

**ANA LUÍSA PRATA PENTEADO**

**SIMULAÇÕES DE DESEMPENHO DE CIRCUITO DE BRITAGEM DE MINÉRIO DE  
NIÓBIO**

**São Paulo**

**2015**

**ANA LUÍSA PRATA PENTEADO**

**SIMULAÇÕES DE DESEMPENHO DE CIRCUITO DE BRITAGEM DE MINÉRIO DE  
NIÓBIO**

Trabalho de Formatura em Engenharia  
de Minas do curso de graduação do  
Departamento de Engenharia de Minas e  
de Petróleo da Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Homero Delboni Jr.

**São Paulo**

**2015**

TF-2015  
P387<sub>A</sub>

Sycho 2753949

H 2015 b

**DEDALUS - Acervo - EPMI**



31700009994

**Catálogo-na-publicação**

Penteado, Ana Luísa  
Simulações de Desempenho de Circuito de Britagem de Minério de Nióbio /  
A. L. Penteado -- São Paulo, 2015.  
42 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São  
Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

1.Britagem 2.Indicadores de Produtividade I.Universidade de São Paulo.  
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo II.t.

Dedico este Trabalho de Formatura a meu pai.  
Que sua luz ilumine meu próximo caminho, como iluminou o que me trouxe até aqui.

## AGRADECIMENTOS

À HDA, pelo fornecimento de toda a base de dados utilizada neste trabalho.

Ao meu professor e orientador, Homero Delboni Jr., por toda a ajuda, instrução e paciência. Agradeço também, a Thiago Jatobá e Wellington Lacerda Gomes por todo o auxílio durante o processo.

A todos os professores que passaram pela minha formação, por me ajudarem a me tornar quem sou, muito além da minha vida acadêmica.

Aos meus colegas de faculdade, que cresceram e amadureceram comigo durante todos os meus anos de graduação.

A meus amigos e família, que me ajudaram a ter forças para passar pelos melhores e piores momentos da minha vida.

Um agradecimento especial à minha mãe, Denise, que me mostrou o significado de ser forte, e me deu inspiração quando achei que o próximo passo seria desistir!

Obrigada por tudo!

“[...] Onde houver ódio, que eu leve o amor,  
Onde houver ofensa, que eu leve o perdão,  
Onde houver discórdia, que eu leve a união,  
Onde houver dúvidas, que eu leve a fé,  
Onde houver erro, que eu leve a verdade,  
Onde houver desespero, que eu leve a esperança,  
Onde houver tristeza, que eu leve a alegria,  
Onde houver trevas, que eu leve a luz. [...]”

(“Oração da Paz”, Autor Anônimo)

## RESUMO

Com base nas informações referentes a uma usina de britagem de minério de nióbio, localizada na região de Catalão (GO) foi possível identificar-se os pontos em que os fatores de desempenho que poderiam ser melhorados. A partir deste ponto, foram criados cenários de simulação, que mostraram quais alterações trariam os melhores resultados para a planta. Esses cenários foram alvo de duas abordagens diferentes. A primeira delas, mais simples, teve por base em conta apenas o balanço de massa resultante, partindo-se sempre do princípio de conservação de massa ao longo de cada etapa do circuito e da definição de eficiência de peneiramento. Já a segunda incluiu as distribuições granulométricas resultantes das alterações sugeridas. Para tanto, foi preciso utilizar o conceito de imperfeições da malha, para obter-se a distribuição de massa de cada malha entre as frações resultantes. Para o caso em que haveria alteração na APF do britador utilizou-se a distribuição granulométrica do Manual da Metso (2005) para os produtos dos britadores da série HP. As duas abordagens foram realizadas separadamente, mas as interpretações dos resultados levaram em conta o conjunto, concluindo-se de que o cenário mais adequado seria aquele em que houvesse mudança da APF do britador secundário. Por fim, foram descritas algumas mudanças na operação dos equipamentos, que poderiam resultar nas alterações previstas.

Palavras-chave: Tratamento de Minérios. Britagem. Índices de Desempenho.

## ABSTRACT

Based on the information relating to a fresh rock comminution niobium plant, located in the surroundings of Catalão (GO), it was possible to identify areas where performance factors (such as sieving efficiency and crushers' APF) could be improved. From then on, some scenarios were created, showing the changes that could bring the best results for the plant. Those scenarios were the subject of two different approaches. The first one, more simple-minded, took into account only the resulting mass balance. The second one considered, further than the mass balance, the particle size distribution resulting from the suggested changes. Despite both scenarios were held separately, the interpretation of the results took both into account as a set. Finally, some changes in the process were described as possible performance index changers.

Palavras-chave: Mineral's Processing. Niobium. Permormance Index.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Movimento das Mandíbulas do Britador de Mandíbulas de 2 eixos e do Britador de Mandíbulas de 1 eixo. ....	13
Figura 2: Britador de Mandíbulas de 1 Eixo. ....	14
Figura 3: Britador Cônico. ....	14
Figura 4: Ilustração das Configurações Standard (a) e Cabeça Curta (b) dos Britadores Cônicos. ....	15
Figura 5 - Curvas granulométricas dos produtos dos britadores Série C da Metso. ....	17
Figura 6 - Circuito Clássico de Cominuição. ....	18
Figura 7: Representação de um Circuito Fechado Normal e Reverso. ....	19
Figura 8: Ilustração de uma Peneira Inclinada. ....	20
Figura 9: Comportamento Coletivo do Material Peneirado, mostrando sua estratificação. ....	21
Figura 10: Fluxograma de Processo do Circuito de Britagem. ....	23
Figura 11: Gráfico de distribuição granulométrica dos produtos dos britadores HP da Metso. ....	25
Figura 12 - Fluxograma do Caso Base da planta de rocha fresca. ....	26
Figura 13: Gráfico das curvas de distribuição granulométrica dos produtos finais dos cenários estudados e do Caso Base. ....	34
Figura 18: Gráfico da % Passante Acumulada do Peneiramento Secundário do Primeiro Cenário. ....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relação de Redução para diferentes estágios de Cominuição. ....	12
Tabela 2: Capacidade e especificações técnicas dos britadores da série C da Metso. ....	16
Tabela 3: Desempenho do Peneiramento. ....	27
Tabela 4: Desempenho das Britagens. ....	28
Tabela 5: Balanço de Massa do Caso Base. ....	29
Tabela 6: Alterações em cada cenário e o Caso Base. ....	30
Tabela 7: Demonstrativo dos resultados das simulações da primeira abordagem. ....	31
Tabela 8: Capacidades para os britadores da série HP da Metso, segundo seus valores de APF.....	32
Tabela 9: Demonstrativo dos resultados das simulações da segunda abordagem.....	33
Tabela 10: Comparativo dos <i>Topsizes</i> e dos P80 obtidos com cada cenário. ....	33
Tabela 11: Cálculo das Imperfeições das Malhas do Peneiramento Secundário. (Continua) ..	37
Tabela 12: Cálculo das Imperfeições das Malhas do Peneiramento Secundário. (Conclusão)	38
Tabela 13: Cálculo das Imperfeições das Malhas do Peneiramento Terciário. (Continua) .....	39
Tabela 14: Cálculo das Imperfeições das Malhas do Peneiramento Terciário. (Conclusão)...	40
Tabela 15: Cálculo do Balanço de Massa do Peneiramento Secundário do Cenário 1. (Continua).....	41
Tabela 16: Cálculo do Balanço de Massa do Peneiramento Secundário do Cenário 1. (Continuação).....	41
Tabela 17: Cálculo do Balanço de Massa do Peneiramento Secundário do Cenário 1. (Conclusão) .....	42

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APA: Abertura na posição aberta.

APF: abertura na posição fechada

O/S: *Oversize*

ROM: *Run of Mine*

U/S: *Undersize*

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	11
2.	OBJETIVOS.....	11
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
3.1.	BRITAGEM .....	11
3.1.1.	EQUIPAMENTOS .....	12
3.1.1.1.	BRITADORES DE MANDÍBULAS.....	12
3.1.1.2.	BRITADORES CÔNICOS .....	14
3.1.2.	SELEÇÃO DE BRITADORES .....	15
3.1.2.1.	CONDIÇÃO DE RECEPÇÃO.....	15
3.1.2.2.	CONDIÇÃO DE PROCESSO .....	16
3.1.2.3.	CAPACIDADE .....	17
3.2.	CIRCUITO CLÁSSICO DE COMINUIÇÃO .....	17
3.3.	PENEIRAMENTO.....	19
3.3.1.	PENEIRAS INCLINADAS VIBRATÓRIAS .....	20
3.3.2.	MECANISMO DO PENEIRAMENTO.....	20
3.3.3.	EFICIÊNCIA DO PENEIRAMENTO .....	22
3.3.4.	IMPERFEIÇÃO DAS MALHAS DO PENEIRAMENTO .....	22
4.	METODOLOGIA .....	23
5.	DESCRIÇÃO DO CASO ESTUDADO .....	25
6.	APRESENTAÇÃO DOS DADOS.....	27
7.	RESULTADOS .....	30
8.	CONCLUSÕES.....	34
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	36
	APÊNDICE A .....	37
	APÊNDICE B .....	39
	APÊNCIDE C .....	41

## 1. INTRODUÇÃO

Um dos maiores depósitos de pirocloro foi descoberto em 1950 no Brasil. Ele está localizado em Araxá (MG) e está sendo lavrado pela CBMM. Porém, existem, ainda, outros depósitos importantes no país. Um deles está localizado nos arredores de Catalão (GO)

A mina de nióbio localizada na região possui produção nos municípios de Catalão e de Ouvidor tem sua lavra realizada em uma mina à Céu Aberto em Catalão (GO).

Após a lavra, o material segue para as usinas de beneficiamento, sendo que a mais recente delas recebe o material proveniente da, assim denominada, “Rocha Fresca”.

O processo desse circuito de britagem foi alvo do estudo realizado a partir de uma série de simulações realizadas a partir de alterações nas eficiências dos peneiramentos e das aberturas dos britadores.

Este tipo de abordagem é prática corrente na indústria. Como exemplo, tem-se a dissertação de Foggiatto (2009), que realizou um estudo do desempenho do circuito de moagem de Carajás, de forma a aumentar a recuperação mássica e a produtividade do circuito.

## 2. OBJETIVOS

Com base na configuração atual do Circuito de Britagem da Planta de Beneficiamento de Rocha Fresca, foi efetuada uma análise detalhada da eficiência do peneiramento e da abertura dos britadores.

Assim, foram analisados, a partir de um caso base, novos cenários para o circuito, a fim de obter-se o que traria um melhor resultado final, dentro das limitações já existentes do processo.

Feitas as análises, foram interpretados os resultados, a fim de analisar sua viabilidade, bem como maneiras de alcançá-los no dia-a-dia.

O objetivo do presente trabalho foi, portanto, simular diferentes cenários a partir de um caso inicial e definir qual o resultado que mais favorece um desempenho adequado do circuito de britagem selecionado.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1. Britagem

As operações de britagem estão associadas fortemente ao conceito de cominuição, a qual tem a função de reduzir o tamanho de partículas minerais a fim de cumprir com determinado objetivo. Para tanto, deve-se dar atenção às exigências de *topsize* e geração de finos dos produtos requeridos.

Para Chaves e Peres (2009), a britagem, bem como as outras operações de cominuição, é necessária para permitir manuseio, transporte contínuo (em correias transportadoras, por exemplo), utilização do minério (cada situação requer certa granulometria) e liberação dos

minerais úteis e dos de ganga, o que por sua vez, permite a separação com processos de concentração.

Durante a britagem, as partículas presentes no processo ficam sujeitas às forças de compressão e de impacto, dependendo do equipamento utilizado. O processo exige certo volume de partículas para poder ocorrer, de modo que se adequem bem a tamanhos maiores. As partículas resultantes apresentam cubicidade e faces relativamente planas.

Sobre as relações de redução mais comuns na britagem, tem-se que elas são tradicionalmente menores se comparadas a processos de cominuição como a moagem. Porém, a britagem quaternária e a moagem grosseira se superpõem no que se refere a faixa de tamanhos. A Tabela 1 retrata as faixas de relação de redução para cada etapa da cominuição.

**Tabela 1: Relação de Redução para diferentes estágios de Cominuição.**

<b>Estágio</b>	<b>Relação de Redução</b>
Britagem Primária	8:1
Britagem Secundária	6 a 8:1
Britagem Terciária	4 a 6:1
Britagem Quaternária	Até 20:1
Moagem Grosseira	Até 20:1
Moagem Fina	Entre 100 e 200:1

Fonte: Chaves e Peres (2009)

### **3.1.1. Equipamentos**

Existem diversos tipos de britadores, porém, como no circuito estudado existem apenas britadores de mandíbulas e cônicos, somente esses modelos foram abordados.

#### **3.1.1.1. Britadores de Mandíbulas**

Nos britadores de mandíbulas, a energia aplicada nas partículas é feita por meio da compressão das mandíbulas. Existem dois tipos, o de dois eixos e o de um eixo.

Segundo Chaves e Peres (2009), o britador de dois eixos funciona com o movimento recessivo de sua mandíbula móvel em relação à mandíbula fixa. Uma dimensão de extrema importância é o “gape”, que é a distância entre as mandíbulas na extremidade do britador e que deve ser grande o suficiente para que os maiores blocos sejam capazes de passar.

Na câmara de britagem, os blocos são comprimidos durante a aproximação das duas mandíbulas, segue-se, então, um movimento de afastamento durante o qual as partículas escoam para baixo até que fiquem retidas e sejam comprimidas novamente. Este ciclo se repete até que o escoamento seja feito para fora do equipamento.

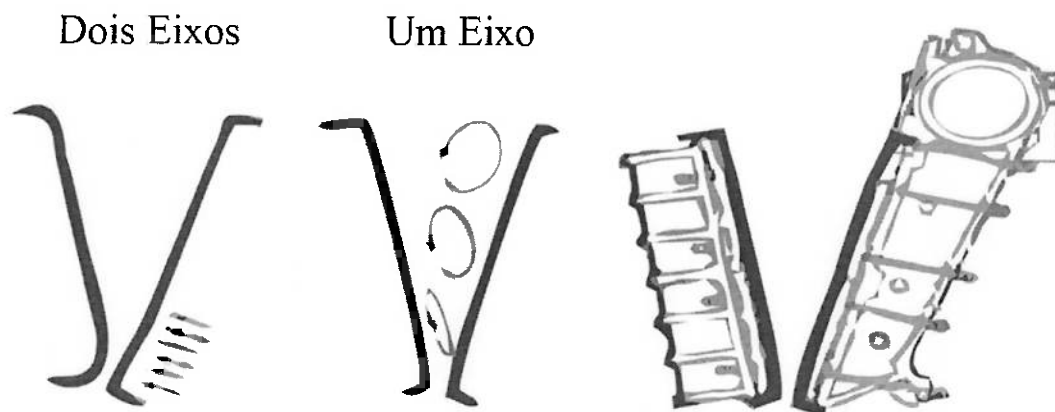
O britador de dois eixos promove movimento de afastamento e aproximação entre as mandíbulas.

Já o britador de um eixo, segundo Wills (2006), se difere do de dois eixos no fato do equipamento ser mais compacto e no movimento das mandíbulas. No britador de mandíbulas

de um eixo, o deslocamento do eixo móvel não somente promove afastamento e aproximação, como também movimento vertical, conforme o eixo excêntrico gira, gerando um movimento elíptico.

O movimento dos dois tipos de britadores de mandíbulas está retratado na Figura 1.

**Figura 1: Movimento das Mandíbulas do Britador de Mandíbulas de 2 eixos e do Britador de Mandíbulas de 1 eixo.**



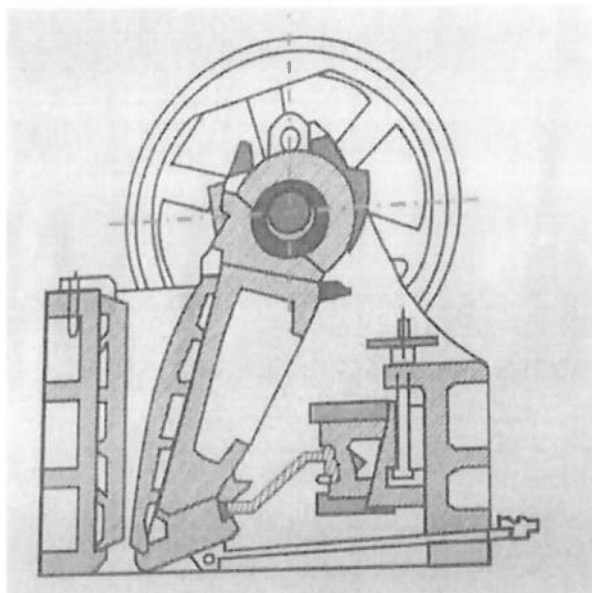
Fonte: Mular, Halbe e Barrat (2002) *apud* Utley.

Assim, o movimento elíptico da mandíbula móvel assiste o material a ser comprimido, favorecendo o surgimento de forças de atrito entre as mandíbulas e as partículas. Isso acarreta um aumento no desgaste do equipamento, de modo que o britador de dois eixos seja recomendável quando o material é de elevada abrasividade.

De modo geral, segundo Valadão e Araujo (2007), os britadores de um eixo apresentam maior desgaste nas placas e geram mais finos, ao passo que os de dois eixos são mais pesados, maiores e mais caros.

O britador de mandíbulas de 1 eixo encontra-se na Figura 2.

**Figura 2: Britador de Mandíbulas de 1 Eixo.**



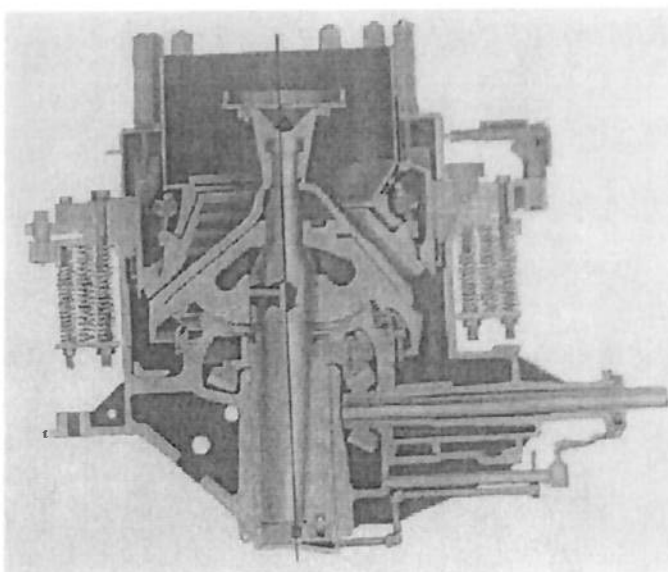
Fonte: Valadão e Araujo (2007).

#### **3.1.1.2. Britadores Cônicos**

Chaves e Peres (2009) descrevem os britadores giratórios como aqueles que possuem um cone, que é um elemento móvel. Ele se move com excentricidade, de forma que ao girar ele se aproxime e se afaste das paredes internas do manto (elemento fixo). Enquanto uma parte do cone se aproxima do manto e comprime as partículas, outra se afasta, e abre espaço para que as partículas da região desçam até ficarem retidas e, posteriormente serem fragmentadas. Isso ocorre até que o material escoe pelo fundo do equipamento.

Na Figura 3, tem-se um britador cônico.

**Figura 3: Britador Cônico.**

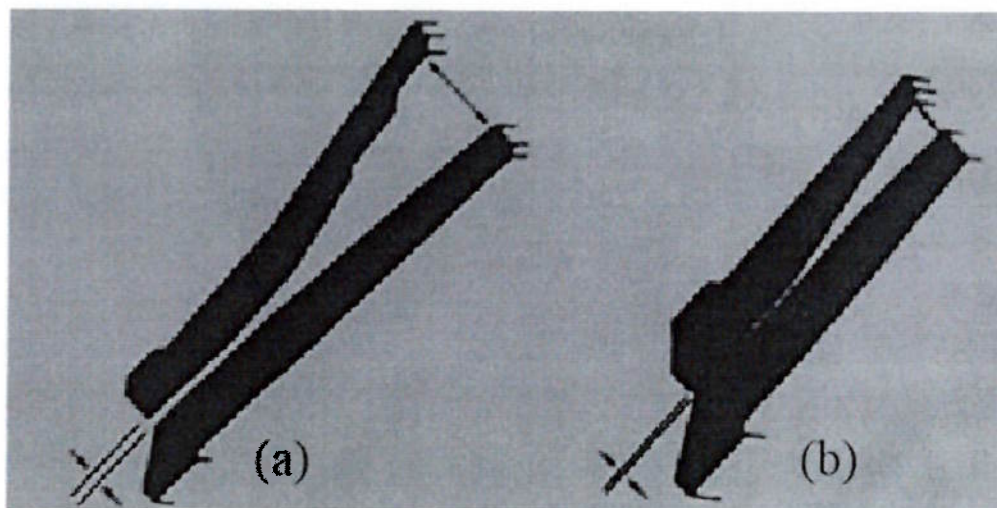


Fonte: Mular, Halbe e Barrat (2002) *apud* Major.



Segundo Wills (2006), os britadores cônicos são produzidos em duas formas, Standard e Cabeça Curta (Figura 4), sendo o primeiro para britagem secundária, resultando em um material de granulometria entre 0,5 e 6 cm e o segundo para britagem mais fina, com granulometria de 0,3 a 2 cm. Eles produzem resultados diferentes, basicamente devido ao formato da câmara de britagem.

Figura 4: Ilustração das Configurações Standard (a) e Cabeça Curta (b) dos Britadores Cônicos.



Fonte: Wills (2006).

Sendo assim, os britadores cônicos são muito comuns na britagem secundária e terciária havendo opção de escolher com o fabricante o formato de câmara desejado. Existem câmaras para grossos, médios ou finos. Alterar o tipo de câmara significa, basicamente, alterar a distribuição granulométrica do produto da britagem. Dessa maneira, pode-se conciliar a capacidade requerida com o produto requerido, o que torna o equipamento muito versátil.

Por esses motivos, os britadores cônicos são usados não só na britagem secundária, como também na terciária e quaternária.

### 3.1.2. Seleção de Britadores

Segundo Chaves e Peres (2009), os britadores são escolhidos de acordo as características do material e do circuito utilizado. Assim, alguns fatores são determinantes para seleção do equipamento mais adequado. São eles, condição de recepção, de processo e de capacidade.

#### 3.1.2.1. Condição de recepção

O equipamento deve possuir o *gape* grande o suficiente para que o maior fragmento da alimentação possa passar e adentrar na câmara de britagem, em que a britagem ocorre efetivamente.

Sendo assim, a condição de recepção é dada por:

$$G = \frac{X}{0,8 \text{ a } 0,85}$$

Em que,

G = abertura da máquina;


X = *Topsite* da alimentação do equipamento.

### 3.1.2.2. Condição de Processo

O britador escolhido deve operar de modo que gere a distribuição granulométrica estipulada. Para garantir que esse critério seja obedecido, deve-se operar o equipamento com determinada abertura. Esse fator é determinante para escolha do equipamento, pois cada um suporta apenas algumas faixas de abertura, aqui referida como APF, ou abertura na posição fechada.

A Tabela 2 retrata alguns aspectos técnicos dos britadores de mandíbulas da Série C. Entre esses fatores, encontra-se a faixa de APF estipulados para cada equipamento. Por exemplo, o modelo C80 possui as configurações de APF nos valores de 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 125, 150 e 180 mm.

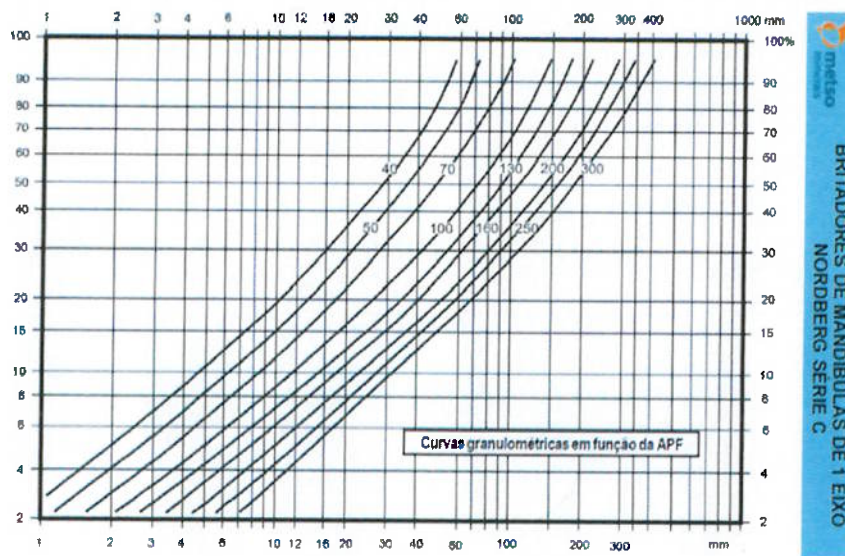
Tabela 2: Capacidade e especificações técnicas dos britadores da série C da Metso.

 <b>BRITADORES DE MANDÍBULAS DE 1 EIXO NORDBERG SÉRIE C - CAPACIDADES</b>												
APF	C63	C80	C95	C100	C105	C110	C125	C140	C145	C160	C200	C3055
mm (pol.)	Capacidades em t/h com alimentação de material com densidade aparente de 1,6 t/m³											
40 (1 5/8)	40	65										
50 (2 )	55	80										
60 (2 3/8)	65	95	120									
70 (2 3/4)	80	115	140	150	155	190						240
80 (3 1/8)	95	130	160	170	175	210						270
90 (3 1/2)	110	150	180	190	200	235						295
100 (4 )	120	165	200	215	220	255	290					325
125 (5 )		210	250	265	280	310	350	385	400			390
150 (6 )		250	300	315	335	370	410	455	470	520		460
180 (7 )		290	360	370	390	425	470	520	540	595	760	530
200 (8 )				420	445	480	530	590	610	675	855	600
225 (9 )							590	655	680	750	945	
250 (10)							650	725	750	825	1040	
275 (11)									820	900	1130	
300 (12)										980	1225	

Fonte: Metso (2005)

Na Figura 5, podem-se observar as curvas granulométricas dos produtos dos britadores de mandíbulas Série C da Metso, em função da APF.

**Figura 5 - Curvas granulométricas dos produtos dos britadores Série C da Metso.**



Fonte: Metso (2005)

### 3.1.2.3. Capacidade

Como mostrado na Tabela 2, a capacidade de um britador varia de acordo com seu tamanho e com sua APF. Como exemplo, o modelo C80 operando com APF de 100 mm, possui capacidade na faixa de 140 a 190 t/h.

Embora haja valores tabelados, as capacidades dos britadores variam conforme a aplicação. Por esse e outros motivos utiliza-se um fator de projeto para o dimensionamento dos britadores. Para britagem primária, esse fator é de 1,5 e para as demais 1,25, na maioria das vezes (Chaves e Peres, 2009).

### 3.2. Circuito Clássico de Comunicação

Na Figura 6 está retratado o circuito clássico de cominuição. Seguindo esta configuração, o ROM é britado em um britador de mandíbulas, seguindo para o britador secundário cônico e depois para o terciário, também cônico.

O britador terciário opera em circuito fechado com uma peneira, ou seja, o material britado é peneirado, com a fração retida retornando ao britador, enquanto que a fração passante se constitui no produto final da britagem.

O produto da britagem é encaminhado a um moinho de barras, cujo produto segue para o moinho de bolas, que opera em circuito fechado, com ciclones.

No circuito clássico, o britador primário opera com escalpe, ou seja, o ROM é alimentado em uma grelha, cuja fração retida alimenta o britador primário. Tanto o produto do britador como a fração passante na grelha são encaminhados para a etapa seguinte.

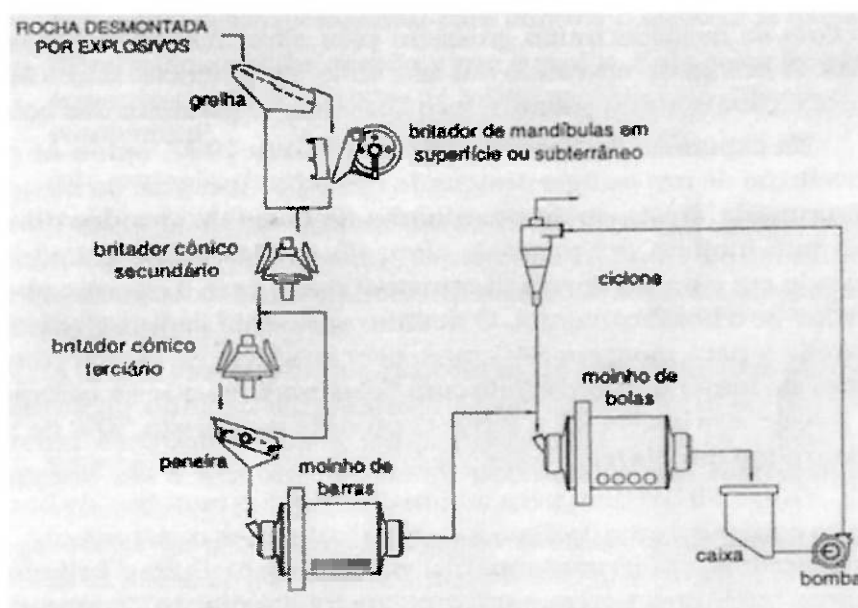
Isso é feito para que a vazão de alimentação do britador se torne menos elevada e para evitar que os finos ocasionem aumento de desgaste do revestimento das mandíbulas. Além disso, partículas menores tendem a se acumular nas mandíbulas do equipamento, principalmente combinação com água.

O circuito fechado é utilizado para limitar superiormente o tamanho das partículas que serão encaminhadas para a etapa seguinte do processo de cominuição. Tal configuração pode ser direta ou reversa, respectivamente, ou seja, com alimentação nova encaminhada ao britador.

No Circuito Clássico da Figura 6, os dois exemplos são circuitos fechados diretos.

Em se tratando de circuitos fechados, um fator importante é a carga circulante. O fluxo retido na peneira direcionado ao britador recebe o nome de carga circulante. Isso é crucial para o dimensionamento correto dos equipamentos, pois ocasiona um aumento na capacidade requerida pelo britador.

Figura 6 - Circuito Clássico de Cominuição.



Fonte: Chaves e Peres (2009)

Para o circuito fechado direto, temos a seguinte fórmula, segundo Chaves e Peres (2009), para o cálculo da % de carga circulante:

$$C/C = \frac{100 \cdot 100 \cdot 100}{E \cdot Y} - 100$$

Em que,

$C/C$  = % da alimentação nova que equivale à carga circulante;

$E$  = eficiência da peneira;

$Y$  = % passante na peneira, presente na descarga do britador;

Já para o circuito fechado reverso, a fórmula para determinação da carga circulante é a seguinte:

$$C/C = \frac{1}{Y} \cdot \left( \frac{100 \cdot 100 \cdot 100}{E} - 100 \cdot z \right)$$

Onde,

$C/C$  = % da alimentação nova que equivale à carga circulante;

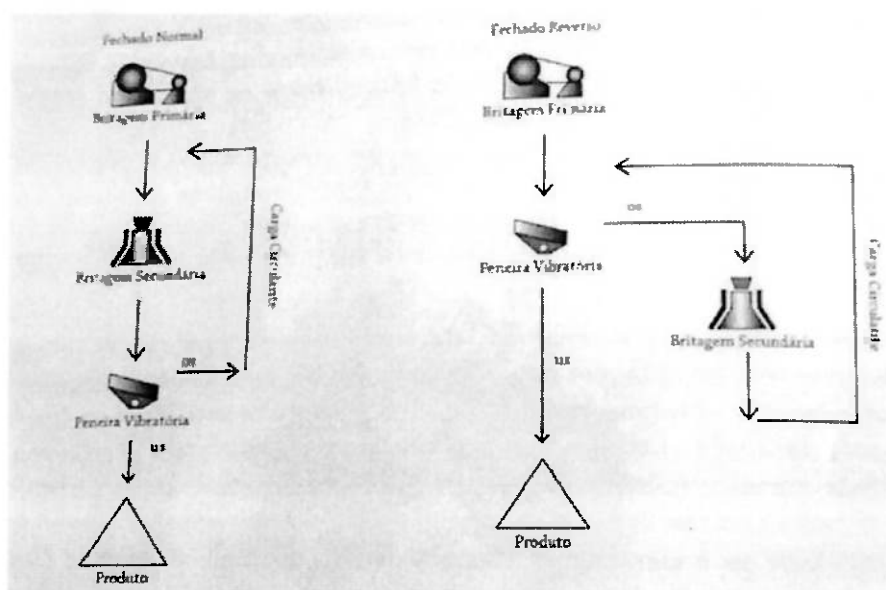
$E$  = % eficiência da peneira;

$Y$  = % do *undersize* do britador;

$z$  = % de finos da alimentação.

A Figura 7 demonstra um circuito fechado do tipo direto e do tipo reverso.

Figura 7: Representação de um Circuito Fechado Normal e Reverso.



Fonte: Valadão e Araujo (2007).

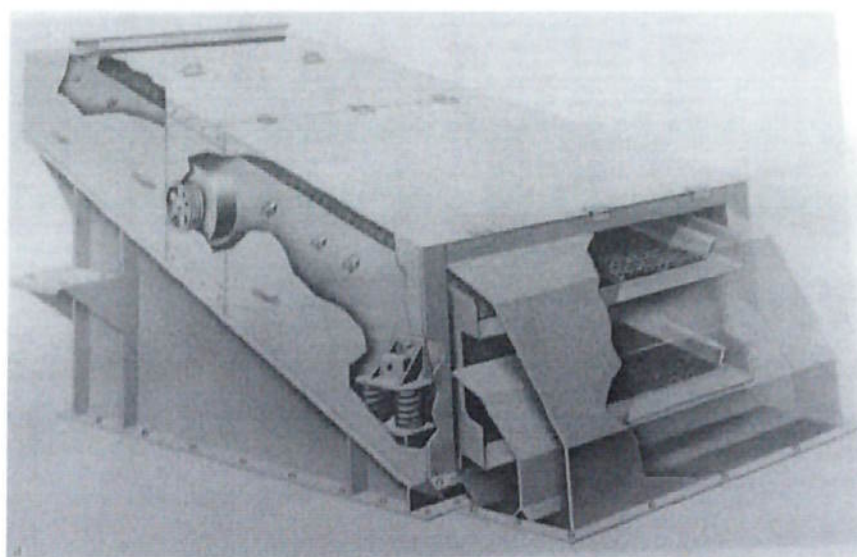
### 3.3. Peneiramento

Para Valadão e Araujo (2007), o peneiramento pode ser definido como a separação por tamanho através de superfícies de formas geométricas variadas, gerando o material retido, chamado de *oversize*, e o material passante, chamado de *undersize*.

As peneiras, como a retratada na Figura 8, podem ser subdivididas, segundo Kelly e Spottiswood (1982), entre fixas e vibratórias, se estiverem se movimentando, as quais podem, por sua vez, ser divididas entre convencionais e de probabilidade, dependendo se a passagem das partículas por elas é determinada por restrição ou princípios estatísticos. O tipo de peneiramento mais comumente utilizado é o com vibração.



**Figura 8: Ilustração de uma Peneira Inclinada.**



Fonte: Kelly e Spottiswood (1982).

Valadão e Araujo (2007) classificam as peneiras vibratórias entre horizontais, inclinadas e de alta frequência.

### **3.3.1. Peneiras Inclinadas Vibratórias**

Para Wills (2006), as peneiras vibratórias possuem uma superfície retangular com alimentação em uma extremidade e descarga de *oversize* em outra. A faixa de separação que elas compreendem varia de 300 até 0,045 mm.

As peneiras vibratórias podem ser fabricadas para suportar um, dois ou três decks, podendo então separar o material em mais de duas frações diferentes.

O uso de mais de um deck também é conveniente quando se deseja apenas duas frações, mas a malha possui aberturas muito pequenas. O deck superior de maior abertura proporciona alívio para o inferior, pois recebe o impacto das partículas de granulometria maior. Quando o material termina de passar, os dois *oversizes* podem ou não ser direcionados ao mesmo fluxo.

Segundo Chaves e Peres (2009), a vibração das peneiras inclinadas tem por objetivo lançar as partículas para cima e para frente, fazendo com que elas alcancem a tela diversas vezes, além de promover uma estratificação do material, de forma que as maiores fiquem por cima e as menores tenham maior probabilidade de entrar em contato com a malha e a atravessarem.

Existem também equipamentos com rotação contra fluxo, de forma que as partículas tenham mais oportunidades de passar pela malha, aumentando a eficiência do processo, segundo Wills (2006).

### **3.3.2. Mecanismo do Peneiramento**

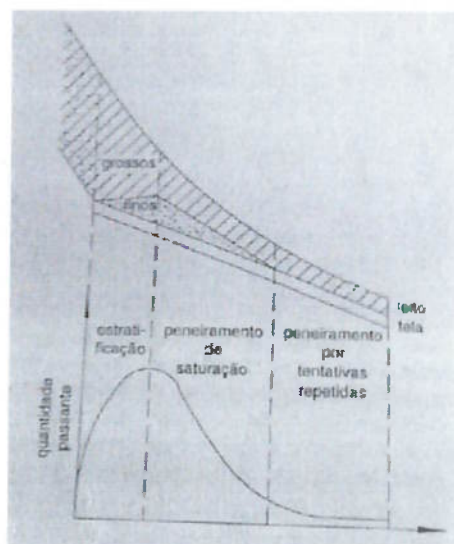
Além de efetuar o peneiramento e de transportar as partículas de uma extremidade do deck até a outra, o movimento da peneira deve ser capaz de estratificar o material. Isso é

possível, porque as partículas têm massas diferentes, de modo que seus movimentos, como recebem a mesma velocidade da peneira, sejam diferentes conforme seus tamanhos.

Sendo assim, para a escolha adequada de uma peneira deve-se garantir sua capacidade, e que haja espaço para estratificação do leito e que haja tempo para que as partículas entrem em contato com a malha e passem através dela.

A estratificação do leito do peneiramento está retratada na Figura 9.

**Figura 9: Comportamento Coletivo do Material Peneirado, mostrando sua estratificação.**



Fonte: Chaves e Peres (2009).

Não só a frequência, como também a amplitude do movimento vibratório da peneira são relevantes para a eficiência do processo. A segunda deve ser suficiente para garantir que as partículas não entupam a tela e não tão elevada para que não sobrevoem diversas aberturas e tenham suas chances de atravessar a peneira diminuídas.

A frequência tem por função garantir uma estratificação adequada do material.

Para malhas mais grosseiras, o ideal é que a amplitude seja maior e a frequência menor. Analogamente, para aberturas menores, a amplitude deve ser menor e a frequência maior.

Já a inclinação, afeta outros parâmetros da operação de uma peneira. Quanto maior a inclinação, maior a capacidade da peneira, ao passo que a altura do leito sobre a malha tende a diminuir. Caso o leito se torne muito baixo, as partículas começam a sofrer um lançamento muito grande, diminuindo as oportunidades de passarem pela tela.

Analisando-se o comportamento individual do material em questão, pode-se agrupar as partículas quanto à sua granulometria:

- $d > 1,5a$  – partículas superiores à 1,5 vezes a abertura da tela – não acarretam problemas, exceto deformações na tela devido ao seu peso elevado;

- $1,5a > d > a$  – partículas entre 1,5 vezes a abertura e o tamanho da abertura da tela – elas podem acarretar entupimento da malha, podendo gerar elevada perda de capacidade de peneiramento;
- $a > d > 0,5a$  – partículas menores que a abertura da tela e maiores que metade da mesma - elas atravessam a tela se caírem sobre ela em uma posição específica, necessitando de varias tentativas para fazê-lo.
- $d < 0,5a$  – partículas menores que a metade da abertura – passam direto e não interferem no peneiramento;
- $d < 0,5a$  – poeiras e lamas – parte delas passa direto pela malha, mas outra fração pode aderir às partículas maiores devido à umidade e acompanha-las para o *oversize* ou para o *undersize*.

Para Valadão e Araujo (2007), o peneiramento deve ser realizado com aberturas ligeiramente maiores do que a granulometria desejada, já que a projeção da abertura é menor, o que torna a passagem das partículas mais difícil.

### 3.3.3. Eficiência do Peneiramento

Segundo Kelly e Spottiswood (1982), uma eficiência elevada é um parâmetro desejável, mas conflitante com a capacidade do equipamento. De forma que qualquer peneira pode ter sua capacidade aumentada, em detrimento da eficiência ideal.

O processo de peneiramento pode ser quantificado por meio da eficiência do peneiramento, que é dado por:

$$E = \frac{t/h \text{ undersize}}{t/h \text{ material passante presente na alimentação}} \cdot 100$$

Em que,

E= eficiência da peneira.

A eficiência é, portanto, uma medida de quantidade de material que deveria estar no *undersize* da peneira, mas continuou no *oversize*.

Valadão e Araujo (2007) afirmam que a eficiência também pode ser verificada com base na construção de sua curva de partição, que por sua vez é dada pela % passante acumulada (eixo y) para cada malha estudada (eixo x em escala logarítmica).

### 3.3.4. Imperfeição das Malhas do Peneiramento

Segundo Chaves e Peres (2009), a imperfeição de uma malha M é uma maneira de quantificar o peneiramento. Ela é dada por

$$I = \frac{t/h \text{ oversize}}{t/h \text{ material passante presente na fração } M + 1, M} \cdot 100$$

Em que,

I = Imperfeição da malha M;

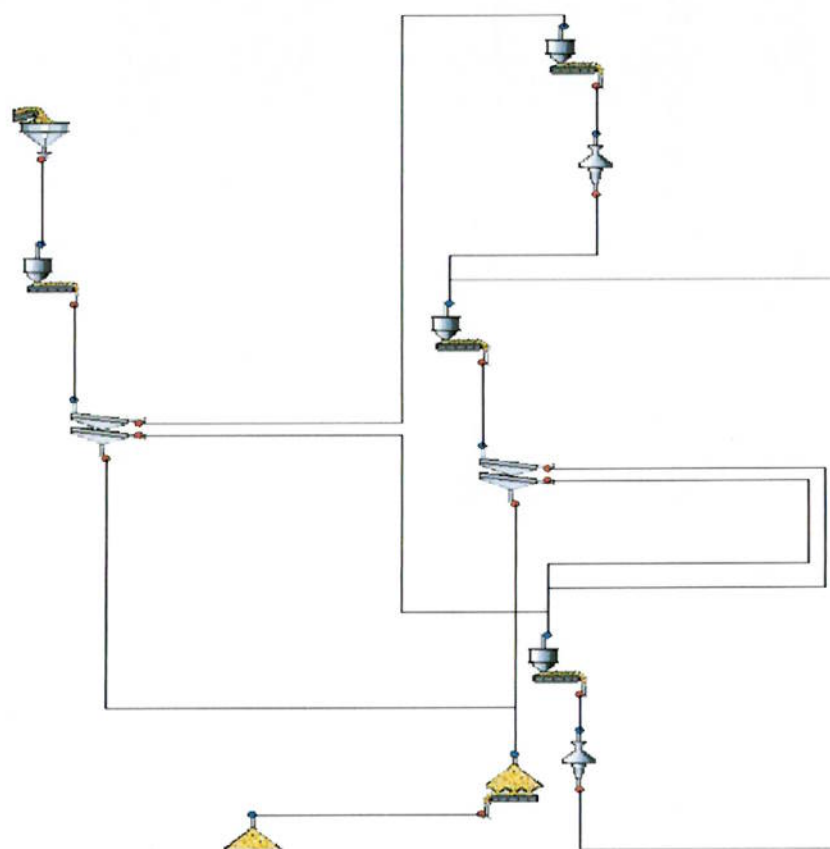


#### 4. METODOLOGIA

Tendo em vista o Caso Base da Planta de Cominuição fornecido pela HDA, empresa de consultoria em mineração que realiza projetos de circuitos de beneficiamento de minérios, bem como trabalhos de otimização de circuitos existentes, foram feitas simulações variando-se os valores de eficiência das peneiras e APF dos britadores.

O fluxograma do processo é apresentado na Figura 10. A britagem primária é feita com um C140 da Metso, enquanto a secundária é realizada com um HP500 com APF de 20 mm da Metso e a terciária, com um HP500 com APF de 14 mm. Os peneiramentos são realizados em peneiras de dois decks, sendo que no secundário o deck superior possui abertura de 35 mm e o deck inferior, de 14 mm e no terciário, o deck superior tem abertura de 20 mm e o inferior, 14 mm.

Figura 10: Fluxograma de Processo do Circuito de Britagem.



Fonte: Arquivo pessoal.

O procedimento foi realizado de duas maneiras, sendo dividido em duas abordagens. A primeira delas, mais simplificada, foi feita somente com o novo balanço de massa sem levar em consideração a granulometria das frações. Ou seja, quando foi alterado o fator desejado, o balanço foi recalculado a partir daí.

Para a segunda abordagem, foi levada em consideração a distribuição granulométrica resultante das alterações feitas.

Assim, quando a eficiência de peneiramento foi aumentada, uma determinada quantidade de finos que antes ia para o *oversize* passaria a ir para o *undersize*. Para a primeira abordagem, levou-se em conta apenas as vazões de massa. Já para a segunda, com as imperfeições de peneiramento e o método *Solver* do Excel foram definidas as quantidades de cada faixa granulométrica redistribuídas para o *undersize*.

Na primeira abordagem, o procedimento foi baseado na definição de eficiência de peneiramento, para que a alimentação da peneira secundária fosse redistribuída entre as três frações resultantes. Então, com o conceito de conservação de massa durante todo o balanço realizado, as alterações foram calculadas para o restante das etapas do circuito.

Para a segunda abordagem, na qual foi levada em consideração as distribuições granulométricas, o procedimento utilizou o mesmo princípio de conservação de massa da primeira abordagem. Além disso, considerou-se que a massa total de cada etapa deveria ser igual à obtida na primeira parte.

Para os casos em que não havia mudança na APF dos britadores, considerou-se que a distribuição granulométrica do novo cenário seria igual à do caso base, pois ela se baseia em grande parte nas características do equipamento e do fabricante.

Para redistribuir as massas da alimentação do peneiramento, considerou-se inalterada a vazão de *oversize* acima da malha de corte, e que abaixo ela dependeria de imperfeições determinadas, primeiro com uso do recurso *Solver* do Excel (ajuste grosso) e depois com alterações feitas com cálculos específicos (ajuste fino).

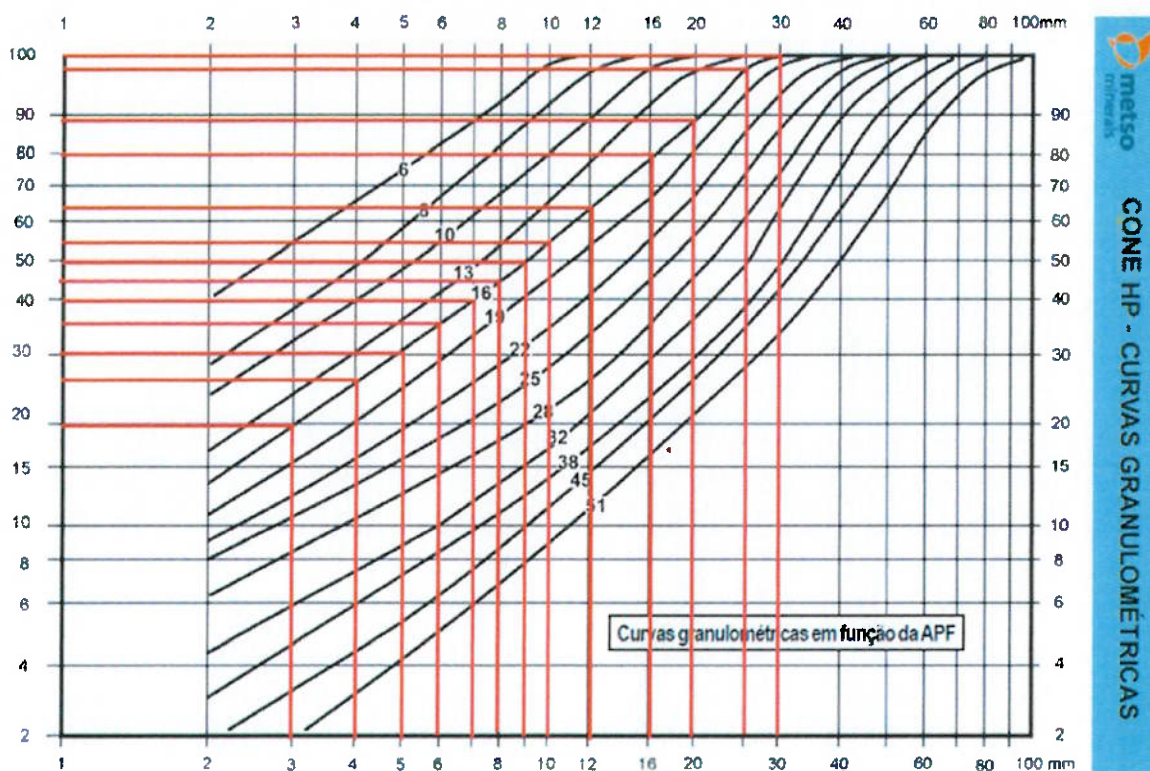
Esses dois ajustes são de grande importância, já que para os tamanhos de malha próximos ao corte, as imperfeições são muito maiores do que nas malhas menores que a metade da abertura da peneira. Já para as malhas muito finas, as imperfeições voltam a subir (mas permanecem bem menores do que as das malhas mais grossas).

No último cenário foi estudado o procedimento foi um pouco diferente, já que a APF do britador secundário foi alterada. Isso acarreta diferenças, pois a curva de distribuição granulométrica do produto de britagem muda quando a APF é mudada.

Então, como mostrado na Figura 11, foram listados para cada malha do gráfico do Manual de Britagem da Metso (6ª Edição), a % passante acumulada da curva de APF de 16 mm, a nova APF do britado. Então, através de interpolações lineares, os valores obtidos na Figura 11 foram adaptados para as malhas estudadas no Caso Base e em todos os cenários.

A partir de então o restante do procedimento foi realizado analogamente aos três primeiros cenários.

**Figura 11: Gráfico de distribuição granulométrica dos produtos dos britadores HP da Metso.**



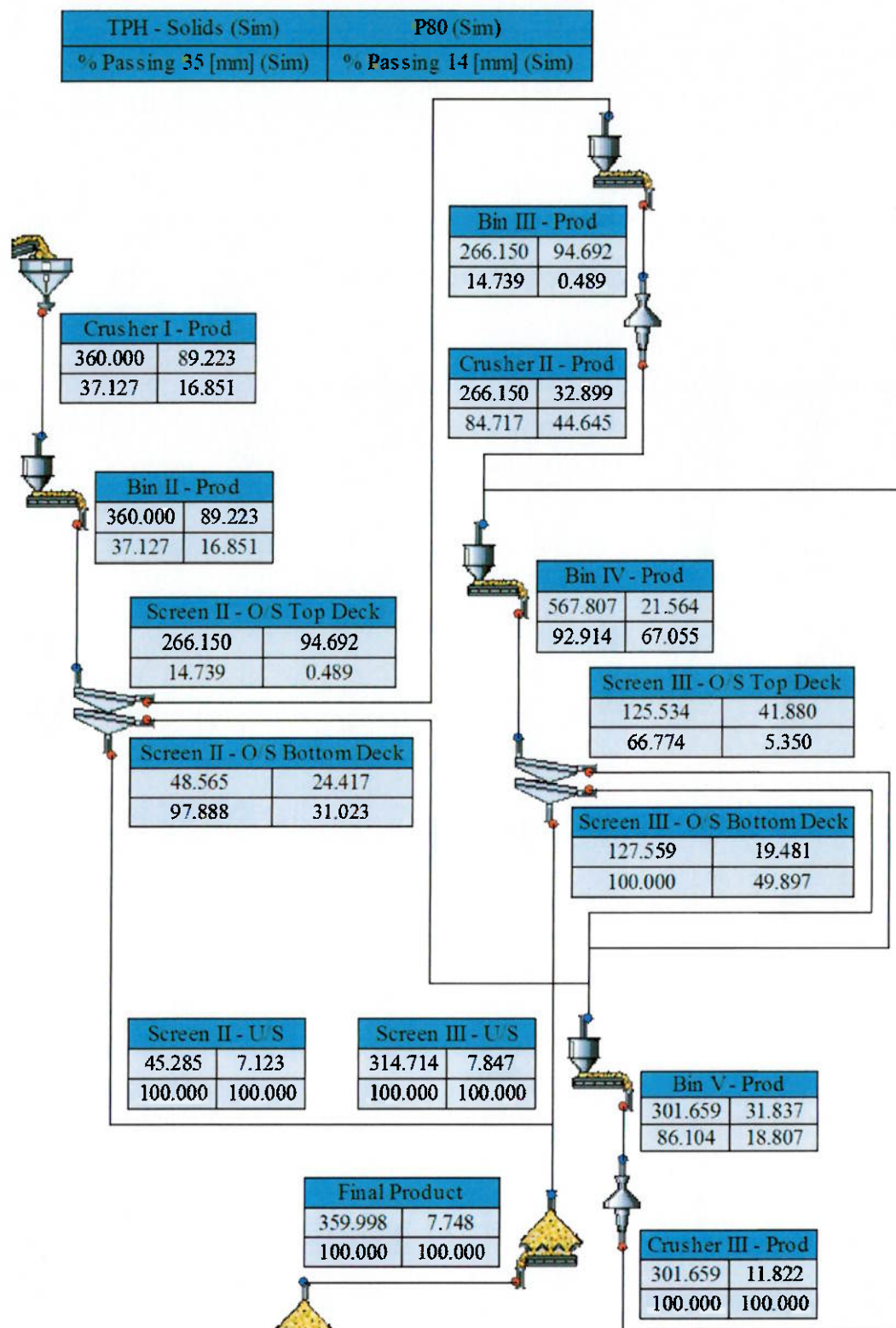
Fonte: Metso (2005).

## 5. DESCRIÇÃO DO CASO ESTUDADO

A partir do caso base da planta de britagem de usina selecionada foram analisadas alternativas de melhoria de desempenho variando-se a eficiência dos peneiramentos e as aberturas dos britadores.

O fluxograma do Caso Base está retratado na Figura 12.

Figura 12 - Fluxograma do Caso Base da planta de rocha fresca.



Fonte: Arquivo pessoal.

Após a britagem primária em um britador de mandíbulas C140 da Metso, o fluxo alimenta uma peneira de dois decks. O *oversize* do deck superior segue para a britagem secundária, ao passo que o *undersize* se torna a alimentação do segundo deck.

O *oversize* do segundo deck é direcionado para a britagem terciária, enquanto o *undersize*, para a pilha do produto final. Tanto na britagem secundária quanto na terciária, são utilizados britadores cônicos do modelo HP500 da Metso.

Depois de passar pelo britador secundário, o material alimenta uma segunda peneira, denominada peneira terciária, de dois decks, sendo o deck superior apenas para alívio do inferior, de modo que os dois *oversize* sejam encaminhados juntos para o britador terciário. O *undersize* desse peneiramento segue para a pilha do produto final.

O produto do britador terciário é recirculado para a peneira terciária, originando um circuito fechado direto e, conseqüentemente, uma carga circulante que deve ser analisada com atenção.

As análises realizadas levaram em consideração o balanço de massa original (Caso Base), possíveis alterações nas APF dos britadores e nas eficiências de peneiramento, que por sua vez afetam a carga circulante e a capacidade dos britadores.

## 6. APRESENTAÇÃO DOS DADOS

A Tabela 3 e a Tabela 4 mostram os dados de desempenho do peneiramento e das britagens secundária e terciária adotados pela HDA para o Caso Base. Além disso, foram utilizados os dados do balanço de massa e distribuições granulométricas para cada etapa do processo do caso base, como mostrado na Tabela 5.

Tabela 3: Desempenho do Peneiramento.

Variáveis	Peneira Secundária	Peneira Terciária
Aberura Deck Superior (mm)	35	20
Eficiência (%)	71*	95
Fração Oversize (%)	74	22
Abertura Deck Inferior (mm)	14	14
Eficiência (%)	77	84
Fração Oversize (%)	52	29

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 4: Desempenho das Britagens.

Variáveis	Britador Secundário	Britador Terciário
$F_{80}$ (mm)	94,7	31,8
$P_{80}$ (mm)	32,9	11,8
Relação de Redução	2,9	2,7
A.P.F.(mm)	20	14
Vazão de Sólidos (t/h)	266	302

Fonte: Arquivo pessoal.

Na Tabela 5, é possível observar a vazão de sólidos (t/h), a densidade do material e o  $P_{80}$  para cada fluxo do circuito. Encontra-se, também a distribuição granulométrica, ou seja, a porcentagem passante acumulada para 22 malhas diferentes, em cada fluxo do circuito.

Além disso, as amostras analisadas são provenientes do produto da britagem primária. Dos peneiramentos secundário e terciário, têm-se a alimentação, o *oversize* do deck superior, *oversize* do deck inferior e o *undersize*. Sobre os britadores secundário e terciário, têm-se os resultados da alimentação e do produto.

Tabela 5: Balanço de Massa do Caso Base.

Variáveis	Briagem Primária Produto + U/S Peneira I			Peneiramento Secundário			Briagem Secundária			Peneiramento Terciário			Briagem Terciária		
	Alimentação	O/S Deck Superior	O/S Deck Inferior	U/S	Alimentação	Produto	Alimentação	O/S Deck Superior	O/S Deck Inferior	U/S	Alimentação	Produto	Alimentação	O/S Deck Superior	O/S Deck Inferior
Vazão Sólidos (t/h)	360	268	49	45	268	266	268	270	128	315	568	302	302	128	360
Densidade (t/m³)	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70
P <sub>80</sub> (mm)	89,2	95	24,4	7,12	94,7	32,9	94,7	41,9	19,5	7,85	21,6	31,8	11,8	7,75	7,75
Tamanho (mm)	Porcentagem Passante Acumulada														
160	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
125	99,5	99,3	100	100	99,3	100	99,3	100	100	100	100	100	100	100	100
100	89,8	85,9	100	100	85,9	100	85,9	100	100	100	100	100	100	100	100
90,0	80,7	73,8	100	100	73,8	100	73,8	100	100	100	100	100	100	100	100
80,0	71,1	61,0	100	100	61,0	99,9	61,0	99,9	99,7	100	99,9	99,9	100	100	100
70,0	63,0	49,9	100	100	49,9	99,6	49,9	99,6	99,1	100	99,8	99,6	100	100	100
60,0	56,8	41,7	100	100	41,7	98,7	41,7	98,7	97,3	100	99,4	98,9	100	100	100
50,0	51,4	34,7	99,9	100	34,7	96,4	34,7	96,4	92,4	100	98,3	96,8	100	100	100
32,0	33,4	10,8	94,8	100	10,8	78,4	10,8	78,4	54,4	100	89,9	80,3	100	100	100
25,4	27,2	4,7	83,7	100	4,7	67,6	4,7	67,6	30,6	99,4	84,5	67,1	100	100	100
12,7	15,3	0,3	20,3	99,0	0,3	40,4	0,3	40,4	3,4	21,9	63,1	12,1	84,7	98,3	98,3
9,52	12,7	0,2	5,1	93,5	0,2	32,4	0,2	32,4	1,3	3,5	49,3	2,4	63,4	90,8	90,8
6,35	9,5	0,2	1,3	72,9	0,2	23,8	0,2	23,8	0,3	3,2	37,6	1,5	50,1	66,8	66,8
4,76	7,2	0,2	1,2	54,6	0,2	19,2	0,2	19,2	0,1	3,2	30,2	1,5	39,9	53,6	53,6
1,68	1,8	0,1	1,1	12,6	0,1	9,8	0,1	9,8	0	3,2	14,6	1,5	16,9	23,5	23,5
0,841	1,2	0,1	0,8	8,0	0,1	6,5	0,1	6,5	0	3,1	9,6	1,4	12,3	15,0	15,0
0,420	0,8	0,04	0,6	5,6	0,04	4,3	0,04	4,3	0	2,5	6,4	1,1	8,3	10,0	10,0
0,210	0,7	0,04	0,5	4,5	0,04	2,8	0,04	2,8	0	1,8	4,3	0,8	5,6	6,7	6,7
0,149	0,6	0,03	0,5	4,1	0,03	2,3	0,03	2,3	0	1,5	3,5	0,7	4,6	5,5	5,5
0,105	0,5	0,03	0,4	3,6	0,03	1,9	0,03	1,9	0	1,2	2,8	0,6	3,7	4,5	4,5
0,074	0,5	0,03	0,4	3,2	0,03	1,5	0,03	1,5	0	1,0	2,3	0,5	3,0	3,7	3,7
0,037	0,4	0,02	0,3	2,7	0,02	1,0	0,02	1,0	0	0,7	1,5	0,3	2,0	2,5	2,5

Fonte: Arquivo pessoal.



## 7. RESULTADOS

A partir do Caso Base, foram adotadas duas abordagens para os quatro cenários selecionados de simulação. O primeiro cenário trata-se de alteração da eficiência do primeiro deck do peneiramento secundário. Ela foi elevada de 71% para 80%.

O segundo caso, seguiu o mesmo princípio, porém o aumento foi para 90%. Já o terceiro cenário foi obtido a partir da alteração das eficiências dos dois decks do peneiramento secundário, sendo que a do primeiro deck ficou em 80% (cenário 1) e a do segundo, em 85% (inicialmente era de 77%).

O quarto e último cenário foi uma variação do terceiro, ou seja, com as eficiências dos dois decks mudadas, a APF do britador secundário foi diminuída de 20 para 16 mm, bem como a abertura da peneira terciária. Esse cenário foi escolhido, a partir da observação dos cenários anteriores, em que o britador secundário trabalharia mais vazio.

A Tabela 6 mostra um resumo das alterações de cada cenário.

**Tabela 6: Alterações em cada cenário e o Caso Base.**

		Caso Base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Peneiramento Secundário	Eficiência Deck Superior (%)	71	80	90	80	80
	Eficiência Deck Inferior (%)	77	77	77	85	85
Britagem Secundária	APF (mm)	20	20	20	20	16

Fonte: Elaboração Própria.

Definidos os cenários, foi realizada a primeira abordagem, mais simples, que levou em consideração apenas as vazões totais de cada fluxo do processo.

Na Tabela 7 estão demonstrados os resultados obtidos com as simulações referentes aos quatro cenários estudados.



Tabela 7: Demonstrativo dos resultados das simulações da primeira abordagem.

Variável	un.	Caso Base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Pen 2 - Eficiência Deck 1	%	71	80	90	80	80
Pen 2 - Eficiência Deck 2	%	77	77	77	85	85
Pen 2 - Abertura Deck 1	mm	35	35	35	35	35
Pen 2 - Abertura Deck 2	mm	14	14	14	14	14
Pen 2 - Alim.	t/h	360	360	360	360	360
Pen 2 - O/S Deck 1	t/h	266	255	242	255	255
Pen 2 - O/S Deck 2	t/h	49	55	62	50	50
Pen 2 - U/S Deck 2	t/h	45	50	56	55	55
Britador 2 - Alimentação	t/h	266	255	242	255	255
Britador 2 - APF	mm	20	20	20	20	16
Pen 3 - Eficiência Deck 1	%	95	95	95	95	95
Pen 3 - Eficiência Deck 2	%	84	84	84	84	84
Pen 3 - Abertura Deck 1	mm	20	20	20	20	16
Pen 3 - Abertura Deck 2	mm	14	14	14	14	14
Pen 3 - Alim.	t/h	568	627	614	617	617
Pen 3 - O/S Deck 1	t/h	126	178	174	175	175
Pen 3 - O/S Deck 2	t/h	128	140	137	137	137
Pen 3 - U/S Deck 2	t/h	315	310	304	305	305
Britador 3 - Alimentação	t/h	302	372	372	362	362
Britador 3 - APF	mm	14	14	14	14	14
Produto Final	t/h	360	360	360	360	360

Fonte: Elaboração Própria.

Na Tabela 7 é possível observar que quanto maior a eficiência do primeiro deck do peneiramento secundário, menor a vazão do *oversize* deste mesmo deck, que é direcionado para a britagem secundária.

De acordo com a Tabela 8, um HP500 com APF de 20 mm, sua capacidade é na faixa de 320 a 430 t/h. Com uma alimentação de 255 ou 242 t/h, o britador trabalharia muito vazio, o que prejudicaria seu desempenho.

Uma maneira de diminuir esse efeito consiste em diminuir o APF do equipamento, conforme adotado no quarto cenário. A simulação foi conduzida com APF de 16 mm na britagem secundária. Neste caso, a capacidade varia, de acordo com a Tabela 8, de 280 a 350 t/h, faixa bem mais próxima dos fluxos gerados pelas novas eficiências.

Tabela 8: Capacidades para os britadores da série HP da Metso, segundo seus valores de APF.

**Capacidades'**

AJUSTE POSIÇÃO FECHADA												
Modelo	6 mm	8 mm	10 mm	13 mm	16 mm	19 mm	22 mm	25 mm	32 mm	38 mm	45 mm	51 mm
HP 100	45-55	50-60	55-70	60-80	70-90	75-95	80-100	85-110	100-140			
HP 200			90-120	120-150	140-180	150-190	160-200	170-220	190-235	210-250		
HP 300			115-140	150-185	180-220	200-240	220-260	230-280	250-320	300-380	350-440	
HP 400			140-175	185-230	225-280	255-320	275-345	295-370	325-430	360-490	410-560	465-630
HP 500			175-220	230-290	280-350	320-400	345-430	365-455	405-535	445-605	510-700	580-790
HP 800			260-335	325-425	385-500	435-545	470-600	495-730	545-800	600-950	690-1050	785-1200

, Capacidade instantânea do britador em t/h, com material de densidade aparente de 1,6 t/m<sup>3</sup>

Fonte: Metso (2005).

Nos cenários três e quatro, alterou-se não somente a eficiência do deck superior do peneiramento secundário, como também a do segundo. Com isso originou-se, como mostrado na Tabela 7, uma diminuição na vazão do *oversize* do segundo deck, se comparado ao Cenário 1. Porém, o efeito das modificações do segundo cenário (em que mudou-se somente a eficiência do primeiro deck) foram mais intensos no que se refere ao *oversize* do deck inferior, aumentando de 55 para 62 t/h.

Para a segunda abordagem, levou-se em consideração as distribuições granulométricas. Nos três primeiros cenários foi necessário alterar somente a proporção da distribuição da massa entre as malhas para o primeiro peneiramento.

Para o balanço de massa com as distribuições granulométricas utilizou-se as imperfeições das malhas. O cálculo das imperfeições do caso base está indicado no Apêndice A.

Para o quarto cenário, com a alteração do APF do britador, as distribuições granulométricas do peneiramento terciário também sofreram modificações. As imperfeições dessa etapa do circuito para o Caso Base estão retratadas no Apêndice B.

No Apêndice C, encontra-se o cálculo do balanço de massa para o peneiramento secundário do Cenário 1, o qual foi recalculado a partir de uma nova estimativa de imperfeições para cada malha, gerando o gráfico da Figura 18, também do Apêndice C.

O procedimento foi repetido analogamente para todos os cenários, sendo que para o cenário 4, ele foi realizado para os dois peneiramentos, tanto o secundário, como o terciário.

Os resultados das porcentagens acumuladas passantes obtidos estão retratados na Tabela 9.

Na Tabela 9, observa-se que a quantidade de material abaixo de 0,841 mm do Cenário 4 aumentou de 15 para 17,66 % de passante acumulado.

Na Tabela 10 tem-se os *topsizes* e os  $P_{80}$  de cada cenário estudado. Os valores listados mostram que mesmo aumentando a eficiência do peneiramento secundário, as diferenças encontradas são muito baixas. Para o cenário quatro, o resultado mostrou-se positivo, já que embora o *topsize* tenha se mantido igual, o  $P_{80}$  diminuiu bastante.

Tabela 9: Demonstrativo dos resultados das simulações da segunda abordagem.

% Passante Acumulado por Malha para cada Cenário - Produto Final					
Tamanho (mm)	Caso Base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
150	100	100	100	100	100
125	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100
90	100	100	100	100	100
80	100	100	100	100	100
70	100	100	100	100	100
60	100	100	100	100	100
50	100	100	100	100	100
25,4	100	100	100	100	100
12,7	99,30	98,40	97,78	97,98	98,46
6,35	66,77	65,97	64,92	65,09	80,92
4,76	53,61	52,85	52,01	52,15	65,50
1,68	23,50	23,00	22,58	22,66	28,47
0,841	15,01	14,56	14,30	14,35	17,66
0,42	9,99	9,57	9,40	9,43	11,67
0,21	6,73	6,34	6,23	6,25	7,96
0,149	5,52	5,14	5,05	5,07	6,62
0,105	4,52	4,14	4,07	4,08	5,54
0,037	2,51	2,15	2,10	2,11	3,46

Fonte: Elaboração Própria.

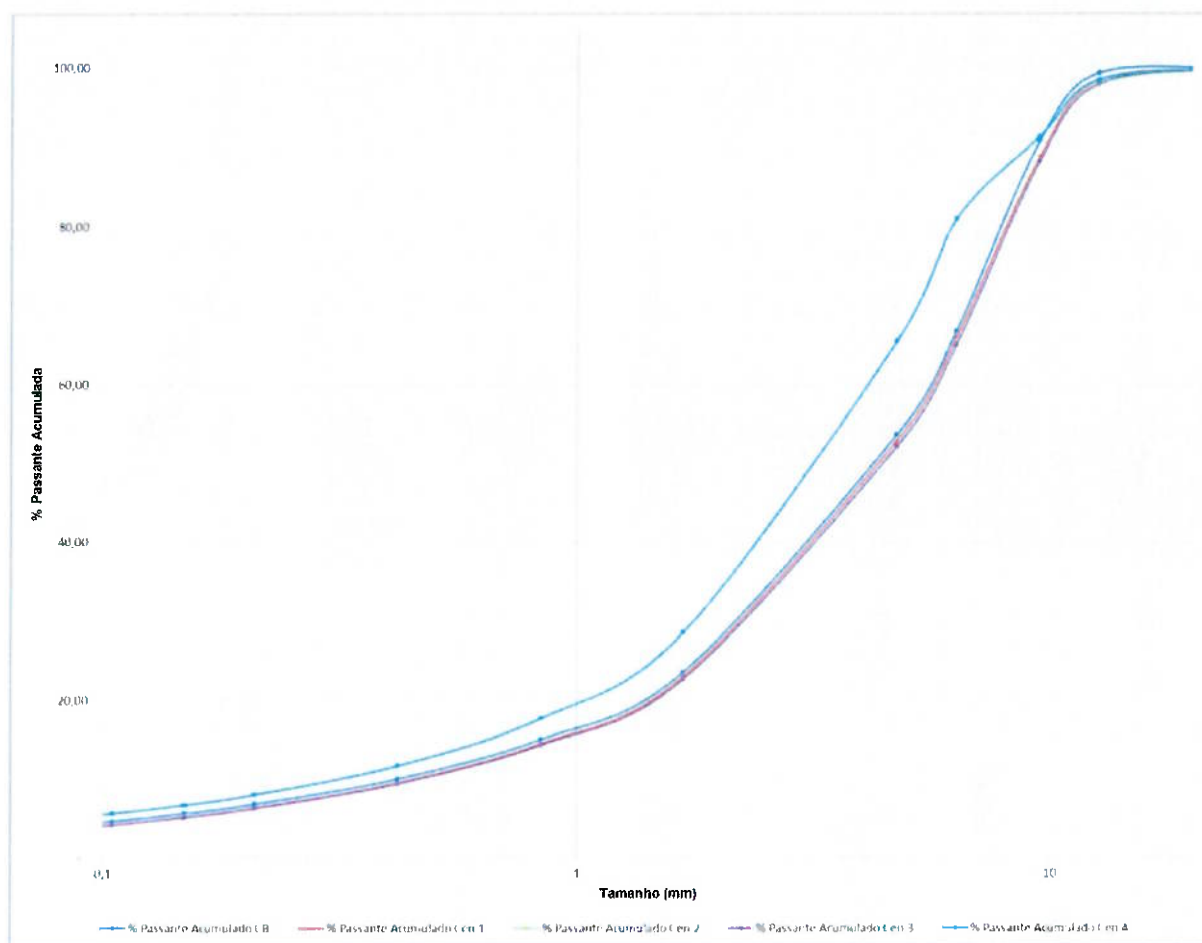
Tabela 10: Comparativo dos *Topsizes* e dos  $P_{80}$  obtidos com cada cenário.

	Caso Base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
P100 (mm)	12,96	13,23	13,44	13,36	13,39
P80 (mm)	8,10	8,30	8,40	8,40	6,26

Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 13 mostra os resultados da Tabela 9 em forma de gráfico.

**Figura 13: Gráfico das curvas de distribuição granulométrica dos produtos finais dos cenários estudados e do Caso Base.**



Fonte: Elaboração Própria.

Na Figura 13, nota-se que a curva em azul, do caso quatro, está deslocada para a esquerda em relação às outras, que estão praticamente sobrepostas, exceto pela parte superior da curva, acima de 90% de passante acumulado.

Assim, as curvas dos três primeiros cenários estão muito próximas, pois os resultados obtidos indicaram pouca diferenciação entre si e entre o Caso Base.

## 8. CONCLUSÕES

Com base nos cenários simulados e discutidos concluiu-se que o mais adequado é o Cenário 4, uma vez que há melhor distribuição de fluxos nas etapas secundária e terciária do circuito, além de obter-se um melhor desempenho do britador secundário, com maior redução e operação com câmara cheia. Ademais, o Cenário 4 resultou em uma carga circulante considerada compatível com o britador terciário.

Para alcançar o cenário quatro a alteração da APF é um simples ajuste no equipamento já existente no circuito, o que não acarreta em mudanças do circuito de britagem.

Já para uma obter-se as eficiências requeridas é preciso fazer um estudo mais aprofundado sobre a frequência e a amplitude de vibração. Visto que a primeira resulta em

boa estratificação do material, ou seja, garante que as frações mais finas ficarão na parte inferior do leito e encontrarão com a malha. Já a segunda, garante que as partículas tenham maiores chances de atravessarem a malha.

Além disto, o tipo de malha e seu material de construção devem ser, também, investigados.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHAVES, Arthur Pinto; PERES, Antonio Eduardo Clark. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios: Britagem, Peneiramento e Moagem. 4. ed. São Paulo: Sigmus Editora, 2009. 258 p. (Volume 3).

FOGGIATTO, Bianca. Previsão de Desempenho do Circuito de Moagem de Carajás. 2009. 230 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mineral, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

KELLY, Errol G.; SPOTTISWOOD, David J.. Introduction to Mineral Processing. Nova York: John Wiley & Sons, 1982. 492 p.

METSO MINERALS, *Manual de Britagem*. 6. Ed. Sorocaba, Metso Minerals, 2005, 1 v.

MULAR, Andrew L; HALBE, Doug N.; BARRAT, Derek John (Ed.). Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control: Proceedings. Vancouver: Sme, 2002. 2500 p. (Volume 1).

VALADÃO, George Eduardo Sales; ARAUJO, Armando Corrêa de (Org.). Introdução ao tratamento de Minérios. Belo Horizonte: Editora Ufmg, 2007. 234 p.

WILLS, B.A. Will's Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of the Ore Treatment and Mineral Recovery. 7. ed. Amsterdam: Elsevier, 2006. 445 p.

# APÊNDICE A – Cálculo de Imperfeições do Peneiramento Secundário

Tabela 11: Cálculo das Imperfeições das Malhas do Peneiramento Secundário. (Continua)

Balanco de Massa Inicial - Peneira Secundária (Passantes Acumulados)									
Size (mm)	Alimentação (%)	O/S Deck 1 (%)	O/S Deck 2 (%)	U/S Deck 2 (%)	Alimentação (t/h)	O/S Deck 1 (t/h)	O/S Deck 2 (t/h)	U/S Deck 2 (t/h)	
150	100,00	100,00	100,00	100,00	-	-	-	-	-
125	99,47	99,28	100,00	100,00	1,91	1,91	-	-	-
100	89,76	85,91	100,00	100,00	36,86	37,49	-	-	-
90	80,66	73,80	100,00	100,00	69,62	69,73	-	-	-
80	71,09	60,98	100,00	100,00	104,09	103,85	-	-	-
70	63,00	49,94	100,00	100,00	133,20	133,24	-	-	-
60	56,83	41,70	99,99	100,00	155,42	155,17	0,00	0,00	-
50	51,44	34,73	99,94	100,00	174,80	173,73	0,03	0,03	-
32	33,44	10,83	94,84	100,00	239,61	237,32	2,51	2,51	-
25,4	27,20	4,69	83,65	100,00	262,08	253,68	7,94	7,94	-
12,7	15,34	0,30	20,35	99,00	304,76	265,36	38,68	38,68	0,45
9,52	12,67	0,22	5,13	93,46	314,40	265,57	46,07	46,07	2,96
6,35	9,48	0,21	1,28	72,91	325,86	265,58	47,94	47,94	12,27
4,76	7,18	0,20	1,21	54,57	334,15	265,62	47,98	47,98	20,57
1,68	1,79	0,08	1,06	12,59	353,56	265,93	48,05	48,05	39,58
0,841	1,16	0,06	0,82	8,03	355,81	265,99	48,17	48,17	41,65
0,42	0,82	0,04	0,62	5,63	357,03	266,03	48,26	48,26	42,74
0,21	0,67	0,04	0,51	4,55	357,60	266,05	48,32	48,32	43,23
0,149	0,60	0,03	0,46	4,07	357,85	266,06	48,34	48,34	43,44
0,105	0,53	0,03	0,41	3,63	358,08	266,07	48,36	48,36	43,64
0,074	0,48	0,03	0,37	3,24	358,28	266,08	48,38	48,38	43,82
0,037	0,39	0,02	0,31	2,67	358,59	266,09	48,42	48,42	44,08
					360,00	266,15	48,57	48,57	45,29

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 12: Cálculo das Imperfeições das Malhas do Peneiramento Secundário. (Conclusão)

Balanco de Massa Inicial - Peneira Secundária (Retidos Simples)			Balanco de Massa Inicial - Peneira Secundária - Imperfeições	
Retido Alimentação (t/h)	Retido O/S Deck 1 (t/h)	Retido O/S Deck 2 (t/h)	Imperfeição Deck 1 (%)	Imperfeição Deck 2 (%)
-	-	-	-	-
1,91	1,91	-	-	-
34,95	35,58	-	-	-
32,76	32,24	-	-	-
34,47	34,12	-	-	-
29,11	29,39	-	-	-
22,22	21,94	0,00	-	-
19,38	18,55	0,00	-	-
64,80	63,59	0,02	-	-
22,47	16,36	2,48	98,13	-
42,68	11,69	5,43	72,79	-
9,64	0,21	30,74	27,38	99,20
11,46	0,02	7,39	2,13	78,36
8,29	0,04	1,87	0,13	16,35
19,41	0,30	0,03	0,45	0,42
2,24	0,07	0,07	1,56	0,38
1,23	0,04	0,12	2,94	5,32
0,56	0,02	0,10	3,47	8,15
0,25	0,01	0,05	3,73	9,57
0,23	0,01	0,02	3,85	10,17
0,20	0,01	0,02	3,89	10,42
0,30	0,01	0,02	3,92	10,59
1,41	0,06	0,03	3,95	10,75
		0,15	3,99	10,96

Fonte: Elaboração Própria.



## APÊNDICE B – Cálculo das Imperfeições do Peneiramento Terciário

Tabela 13: Cálculo das Imperfeições das Malhas do Peneiramento Terciário. (Continua)

Size (mm)	Balanço de Massa Inicial - Peneira Terciária (Passantes Acumulados)				Balanço de Massa Inicial - Peneira Terciária (Retidos Acumulados)			
	Alimentação (%)	O/S Deck 1 (%)	O/S Deck 2 (%)	U/S Deck 2 (%)	Alimentação (%)	O/S Deck 1 (%)	O/S Deck 2 (%)	U/S Deck 2 (%)
150	100,00	100,00	100,00	100,00	-	-	-	-
125	100,00	100,00	100,00	100,00	-	-	-	-
100	99,99	99,98	100,00	100,00	0,01	0,02	-	-
90	99,98	99,93	100,00	100,00	0,02	0,07	-	-
80	99,93	99,74	100,00	100,00	0,07	0,26	-	-
70	99,79	99,11	100,00	100,00	0,21	0,89	-	-
60	99,41	97,31	100,00	100,00	0,59	2,69	-	-
50	98,32	92,45	100,00	100,00	1,68	7,55	-	-
32	89,91	54,36	99,97	100,00	10,09	45,64	0,03	-
25,4	84,53	30,59	99,42	100,00	15,47	69,41	0,58	-
12,7	63,10	3,35	21,91	99,43	36,90	96,65	78,09	0,57
9,52	49,26	1,26	3,46	90,18	50,74	98,74	96,54	9,82
6,35	37,65	0,32	3,20	65,97	62,35	99,68	96,80	34,03
4,76	30,23	0,12	3,16	53,45	69,77	99,88	96,84	46,55
1,68	14,61	0,00	3,16	25,07	85,39	100,00	96,84	74,93
0,841	9,57	-	3,10	16,01	90,43	100,00	96,90	83,99
0,42	6,44	-	2,47	7,05	93,56	100,00	97,53	89,39
0,21	4,31	-	1,78	5,73	95,69	100,00	98,22	92,95
0,149	3,51	-	1,49	4,64	96,49	100,00	98,51	94,27
0,105	2,85	-	1,22	3,76	97,15	100,00	98,78	95,36
0,074	2,31	-	1,00	2,48	97,69	100,00	99,00	96,24
0,037	1,53	-	0,67	-	98,47	100,00	99,33	97,52
					100,00	100,00	100,00	100,00

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 14: Cálculo das Imperfeições das Malhas do Peneiramento Terciário. (Conclusão)

Balanco de Massa Inicial - Peneira Terciária (Retidos Acumulados)				Balanco de Massa Inicial - Peneira Terciária (Retidos Simples)		Balanco de Massa Inicial - Peneira Terciária - Imperfeições	
Alimentação (t/h)	O/S Deck 1 (t/h)	O/S Deck 2 (t/h)	U/S Deck 2 (t/h)	Retido Alimentação (t/h Retido O/S Deck 1 (t/h Retido O/S Deck 2 (t/h	Imperfeição Deck 1 (% Imperfeição Deck 2 (%		
-	-	-	-	-	-		
-	-	-	-	-	-		
0,04	0,02	-	-	0,04	0,02		
0,13	0,09	-	-	0,09	0,07		
0,39	0,33	-	-	0,26	0,24		
1,16	1,12	-	-	0,78	0,79		
3,37	3,38	-	-	2,21	2,26		
9,52	9,48	-	-	6,15	6,10		
57,27	57,29	0,03	-	47,74	47,81		
87,83	87,13	0,75	-	30,56	29,85		
209,54	121,32	99,62	1,79	121,72	34,19	28,09	30,96
288,13	123,95	123,14	30,92	78,59	2,62	3,34	0,52
354,04	125,14	123,48	107,10	65,91	1,19	1,80	0,12
396,17	125,39	123,53	146,50	42,13	0,25	0,59	-
484,86	125,53	123,53	235,81	88,69	0,14	0,16	0,27
513,46	125,53	123,61	264,32	28,60	0,00	0,01	4,51
531,26	125,53	124,41	281,32	17,80	-	-	7,25
543,35	125,53	125,28	292,53	12,09	-	-	8,41
547,87	125,53	125,66	296,67	4,52	-	-	8,87
551,63	125,53	126,00	300,10	3,76	-	-	9,21
554,68	125,53	126,28	302,87	3,05	-	-	9,51
559,13	125,53	126,70	306,90	4,45	-	-	9,88
567,81	125,53	127,56	314,71	8,67	-	-	

Fonte: Elaboração Própria.

# **APÊNCIDE C – Cálculo do Balanço de Massa do Peneiramento Secundário do Cenário 1 para a Segunda Abordagem do Trabalho**

**Tabela 15: Cálculo do Balanço de Massa do Peneiramento Secundário do Cenário 1. (Continua)**

Balanço de Massa Inicial - Peneira Secundária - Retido Simples				Imperfeições Cenário 1	
Size (mm)	Alimentação (t/h)	O/S Deck 1 (t/h)	O/S Deck 2 (t/h)	Deck 1 (%)	Deck 2 (%)
150	-	-	-		
125	1,91	1,91	-		
100	34,95	35,58	-		
90	32,76	32,24	-		
80	34,47	34,12	-		
70	29,11	29,39	0,00		
60	22,22	21,94	0,00		
50	19,38	18,55	0,02		
32	64,80	63,59	2,48	84,55	
25,4	22,47	16,36	5,43	40,00	
12,7	42,68	11,69	30,74	38,12	85,00
9,52	9,64	0,21	7,39	0,10	40,00
6,35	11,46	0,02	1,87	0,10	40,00
4,76	8,29	0,04	0,03	0,10	0,47
1,68	19,41	0,30	0,07	0,10	1,23
0,841	2,24	0,07	0,12	3,02	0,20
0,42	1,23	0,04	0,10	3,01	0,15
0,21	0,56	0,02	0,05	3,00	2,00
0,149	0,25	0,01	0,02	3,00	6,20
0,105	0,23	0,01	0,02	3,00	6,37
0,074	0,20	0,01	0,02	3,00	7,65
0,037	0,30	0,01	0,03	3,00	7,31

Fonte: Elaboração Própria.

**Tabela 16: Cálculo do Balanço de Massa do Peneiramento Secundário do Cenário 1. (Continuação)**

Balanço de Massa Cenário 1 - Retido Simples				
Alimentação (t/h)	O/S Deck 1 (t/h)	U/S Deck 1 (t/h)	O/S Deck 2 (t/h)	U/S Deck 2 (t/h)
-	-	-	-	-
1,91	1,91	-	-	-
34,95	34,95	-	-	-
32,76	32,76	-	-	-
34,47	34,47	-	-	-
29,11	29,11	-	-	-
22,22	22,22	-	-	-
19,38	19,38	-	-	-
64,80	54,79	10,02	10,02	-
22,47	8,99	13,48	13,48	-
42,68	16,27	26,41	22,45	3,96
9,64	0,01	9,63	3,85	5,78
11,46	0,01	11,45	4,58	6,87
8,29	0,01	8,28	0,04	8,25
19,41	0,02	19,39	0,24	19,15
2,24	0,07	2,18	0,00	2,17
1,23	0,04	1,19	0,00	1,19
0,56	0,02	0,55	0,01	0,54
0,25	0,01	0,24	0,02	0,23
0,23	0,01	0,22	0,01	0,21
0,20	0,01	0,20	0,02	0,18
0,30	0,01	0,29	0,02	0,27

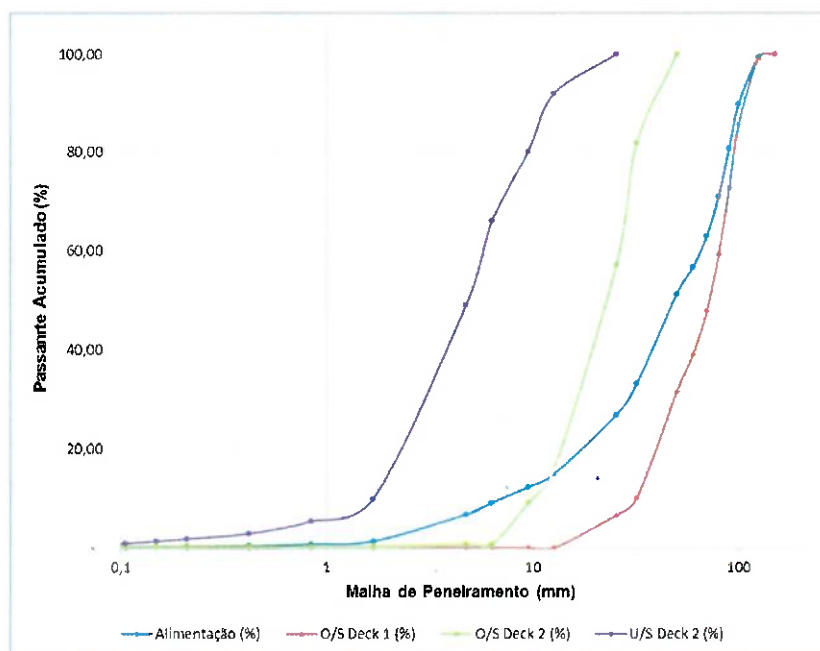
Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 17: Cálculo do Balanço de Massa do Peneiramento Secundário do Cenário 1. (Conclusão)

Balanço de Massa Cenário 1 - Passante Acumulado					
Alimentação (%)	O/S Deck 1 (%)	U/S Deck 1 (%)	O/S Deck 2 (%)	U/S Deck 2 (%)	
100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
99,47	99,25	100,00	100,00	100,00	100,00
89,72	85,55	100,00	100,00	100,00	100,00
80,58	72,70	100,00	100,00	100,00	100,00
70,97	59,19	100,00	100,00	100,00	100,00
62,85	47,77	100,00	100,00	100,00	100,00
56,66	39,06	100,00	100,00	100,00	100,00
51,25	31,46	100,00	100,00	100,00	100,00
33,18	9,98	90,33	81,70	100,00	100,00
26,91	6,46	77,31	57,07	100,00	100,00
15,01	0,08	51,79	16,06	91,88	91,88
12,32	0,07	42,49	9,02	80,04	80,04
9,13	0,07	31,44	0,66	65,97	65,97
6,81	0,07	23,44	0,59	49,07	49,07
1,40	0,06	4,71	0,15	9,81	9,81
0,78	0,03	2,60	0,14	5,36	5,36
0,43	0,02	1,45	0,14	2,93	2,93
0,28	0,01	0,93	0,12	1,83	1,83
0,21	0,01	0,69	0,09	1,36	1,36
0,14	0,01	0,47	0,07	0,93	0,93
0,08	0,00	0,28	0,04	0,56	0,56
-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Elaboração Própria.

Figura 14: Gráfico da % Passante Acumulada do Peneiramento Secundário do Primeiro Cenário.



Fonte: Elaboração Própria.