



ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

*DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE
MINAS*

**PMI 500
TRABALHO DE FORMATURA**

**ANÁLISE DE DESEMPENHO E SIMULAÇÃO DO
CIRCUITO DE MOAGEM DA MSF**

FERNANDO KARAM DELBIM

DEZEMBRO DE 1999

SUMÁRIO EXECUTIVO

A metodologia *do* previsão da taxa de alimentação através da utilização de características do minério foi utilizada com sucesso na mineração Serra da Fortaleza, MG, resolvendo um problema crônico pois, desde a entrada em operação, esta mineração enfrentava problemas de taxa de alimentação abaixo da nominal do circuito de moagem primária.

Inúmeras tentativas foram feitas para que a capacidade nominal fosse atingida, entre elas, alterações no circuito, nas variáveis operacionais e investimentos em novos equipamentos. Diversas metodologias com base em métodos tradicionais foram empregadas, como o *work index de Bond*, não apresentando entretanto correlações adequadas.

Neste contexto, a metodologia descrita no presente trabalho apresentou resultados excelentes, com a previsão da taxa de alimentação dentro de margens estreitas em função de características do minério e algumas variáveis do processo. Um aspecto que deve ser enfatizado na metodologia desenvolvida constitui-se no seu emprego na maximização da taxa de alimentação do circuito.

A metodologia proposta de previsão da taxa de alimentação pelas características do minério constitui uma ferramenta poderosa e útil que, entretanto, não se restringe à MSF, podendo ser aplicada potencialmente a qualquer operação que apresente um circuito de moagem SAG.

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 3 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 5 |
| 2.1 | CONTROLE NA MINA DE ERNEST HENRY – AUSTRÁLIA | 5 |
| 2.2 | METODOLOGIA DE KLIMPEL | 8 |
| 3 | MODELO DE DESEMPENHO DE MOINHOS AG/SAG | 12 |
| 4 | METODOLOGIA | 15 |
| 4.1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 4.2 | ÍNDICES DE QUEBRA | 17 |
| 5 | ESTUDO DE CASO: MSF | 21 |
| 5.1 | GENERALIDADES | 21 |
| 5.2 | GEOLOGIA | 21 |
| 5.3 | PROCESSO DE CONCENTRAÇÃO | 22 |
| 5.4 | TAXA DE ALIMENTAÇÃO E PRODUÇÃO | 26 |
| 5.5 | CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIOS A PARTIR DO IQ | 28 |
| 5.6 | RESULTADOS OBTIDOS | 29 |
| 5.7 | METODOLOGIA DE UTILIZAÇÃO DO IQ | 31 |
| 5.8 | CORRELAÇÃO DO IQ COM A TAXA DE ALIMENTAÇÃO | 32 |
| 5.9 | ADERÊNCIA DO MODELO PROPOSTO | 38 |
| 6 | CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS | 41 |
| 7 | AGRADECIMENTOS | 43 |
| 8 | BIBLIOGRAFIA | 44 |

1 INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, o empreendimento mineiro é dividido em duas grandes áreas: mina e usina de tratamento. Empresas de mineração incorporam esta distinção, freqüentemente atribuindo gerência separadas e consequentemente centros de custo diferenciados.

Esse modo de operação assume portanto, que cada setor operando no custo mínimo, garante o mínimo global. Ocorre porém que os custos mínimos locais não refletem necessariamente o mínimo global do empreendimento, que realmente deve ser procurado.

O mínimo global é portanto função de duas áreas que se encontram intimamente ligadas e, além disso, interdependentes já que uma mudança realizada em uma delas afeta diretamente a outra. Assim, práticas na lavra afetam a eficiência das operações subsequentes no beneficiamento.

Uma analogia para tornar esse fenômeno mais compreensível seria associar o empreendimento (Emp) a uma função de 2 variáveis: mina e usina.

$$\text{Emp} = f(\text{mina}, \text{usina})$$

O mínimo custo dessa função é dado pelo gradiente (derivada), conforme apresentado a seguir:

$$\frac{d\text{Emp}}{d\text{Custo}} = \nabla \text{Emp} = \frac{d\text{Emp}}{d\text{mina}} \cdot \frac{\partial \text{mina}}{\partial \text{Custo}} + \frac{d\text{Emp}}{d\text{Usina}} \cdot \frac{\partial \text{Usina}}{\partial \text{Custo}} = 0 \rightarrow C_{\min}$$

que é, portanto, diferente do custo obtido a partir das derivadas parciais, ou seja,

$$\frac{\partial \text{mina}}{\partial \text{Custo}} = 0 \rightarrow C1_{\min} \quad \frac{\partial \text{Usina}}{\partial \text{Custo}} = 0 \rightarrow C2_{\min} \quad C_{\min} \neq C2_{\min} + C1_{\min}$$

De fato, variações nos teores da alimentação da usina, diluição, distribuição granulométrica tem um efeito significativo na taxa de alimentação e recuperações na

planta de beneficiamento. Investigar, identificar e quantificar esse impactos é um grande passo para a otimização global do empreendimento, desde o modelo de blocos até o concentrado final.

A abordagem geometalúrgica, assim chamada, é muito complexa. Um estudo que possibilitasse a partir do modelo de blocos prever quanto de concentrado ou substância de interesse será obtido no final do processo é tarefa longa e de custo elevado.

Neste trabalho porém, o enfoque foi desenvolver uma metodologia que possibilitasse correlacionar parâmetros de caracterização tecnológica do minério com o desempenho da usina de concentração.

Esse trabalho foi iniciado pelo autor em seu estágio na Mineração Serra da Fortaleza, no período de 07/1999 à 08/1999. O trabalho foi conduzido em conjunto com o engenheiro chefe do Departamento de Concentração da MSF, João Batista Junior , sendo parte de um trabalho mais abrangente entre a MSF e o prof. Dr. Homero Delboni Junior.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Devido à escassa literatura disponível sobre o assunto abordado neste trabalho, optou-se pela análise de estudos semelhantes desenvolvidos ou aplicados a empreendimentos mineiros

2.1 CONTROLE NA MINA DE ERNEST HENRY – AUSTRÁLIA

a) *Generalidades*

O primeiro caso analisado refere-se a mina de cobre de Ernest Henry, situada na parte noroeste da Austrália, à 35 km do distrito mineral de Mount Isa. Em produção desde agosto de 1997, a mina de Ernest Henry possui reservas de 127 milhões de toneladas de minério a um teor médio de 1,1% de cobre contido e teor de ouro de 0,55 g/t.

Nesta mina a performance metalúrgica é prevista a partir da mineralogia do minério alimentado. Esse parâmetro é utilizado para prever a taxa de alimentação ou os teores e recuperações obtidos na flotação, bem como uma ferramenta para análise de performances passadas da planta de concentração.

b) *Geologia*

A rocha encaixante é um brechóide, félscico-vulcânico cuja matriz de preenchimento é composta de uma assembléia de magnetita, carbonatos e sulfetos. A zona mineralizada pode ser subdividida em duas: primária e supérgena.

- **Primária:** A mineralogia pode ser descrita como uma assembléia em que predomina a calcopirita em uma ganga composta de magnetita e carbonatos. A Piritá é abundante mas sua ocorrência decresce com o aumento de calcopirita em zonas de teor mais elevado. A ocorrência do ouro está diretamente ligada à de calcopirita. A consistência dessa mineralogia assegura uma flotação simples e estável.
- **Supérgena:** A mineralogia é bem mais complexa em função de alterações decorrentes de intemperismo físico e químico. As principais espécies detentoras de cobre são a calcocita, bornita, calcopirita secundária e o cobre nativo. A distribuição

desses minerais é complexa e aparentemente não existe uma correlação entre o ouro e o cobre. Os óxidos de ferro exibem complexidade equivalente aos minerais de cobre, com uma freqüente alteração de magnetita à hematita e goethita. Essa complexidade mineralógica e variabilidade de espécies minerais torna difícil a previsão do comportamento desse minério na planta.

c) *Beneficiamento*

Testes de cominuição levaram a um fluxograma composto de uma moagem semi-autógena (SAG) em circuito fechado com uma peneira vibratória (7mm) e um moinho de bolas seguido de hidrociclos, também em circuito fechado. A concentração é feita por flotação. É importante ressaltar que toda a planta foi projetada para o minério da zona primária, que corresponde à 85% de todo o corpo mineralizado, mas o minério da zona supérgena é predominante para os três primeiros anos de operação, sendo necessário, portanto um circuito flexível.

d) *Controle da taxa de Alimentação*

A taxa de alimentação é dependente da composição mineralógica do minério alimentado. Da observação da Figura 1 abaixo, conclui-se que feldspato e a albita acarretam em redução da taxa de alimentação do circuito, ao contrário portanto, do quartzo e magnetita, cujo efeito é inverso. Desta forma, minérios mais ricos em quartzo e magnetita permitem uma maior taxa de alimentação.

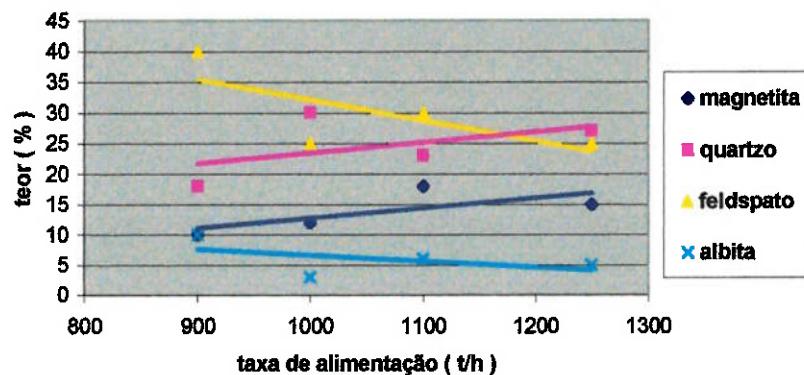


Figura 1 – taxa de alimentação em função do teor de diversos minerais

O minério de Ernest Henry possui competência variável. O tipo de alteração e o grau de intemperismo têm um impacto determinante na taxa de alimentação do moinho SAG, resultando em operações de desempenho variável. Esse fato determina a carga de bolas a ser utilizada.

De um modo geral, essa flutuação é função da formação geológica do depósito uma vez que a magnetita está presente no material de preenchimento, que possui uma competência menor que a rocha hóspede sem brechas, e desse modo associada à uma rocha fraturada, portanto menos competente à cominuição. O mesmo raciocínio pode ser aplicado a um minério rico em feldspatos, indicando assim um minério mais compacto.

O efeito pronunciado da magnetita no desempenho do circuito é, no entanto, limitado pelo fato da acumulação deste mineral na carga circulante do moinho de bolas.

Nesse contexto foi desenvolvida uma fórmula de previsão da taxa de alimentação do circuito em função da composição mineralógica de dez blocos de lavra, através de uma regressão linear simples de variáveis múltiplas. Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 2 a seguir:

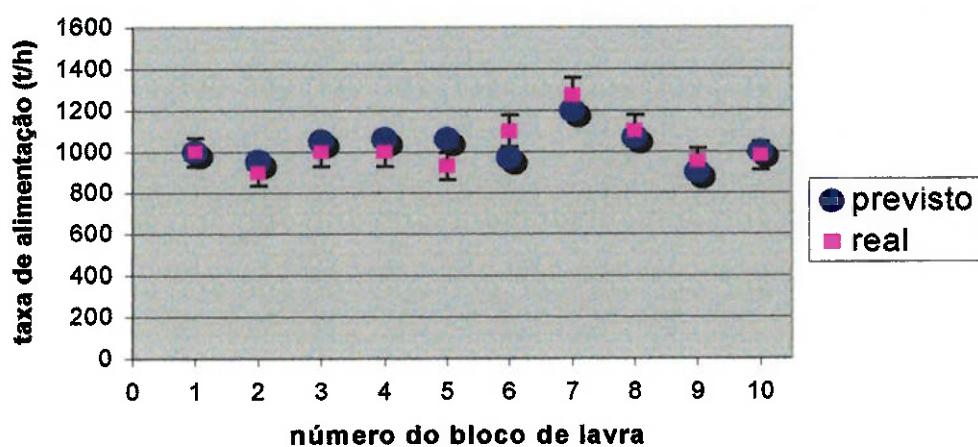


Figura 2 - Comparação taxa de alimentação observada e calculada

2.2 METODOLOGIA DE KLIMPEL

Tradicionalmente, a tomada de decisões nos processos de cominuição e flotação, se encontra interligada com a adoção de alguns parâmetros ou índices de eficiência, como mostrados na tabela abaixo:

Tabela 1 - Parâmetros clássicos usados na cominuição e flotação

| Cominuição | Flotação |
|--|-------------------------------------|
| Consumo Energético Específico...(kWh / t) | Recuperações.....(%) |
| Taxa de Alimentação.....(t / h) | Teores.....(%) |
| Consumo de corpos moedores(kg / t) | Vazão de Concentrado Final..(t/h) |
| Disponibilidade.....(%) | Disponibilidade.....(%) |
| Custo de Capital.....(\$ / t) | Custo de Capital(\$ / t) |
| Work Index (WI _{Bond}).....(kWh / t) | Custo de Operação.....(\$ / t) |
| Parâmetros de quebra..... | Parâmetros de Flotação..... |
| Análises de Liberação..... | Custo de reagentes.....(\$ / t) |

Esses parâmetros nem sempre exibem correlação direta em abordagens combinadas. Na realidade, estes índices clássicos de processos não são correlacionáveis. O *work index*, apesar de útil em projetos de circuitos de cominuição não permite previsões sobre a performance na flotação, assim como uma análise de teores pouco traduz o desempenho da cominuição.

Nessa linha, alguns novos parâmetros são propostos por Klimpel como:

- A performance da flotação em função do tipo e dosagem de coletor para uma dada malha de moagem (MM);
- A performance global da planta em função de parâmetros de modelos matemáticos de cominuição como taxa de quebra (S) ou distribuição de quebra (B);
- A mudança da MM na seleção da dosagem ótima de coletor.

É interessante notar, dentre os novos índices para a análise da performance da flotação propostos por Kliment, encontram-se os índices de taxa de quebra (S) e distribuição quebra (B).

O mecanismo de redução de tamanho pode ser modelado como uma reação química de decomposição. Estudos mostram que, a taxa de quebra de uma dada fração granulométrica é regida por uma equação diferencial de primeira ordem, tal como:

$$\frac{d[A_1]}{dt} = -S_1[A_1]$$

Onde ,

A_1 = fração granulométrica original

S_1 = taxa de quebra específica da fração A_1 .

A taxa de quebra S_1 é numericamente igual a declividade da reta plotada no gráfico cujo eixo das abscissas é a porcentagem de material na fração A_1 e possui o tempo no eixo das ordenadas.

Quando as condições de moabilidade são tais que esta quebra não ocorre segundo uma equação de primeira ordem (a função não é uma reta), o processo subsequente de flotação irá ter uma menor recuperação e tonelagem alimentada do que no caso da quebra de primeira ordem. Isso ocorre pelo fato da menor taxa de moabilidade, já que a quebra é mais lenta e, portanto possui a tendência de produzir mais finos por abrasão, fração esta de difícil recuperação na flotação.

A outra função que surge da analogia da reação química é a descrição das quantidades relativas dos fragmentos produzidos pela quebra dos fragmentos contidos na faixa granulométrica A_1 . A distribuição de fragmentos em diferentes tamanhos é função específica do minério e não do equipamento, sendo denominada distribuição de quebra primária (B_{ij}).

Fragmentação primária é definida como o fenômeno em que o material é quebrado e misturado novamente às outras partículas do moinho. Se esses fragmentos puderem ser medidos antes destes fragmentos sofrerem nova quebra, o resultado é a distribuição de quebra primária. Numericamente a distribuição de quebra primária é a porcentagem acumulada de partículas originalmente na fração (j) que passaram para a fração (i). A declividade da reta obtida a partir do gráfico bi-logarítmico de B_{ij} pelo tempo é γ , parâmetro este que é função de cada minério. Fisicamente, quanto maior o valor de γ mais limitada é a distribuição granulométrica produzida.

Klimpel, obteve resultados satisfatórios correlacionando as performances do circuito de cominuição com o desempenho da flotação, através do valor experimental do parâmetro γ do minério alimentado.

A Tabela 2 abaixo, ilustra essa abordagem, ou seja, no caso de três minérios sulfetados de cobre, processados em uma mesma configuração (com um circuito de moagem fechado seguido de uma flotação tradicional "Rougher-Scavenger-Cleaner").

Tabela 2 – Caracterização dos 3 minérios sulfetados de Cu

| Tipo de Minério | Teor de cobre na Alimentação | Work index (kWh/st) | Taxa de Quebra (S) | Parâmetro (γ) |
|-----------------|------------------------------|---------------------|--------------------|------------------------|
| A | 0,745 | 12,8 | 0,34 | 0,68 |
| B | 0,810 | 14,6 | 0,28 | 0,56 |
| C | 0,667 | 17,2 | 0,21 | 0,84 |

Uma análise da tabela acima mostra que os valores da taxa de quebra e *work index* possuem uma correlação entre si, indicando que os minérios C, B e A, nesta ordem, possuem uma resistência decrescente à cominuição.

Entretanto, uma análise mais detalhada do gráfico da figura 3 a seguir, indica que esses parâmetros, a taxa de quebra e *work index de Bond*, não são apropriados

previsão da performance global da usina de concentração, sendo o parâmetro γ mais útil para esse propósito.

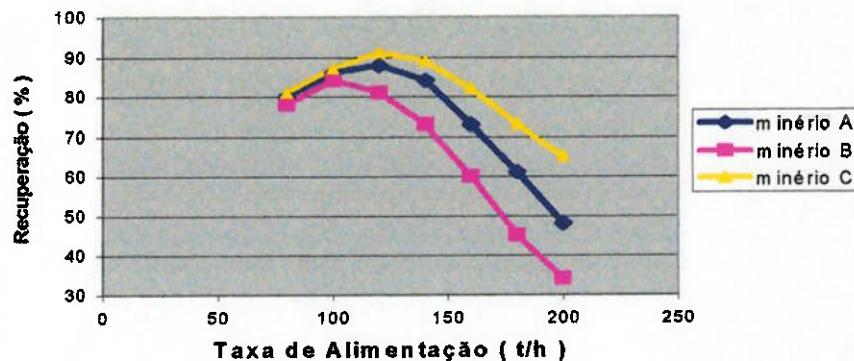


Figura 3 – Recuperações de cobre dos três tipos de minério na planta

De acordo como a figura 3, a recuperação de cobre é decrescente nos minérios C, A e B para uma mesma taxa de alimentação. O parâmetro γ apresenta valores decrescentes para os três minérios nesta mesma sequência C,A, e B. Quanto maior o valor de γ mais estreita é a distribuição granulométrica após a moagem. Dessa forma, o material de maior valor de γ possui uma homogeneidade granulométrica maior. A observação da figura 4 confirma a utilidade do parâmetro γ , apresentando uma correlação direta entre o γ de cada minério e o teor de cobre no concentrado.

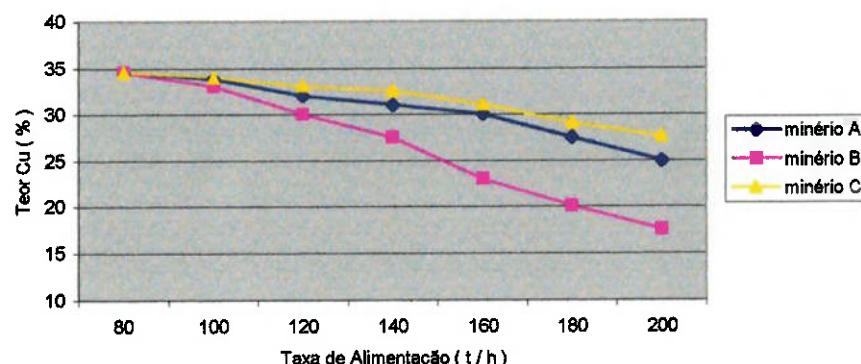


Figura 4- Teor de cobre no concentrado versus taxa de alimentação

3 MODELO DE DESEMPENHO DE MOINHOS AG/SAG

Um modelo de operação de moinhos autógenos (AG) / semi-autógenos (SAG) e moinhos de bolas, é aquele que considera o moinho como um misturador perfeito (*perfect mixing*), sendo regido por duas equações básicas, abaixo descritas.

$$f_i - p_i + \sum_{j=1}^i r_j s_j a_{ij} - r_i s_i = 0$$

$$p_i = d_i s_i$$

onde:

- f_i = vazão de sólidos da alimentação do moinho, correspondente a i -ésima faixa granulométrica (t/h)
- p_i = vazão de sólidos do produto do moinho, correspondente a i -ésima faixa granulométrica (t/h)
- a_{ij} = função distribuição de quebra, correspondente a fração da j -ésima faixa granulométrica, que aparece na i -ésima faixa granulométrica devido a fragmentação
- r_i = função taxa de quebra, correspondente a i -ésima faixa granulométrica (h^{-1})
- s_i = massa da carga do moinho correspondente a i -ésima faixa granulométrica (t)
- d_i = função taxa de descarga, correspondente a i -ésima faixa granulométrica (h^{-1})

Os vetores f_i , p_i e s_i representam, respectivamente, a taxa de alimentação do moinho, a taxa de descarga do moinho e o conteúdo interno do moinho (carga) em cada intervalo granulométrico. Os dois primeiros vetores são diretamente obtidos com base nos resultados de medidas de vazão e distribuições granulométricas em cada amostragem.

A distribuição granulométrica da carga, no entanto, é raramente conhecida em moinhos industriais, sendo portanto estimada em função dos valores das variáveis taxa de quebra (r_i) e taxa de descarga do moinho (d_i).

A distribuição taxa de quebra (r_i) é definida como a fração fragmentada do material, em uma faixa granulométrica, por unidade de tempo. A distribuição dos valores da taxa de quebra é assimilada a uma função, utilizando-se a técnica denominada *cubic splines*, em cinco nós situados nos pontos 0,25mm, 4,0mm, 16mm, 44mm e 128 mm. A Figura 4 apresenta, em forma de gráfico, a função taxa de fragmentação calculada a partir de dados de operação de moinhos autógenos e semi-autógenos.

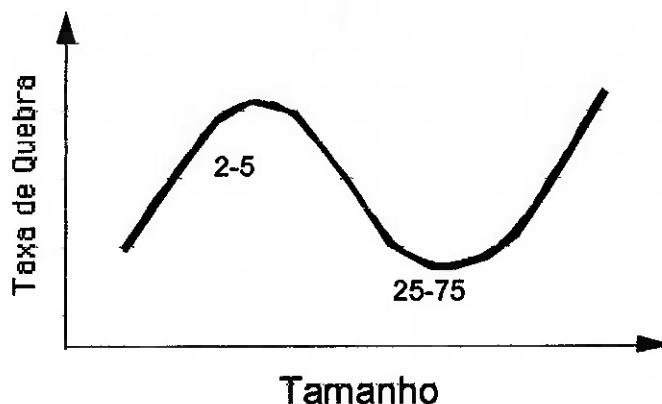


Figura 5 . Exemplo da função taxa de fragmentação calculada para moinhos autógenos e semi-autógenos

Conforme pode ser observado na figura 5, a função taxa de fragmentação exibe, via de regra, a forma de uma função cúbica, com dois pontos de inflexão bem definidos. O ponto de inflexão superior determina a máxima taxa de quebra, segundo o mecanismo de atrito. O ponto de inflexão inferior representa a transição entre os mecanismos de fragmentação por abrasão e atrito. Tal faixa granulométrica é denominada tamanho crítico e pode ser interpretada como a classe de fragmentos que é muito grande para ser fragmentada por atrito e, por encontrar-se bastante arredondada, tem uma taxa de fragmentação por abrasão, relativamente baixa. Essa fração tende portanto a se acumular no interior do moinho, diminuindo a performance do mesmo. Uma das soluções para se contornar o problema é a instalação de aberturas maiores de descarga (*pebble ports*), de forma a propiciar a descarga dessa fração que, via de regra é britada no chamado britador de reciclo, e o produto encaminhado de volta ao moinho.

A variável a_{ij} representa a fração retida na malha j proveniente da malha i , após um evento de fragmentação. O conjunto de valores desta variável é calculado a partir dos testes de caracterização com o minério, descritos na seção anterior. Ele é definido em termos dos parâmetros de quebra por impacto e abrasão (A , b e t_a).

A segunda equação introduz a função taxa de descarga do moinho (d_i), ou a taxa segundo a qual, a polpa é descarregada do moinho, tendo a dimensão de inverso de tempo. Para faixas de tamanho superiores a abertura da grelha, esta função tem valor nulo, atingindo um máximo, com o decréscimo do tamanho da partícula.

Apesar da interdependência entre as variáveis do modelo, a taxa de quebra é assumida como exclusivamente dependente das características de projeto e operação do moinho. Na estrutura do modelo aqui descrito, a função taxa de fragmentação não é parametrizada a partir de testes específicos, mas sim, retro-calculada pelas equações do modelo, para cada faixa granulométrica considerada.

Após a 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 da sua alimentação, assim como das características do minério alimentado.

4 METODOLOGIA

4.1 INTRODUÇÃO

O *Work Index* proposto por Bond tem aplicação consagrada no projeto de moinhos de bolas e barras. Este índice não é entretanto, um parâmetro adequado para descrever o desempenho de moinhos autógenos e semi-autógenos.

O WI é obtido a partir de um teste executado sob condições padronizadas segundo as quais todo o material na alimentação seja passante em 3,36 mm. Esse é o tamanho típico da alimentação de um moinho de barras, substancialmente menor, portanto, que a alimentação de moinhos AG/SAG, nos quais o *top size* pode chegar até 12".

Partículas grossas possuem, via de regra, uma resistência a moagem menor do que partículas finas. Esse fato decorre, por exemplo, da existência de fraturas e fissuras nos fragmentos maiores. Conforme o fragmento original vai sendo cominuído, novos fragmentos são gerados. Assim, fissuras desaparecem uma vez que são regiões de menor resistência, nas quais a quebra ocorre preferencialmente



Figura 6- Resistência de fragmentos por tamanho

Em um moinho AG/SAG há três mecanismos de quebra: Abrasão, Impacto e Atrito.

- Abrasão: Fenômeno de fragmentação da superfície que é resultante do movimento entre duas partículas paralelo ao plano de contato

- Atrito: Fenômeno similar a abrasão, no qual uma partícula pequena é presa entre duas partículas muito maiores e quebra-se por ação da força exercida.
- Impacto: A partícula impactante move-se obliquamente ao plano de contato, não estando em contato constante com a partícula impactada.

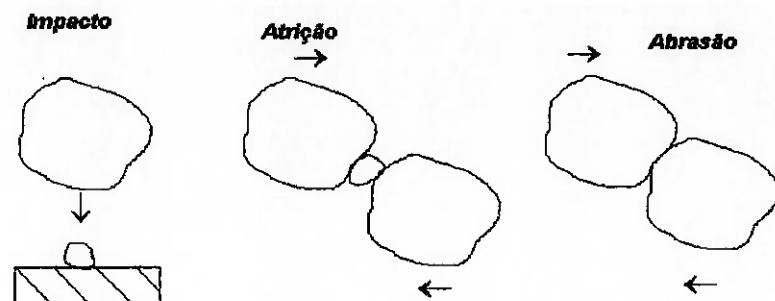


Figura 7 - Mecanismos de impacto, Atrito e Abrasão

Em moinhos com bolas ou barras só dois desses mecanismos estão presentes: impacto e atrito. Não há quebra por abrasão nesses moinhos pois esse mecanismo pressupõe que os fragmentos e corpos moedores tenham tamanhos próximos.

Em moinhos em que os corpos moedores são exclusivamente barras ou bolas a quebra se dá pela atrito ou impacto, não ocorrendo quebra por abrasão uma vez que a massa do fragmento a ser cominuído é pequena em relação aos corpos moedores.

O índice de Bond não se aplica para moinhos AG/ SAG uma vez que não há abrasão nas condições do teste.

Um outro fator que impossibilita o uso do *work index* como um parâmetro de correlação para moinhos AG/SAG é o fato de as curvas de distribuição granulométrica do produto gerado em um moinho AG/SAG apresentam formas diferentes das obtidas em um moinho de bolas/barras.

Esses fatores, aliados às próprias restrições do uso do WI para moinhos de barras ou bolas, como a não consideração da carga circulante, determinam que o WI não é um bom índice para traduzir o desempenho de um moinho AG/SAG.

Um outro complicador reside no fato de que o WI não é um índice ponderável. Assim, ao misturarmos dois ou mais tipos de rochas cada uma com um diferente WI, o WI da mistura não será o WI médio ponderado pelas quantidades (em peso) de cada tipo. Isso ocorre uma vez que a rocha mais resistente auxilia a cominuir a de menor competência.

No caso de operações em que há a blendagem essa imponderabilidade complica o uso do *work index*. Um estudo de como cada minério afeta na moabilidade do material blendado torna-se necessário. A dificuldade do estudo aumenta exponencialmente com o número de minérios a serem blendados. Assim, para uma operação que trabalha com dois tipos de rochas diferentes é relativamente fácil o estudo da variação do WI com a blendagem, mas para quatro ou cinco tipos a análise torna-se muito mais complexa.

4.2 ÍNDICES DE QUEBRA

A distribuição quebra, é a distribuição granulométrica após um evento de quebra, ocorrido no interior de um moinho AG/SAG.

Estudos realizados sobre uma ampla gama de minérios, dos mais variados tipos e origens, foram objetos de estudos ao longo de décadas pela equipe técnica do JKMRC, da Austrália, na busca de parâmetros correlacionáveis entre si. Constatou-se que, se a distribuição quebra for expressa em relação ao tamanho original do fragmento, os resultados seguem um padrão definido, independentemente do tamanho inicial selecionado. Esse padrão é conhecido como auto-similaridade.

Esse conceito, quando aplicada aos testes de quebra incluídos neste trabalho, permite estabelecer uma função que descreve a relação entre energia aplicada e fragmentação resultante, conforme mostrada a seguir:

$$t_{10} = A \left(1 - e^{-b E_{cs}} \right)$$

onde:

t_{10} = porcentagem passante na malha igual a 1/10 do tamanho original

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

A, b = parâmetros dependentes da resistência à quebra do minério

A função acima tem a forma de uma curva com rápido crescimento inicial, determinado pelo parâmetro b, tendendo posteriormente a um valor assintótico, determinado pelo parâmetro A, conforme ilustra o gráfico contido na Figura 3.

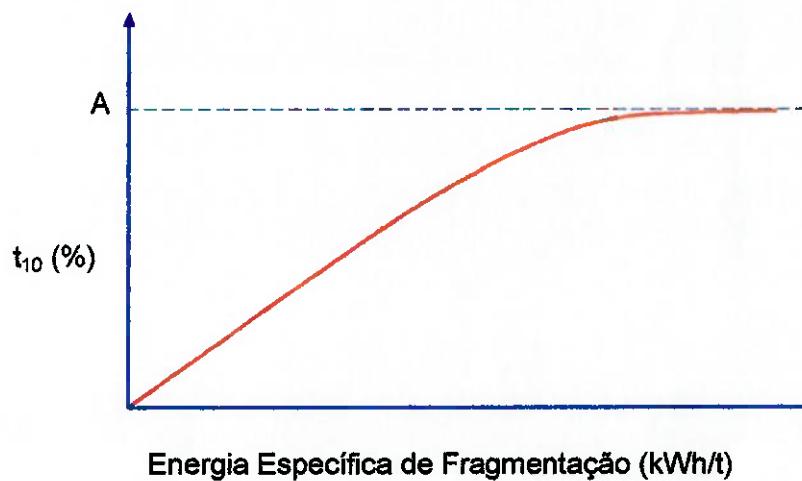


Figura 8 - Representação da relação Energia/Fragmentação obtida a partir de testes sobre amostras de minérios

Os parâmetros A e b são, portanto, característicos de a cada amostra de minério testada. De acordo com a figura 8, a fragmentação é crescente conforme o aumento de energia específica aplicada à partícula, até que um limite superior seja atingido. Na prática isto significa que o processo de fragmentação não mais ocorre a partir de um certo valor de energia aplicada às partículas.

O produto de A por b é considerado um parâmetro de resistência à quebra por impacto da rocha. Quanto maior esse valor de A por b menos resistente ao impacto é o material. Em situações nas quais o valor do parâmetro A é mantido constante, quanto menor o valor do parâmetro b maior a resistência da amostra ao impacto.

Deve-se salientar que, apesar de que o método descrito de análise das características de minerais, estar há mais de uma década consolidado pelo JKMRC, os testes podem ser conduzidos sobre amostras da cujos resultados são provenientes de testes adaptados e com procedimentos expeditos. Entretanto, esse fato não compromete em absoluto as conclusões destes estudos, já que os dados obtidos guardam correlação direta com o procedimento tradicional.

O equipamento utilizado neste teste, o *Drop Weight Tester- DWT*, consiste em um peso de queda montado entre dois trilhos guia, enclausurado em chapas de acrílico, como ilustrado na figura 9 abaixo.

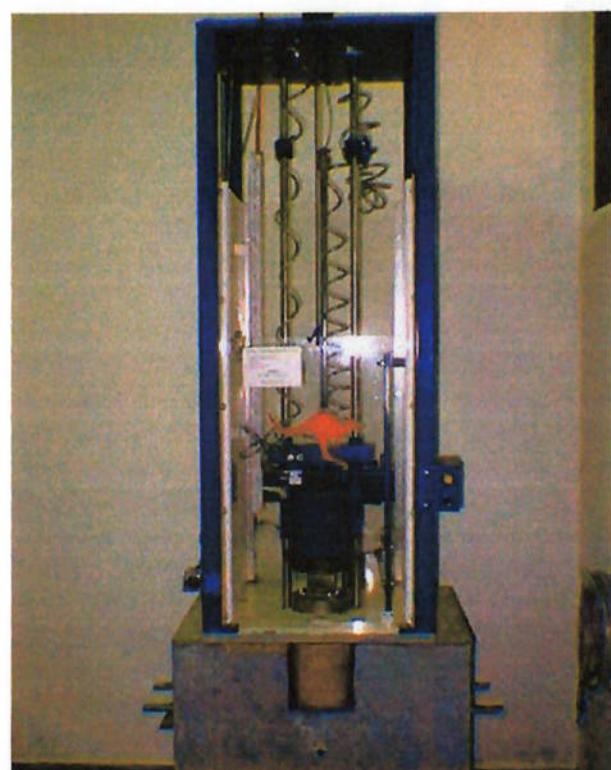


Figura 9 - *Drop Weight Tester*

Um guincho elétrico é usado para elevar ou abaixar o peso até uma altura conhecida. O peso é liberado através de um dispositivo pneumático e cai, por gravidade cominuindo o material que se encontra acima da parte fixa do aparelho. Todo esse conjunto é fixo a um bloco de concreto.

Uma grande faixa de energia pode ser produzida por esse aparelho simplesmente mudando o peso e a altura de queda.

Uma prática normal para amostras com partículas grossas é testar de 20 à 50 partículas por par (faixa granulométrica / energia), requerendo algo em torno de 500-1300 partículas, ou 50 –100kg de material.

A energia específica de cominuição , E_{cs} (kWh / t), é dada por:

$$E_{cs} = \frac{0,0272 \quad M_d (H_i - H_f)}{m}$$

Onde,

M_d = massa do peso de queda (kg)

m = massa média das partículas da fração (kg)

H_i = altura inicial de queda (cm)

H_f = massa final de queda (cm)

5 Estudo de Caso: MSF

5.1 GENERALIDADES

A Mineração Serra da Fortaleza, pertencente ao grupo Rio Tinto Brasil, situa-se a cerca de 5 km da cidade de Fortaleza de Minas e a 20 km da cidade de Passos no sudoeste do Estado de Minas Gerais.

O projeto contempla a lavra, concentração, fundição e futura instalação de refino de um corpo de minério sulfetado de níquel, cobre e cobalto.

A lavra está sendo realizada a céu aberto durante os primeiros 4 anos, com uma gradual passagem para o método subterrâneo a partir do terceiro ano, permitindo a recuperação de 95,4% das reservas geológicas de níquel e a obtenção de um minério com teor médio de 1,65% de níquel, considerando-se a diluição da lavra.

A concentração dos sulfetos por flotação permite a obtenção de um máximo de 150.000 t/a (70 t/h) de um concentrado com teor médio de 7,16% de níquel. Por meio da fundição deste concentrado poderá ser produzidas , no máximo , 21800 t/a de matte granulado do forno *flash* e do forno elétrico, com teor médio de 61% de níquel, que no futuro se constituirão na alimentação da etapa de refino químico e eletroquímico do mesmo.

Os gases provenientes da fundição são transferidos para uma unidade de fabricação de ácido sulfúrico, podendo atingir uma produção média de 96.045 t/a.

5.2 GEOLOGIA

A jazida de níquel sulfetado de Fortaleza de Minas é estimada em 10,6 milhões de toneladas e, ao ritmo atual de lavra, uma vida útil de 20 anos .

O mineral de minério de níquel é a pentlandita que ocorre associada a outros sulfetos como a pirrotita, calcopirita, talco e outros filossilicatos.

A litologia dessa jazida é subdividida em 4 tipos de minério além do estéril com relação a teores e desempenho metalúrgico no processo de concentração, como mostra a tabela abaixo:

Tabela 3 - Informações Históricas da MSF sobre os Tipos de Minério

| Tipo de minério | Distribuição | | WI | Índice De Abrasão | Teor de Níquel (%) | |
|--------------------------|----------------------|------------------------|-----------|--------------------------|---------------------------|---------------|
| | Na Jazida (%) | De Bond (kWh/t) | | | Mínimo | Máximo |
| Brechóide | 40 | 14,5 | Baixo | 2,2 | 8,8 | |
| Stringer no Chert | 20 | 20,8 | Médio | 0,2 | 3,2 | |
| Interstitial | 20 | 18,3 | Baixo | 2,5 | 5,4 | |
| Disseminado | 20 | 20,4 | Baixo | 0,3 | 1,7 | |

5.3 PROCESSO DE CONCENTRAÇÃO

O processo de concentração inclui todas as etapas necessárias para obtenção de um concentrado de níquel , à partir do minério oriundo da Mina . Estas etapas incluem a cominuição do minério , a flotação e o espessamento do concentrado produzido .

- Cominuição

Esta etapa inclui todas as operações unitárias necessárias para obter um produto adequadamente fino que permita a separação dos sulfetos na etapa seguinte , de flotação , sendo constituída da britagem , moagem num moinho semi-autógeno , moagem em moinho de bolas e classificação .

O produto dos vários blocos de desmonte são dispostos em um pátio de estocagem em pilhas a partir das quais carregadeiras frontais alimentam a britagem , mesclando minérios de cada pilha de acordo com a blendagem estipulada. Ou ,alternativamente , a alimentação se dá diretamente da mina , por caminhões de até 35 t de capacidade . Uma grelha de 500 x 1000 mm de abertura instalada no ponto de descarga dos caminhões , limita a admissão de blocos de rocha acima deste tamanho no britador.

O minério é britado à taxa de 140 t/h por britador de mandíbula , obtendo-se um produto abaixo de 150 mm que é transferido, por transportador de correia a uma pilha cônica com capacidade de estocagem de 9650 t , sendo 2100 t úteis .

O minério britado é retomado da pilha de estoque a uma taxa de 70 t/h e alimentado no moinho semi-autógeno (SAG) através de transportador de correia dotado de balança integradora .

Água é adicionada ao moinho SAG em proporção adequada para manter a % de sólidos em 60 % . O moinho SAG é carregado com cerca de 10% de bolas de 125 mm, e é equipado com uma grelha de descarga que permite apenas a saída de produto abaixo de 35 mm . A polpa de descarga do moinho alimenta uma peneira vibratória horizontal , de onde a fração retida (acima de 12 mm) é enviada de retorno a alimentação do moinho SAG , através de um transportador de correia de alto ângulo . A fração fina , abaixo de 12 mm , é conduzida a uma caixa de bomba , e juntando-se a polpa de descarga do moinho de bolas , alimentará uma flotação de talco para retirada deste mineral deletério ao circuito de fundição. O *underflow* dessa flotação é conduzida a uma caixa de bomba que alimentará os ciclones primários .

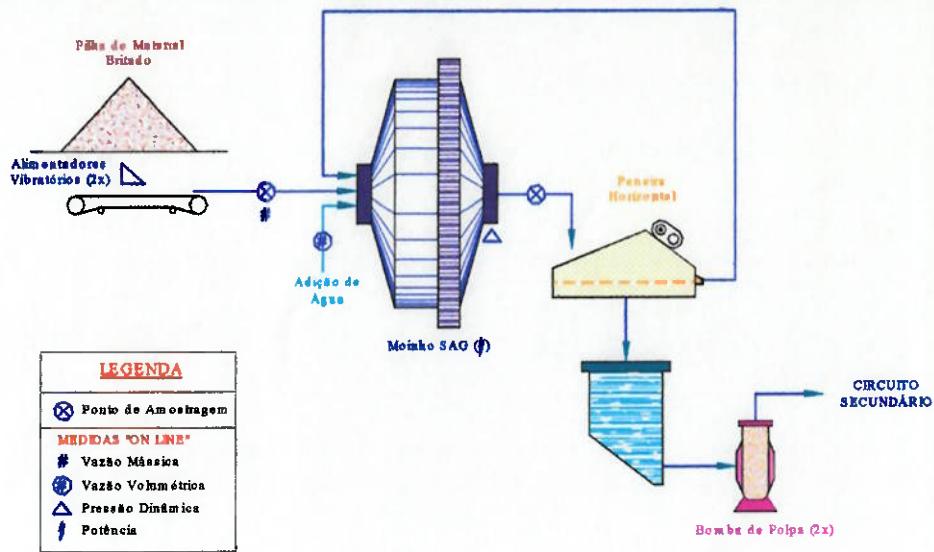


Figura 10. Fluxograma de Processo do Circuito Primário de Moagem da MSF

O circuito secundário de moagem da MSF está configurado em modo reverso, cujo produto possui um diâmetro de corte de $80 \mu\text{m}$. O *underflow* dos ciclones constitui a alimentação do moinho de bolas, trabalhando em circuito fechado, como mostra a figura 11 abaixo. No entanto, na carga circulante está instalada célula de flotação especial para recuperar os sulfetos já liberados, cujo concentrado é adicionado ao concentrado do circuito de flotação convencional. A fração abaixo de $80 \mu\text{m}$, que constitui o *overflow* dos ciclones primários, é conduzida à etapa de concentração propriamente dita, a flotação em células mecânicas.

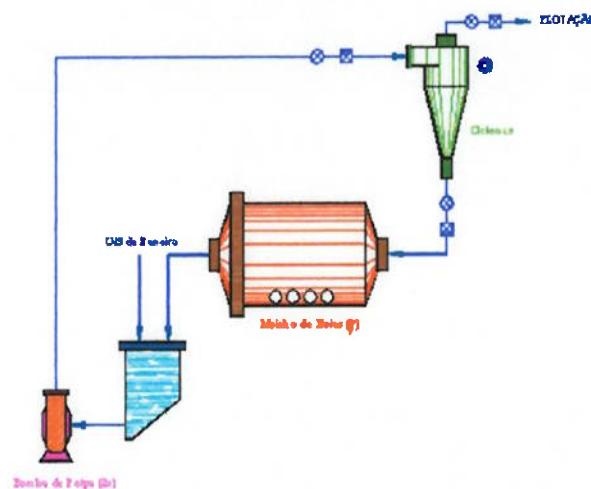


Figura 11. Fluxograma de Processo do Circuito Secundário de Moagem da MSF

- Sistema de flotação

O circuito de flotação em células mecânicas da MSF compreende os estágios *rougher*, *scavenger* e *cleaner*, segundo um processo clássico de flotação de sulfetos.

O objetivo principal da flotação é o enriquecimento dos sulfetos de níquel, cobre e cobalto. O concentrado obtido contém também sulfetos de ferro (especialmente pirrotita) que, junto aos demais sulfetos metálicos, irá compor a carga de enxofre para a fábrica de ácido sulfúrico.

O concentrado é posteriormente desaguado em um espessador de 19,8 m de diâmetro e filtrado e um filtro de prensa.

5.4 TAXA DE ALIMENTAÇÃO E PRODUÇÃO

No cenário de produção que se apresentava na MSF em junho de 1999 era de estrangulamento em função da concentração. Ou seja, o processo de concentração e cominuição era o gargaço do empreendimento.

Esse fato ocorreu uma vez que havia ampla variação de desempenho no circuito de moagem da MSF, resultando em taxas de alimentação inferiores à nominal.

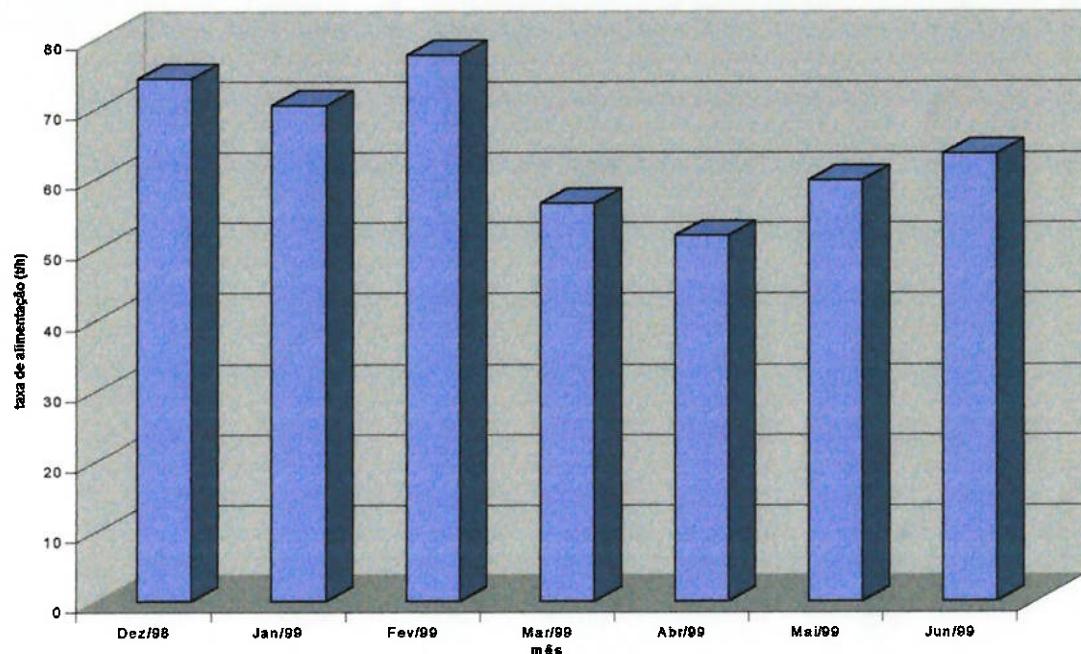


Figura 12- Histórico da Taxa de alimentação horária mensal

Como observa-se na figura 12, a Taxa de alimentação projetada de 70 t/h foi atingida somente nos meses de Janeiro e Fevereiro, sendo inferior a este valor nos demais. Essa deficiência na alimentação leva a dois problemas principais. O primeiro foi uma menor produção de concentrado final e, consequentemente, menores quantidades de níquel. O segundo diz respeito ao processo em si, que determina condições de operação totalmente diferentes da projetada. Na concentração, o fator limitante ao aumento da taxa de alimentação foi o moinho SAG.

A partir de dados resultados de campanhas de amostragem e simulações, várias tentativas foram implementadas para reverter esse quadro, entre elas:

- a) Troca do motor do moinho SAG;
- b) Troca da abertura da peneira horizontal;
- c) Abertura de *pebble-ports* na grelha do moinho SAG, para a passagem da fração crítica;
- d) Aumento da Carga de bolas e modificação no tamanho das bolas;
- e) Introdução de um Britador de reciclo à carga circulante do moinho AG/SAG.

Essas mudanças, no entanto, não solucionaram o problema da baixa taxa de alimentação, o que levou a MSF a implantar um circuito de britagem paralelo ao moinho SAG, com entrada em operação prevista para o final do ano de 1999.

Simulações realizadas em computador e a própria experiência da equipe técnica da MSF, indicam que o tipo de minério processado, constitui-se na principal variável de operação do circuito primário de moagem da MSF. Segundo, o prof. Homero Delboni Jr., condutor desses estudos e simulações, “..A combinação entre os quatro tipos de minério presentes na jazida mostrou-se determinante do desempenho do circuito.”.

Historicamente a previsão da taxa de alimentação na MSF foi realizada a partir do *Work Index de Bond* para cada minério, que no entanto, não apresentava correlações aceitáveis. Assim sendo, o controle adotado não era satisfatório. Nesse contexto, minérios cujo WI ponderado era baixo, se esperando desse modo uma alta taxa de alimentação apresentavam taxas de alimentação baixas. Da mesma forma, minérios extremamente resistentes, segundo o WI resultavam em altas taxas de alimentação, não correspondendo ao desempenho previsto.. Assim, o *work index* não se constituía em parâmetro útil ao planejamento das operações da MSF.

No entanto, permanecia a necessidade de estimar a taxa de alimentação da usina. Considerando que os parâmetros de quebra por abrasão e impacto (A , b , t_a) são utilizados no dimensionamento e modelagem de moinhos AG/SAG, decidiu-se adotá-los na metodologia proposta para estimativa de desempenho do circuito.

5.5 CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO A PARTIR DE ÍNDICES DE QUEBRA

Tomada a decisão de utilizar esse novos índices para prever a taxa de alimentação da usina, foi preciso uma nova caracterização dos minérios.

- Amostragem

Durante os meses de novembro/dezembro de 1997 e janeiro de 1998, foram conduzidos três programas de amostragens no circuito de moagem existente nas instalações industriais da usina da MSF.

As amostras, coletadas na alimentação do circuito, foram consideradas satisfatórias e, em praticamente todas as amostragens, o máximo volume possível de amostras foi extraído da correia transportadora, conforme descrito a seguir.

Como a principal fonte de erro associada à amostra de alimentação de circuitos AG/SAG está relacionada com a distribuição dos fragmentos mais grossos, a técnica recomendada consiste em coletar o máximo volume de amostras grossas, mantendo, no entanto, mínimo o volume total de amostras das frações mais finas.

A técnica empregada no caso da MSF consistiu em retirar duas amostras distintas da correia. A primeira obtida ao coletar todo o conteúdo da correia numa extensão de 5 a 6 m, perfazendo aproximadamente 50 kg de material tal qual. A segunda amostra foi obtida coletando-se apenas os fragmentos maiores do que 50 mm, ao longo de aproximadamente 10 m da correia, geralmente correspondendo a 50 kg de material.

Tais amostras foram encaminhadas para os laboratórios da MSF, onde foram tratadas separadamente, de forma a determinar suas distribuições granulométricas, conforme as seguintes malhas:

152; 127; 102; 76,2; 50,8; 25,4; 19,1; 12,7; 6,35; 1,68; 1,00; 0,60; 0,42; 0,30; 0,021; 0,15; 0,105; 0,075 e 0,053 mm

Após o processamento de cada amostra, foram separados aproximadamente 30 kg de material maior do que 25 mm, de forma a gerar uma fração representativa da alimentação nova do circuito, para ser encaminhada aos testes de caracterização tecnológica.

Uma das 10 amostragens conduzidas no circuito de moagem da MSF, foram coletas amostras do minério que constituiu a alimentação nova do moinho SAG. Essas amostras foram transportadas para o Laboratório de Simulação e Controle (LSC) do PMI/EPUSP, onde foram objeto de testes de caracterização.

O procedimento adotado foi coletar cerca de 30 kg da amostra da alimentação nova do circuito, formada por fragmentos maiores do que 50 mm. Para efeito dos testes, a essa amostra foi dividida em duas frações uniformes e, uma das metades britada até que os fragmentos estivessem dentro da faixa granulométrica estabelecida para os testes de caracterização. Desta forma, a massa de amostra efetivamente submetida aos testes foi de cerca de 1 kg.

5.6 RESULTADOS OBTIDOS

Os principais tipos de minério da MSF foram testados, segundo a metodologia descrita no item 3 ,cujos resultados são apresentados abaixo:

Tabela 4- Índices de Quebra Obtidos a Partir de Amostras da MSF

| Amostra | Índices de Quebra | |
|-------------------|-------------------|------|
| | A | b |
| Brechóide – BR-A | 60 | 1,41 |
| Brechóide – BR-B | 60 | 0,62 |
| Stringer no Chert | 60 | 0,44 |
| Disseminado | 60 | 0,28 |
| Intersticial | 60 | 0,61 |

À título de complementar os estudos de caracterização, a equipe técnica da MSF realizou análise em cada uma das amostras coletadas, de forma a determinar a

composição aproximada das mesmas, segundo os vários tipos de minérios lavrados pela MSF. Essas informações encontram-se listadas na Tabela 5 a seguir, em conjunto com os resultados experimentais dos testes de caracterização realizados no LSC. Essa mesma tabela apresenta ainda os valores dos índices de quebra, ponderados com base nas informações de composição aproximada das amostras.

Tabela 5 - Índices de Quebra Experimentais e Calculados para Amostras da Alimentação Nova do Moinho SAG

| Amostragem | Índice Experimental de Quebra | Composição da Amostra | Índice Ponderado de Quebra |
|------------|-------------------------------------|---|----------------------------------|
| | B (para A = 60) | | b (para A = 60) |
| 1 | 0,23 | 39% DS 45% IN 16% BR | 0,48 |
| 2 | 0,42 | 75% DS 25% IN | 0,36 |
| 3 | 0,53 | 75% DS 25% IN | 0,36 |
| 4 | 0,36 | 75% DS 25% IN | 0,36 |
| 5 | 1,09 | 25% DS 75% BR Alterado | 1,06 |
| 6 | 0,27 | 70% DS 21% IN 9% BR | 0,37 |
| 7 | 0,19 | 67% DS 23% IN 10% BR | 0,38 |
| 8 | 0,29 | 49% DS 34% IN 3 % BR 14% Estéril | 0,40 |
| 9 | 0,40 | 54% DS 32% IN 5 % BR 9% Estéril | 0,40 |

Foi admitido que a resistência do estéril é igual ao do minério tipo disseminado.

De acordo com os critérios adotados, as amostras provenientes de todas as amostragens estariam classificadas como extremamente resistentes à fragmentação, exceção feita à Amostra 5. Uma análise mais detalhada demonstra, entretanto, que a correlação entre os índices obtidos a partir dos testes (experimentais) e aqueles calculados a partir da composição das amostras (ponderados) pode ser considerada muito boa. Assim, a estimativa da composição dos minérios alimentados na planta, baseada na participação de cada tipo de minério e o cálculo da média ponderada do índice de quebra, revelou ser um instrumento valioso para o estudo ora descrito.

5.7 METODOLOGIA DE UTILIZAÇÃO DO IQ

O índice de quebra é uma propriedade característica do tipo de minério. Normalmente, o produto A por b seria por si só uma indicação da resistência do minério. No entanto, com o parâmetro A igual a todos os minérios, o índice de resistência à quebra por impacto é simplesmente o " b " de cada minério. Esse é o índice de Quebra (IQ), utilizado para os minérios da MSF.

A cada fogo na mina a céu aberto, atribui-se valores de participação do material desmontado para cada tipo de minério, bem com de estéril. A partir desses valores e dos IQ's individuais calcula-se o IQ do fogo mediante média ponderada. Desse modo, cada fogo é associado um valor de IQ.

No caso do minério proveniente da lavra subterrânea foi adotado um valor fixo de IQ igual a 0,70 , em função do estágio preliminar em que se encontram os trabalhos.

Os fogos são dispostos em um pátio de estocagem onde uma pá-carregadeira alimenta o britador primário, blendando esses desmontes. A caçamba da carregadeira é portanto, a unidade de blendagem. O controle da quantidade de conchas de cada fogo é feito por turno e posteriormente somados , de forma a obter-se as quantidades diárias. A tabela 5 apresenta um exemplo de blendagem:

Tabela 5. Exemplo de blendagem

| Fogo | Blendagem Requerida(%) | No de Caçambas |
|------|--------------------------|----------------|
| A | 75 | 3 |
| B | 25 | 1 |

Do mesmo modo, o IQ do minério alimentado na usina é obtido pela ponderação dos índices dos fogos blendados.

Com a finalidade de se obter uma correlação entre a taxa de alimentação e o IQ, os valores médios diários desses parâmetros foram plotados para o ano de 1999. Os resultados obtidos são mostrados a seguir.

5.8 CORRELAÇÃO DO IQ COM A TAXA DE ALIMENTAÇÃO

Inicialmente são necessárias algumas considerações antes de serem apresentadas as correlações obtidas com o uso do IQ.

No ano de 1999 o circuito de moagem primária da MSF operou de três modos distintos. O primeiro, circuito SAG , durante o mês de janeiro e o período entre maio e setembro. No período entre fevereiro e abril o moinho operou em um modo FAG (*full autogenous grinding*) e em outubro entrou em operação um circuito de britagem , cuja função é complementar a produção requerida.

A primeira abordagem da correlação entre IQ e taxa de alimentação foi analisar somente os meses em que o moinho operou como SAG, excluindo-se o mês de janeiro já que a operação foi distinta dos outros meses considerados. Tampouco foi considerado o mês de setembro uma vez que, neste mês, o motor do moinho quebrou e foi colocado um motor substituto de menor potência, limitando portanto alimentação do circuito. Os dados da segunda quinzena de julho e primeira semana de agosto também foram desconsideradas com finalidade de utilizá-los em simulações de aderência de modelos, que será descrito posteriormente.

A primeira análise conduzida é mostrada nas figuras seguintes. Nota-se nessas figuras que a correlação dos resultados mensais médios com o IQ resultou em índices R^2 , compreendidos na faixa entre 0,847 e 0,953 bastante promissores para uma primeira abordagem.

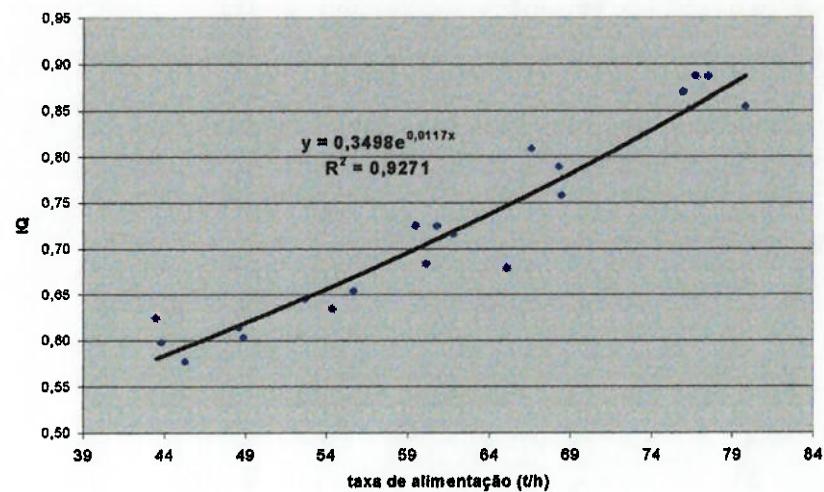


Figura 13 – Correlação entre taxa de alimentação do circuito e IQ, referente a maio de 1999

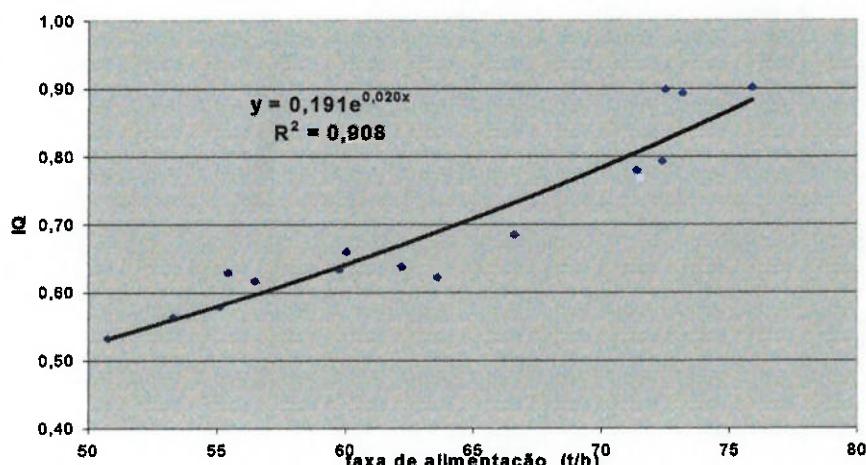


Figura 14 – Correlação entre taxa de alimentação do circuito e IQ, referente a junho de 1999

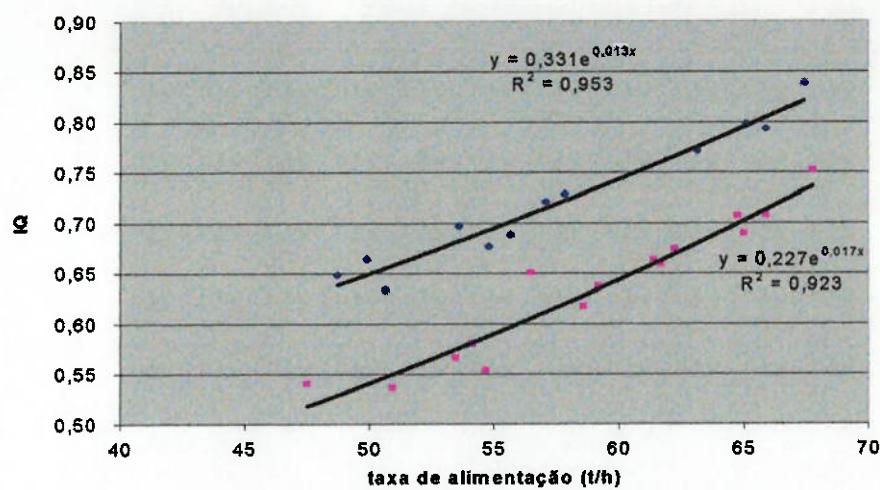


Figura 15 – Correlação entre taxa de alimentação do circuito e IQ, referente a julho de 1999

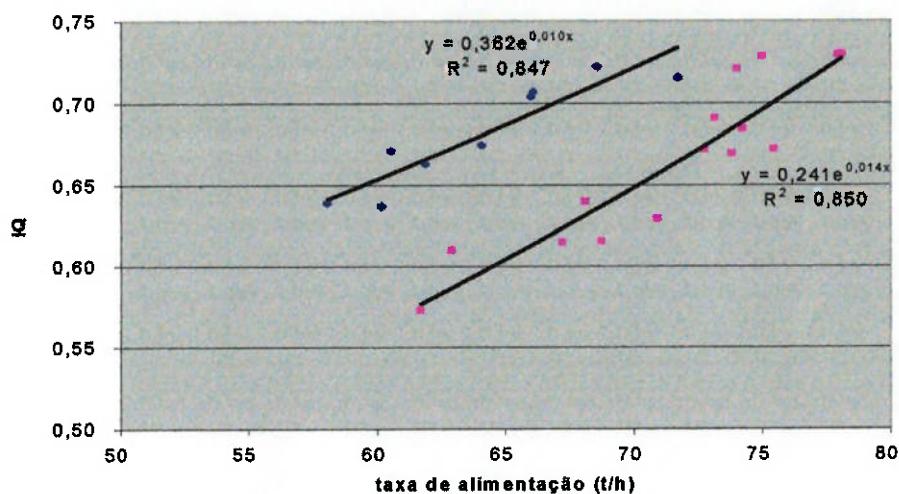


Figura 16 – Correlação entre taxa de alimentação do circuito e IQ, referente a agosto de 1999

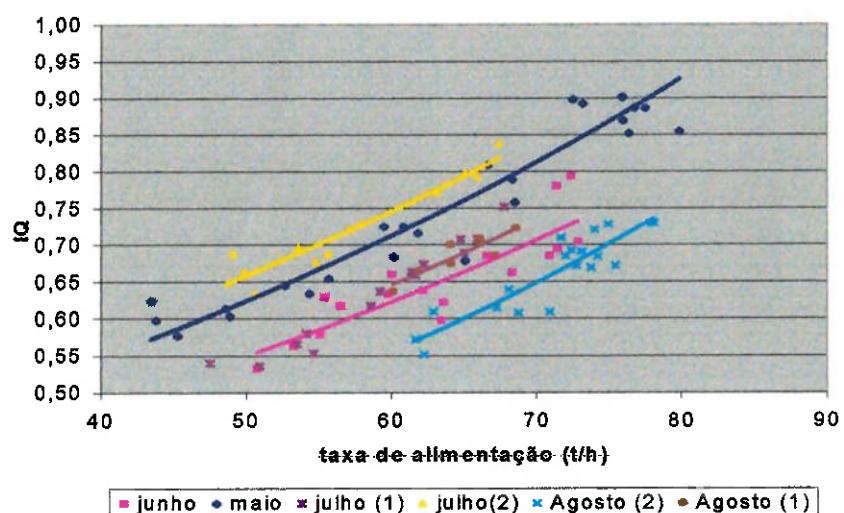
Esses índices de correlação foram obtidos através de regressões exponenciais, cujas equação são apresentadas nas figuras acima. O índice de correlação mostrado em cada figura é uma medida da dispersão dos pontos utilizados para a aproximação de tal curva, a correlação é tanto melhor quanto mais próximo de 1,00 for o R^2 . Considerando-se que nenhum tratamento prévio foi feito, os valores obtidos são considerados muito bons, demonstrando que o IQ constitui-se em um índice aplicável à previsão do desempenho do moinho SAG da MSF.

Nos meses de julho e agosto os dados foram discretizados em duas curvas de comportamentos diferentes bem nítidos visualmente. Esse fato, como será abordado a seguir, foi reflexo de modos de operação diferenciada.

Apesar de apresentar valores aceitáveis de índice de correlação, as regressões realizadas sobre o conjunto de todos os dados apresentaram valores bastante inferiores, da ordem de 0,451. Análises sobre esses resultados indicaram conjuntos de pontos representativos de diferentes condições de operação do circuito, ainda que em modo SAG.

Uma das principais causas dessas dispersões foram atribuídas a diferentes cargas de bolas pois quanto maior a carga de bolas maior a tendência de aumento da taxa de alimentação. Outras possíveis causas seriam a diferença de granulometria na alimentação do moinho primário, velocidade de rotação, bem como a porcentagem de sólidos do moinho.

De fato, plotando os dados agrupados por meses em um mesmo gráfico, como observa-se na figura 17, as curvas são semelhantes, com uma tendência de paralelismo entre elas, o que sugere mais uma vez que há alguma diferença de operação mês a mês.



Assim, os pontos foram separados em três regiões, conforme mostra a figura 18 abaixo.

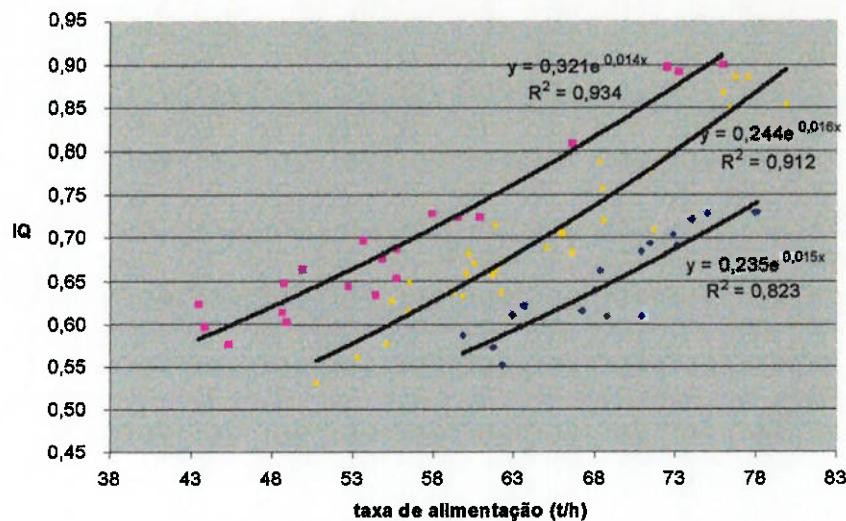


Figura 18 – Correlação entre taxa de alimentação do circuito e IQ, em grupos de 1999

O procedimento descrito definiu matematicamente portanto três domínios de pontos cujas curvas de regressão entre a taxa de alimentação e o IQ mostraram-se praticamente paralelas, como observa-se na figura 18 acima.

Analizando-se a operação de um moinho SAG, nota-se que a taxa de alimentação é bastante sensível à condição de operação, uma vez que a própria carga do moinho é formada em função do minério que alimenta o equipamento. Dessa forma os três domínios observados deveriam estar associados a faixas de valores das principais variáveis envolvidas.

Decidiu-se assim analisar em detalhe os dados de operação diária do circuito em relação às seguintes variáveis:

- Carga de bolas;
- Velocidade de rotação;
- Granulometria de alimentação;
- Porcentagem de sólidos.

Para tanto foi necessária uma Segunda viagem do autor à MSF em Passos, MG, de forma a tabular as informações acima. Assim, no período entre três e seis de novembro o autor levantou as informações necessárias.

Após testes preliminares de sensibilidade entre a relação taxa de alimentação/IQ e as variáveis acima listadas, observou-se que o fator individual com maior influência nos resultados foi a granulometria de alimentação. Dessa forma, esta variável foi selecionada para análises ainda mais detalhadas. Estas análises encontram-se detalhadas em anexo.

Essas análises indicaram três fatores que determinam a granulometria da alimentação do circuito de moagem SAG da MSF, que são:

- Abertura do britador;
- Estado de desgaste das mandíbulas;
- Volume da pilha pulmão.

Os dois primeiros índices são relativos à operação do britador primário da MSF, enquanto que o segundo relaciona-se com o modo de alimentação da pilha. A alimentação normal, aqui entendida como proveniente de uma pilha de volume estacionário, indica condição de operação sem segregação granulométrica. Já o termo pilha "virada", ou máquina na pilha, tal qual empregado na MSF, indica volume baixo da pilha e material sendo alimentado via trator de lâminas, acarretando portanto em material de granulometria substancialmente mais grossa da saia da pilha.

Com base nessas informações foram estabelecidos três conjuntos de modos de operação do britador e da forma de alimentação, referentes a cada uma das três regiões do gráfico na figura 18. A tabela 7 abaixo apresenta as combinações acima descritas.

Tabela 7 –Características dos grupos de correlação

| Grupo | Granulometria | Britador | | Pilha |
|-------|---------------|----------|-------------|---------------|
| | | abertura | Mandíbulas | |
| 1 | grossa | muito | gastas | virada |
| 2 | média | média | gasto médio | virada/normal |
| 3 | fina | pouca | novas | normal |

Vale ressaltar a grande dificuldade em estabelecer os critérios descritos pois não havia na MSF quaisquer critérios diretos de medida de granulometria da alimentação do circuito de moagem.

Embora a metodologia adotada apresentasse resultados bastante satisfatórios, uma segunda etapa de refinamento dos dados foi realizada sobre a mesma base de informações. Assim, excluindo-se as situações de limitação na alimentação do circuito devido à falta de alimentação ou problemas de quebra de equipamentos as três regressões obtidas revelaram índices de correlação ainda maiores, conforme mostra a figura 19, que se segue.

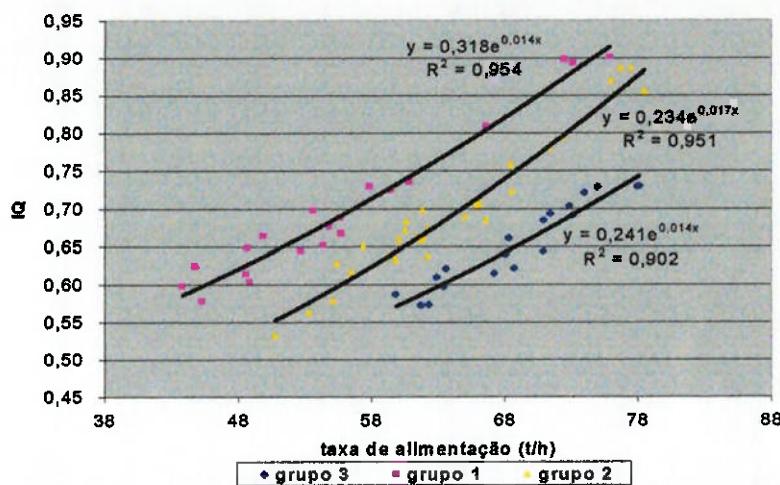


Figura 19 – Correlação entre taxa de alimentação do circuito e IQ, em grupos corrigidos de 1999

5.9 ADERÊNCIA DO MODELO PROPOSTO

Com base na definição do modelo de previsão da taxa de alimentação em função do IQ, descrito no item anterior, foram executadas rotinas de testes estatísticos simples na avaliação da qualidade das estimativas.

Para esse propósito foram selecionou-se um conjunto de dados de operação referentes à segunda quinzena de julho e primeira semana de agosto, que foram utilizados nas simulações. Conforme estabelecido no item anterior, o critério usado para estabelecimento dos conjuntos foi a granulometria de alimentação.

As comparações foram então realizadas mediante o cálculo das simulações e a taxa de alimentação através das fórmulas do modelo obtido e comparado-as com as taxas de alimentação reais. Os resultados entre as taxas de alimentação observadas e as calculadas com base no modelo são expressos na figura 20 abaixo.

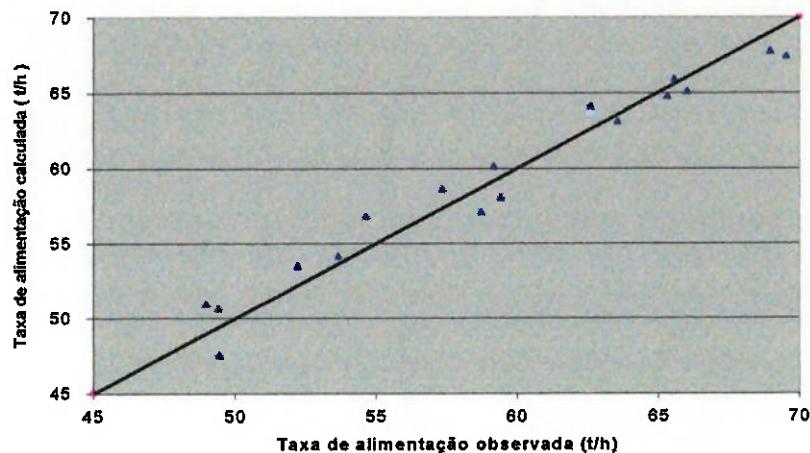


Figura 20 – Aderência do modelo proposto

Observa-se na figura acima que o modelo apresenta visualmente uma aderência muito boa dos dados experimentais.

A comprovação quantitativa desta aderência foi realizada através do cálculo de média e desvio padrão das taxas de alimentação calculadas, das observadas e da diferença entre as duas. Esses dados estatísticos são apresentados na tabela 8 a seguir. Foi utilizado um teste estatístico de T-Student, apresentado na tabela 9, para determinar a probabilidade das médias das duas amostras serem iguais.

Tabela 8 – Resultados Estatísticos

| | Calculado (V_c) | Observado (V_o) | Diferença ($V_c - V_o$) |
|------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------------|
| Média | 59,08 | 59,15 | -0,07 |
| Desvio Padrão- σ | - | - | 1,42 |
| Erro (2σ)- absoluto | - | - | 2,83 |
| Erro padrão (%) | 4,79 | - | - |
| Média de erros padrão (%) | 4,86 | | |

Tabela 9 – Teste de T-student

| | |
|--|--------|
| Hipótese da diferença de média | 0 |
| Grau de confiança | 95% |
| Probabilidade de calculado = observado | 97,72% |

A média da diferença observada na tabela 8 demonstra a proximidade entre os valores calculados e os observados. Estatisticamente, a probabilidade das médias serem iguais foi de 97,72%, como mostra a tabela 9. O erro padrão entre os dados calculados e os observados, foi de 4,79%. Esse erro padrão foi calculado como o quociente do erro absoluto pela média dos valores de taxa de alimentação calculadas. Ainda, foi calculado a média dos erros padrão definida como a média dos quocientes do erro padrão e cada valor calculado, cujo resultado foi 4,86%.

Dessa forma é comprovada a eficácia dessa metodologia de previsão da taxa de alimentação através do IQ.

6 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

A metodologia do previsão da taxa de alimentação através da utilização de características do minério foi utilizada com sucesso, resolvendo um problema crônico da MSF pois, desde a entrada em operação, a MSF enfrentou problemas de taxa de alimentação abaixo da nominal do circuito de moagem primária.

A taxa de alimentação constitui-se em um parâmetro fundamental na MSF, sendo a principal meta a ser alcançada bem como o item de controle de desempenho mais importante. Essa importância deve-se às particularidades desse empreendimento e à evolução econômica do preço do níquel, em queda acentuada nos últimos anos.

A mina da MSF é constituída por um corpo filonar subvertical e estreito no qual é realizada a lavra a teores bem baixos. Assim, possui altos custos, devido a altíssimas relações estéril/minério, que chegam a ser até 20:1. A variabilidade do minério bem como sua alta resistência, implicam em custos relativamente altos no processo de concentração. Sendo o processo contínuo, a metalurgia também é afetada pela regularidade na alimentação e qualidades dos produtos que chegam até ela.

A conjunção desses fatores determina uma orientação do corpo gerencial da MSF no sentido de atingir a taxa de nominal de alimentação do circuito.

Desde a posta em marcha do empreendimento inúmeras tentativas foram feitas para que a capacidade nominal fosse atingida, entre elas, alterações no circuito, nas variáveis operacionais e investimentos em novos equipamentos.

Diversas metodologias com base em métodos tradicionais foram empregadas, como o *work index de Bond*, não apresentando entretanto correlações adequadas.

Neste contexto, a metodologia descrita no presente trabalho apresentou resultados excelentes, com a previsão da taxa de alimentação dentro de margens estreitas em função de características do minério e algumas variáveis do processo.

O gargalo da operação da MSF é o circuito de moagem SAG primária. O controle de uma linha de produção deve ser realizado com o controle do gargalo dessa operação. O IQ, proposto nesta metodologia, é um índice muito mais adequado para

caracterizar o minério frente aos mecanismos de fragmentação que ocorrem em um moinho SAG.

Atualmente, a metodologia descrita é empregada com sucesso pela equipe técnica da MSF, tornando-se assim um recurso fundamental ao planejamento e operação de lavra e beneficiamento desta empresa.

A metodologia de previsão da taxa de alimentação pelo IQ constitui uma ferramenta poderosa e útil que, entretanto, não se restringe à MSF, podendo ser aplicada potencialmente a qualquer operação que apresente um circuito de moagem SAG.

Os estudos executados indicaram claramente que granulometria da alimentação do moinho primário da MSF tem uma forte influência no desempenho deste circuito e, consequentemente nas performances obtidas. O controle da granulometria resulta, portanto, em ganhos significativos de taxas de alimentação.

Algumas melhorias podem ser executadas para o refino da metodologia mediante a incorporação de outras variáveis de processo e, sobretudo, execução de uma campanha mais detalhada de testes sobre os vários tipos de minérios da MSF.

Um aspecto que deve ser enfatizado na metodologia desenvolvida constitui-se no seu emprego na maximização da taxa de alimentação do circuito. Esse procedimento é atualmente empregado pela equipe técnica da MSF mediante a blendagem adequada do minério em função de simulações executadas com o modelo desenvolvido.

7 AGRADECIMENTOS

Expresso meus sinceros agradecimentos a todos que tornaram esse trabalho possível.

Em especial, agradeço ao prof. Doutor Homero Delboni Jr., orientador deste trabalho e sem o qual não seria possível realizá-lo, pela enorme ajuda dada e canetas vermelhas gastas com revisões e correções.

Também, agradeço ao prof. Doutor Giorgio Francesco C. de Tomi, que também participou ativamente deste trabalho, bem como ao engenheiro chefe do Departamento de Concentração da MSF, João Batista Reis Jr. e a toda equipe técnica da MSF, pela colaboração e oportunidade dadas.

Por último, agradeço a todos os professores do Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, que contribuíram decisivamente à minha formação como ser humano e engenheiro de minas.

8 BIBLIOGRAFIA

DELBONI JR, H. Otimização do circuito de moagem da MSF. Fortaleza de Minas, MSF, s.d. (Relatório Interno)

KLIMPEL, R. R. Evaluating comminution efficiency from the point of view of downstream froth flotation. **Minerals & Metallurgical Processing** , v. 15, n.4, p.1-8, Nov. 1998

MINERAÇÃO SERRA DA FORTALEZA LTDA. Descrição do empreendimento da MSF. Fortaleza de Minas, MSF, s.d. (Relatório Interno)

NAPIER-MUNN, T.J. et al. **Mineral comminution circuits:** their operation and optimisation. Indooroopilly, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre/University of Queensland, 1996. Cap.7, p.154-90. (JKMRC Monograph Series in Mining and Mineral Processing)

PANGUM, L. S. et al. Mineralogical and metallurgical examination of fluosilicate mineral flotation in the Ok Tedi Circuit. In: **MINE TO MILL CONFERENCE**, Brisbane, 1998. **/Proceedings/** Brisbane, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1998. p. 19-28. (Publication Series, n. 4/98)

PITARD, F.F. A strategy to minimize ore grade reconciliation problems between the mine and the mill. In: **MINE TO MILL CONFERENCE**, Brisbane, 1998. **/Proceedings/** Brisbane, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1998. p. 77-82. (Publication Series, n. 4/98)

STROHMYAR, S. J. et al. Mineralogy controlling metallurgy at Ernest Henry Mining. In: **MINE TO MILL CONFERENCE**, Brisbane, 1998. **/Proceedings/** Brisbane, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1998. p. 13-7. (Publication Series, n. 4/98)

ANEXO

**DADOS OPERACIONAIS DA BRITAGEM PRIMÁRIA E
CIRCUITO PRIMÁRIO DE MOAGEM DA MSF
MAIO/99 À AGOSTO/99**

Maio-99

| Dia | t/h | IQ | Comentários |
|-----|-------|------|--|
| 10 | 54,37 | 0,63 | |
| 11 | 48,60 | 0,61 | |
| 12 | 43,46 | 0,62 | |
| 13 | 45,29 | 0,58 | |
| 14 | 43,80 | 0,60 | |
| 15 | 52,69 | 0,64 | %sol minima 55 |
| 16 | 48,88 | 0,60 | muitos engaiolamentos britador |
| 17 | 55,89 | 0,65 | ab brita 5,5" e G.E.=35% |
| 18 | 65,07 | 0,68 | retirada de bolas do moinho |
| 19 | 60,16 | 0,68 | ab brita 3,5" |
| 20 | 61,83 | 0,72 | fechado o britador - abert. De 3,75" |
| 21 | 60,83 | 0,72 | alta granulometria |
| 22 | 59,50 | 0,72 | repos bolas/ baixa produt. Da britagem |
| 23 | 68,33 | 0,79 | |
| 24 | 68,49 | 0,76 | |
| 25 | 66,62 | 0,81 | maq na pilha |
| 26 | 79,87 | 0,85 | G.E. 26% |
| 27 | 75,98 | 0,87 | |
| 28 | 76,38 | 0,85 | troca da mandibula |
| 29 | 77,51 | 0,89 | |
| 30 | 76,74 | 0,89 | |

Junho-99

| Dia | t/h | IQ | Comentários |
|-----|-------|------|---|
| 2 | 73,17 | 0,89 | máquina na pilha |
| 3 | 75,90 | 0,90 | alim. Limitada pela bomba |
| 4 | 72,50 | 0,90 | alim. Limitada pela flotacao |
| 7 | 59,80 | 0,63 | mandíbula gasta |
| 8 | 70,92 | 0,68 | pilha pulmao alta |
| 9 | 66,59 | 0,68 | brít. Parada |
| 11 | 72,89 | 0,70 | troca mandibula / alimentação de material oxidado |
| 12 | 72,39 | 0,79 | alim. Limitada por minério |
| 13 | 71,37 | 0,78 | reposição de bolas |
| 14 | 60,06 | 0,66 | brít. Fechado para 3,5"/carregadeira na pilha |
| 15 | 71,45 | 0,69 | máquina. na pilha / min oxidado/ reposição bolas |
| 16 | 68,32 | 0,66 | |
| 17 | 63,43 | 0,60 | brít parada |
| 18 | 55,11 | 0,58 | máquina na pilha |
| 19 | 50,77 | 0,53 | máquina na pilha |
| 20 | 62,22 | 0,64 | máquina na pilha |
| 21 | 63,60 | 0,62 | |
| 22 | 55,41 | 0,63 | GE 32% |
| 23 | 53,30 | 0,56 | troca de mandibula |
| 24 | 56,49 | 0,62 | britagem parada |

Julho-99

| Dia | t/h | IQ | Comentários |
|-----|-------|------|-------------|
| 1 | 49,88 | 0,66 | |
| 2 | 56,50 | 0,65 | |
| 3 | 59,20 | 0,64 | |
| 4 | 48,71 | 0,65 | |
| 5 | 55,66 | 0,69 | |
| 6 | 49,08 | 0,69 | |
| 7 | 53,61 | 0,70 | |
| 8 | 54,80 | 0,68 | |
| 9 | 61,69 | 0,66 | |
| 10 | 61,40 | 0,66 | |
| 11 | 62,24 | 0,67 | |
| 12 | 65,02 | 0,69 | |
| 13 | 65,91 | 0,71 | |
| 14 | 57,86 | 0,73 | |
| 15 | 65,10 | 0,80 | |
| 16 | 63,14 | 0,77 | |
| 17 | 65,91 | 0,79 | |
| 18 | 67,42 | 0,84 | |
| 19 | 67,75 | 0,75 | |
| 20 | 58,59 | 0,62 | |
| 21 | 64,77 | 0,71 | |
| 22 | 57,09 | 0,72 | |
| 23 | 53,47 | 0,57 | |
| 24 | 50,92 | 0,54 | |
| 25 | 47,50 | 0,54 | |
| 26 | 50,63 | 0,63 | |
| 27 | 54,15 | 0,58 | |
| 28 | 54,68 | 0,55 | |
| 29 | 59,82 | 0,59 | |
| 30 | 62,30 | 0,55 | |

Agosto-99

| Dia | t/h | IQ | Comentários |
|-----|-------|------|-------------|
| 1 | 62,89 | 0,61 | |
| 2 | 58,05 | 0,64 | |
| 3 | 58,48 | 0,66 | |
| 4 | 56,80 | 0,68 | |
| 5 | 64,09 | 0,67 | |
| 6 | 60,14 | 0,64 | |
| 7 | 68,10 | 0,64 | |
| 8 | 70,91 | 0,61 | |
| 9 | 68,74 | 0,61 | |
| 10 | 61,69 | 0,57 | |
| 11 | 61,87 | 0,68 | |
| 12 | 67,15 | 0,68 | |
| 13 | 71,69 | 0,71 | |
| 14 | 74,96 | 0,73 | |
| 15 | 78,11 | 0,73 | |
| 16 | 77,95 | 0,73 | |
| 17 | 73,13 | 0,69 | |
| 18 | 67,23 | 0,61 | |
| 19 | 60,52 | 0,67 | |
| 20 | 64,07 | 0,70 | |
| 21 | 66,08 | 0,71 | |
| 22 | 68,55 | 0,72 | |
| 23 | 74,00 | 0,72 | |
| 24 | 66,00 | 0,70 | |
| 25 | 67,31 | 0,75 | |
| 26 | 72,39 | 0,69 | |
| 27 | 72,01 | 0,68 | |
| 28 | 74,22 | 0,68 | |
| 29 | 72,74 | 0,67 | |
| 30 | 75,44 | 0,67 | |