

## **METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO DE CIRCUITOS DE MOAGEM E FLOTAÇÃO PARA NOVOS PROJETOS DA CVRD**

V. K. Alves<sup>1</sup>, K. L. C. Gonçalves<sup>1</sup>

1 – Companhia Vale do Rio Doce – Diretoria de Desenvolvimento de Projetos Minerais – BR 262 KM 296 –  
33030970 – Caixa Postal 09 – Santa Luzia – MG – Brasil

E-mail: [vladimir.alves@cprd.com.br](mailto:vladimir.alves@cprd.com.br) - [keila.goncalves@cprd.com.br](mailto:keila.goncalves@cprd.com.br)

### **RESUMO**

Ao longo dos anos a Gerência Geral de Desenvolvimento e Tecnologia - GETEK da CVRD vem aperfeiçoando uma metodologia para dimensionamento de circuitos de moagem e flotação para novos projetos minerais. Ela engloba uma etapa de estudos de variabilidade em bancada, planta piloto de moagem e flotação, modelamento matemático e simulação para escalonamento do circuito industrial.

Durante a etapa de bancada são realizados ensaios de WI, DWT simplificado, flotação rougher e locked cycle tests com amostras que descrevem a variabilidade do depósito. Após a finalização dessa etapa, são realizados ensaios contínuos de flotação em Mini Planta Piloto com amostras de furos de sonda representativas de diferentes períodos de lavra. A etapa seguinte compreende estudos com amostra de grande volume em planta piloto convencional de moagem e flotação, cuja amostra é também utilizada para levantamento de parâmetros de liberação, cinética de quebra e flotação para escalonamento do circuito industrial.

Essa metodologia tem sido aplicada com sucesso no desenvolvimento de novos projetos da CVRD.

**Palavras – Chave,** moagem, flotação, variabilidade, modelamento, simulação.

## I. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos a CVRD desenvolveu uma metodologia para desenvolvimento de projetos minerais. A definição de rotas de processo e dimensionamento de circuitos de beneficiamento de minérios são alguns dos produtos gerados durante a fase de pré-viabilidade de um projeto "greenfield". Neste trabalho será dado um enfoque no dimensionamento de circuitos de cominuição e flotação, operações geralmente de maior importância em uma usina.

A metodologia para definição e dimensionamento de circuitos de moagem e flotação é composta pelas seguintes etapas: estudo de variabilidade do minério em escala de laboratório, operação de planta piloto e modelamento matemático e simulação. O produto desse trabalho é um simulador calibrado que pode ser posteriormente utilizado para planejamento de lavra e operação da usina, buscando sempre condições ótimas de operação.

Os modelos utilizados atualmente para dimensionamento de circuitos de moagem, visam somente a adequação granulométrica do produto. No entanto, a liberação é o parâmetro mais importante no desempenho dos processos de concentração a jusante. A Gerência de Tecnologia da CVRD está desenvolvendo uma metodologia de modelamento da cinética de liberação na moagem visando uma otimização da taxa de alimentação na moagem e recuperação metalúrgica na flotação.

## 2. ESTUDOS DE MOAGEM

Durante a etapa de estudos em laboratório para moagem são realizados ensaios de WI, AI e DWT simplificado com amostras de furo de sonda, para se avaliar a variabilidade do depósito. Após o estudo de variabilidade são operadas plantas piloto de moagem SAG / AG, moinho de bolas e HPGR (High Pressure Grinding Rolls). São coletadas amostras dos testes em planta piloto para ensaios em moinho de torque, HPGR, DT e DWT completo. Os resultados dos ensaios piloto e estudos de variabilidade são utilizados para modelar e dimensionar o circuito industrial de cominuição. A seguir será feita uma breve descrição de cada ensaio.

### 2.1. Ensaios de WI e AI de Bond

O Wi de Bond (**Bond, 1960**) é um ensaio em escala de laboratório que mede a resistência do minério em relação à moagem de bolas e barras. Este procedimento encontra-se padronizado pela ABNT.

O Ai, também desenvolvido por Fred Bond, é um ensaio que tem como objetivo avaliar a capacidade do minério em desgastar metais por abrasão.

### 2.2. Caracterização pela Metodologia JKMRC

A metodologia de caracterização tecnológica do minério com base em testes proposto pelo JKMRC - Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, na Austrália, baseia-se, em índices paramétricos da relação entre energia aplicada e a fragmentação resultante, segundo duas faixas de intensidade de energia. Os valores altos de energia aplicada são obtidos mediante impactos sobre partículas são obtidos com utilização do equipamento denominado DWT (**Narayanan and Whiten, 1983**) - Drop Weight Tester, mostrado na figura 1.. Os valores baixos de energia são obtidos por meio de tamboramento das amostras, denominado "teste de abrasão".



Figura 1 - O Drop Weight Tester

O procedimento padrão de DWT estabelece que sejam submetidas a impacto fragmentos em cada uma das cinco faixas.

A partir de cada classe granulométrica são preparados 3 lotes, cada um deles composto por 30 fragmentos, que são submetidos a impactos com energia específica entre 0,25 kWh/t e 2,5 kWh/t. Desta forma, as partículas serão impactadas individual e separadamente, em cada lote de 30 fragmentos. O material fragmentado proveniente de cada lote é então reunido e encaminhado ao peneiramento, do qual se obtêm parâmetros selecionados de distribuição granulométrica.

Em virtude de limitações de tamanho dos fragmentos e quantidade de material disponível, pode-se adotar procedimentos alternativos para teste das amostras de minério segundo a metodologia baseada no DWT. Esse procedimento consiste em submeter aos testes de impacto partículas contidas em pelo menos uma faixa de tamanho padronizado, o que permite que se trabalhe com amostras de testemunhos de sondagem.

O procedimento do teste simplificado (Chierigati, e Delboni, 2002) têm sido uma boa ferramenta no estudo de variabilidade dos depósitos, foram adotados nos estudos para o Projeto Sossego, Cristalino, Bauxita de Paragominas, Alemão e Conceição.

Os testes de impacto executados no DWT visam determinar os parâmetros descritivos da função paramétrica entre energia aplicada e a fragmentação resultante, conforme demonstrado a seguir:

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

onde:

- t<sub>10</sub> = porcentagem passante na malha igual a 10% do tamanho original do fragmento
- Ecs = energia específica aplicada ao fragmento de minério (kWh/t)
- A, b = parâmetros dependentes da resistência à quebra do minério

A função acima representa portanto, o comportamento característico do minério testado, quando submetido a impactos que ocorrem no interior da câmara de moagem de moinhos AG/SAG. O fenômeno de fragmentação é convenientemente descrito por uma curva com rápido crescimento inicial, determinado pelo parâmetro b, tendendo posteriormente a um valor assintótico, determinado pelo parâmetro A, conforme ilustra o gráfico da Figura 2.

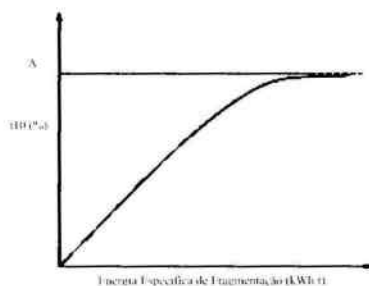


Figura 2 - Representação da relação energia/fragmentação obtida a partir de testes sobre amostras de minérios.

Assim, os parâmetros A e b são característicos de cada amostra de minério testada. De acordo com a Figura 2, a fragmentação é crescente conforme o aumento da energia específica aplicada à partícula, até que um limite superior seja atingido. Em termos práticos, isto significa que o processo de fragmentação não mais ocorre a partir de um certo valor de energia aplicada às partículas, ou seja, quanto menor o valor dos parâmetros A e b, maior a resistência da amostra à fragmentação por impacto.

O JKSimMet é um simulador de processo desenvolvido pela equipe do Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre - JKMRRC, que utiliza para o dimensionamento de britadores e moinhos os parâmetros levantados a partir dos testes de caracterização (DWT).

Após esta calibração, o modelo é empregado para prever a distribuição granulométrica do produto, o nível da carga e a potência consumida por um dado moinho, baseados na vazão e distribuição granulométrica de sua alimentação, assim como das características do minério alimentado.

### 2.3. Estudo de Variabilidade de Moagem

Com os dados obtidos em laboratório (WI, AI, DWT, etc) são feitos estudos estatísticos para se avaliar a variabilidade do depósito.

### 2.4. Ensaios em Planta Piloto

Após a campanha de ensaios de bancada, é realizada uma campanha de ensaios piloto de moagem SAG/AG, bolas, HPGR e britagem. Esta etapa é utilizada para calibração dos softwares e dimensionamento do circuito industrial.

Na campanha de ensaios piloto são testadas várias configurações de circuitos e condições operacionais para se avaliar o desempenho de cada equipamento.

Após os testes piloto, são realizados testes em laboratório com amostras de alimentação dos testes piloto, para levantamento de parâmetros de quebra (função seleção e quebra, energia de fratura, WI, etc) (Galery et al., 1994).

### 2.5. Ensaios em Moinho de Torque

O moinho de torque do CDM da CVRD tem diâmetro e comprimento internos de 46 e 38 cm, respectivamente, revestido com 8 aletas igualmente espaçadas. As aletas fazem o papel de levantadores da carga (lifters). O teste em moinho de torque requer amostra com a mesma distribuição granulométrica da alimentação do moinho industrial. As bolas devem ter a mesma distribuição de tamanho do moinho que se deseja simular.

A rotina de trabalho é organizada de forma que, ao término de cada moagem, (Alves et al., 2004) uma alíquota representativa do conteúdo do moinho de mais ou menos 100 g é peneirada, a úmido, e retornada ao moinho para a continuação do teste, após secagem. Como os resultados de cada tempo de moagem são obtidos rapidamente, o erro experimental é minimizado no laboratório.

## 2.6. Ensaios em HPGR de Laboratório

A CVRD possui um HPGR para ensaios de laboratório que possui rolos de 250 mm e opera com uma pequena quantidade de amostras.

Neste equipamento são feitos estudos para levantamento de parâmetros de quebra.

## 2.7. Cinética de Liberação

De forma a possibilitar a simulação do processo de liberação, na moagem, é necessário parametrizar o diagrama de Andrews e Mika (King, 2001) para o minério em questão. A metodologia utilizada consiste em um teste de moagem em batelada de uma amostra mono-tamanho, na faixa 2 mm x 1 mm, aproximadamente. Esta é uma fração onde não ocorre liberação da fase de interesse. A amostra é separada em líquido denso para produzir amostras de frações mono-teor. Estas amostras são moídas em moinho de batelada, e os produtos da moagem peneirados. Cada amostra de tamanho no produto e alimentação do teste de moagem é caracterizada para liberação, em MEV, obtendo-se assim diagramas de Andrews e Mika.

Os diagramas de Andrews e Mika obtidos para o minério, são utilizados para o cálculo de parâmetros de liberação que podem ser utilizados no Modsim<sup>TM</sup>. Assim, o simulador pode ser utilizado para obter dados de recuperação e teor na etapa de flotação, em função da distribuição de tamanhos obtida na moagem, e possibilitando a otimização da etapa de cominuição.

## 2.8. Dimensionamento do Circuito Industrial de Moagem

Baseado nos resultados dos testes de laboratório e planta piloto é feito o dimensionamento do circuito final de cominuição, utilizando softwares de simulação tais como Modsim<sup>TM</sup>, JKSimMet e Moly Cop Tools e VKA-Ball Mill Sizing.

Nesta etapa são apresentados os equipamentos com suas dimensões e um balanço de massas completo do circuito, com a liberação ótima para o melhor desempenho do circuito de moagem e flotação.

## 3. ESTUDOS DE FLOTAÇÃO

Os estudos de flotação desenvolvidos na fase de Pré-Viabilidade de um projeto mineral constituem-se na execução de ensaios de laboratório (rougher, cleaner e locked cycle test) com amostras de furos de sonda, para determinação da variabilidade do depósito em termos de recuperação metalúrgica e qualidade do concentrado final. Em seguida são realizados testes contínuos em Mini Planta Piloto com amostras de diferentes litologias e períodos de lavra, para confirmação dos resultados de bancada e levantamento de parâmetros de processo essenciais para dimensionamento dos equipamentos industriais. A seguir será feita uma descrição de cada ensaio e discutidos os objetivos e resultados.

### 3.1. Variabilidade de Flotação

#### 3.1.1 Testes Rougher

As amostras de furos de sonda são detalhadamente descritas pelos geólogos do campo e chegam no laboratório acompanhadas de um relatório descritivo utilizado para nortear os estudos de mineralogia. As amostras são britadas para obtenção de  $100\% < 1\text{mm}$  e caracterizadas quanto à análise química, mineralógica, densidade real e conteúdo de magnetita. O estudo de liberação, realizado em QEM SCAN ou microscópio ótico, dá uma indicação do P80 de moagem (Gonçalves, et al., 2003) a ser utilizado para o minério estudado.

São realizados ensaios de flotação rougher com a amostra moída a diferentes P80, de forma a avaliar a influência da granulometria na recuperação metalúrgica dos metais de interesse. Um vez definido o P80 de moagem, são realizados ensaios de flotação rougher para definição da melhor receita de reagentes. Dessa forma, são definidas as condições do teste padrão de flotação rougher.

O teste padrão de flotação é feito em amostras de furos de sonda, coletadas em malha regular, buscando abranger toda a zona mineralizada.

O estudo de variabilidade permite o diagnóstico do comportamento metalúrgico das diferentes áreas do depósito, reclassificação dos tipos de minério quanto à sua resposta metalúrgica, obtenção de curvas de correlação entre parâmetros do minério e as recuperações metalúrgicas dos metais de interesse e diminuição do risco do empreendimento devido a um melhor conhecimento do depósito e sua potencialidade em gerar valor. A figura 3 apresenta um exemplo de resultados obtidos na etapa de variabilidade de flotação.

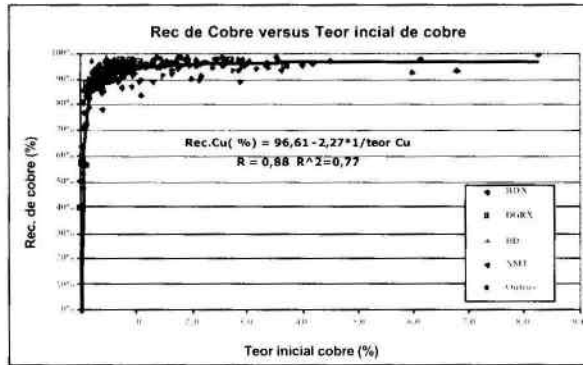


Figura 3 - Curva de Recuperação de Cobre versus Teor Inicial de Cobre em Estudo de Variabilidade

### 3.1.2 Testes Cleaner e LCT

Os testes cleaner e LCT são realizados em amostras compostas a partir das amostras individuais da variabilidade rougher. A composição das amostras utiliza critérios de similaridade de comportamento frente à flotação e composição mineralógica.

As condições do teste cleaner são definidas preliminarmente e o teste padrão cleaner é aplicado a cada amostra composta. Em seguida são feitos os Locked Cycle tests (LCT) objetivando a obtenção de recuperações metalúrgicas finais para diferentes amostras. Os concentrados finais dos testes LCT (Onpuu, 2001) são caracterizados química e mineralogicamente de forma a permitir uma avaliação da qualidade do concentrado final de flotação para o minério estudado.

O locked cycle test (LCT) é um ensaio composto de uma série de testes de flotação cleaner em bancada, ou ciclos, no qual os produtos intermediários gerados em um teste (ciclo) são adicionados ao teste (ciclo) subsequente para simular a operação de um processo contínuo, no qual materiais de teores intermediários são recirculados. Os produtos de todos os ciclos (concentrado e rejeitos finais) são analisados quimicamente para cobre por FRX para acompanhamento do ensaio e definição do ciclo a partir do qual foi atingido o regime permanente. Os resultados são balanceados em softwares de balanço de massas.

### 3.2 Testes Contínuos em Miniplanta Piloto de Flotação

A Miniplanta piloto de flotação é um equipamento compacto que opera continuamente com amostras de furos de sonda proveniente de campanhas de exploração geológica (Andrade, et al.,2004).

A MPP é equipada com 12 células Denver de 1,7 litros cada. As células são conectadas por bombas peristálticas que permitem o arranjo de qualquer configuração de circuito. Possui ainda um sistema de controle individual da vazão de ar e das velocidades de rotação das espátulas e rotores. As medidas de pH e Eh são feitas com eletrodos do próprio equipamento. A vazão de alimentação da planta pode variar entre 5 e 10kg/h. Os reagentes são alimentados continuamente por bombas peristálticas. A moagem primária é feita em moinho de barras em bateladas de 20kg. A remoagem dos concentrados intermediários é feita em um moinho de pinos vertical. A figura 4 mostra a MPP em detalhe.

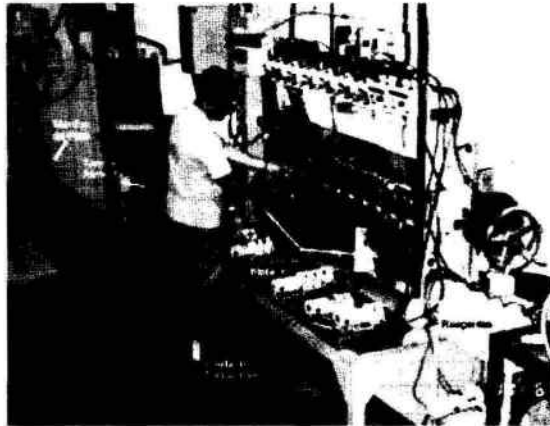


Figura 4. Mini Planta Piloto de Flotação

Geralmente os testes em MPP (Santos et al., 2003) duram em torno de 30 a 40 horas. Nesse período são feitas amostragens, denominadas aberta e fechada. A amostragem aberta constitui-se pela coleta dos produtos finais do teste por um tempo de 2 a 3 horas e a amostragem fechada caracteriza-se pela amostragem de todos os pontos do circuito. Com os resultados de análise química dos produtos das amostragens são feitos balanços de massa, água e metalúrgica em software comercial.

Os dados obtidos nos testes em MPP permitem a confirmação dos resultados metalúrgicos obtidos em escala de bancada, levantamento de parâmetros de processo para dimensionamento dos equipamentos industriais (Loyola e Gonçalves, 2005) e geração de amostras de rejeito e concentrado para testes de sedimentação e filtração.

### 3.2 Simulação de Flotação

Atualmente existem modelos matemáticos de moagem e flotação (King, 2001) que levam conta parâmetros de liberação para cálculo de consumo energético, tamanho de equipamentos e recuperação metalúrgica na flotação. No entanto, esses modelos necessitam de validação. A CVRD está desenvolvendo um trabalho de pesquisa visando a utilização e comprovação desses modelos em suas plantas em operação.

## 4. CONCLUSÃO

Os estudos de processo desenvolvidos na fase de pré-viabilidade de um projeto devem ser robustos o suficiente para sustentar decisões de investimento por parte dos acionistas de uma empresa. Na CVRD essa etapa é considerada como uma das mais importante e são empregados recursos necessários para a minimização dos riscos do projeto.

A integração das equipes de desenvolvimento, implantação e operação, é extremamente importante para garantir uma utilização adequada do conhecimento gerado durante as etapas do empreendimento. Os dados obtidos na etapa de desenvolvimento devem ser utilizados para o planejamento de lavra e processo, visando atingir condições ótimas de operação da usina.

A CVRD busca continuamente o desenvolvimento e monitoramento de novas tecnologias de processo, visando proporcionar a utilização de tecnologias de ponta no desenvolvimento de novos projetos e otimização de plantas em operação.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, V.K., Galery, R., Peres, A.E.C., Schneider, C.L., 2004, Estudo de Otimização de Carga de Moínho Utilizando Tecnologia de Simulação. Anais XX ENTMME, p. 227-234
- Alves, V.K., Galery, R., Schneider, C.L., 2004, Optimization of Mill Charge Using Simulation, Comminution 2004, Perth-Australia
- Andrade, V L L Santos, N A Gonçalves, K L C, 2004, How to obtain continuous flotation test data on drill-core samples using a Mini Pilot Plant. In Mining Engineering, Vol.56, No.3
- Bond, F.C., 1960, British Chemical Engineering, Vol.6, pp.378-391, 543-548
- Galery, R., Andrade, D.G., Alves, V.K., 1994, Simulação de Circuitos de Moagem: Determinação de Parâmetros de Quebra, Anais XV CILAMCE, Belo Horizonte, 2p. 1005 - 1014;
- Gonçalves, K L C, Andrade, V L L, Peres, A E C, 2003, The effect of grinding conditions on the flotation of a sulphide copper ore, in Mineral Engineering, 2003, 16: 1213-1216 (Elsevier Ltd).
- King, R.P., 2001, Modelling and Simulation of Mineral Processing Systems, Butterworth-Heinemann
- Loyoh, L.M., Gonçalves, K.L.C., 2005, A Comparison Between a Flotation Mini Pilot Plant and a Copper Concentrator Mill. In Centenary of Flotation Symposium Volume still in edition
- Ounpuu, M., 2001, Was that locked cycle test any good ?, in Proceedings 33 rd Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors, pp 389-403 (The Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum)
- Santos, N A, Gonçalves, K L C, Andrade, V L L, 2003, Mini-Pilot Plant: extracting maximum value from drill cores. In Canadian Institute of Mining, Metallurgy And Petroleum, p3: 77-90
- Narayanan S.S. and Whiten W.J. 1983. Breakage Characteristics from single particle breakage tests and its application to ball mill scale-up. Trans Inst Min Metall, 97, C115-124
- Chieregati, A. C., Delboni Jr., H. (2002). Novo método de caracterização tecnológica para menérios, Anais XIX ENTMME, vol. 1, pp. 95-102.