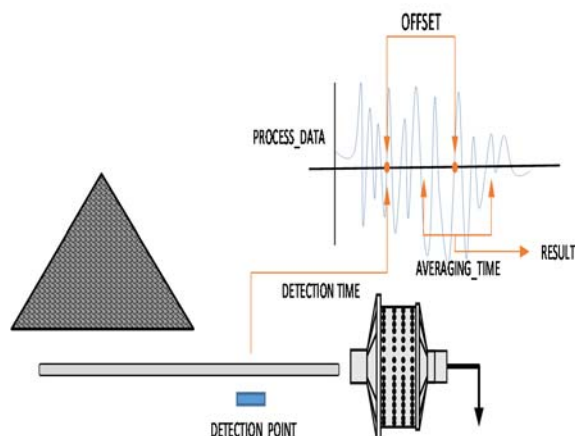


Figura 5. Esquemático – Captura dos dados de processo.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na metodologia do projeto, domínios de desmonte são definidos de acordo com as propriedades geotécnicas do minério, RQD para estrutura e PLI para resistência mapeadas dentro do depósito através do modelo geotécnico desenvolvido pela Metso. Para o exemplo do site A, a resistência da rocha foi dividida em 3 categorias: macio (< 60 MPa), médio (60 to 100 MPa) e duro (> 100 MPa). A estrutura foi dividida em duas categorias: fino (RQD < 80%) e grosso (RQD > 80%). A distribuição para a vida útil da mina dos domínios resultantes é mostrada na Figura 6. Zonas em uma mina em que apresentem rochas com resistência e estrutura similares devem resultar em distribuições granulométricas similares do ROM quando desmontados da mesma maneira.

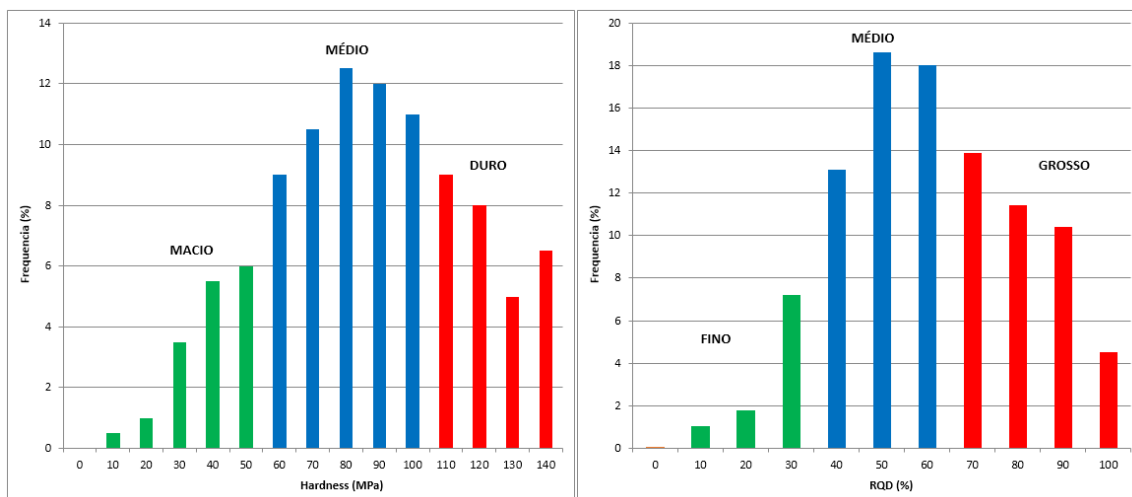


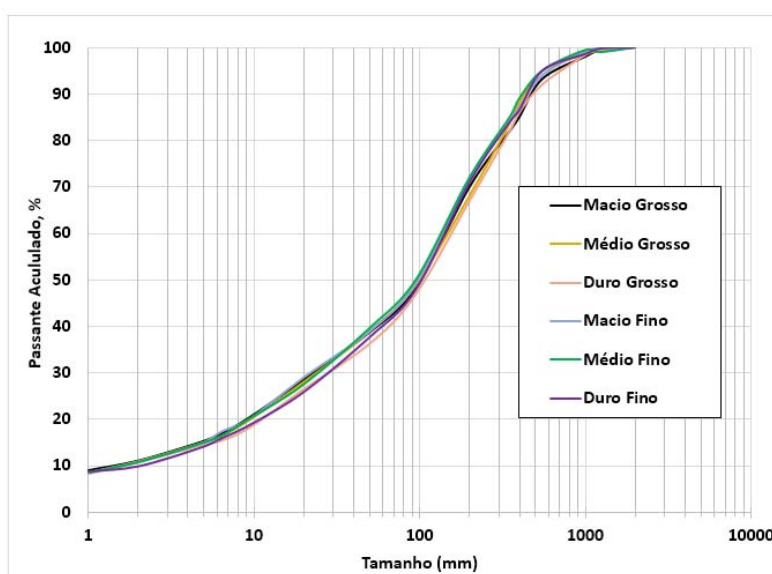
Figura 6. Distribuição de frequência de dados de RQD e UCS.

Simulações são conduzidas utilizando o modelo de fragmentação do desmonte calibrado para investigar o impacto nas mudanças no espaçamento, afastamento, comprimento do tampão, diâmetro do furo e razão de carga na fragmentação do ROM. O plano de fogo é otimizado para os diferentes domínios de desmonte com o objetivo de produzir uma fragmentação consistente e mais fina do ROM para todos os domínios conforme Tabela 1.

**Tabela 1.** Exemplo de parâmetros de entrada e resultados para simulações de desmonte

Domínio de Desmonte	Cenário 1	Cenário 2	Macio Grosso	Médio Grosso	Duro Grosso	Macio Fino	Médio Fino	Duro Fino
Altura do Banco (m)	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
Afastamento (m)	8.2	6.8	7.3	6.8	6.8	7.3	7.3	7.3
Espaçamento (m)	9.4	7.8	8.4	7.8	7.8	8.4	8.4	8.4
Diâmetro do Furo (mm)	311.0	311.0	311.0	311.0	311.0	311.0	311.0	311.0
Subperfuração (m)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Tampão (m)	6.8	6.7	6.8	5.8	5.8	6.8	5.8	5.8
Razão de Carga (kg/m <sup>3</sup> )	0.76	1.12	0.96	1.22	1.22	0.96	1.06	1.06
Razão de Carga (kg/t)	0.29	0.43	0.37	0.47	0.47	0.37	0.41	0.41
Diferença	-	48%	28%	62%	62%	28%	41%	41%

As correspondentes previsões do modelo de distribuição granulométrica do ROM estão apresentadas na Figura 7.



**Figura 7.** Fragmentação prevista para os planos de fogo de cada domínio.

O modelo de desmonte e fragmentação da Metso foi usado para otimizar o plano de fogo para cada domínio e uma "guia de diretrizes" de desmonte é gerada; o qual fornece "diretrizes", ou seja, um plano de fogo otimizado para cada domínio de desmonte. O plano de desmonte de acordo com este guia fornece uma distribuição granulométrica de alimentação mais consistente e otimizada para os processos subsequentes, aumentando a tonelagem processada, a estabilidade e a eficiência do processo. Seguir o Guia de Diretrizes também evita o desmorte excessivo em domínios de minérios mais macios, reduzindo assim o consumo de energia e custos.

Os três planos de fogo recomendados para cada domínio de resistência e estrutura do maço rochoso são fornecidos na Tabela 2.

**Tabela 2.** Guia de diretrizes para desmonte para os domínios de dureza e estrutura

		Estrutura RQD (%)	
		0-80	80-100
Resistência UCS (MPa)	< 60	<b>Macio Fino / Macio Grosso</b> 7.3 x 8.4 , T = 6.8 m Razão de Carga = 0.37 kg/t	
	60 - 100	<b>Médio Fino / Duro Fino</b> 7.3 x 8.4 , T = 5.8 m Razão de Carga = 0.41 kg/t	<b>Médio Grosso / Duro Grosso</b> 6.8 x 7.8 , T = 5.8 m Razão de Carga = 0.47 kg/t
	> 100		

Os dados da amostragem e os parâmetros de caracterização medidos são utilizados para desenvolver e calibrar modelos específicos de cominuição através do software JKSimMet. Resultados de dados de caracterização do site B utilizados nas simulações de planta são mostrados na Tabela 3. O valor A\*b classifica o minério como 'moderadamente brando' em termos de resistência à quebra por impacto e o valor  $t_a$  classifica o minério como 'brando' para resistência à abrasão. O BWI de 13 kWh/t indica que o minério é de média dureza para moagem de bolas. Os modelos necessitam de uma boa correlação entre os dados obtidos na amostragem para serem considerados adequados para a realização de simulações. A Tabela 3 mostra exemplos de resultados de testes de DWT e BWi de bolas. A Tabela 4 mostra a faixa de classificação para valores de DWT e a Tabela 5 para valores de BWi de bolas.

**Tabela 3.** Resultados de testes de DWT e BWi

Minério	A	b	A*b	$t_a$	BWi (kWh/t)
Amostra da correia	57.8	1.06	61.3	0.67	13

**Tabela 4.** Faixa de classificação para parâmetros do DWT

Parâmetro	Muito duro	Duro	Mod. Duro	Médio	Mod. Brando	Brando	Muito Brando
Axb	<30	30-38	38-43	43-56	56-67	67-127	>127
$t_a$	<0,24	0,24-0,35	0,35-0,41	0,41-0,54	0,54-0,65	0,65-1,38	>1,38

**Tabela 5.** Faixa de classificação para valores de BWi de bolas

Parâmetro	Muito duro	Duro	Médio	Brando
Wi	>20	14-20	9-14	7-9

Finalmente o desempenho da planta é atribuído para cada bloco do modelo de blocos. A Figura 8 mostra como exemplo os blocos de um polígono coloridos de acordo com os dados de processo obtidos da balança instalada na correia de alimentação do circuito de moagem SAG. O sistema GeoMetso™ estabelece correlações entre os dados de processo, como teor de alimentação da flotação, recuperação, consumo de energia, analisadores online de granulometria entre outros com as propriedades física do minério, parâmetros do modelo de blocos e parâmetros do desmonte visando a



validação e melhoria contínua das estratégias integradas e otimizadas de operação recomendadas pela Metso.

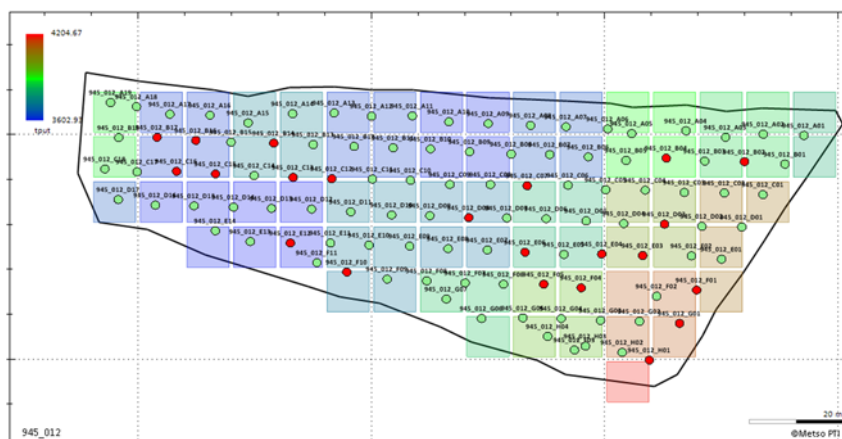


Figura 8. Resultado do software GeoMetso™ - Blocos com informação de desempenho da planta

Os principais resultados atingidos nos mais de 430 projetos de otimização entregues pela metodologia da Metso são:

- Diminuição da fragmentação geral do ROM (P80).
- Maior utilização dos circuitos primário e secundário.
- Aumento da taxa de produção (5-30%), mantendo o tamanho do produto final necessário.
- Melhoria da eficiência energética do circuito de cominuição (5-25%) para minérios mais duros.
- 1-5% mais recuperação.

Além de um banco de dados relacional das propriedades físicas do minério na mina com os dados de desempenho da planta para otimizar o processo como um todo, melhoria da reconciliação e planejamento estratégico de longo prazo, predição precisa do desempenho futuro, otimização de estratégias de blend na alimentação de minérios, predição da necessidade de aquisições de novos equipamentos com antecedência e previsão antecipada de alimentação de tipos de minérios para ajuste das condições operacionais.

## 4 CONCLUSÃO

Em muitas minas, há um potencial significativo para aumento de produção, economia de custos e redução do impacto ambiental por meio da adoção de uma abordagem integrada para a otimização.

## REFERÊNCIAS

- 1 La Rosa, D., Valery, W., Wortley, M., Ozkocak, T., Pike, M., 2007. The Use of Radio Frequency ID Tags to Track Ore in Mining Operations, in Proceedings Symposium on Computer Applications and Operations Research in the Minerals Industries (APCOM), Santiago, Chile.
- 2 Burger, B., McCaffery, K., Jankovic, A., Valery, W., McGaffin, I., 2006. Batu Hijau Model for Throughput Forecast, Mining and Milling Optimisation and Expansion Studies, SME 2006.

- 3 Lynch-Watson, S, Valle, R, Duffy, K, La Rosa, D, and Valery, W, 2013. GeoMetso™: A site-specific methodology to optimize production and efficiency over the life-of-mine, ProceMin 2013, p 507.
- 4 Rybinski, E., Gherzi, J., Davila, F., Linares J., Valery, W., Jankovic, A., Valle, R., Dikmen S., 2011. "Optimisation and Continuous improvement of the Antamina Comminution Circuit", Proceedings of the 5th International Conference on Autogenous and Semi-Autogenous Grinding Technology, SAG2011.