

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo



ISSN 0104-0553

BT/PMI/159

**Previsão de Desempenho do
Circuito de Moagem SAG da MSF a
Partir do Índice de Quebra**

Fernando Karam Delbim
Homero Delboni Junior

São Paulo - 2002

O presente trabalho é parte da dissertação de mestrado apresentada por Fernando Karam Delbim, sob a orientação do Prof. Dr. Homero Delboni Junior: "Previsão do Circuito de Moagem SAG da MSF a Partir do Índice de Quebra", defendida em 20/12/01, na EPUSP.

A íntegra da dissertação encontra-se à disposição dos interessados com o autor e na Biblioteca do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da USP.

FICHA CATALOGRÁFICA

Delbim, Fernando Karam

Previsão de desempenho do circuito de moagem SAG da MSF a partir do índice de quebra / F.K.Delbim, H. Delboni Júnior. – São Paulo : EPUSP, 2002.

31 p. – (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Minas, BT/PMI/159)

1. Moagem de minérios I. Delboni Júnior, Homero II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas III. Título IV. Série

ISSN 0104-0553

CDU 622.73



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Boletim Técnico

Previsão de Desempenho do Circuito de Moagem SAG
da MSF a partir do Índice de Quebra

Fernando Karam Delbim

Dezembro 2001

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma técnica de previsão de desempenho de moinhos SAG baseada na caracterização tecnológica do minério processado.

O estudo foi motivado frente à variação de desempenho observada em um circuito industrial de moagem SAG, constatada por vazões de alimentação média inferiores à capacidade nominal da instalação. Tentativas de emprego de técnicas consolidadas de previsão de desempenho como o WI de Bond para moinhos de bola, mostraram-se inadequados ao caso do circuito investigado.

A viabilidade da técnica proposta para estabelecer previsões do circuito industrial de moagem SAG estudado foi comprovada a partir de correlações entre o Índice de Quebra combinado com a granulação de alimentação nova do circuito e vazões mássicas de alimentação. Análises estatísticas comprovaram a consistência do método proposto.

Tal técnica estabelece as bases de uma abordagem para planejamento e integração do empreendimento mineiro como um todo, uma vez que possibilita estimar o desempenho de blocos de lavra no moinho SAG, sendo portanto um recurso para planejamento de lavra em função do desempenho do minério desmontado.

ABSTRACT

This project presents the development of a performance prediction technique applied to SAG mills based on the technologic ore processed characterization.

This study has been moved in face of the variation of observed performance of a industrial SAG grinding circuit, stated by inferior average thoughtputs compared to the nominal installation capacity. Attempts on the usage of consolidated techniques of performance prediction like Bond's WI for ball mills, showed to be inappropriate to the case of the investigated circuit.

The proposed technique viability to establish predictions on the industrial SAG grinding circuit studied was proved from correlations between the Breakage Index combined with new feed size distribution and feed thoughtputs. Statistics analyses have proved the consistency of the proposed method.

This technique has established the basis of an approach toward planning an integration of a mining enterprise as a whole, once it permits to estimate the performance of mine blocks at the SAG mill, being therefore a resource for planning the mine starting from the blasted ore performance.

1 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo principal analisar a viabilidade técnica do emprego do índice de quebra para estabelecer previsões de desempenho de circuitos industriais de moagem autógena (AG) e semi-autógena (SAG).

A metodologia proposta consiste em definir um parâmetro de caracterização aos diversos tipos de minério que ocorrem em uma determinada jazida que permita avaliar os correspondentes desempenhos em circuitos de moagem frente as alterações das características do corpo de minério.

Para tanto, o trabalho analisou a viabilidade técnica do emprego do Índice de quebra (IQ).

O objetivo final é viabilizar o ajuste das condições operacionais do circuito de moagem, auxiliando o planejamento de lavra e definindo estratégias de blendagem. Dessa forma fica estabelecida uma técnica para integrar as operações de lavra e tratamento para circuitos de moagem AG/SAG, já que outros índices, como o WI, não são aplicáveis em tais situações.

2 INTRODUÇÃO

O presente trabalho justifica-se por fornecer à indústria mineral brasileira uma técnica que torna mais abrangente a caracterização tecnológica de minérios, de forma a simular circuitos industriais e respectivos desempenhos frente a mudanças no processo, seja na fase de projeto ou de otimização de processos existentes.

Através deste trabalho pretende-se estabelecer e disponibilizar as bases de uma metodologia que envolva o desenvolvimento da parametrização da relação entre características tecnológicas de um minério e o desempenho deste frente a cominuição, em particular nas operações de moagens AG/SAG.

O estudo ora descrito foi motivado frente à variação de desempenho observado no circuito de moagem da Mineração Serra da Fortaleza- MSF, constatada por vazões de alimentação média inferiores à capacidade nominal da instalação. A divergência observada passou a ser investigada através das diversas variáveis intervenientes no processo, de forma a quantificar seus efeitos de forma individual e combinada no sistema.

A investigação foi dirigida, principalmente, às características divergentes entre os tipos de minérios presentes na alimentação do circuito, bem como as principais variáveis do sistema, processo, técnicas operacionais e circuitos empregados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Integração do Empreendimento Mineiro

O conceito de melhorias incrementais ou contínuas tem feito parte da filosofia de operação de inúmeros empreendimentos mineiros.

Em várias ocasiões, os processos minerais individuais foram melhorados com a aplicação de novas técnicas, equipamentos ou mudanças em práticas operacionais. Um desafio mais amplo, alvo de explorações recentes, envolve a otimização das operações de lavra e beneficiamento como um único sistema. Desse modo, seria possível melhorar a eficiência dos sistemas de lavra e beneficiamento estendendo-se o foco dos processos individuais incluindo-os em uma cadeia de processos que comporiam um sistema unificado mina-usina.

Variações nos teores da alimentação da usina, diluição, distribuição granulométrica têm efeitos significativos na vazão de alimentação e recuperações na planta de beneficiamento. Investigar, identificar e quantificar esses impactos é um grande passo para a otimização global do empreendimento, desde o modelo de blocos até o concentrado final.

Dentro de tal contexto, a abordagem de integração do empreendimento mineiro ou, *Mine-to-Mill*, é assim chamada por considerar as etapas de lavra e tratamento indissociáveis e interdependentes.

3.2 A Cominuição em um Contexto de Operação de Lavra

O “Julius Kruttschmitt Mineral Research Centre”- JKMRC tem atuado nas áreas de desmonte por explosivos por 20 anos e na área de cominuição por 35 anos. Entretanto, somente nos últimos anos tem considerado as melhorias potenciais de produtividade devido à integração entre a lavra e o beneficiamento (McKee e Kojovic, 1997).

São muitas as dependências possíveis entre a produção da lavra e o beneficiamento. Considerando somente a cominuição, alguns trabalhos têm sido publicados pela equipe técnica do JKMRC que a relacionam com a fragmentação de lavra e as operações subsequentes, com grande redução nos custos de escavação e britagem.

3.2.1 Fragmentação na lavra e subsequente desempenho na cominuição

Há um consenso de que a distribuição granulométrica do minério, após a britagem primária, varia frequentemente e a vazão de alimentação da britagem está ligada à fragmentação proveniente da lavra. A extensão desta dependência não está adequadamente quantificada, mas dois efeitos têm sido estabelecidos.

O primeiro é que a detonação influencia a distribuição granulométrica do material fragmentado (Kleine, Cocker e Kavetsky, 1990). No desmonte, aumentos no

espaçamento resultam em uma fragmentação mais grosseira, produzindo uma distribuição granulométrica com aspecto bi-modal. Essas mudanças na alimentação da britagem primária são refletidas no seu produto.

O segundo efeito diz respeito à dependência entre a vazão de alimentação de moinhos AG/SAG e a distribuição granulométrica da alimentação (Morrell et al, 1994). Esta dependência entre granulometria e vazão da alimentação na moagem AG/SAG é complexa. Por exemplo, para uma moagem SAG com carga de bolas superior a 6% em volume, a vazão de alimentação ótima é associada com distribuições mais finas com P_{80} de 50 a 60 mm, enquanto que em uma operação de moagem AG esta vazão de alimentação é aumentada com alimentações mais grossas, com P_{80} na faixa de 120 a 160 mm. Essas relações estão ligadas à disponibilidade de corpos moedores em moinhos AG e bolas em moinhos SAG, com energia suficiente para que a fragmentação ocorra.

3.2.2 Modelos de balanço populacional

Os principais modelos empregados na área de cominuição são aqueles que atribuem aos fenômenos envolvidos (fragmentação, transporte, seleção, etc). parâmetros simplificadores em simples equações de conservação de massa (Delboni Jr., 1999).

Esses modelos, chamados comumente de modelos de balanço populacionais, tratam a operação de moagem como o resultado de dois processos independentes e simultâneos. No primeiro processo, uma parte da carga sofre redução de tamanho resultando em uma nova distribuição granulométrica e, no segundo, outra parte da carga passa diretamente ao produto gerado.

Entre tais modelos de balanço populacional, destacam-se os modelos matricial e cinético. O modelo matricial considera a cominuição como uma sucessão de eventos de quebra, na qual a alimentação de cada evento é o produto do evento precedente. Já no modelo cinético, a cominuição é considerada como um processo contínuo, incorporando a dependência entre as variáveis de processo e o tempo.

Há ainda um terceiro modelo, o *perfect mixing*, ou misturador perfeito, que combina a simplicidade e facilidades de cálculo da abordagem matricial e a solução temporal do modelo cinético. Este modelo pode ser utilizado tanto em regime dinâmico ou estacionário (Lynch, 1977).

Tais modelos baseiam-se em três conceitos principais: a probabilidade de quebra, a distribuição de tamanhos característica após o evento de quebra e movimento diferencial das partículas dentro do equipamento.

3.2.3 Modelo de desempenho de moinhos AG/SAG

O modelo que considera moinhos AG/SAG e moinhos de bolas como um misturador perfeito em estado estacionário foi proposto por Leung (1987 apud

Delboni Jr.,1999), que parametrizou as variáveis contidas neste modelo. Este modelo é regido por duas equações básicas, abaixo descritas.

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

e

$$p_i = d_i s_i \quad (2)$$

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 à quebra
- 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, a partir de campanhas de 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 0,25 mm, 4,0 mm, 16 mm, 44 mm e 128 mm. A Figura 1 apresenta, em forma de gráfico, um exemplo qualitativo da função taxa de quebra obtida a partir de dados de operação de moinhos AG/SAG.

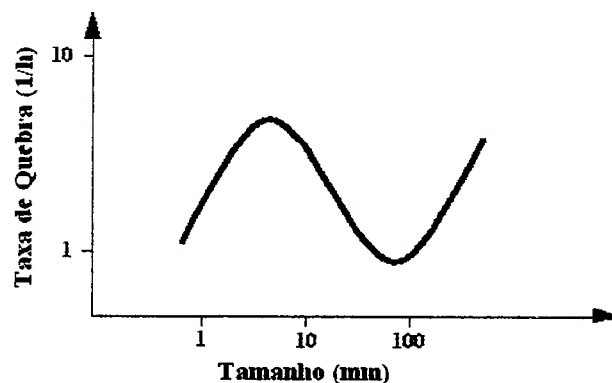


Figura 1: Exemplo da função taxa de quebra calculada para moinhos AG/SAG (apud Delboni Jr., 1998)

A variável a_{ij} representa a fração retida na malha j proveniente da malha i , após um evento de quebra. O conjunto de valores desta variável é calculado a partir dos ensaios de caracterização do minério, que utilizam mecanismos de quebra por impacto e abrasão.

A segunda equação, que provém do fato da simulação ser considerada estacionária, 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.

A calibração do modelo é executada pelo ajuste da função taxa de quebra, de forma a minimizar os erros entre os valores estimados e os obtidos experimentalmente. É comum o uso de rotinas de minimização de erros baseado no método de mínimos quadrados.

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 quebra não é parametrizada a partir de ensaios 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 na distribuição granulométrica da sua alimentação, assim como das características do minério alimentado.

3.2.4 Limitações do WI para moinhos AG/SAG

O WI 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 AG/SAG.

O WI é obtido a partir de um ensaio executado sob condições padronizadas, segundo as quais todo o material na alimentação passa na malha 3,36 mm, tamanho típico da alimentação de um moinho de bolas, substancialmente menor que a alimentação de moinhos AG/SAG, nos quais o *top size* pode chegar até 0,254 m (Napier-Munn, 1996c).

Essa diferença substancial nas distribuições granulométricas de alimentação entre o ensaio proposto por Bond e a utilizada em moinhos SAG, causa de desvios no emprego do WI para estes moinhos, já que 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.

Outro fator de desvio decorre dos mecanismos de quebra presentes no ensaio de Bond e aqueles observados em moagens AG/SAG nas quais o minério também possui o papel de corpo moedor.

Assim, em moinhos AG/SAG ocorrem três mecanismos de fragmentação, quais sejam, impacto, atrição e abrasão, conforme comentados a seguir.

- **IMPACTO:** A partícula impactante move-se obliquamente ao plano de contato, não estando em contato constante com a partícula impactada
- **ATRIÇÃO:** A partícula de menores dimensões relativas é presa entre duas partículas muito maiores e quebra-se por ação da força exercida
- **ABRASÃO:** Fenômeno de fragmentação da superfície que é resultante do movimento entre duas partículas paralelo ao plano de contato

Em moinhos em que os corpos moedores são exclusivamente barras ou bolas, a quebra se dá basicamente pela atrição 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 mesmo não ocorre em moinhos AG/SAG, nos quais a abrasão desempenha um papel importante no processo de quebra.

Outro fator de desvio está ligado à uma das premissas do método de Bond, que considera as curvas de distribuições granulométricas da alimentação e produto como paralelas entre si. Esta premissa é aplicável a moinhos de barras e, parcialmente a moinhos de bolas, já que nestes equipamentos há um forte efeito de classificação da alimentação. Em moinhos AG/SAG a descarga não é paralela a alimentação, sendo necessária a adoção de parâmetros mais adequados (Napier-Munn, 1996c).

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 seja 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 se misturar 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 causa desvios maiores com o emprego do WI. Estudos mais detalhados sobre o material blendado tornam-se necessário. A dificuldade desse tipo de estudo aumenta exponencialmente com o número de tipos de minérios a serem blendados. Assim, para uma operação que trabalha com dois tipos de rochas diferentes é relativamente simples o estudo da variação do WI com a blendagem, mas para situações em que haja quatro ou cinco tipos, a análise torna-se muito mais complexa.

3.3 Procedimentos de Caracterização quanto a Fragmentação do JKMRC

Os modelos de equipamentos de cominuição desenvolvidos pelo JKMRC apresentam uma separação fundamental entre as características físicas de fragmentação de minérios e os mecanismos de fragmentação atuantes em equipamentos de cominuição. Esses mecanismos, conforme mostrados anteriormente são basicamente três que, dependendo do tipo de equipamento envolvido e condições de operação, ocorrerão sob intensidades e frequências próprias (Napier-Munn, 1996a).

O tratamento matemático de circuitos de cominuição é obtido pela parametrização dos mecanismos físicos envolvidos no processo, assim como na caracterização tecnológica do minério processado. É portanto, fundamental o estabelecimento de ensaios de caracterização tecnológica específicos, dos quais derivem informações completas que possam ser empregadas em modelos matemáticos de uma ampla gama de equipamentos de processo.

As informações necessárias à maioria dos modelos de cominuição são traduzidas pela parametrização da relação entre a energia aplicada e a fragmentação resultante. Contrariamente aos métodos energéticos, Bond incluso, trata-se de estabelecer com estas parametrizações as características de fragmentação das partículas de minérios, frente a um amplo espectro de energia específica.

A metodologia adotada pelo JKMRC, empregada em diversos países do mundo, incorpora equipamentos especiais para a execução de ensaios de caracterização. Tais equipamentos seguiram uma evolução contínua, dentro de um período de 25 anos, percorrendo um longo caminho entre o Duplo-Pêndulo para o *Drop Weight Tester*– DWT.

3.3.1 *Drop Weight Tester- DWT*

Uma das limitações do Duplo-Pêndulo é a impossibilidade de nele se conduzir ensaios segundo elevados valores de energia específica para fragmentos grossos, maiores do que 25 mm. Apesar de não ser relevante na modelagem de moinhos de bolas ou de barras, esta limitação acaba restringindo significativamente a caracterização de materiais a serem processados em britadores ou moinhos AG/SAG. Visando superar esse problema, foi desenvolvido no JKMRC o DWT. Neste equipamento é possível ensaiar fragmentos com tamanhos de até 100 mm sob níveis de energia compatíveis com os equipamentos a serem utilizados.

Atualmente, o DWT é o equipamento de referência para a caracterização tecnológica de minérios quanto à cominuição, não só pelo JKMRC, mas por uma série de outros grupos de pesquisa na área de modelagem matemática de processos. Um equipamento DWT encontra-se instalado nas dependências do LSC/PMI/EPUSP- Laboratório de Simulação e Controle do Departamento de Engenharia de Minas da EPUSP.

3.4 Descrição do DWT

O equipamento consiste de uma plataforma metálica apoiada sobre uma base de concreto. Sobre a plataforma metálica há uma base cilíndrica metálica dotada de duas guias laterais, na qual prende-se um cilindro que abriga massas de chumbo. A altura da qual a base iniciará a queda e a massa a ela fixada, determinarão o valor da energia potencial do choque com o fragmento disposto sobre a plataforma inferior (bigorna). Nesse equipamento considera-se que toda a energia cinética no momento do choque é transferida para o fragmento a ser ensaiado. A Figura 2 a seguir mostra o equipamento DWT que se encontra nas dependências do LSC/PMI/EPUSP.

O minério selecionado é então submetido a uma série de ensaios envolvendo fragmentos de diversos tamanhos e valores de energias específicas aplicadas. Após a execução dos ensaios de fragmentação, os lotes de partículas são peneirados, de forma a se determinar as curvas de distribuição granulométrica resultantes.

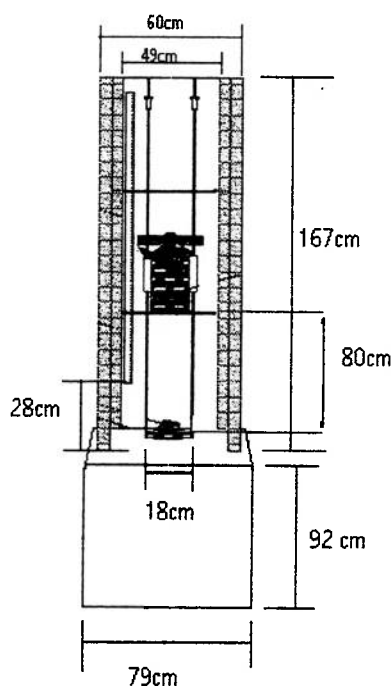


Figura 2: Equipamento DWT

3.5 Procedimentos do Ensaio

Os ensaios no DWT são realizados em condições padronizadas que envolvem cinco frações granulométricas submetidas a três níveis de energia cada. O nível de energia aplicado a cada fragmento é obtido através de uma combinação entre a massa e a altura de queda do cilindro. A massa de impacto pode variar de 2,737 kg a 50 kg, por meio da utilização de diferentes bases de impacto e discos de chumbo acoplados a essas bases.

Com relação a granulometria, o procedimento padrão do DWT estabelece que sejam submetidos a impacto fragmentos em cada uma das seguintes faixas granulométricas: 63,0 x 53,0 mm; 45,0 x 37,5 mm; 31,5 x 26,5 mm; 22,4 x 19,0 mm; 16,0 x 13,2 mm

A partir de cada classe granulométrica são preparados 3 lotes compostos por 30 fragmentos cada e estes submetidos a impactos com energia específica em 0,25, 1 e 2,5 kWh/t. As partículas são assim impactadas individual e separadamente. O material fragmentado proveniente de cada lote de 30 fragmentos é então reunido e encaminhado ao peneiramento, do qual se obtém parâmetros selecionados de distribuição granulométrica.

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

$$E_{cs} = \frac{0,0272 M_d (H_i - H_f)}{m} \quad (3)$$

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 = altura final de queda (cm)

3.6 Tratamento de Dados do DWT

A distribuição granulométrica do produto dos ensaios é caracterizada por um parâmetro, denominado t_{10} , que representa a porcentagem em massa passante pela malha igual a 1/10 do tamanho original do fragmento.

Os 15 pares de valores de energia específica (5 frações granulométricas sob 3 níveis de energia) consumida na fragmentação – denominado E_{cs} (kWh/t)– e o parâmetro t_{10} são então assimilados à seguinte equação paramétrica do processo:

$$t_{10} = A \left(1 - e^{-b E_{cs}} \right) \quad (4)$$

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 . Na prática, isto significa que o processo de fragmentação não mais ocorre a partir de um certo valor de energia aplicada às partículas. Este comportamento é mostrado na Figura 3 que se segue.

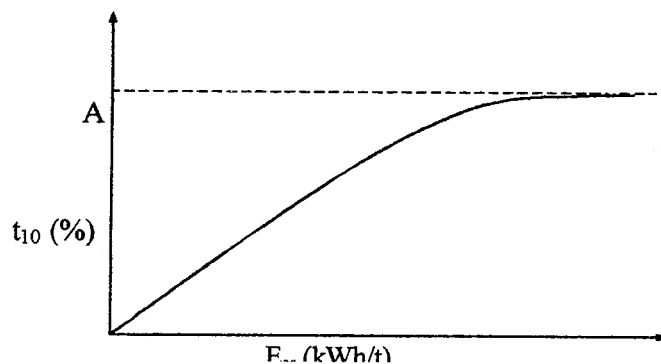


Figura 3: Representação da relação energia/fragmentação a partir de ensaios sobre amostras de minérios

Os parâmetros A e b são característicos de cada amostra de minério ensaiada. O produto de A por b , ou parâmetro de impacto Axb , é considerado um parâmetro

característico de resistência à quebra por impacto da rocha. Quanto maior o valor de A_{xb} menos resistente ao impacto é o material.

3.7 Definição do Índice de Quebra- IQ

O ensaio de caracterização à cominuição descrito nos itens anteriores encontra-se plenamente consolidado quanto ao seu emprego em modelos de equipamentos de cominuição. Entretanto as massas envolvidas neste tipo de ensaio constitui-se em um fator limitante ao seu emprego.

Modificações nesse método de ensaio, utilizando menores quantidades de amostra, foram propostas por Chierigati (2001) em um método denominado de Ensaio Sintético. A principal diferença do Ensaio Sintético com relação ao ensaio consolidado é que tal ensaio é realizado a partir de fragmentos provenientes de uma única faixa granulométrica, compreendida entre 22,4 e 19,0 mm, e não mais a partir de 5 faixas.

A partir desta classe granulométrica única preparam-se 3 lotes compostos por 30 fragmentos. Cada um dos 3 lotes de cada amostra são submetidos a impactos com diferentes energias específicas entre si: 0,25, 1,0 e 2,5 kWh/t. As partículas são assim impactadas individual e separadamente (Chierigati, 2001).

O material fragmentado proveniente de cada lote de 30 fragmentos é então reunido e encaminhado ao peneiramento, do qual se obtém-se o parâmetro t_{10} , a porcentagem passante na malha igual a um-décimo do tamanho original do fragmento, selecionado da distribuição granulométrica.

A partir dos resultados dos ensaios de DWT são realizados cálculos de regressão para se determinar os coeficientes A e b da equação (15), que parametriza a relação entre Energia e Quebra.

Para efeitos de simplificação dos cálculos o parâmetro A pode ser considerado como sendo um valor fixo, sendo o parâmetro b calculado por decorrência desta consideração.

Conforme discussão apresentada no item 3.6, A_{xb} é por si só uma indicação da resistência à quebra do minério. Dessa forma, fixando-se o valor do parâmetro A, o índice de resistência à quebra por impacto pode ser reduzido simplesmente ao parâmetro b de cada tipo minério.

Definiu-se neste trabalho que, nas situações do Ensaio Sintético em que o parâmetro A é mantido fixo, o parâmetro b é denominado de Índice de Quebra (IQ).

Nessa situação, o IQ é traduzido pelo parâmetro b de cada amostra obtida pelo ensaio. Assim, o valor do IQ para uma dada amostra é obtido pela média aritmética dos valores do parâmetro b calculados através dos 3 pares de energia específica e t_{10} .

4 MINERAÇÃO SERRA DA FORTALEZA

O método descrito neste trabalho foi aplicado a uma operação industrial de mineração, com o objetivo de desenvolver técnicas específicas, estabelecer domínio de aplicação e fatores limitantes.

A operação selecionada foi a Mineração Serra da Fortaleza- MSF, pertencente ao grupo Rio Tinto Brasil, que explora minério de níquel a partir de uma jazida localizada próxima a cidade de Fortaleza de Minas, MG.

A MSF, 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 empreendimento inclui operações de lavra e concentração de um corpo de minério sulfetado de níquel, cobre e cobalto, incluindo também a metalurgia extrativa.

A lavra foi realizada a céu aberto durante os primeiros 3 anos da exploração, com uma gradual passagem para o método subterrâneo a partir do terceiro ano, o que permitirá a recuperação de 95,4% das reservas geológicas de níquel ao final do empreendimento e obtenção de um minério com teor médio de 1,65% de níquel, considerando-se a diluição da lavra (MSF, 1996).

A vazão de alimentação nominal da usina de beneficiamento foi fixada em 500.000 t/ano (70 t/h), resultando na produção de aproximadamente 150.000 t/ano de concentrado com teor médio de 7,2% de níquel. Por meio da metalurgia deste concentrado são produzidas cerca de 21.800 t/ano de *matte* granulado do forno *flash* e do forno elétrico, ou 12.000 t/ano de níquel contido considerando-se um teor médio de 61% de níquel (MSF, 1996).

Os gases provenientes da metalurgia são transferidos para uma unidade de fabricação de ácido sulfúrico, com capacidade de produção de 100.000 t/ano.

4.1 Geologia

A jazida, localizada a aproximadamente 6 km a sudoeste da cidade de Fortaleza de Minas (MG), é constituída por mineralizações de níquel, cobre e cobalto, hospedadas ao longo do contato de serpentinito (meta-olivina peridotito) e metachert. Estratigraficamente, a jazida está inserida na unidade Morro do Níquel, da Sequência Morro do Ferro, de tipo *Greenstone Belt*, na faixa Fortaleza de Minas.

A assembléia mineralógica do minério é constituída por pirrotita-pentlandita-calcopirita com presença significativa de cobaltita e de minerais do grupo da platina, apresentando bravoíta-violarita como principal mineral secundário na zona de alteração supérgena. A heterogeneidade e progressividade da deformação possibilitou o desenvolvimento de quatro tipos distintos de minério com relação a teores e

desempenho metalúrgico no processo de concentração, como mostra a Tabela 1 abaixo.

Tabela 1: Informações históricas da MSF sobre os tipos de minério

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

4.2 Vazão de Alimentação e Produção

O cenário de produção que se apresentava na MSF em junho de 1999 era de estrangulamento da produção. O processo de cominuição constituía o gargalo do empreendimento.

Havia ampla variação de desempenho no circuito de moagem da MSF, resultando em vazões de alimentação médias inferiores à nominal, acarretando em dois problemas principais:

- Menor produção de concentrado final e, conseqüentemente, menor quantidade de níquel, diminuindo a receita.
- Problemas de controle e operacionalidade do processo em si, determinados por condições de operação totalmente diferentes das projetadas.

O moinho SAG constituía-se no fator limitante para atingir a capacidade nominal do circuito.

Historicamente, a previsão da vazão de alimentação na MSF era estabelecida, tal como em circuitos clássicos de moagem barras/bolas, a partir do WI, por tipo minério. No entanto, não se verificavam na MSF correlações aceitáveis entre o WI previsto e a vazão de alimentação do circuito. Nesse contexto, um minério alimentado com WI ponderado baixo, deveria resultar em uma vazão de alimentação alta, o que não se constatava. Em outras situações, minérios com WI elevados, portanto extremamente resistentes, resultavam em altas vazões de alimentação, não

correspondendo ao desempenho previsto. Assim, ficou constatado que o WI não se constituía em parâmetro útil ao planejamento das operações da MSF.

A Figura 4 abaixo ilustra a dificuldade que existia em utilizar o WI ponderado em função dos tipos de minério, como parâmetro de estimação de desempenho do moinho SAG.

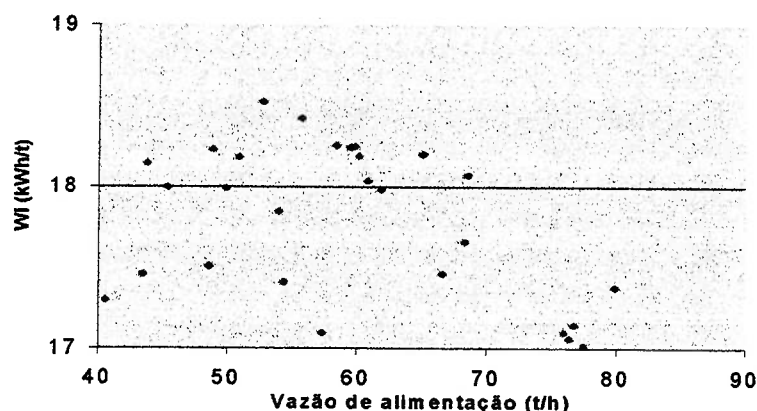


Figura 4: Vazão de alimentação do moinho SAG *versus* WI

5 RESULTADOS OBTIDOS

Face à inadequação do emprego do WI como parâmetro característico do minério, decidiu-se empregar o IQ para este fim.

Os principais tipos de minério da MSF foram submetidos a ensaios de caracterização quanto à cominuição, segundo o método descrito no capítulo **Erro! A origem da referência não foi encontrada..** O sumário dos resultados é apresentado na Tabela 2 que se segue:

Tabela 2: Valores de IQ obtidos a partir de amostras da MSF

Amostra	IQ
Brechóide Alterado	1,41
Brechóide	0,62
Stringer no Chert	0,44
Disseminado	0,28
Intersticial	0,61

A caracterização dos 5 tipos principais de minérios da jazida da MSF através do IQ possibilitou a obtenção do IQ da composição dos tipos de minério alimentado no circuito de moagem mediante o cálculo do valor ponderado do IQ de cada minério

em função das quantidades relativas em volume, definidas pelo modelo geológico de blocos.

Para efeitos de estimação do IQ do minério alimentado no moinho SAG, foi adotado o procedimento de cálculo com base na ponderação dos IQ individuais. .

5.1 Metodologia de Utilização do IQ

O IQ é uma propriedade característica do tipo de minério. Embora o objetivo principal do trabalho seja desenvolver e validar o emprego do IQ como recurso de caracterização do minério à cominuição e estimador do desempenho do circuito de cominuição, sua utilização não se restringe a este escopo.

No caso da MSF, a partir do modelo geológico da jazida foi possível inferir os valores do IQ aos blocos de lavra. Dessa forma, o planejamento de lavra do empreendimento possui a distribuição de cada tipo de minério de um determinado bloco da lavra.

A cada fogo na mina a céu aberto, é possível atribuírem-se valores de partição do material desmontado em função de cada tipo de minério e estéril. A presença do geólogo de campo nessas situações é importante para validar os valores indicados pelo modelo.

A partir desses valores e dos IQ's individuais calcula-se o IQ do fogo mediante média ponderada pela distribuição de cada tipo mineral no material desmontado. Desse modo, a cada fogo é associado um valor de IQ.

Os fogos são dispostos em pilhas no pátio de estocagem onde uma pá-carregadeira alimenta o britador primário, blendando as pilhas. 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.

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

As ponderações foram realizadas em bases volumétrica e estas igualadas a partições em massa, uma vez que foram desconsiderados os efeitos de densidades e empolamentos diferentes para cada tipo de minério.

Com a finalidade de se obter uma correlação entre a vazão de alimentação e o IQ, os valores médios diários desses parâmetros foram plotados para o ano de 1999. Os resultados obtidos são mostrados nos gráficos contidos na Figura 5 até a Figura 8 a seguir.

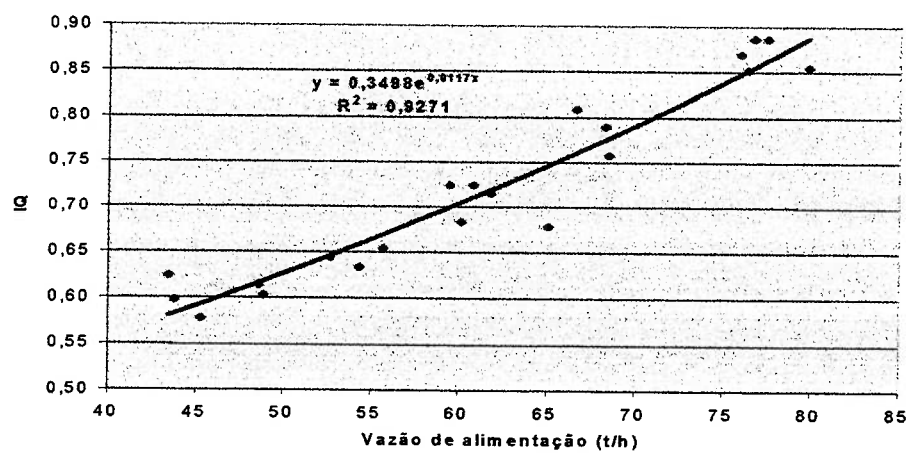


Figura 5: Correlação entre vazão de alimentação do circuito SAG e IQ, referente a maio de 1999

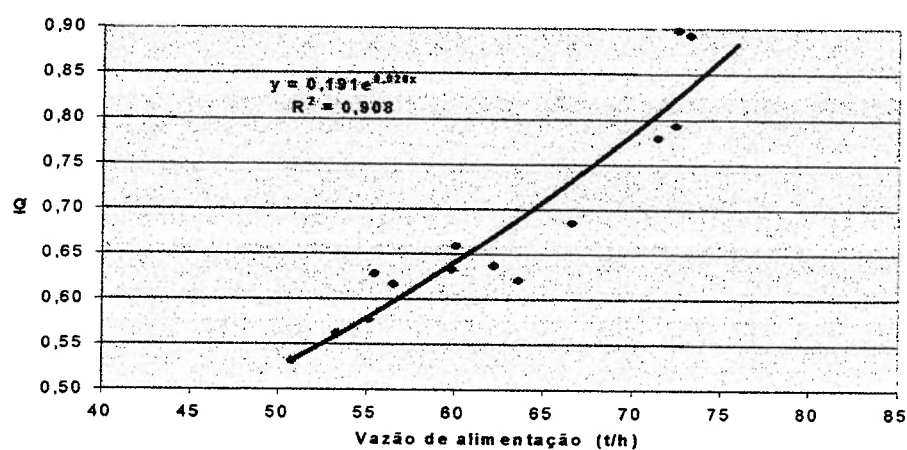


Figura 6: Correlação entre vazão de alimentação do circuito SAG e IQ, referente a junho de 1999

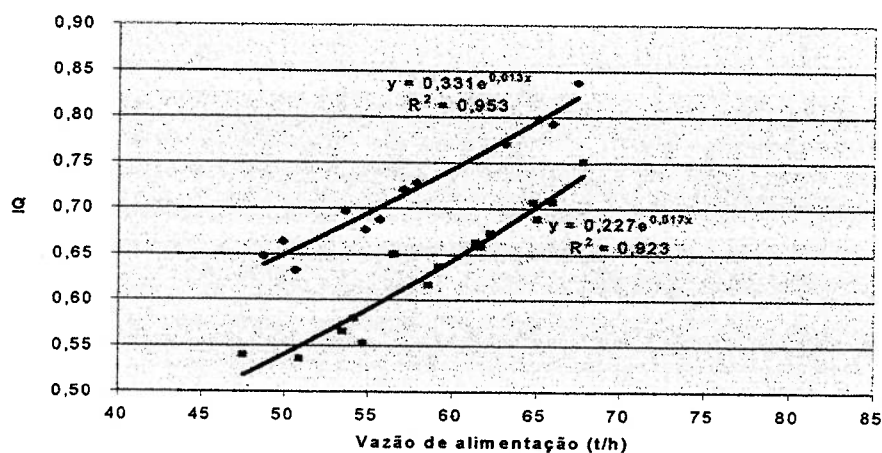


Figura 7: Correlação entre vazão de alimentação do circuito SAG e IQ, referente a julho de 1999

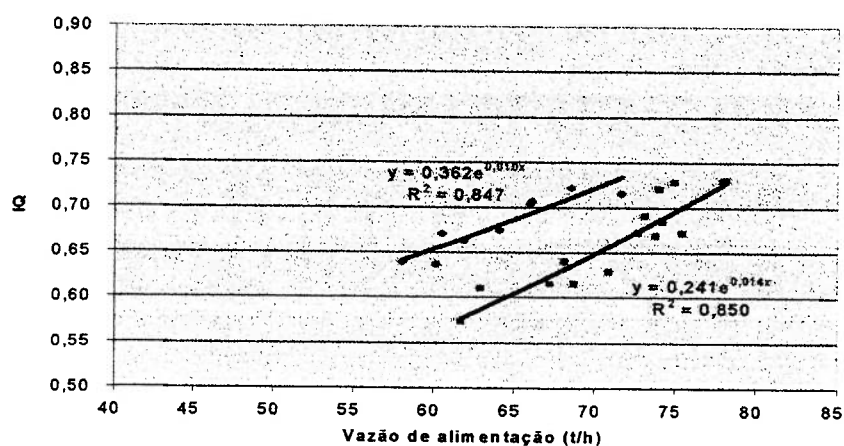


Figura 8: Correlação entre vazão de alimentação do circuito SAG e IQ, referente a agosto de 1999

5.2 Correlação do IQ com a Vazão de Alimentação

Para cada conjunto de valores foi realizada a regressão entre as variáveis e calculado o índice de correlação de Pearson (R^2). A equação de regressão obtida e o respectivo R^2 foram impressos em cada gráfico.

O índice R^2 mostrado em cada figura é uma medida da dispersão dos pontos utilizados para a aproximação da curva calculada, a correlação é tanto melhor quanto mais próximo o valor de R^2 estiver de 1.

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 promissores, portanto, para uma primeira abordagem.

Considerando-se que nenhum tratamento prévio foi feito, os valores obtidos foram considerados muito bons, demonstrando o potencial do IQ em constituir-se em um índice aplicável à previsão do desempenho do moinho SAG da MSF.

Nos meses de julho e agosto, respectivamente a Figura 7 e Figura 8, os dados foram discretizados em duas regiões distintas. Cada região correspondeu, conforme considerações que se seguem, a modos distintos de operação do moinho.

Apesar das regressões feitas sobre cada mês apresentarem valores aceitáveis de índice de correlação, a regressão realizada sobre o conjunto de todos os meses apresentou um valor de R^2 significativamente inferior, da ordem de 0,45. Novamente, pontos representativos de diferentes condições de operação do circuito, seriam a explicação para a dispersão desses resultados, ainda que o circuito estivesse operando sobre o mesmo modo SAG.

Decidiu-se assim analisar em detalhe os dados de operação diária do circuito contidos nas planilhas de operação da MSF em relação às seguintes variáveis de operação do moinho SAG:

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

Após ensaios preliminares de sensibilidade entre a relação entre a vazão de alimentação e o IQ, 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.

As análises conduzidas indicaram três fatores que determinam a granulometria da alimentação do circuito de moagem SAG da MSF, que foram:

- 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 terceiro relaciona-se com o modo de alimentação da pilha.

Esse aumento da granulação ocorre uma vez que trata-se de uma pilha pulmão cônica, na qual existe uma forte tendência de acúmulo de material grosseiro nas regiões periféricas, ou a saia da pilha. Uma condição básica de operação de pilhas cônicas é de que o nível da mesma esteja sempre alto. Com base nessas informações foram estabelecidos três conjuntos de modos de operação do britador e da forma de alimentação. A Tabela 3 apresenta as combinações acima descritas.

Tabela 3: Características dos grupos de correlação

Grupo	Granulometria de Alimentação do Moinho SAG	Estado de Desgaste das Mandíbulas		Estado da Pilha
1	grossa	muito	gastas	Baixa
2	média	média	gasto médio	Baixa/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 minério na alimentação ou problemas de quebra de equipamentos, as três regressões obtidas revelaram índices de correlação ainda maiores, conforme mostra a Figura 9, que se segue.

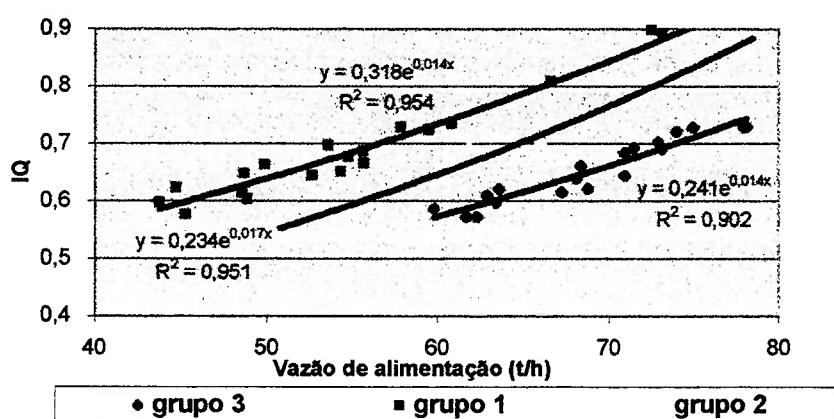


Figura 9: Correlação entre vazão de alimentação do circuito e IQ, em grupos corrigidos de 1999

As equações 16, 17 e 18 reescritas a seguir, aparecem no gráfico da Figura 9, e correlacionam a vazão de alimentação com o IQ para cada um dos três grupos

$$\text{Grupo 1: } IQ = 0,318 e^{0,014 TPH} \quad (5)$$

$$\text{Grupo 2: } IQ = 0,234 e^{0,017 TPH} \quad (6)$$

$$\text{Grupo 3: } IQ = 0,241 e^{0,014 TPH} \quad (7)$$

Onde:

TPH = Vazão de alimentação do moinho SAG (t/h).

Esses grupos correspondem a diferentes granulometrias da alimentação, conforme descritos na Tabela 3.

Assim, o modelo de previsão de desempenho do moinho SAG da MSF a partir do IQ e da granulação da alimentação do circuito primário de moagem é definido pelas equações 5, 6 e 7.

6 VALIDAÇÃO DO MÉTODO

6.1 Aderência do Modelo Proposto

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

Estes testes foram realizados a partir de um banco de dados formado independente daquele empregado para a confecção do modelo, sendo previamente separado e não incluso em quaisquer correlações do modelo proposto.

Foi realizada uma análise estatística de erros sobre os dados, tendo como base o erro experimental do IQ obtido a partir do ensaio no DWT. Chierigati (2001) estimou o erro associado ao ensaio através de 4 repetições do ensaio sobre as mesmas condições para uma dada amostra de granito. O erro associado ao ensaio no DWT, tal como realizado no LSC/PMI/EPUSP, possui o valor numérico de 6% do valor original do parâmetro b, que neste trabalho é numericamente igual ao IQ.

As vazões de alimentação foram recalculadas, atribuindo-se a cada valor de IQ o valor do erro experimental de 6%, de modo a avaliar o efeito da variação do IQ no modelo. Os valores observados, os obtidos pelo modelo e aqueles resultantes das variações do IQ são apresentados na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4: Vazões de alimentação observadas, calculadas e sensibilidade ao erro experimental

Dados observados		Cálculo modelo	Cenário 1: Variação negativa do IQ (-6%)			Cenário 2: Variação positiva do IQ (+6%)		
Vazão de alimentação (t/h)	IQ	Vazão de alimentação (t/h)	IQ	Vazão de alimentação (t/h)	Erro (%)	IQ	Vazão de alimentação (t/h)	Erro (%)
65,1	0,80	66,0	0,76	62,3	-4,42	0,84	69,5	6,38
63,1	0,77	63,5	0,73	59,9	-5,46	0,81	67,1	5,85
65,9	0,79	65,6	0,75	59,9	-9,93	0,83	69,1	4,59
67,4	0,84	69,5	0,80	65,8	-2,39	0,88	73,0	7,69
57,1	0,72	58,7	0,68	55,0	-3,77	0,76	62,2	8,23
50,6	0,63	49,4	0,60	45,7	-10,80	0,66	52,9	4,28
56,8	0,68	55,2	0,65	50,9	-11,52	0,72	58,1	2,29
67,7	0,75	67,0	0,71	65,9	-2,75	0,79	71,8	5,69
58,6	0,62	57,3	0,59	54,3	-7,90	0,65	60,2	2,68
64,8	0,71	65,3	0,67	62,3	-3,99	0,74	68,2	5,02
53,5	0,57	52,2	0,54	49,2	-8,74	0,59	55,1	2,92
50,9	0,54	49,0	0,51	45,9	-10,81	0,56	51,9	1,81
47,5	0,54	49,4	0,51	46,4	-2,38	0,57	52,3	9,18
54,1	0,58	53,6	0,55	50,6	-6,98	0,61	56,5	4,20
58,0	0,64	59,4	0,61	56,4	-2,98	0,67	62,3	6,78
64,1	0,67	62,6	0,64	59,6	-7,60	0,71	65,5	2,10
60,1	0,64	59,2	0,60	56,1	-7,11	0,67	62,0	3,08
Média (%)	-		-	-	-6,44	-	-	4,87

Nota-se na Tabela 4, que para o Cenário 1, no qual o valor observado de IQ foi acrescido do erro admitido, a média dos erros obtidos foi de -6,44%. Para o Cenário 2 a média obtida para os erros foi de 4,87%. Para efeitos da análise estatística, sendo a variação para os 2 cenários próximas em módulo, é possível admitir que o erro médio do modelo frente a um erro de 6% do parâmetro IQ foi de $\pm$

5%, valor este calculado pela média aritmética dos valores em módulo. O gráfico de mostrado na Figura 10 apresenta a aderência entre a vazões de alimentação calculadas pelo modelo de previsão de desempenho e aquelas observadas, incluindo-se os erros associados a cada valor calculado.

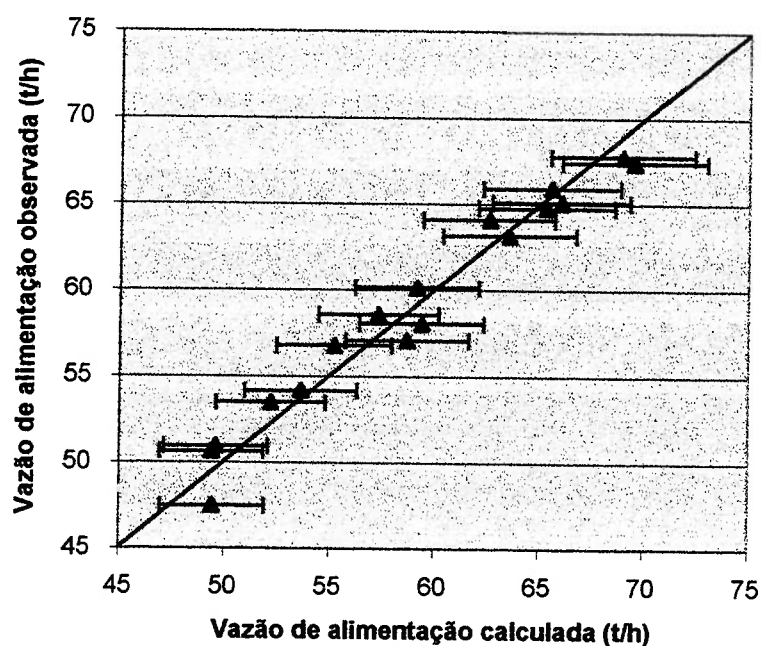


Figura 10: Aderência do modelo proposto

6.1.1 Testes estatísticos

foi realizada com o auxílio de programas computacionais de análise de dados, sendo os resultados estatísticos do teste de t-student apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Teste de t-student

	Valor
Hipótese da diferença de média	0
Grau de confiança	95%
Probabilidade de calculado = observado	97,72%
t_0	0,1236
$t_{\text{crítico}}$	2,1098

6.2 Simulações

Foram realizadas simulações utilizando-se o modelo de previsão de desempenho do moinho SAG visando validá-lo como um recurso potencial a ser incorporado em modelos preexistentes de simulação de circuitos de cominuição.

As simulações visaram analisar o comportamento do modelo computacional proposto por Leung com a utilização de vazões de alimentação provenientes do modelo de previsão de desempenho proposto na seção 5.2.

Foi utilizado um circuito que consistia do moinho SAG trabalhando em circuito fechado com uma peneira com tela de abertura de 12 mm e um britador de reciclo, reproduzindo portanto a da condição de operação que se apresentava no circuito primário de moagem da MSF no ano de 1999. O modelo do moinho SAG empregado foi previamente ajustado e calibrado para realizar as simulações. As taxas de quebra do modelo calibrado encontram-se na Tabela 6 a seguir.

Tabela 6: Taxas de quebra do modelo calibrado do moinho SAG da MSF

Nó	Tamanho (mm)	Taxa de Quebra (1/h)
1	0,25	2,46
2	4,00	2,90
3	16,0	1,40
4	44,8	2,70
5	128	4,20

A base de dados utilizada foi referente ao o mês de Agosto de 1999, da qual excluiu-se os dias em que a alimentação foi limitada, em função de fatores externos ao circuito de moagem, como sobrecarga do circuito de flotação, entre outros.

As vazões de alimentação utilizadas foram calculadas a partir do modelo proposto para a previsão de desempenho. A equação do modelo utilizada foi a (6) referente ao grupo 2, exceto em casos em que havia alguma indicação de mudança na abertura do britador primário, passando então a utilizar-se a equação (7) referente ao Grupo 3 . Ambas equações são reescritas a seguir.

$$\text{Grupo 2: } IQ = 0,234e^{0,017TPH} \quad (6)$$

$$\text{Grupo 3: } IQ = 0,241 e^{0,014 TPH} \quad (7)$$

A Tabela 7 mostra quais foram as características operacionais do modelo usado nas simulações, bem como se os parâmetros listados foram variáveis ou não. As demais condições foram mantidas fixas, por falta de melhores informações.

Tabela 7: Parâmetros operacionais do caso Base do modelo do circuito de moagem primário da MSF

Parâmetro		Valor	Parâmetro Variável ? (sim/ não)
Vazão de alimentação (t/h)		70	Sim
Porcentagem de sólidos (%)		65	Não
IQ		1,02	Sim
Velocidade de rotação do moinho (% crítica)		68	Sim
Carga de bolas (% volume interno do moinho)		12	Não
Diâmetro das bolas novas adicionadas ao moinho (mm)		125	Não
APF do britador de reciclo (mm)		6,5	Não
Granulometria de Alimentação Circuito (mm)	P ₈₀	102	Sim
	P ₅₀	70	Sim
	P ₂₀	37	Sim

A distribuição granulométrica da alimentação do circuito de moagem primário foi adotada de modo a representar uma distribuição granulométrica relativa ao valor de APF nominal do britador primário, que era encontrado na ocasião do trabalho. Por coerência ao modelo de desempenho e por falta de dados consolidados, a granulometria foi mantida constante em cada grupo. A distribuição granulométrica do grupo 2 foi obtida a partir de manuais do fabricante do britador primário para uma APF de 102 mm, sendo considerada a curva granulométrica de alimentação utilizada no Caso Base.

Para efeitos deste estudo admitiu-se, por falta de melhores informações, que o P₈₀ da distribuição granulométrica do Grupo 3 fosse 5 mm inferior ao correspondente da granulometria do Grupo 2. Como a alimentação do circuito de moagem provém de uma etapa de britagem, é possível estipular que as curvas granulométricas dos produtos gerados são paralelas, para diferentes aberturas. Isso se deve ao fato de equipamentos como britadores de mandíbula possuírem uma forte tendência de seleção. Assim, a distribuição granulométrica do Grupo 3 foi considerada paralela à curva do Grupo 2, transladada em de 5 mm no valor do P₈₀.

As demais variáveis foram obtidas através dos registros históricos diários de dados operacionais contidos nas planilhas da MSF.

A variável selecionada para a validação do modelo de previsão de desempenho foi a potência consumida pelo moinho SAG através da comparação entre os valores observados, obtidos das planilhas de operação, e os valores calculados através do modelo de previsão de potência de Morrell. Para efeito das simulações foi empregado o programa JKSimmnet. A seleção da potência consumida pelo motor do moinho SAG como variável característica do moinho utilizada para comparação entre os dados experimentais e simulados deveu-se à qualidade dos dados experimentais. O registro de potência consumida pelo motor do moinho SAG é determinada com precisão e registrada a cada hora, 24 horas por dia.

6.2.1 Resultados da análise de sensibilidade do programa de simulação aos erros das variáveis

Com base nos erros admitidos para cada uma dos parâmetros operacionais selecionados, descritos nas seções anteriores, foram executadas simulações de operação do moinho SAG da MSF. Assim, cada variável foi alterada dentro da faixa de erro estabelecida, mantendo-se constante as demais variáveis consideradas. Os valores de potência obtidos a partir das simulações foram comparados com o valor do Caso Base, ou seja, 700 kW. A Tabela 8 a seguir mostra as variações no valor da potência obtidas a partir das simulações.

Tabela 8: Resultados das simulações do modelo de previsão de potência em função dos erros dos parâmetros operacionais

Potência do Moinho SAG					
Variável	Erro associado à Variável	Variação Positiva do Parâmetro Simulado		Variação Negativa do Parâmetro Simulado	
		(kW)	(%)	(kW)	(%)
Vazão de alimentação	5%	713	2	690	-1
Velocidade de rotação do moinho	0,50%	706	1	694	-1
Granulação	12 mm (ao P ₈₀)	745	6	660	-6
Carga de bolas	1%	721	3	686	-3
IQ	6%	697	-0,4	703	0,4
Efeito Combinado-Granulometria + Carga de Bolas	-	753	7	644	-8

A variação da potência devida ao erro do modelo de previsão de desempenho, expresso pela vazão de alimentação é cerca de 1%, pequena portanto. Este é um ponto favorável à utilização do modelo de desempenho no programa de simulação empregado, já que o erro intrínseco associado à metodologia de previsão da vazão de alimentação não influencia significativamente no valor da potência consumida, se comparado com outras variáveis como a granulometria de alimentação, por exemplo.

Os resultados obtidos das simulações, bem como os erros associados a cada valor calculado, são apresentados sob a forma de gráfico dos valores observados e calculados de potência consumida pelo motor do moinho SAG, como mostra a Figura 11.

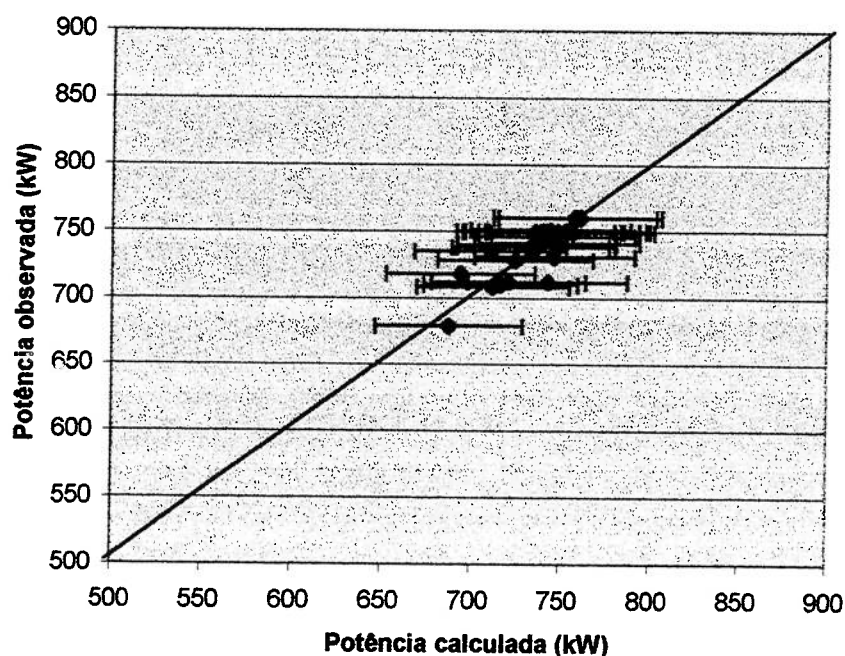


Figura 11: Gráfico de aderência entre a potência consumida no moinho SAG e a calculada pelo modelo de previsão de desempenho

A faixa de erro utilizado no gráfico da Figura 11, referentes aos valores calculados, corresponde ao erro médio obtido para a variação em simulações sobre o efeito combinado da granulometria e da carga de bolas do moinho. Através da análise da Tabela 8, nota-se que o erro calculado nas simulações de efeito combinado das variáveis (7%) possui um valor diferente da soma dos valores individualizados, quais sejam, 6% para a granulação da alimentação e 3% para a carga de bolas. Houve portanto um efeito interativo entre elas no modelo utilizado.

A análise quantitativa dos resultados obtidos foi conduzida com base em critérios estatísticos. Assim, analogamente ao que foi feito no item 6.1, foi realizado

um teste de t-student para analisar a consistência dos dados experimentais. Os resultados são apresentados na Tabela 9 a seguir.

Tabela 9: Teste de t-student para dados de potência observada e simulada

	Potência (kW)	
	Observada	Calculada
Média	736	736
Variância	343	397
Desvio padrão	19	20
Grau de confiança	95%	
Probabilidade de observado = calculado	86,9%	
t_0	0,5214	
t crítico	2,0687	

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A viabilidade técnica da utilização do IQ para estabelecer previsões de desempenho de circuitos industriais de moagem SAG foi comprovada a partir do emprego desta prática na análise de desempenho do circuito de moagem primária da MSF.

As correlações entre o IQ ponderado da alimentação do moinho SAG e a vazão de alimentação registrada pela operação da MSF, indicaram resultados mais consistentes do que os obtidos com o uso do método de Bond.

Estudos complementares sobre períodos longos de operação permitiram hierarquizar as variáveis de operação em função de sua influência no desempenho do moinho SAG da MSF, definindo a granulação do minério da alimentação nova do moinho como a de maior influência.

Utilizando a potência consumida pelo moinho SAG como valor de comparação entre os dados observados e simulados demonstrou-se a validade deste modelo para fins de integração das operações de lavra e tratamento, comprovada através de análises estatísticas sobre os dados e proximidade dos valores obtidos

As análises estatísticas executadas comprovaram quantitativamente as correlações entre a vazão de alimentação do moinho SAG e a combinação do IQ ponderado com estimativas da granulação da alimentação do moinho.

O método desenvolvido serve de base para a integração das operações de lavra e tratamento para circuitos de moagem SAG, já que através da integração do IQ com o modelo de operação do moinho SAG é possível planejar a lavra e definir estratégias de blendagem em busca do melhor ajuste das condições operacionais do circuito de cominuição.

Assim, através da atribuição de valores do IQ ponderado aos blocos de lavra é possível estimar o desempenho do bloco considerado no circuito de moagem. A integração dos vários blocos de lavra em um modelo dos mesmos permitiria planejar e integrar a operação de lavra com a de tratamento de forma a atender os objetivos propostos.

O acompanhamento sistemático da granulometria de alimentação do circuito de moagem da MSF, através da abertura do britador primário e controle do nível da pilha cônica de alimentação, permitirá um refinamento do método proposto.

Por fim, o método proposto não se restringe à operação estudada e, mediante adaptações referentes às peculiaridades de cada operação, pode ser empregado em circuitos similares.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUSTIN, L. G; KLIMPEL, R. R. Theory of grinding operations. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 56, p. 18-29, 1964.

BERALDO, J. L. **Moagem de minérios em moinhos tubulares**. São Paulo: Edgard Blücher, 1987. Cap. 2, p. 10-14: Teoria sobre processo de cominuição.

BOND, F.C. The third theory of comminution. **Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers**, v. 193, p. 484-94, 1952.

CHIEREGATI, A.C. **Novo método de caracterização tecnológica para cominuição de minérios** 2001. 149p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo, São Paulo.

COSTA NETO, P. C. O. **Estatística**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. Cap. 5, p. 84-130: Testes de hipótese.

DELBONI JUNIOR, H. **Otimização do circuito de moagem da MSF**. Fortaleza de Minas: MSF, [1998]. (Relatório Interno) *

DELBONI JUNIOR., H. **A load-interactive model of autogenous and semi-autogenous mills**. 1999. 415p. Thesis (Philosophy Doctor) - University of Queensland, Brisbane.

FONSECA, J. S., MARTINS, G. A. e TOLEDO, G. L. **Estatística aplicada**. São Paulo: Atlas, 1995. Cap 1, p 11-72: Correlação na amostra.

KLEINE, T. H., COCKER, A. e KAVETSKY, A. The development and implementation of a three dimensional model of blast fragmentation and damage, In: 3rd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting Melbourne, 1990. /**Proceedings**/ Melbourne: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1990 p. 181-88.

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.

LYNCH, A. J. **Mineral crushing and grinding circuits - Their simulation, optimization and control**. Amsterdam: Elsevier, 1977.

LYNCH, A. J.; NARAYANAN, S. S. Simulation – the design tool for the future. In: NATO ADVANCED STUDY INSTITUTE ON MINERAL PROCESSING AT A CROSSROADS – Problems and prospects, Falmouth, 1986. **Mineral processing at a crossroads – problems and prospects: proceedings**. Dordrecht: Nijhoff, 1986. p. 89-116.

* Documento acessível mediante autorização da Empresa.

- LO, Y.C. Increasing autogenous and semi-autogenous mill capacity through grinding process optimization. In: KAWATRA, S. K. (Ed.). **Comminution practices**. Littleton: SME, 1997. cap. 20, p. 147-153.
- McKEE, D. J.; SCOTT, A. The inter-dependance of mining and mineral beneficiation processes on the performance of mining projects. In: The AusIMM ANNUAL CONFERENCE, Darwin, 1994. [s.L.]: [s.n.], [1994]. p. 303-8.
- McKEE, D. J., KOJOVIC, T. Comminution in a mining context: KAWATRA, S. K. (Ed.). **Comminution practices**. Littleton: SME, 1997. cap. 34, p. 271-78.
- MORELL, S. et al Modelling and simulation of large diameter autogenous and semi autogenous mills In: 8th European Comminution Symposium, Stockholm, 1994 /Proceedings/
- MSF- MINERAÇÃO SERRA DA FORTALEZA LTDA. **Descrição do empreendimento da MSF**. Fortaleza de Minas: MSF, [199?]. (Relatório Interno) *
- NAPIER-MUNN, T. J. et al. **Mineral cominution circuits: their operation and optimisation**. Indoorroopilly: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre/University of Queensland, 1996a. Cap. 4, p.63-87: Rock Testing- Determining the Material-Specific Breakage Function. (JKMRC Monograph Series in Mining and Mineral Processing)
- NAPIER-MUNN, T. J. et al. **Mineral cominution circuits: their operation and optimisation**. Indoorroopilly: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre/University of Queensland, 1996b. Cap. 9, p.209-11: Ball Mills. (JKMRC Monograph Series in Mining and Mineral Processing)
- NAPIER-MUNN, T. J. et al. **Mineral cominution circuits: their operation and optimisation**. Indoorroopilly: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre/University of Queensland, 1996c. Cap. 11, p.247-72: The prediction of power draw in crushers and tumbling mills. (JKMRC Monograph Series in Mining and Mineral Processing)
- O'BRYAN, K. L., WIPF, E. H., Comminution alternatives to SAG mills. In: KAWATRA, S. K. (Ed.). **Comminution practices**. Littleton: SME, 1997. cap. 24, p. 180-86.
- 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)
- SANTOS, M. **Modelo estrutural da jazida de O'Toole, Fortaleza de Minas (MG)**. 1996. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual de São Paulo, Rio Claro. /Resumo/. Disponível em: <http://www.igce.unesp.br/igce/geologia/gr-m33.html>. Acesso em: 24 jun.2001

* Documento acessível mediante autorização da Empresa.

BOLETINS TÉCNICOS - TEXTOS PUBLICADOS

- BT/PMI/001 - Características Geométricas da Escavação Mecânica em Mineração: Exemplo de Escavadora de Caçamba de Arraste - ANTONIO STELLIN JUNIOR
- BT/PMI/002 - Prospecção Geoquímica Experimental na Ocorrência de Ouro Tapera Grande - PAULO BELJAVSKIS, HELMUT BORN
- BT/PMI/003 - Estudo de Processo de Dupla Flotação visando o Beneficiamento do Minério Carbonático de Fosfato de Jacupiranga - JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/004 - Desenvolvimento de um Equipamento Não-Convencional em Beneficiamento Mineral: A Célula Serrana de Flotação Pneumática - RICARDO NEVES DE OLIVEIRA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/005 - Ajuste de Modelos Empíricos de Operação de Ciclones - HOMERO DELBONI JUNIOR, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/006 - Contribuição ao Estudo dos Explosivos Permissíveis - AMILTON DOS SANTOS ALMEIDA, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/007 - Contribuição ao Dimensionamento de Pilares em Minas Subterrâneas de Manganês - LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA, ANTONIO STELLIN JUNIOR
- BT/PMI/008 - Exploração Mineral: Conceitos e Papel do Estado - LUIZ AUGUSTO MILANI MARTINS, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/009 - Otimização do Projeto de Pátios de Homogeneização através do Método da Simulação Condicional - FLAVIO MOREIRA FERREIRA, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/010 - Considerações Gerais sobre Desmonte de Rocha: Análise de Custo - Índice de Produtividade e Otimização da Malha de Perfuração - MARCO ANTONIO REZENDE SILVA, FERNANDO AMOS SIRIANI
- BT/PMI/011 - Aglomeração de Rejeitos de Fabricação de Brita para sua Reciclagem - ARTHUR PINTO CHAVES, BRADDLEY PAUL
- BT/PMI/012 - Método de Dimensionamento de Peneiras para a Classificação Granulométrica de Rochas ou Minérios - FERNANDO AMOS SIRIANI
- BT/PMI/013 - Processo de Beneficiamento para Obtenção de uma Carga Mineral Nobre a partir do Fosfogesso - WALTER VALERY JUNIOR, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/014 - Estudo da Carboxi-Metil-Celulose como Aglomerante para Pelotização - JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/015 - A Influência do Amido de Milho na Eficiência de Separação Apatita/Minerais de Ganga Via Processo Serrana - LAURINDO DE SALLES LEAL FILHO, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/016 - Beneficiamento de Criolita Natural - Estado da Arte - HENRIQUE KAHN, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/017 - Estudo da Variação do Índice Energético Específico - W_i , segundo a Granulometria do Ensaio, Obtida através de um Moinho de Bolas Padrão, em Circuito Fechado - MARIO SHIRO YAMAMOTO, FERNANDO AMOS SIRIANI
- BT/PMI/018 - Fluorita - FERNANDO FUJIMURA, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/019 - O Aproveitamento de Recursos Minerais: Uma Proposta de Abordagem a Nível Nacional - CELSO PINTO FERRAZ, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/020 - Comparação de duas Metodologias - A de Bieniawski e a de Panek, para Dimensionamento de Tirantes em Galerias Subterrâneas de Seção Retangular em Camadas Estratificadas - NESTOR KENJI YOSHIKAWA, LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA
- BT/PMI/021 - Caracterização de Maciços Rochosos através de Envolvimentos de Resistência por Tratamento Estatístico utilizando Dados de Laboratório do IPT Simulando Condições Geotécnicas do Maciço - NESTOR KENJI YOSHIKAWA, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/022 - Avaliação de Impactos Ambientais na Mineração de Combustíveis Fósseis Sólidos - GILDA CARNEIRO FERREIRA, ANTONIO STELLIN JUNIOR
- BT/PMI/023 - O Lado Nocivo do Elemento Quartzo no Desgaste Abrasivo de Mandíbula de Britadores - FERNANDO FUJIMURA
- BT/PMI/024 - Conceitos Básicos de Iluminação de Minas Subterrâneas - SÉRGIO MEDICI DE ESTON, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/025 - Sistema Computadorizado para Ajuste de Balanço de Massas e Metalúrgico - ANTONIO CARLOS NUNES, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/026 - Caracterização Mineralógica/Tecnológica das Apatitas de alguns Depósitos Brasileiros de Fosfato - SARA LAIS RAHAL LENHARO, HELMUT BORN
- BT/PMI/027 - Classificação de Maciços quanto à Escarificabilidade - GUILHERME DE REZENDE TAMMERIK, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO, LINDOLFO SOARES

- BT/PMI/028 - Análise Comparativa de Métodos de Amostragem de Depósitos Auríferos - FÁBIO AUGUSTO DA SILVA
SALVADOR, HELMUT BORN
- BT/PMI/029 - Avaliação da Qualidade de Corpos Moedores para o Minério Fosfático de Tapira - MG - GERALDO DA SILVA
MAIA, JOSÉ RENATO B. DE LIMA
- BT/PMI/030 - Contribuição ao Estudo da Cominação Inicial à Partir da Malha de Perfuração - MARCO ANTONIO REZENDE
SILVA, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/031 - Análises Químicas na Engenharia Mineral - GIULIANA RATTI, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/032 - Usos Industriais da Atapulga de Guadalupe (PI) - SALVADOR LUIZ MATOS DE ALMEIDA, ARTHUR PINTO
CHAVES
- BT/PMI/033 - Minerais Associados às Apatitas: Análise de sua Influência na Produção de Ácido Fosfórico e Fertilizantes
Fosfatados - ROBERTO MATTIOLI SILVA, ANTÔNIO EDUARDO CLARK PERES
- BT/PMI/034 - Beneficiamento dos Caulins do Rio Capim e do Jari - ADÃO BENVINDO DA LUZ, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/035 - Dimensionamento de Suportes em Vias Subterrâneas - LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA, WILDOR
THEODORO HENNIES
- BT/PMI/036 - Estudos da Modelagem Matemática da Moagem com Seixos para Talco de Diversas Procedências - MARIO
VALENTE POSSA, JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA
- BT/PMI/037 - Mecânica de Rochas Aplicada ao Dimensionamento do Sistema de Atirantamento em Minas Subterrâneas -
LEONCIO TEÓFILO CARNERO CARNERO
- BT/PMI/038 - Geometria de Minas a Céu Aberto: Fator Crítico de Sucesso da Indústria Mineral - FÁBIO JOSÉ PRATI,
ANTÔNIO JOSÉ NAGLE
- BT/PMI/039 - Substituição do Aço por Polímero e Compósitos na Indústria Automobilística do Brasil: Determinantes e
Consequências para o Mercado de Minério de Ferro - WILSON TRIGUEIRO DE SOUSA, EDUARDO
CAMILHER DAMASCENO, ANTONIO JOSÉ NAGLE
- BT/PMI/040 - Aplicação de uma Metodologia que Simule em Moinho de Laboratório Operações Contínuas de Moagem com
Seixos para Talco - REGINA COELI CASSERES CARRISSO, JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA
- BT/PMI/041 - A Indústria Extrativa de Rochas Ornamentais no Ceará - FRANCISCO WILSON HOLLANDA VIDAL, ANTONIO
STELLIN JÚNIOR
- BT/PMI/042 - A Produção de Fosfato no Brasil: Uma Apreciação Histórica das Condicionantes Envolvidas - GILDO DE A. DE
SÁ C. DE ALBUQUERQUE, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/043 - Flotação em Coluna - Estado de Arte - JULIO CESAR GUEDES CORREIA, LAURINDO SALIES LEAL FILHO
- BT/PMI/044 - Purificação de Talco do Paraná por Flotação e Alveamento Químico - IVAN FALCÃO PONTES, LAURINDO
SALLES LEAL FILHO
- BT/PMI/045 - Pequena Empresa - A Base para o Desenvolvimento da Mineração - GILSON EZEQUIEL FERREIRA,
EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/046 - Máquinas de Flotação - ROGÉRIO CONTATO GUIMARÃES, ANTÔNIO EDUARDO CLARK PERES
- BT/PMI/047 - Aspectos Tecnológicos do Beneficiamento do Carvão de Candiota (RS) - ANTONIO RODRIGUES DE
CAMPOS, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/048 - Efeito das Dimensões de Provetas no Dimensionamento de Espessadores - ELDON AZEVEDO MASINI,
ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/049 - Água no Processamento Mineral - RODICA MARIA TEODORESCU SCARLAT, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/050 - Drenagens Ácidas do Estéril Piiritoso da Mina de Urânio de Poços de Caldas: Interpretação e Implicações
Ambientais - VICENTE PAULO DE SOUZA, LUIS ENRIQUE SÁNCHEZ
- BT/PMI/051 - "Caracterização Tecnológica de Minérios Auríferos. Um Estudo de Caso: O Minério Primário da Jazida de
Salamangone, AP." - MARIA MANUELA MAIA LÉ TASSINARI, HENRIQUE KAHN
- BT/PMI/052 - Ensino de Engenharia de Minas - WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/053 - Redistribuição de Tensões e Desenvolvimento da Zona Clástica em Túneis Circulares - FERNANDO
FUJIMURA
- BT/PMI/054 - Projeto de Barragem para Reservação de Mistos de Minerais Pesados Rejeitados pelo Beneficiamento de
Cassiterita na Mina do Pitinga - MARCELO PIMENTEL DE CARVALHO, EDER DE SILVIO, LINDOLFO DE
SILVIO
- BT/PMI/055 - A Segurança e a Organização do Trabalho em uma Mineração Subterrânea de Carvão da Região de Criciúma -
Santa Catarina - DORIVAL BARREIROS, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/056 - Diagnóstico de Lixiviação para Minérios de Ouro - VANESSA DE MACEDO TORRES, ARTHUR PINTO
CHAVES
- BT/PMI/057 - O Estado da Arte em Tratamento de Minérios de Ouro - RONALDO DE MOREIRA HORTA, ARTHUR PINTO
CHAVES

- BT/PMI/058 - Vias Subterrâneas em Rocha - Escavação por Explosivos - WILDOR THEODORO HENNIES, LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA
- BT/PMI/059 - Aumento da Seletividade na Separação da Fluorita/Calcita/Barita/Apatita por Flotação. Jazida de Mato Preto - PR - MONICA SPECK CASSOLA, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMC/060 - Desenvolvimento de Processo para Extração de Gálio do Licor de Bayer por Resinas de Troca-Iônica de Poli (Acrilamidoxima) - WALDEMARAVRITSCHER, LAURINDODESALLES LEALFILHO
- BT/PMI/061 - Estudo de Aspectos Geomecânicos Aplicados ao Projeto de Minas Subterrâneas - EDUARDO CÉSAR SANSONE, LINEU A. AYRES DA SILVA
- BT/PMI/062 - Avaliação da Recuperação de Áreas Degradadas por Mineração na Região Metropolitana de São Paulo - OMAR YAZBEK BITAR, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/063 - Avaliação Técnica dos Processos de Cianetação/Adsorção da Mina de Fazenda Brasileiro - ÁUREA MARIA DIAS, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/064 - A Nova Configuração da Indústria de Fertilizantes Fosfatados no Brasil - YARA KULAIF, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/065 - Estudos de Flotação em Coluna com Finos de Fosfato da Ultrafertil em Escala Piloto - JOSÉ PEDRO DO NASCIMENTO, LAURINDO DE SALLES LEAL FILHO
- BT/PMI/066 - Flotação da Apatita da Jazida de Tapira - MG - LUIZ A. F. BARROS, LAURINDO DE SALLES LEAL FILHO - LUIZ A. F. BARROS, LAURINDO DE SALLES LEAL FILHO
- BT/PMI/067 - Minerais Industriais: Conceituação, Importância e Inserção na Economia - FRANCISCO REGO CHAVES FERNANDES, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/068 - Atividades Micro-Sísmicas e a Ruptura de Rochas - FERNANDO FUJIMURA
- BT/PMI/069 - Metodologia para Caracterização Tecnológica de Matérias Primas Minerais - LÍLIA MASCARENHAS SANT'AGOSTINO, HENRIQUE KAHN
- BT/PMI/070 - Aplicação de Modelos Numéricos ao Projeto de Escavação por Explosivos de Túneis e Galerias - LUIZ CARLOS RUSILO, LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA
- BT/PMI/071 - O Estado da Arte da Cianetação de Minérios Auríferos - ROBERTO GOULART MADEIRA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/072 - Revisão da Indústria Mineral de Titânio - ANTÔNIO HELENO DE OLIVEIRA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/073 - Sistematização de Casos de Instabilidades em Encostas Rochosas no Município de Santos, Através de Nova Metodologia de Avaliação de Estabilidade - NESTOR KENJI YOSHIKAWA, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/074 - A Minerio-Metalurgia e suas Ligações com a Geologia e suas Engenharias de Minas, Metalúrgica e Química - RICARDO ALVARES DE CAMPOS CORDEIRO, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/075 - A Redução da Umidade de Minérios de Ferro com o Emprego de Microondas - FERNANDO LEOPOLDO VON KRÜGER, ANTÔNIO EDUARDO CLARK PERES
- BT/PMI/076 - Estimativa de Parâmetros do Modelo Cinético de Moagem - CLÁUDIO FERNANDES, ANTÔNIO EDUARDO CLARK PERES
- BT/PMC/077 - A Bauxita e a Indústria do Alumínio - JOSÉ CRUZ DO CARMO FLÔRES, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMC/078 - Técnicas de Tratamento de Minérios para Reciclagem de Vidro - CLEUSA CRISTINA BUENO MARTHA DE SOUZA, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/079 - Comparação entre Cylpebs e Bolas na Moagem Secundária da Samarco Mineração - JOAQUIM DONIZETTI DONDA, ANTONIO EDUARDO CLARK PERES
- BT/PMI/080 - Calcários Dolomíticos da Região de Ouro Preto para usos na Metalurgia e como Rochas Ornamentais - MARCÍLIO DIAS DE CARVALHO, PAULO ROBERTO GOMES BRANDÃO
- BT/PMI/081 - Estudo de Reoxidação e Redução de Ferro Contido em Caulins - ADÃO BENVINDO DA LUZ, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/082 - Recuperação do Gálio Existente no Licor de Bayer de Poços de Caldas por Flotação Iônica: Estudo dos Coletores - ANA MARGARIDA MALHEIRO SANSÃO, LAURINDO DE SALLES LEAL
- BT/PMI/083 - Contribuição ao Conhecimento de Argilas de Cuba - GUILLERMO RUPERTO MARTÍN CORTÉS, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/084 - Determinação da Rugosidade da Superfície de Descontinuidades Rochosas - JOSÉ MARGARIDA DA SILVA, LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA
- BT/PMI/085 - Serragens de Granitos para Fins Ornamentais - ANTONIO STELLIN JR
- BT/PMI/086 - Evolução Magmática e Modelo Metalogenético dos Granitos Mineralizados da Região de Pitinga, Amazonas, Brasil - SARA LAIS RAHAL LENHARO, HELMUT BORN

- BT/PMI/087 – Considerações sobre o Dimensionamento de Equipamentos de Carga e Transporte em Mineração a Céu Aberto – IESO DO COUTO COUTINHO, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO, GIORGIO FRANCESCO CESARE DE TOMI
- BT/PMI/088 – Tratamento do Minério de Transição de Cobre e Ouro de Igarapé Bahia, Carajás, PA – DACILDO RODRIGUES DE SOUZA, PAULO ROBERTO GOMES BRANDÃO
- BT/PMI/089 – Variáveis que Interferem nos Problemas Ambientais Gerados Durante os Desmontes de Rochas – VALDIR COSTA E SILVA, LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA
- BT/PMI/090 – Caracterização Mineralógica do Minério de Cobre e Ouro Secundário de Igarapé Bahia – LUIS RODRIGUES ARMÔA GARCIA, PAULO ROBERTO GOMES BRANDÃO
- BT/PMI/091 – O Topázio na Região de Ouro Preto: Minas do Vermelhão e Capão do Lana – JAIR MAZON JÚNIOR, HELMUT BORN
- BT/PMI/092 – A Mineralização Aurífera de Fazenda Brasileiro – BA Aspectos Geológicos e Planejamento de Lavra – MARCO ANTONIO DE MORAES SILVA, HELMUT BORN
- BT/PMI/093 – Estudo dos Mecanismos de Adsorção em Meio Ácido dos Metais Chumbo e Zinco em uma Turfa de Jaconé – RJ – MARIA DIONÍSIA COSTA DOS SANTOS, LAURINDO DE SALLES LEAL
- BT/PMI/094 – Cartografia de Riscos Geológicos Associados a Escorregamentos no Município de Embu – RMSP – CÉLIA MARIA GARIBLADI, LINDOLFO SOARES
- BT/PMI/095 – Revisão da Teoria para Projeto de Taludes Heterogêneos em Minas a Céu Aberto – FLÁVIO MOREIRA FERREIRA, LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA
- BT/PMI/096 – Estratégias para Remediação de um Sítio Contaminada por Metais Pesados: Estudo de Caso – JOSÉ ÂNGELO SEBASTIÃO ARAUJO DOS ANJOS, LUIS ENRIQUE SÁNCHEZ
- BT/PMI/097 – Estudo dos Elementos Abrasivos de Fios Diamantados para a Lavra de Granitos do Ceará – FRANCISCO WILSON HOLLANDA VIDAL, ANTONIO STELLIN JÚNIOR
- BT/PMI/098 – Caracterização Mineralógica do Depósito de Terras no Complexo Alcalino – Carbonatítico de Barra do Itapirapuã (SP/PR) – Área de Detalhe I – Maria de Lourdes Lorenzi, Henrique Kahn
- BT/PMI/099 – Considerações sobre a Seleção de Equipamentos para o Transporte de Minérios – ALEXANDRE DE SANT'ANNA, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/100 – Desgaste Abrasivo em Britadores de Mandíbulas – NILSON MAR BARTALINI, FERNANDO FUJIMURA
- BT/PMI/101 – Viabilidade do Emprego de Finos de Basalto em Concreto Compactado a Rolo – KLEBER DA SILVA MENDES, LINDOLFO SOARES
- BT/PMI/102 – Sistema Especialista para o Processamento de Minérios de Ouro – VANESSA DE MACEDO TORRES, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/103 – Desenvolvimento de Eletrodos de Pasta de Carbono Modificados com a Resina Poliamidoxima (ES-346) para a Determinação Potenciométrica de Gálio – MARCO ROGÉRIO BARRIOS, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/104 – Desenvolvimento de Processo para o Aproveitamento do Feldspato Contido em Finos de Pedreira de Nefelina Sienito – PAULO FERNANDO ALMEIDA BRAGA, LAURINDO DE SALLES LEAL FILHO
- BT/PMI/105 – Os Recursos Minerais e a Economia Internacional: Uma Reavaliação das Teorias – FRANCISCO REGO CHEVES FERNANDES, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/106 – Importância dos Aspectos Geológico-Geotécnicos em Obras Implantadas na Serra do Mar – Uma Metodologia de Manutenção Preventiva – ORIOVALDO CUNHA MARTINEZ, FERNANDO FUJIMURA
- BT/PMI/107 – Lixiviação e Adsorção em Fazenda Brasileiro – CVRD: Uma Questão de Produtividade – ÁUREA MARIA DIAS GOMES, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/108 – Análise Quantitativas por Difração de Raios-X em Engenharia Mineral – Aplicação dos Métodos de Rietveld e do Padrão Interno – GABRIELA CAMPOS FRONZAGLIA, HENRIQUE KAHN
- BT/PMI/109 – Avaliação das Principais Causas de Acidentes em Barragens de Contenção de Rejeitos Devido a Fatores Geológicos e Geotécnicos – FERNANDO IVAN VÁSQUEZ ARNEZ, LINDOLFO SOARES
- BT/PMI/110 – Problemas Relacionados a Tensões Naturais Durante a Lavra de Rochas Ornamentais – HUGO ANTONIO MERCONCHINI VEGA, LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA
- BT/PMI/111 – Sistemas de Classificação na Análise da Estabilidade de Taludes em Maciços Brandos – ANDREA CRISTINA Y. DE MATTOS, LINDOLFO SOARES
- BT/PMI/112 – Metodologia para Amostragem de Material Particulado em Suspensão (MPS) – IVO TORRES DE ALMEIDA, SERGIO MÉDICI DE ESTON
- BT/PMI/113 – Viabilização da Recuperação de Ouro de Minério Primário por Lixiviação em Pilha Mediante o uso de Britadores não Convencionais: Um Estudo de Caso: O Minério Primário da Mina de Almas-Paiol, TO – SALOMÃO SOLINO EVELIN, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/114 – Aplicação de Aditivos Químicos à Filtragem de Polpas de Minerais – LUIZ GUSTAVO ESTEVES PEREIRA, LAURINDO DE SALLES LEAL FILHO
- BT/PMI/115 – Proposta de Gerenciamento Ambiental de uma Área Degradada nos Municípios de Mauá e Ribeirão Pires – Região Metropolitana de São Paulo – ÁLVARO GUTIERREZ LOPEZ, LUIZ ENRIQUE SÁNCHEZ

- BT/PMI/116 – Experiência de Gerenciamento da Reforma e Adequação de um Moinho de Bolas de 4000 HP para nova Aplicação – AROLDO DUTRA GARCIA, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/117 – Efeitos da Viscosidade no Processo de Deslamagem com Microciclones em Polpa Não-Newtoniana de Rocha Fosfática – MARIO VALENTE POSSA, JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA
- BT/PMI/118 – Caracterização Tecnológica de Depósitos de Cromita da Província de Camagüey, República de Cuba – JULIÁN ANDRÉS MÉNDEZ GARCÉS, HENRIQUE KAHN
- BT/PMI/119 – Garimpo de Ouro no Brasil: Desafios da Legalização – MARIA LAURA TAVEIRA DA MOTA GERALDES DE CARVALHO BARRETO, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/120 – Contribuição ao Projeto de Reatores de Ácido Fosfórico para Processamento de Concentrados Apatíticos Brasileiros – ROBERTO MATTIOLI SILVA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/121 – Lixiviação em Pilhas de Minérios Oxidados de Cobre – GEYSA SANTOS DE PONTES PEREIRA, ELTON AZEVEDO MASINI
- BT/PMI/122 – Produção de Agregado como Alternativa para Produtores de Corretivo de Solo da Grande Curitiba – PLÍNIO CRISTIANO CAMBOIM DE OLIVEIRA, ANTÔNIO JOSÉ NAGLE
- BT/PMI/123 – A Competitividade da Mineração Nacional com Ênfase no Minério de Ferro – GILSON EZEQUIEL FERREIRA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/124 – Aplicação de Turfa na Recuperação de Solos de Degradados pela Mineração de Areia – JOSÉ GUILHERME FRANCHI, JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA
- BT/PMI/125 – Aproveitamento de Materiais Fosfáticos Marginais para a Produção de Fertilizantes Organo-Fosfatados – CARLOS ALBERTO IKEDA OBA, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/126 – Abordagem Participativa na Gestão de Recursos Minerais – CARLOS C. PEITER, ROBERTO C. VILLAS BÔAS
- BT/PMI/127 – A Importância dos Condicionantes Geológicos-Geotécnicos na Recuperação de Áreas Degradadas por Lavra de Minas a Céu Aberto – RICARDO DEGUTI DE BARROS SILVA, FERNANDO FUJIMURA
- BT/PMI/128 – Determinação de Indicadores de Impactos Ambientais Cumulativos Decorrentes da Mineração de Areia no Vale do Paraíba Através de Geoprocessamento – EDER LUIZ SANTO, LUIS HENRIQUE SÁNCHEZ
- BT/PMI/129 – Tecnologia de Corte de Rocha Ornamental com Fio Helicoidal – FERNANDO FUJIMURA, ANTONIO STELLIN JUNIOR
- BT/PMI/130 – Diagnóstico da Degradação do Meio Físico e Proposição de Medidas de Recuperação em Áreas de Mineração Abandonadas na Bacia do Guarapiranga, Região Metropolitana de São Paulo – MARIA MARTA TEIXEIRA VASCONCELOS, LUIS ENRIQUE SANCHEZ
- BT/PMI/131 – A Integração Competitiva do Setor Mineral Brasileiro no Cenário Internacional Estudo de Caso: O Setor de Aços Especiais Inoxidáveis – MANOEL RODRIGUES NEVES, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/132 – Contribuição à Implantação de um Novo Pólo de Fertilizantes no Nordeste do Brasil – GILDO DE ARAÚJO SÁ C. DE ALBUQUERQUE, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/133 – Metodologia Construtiva do Poço de Produção da Mina Fazenda Brasileiro – LEONCIO TEÓFILO CARNERO CARNERO, FERNANDO FUJIMURA
- BT/PMI/134 – Aproveitamento de Finos Gerados nas Ferragens de Mármore e Granitos – IVAN FALCÃO PONTES, ANTÔNIO STELLIN JÚNIOR
- BT/PMI/135 – Aspectos Hidrodinâmicos na Flotação de Partículas Grossas – WENDEL JOHNSON RODRIGUES, LAURINDO DE SALLES LEAL FILHO
- BT/PMI/136 – Aproveitamento de Rejeitos de Pedreiras de Santo Antônio de Pádua – RJ para Produção de Brita e Areia – SALVADOR LUIZ DE MATOS DE ALMEIDA, LAURINDO DE SALLES LEAL FILHO
- BT/PMI/137 – Análise Crítica do Desenvolvimento de Processos de Cianetação em Tanques Agitados – RINALDO PEDRO NARDI, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/138 – A Utilização de Finos de Pedreira em Solo-Cimento Ensacado – EDILSON PISSATO, LINDOLFO SOARES
- BT/PMI/139 – Dessulfuração de Finos de Carvão de Santa Catarina por Concentradores Centrífugos – ANTÔNIO RODRIGUES DE CAMPOS, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/140 – Estereoquímica de Polissacarídeos e sua Influência na Seletividade da Separação Apatita/Calcita por Flotação Aniônica Direta – JULIO CESAR GUEDES CORREIA, LAURINDO DE SALLES LEAL FILHO
- BT/PMI/141 – Avaliação do Desempenho Ambiental – Proposta Metodológica e Diretrizes para Aplicação em Empreendimentos Cíveis e de Mineração – FRANCISCO NOGUEIRA DE JORGE, LINDOLFO SOARES
- BT/PMI/142 – Formação de Barreira Geoquímica para o Abatimento de Drenagens Ácidas de Estéril Piritoso – VICENTE PAULO DE SOUZA, LUIS ENRIQUE SÁNCHEZ
- BT/PMI/143 – Técnicas de Preparação de Areia para uso na Construção Civil – WILLIAM WHITAKER, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/144 – Inovação Tecnológica e Setores da Indústria: O Contexto da Indústria Extrativa e de Transformação Mineral – MARIA HELENA MACHADO ROCHA LIMA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO

- BT/PMI/145 – Determinação e Análise Estatística dos Índices Físicos de Pedras Ornamentais Brasileiras – ANTONIO STELLIN JUNIOR, EDUARDO CESAR SANSONE, MARIA RENATA MACHADO STELLIN
- BT/PMI/146 – Avaliação de Impacto Ambiental de Projetos de Mineração n Estado de São Paulo: A Etapa de Acompanhamento – ELVIRA GABRIELA C. S. DIAS, LUIS E. SÁNCHEZ
- BT/PMI/147 – Contribuição ao Estudo do Corte de Rochas por Jato D'Água Abrasivo – CARLOS TADEU LAUAND, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/148 – Competitividade na Exploração Mineral – Um Modelo de Avaliação – JOSÉ GUEDES DE ANDRADE, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/149 – Caracterização Tecnológica do Depósito de Terras Raras de Catalão I, GO. Áreas: Córrego do Garimpo e Lagoa Seca – MARIA MANUELA MAIA LÉ TASSINARI, HENRIQUE KAHN
- BT/PMI/150 – Contribuição ao Método de Determinação do Índice de Abrasividade de Bond (A. i.) à Luz de Outros Materiais Metálicos – JOSÉ BRUNO NETO, JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA
- BT/PMI/151 – Fabricação de Termofosfato Utilizando Fosfogesso – REYNALDO ARBUE PINI, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/152 – Desenvolvimento de Tecnologia Eletrohidráulica Aplicada a Desmonte de Rochas em Áreas Urbanas – CARLOS MAGNO MUNIZ E SILVA, ANTONIO STELLIN JÚNIOR
- BT/PMI/153 – Novo Método de Caracterização Tecnológica para Cominuição de Minérios – ANA CAROLINA CHIEREGATI, HOMERO DELBONI JUNIOR
- BT/PMI/154 – Desenvolvimento de Processo do Projeto Rocha Sã em Pitinga, AM – EDER DE SILVIO, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/155 - Aplicação dos Finos Gerados pela Produção de Pedras Britadas Graníticas no Concreto Pré-Misturado em Substituição às Areias Naturais – LIGIA NEVES, JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA
- BT/PMI/156 - Técnica de Simulação Numérica de Escavação Subterrânea por Computador - MÁRCIO DELCHIAO NIEBLE, FERNANDO FUJIMURA
- BT/PMI/157 - Jato de Água Abrasivo para Corte e Gravação de Materiais Friáveis – WILDOR THEODORO HENNIES, CARLOS TADEU LAUAND, GUILLERMO RUPERTO MARTÍN CORTÉS
- BT/PMI/158 – Desativação de Empreendimentos Mineiros: Estratégias para Diminuir o Passivo Ambiental – JOSÉ BAPTISTA DE OLIVEIRA JÚNIOR, LUIS ENRIQUE SÁNCHEZ