

# DIMENSIONANDO CIRCUITOS DE MOAGEM SAG: A EXPERIÊNCIA DO CENTRO DE DESENVOLVIMENTO MINERAL DA CVRD

E. C. Silva<sup>1</sup>, G. S. Maia<sup>2</sup>, H. D. Júnior<sup>3</sup>

Centro de Desenvolvimento Mineral - Cia. Vale do Rio Doce - Rod. Br. 262 - km 296 - Sta. Luzia - Minas Gerais - Brasil - CEP 33030-970 Cx. Postal 09

E-mail: Evandro.silva@cvrd.com.br, Geraldo.maia@cvrd.com.br, Hdelboni@usp.br

## RESUMO

Na área mineral, assim como em outros ramos da atividade econômica, a demanda por empreendimentos cada vez mais eficientes, tanto do ponto de vista técnico quanto do ponto de vista econômico (eficiência de aplicação do capital) mostra-se cada vez mais acentuada. Esta pressão traduz-se nas empresas de grande porte, via de regra, pela necessidade de desenvolvimento de grandes depósitos minerais e a implantação de projetos de elevada capacidade de processamento em circuitos compostos por um número cada vez menores de linhas.

Isto é, deve-se buscar, além da economia de escala utilizando-se os equipamentos de maior porte disponíveis, circuitos com pequeno número de operações unitárias, e que apresentem ainda, elevada confiabilidade operacional (disponibilidade), eficiência de processamento e eficiência energética. Os projetos de cobre, especialmente os de minérios sulfetados, dado as necessidades de processamento de grandes volumes de em função dos teores cada vez menores, média da ordem de 0,8 a 1,2% de Cu) enquadram-se perfeitamente neste cenário.

Circuitos de moagem semi-autógena (SAG) ou autógena (AG), de dimensões e potências cada vez maiores, são componentes presentes na totalidade dos grandes projetos de cobre das três últimas décadas. Entretanto, em função do desempenho destes circuitos serem extremamente dependentes das características e variabilidade dos minérios, a sua seleção, configuração, dimensionamento e operação torna-se uma questão complexa e vital para o sucesso do empreendimento.

Em função dos projetos de cobre a serem implantados pela CVRD na região de Carajás nos próximos anos, o Centro de Desenvolvimento Mineral desenvolveu uma metodologia para a seleção, configuração e pré-dimensionamento de circuitos de moagem SAG e AG baseado em estudos de variabilidade em testemunhos de sondagem, modelamento e simulação de processos e campanhas de moagem em escala piloto.

Apresenta-se neste artigo, as linhas gerais desta metodologia, e os resultados de sua aplicação nos projetos das instalações de moagem dos projetos Sossego e Alemão.

PALAVRAS-CHAVE: moagem, semi-autógena, metodologia, cobre.

## 1. COBRE - UMA NOVA ÁREA DE NEGÓCIOS PARA A CVRD

A Cia. Vale do Rio Doce (CVRD) dentro dos seus objetivos de consolidar sua posição com uma das maiores mineradoras do mundo, diversificar sua linha de produtos, internacionalizar sua atuação e, sobretudo, aumentar o seu valor de mercado, elegeu a área de cobre como uma das suas principais linhas de negócios.

Fruto de um intenso e vasto programa de pesquisas geológicas desenvolvido principalmente ao longo das duas últimas décadas pela Docegeo na região amazônica especialmente no estado do Pará, a CVRD conta hoje com 5 grandes projetos de cobre em diferentes estágios de desenvolvimento (Sossego, Salobo, Alemão, Cristalino e Alvo 118) além de diversos outros alvos ainda em estágio iniciais de pesquisa.

A completa implantação destes projetos, prevista para até a segunda metade desta década, posicionará a CVRD como uma das 5 maiores produtoras de cobre do mundo. Este fato levará o Brasil de uma condição de importador de cobre, quer sob a forma de concentrado quer sob a forma de cobre metálico, a uma posição de exportador com significativos efeitos na balança comercial nacional. Prevê-se, portanto, a formação na região de Carajás e no seu entorno de um dos maiores e mais importantes pólos mineradores do mundo com forte impacto econômico e social para a região.

A implantação deste ambicioso programa, iniciado com a implantação do Projeto Sossego com previsão de início de

produção em 2004 e investimentos de R\$ 985 milhões, requer não apenas elevada capacidade financeira e administrativa, já comprovada ao longo dos seus 60 anos de sucesso, mas também um corpo técnico e gerencial altamente capacitado.

## 1.1. Características dos projetos de cobre

Os projetos de cobre caracterizam-se pela utilização intensiva de capital, da ordem de US\$ 2.500 a US\$ 4.000/t/ano de capacidade de produção de cobre contido em concentrados, e elevadas taxas de processamento.

Em função dos teores relativamente baixos, em média da ordem de 0,8 a 1,3% de Cu para depósitos lavrados a céu aberto, os projetos de cobre somente se viabilizam através de grandes escalas de produção. Além da grande escala, a eficiência operacional, traduzida em termos de elevadas recuperação metalúrgica e disponibilidade e baixos custos operacionais, é fundamental para a economicidade do empreendimento.

Esta busca pela eficiência, tanto de capital quanto operacional, nas instalações de beneficiamento é perseguida desde as primeiras etapas do projeto visando circuitos simples, de elevada capacidade horária de processamento, com o menor número possível de linhas e equipamentos, elevada eficiência energética e mínimo consumo de insumos (corpos moedores, revestimentos, reagentes, etc.).

Na grande maioria das instalações de beneficiamento para a produção de concentrados a partir de minérios sulfetados, os custos dos circuitos de cominuição (britagem e moagem) representam da ordem de 35 a 60% do custo de investimento e de 35 a 50% do custo operacional. Estes números por si só revelam a importância da correta seleção, dimensionamento e operação destes circuitos. Além do aspecto do custo operacional deve-se destacar ainda a influência da qualidade do produto dos circuitos de cominuição no desempenho das etapas subsequentes de concentração, desaguamento e manuseio.

Nos grandes projetos, a necessidade de menores investimentos e altas capacidades de processamento requeridas nos circuitos de moagem, variando de 1600 a 3500 t/h, conduzem, na quase totalidade dos casos à adoção de circuitos baseados na utilização de moinhos semi-autógenos (SAG) ou autógenos (AG).

Estes equipamentos permitem, simultaneamente, elevadas capacidades de processamento, alimentação de material grosso (produto da britagem primária) e geração de produto final, para os casos de circuitos de estágio único de moagem, ou alimentação para o estágio de moagem secundária em moinho de bolas ou pebbles. O reduzido número de equipamentos no circuito, aliada a sua alta confiabilidade operacional destes, resulta em instalações mais compactas, menor necessidade de mão-de-obra, quer de operação quer de manutenção, menor estoque de peças e componentes e, por consequência, menores custos de investimento e operacional.

## 2. CIRCUITOS AG/SAG

Apesar dos circuitos de moagem SAG/AG serem presença quase constante nos novos projetos de médio porte e constante na totalidade dos de grande porte, uma série de conceitos, ou “mitos”, ainda envolvem este tipo de circuito:

- Consumo energético específico mais alto do que os circuitos convencionais;
- Dimensionamento empírico;
- Necessidade de grande massa de minério para ensaios preliminares;
- Baixa flexibilidade dos circuitos;
- Operação complexa e instável;
- Grandes variações de desempenho em função dos tipos de minério;
- Pré-operação longa e dispendiosa.

Uma parcela expressiva destes “mitos” vem de experiências de insucesso decorrente de projetos equivocados e práticas operacionais inadequadas e não pelo equipamento em si. Dentre estas causas pode-se citar algumas:

- Ausência/insuficiência de informações sobre as características tecnológicas do(s) minério(s);
- Baixo conhecimento das jazidas em termos de possíveis graus de variabilidade do minério (tipologias);
- Critérios inconsistentes de projeto (relação de redução, carga circulante, grau de enchimento, taxa de geração de pebbles, etc.);
- Critérios de dimensionamento inadequados (Bond);
- Inexistência de técnicas simples e diretas para projeto de novas instalações e otimização de circuitos existentes;
- Inexistência de técnicas para controle do processo;
- Custos de capital decrescentes somente com o advento de equipamentos de grande porte;
- Baixo grau de entendimento de conceitos e peculiaridades associadas ao processo;
- Inexperiência em projetos de revestimentos, grelhas, mecanismos de descarga, etc. para grandes moinhos;
- Instrumentação precária.

Estes “mitos”, entretanto, vem sendo aos poucos desfeitos em função do maior conhecimento dos processos envolvidos, da divulgação das experiência, tanto de sucessos quanto de insucessos, e sobretudo pela sua crescente utilização e pelo

crescimento dos equipamentos. Estima-se que tenham sido comercializados e instalados até o ano 2000 mais de 1000 moinhos AG/SAG de diferentes tamanhos e potências.

Abaixo, apresenta-se a evolução das dimensões e potências destes equipamentos:

- 1959 – 1º Moinho AG de 18' – 600 hp
- 1962 – 1º Moinho AG de 24' – 1750 hp
- 1965 – 1º Moinho AG de 32' – 6000 hp
- 1973 – 1º Moinho AG de 36' – 12000 hp
- 1986 – 1º Moinho *Gearless* SAG – 11000 hp
- 1996 – 1º Moinho SAG de 38' – 26800 hp
- 1996 – 1º Moinho SAG de 40' – 26800 hp

A Tabela I, consolida os fornecimentos de grandes moinhos em relação ao seu diâmetro nominal em pés.

**Tabela I - Moinhos SAG/AG de grande porte instalados**

Diâmetro nominal (pés)	Unidades em operação	Potência Instalada (khp)
40	1	26
38	5	24-27
36	24	12-18
34	21	6-15
32	62	6-11

### 3. A METODOLOGIA CVRD

Em função das escalas de produção prevista para os projetos de produção de concentrados situarem-se entre 12 e 24 Mt/a, 15 Mt/a no caso específico do Projeto Sossego, a utilização de circuitos AG/SAG passa a ser uma premissa básica de projeto.

De forma a assegurar-se que os circuitos de moagem AG/SAG atinjam de forma consistente as capacidades requeridas pelo projeto, e para não incorrer nos mesmos fatores de insucesso anteriormente apresentados, o Centro de Desenvolvimento Mineral (CDM) da CVRD desenvolveu uma metodologia própria para a seleção e dimensionamento de circuitos de moagem. O desenvolvimento desta metodologia envolveu instituições de pesquisa e ensino, empresas de engenharia além de parceiros comerciais e fornecedores de equipamentos.

A metodologia desenvolvida pelo CDM apresenta, de fato, uma visão mais ampla do que apenas o dimensionamento dos circuitos de moagem. Como um dos objetivos do CDM é a “entrega” para a futura área de negócio um estudo completo de pré-viabilidade do empreendimento, a seleção e o dimensionamento circuito em si torna-se uma das etapas cobertas pela metodologia. O seu êxito reside na intensa cooperação das áreas de geologia, lavra, tecnologia, engenharia e análise de negócios e no contínuo refinamento de informações e das alternativas propostas até alcançar-se a solução mais adequada.

A metodologia prevê a realização dos seguintes ensaios e estudos:

- Escala de bancada utilizando-se amostras de furos de sondagem a diamante:

Drop Weight Test (DWT) - ensaio simplificado para amostras de 2" e ensaio completo para amostras de 6". Metodologia desenvolvida pelo Prof. Homero Delboni da Escola Politécnica da USP baseada na metodologia do JKMR;

SAG Power Index (SPI)- ensaio completo para amostras de 2" e 6". Ensaio desenvolvido pela MinnovEx;

Densidade real, teor de magnetita, Wi e Ai de Bond - amostra composta para amostra de furos de 2" e amostra simples para furo de 6". Em função da pequena massa do segmentos de furos de 2" enviados para os ensaios de Wi de Bond de moagem, faz-se necessário a composição de amostras (3 segmentos de testemunho) para a realização do ensaio. No caso das amostras de 6" não ocorre a necessidade de composição;

Compressão axial simples - amostras de 2" e 6" para estudos de simulação de desmonte.

- Escala piloto:

Ensaio de moagem AG/SAG em diferentes configurações de circuito e condições operacionais;

Ensaio de moagem em moinho de bolas;

Ensaio de britagem - britagem de pebbles em britador côncico para determinação do Wi de britagem e caracterização do produto.

Descreve-se a seguir, resumidamente, os ensaios de DWT e SPI.

O **Drop Weight Test**, desenvolvido pelo JKMR da Austrália no início da década de 90, é uma evolução do ensaio do

pêndulo duplo e visa determinar a resistência do minério ao impacto. O ensaio consiste, basicamente, em a partir de uma determinada altura deixar cair em queda livre um sólido “indeformável” de massa conhecida sobre uma partícula de dimensões também conhecidas. O método considera que toda a energia potencial é transformada em energia de impacto responsável pela fragmentação da partícula.

O ensaio dito completo é realizado em 5 classes de tamanho de partículas, cada classe com um mínimo de 20 a 30 partículas, em 3 níveis de energia (função da massa do sólido e da altura da queda). Após a quebra das partículas de uma determinada classe para um dado nível de energia é realizada a análise granulométrica do produto utilizando-se uma

série de peneiras com razão  $\sqrt{2}$ . A partir desta análise granulométrica, determina-se a percentagem passante em 10% tamanho inicial da partícula ( $t_{10}$ ). O valor de  $t_{10}$  relaciona-se com a energia específica de quebra pela expressão:

$$t_{10} = A * (1 - e^{-(b * Ecs)}),$$

sendo  $Ecs$  a energia específica de quebra por impacto e  $A$  e  $b$  parâmetros desta função.

Através do teste de abrasão, realizado em moinho de 300 mm x 300 mm dotado de 4 barras levantadoras de 10 mm cada no qual é moída durante 10 minutos a 70% da velocidade crítica 3 kg de amostra classificada em -55+38mm, determina-se o valor  $t_4$ , o qual assume-se ser aproximadamente igual a 10% do valor de  $t_{10}$ . Este ensaio visa determinar a energia específica decorrente da cominuição por abrasão.

A partir dos parâmetros definidos nos ensaios de DWT e abrasão, da densidade real, análise granulométrica estimada para a alimentação do circuito de moagem e das dimensões e parâmetros de processo de um moinho AG ou SAG pré-definido é possível, através de modelos matemáticos do processo estimar: o consumo específico (kWh/t), o tamanho de transferência (T80), a taxa de geração de pebbles (t/h) e a capacidade do circuito (t/h).

**O método do SPI** desenvolvido pela MinnovEx, também na década de 90, assemelha-se ao método de determinação do Wi de Bond (método energético) porém com algumas diferenças tais como: dimensões do moinho, perfil interno e potência do moinho, distribuição granulométrica da alimentação e da carga de bolas e da massa alimentada.

O ensaio consiste em determinar o tempo (minutos) necessário para moer, no moinho de SPI, 2 kg de minério previamente reduzido a 100% passante em 3/4" e 80% passante em 1/2" até alcançar-se um produto 80% passante em 10#. Utilizando-se uma equação, determinada experimentalmente, e ajustada por um grande número de amostragens de circuitos industriais, determina-se o consumo específico (kWh/t) para a determinada amostra.

Visando reduzir o tempo e os riscos do desenvolvimento do projeto, paralelamente à fase inicial da pesquisa geológica são realizados estudos tecnológicos preliminares que incluem: a caracterização das amostras (física, química e mineralógica), estudos de concentração (definição de condições de concentração por flotação e pré-definição do grau de moagem requerido) e de moagem.

Nesta etapa são realizados da ordem de 6 a 10 ensaios de caracterização de moagem - ensaios de DWT simplificado, SPI, Wi e Ai. Estes ensaios visam dar uma idéia dos consumos específicos e da competência do minério e, em função do consumo específico e das prováveis taxas de alimentação estimar-se as dimensões do moinho primário.

Os produtos principais desta etapa de pesquisa geológica: o modelo geológico (delimitação e caracterização dos corpos mineralizados), o modelo de blocos, a estimativa dos recursos e um fluxograma básico de processo. De posse destas informações, elabora-se um estudo econômico preliminar onde são avaliadas diferentes escalas de produção, seus respectivos custos de investimento e operacionais e, para cada uma delas sua atratividade.

Para cada escala é “pré-dimensionado” o circuito de moagem considerando-se como caso base circuitos do tipo SABC, ou seja, moagem semi-autógena seguida por moagem de bolas com um circuito de britagem de pebbles (reciclo) retornando o produto ao moinho SAG.

Nesta etapa, denominada de “scope study”, os investimentos e custos operacionais para as instalações de beneficiamento são baseados nos resultados dos estudos tecnológicos preliminares, valores de benchmarking da indústria do cobre e dados de operações próprios de porte semelhante. Este estudo permite a escolha das prováveis escalas de produção definindo-se ainda pela continuidade ou não do projeto.

Uma vez que o “scope study” sinalize a viabilidade do empreendimento, parte-se para um detalhamento da geologia e uma avaliação da variabilidade do depósito, tanto em termos de moagem quanto de concentração, utilizando-se, basicamente, testemunhos de sondagem de 2". De modo a maximizar a utilização das amostras disponíveis obtendo o maior número de dados possíveis e evitar-se qualquer tipo de viés, cada amostra selecionada para caracterização tecnológica é submetida a seguinte sequência de ensaios: DWT, SPI, Wi, Ai, densidade real, teor de magnetita e análise química completa.

Esta seqüência de ensaios é ditada pela distribuição granulométrica requerida e dos produtos gerados em cada ensaio:

- O ensaio de DWT simplificado, por exemplo, requer a utilização de partículas em 3 classes de tamanho (-31.5+26.5 mm; -22.4+19 mm; -16+13.2 mm) gerando produtos “grosseiros” uma vez que a quebra se dá por impacto;
- Por sua vez, o ensaio de SPI requer que a alimentação esteja 100% abaixo de 3/4” e 80% abaixo de 1/2”. O produto do ensaio de SPI encontra-se com 80% abaixo de 10#;
- O produto do ensaio de SPI é então preparado, reduzido a -6#, para os ensaios de Wi e Ai de Bond. O produto destes ensaios é então caracterizado (análise química, densidade real e teor de magnetita) e submetido ao ensaio padrão de flotação sendo os produtos deste novamente caracterizado.

Este procedimento, além de permitir a obtenção de um expressivo número de informações por amostra, elimina qualquer questionamento em relação aos resultados de DWT e SPI uma vez que são utilizadas rigorosamente as mesmas amostras em ambos os ensaios. São realizados nesta etapa, em média, de 100 a 150 ensaios de DWT e SPI. Estes resultados são analisados estatisticamente de forma a ter-se uma idéia mais precisa da variabilidade do depósito e do grau de correlação entre os métodos utilizados visando identificar algum tipo de erro ou viés.

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização de moagem tais como os parâmetros A e b no ensaio de DWT, o tempo em minutos e o valor do P64 no ensaio de SPI e os resultados de Wi e Ai, são então “distribuídos” ao longo do modelo de blocos por métodos geoestatísticos. A partir destas estimativas, através de ferramentas de simulação estima-se para cada bloco: o consumo específico para as etapas de moagem primária (SAG/AG) e secundária (bolas), o consumo de revestimentos e corpos moedores, a capacidade máxima de processamento, o tamanho de transferência, etc.

#### **4. ENSAIOS EM ESCALA PILOTO**

Os resultados obtidos nos estudos de variabilidade são fundamentais para o planejamento do programa de moagem (AG/SAG e bolas) em escala piloto uma vez que permitem:

- Definir o número de ensaios e a duração dos mesmos;
- Definir quais serão as configurações de circuito a serem testadas;
- Definir as condições iniciais de processo para cada um dos ensaios;
- Determinar, com elevado grau de precisão, a massa de amostra necessárias para a realização de toda a campanha piloto que compõem-se por ensaios exploratórios (ensaios de curta duração) e ensaios de demonstração (demonstration run).

Normalmente, a campanha piloto consta de 8 a 12 ensaios de moagem AG/SAG, 2 ensaios de moagem em moinho de bolas e 1 ensaio de britagem de pebbles.

Por ser a distribuição granulométrica da alimentação uma das variáveis operacionais críticas da moagem AG/SAG, faz parte da metodologia a simulação do desmonte do minério na mina para determinação da granulometria de alimentação do britador primário. A partir da granulometria do material desmontado simula-se a operação de um britador primário de forma a obter-se a provável distribuição granulométrica da alimentação do circuito de moagem. Para a realização destes estudos são utilizadas informações geotécnicas tais como: tipo, natureza e grau de fraturamento do maciço, densidade in situ, RQD, tensão de ruptura uniaxial, módulo de Young, natureza do preenchimento das fraturas, etc. Estas simulações são realizadas no JKRCM da Austrália.

Diferentemente da coleta tradicional de amostras através de galerias ou lavra experimental para a campanha piloto, a CVRD pioneiramente optou pela utilização de amostras provenientes de furos de sonda de grande diâmetro (6” ou 6 1/2”). Esta opção permite:

- A redução do prazo e do custo para a retirada e preparação das amostras;
- Uma melhor representatividade do depósito uma vez que os furos são distribuídos ao longo de todo o depósito e coletadas em diferentes níveis que representarão, no futuro, diferentes etapas da lavra;
- A utilização destes testemunhos para detalhamento da interpretação geológica do depósito.

Destes testemunhos são também retiradas, segundo critérios pré-estabelecidos, novas amostras para os ensaios de caracterização tecnológica (concentração e moagem) aumentando o conhecimento da variabilidade do depósito e validando-se a representatividade da amostra como um todo.

Em função da maior massa e das maiores dimensões da amostra, é possível realizar-se o ensaio de DWT completo assim como os ensaios de SPI, Wi, Ai, de concentração e caracterização física, química e mineralógica. Estes resultados complementam a campanha anterior e são também incluídos no modelo de blocos. Realizam-se de 50 a 60 ensaios completos de caracterização com as amostras de 6”.

Na campanha piloto AG/SAG são avaliados os seguintes parâmetros de processo:

- Tipo de circuito: AG ou SAG;
- Abertura da Grelha;
- Área Aberta da Grelha;
- Abertura das *Pebble Ports* (dimensões das Pebble Ports);
- Área Aberta das *Pebble Ports* (número de dimensões das Pebble Ports);
- Carga de Bolas (0, 4, 8 e 10%);
- Distribuição de Tamanho das Bolas;
- Circuito Aberto / Fechado;
- Inclusão de Britador de Reciclo (OS do Trommel);
- Volume da Carga Total;
- Distribuição Granulométrica da Alimentação Nova.

Durante a realização da campanha piloto são coletas novas amostras da alimentação para novos ensaios de caracterização (DWT, SPI, Wi, Ai, densidade real). Uma vez concluída a campanha piloto, os resultados obtidos, após criteriosa análise e validação, são utilizados para a recalibração dos modelos utilizados nos estudos de variabilidade.

Após a calibração dos modelos de moagem e britagem procede-se a atualização do modelo de bloco. A partir deste modelo atualizado inicia-se a etapa final de dimensionamento dos circuitos. Neste dimensionamento são consideradas as diferentes configurações do circuito (AG/SAG, circuito aberto ou fechado, com ou sem britador de reciclo, etc.), seus custos de investimento e operacionais, capacidades máximas e mínimas em função da variabilidade do depósito, etc.

Nesta etapa, faz-se utilização intensiva do CEET (Cominution Economic Evaluation Tool) que é um sistema desenvolvido pela MinnovEx através de um consórcio formado pelas maiores mineradoras do mundo, sendo a CVRD uma das patrocinadoras. Este sistema permite simular a partir do modelo de bloco, de forma bastante simples, rápida e objetiva, diferentes configurações de circuito.

As campanhas piloto para os projetos Sossego e Alemão foram realizadas nas instalações do Centro de Investigaciones Minera e Metalurgica (CIMM) em Santiago no Chile, utilizando-se um moinho 6' x 2' Koppers (25 kW). Cabe aqui destacar a excelência dos serviços prestados pelo CIMM.

## 5. CONCLUSÕES

Como pode-se observar, a metodologia desenvolvida é não somente fruto do intenso programa de capacitação técnica da CVRD nesta nova área de negócios mas, sobretudo, o resultado de uma vasta cooperação técnica entre instituições de ensino e pesquisa, empresas de engenharia e parceiros comerciais.

A opção pela utilização simultânea de diversos métodos e procedimentos, desenvolvidos por diferentes “escolas” e abordagens, leva a uma maior independência com relação aos detentores de tecnologia permitindo a comparação direta entre elas e uma análise mais crítica e independente dos resultados obtidos.

A visão da CVRD é, portanto, de tratar estes métodos e procedimentos como complementares e, portanto, parte de um arsenal de ferramentas a serem utilizadas para a solução de um problema, não trivial e de impacto fundamental na economicidade do empreendimento.

A utilização intensiva dos ensaios de DWT e SPI e das técnicas de simulação de processo permite, dentre outros benefícios:

- O mapeamento da variabilidade de moagem ao longo do depósito para os diferentes tipos de minério minimizando-se os riscos do empreendimento e melhorando o aproveitamento do bem mineral;
- O melhor planejamento dos ensaios e da própria campanha de moagem SAG/AG em escala piloto minimizando o volume de amostras a serem processadas, e por consequência, reduzindo-se prazos e custos, assegurando ainda uma avaliação mais objetiva dos circuitos e condições operacionais;
- Confirmação da representatividade da amostra submetida aos ensaios em escala piloto.

O acesso à variabilidade de moagem do depósito viabiliza a inclusão no modelo de blocos de dados tais como: o consumo específico de moagem ( $\text{kWh/t}$ ), a taxa prevista de processamento ( $\text{t/h}$ ), o consumo de corpos moedores e revestimentos ( $\text{g/kW}$ ) e tamanho de transferência esperado ( $T80$ ) e o  $F80$  da alimentação do circuito de moagem primária. Este dados associados aos dados de teores, recuperações, litologias, densidade, etc., enriquece, sobremaneira, todas as atividades de planejamento do ambiente de negócios permitindo a otimização das operações e um melhor aproveitamento do bem mineral.

Apesar da robustez dos resultados das simulações baseadas nos ensaios de DWT e SPI, a realização de uma campanha de ensaios em planta piloto é ainda considerada essencial no projeto dos grandes circuitos de moagem SAG/AG. Isto deve-se não somente pela necessidade de calibração e validação dos modelos utilizados, a observação de aspectos não suportados pelos modelos atuais, mas também pelo fato desta campanha ainda ser um requisito básico exigido pela totalidade das instituições financiadoras de projetos.

A campanha piloto permite ao engenheiro de processos adquirir, através do acompanhamento e análise contínua da operação, um melhor entendimento do comportamento do minério frente à diferentes condições de processo. Esta experiência é fundamental na fase final do projeto das instalações.

A inovadora metodologia aqui apresentada, quando do desenvolvimento do Projeto Sossego, foi alvo de profunda auditoria realizada por algumas das mais renomadas empresas de engenharia internacionais e nacionais. Durante estas auditoria não identificaram-se pontos falhos ou omissos no programa que de alguma forma comprometessem a confiabilidade e a robustez do projeto do circuito de moagem adotado.

O desenvolvimento de todo o programa de ensaios de caracterização de moagem em escala de bancada em laboratórios nacionais (CVRD, USP e MinnovEx do Brasil) assim como de todos os trabalhos de modelamento, simulação, análise e interpretação de resultados comprovam a capacitação técnica e a qualidade dos recursos humanos e materiais disponíveis no país.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- MinnovEx Technologies Inc., CEET II Users Manual Rev-1, Março 2002, Toronto, Canadá  
 JKTech, JksimMet – Steady State Mineral Processing Simulator – Version 5, JKTech JKMR, Indooroopilly, Austrália, Dezembro, 1999  
 DELBONI, H. Jr., Caracterização de Amostras e Dimensionamento do Circuito de Moagem do Cristalino, HDA Serviços S/C Ltda, São Paulo, Novembro, 2000  
 DELBONI, H. Jr., Caracterização de Amostras e Dimensionamento do Circuito de Moagem do Alemão, HDA Serviços S/C Ltda, São Paulo, Agosto, 2001  
 MAGNE L., VALDERRAMA W., PONTT J., Temas Actuales en Molienda Semiautógena, Workshop de Molienda SAG 2001, Proceedings, Viña Del Mar, Maio, 2001  
 SILVA, E. C., MAIA, G. S., Projeto Sossego Avaliação dos ensaios de moagem AG/SAG em escala piloto, Cia. Vale do Rio Doce, Sta. Luzia, Agosto, 2000  
 SILVA, E. C., Estudo de Variabilidade do minério de cobre do Depósito do Cristalino em relação à moagem, Cia. Vale do Rio Doce, Sta. Luzia, Novembro, 2001  
 SILVA, E. C., Maia, G. S., Consolidação dos ensaios de moagem SAG/AG em escala piloto – Projeto Alemão – CIMM/2001, Cia. Vale do Rio Doce, Sta. Luzia, Novembro, 2001  
**Home Pages - Internet**  
 I. [www.minnovex.com](http://www.minnovex.com)  
 II. [www.jktech.com.au](http://www.jktech.com.au)