



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



ANA VITÓRIA DE MOURA GONÇALVES

DESIGNS DE UMA PLANTA DE FRAGMENTAÇÃO

OURO PRETO

2022

ANA VITÓRIA DE MOURA GONÇALVES

DESIGNS DE UMA PLANTA DE FRAGMENTAÇÃO

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas

Orientadora: Prof. Dra. Otavia Martins Silva Rodrigues

OURO PRETO  
2022



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Ana Vitória de Moura Gonçalves**

### Desings de uma planta de fragmentação

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira de Minas

Aprovada em 31 de Outubro de 2022

#### Membros da banca

Doutora Otávia Martins Silva Rodrigues - Orientador(a) (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Mestre Mariana Caroline Andrade Silva - (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Mestre Gilvan de Souza Amorim Júnior - (Nexa Resources)

Otávia Martins Silva Rodrigues, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 01/12/2022



Documento assinado eletronicamente por **Otavia Martins Silva Rodrigues, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 01/12/2022, às 06:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0435120** e o código CRC **ED10063F**.

## RESUMO

Dois dos aspectos mais importantes para as usinas de beneficiamento é o design e projeto adequado do circuito para um determinado material. Com o objetivo de trazer eficiência para a etapa de *ramp-up*, testes em escala piloto para moagem SAG, com foco na análise do comportamento dos dois diferentes minérios, *Stratabound* e *Stringer*, foram realizados para uma planta de material polimetálico. Para análises das amostras coletadas, utilizou-se diferentes métodos, como testes de DWT, WI de Bond, análise granulométrica, entre outros, para entender o comportamento do minério tendo em vista que o *Stringer* tem valores de tenacidade maiores. Como já esperado foi possível observar que com o aumento das proporções do material mais tenaz fatores como taxa de alimentação, vazão e índice de redução resultam em valores mais baixos o que leva a diminuição da produtividade. Outro aspecto avaliado foi a modificação do  $F_{80}$  de 109mm para 130mm, mas os testes avaliaram como perda de produtividade de quase 10%.

Palavras-chave: Design Planta de Fragmentação; Teste Piloto; Cominuição.

## **ABSTRACT**

Two of the most important aspects for beneficiation plants is proper circuit design and design for a given material. With the aim of bringing efficiency to the ramp-up stage, pilot scale tests for SAG grinding, focusing on the analysis of the behavior of two different ores, Stratabound and Stringer, were carried out for a polymetallic material plant. For analysis of the collected samples, different methods were used, such as DWT tests, Bond WI, granulometric analysis, among others, to understand the behavior of the ore, considering that Stringer has higher tenacity values. As already expected, it was possible to observe that with the increase in the proportions of more tenacious material, factors such as feed rate, flow rate and reduction index result in lower values, which leads to a decrease in productivity. Another aspect evaluated was the modification of the F80 from 109mm to 130mm, but the tests evaluated it as a productivity loss of almost 10%.

**Keywords:** Fragmentation Plant Design; Pilot Test; Comminution.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Circuito simplificado de cominuição .....	12
Figura 2: Circuito SAG Estágio Único (Single Stage AG/SAG) .....	19
Figura 3: Circuito AG - SEIXOS (FAP) .....	20
Figura 4: Circuito AG - BOLAS (FAB) .....	21
Figura 5: Circuito SAG - BOLAS (SAB) .....	22
Figura 6: Circuito SAG - Rebritador de Reciclos - Bolas (SABC) .....	22
Figura 7: Rota de Processo Moagem SAG (em escala piloto) .....	24
Figura 8 Rotâmetro para medição da vazão de água .....	25
Figura 9: Monitor da célula de carga .....	26
Figura 10: Calha de contenção .....	27
Figura 11: Controle Célula de Carga - Cenário Stringer (Teste 1, 2 e 3) .....	28
Figura 12: Controle Célula de Carga - Cenário Stringer (Teste 4) .....	29
Figura 13: Verificação do Grau de Enchimento .....	30
Figura 14: Resultado de BWi para Stringer e Stratabound .....	31
Figura 15: Taxa de Alimentação (t/h) .....	33
Figura 16: Potência Calculada (KWh) .....	33
Figura 17: Enchimento Total - Medido .....	34
Figura 18: Índice de Redução .....	34
Figura 19: Relação de A.b com a % <i>Stratabound</i> .....	35
Figura 20: Influência da % de Stringer na Alimentação .....	36
Figura 21: Influência do F80 na vazão de sólidos máxima .....	36

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características Britadores Primários.....	15
Tabela 2: Programação de Testes .....	23
Tabela 3: Características do teste para o Cenário Stringer (Teste 1,2 e 3).....	28
Tabela 4: Características do teste para o Cenário Stringer (Teste 4).....	29
Tabela 5: Resultados teste de BWi para Stringer e Stratabound .....	30
Tabela 6: Resultados para os 5 cenários propostos.....	32

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
OBJETIVO.....	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1. Processo de Fragmentação.....	11
2.2. Exemplo de Planta de Cominuição .....	12
2.3. Análise dos Equipamentos Selecionados .....	14
2.4. Circuito Industriais de Moagem AG/SAG .....	18
3. METODOLOGIA.....	23
4. RESULTADOS .....	28
4.1. Célula de Carga.....	28
4.2. Características das Amostras .....	30
4.3. Resultados Preliminares .....	32
5. CONCLUSÃO.....	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38

## 1. INTRODUÇÃO

Devido ao posicionamento estratégico brasileiro para comercialização de seus bens minerais e a vasta diversidade de reservas, o país detém grande importância no setor mineral mundial. A demanda crescente por bens de consumo nos últimos anos, resulta em um crescimento de mercado no ramo. No ano de 2021 o Brasil registrou um crescimento de 62% no faturamento em relação ao ano anterior (MALAR, 2022).

Com o crescimento da demanda pelos metais, a indústria mineral se torna mais importante para a economia do país e assim estratégias para seu aperfeiçoamento e aproveitamento se tornam foco, tendo como consequência o aumento de estudos e pesquisa no setor. Um dos estágios dentro da indústria mineral é a etapa de Beneficiamento Mineral, momento em que o minério extraído da mina será fragmentado, classificado e concentrado por métodos físicos. A cominuição faz parte desse processo e se destaca pela importância na liberação mineral necessária para o desempenho de etapas subsequentes.

Além de sua importância na liberação do bem mineral, outras características tornam a etapa estratégica para o estudo. Uma delas é o gasto energético, a cominuição é a fase do processamento mineral em que se gasta mais energia. Assim o máximo aproveitamento e otimização dessa planta fazem com que os custos sejam menores e a liberação máxima, unindo os dois principais objetivos.

As rotas de processo determinadas têm como foco o melhor desempenho e suas estratégias estão ligadas com o grau de liberação de acordo com as características minerais. Dessa forma estudos prévios são necessários para planejamento de novas usinas ou para modificações em usinas pré-existentes com o objetivo do alcance máximo do seu potencial.

Vantagens e desvantagens são listadas em todos os tipos de circuitos desenvolvidos e estudados, existindo também a dependência com as características minerais, localização da mina, clima, entre outras variáveis que podem interferir na escolha da melhor rota de cominuição.

Este trabalho tem como objetivo revisar estratégias utilizadas no design de uma planta de cominuição de polimetálicos. Assim como discutir sobre os testes em escala piloto realizados

para a etapa de moagem SAG, com a finalidade de buscar resultados que auxiliem na etapa de *ramp up* do circuito visando o aumento de produtividade posterior.

## **OBJETIVO**

### **Objetivos gerais**

O *design* adequado de circuitos de fragmentação de acordo com as características do minério, localização da planta e objetivos com relação ao produto final esperado, são de fundamental importância para o sucesso do empreendimento.

### **Objetivos específicos**

Este projeto, portanto, possui a pretensão de analisar o design de um circuito de cominuição existente e os dados gerados em teste piloto de moagem SAG para a mesma planta. Com isso identificar os parâmetros que melhor se adequem à planta de beneficiamento, com os minérios *Stringer*, *Stratabound* e o *mix*.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Processo de Fragmentação

Cominuição consiste nas etapas de britagem e moagem que tem como finalidade a redução do tamanho da partícula para liberação do mineral de interesse. Considerada a parte do processo de beneficiamento com maior consumo energético, é essencial que o desenvolvimento do seu fluxograma busque maximizar sua eficiência. Apesar de todos os estudos realizados na área, o processo de cominuição continua sendo considerado pouco eficiente. Os circuitos existentes comumente são adaptações de circuitos pré-existentes, alterando as variáveis de capacidade e característica específica de cada projeto. De modo geral o circuito considerado eficiente é aquele com a combinação das etapas de fragmentação e classificação mais próximas do ideal para cada projeto (DELBONI; SAMPAIO, 2018).

A primeira etapa do processo é usualmente realizada pelos britadores, equipamentos robustos destinados para a quebra inicial. Em operação de larga escala os britadores mais comuns são os britadores de mandíbula, rolos e giratórios, sendo o mecanismo de quebra desses equipamentos o impacto, pressão ou ambos dependendo do britador selecionado (WILLS, 2005).

Para que exista uma liberação satisfatória é comum a existência de três estágios de cominuição, a grossa, intermediária e fina, sendo geralmente a primeira e segunda realizadas por britadores e a terceira, fragmentação de partículas mais finas, pelos moinhos. Um dos britadores mais usuais para o estágio inicial é o britador de mandíbulas, equipamento ideal para granulometria e dureza elevada (FIGUEIRA *et.al.*, 2010).

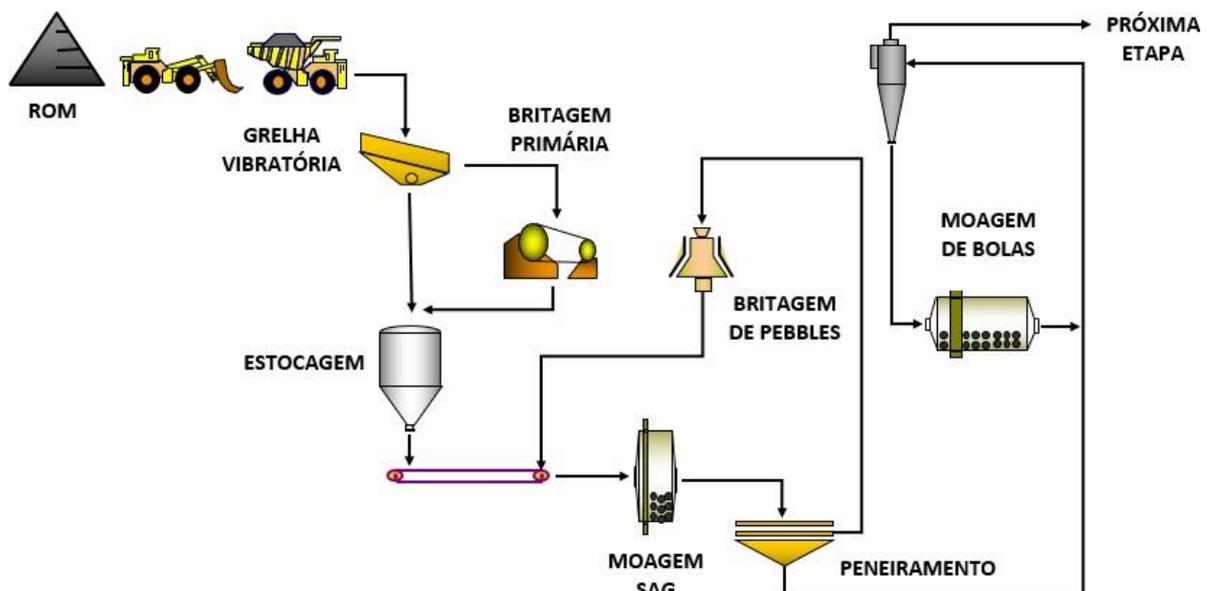
A moagem é o último processo de fragmentação, sendo necessário nessa etapa atingir a granulometria especificada para o minério que está sendo beneficiado. Sem atingir o tamanho adequado da partícula para liberação do mineral de interesse, o processo perde a viabilidade econômica, pois pode provocar a não liberação adequada e assim perda na especificação do teor do concentrado final. Além da importância técnica, a moagem é a área que requer maior investimento do processo de cominuição. Dessa forma é conclusivo que esse estágio assim como todo o circuito de fragmentação, precisa ser estudado e bem dimensionado para cada caso (FIGUEIRA *et.al.*, 2010).

## 2.2. Exemplo de Planta de Cominuição

O circuito de cominuição apresentado é composto pelos seguintes equipamentos: britagem primária em britador de mandíbulas, moagem primária em moinho SAG, britagem de seixos rolados em britador cônico e moagem secundária em moinho de bolas. A britagem primária em britador de mandíbulas é realizada em circuito aberto, com grelha vibratória para escalpe do material fino. Após a primeira quebra, a moagem primária é feita em circuito fechado e direto com peneira vibratória e rebritagem de seixos rolados em britador cônico. Por último a moagem secundária é feita em circuito fechado e reverso com a bateria de hidrociclones, assim como apresentado no esquema simplificado na Figura 1.

A característica do minério é um fator importante para a determinação dos equipamentos, no caso apresentado existem dois tipos de minérios, determinados como *Stratabound* e *Stringer*. O *Stratabound* é composto por minerais portadores de chumbo, zinco e prata, apresenta competência e WI menor que o segundo, fatores importantes para a cominuição. O *Stringer* apresenta minerais de cobre, prata e ouro e devido às peculiaridades geológicas, a usina de beneficiamento recebe uma mistura dos produtos.

Figura 1: Circuito simplificado de cominuição



Com pátio de ROM para aproximadamente 45.000t, o que corresponde a 7,5 dias de alimentação da planta, a britagem primária é formada por uma grelha fixa com abertura de 600 mm seguida de uma grelha vibratória que faz o trabalho de escalpe do material mais fino que 130mm. O material retido na grelha vibratória é enviado para o britador de mandíbulas e o produto britado, somado com a fração passante da grelha vibratória, são transportados para o silo de estocagem, com capacidade para armazenamento de 10 horas de operação da planta.

O próximo estágio é a moagem primária, feita pelo moinho SAG (22'x 13'), que recebe o material com um tamanho máximo de 140mm e reduz para 12 mm. Esse circuito é fechado e direto com a peneira vibratória de dois *decks*, sendo o primeiro *deck* com abertura de 19,5mm e o segundo *deck* com abertura de 12,7 mm. Nesse estágio existem duas peneiras, uma operacional e outra reserva, para que não seja um ponto crítico de paralisação da planta durante as paradas de manutenção.

A fração retida na da peneira é retornada para o moinho formando a carga circulante enquanto, a fração passante, é transportada para o próximo estágio. Os seixos rolados expelidos pela grelha de descarga do moinho SAG são transportados para o britador cônico, com abertura na posição fechada de 12 mm que foi projetado para quebrar seixos a fim de evitar um acúmulo de material em uma granulometria bitolada. Assim quando esse material retornar para o moinho já estará com as partículas fragmentadas. Essa granulometria poderia causar um acúmulo de carga no moinho e provocar a redução da capacidade de produção do circuito. Existe também a possibilidade de desviar do britador cônico caso precise de manutenção ou o material processado seja menos competente, dispensando o uso do mesmo.

A moagem secundária é alimentada pelo passante da peneira vibratória, como é um circuito fechado e reverso com a bateria de hidrociclones (5 hidrociclones de 26"), a alimentação é feita direto nos classificadores. O underflow da bateria de hidrociclones alimenta o moinho de bolas (15,5' x 24,5') e o overflow é o produto final do circuito de cominuição, que tem uma redução de 1,7 ~ 2 mm para 150µm.

### **2.3. Análise dos Equipamentos Selecionados**

A etapa de fragmentação tem como objetivo reduzir o tamanho da partícula e ter o máximo de aproveitamento em cada estágio. Para que custos de investimento, manutenção e operação sejam reduzidos, a escolha do equipamento mais adequado na etapa de projeto é fundamental. Para que isso ocorra, testes e estudos de quais equipamentos se enquadram nas características específicas de cada material e objetivo especificados, são realizadas.

Na etapa de britagem primária os equipamentos escolhidos precisam ser de grande porte e operam sempre em circuito aberto à seco. Geralmente para nessa etapa é utilizado o britador de mandíbulas, britador giratório, britador de impacto ou britador de rolo dentado. De acordo com Luz, Almeida e Braga (2010) a Tabela 1 mostra em quais características do material cada britador primário se aplica.

Um dos britadores mais difundidos no mundo é o britador de mandíbulas para a britagem primária. Seu funcionamento é baseado na compressão da mandíbula contra o fragmento e para seu dimensionamento é necessário a análise de curvas granulométricas e características do material. Além disso as condições de capacidades específicas de cada equipamento e análise da rota de processo para cálculo das aberturas nas posições aberta e fechada devem ser analisados. Por último a granulometria esperada para entrada e saída do material no equipamento também é um dos parâmetros para serem verificados (SILVA; VIEIRA, 2020).

Tabela 1: Características Britadores Primários

Características Consideráveis	Britador de Mandíbulas	Britador Giratório
Capacidade	Adequado para capacidades baixas e médias (1000 t/h)	Adequado para capacidades médias e altas
Granulometria do produto	Recomendado quando é indesejável grande quantidade de finos no produto. O <i>top size</i> do produto é alto para materiais lamelares	Idêntico ao de mandíbulas quanto a finos. Mas apresenta <i>top size</i> menor, para uma mesma abertura de saída, britando materiais lamelares
Características mecânicas da rocha	Sem restrição	Sem restrição
Estratificação da rocha	Pouco adequado para materiais com tendência a produzir partículas lamelares	É mais adequado que o de mandíbulas para materiais com tendência a produzir partículas lamelares
Materiais úmidos com alto teor de argila	Mais adequado que o giratório e menos adequado que os de impacto e de rolo dentado	Pouco adequado
Teor de minerais abrasivos altos	Adequado para material abrasivo	Adequado. Comparável com o de mandíbulas (2 eixos)
Grau de redução. Valores usuais médios	Em torno de 5:1	Em torno de 8:1
Modo de alimentação	Exige alimentador	Dispensa alimentador
Granulometria do produto	Caracterizado por alta produção de finos	É o britador primário que produz menos finos. Apresenta <i>top size</i> do produto alto
Características mecânicas da rocha	Uso limitado a rochas frágeis ou elásticas	Uso limitado a rochas de média fragmentação ou para minerais moles
Estratificação da rocha	Altamente efetivo para materiais com tendência a produzir partículas lamelares	É efetivo para materiais com tendência a produzir partículas lamelares, mas o <i>top size</i> do produto é alto
Materiais úmidos com alto teor de argila	Como o britador de rolo, é altamente efetivo para este tipo de material	Altamente efetivo para este tipo de material

Características Consideráveis	Britador de Impacto	Britador de Rolo Dentado
Teor de minerais abrasivos altos	Geralmente restrito a materiais com teor de sílica equivalente menor que 15%	Como o de impacto, é limitado a materiais pouco abrasivos
Grau de redução. Valores usuais médios	Grande o suficiente para, muitas vezes, fazer o trabalho de britagem primária e secundária em um só equipamento.	Brita qualquer bloco que caiba na boca do britador. Todavia, a presença de blocos grandes limita bastante a capacidade
Modo de alimentação	Exige alimentador	Exige alimentador

Fonte: Livro Tratamento de Minérios 6ªed. Cap. Cominuição (2010).

Outras adversidades precisam ser analisadas na tomada de decisão quanto ao equipamento de britagem: localização, clima, custo operacional e de manutenção e a necessidade de movimentação do equipamento. A princípio, os cálculos e simulações precisam ser realizados de forma cautelosa, considerando a capacidade e restrições dos diferentes britadores e requisitos operacionais. Além da experiência prática para adaptação em diferentes situações (VARELA, 2011).

A moagem semi-autógena (SAG) utiliza o próprio minério como corpo moedor. Geralmente adiciona-se uma parcela de corpos moedores convencionais, geralmente 6% a 12% do volume total, para aumentar a eficiência de moagem de acordo com a variabilidade de dureza do material. Fundamentalmente a cominuição nesse processo é feita pela abrasão e impacto do material no revestimento do moinho. A utilização de corpos moedores, que diferencia a moagem semi-autógena da moagem autógena faz com que não crie uma dependência tão grande da característica do material gerada na lavra, podendo regular a alimentação e controlar os resultados de forma mais fácil (PEREIRA, 2004).

Segundo Pereira (2004) após o reconhecimento mundial dos moinhos autógenos (AG) e semi-autógenos (SAG), em qualquer operação com o objetivo de redução de custos de investimento e operacionais, se torna prudente o estudo para implementação desses equipamentos.

Comparando a moagem autógena e semi-autógena com relação a suas vantagens e desvantagens, a primeira é preferível pelo fato de não consumir corpo moedores, isso faz com que o peso não agregado a esse insumo consuma menos energia em comparação ao SAG. Entretanto o processo em AG gera um tamanho crítico de partícula em maior quantidade que o processo em SAG, que o torna difícil de fragmentar. Essa particularidade é decorrente de um tamanho específico, que é considerado pequeno para ter energia suficiente para a quebra e grande para ser moída por outras partículas. Em contrapartida os moinhos SAG, apesar de gerarem um produto mais grosso, tem sua eficiência energética maior e em alguns casos para que as partículas de tamanho crítico sejam cominuídas é incorporado no circuito o britador de seixos rolados, para auxiliar a fragmentação desse material (PEREIRA, 2004).

Para estabelecer possíveis parâmetros operacionais nos circuitos de cominuição com moagem SAG, AG e/ou Bolas, é fundamental a determinação das características do material, para isso é necessário que sejam feitas análises das amostras. As análises principais podem ser divididas

por testes para moagem, como BWi, DWT, SPI, entre outros, que tem como objetivo entender o comportamento do material dentro do equipamento e análise granulométrica do material de várias etapas do circuito, que geram informações se produto e alimentação condizem com o esperado.

Segundo Pereira (2004) os testes para moagem SAG no geral são, determinação do *Autogenous Work Index por MacPherson*, *Teste Advanced Media Competency*, teste de abrasividade do *Julius Kruttschnitt DWT (Drop Weight Test)*, e SPI. Contudo os principais testes adotados para dimensionamento de circuito de moagem SAG são DWT (*Drop Weight Test*) e SPI (PEREIRA; TURRER; PERES, 2005).

O teste de DWT é feito com o intuito de calcular o gasto de energia para se quebrar uma partícula. Um peso com massa (variando de 20kg a 50kg) e distância (variando de 0,05m a 1m) conhecidos, é solto em queda livre, em faixas granulométricas diferentes, com o intuito de gerar uma série de valores de energia aplicada. Com o produto gerado é feita a distribuição granulométrica e descrito como  $t_{10}$  o percentual passante em um décimo do tamanho da partícula original. O valor de  $t_{10}$  em relação com a energia específica para quebra, são plotados no gráfico, gerando valores de A e b. A multiplicação desses dois fatores gera um resultado que pode ser avaliado quanto à resistência ao impacto (RODRIGUES, 2010).

Outro importante teste é o Wi de Bond, que para circuito de moagem SAG/Bolas é utilizado em conjunto com os resultados de SPI. O propósito do teste é identificar a energia gasta para reduzir o minério até que 80% do passante em  $106\mu\text{m}$ , identificando assim a resistência a moagem.

Para SPI um valor fixo de 2kg de amostra é definido e o teste é feito em um moinho SAG padrão, com 15% do seu volume interno de corpos moedores. O objetivo é saber quanto tempo o material estudado necessita para atingir a distribuição granulométrica especificada no teste (100% do passante em 19mm e 80% do passante em 12mm), ou seja, 80% menor que 1,7mm (PEREIRA, 2004).

Mesmo nos circuitos de moagem bem dimensionados, é esperado que tenha um acúmulo de uma determinada fração granulométrica (tamanho crítico) que reduz a vazão de alimentação.

Dentre as soluções possíveis, a mais comum seria a implementação de um britador de seixos rolados, usualmente feita pelo britador giratório, e sua função seria receber o material do oversize da peneira localizada na saída da moagem SAG e britar essa fração (DELBONI; SAMPAIO, 2018).

Outra informação fundamental nos circuitos com moagem SAG está relacionada com o peso da carga do material no interior do moinho. Fundamentalmente para que a cominuição atinja valores desejados é necessário que o grau de enchimento do moinho seja monitorado, a fim de não se perder área vazia que auxilia no processo de quebra. Sendo assim um dos equipamentos mais difundidos atualmente, é a célula de carga. Esse instrumento atua medindo a força de maneira indireta e resultando na medição do peso registrado no interior do moinho de maneira instantânea.

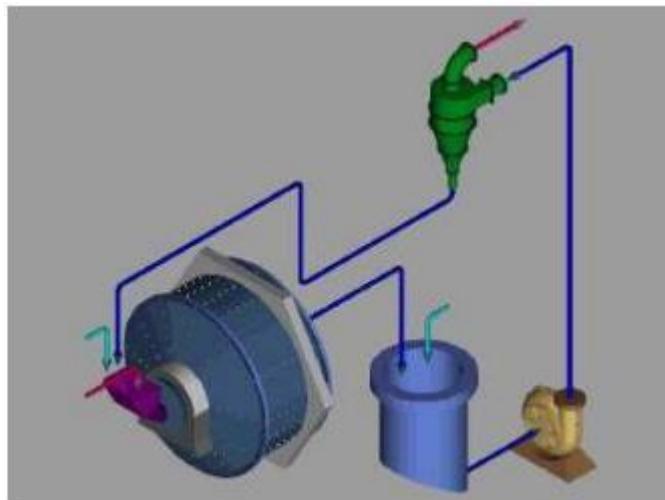
Para a moagem de bolas a redução do tamanho das partículas é feita pelo impacto e abrasão com o auxílio dos corpos moedores. Assim como em qualquer outro circuito é necessária a análise dos prós e contras para determinação de um esquema que mais se enquadra nas características intrínsecas e desejadas para cada material. As vantagens do circuito fechado e reverso estão na possibilidade do material, já na granulometria adequada, continuar o processo e reduzir a possível sobre moagem (CARVALHO, 2015).

#### **2.4. Circuito Industriais de Moagem AG/SAG**

A escolha da configuração do circuito adotado varia de acordo com o objetivo de cada empreendimento, todas as esquematizações possuem vantagens e desvantagens, que devem ser cuidadosamente avaliadas e fim de proporcionar o produto desejado de maneira viável. O circuito de estágio único (Figura 2) é recomendado para processos já consolidados pois é considerado como uma operação de risco. Além disso a comunicação e coordenação entre mina e usina nesse caso é de essencial importância, a fim de garantir *blends* e granulometria adequada, uma opção são as pilhas de homogeneização ou pulmão. Nesse circuito, a ausência de britador de seixos rolados para seixos de tamanho crítico, requer um o estudo criterioso da característica do material (DELBONI; SAMPAIO, 2018).

Alguns exemplos de circuitos em estágio único são as minas de Leinster, Kambalda, Golden Pride, Hidden Valley, Jacobina, entre outros. A diferença entre os exemplos são as características adotadas de cada rota de processo. Parâmetros como porcentagem de enchimento de bolas ou utilização do moinho como AG ou SAG, são algumas das modificações adotadas de acordo com o objetivo. Golden Pride é uma das exemplificações de circuito de estágio único que utiliza moinho SAG com carga de bolas de 8% a 15%. A mina apresenta um minério de competência variável ou moderada com o tamanho de moagem selecionado (PUTLAND; KOCK; SIDALL, 2015).

Figura 2: Circuito SAG Estágio Único (Single Stage AG/SAG)



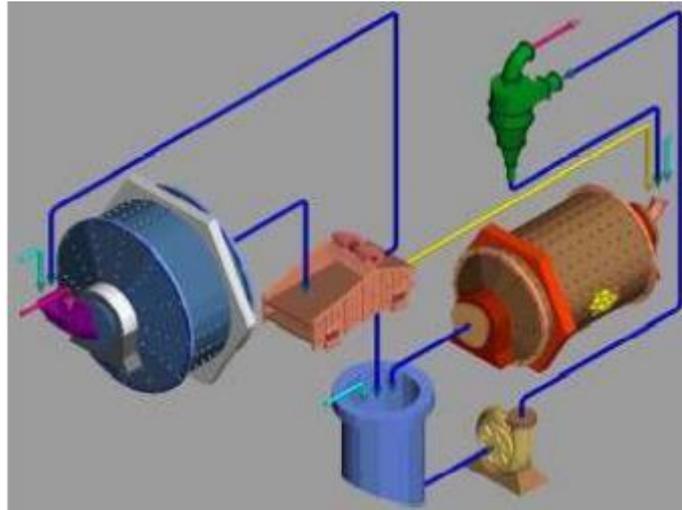
Fonte: Delboni (2006).

O circuito FAP (AG/SEIXOS) (Figura 3) possui duas etapas de moagem, a primeira é a moagem AG seguida da moagem de seixos. Nessa configuração o problema citado anteriormente, sobre a possibilidade de acúmulo de material na fração crítica, não seria mais uma desvantagem, visto que essa granulometria seria utilizada na moagem de seixos como corpos moedores. Confrontando com a moagem SAG, apesar dos custos operacionais serem inferiores, o custo de investimento para a mesma capacidade é bem mais elevado (DELBONI; SAMPAIO, 2018).

A mina de cobre de Aitik na Suécia utilizou até 2013 o circuito FAP (*Fully Autogenous Pebble*), com o objetivo de aumentar sua produtividade, ao longo dos anos modificações foram feitas no circuito. Nos anos de 1968 para 1996, a produção foi de 2Mt/ano para 18Mt/ano, esse resultado foi devido a substituição dos dois circuitos iniciais que consistiam em moinhos de barras e seixos pelo circuito autógeno. O novo *design* era composto de 5 circuitos de moagem autógena,

cada um em série com o moinho de seixos, mostrando resultados satisfatórios. Já no ano de 2006 a nova modificação foi visando o aumento da capacidade de 18Mt/ano para 36Mt/ano. Para isso a substituição dos cinco circuitos por apenas duas linhas, mas com moinhos de maior porte, foi realizada. A opção pelo moinho autógeno ao invés do moinho SAG, se deu pelo fato de uma despesa operacional menor, além do fato que a nova rota facilitou futuras expansões.

Figura 3: Circuito AG - SEIXOS (FAP)

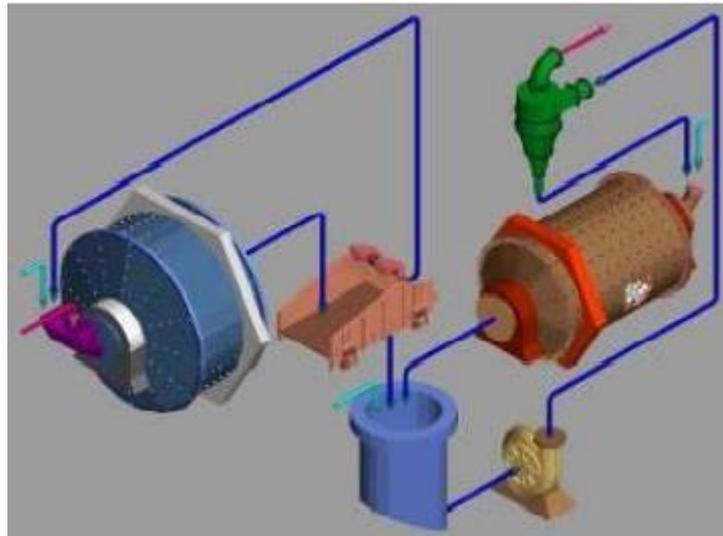


Fonte: Delboni (2006)

Na configuração FAB (*Fully Autogenous Balls*) (Figura 4) a diferença do circuito FAP está na modificação da moagem secundária pelo moinho de bolas. Desta forma proporciona uma vantagem: a presença da moagem de bolas pode corrigir falhas de desempenho pontuais do processo de moagem primária. De modo geral o consumo energético dessa operação se assemelha às operações convencionais de estágios sequenciados de britagem e moagem de bolas (DELBONI; SAMPAIO, 2018).

De acordo com Karageorgos *et al.* (1996) na mina de *Mount Isa*, Austrália, a substituição de um processo tradicional de britagem e moagem para a operação com moinhos autógenos e moinhos de bolas resultaram em um valioso conhecimento operacional adquirido. Além disso a redução dos custos operacionais foi notável quando comparados com a rota anterior.

Figura 4: Circuito AG - BOLAS (FAB)

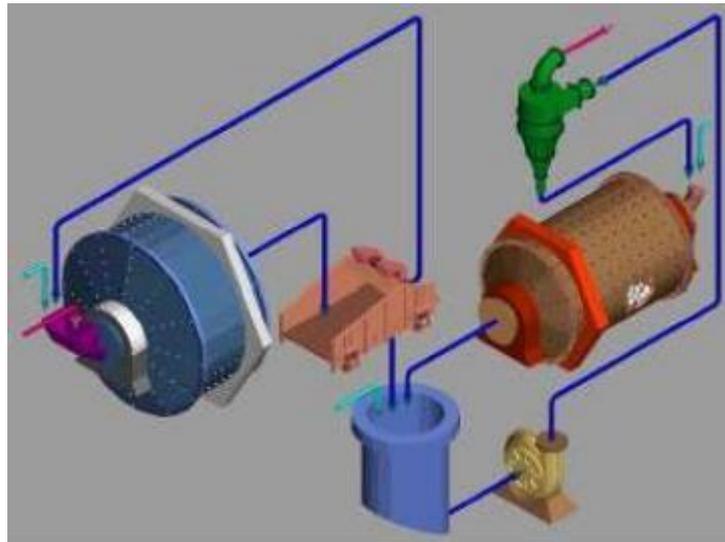


Fonte: Delboni (2006).

A alternativa dessa configuração (Figura 5) se baseia na substituição do moinho AG pelo moinho SAG, levando o nome assim de circuito SAG – BOLAS (*Semiautogenous Balls – SAB*). Devido à flexibilidade de operação e aumento de produção comparados com o circuito anterior, sendo que o aumento de custo seria relativo ao consumo de corpos moedores, esse modelo se torna mais vantajoso (DELBONI; SAMPAIO, 2018).

De acordo com Junior *et al.* (2011) a empresa Kinross opera em Paracatu com uma das plantas de beneficiamento no circuito SAB. Com o início das operações entre 2008 e 2009, a planta foi projetada para atingir 5087t/h. Outro exemplo é a mina de Serra da fortaleza em Minas Gerais com moinho SAG de 18'x 6' alimentado na faixa de 70t/h e 10% de carga de bolas.

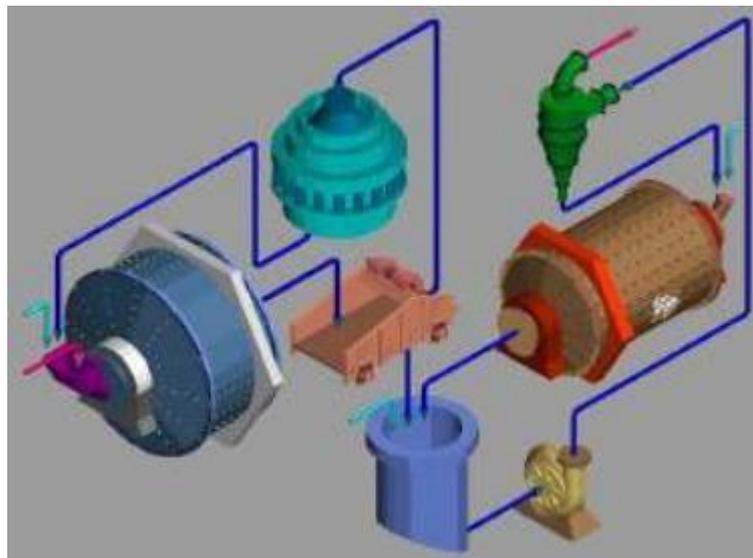
Figura 5: Circuito SAG - BOLAS (SAB)



Fonte: Delboni (2006).

Por último o modelo apresentado na Figura 6 consiste no mesmo esquema anterior, mas com a adição do britador de seixos rolados, em circuito fechado com a peneira vibratória. A vantagem dessa modificação consiste em redução da fração crítica e conseqüentemente aumento na capacidade do circuito (DELBONI; SAMPAIO, 2018).

Figura 6: Circuito SAG - Rebritador de Reciclos - Bolas (SABC)



Fonte: Delboni (2006).

### 3. METODOLOGIA

Testes em escala piloto tem como objetivo confirmar os resultados e avaliar variabilidades dos testes obtidos em escala de bancada. Além do mais, podem fornecer resultados que aprimorem os estudos para a execução do projeto, pois são mais representativos em escala industrial. Neste projeto, os aspectos fundamentais analisados foram as características de fragmentação e simulações de rotas de processo para moagem SAG.

Este texto se refere aos testes piloto, bem como sua interpretação e correlação com testes em escala de bancada, os quais foram realizados anteriormente.

#### 1.1. Testes Piloto

Os testes em escala piloto foram executados no CETEM – Rio de Janeiro e acompanhados pela equipe de engenharia de processos. Na programação foi estabelecido que 5 cenários seriam feitos, como demonstrado na Tabela 2, modificando as proporções de cada minério alimentado, *Stringer* e *Stratabound* para os 4 primeiros e para o último a modificação realizada foi do F80 do *Stratabound*.

Tabela 2: Programação de Testes

Minério	
Cenário 1	<i>Stringer</i>
Cenário 2	<i>Stratabound</i>
Cenário 3	Mix 1 (15% <i>Str</i> + 85% <i>Stb</i> )
Cenário 4	Mix 2 (30% <i>Str</i> + 70% <i>Stb</i> )
Cenário 5	100% <i>Stb</i> F80 = 130mm

Fonte: Relatório interno

Na campanha piloto, a rota de processo (Figura 7) simulou um circuito de moagem SAG. Os equipamentos que compuseram o teste foram: correia transportadora, moinho SAG de dimensões de 5,71' x 1,89', *trommel* e britador de mandíbulas com APF (abertura na posição fechada) de 10 mm. O material utilizado, foi previamente britado e separado por faixa granulométrica, a fim de compor o montante representativo do ROM na alimentação da planta piloto.

Figura 7: Rota de Processo Moagem SAG (em escala piloto)



Para iniciar as operações realizaram-se ajustes de parâmetros de processos para obter resultados mais próximos possíveis do real. Os parâmetros ajustados foram: porcentagem de sólidos na moagem, APF (abertura na posição fechada) do britador e adequação da granulometria das amostras para representar o ROM. Também foram realizados ajustes mecânicos: ajustes das tensões da correia transportadora que alimenta o moinho SAG, manutenção no sistema de lubrificação do mancal de alimentação do moinho e no sistema de separação de bombeamento de finos (produto do SAG).

Como já previsto o primeiro teste realizado (cenário 1) foi com material *Stringer*. A cada 60 segundos um carrinho de mão manipulado pelos colaboradores do CETEM, com 40kg de material, eram descarregados na correia transportadora que alimenta o moinho SAG. Na planta piloto entre a saída da correia e a entrada do moinho SAG, existe uma bica de entrada (*spout feeder*), que através dele, além da alimentação de massa, houve a alimentação de água controlando assim a vazão e consequentemente a porcentagem de sólidos (72%, valor estabelecido no projeto). A vazão de água é controlada através de rotâmetros (Figura 8) e certificada a cada início de teste, através de medições em baldes graduados e cronômetro.

Figura 8 Rotômetro para medição da vazão de água



Foram estipuladas 2 horas de duração para cada teste, sendo a primeira hora para estabilização dos parâmetros estabelecidos e a segunda hora para a amostragem. Nos primeiros 30 min o processo foi pausado para fazer uma medição do grau de enchimento do moinho com o auxílio da treina a laser, quando atingido o valor de 25% de enchimento o processo era retomado. Por mais 30 minutos o processo foi continuado e após esse tempo, mais uma medição foi realizada para confirmar o valor de grau de enchimento e a sua estabilização. Assim que retomado o processo, se inicia o começo da segunda etapa em que foram feitos os testes.

Outro método para acompanhamento da estabilização e controle do grau de enchimento, foi a avaliação dos valores da célula de carga (Figura 9). Com o monitoramento dos valores, decisões sobre aumento ou redução da frequência de carregamento de carrinhos de mão na alimentação da correia transportadora eram tomadas, sempre com objetivo de manter valor adequado de enchimento do moinho.

Figura 9: Monitor da célula de carga



Após a alimentação do moinho SAG e sua fragmentação, o material era descarregado no *trommel* com abertura de 12,7 mm e o seu retiro direcionado para o britador de mandíbulas. Quando analisados os parâmetros do britador de mandíbula, foi observado que sua APF (abertura na posição fechada) estava maior do que a definida do projeto, assim não havia formação de câmara durante a operação da planta piloto. A medida de mitigação realizada foi a confecção de uma contenção, demonstrada na Figura 10, com o objetivo de acumular material e assim liberar o material apenas quando a calha estivesse cheia.

Figura 10: Calha de contenção



Como mencionado, na segunda hora do teste foi realizada a amostragem. As amostras coletadas foram retiradas do *trommel* (retido e passante) e o produto do britador, totalizando em quatro bateladas com intervalo de 10 minutos entre cada uma.

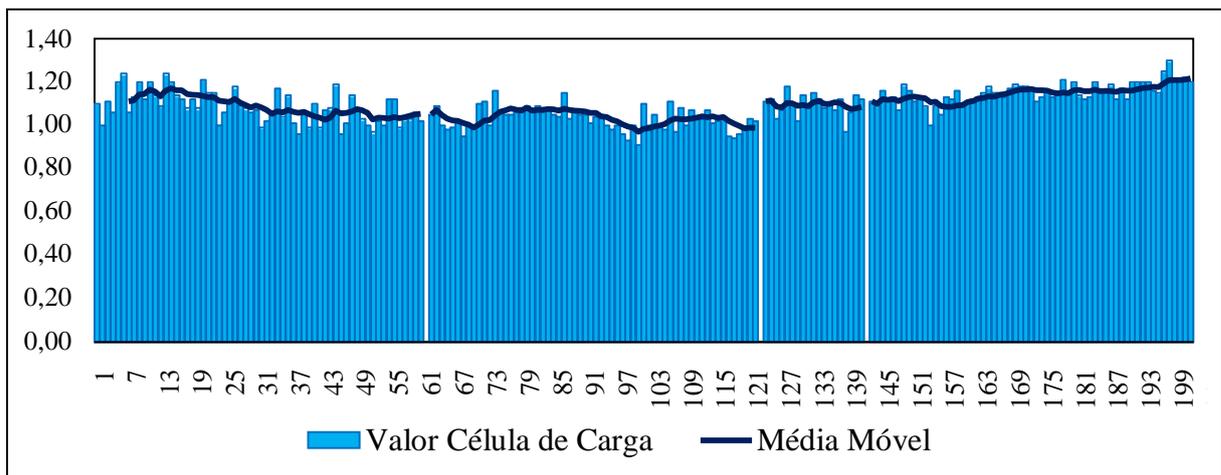
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Célula de Carga

A célula de carga foi a principal variável avaliada durante os testes na planta piloto, para acompanhamento da estabilidade do processo. O gráfico apresentado na Figura 11 representa a variação da célula de carga para o cenário *Stringer* (cenário 1) e a Tabela 3 mostra as principais características dos 3 primeiros ensaios realizados.

Com o objetivo de estabilizar os parâmetros definidos para validação dos testes e posteriormente fazer a amostragem, mais de um ensaio foi realizado para cada cenário.

Figura 11: Controle Célula de Carga - Cenário *Stringer* (Teste A, B e C)



Fonte: Relatório Interno

Tabela 3: Características para o Cenário *Stringer* (Teste A, B e C)

Cenário	Teste	Fluxo	Qtd.	kg/30 min	kg/h	%CC	Balança	Altura	Enchimento(%)	Tempo
1	A	Britado Carrinhos	24	313,3 960	626,6 1920	33	1,05	1,26	22,4	30
	B	Britado Carrinhos	24	343,6 960	687,2 1920	36	1,01	1,28	21,1	30
	C	Britado Carrinhos	26	399,9 1040	799,8 2080	38	1,22	1,2	26,6	30

Fonte: Relatório Interno

Devido a variação da média móvel é possível observar a não estabilidade do processo, sendo necessário novos testes (Figura 12). Para alcançar o resultado esperado, foram recalculadas as massas necessárias na alimentação a fim de manter o grau de enchimento desejado. No início do ensaio os parâmetros foram medidos e após 83,3 minutos o teste foi pausado e uma nova

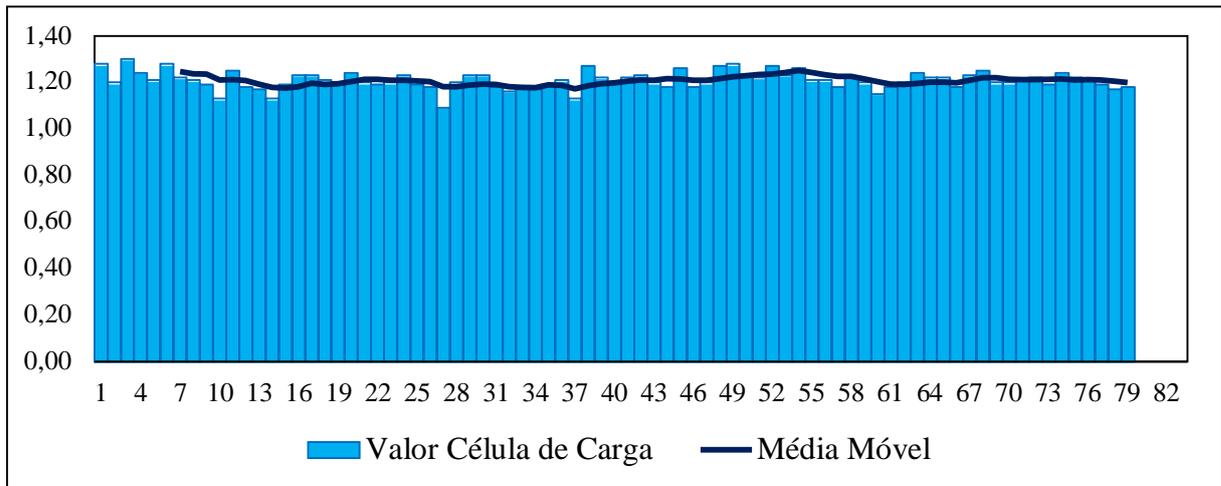
medição foi feita, ambos os valores estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4: Características do teste para o Cenário *Stringer* (Teste D)

Cenário	Teste	Fluxo	Qtd	kg/30 min	kg/h	%CC	Balança	Altura	Enchimento(%)	Tempo
1	D	Britado Carrinhos	66	941 2640	677,8 1902	36	<b>1,28</b> 1,18	<b>1,2</b> 1,23	<b>26,6</b> 24,4	<b>Começo</b> 83,3

Fonte: Relatório Interno

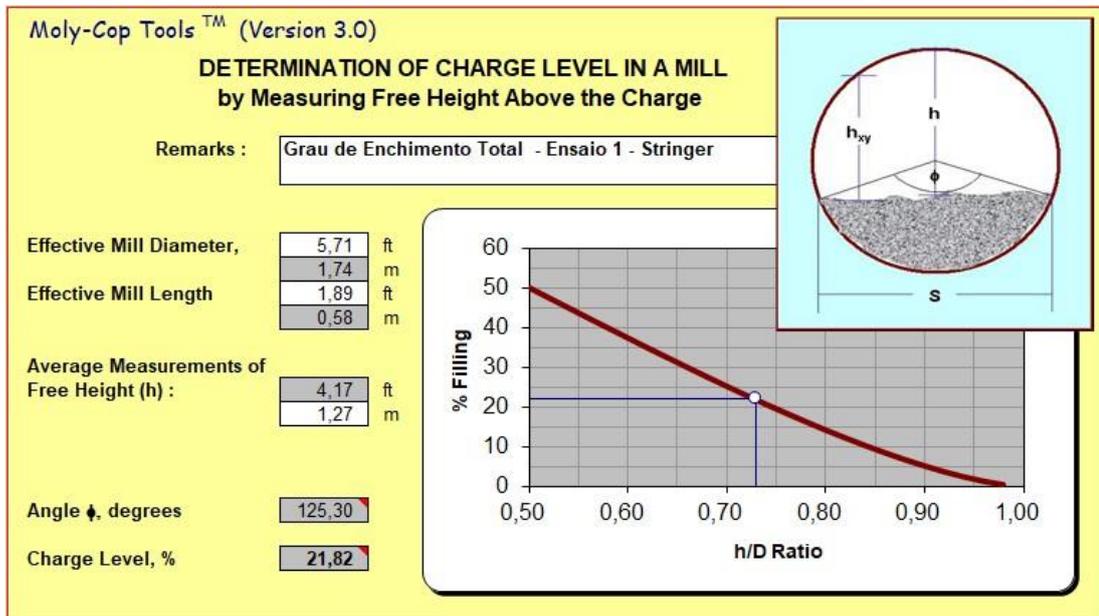
Figura 12: Controle Célula de Carga - Cenário *Stringer* (Teste D)



Fonte: Relatório Interno

Atingido o objetivo de controle do processo e estabilização dos parâmetros o teste se torna válido para avaliações e comparações com os testes de bancadas e resultados que auxiliem no início do processo em escala industrial. Foi feito o cálculo do grau de enchimento pelo método da altura livre para validar os resultados obtidos em campo (Figura 13).

Figura 13: Verificação do Grau de Enchimento



Fonte: Relatório Interno

O mesmo processo de estabilização dos parâmetros e coleta de amostras, foram feitos para o minério *Stratabound*.

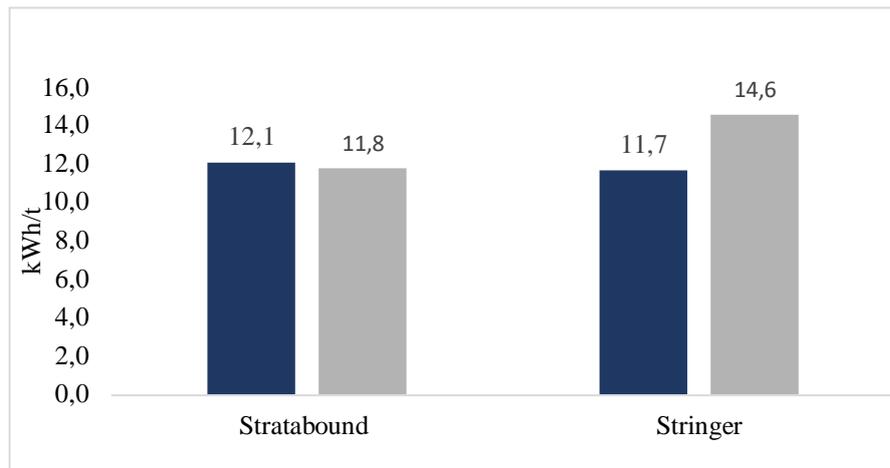
#### 4.2. Características das Amostras

Com todas as amostras coletadas para ambos os tipos de minérios, o material foi levado para ensaios de DWT e BWi a fim de se fazer o tratamento de dados. Com os resultados obtidos, parâmetros descritos anteriormente de tenacidade a moabilidade nos dados do projeto, foram indicados nos testes da planta piloto com resultado diferente para o minério *Stringer*. Valores de BWi indicam a quantidade de energia gasta para moagem de um material e devido os outros resultados obtidos para o mesmo minério, como índice de redução e taxa de alimentação, é possível que tenha existido alterações no teste de BWi, fazendo com que não representem a realidade. Além disso o histórico de dados, além da descrição geológica sugerem que o material *Stringer* seja mais tenaz que o *Stratabound*. Os dados de BWi são demonstrados na Figura 14 e a Tabela 5.

Tabela 5: Resultados teste de BWi para *Stringer* e *Stratabound*

BWi Teste Piloto		BWi Teste Anterior	
<i>Stratabound</i>	<i>Stringer</i>	<i>Stratabound</i>	<i>Stringer</i>
12,1	11,7	11,8	14,6

Fonte: Relatório Interno

Figura 14: Resultado de BWi para *Stringer* e *Stratabound*

Fonte: Relatório Interno

Além dos testes de BWi e DWT as análises granulométricas nas amostras foram feitas e com isso foi possível confirmar a necessidade da confecção da barreira para acúmulo de material na alimentação do britador de mandíbulas.

### 4.3. Resultados Preliminares

A Tabela 6 foi confeccionada pela equipe de engenharia de processos, compilando os resultados obtidos nos testes de campanha piloto.

Tabela 6: Resultados para os 5 cenários propostos

		Strata (Piloto)	Stringer (Piloto)	85%/15 %	70%/30 %	100%Strata F80=130m m
Vazão	t/h	2,44	1,902	2,441	2,387	2,353
Ecs operacional (potência do pinhão)	k Wh/t	4,41	5,57	4,48	4,48	4,74
Potência medida (motor)	kW	14,99	14,8	15,2	14,9	15,43
Potência calculada (pinhão)	kW	10,8	10,6	10,9	10,7	11,1
Grau de enchimento total	%	<b>21,8</b>	26	25,7	25,5	26,5
SG	t/m <sup>3</sup>	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65
F80	µm	107921	107921	107921	107291	127875
T80	µm	2354	3858	1766	3372	2840
Taxa de alimentação (ajustada)	t/h	2,6	1,7	2,21	2,18	2,07
IR	-	<b>46</b>	<b>28</b>	<b>61</b>	<b>32</b>	<b>45</b>
A.b	-	68,74	44,35	63,98	59,7	68,74
DWI	kWh/m <sup>3</sup>	3,86	5,98	4,14	4,44	3,86
DWI/SG	kWh/t	1,45	2,25	1,56	1,68	1,45
f(DWI/SG)	kWh/t	12,59	17,9	13,34	14,1	12,59
T80 -> (x2)	µm	2354	3858	1766	3372	2840
p(F80)		-0,403	-0,403	-0,403	-0,403	-0,423
p(T80)		-0,297	-0,299	-0,297	-0,198	-0,298
Ecs estimada [f(A.b;F80;T80)]	kWh/t	4,31	5,13	5,04	4,25	4,15
Ecs observada (pinhão)	kWh/t	4,41	5,57	4,48	4,48	4,75

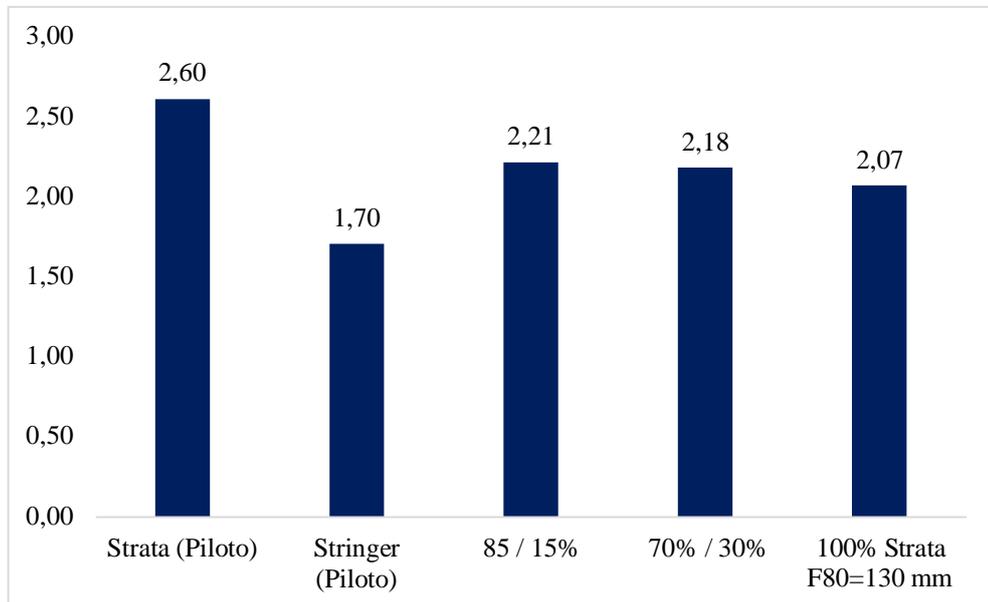
Fonte: Relatório Interno

É possível observar que o monitoramento da célula de carga para acompanhar o grau de enchimento do moinho SAG foi bem assertivo, apenas no primeiro teste com a amostra *Stratabound* que o valor se mostra mais distante do definido. A adição do minério *Stringer*, considerado o mais tenaz, resulta na diminuição dos valores de vazão e taxa de alimentação a medida que a sua proporção aumenta. Confirmando que as suas características mineralógicas contribuem para uma redução da moabilidade.

Os valores de tamanho de transferência ( $T_{80}$ ) significam o tamanho em que 80% das partículas do produto do SAG são passantes. Sugerindo tamanhos de partículas maiores nos cenários que apresentam maiores quantidades de *Stringer*.

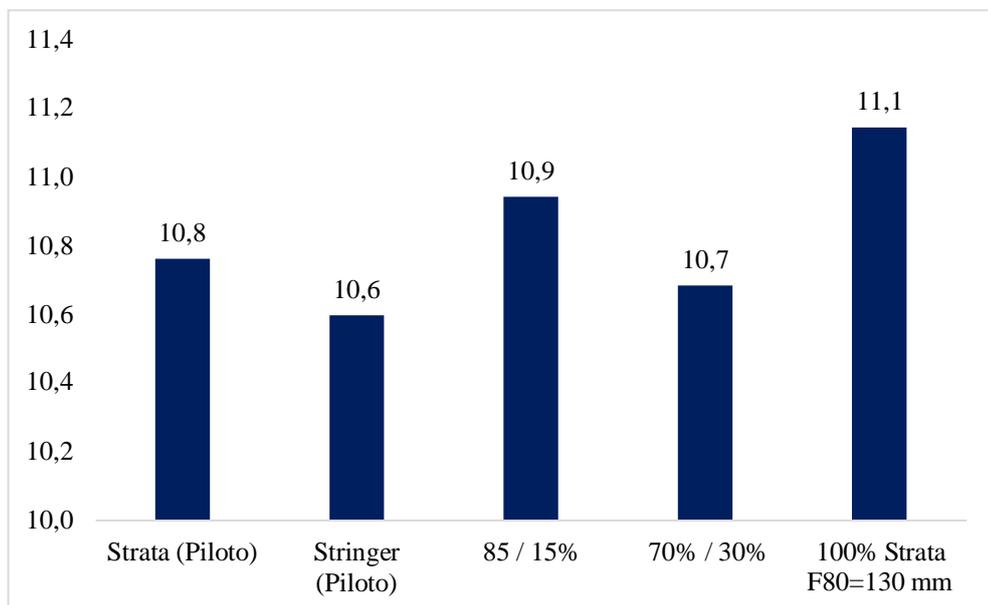
Outras características foram analisadas durante o teste, como potência no pinhão de acordo com a taxa de alimentação, como demonstrado na figura 15 e 16.

Figura 15:Taxa de Alimentação (t/h)



Fonte: Relatório Interno

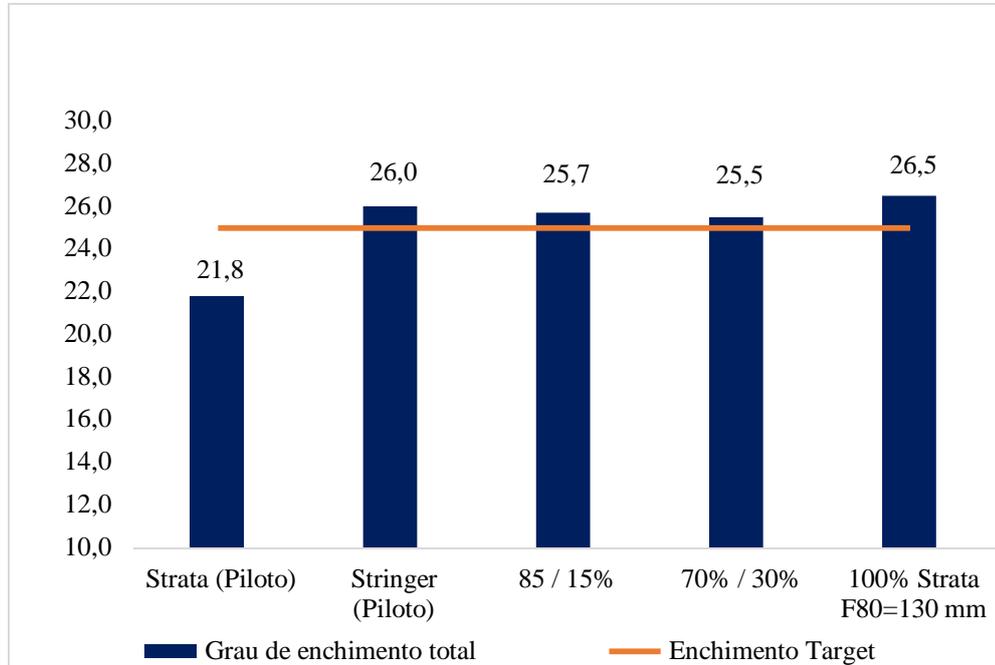
Figura 16: Potência Calculada (KWh)



Fonte: Relatório Interno

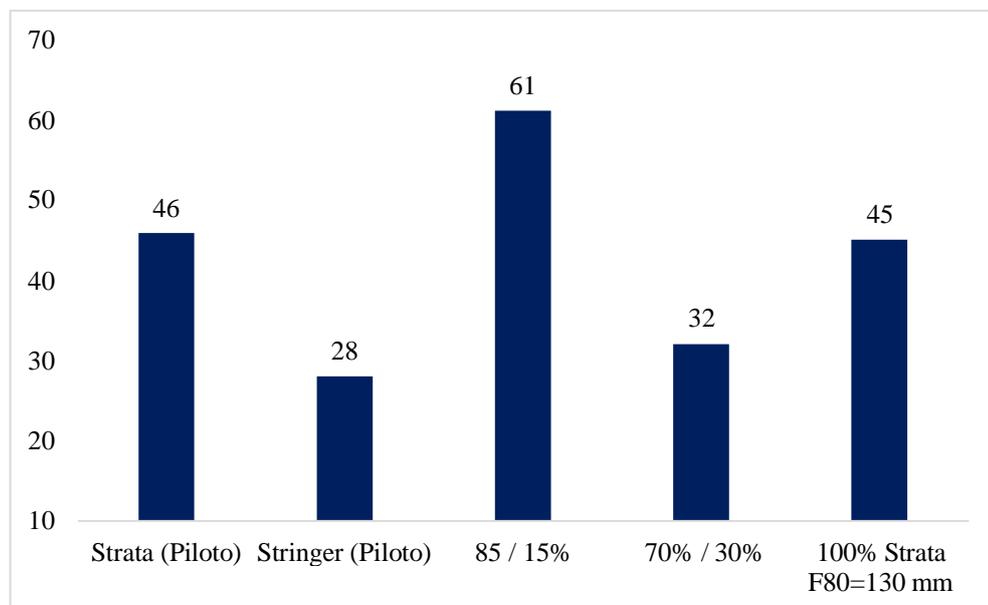
Na figura 17 é possível observar o grau de enchimento total medido na figura 18 e o Índice de Redução versus Blend.

Figura 17: Enchimento Total - Medido



Fonte: Relatório Interno

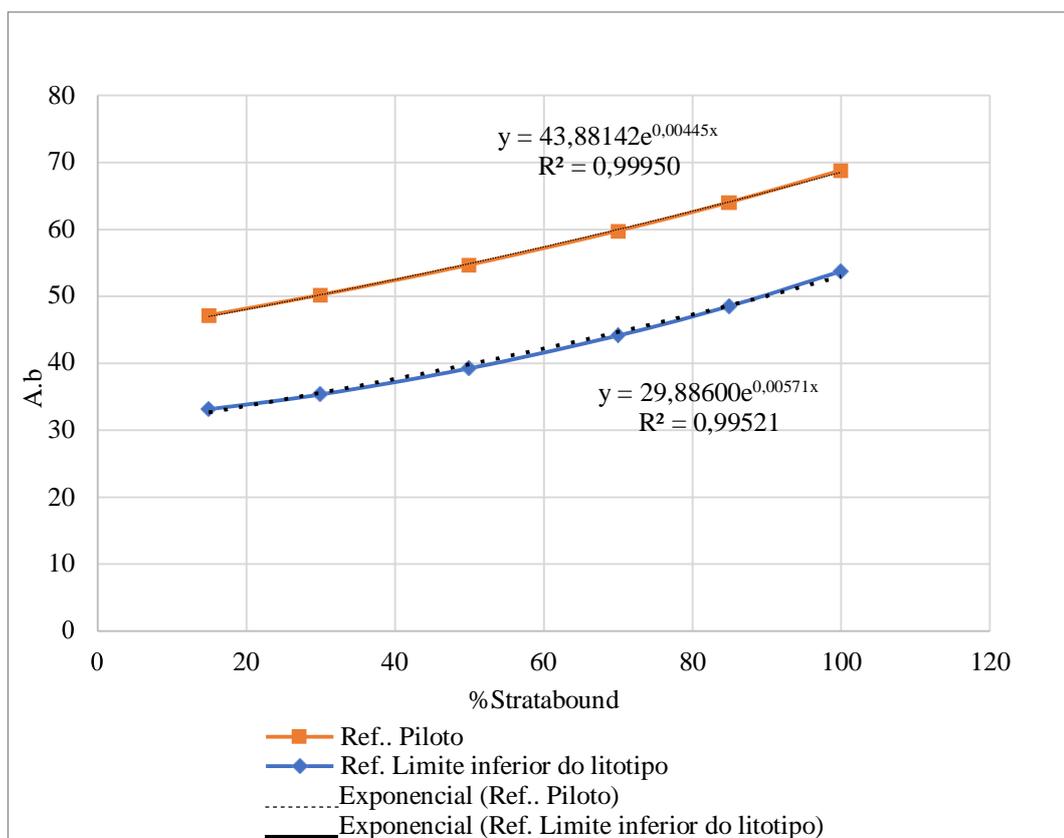
Figura 18: Índice de Redução



Fonte: Relatório Interno

Com a análise da figura 19 é possível observar que os valores de parâmetros de A.b acompanham o aumento gradativo de minério *Stratabound*, indicando assim maior moabilidade. O resultado encontrado confirma, como apresentado anteriormente, que o minério *Stratabound* apresenta características mineralógicas que proporcionam uma facilidade de moagem.

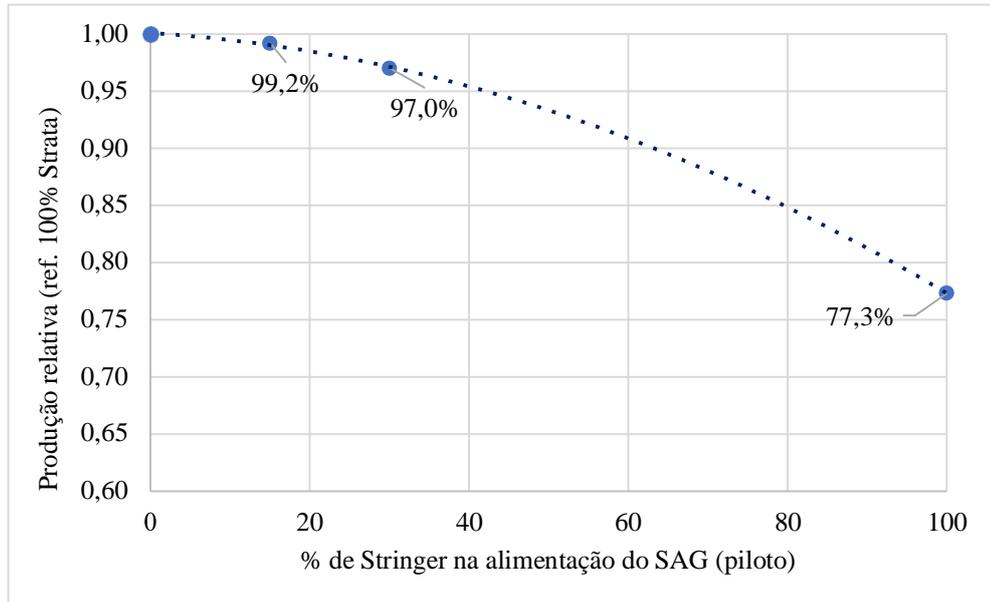
Figura 19: Relação de A.b com a %*Stratabound*



Fonte: Relatório Interno

Outro fator importante que foi estudado, está relacionado com a quantidade de material *Stringer* que, devido a suas características, apresenta ser um material com mais resistência a moagem. A Figura 19 apresenta a influência do material *Stringer* no blend para os resultados de produção, quando comparado com 100% de *Stratabound*. Observa-se que a produtividade reduziu de 100%, contendo apenas *Stratabound*, para 77,5%, contendo apenas *Stringer*.

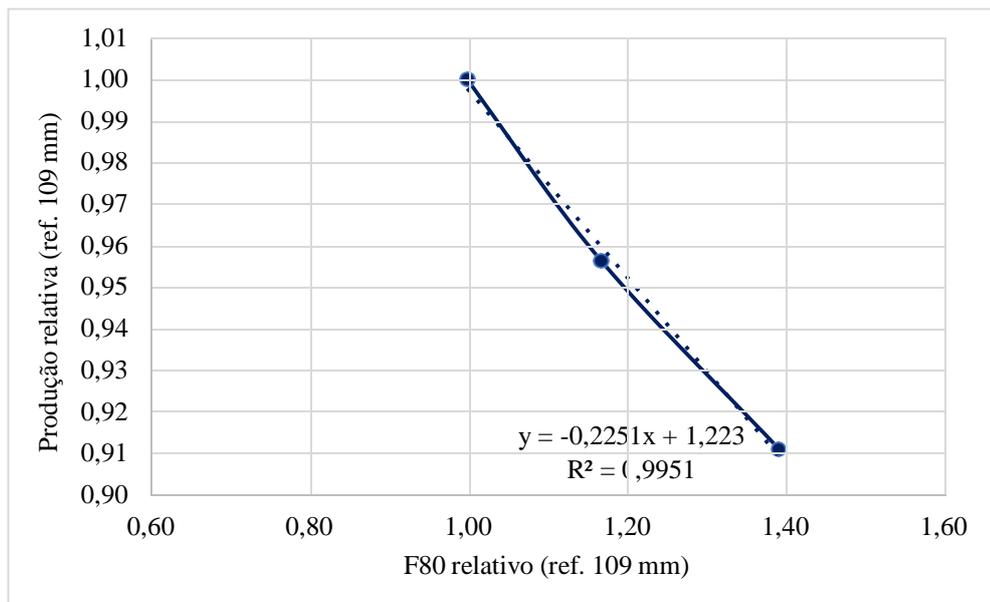
Porém, como exemplo, o cenário de 70/30 *Stratabound/Stringer* essa correlação é de 97,0%. Obviamente, o incremento de pontos ajustaria a curva. De todo modo, é uma observação interessante para os estudos de possíveis proporções de cada minério *versus* produtividade da planta.

Figura 20: Influência da % de *Stringer* na Alimentação

Fonte: Relatório Interno

Da mesma forma foi realizado avaliação para o F80 da alimentação, o aumento em aproximadamente de 109 para 130 mm, sugere um impacto de perda de 10% da produtividade da moagem SAG, como demonstrado na figura 21.

Figura 21: Influência do F80 na vazão de sólidos máxima



Fonte: Relatório Interno

## 5. CONCLUSÃO

O *design* de uma planta de fragmentação é de fundamental importância para o sucesso do empreendimento mineral. Atualmente a utilização de moagem SAG vem ganhando mais espaço nas plantas de beneficiamento e, como já discutido, é fundamental que novos projetos avaliem as diversas possibilidades de equipamentos que se adequem melhor a suas características.

Além de um bom projeto, com *design* efetivo de um circuito de processo, testes devem ser realizados com o objetivo de facilitar a operação no período inicial da usina de beneficiamento em questão e conseqüentemente a fase posterior de operação. Os testes de bancada são essenciais, porém testes em escala piloto contribuem agregando resultados mais próximos da realidade, auxiliando na possível determinação de parâmetros.

No caso estudado uma das principais preocupações estava relacionada com as proporções de minério *Stratabound* e *Stringer* nos *blends* de alimentação da planta e a influência dessas proporções na produtividade. Conclui-se com os testes que ao avaliar os resultados de DWT existe uma diferença de moabilidade considerável para os dois minérios estudados, implicando que conseqüentemente existe uma diferença significativa de resistência ao impacto. Visto que ao comparar a produtividade relativa de 100% *Stratabound* para 100% *Stringer*, houve um decréscimo relativo de 22,7%. Este fato precisa ser bem avaliado na escolha das proporções alimentadas na usina, pois pode gerar uma perda de produtividade.

Os resultados para o teste de BWi na campanha piloto se mostram positivos, uma vez que os números se aproximam. Porém como explicitado anteriormente é possível que interferências possam ter modificado os valores, já que outros parâmetros (taxa de alimentação e índice de redução) analisado não condizem ou acompanham essa redução de BWi que sugeriria maior facilidade para moer.

De modo geral, pode-se observar os parâmetros alterados de acordo com as modificações de proporção das misturas sugeridas para cada minério. Dentre os resultados destaca-se a necessidade de acompanhar com proximidade o aumento na alimentação do minério *Stringer*. Os parâmetros como vazão, taxa de alimentação e índice de redução se mostram bastante reativos com o aumento do minério de maior tenacidade, fatores de fundamental importância na cominuição mineral.

Outro cenário analisado foi a modificação do  $F_{80}$  na alimentação da moagem SAG, de 109mm

para 130mm, no minério *Stratabound*. Como demonstrado, foi analisado uma redução de quase 10% na produtividade, assim possíveis reduções do  $F_{80}$  podem ser futuramente estudadas para maximizar a taxa de alimentação no moinho SAG.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERGERMAN, Maurício Guimarães. **DIMENSIONAMENTO E SIMULAÇÃO DE MOINHOS VERTICAIS**. 2013. 282 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Minas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- BERGERMAN, Maurício Guimarães. **MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO CIRCUITO DE MOAGEM DO SOSSEGO**. 2009. 207 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- CARVALHO, Marly de Ávila. **Avaliação da disposição de moinhos em circuitos de moagem de minério de ferro**. 2015. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.
- DELIBERATO NETO, Octavio. **SISTEMA PARA SIMULAÇÃO DINÂMICA DE CIRCUITOS DE BRITAGEM**. 2007. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- DIMENSIONAMENTO DOS BRITADORES DA COOPERATIVA DOS GARIMPEIROS DE PEDRA LAVRADA-PB**. Recife: Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 12, n. 3, 2020.
- E. C. Silva, G. S. Maia, H. D. Júnior. DIMENSIONANDO CIRCUITOS DE MOAGEM SAG: A EXPERIÊNCIA DO CENTRO DE DESENVOLVIMENTO MINERAL DA CVRD. In: ENTMME, 19., 2002, Recife. **Congresso**. Recife: ., 2002. p. 168-174.
- E.B. de Jesus, L.R.P. de Andrade Lima, E.A. Alves Junior. AVALIAÇÃO DO CIRCUITO DE MOAGEM CLASSIFICAÇÃO E CONCENTRAÇÃO GRAVIMÉTRICA DA JACOBINA MINERAÇÃO E COMÉRCIO. In: ENTMME, 24, 2011, Salvador. **Congresso**. Salvador, 2011. p. 456-465.
- FELIPE, Rafael Alves de Souza. **MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO CIRCUITO DE BRITAGEM DE CÓRREGO DO SÍTIO I COM DESENVOLVIMENTO DE MODELO PARA MOINHO DE MARTELOS**. 2019. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.
- FIGUEIRA, Hedda Vargas O.; LUZ, Adão Benvindo da; ALMEIDA, Salvador Luiz Matos de. BRITAGEM E MOAGEM. In: LUZ, Adão Benvindo (Ed.); SAMPAIO, João Alves (Ed.); ALMEIDA, Salvador Luiz Matos (Ed.). Tratamento de Minérios 2010. 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 932p.

FRANÇA, Fernanda Aucar. **ECO-EFICIÊNCIA DE CIRCUITOS DE COMINUIÇÃO**. 2011. 79 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

JUNIO, L.T. Santos; GOME, M.P.D.; GOMIDE, R.B.; PIGNATO, T.V.; PHILLIP, W.. KINROSS PARACATU, START-UP E OTIMIZAÇÃO DO CIRCUITO DE MOAGEM SAG. In: ENTMME, 24., 2011, Salvador. **Congresso**. Salvador: ., 2011. p. 432-439.

KARAGEORGOS, J.; ROHNER, P.; BURFORD, B.; VALERY JUNIOR, W.. **COPPER CONCENTRATOR AUTOGENOUS GRINDING PRACTICES AT MOUNT ISA MINES LIMITED**. Brisbane: Cim, 1996.

LEITE, Thiago de Oliveira Nunan. **MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO CIRCUITO DE MOAGEM DA MINERAÇÃO SERRA GRANDE**. 2016. 195 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

MALA, João Pedro. **Faturamento do setor de mineração do Brasil sobe 62% em 2021, diz levantamento**. 2022. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/faturamento-do-setor-de-mineracao-do-brasil-sobe-62-em-2021-diz-levantamento/>. Acesso em: 10 set. 2022.

MAZZINGHY, Douglas Batista. **MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE CIRCUITO DE MOAGEM ATRAVÉS DA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE QUEBRA E DA ENERGIA ESPECÍFICA DE FRAGMENTAÇÃO**. 2009. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

MAZZINGHY, Douglas Batista; SCHNEIDER, Cláudio Luiz. EXISTEM DIFERENÇAS SIGNIFICATIVAS ENTRE OS CIRCUITOS DIRETO E REVERSO DE MOAGEM, **Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 11, n. 4, p. 311-315, out. 2014.

PEREIRA, Pedro Eduardo da Cunha. **Comparação entre diferentes testes de moagem SAG para determinação da energia unitária para cominuição de minérios sulfetados de cobre**. 2004. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

PUTLAND, Brian; KOCK, Fred; SIDDALL, Leigh. **SINGLE STAGE SAG/AG MILLING DESIGN**. Perth: Orway Mineral Consultants, 2005.

ROSA, Andreia Carolina. **DESEMPENHO DOS CIRCUITOS DE MOAGEM DIRETO E INVERSO DA SAMARCO**. 2013. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SALAZAR, Juliana Segura. **COMPARAÇÃO DE ROTAS DE COMINUIÇÃO ITABIRÍTICO USANDO DE ROTAS DE COMINUIÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO ITABIRÍTICO USANDO CONCEITOS DE SUSTENTABILIDADE E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**. 2014. 202 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

SCHMITT, Raoul. **A Geometallurgical Approach Towards the Correlation Between Rock Type Mineralogy and Grindability: A case study in Aitik mine, Sweden**. 2021. 113 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engineering Division Of Minerals And Metallurgical Engineering, Lulea University Of Technology, Suécia, 2021.

SILVA, Anatólia Lara; MOURA, Armando José; DELBONI JUNIOR, Homero; AMARAL JUNIOR, Edvaldo Alves. ESTUDOS DE OTIMIZAÇÃO DO CIRCUITO DE COMINUIÇÃO PARA JACOBINA MINERAÇÃO E COMÉRCIO. In: ENTMME, 24., 2011, Salvador. **Congresso**. Salvador: 2011. p. 407-415.

TEIXEIRA, Henrique Gonçalves. **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA DIMENSIONAMENTO, ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DE CIRCUITOS DE PREPARAÇÃO DE MINÉRIOS**. 2013. 188 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

VARELA, James. CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DE BRITADORES APLICADOS AO PROCESSAMENTO MINERAL. In: ENTMME, 24, 201, Salvador. **Congresso**. Salvador:, 2011. p. 384-391.