

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS**  
**Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais**

**MONOGRAFIA**

**Influência das Características do ROM no Dimensionamento de  
Equipamentos de Fragmentação – Britagem**

**Aluno: Igor Leonardo Cunha Carmo**

**Orientador: Roberto Galery**

**Julho 2015**

Igor Leonardo Cunha Carmo

## Influência das Características do ROM no Dimensionamento de Equipamentos de Fragmentação – Britagem

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Engenharia de Recursos Minerais.

Área de concentração: Processamento de Minério de Ferro

Professor Orientador: Roberto Galery

Belo Horizonte  
Universidade Federal de Minas Gerais  
Julho 2015

1. INTRODUÇÃO.....	6
2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA .....	7
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
3.1. DEFINIÇÕES BÁSICAS .....	9
3.1.1. Mineral.....	9
3.1.2. Rocha .....	10
3.1.3. Minério.....	11
3.1.4. Depósitos e Jazidas Minerais .....	11
3.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA MATÉRIA-PRIMA.....	12
3.2.1. Tamanho Máximo e Distribuição Granulométrica.....	12
3.2.2. Conteúdo de argila e umidade.....	12
3.2.3. Clivagem .....	13
3.2.4. Fratura .....	14
3.2.5. Densidade do material.....	15
3.2.6. Forma da Partícula.....	15
3.2.7. Dureza .....	15
3.2.8. Tenacidade.....	16
3.2.9. Abrasividade.....	17
3.2.10. Coesão .....	17
3.2.11. Resistência à Compressão.....	18
3.2.12. Velocidade de Propagação de Onda.....	18
3.2.13. Corrosividade.....	18
3.3. MECANISMOS DE FRAGMENTAÇÃO.....	18
3.3.1. Compressão ou Esmagamento.....	18
3.3.2. Choque ou Impacto.....	19
3.3.3. Cisalhamento (Abrasão).....	19
3.4. GRAU DE REDUÇÃO .....	20
3.5. CONCEITO E ESTÁGIOS DE BRITAGEM .....	20
3.5.1. Britagem Primária.....	21
3.5.2. Britagem Secundária.....	21
3.6. ASPECTOS ENERGÉTICOS DA FRAGMENTAÇÃO.....	23
3.7. EQUIPAMENTOS DE BRITAGEM.....	25
3.7.1. Britadores Fixos.....	25
3.7.2. Britador de Mandíbulas.....	25
3.7.3. Britador Giratório .....	26
3.7.4. Britador Cônico .....	27
3.7.5. Britador de Impacto .....	28
3.7.6. Britador Sizer.....	31
3.7.7. Britador de Rolo Dentado .....	33
3.7.8. Britador de Rolos.....	34
3.7.9. Britadores Móveis.....	35
4. ESTUDO DE CASO.....	39
5. CONCLUSÕES .....	47
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48

## RESUMO

A procura por equipamentos que mantenham eficiência e desgaste aceitáveis durante a vida útil de uma mina é a realidade dos desenvolvedores/fornecedores de equipamentos e de seus clientes. Para as operações de britagem, esta busca fica ainda mais evidente uma vez que tais equipamentos são conhecidos por serem grandes, caros e se mal dimensionados elevam o custo operacional, abaixam a produtividade da usina além de serem atualmente os maiores consumidores de energia das plantas de processamento mineral.

Para atingir um desempenho equilibrado durante a extração de toda a jazida, deve-se ter um conhecimento detalhado da matéria-prima mineral a ser processada na usina de beneficiamento e dos equipamentos disponíveis no mercado para o correto dimensionamento. Outro ponto importante para manter a eficiência em um nível satisfatório, seria o desenvolvimento de novos equipamentos utilizando novas tecnologias ampliando a abrangência no que se refere ao atendimento a uma gama maior de minérios, durezas e granulometrias visando preencher as lacunas abertas pelas mudanças nas características ao longo da lavra.

Neste trabalho será abordada uma situação de mudança nas características do ROM durante a extração de uma mina para evidenciar a influência que essas mudanças exercem na eficiência, desgaste e aspectos dos equipamentos de fragmentação.

Serão abordados os mecanismos de fragmentação, os princípios de funcionamento e os aspectos energéticos relacionados a eles.

Palavras-chave: Britador, Fragmentação, Cominuição, Características do minério, Eficiência, Energia.

## **ABSTRACT**

Demand for equipment to maintain acceptable efficiency and deterioration over the life of a mine is the reality of the developers / equipment suppliers and their customers. For the crushing operations, this quest is even more evident since these equipment are known to be big, expensive and if it be poorly sized it can raise operating costs, lower the plant's productivity besides currently are the largest energy consumers in the mineral processing plants.

To achieve a balanced performance during the extraction of the whole ore mine, it's necessary have a detailed knowledge of the mineral raw material to be processed in the ore processing plant and the equipment available in the market for right-sizing. Another important point to keep efficiency at a satisfactory level, would be the development of new equipment using new technologies expanding the coverage in regard to service to a wider range of ores, hardnesses and grain sizes in order to fill the gaps opened by changes in the characteristics throughout the extraction.

At this work will be addressed a changing situation in ROM's characteristics during the extraction of a mine to evidence the influence that these changes have on efficiency, wear and aspects of the fragmentation equipment.

The fragmentation mechanisms, the operation principles and the energy aspects related to them will be addressed.

Keywords: Crusher, Fragmentation, Comminution, ore characteristics, Efficiency, Energy.

## 1. INTRODUÇÃO

A procura por equipamentos que mantenham uma eficiência aceitável durante toda a vida útil de uma mina é a realidade de desenvolvedores/fornecedores e clientes, em especial na extração e beneficiamento de minério de ferro. O dimensionamento correto dos equipamentos de fragmentação, do ponto de vista da produtividade, eficiência energética, custos de investimento e operação, é um dos pontos mais importantes na atividade de mineração, haja vista que os circuitos de cominuição são conhecidos por serem caros e se mal dimensionados elevam o custo operacional, abaixam a produtividade da usina além de atualmente serem os maiores consumidores de energia das plantas de processamento.

Existem duas áreas de cominuição, a britagem e a moagem. Estas etapas são responsáveis pela redução granulométrica e adequação do tamanho de partícula aos processos de classificação e concentração subsequentes. Entre os inúmeros fatores que influenciam na escolha e conseqüentemente no desempenho dos equipamentos utilizados na britagem e moagem, encontram-se as características físicas das matérias-primas minerais, como a dureza, a abrasividade, coesão, entre outras.

## **2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA**

O objetivo deste trabalho é mostrar como as mudanças das características físicas das matérias-primas minerais (ROM) influenciam no dimensionamento e escolha dos equipamentos de cominuição (britadores). Para obter o desempenho desejado de todos os equipamentos é fundamental ter um conhecimento detalhado da matéria-prima mineral a ser processada na usina de beneficiamento. Será mostrado também as definições básicas e as características físicas das matérias primas, os princípios de funcionamento dos principais modelos de britadores utilizados nas atuais plantas de processamento mineral, bem como as forças envolvidas no processo de fragmentação.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os circuitos de cominuição visam reduzir o tamanho das partículas minerais para obter a granulometria adequada para o transporte e manuseio do material, obtenção de granulometria com especificações já próprias para a venda bem como o ajuste ao grau de liberação necessário para alimentar as etapas subsequentes. Podemos destacar também a adequação da área superficial específica que é de grande importância para etapas de concentração expondo uma área maior dos minerais aos reagentes químicos e físicos.

As operações de cominuição compreendem diversos estágios que se aplicam ao minério, desde a mina, até sua adequação ao processo de beneficiamento. Na etapa de lavra, o desmonte do minério ou rocha, com o auxílio de explosivo ou equipamentos mecânicos pode ser visto como um primeiro estágio de fragmentação, onde são produzidos blocos maiores, mas com um tamanho que permita alimentar os equipamentos de britagem. A britagem é a operação que fragmenta os blocos obtidos após a etapa de desmonte, podendo ter vários estágios e diferentes tipos de equipamentos, até que se obtenha a granulometria própria para a venda ou adequada à alimentação da etapa subsequente que é a moagem. A moagem é a operação de fragmentação mais fina obtendo-se nela um produto adequado à concentração ou a qualquer outro processo industrial, como a pelotização, lixiviação e combustão também podendo ter mais de um estágio.

É importante que a redução seja realizada utilizando o menor número de estágios, visando reduzir custos de investimento, operação e manutenção, tendo como foco um processo eficiente em termos de produtividade e disponibilidade.

O processo de cominuição é a etapa mais cara do beneficiamento de minérios, portanto, deve ser muito bem pensada, dimensionada, operada e mantida com rigoroso controle.

### 3.1. DEFINIÇÕES BÁSICAS

#### 3.1.1. Mineral

A definição de mineral possui algumas controvérsias: para alguns é toda substância homogênea, sólida ou líquida, de origem inorgânica e que surge, naturalmente, na crosta terrestre, normalmente com composição química definida e, que se formado em condições favoráveis, terá estrutura atômica ordenada condicionando sua forma cristalina e suas propriedades físicas; para outros, trata-se de substância com estrutura interna ordenada (cristais), de composição química definida, origem inorgânica e que ocorre naturalmente na crosta terrestre ou em outros corpos celestes (UNESP, 2003).

As substâncias originadas por atividades ou processos biológicos (animal ou vegetal), a exemplo do carvão, âmbar, marfim, pérola, petróleo, que não se incluem em nenhuma das definições, devem ser denominadas mineralóides, como também as substâncias não cristalinas, excluídas na segunda definição (UNESP, 2003).

Os minerais são caracterizados pela maneira com que os átomos (cátions e ânions) estão dispostos (estrutura interna) e pela composição química, expressa por fórmula química. A composição química dos minerais pode variar dentro de limites definidos e previsíveis pelas características atômicas, gerando os diferentes grupos de minerais ou soluções sólidas (UNESP, 2003).

Os minerais constituem os diferentes tipos de rochas, mono ou poliminerálicas, sedimentares, metamórficas, magmáticas, hidrotermais ou pneumatolíticas. Algumas dessas rochas, devido à granulação muito fina, a exemplo de alguns tipos de basaltos, mostram-se em um exame a olho nu, com aparência de um único mineral (massas homogêneas). Todavia, quando observado ao microscópio petrográfico e em casos extremos ao microscópio eletrônico, verifica-se que são constituídos por várias substâncias cristalinas e, às vezes, também por material amorfo (vidro) (UNESP, 2003).

As substâncias produzidas em laboratório, com estrutura interna ordenada e composições químicas definidas, são denominadas cristais ou minerais artificiais ou sintéticos, e as sem estrutura interna, de vidro. Atualmente o homem consegue

reproduzir em laboratório, com bastante semelhança, praticamente todos os minerais e gemas naturais. Desta forma, em laboratórios são produzidos o diamante, a safira, o rubi, o quartzo, o espinélio, a esmeralda etc (UNESP, 2003).

### 3.1.2. Rocha

É um agregado natural formado de um ou mais minerais (podendo eventualmente tratar-se de um vidro vulcânico), que constitui parte essencialmente da crosta terrestre e é nitidamente individualizado. Por isso, as rochas ocorrem em extensões consideráveis na crosta terrestre, podendo, na maioria das vezes, ser representada em mapas geológicos. São elas nitidamente individualizadas, porque os minerais se agregam obedecendo as leis físicas, químicas ou físico químicas, dependendo das situações em que se formam esta ou aquela rocha. Esta agregação, portanto, não se dá ao acaso. Não é necessário que a rocha seja consolidada. As areias, as argilas, etc., desde que representem corpos independentes, individualizados e extensos, são considerados rochas. De acordo com a sua origem, distingue-se 3 grandes grupos, tais como: rochas magmáticas e rochas metamórficas (Leinz, 1975).

Rochas magmáticas, ou ígneas. Provêm da consolidação do magma e são por isso de origem primária. Delas se derivam por processos várias rochas sedimentares e metamórficas (Leinz, 1975).

Rochas sedimentares. As rochas sedimentares no senso estrito são aquelas formadas a partir do material originado da destruição erosiva de qualquer tipo de rocha, material este que deverá ser transportado e posteriormente depositado ou precipitado em um dos muitos ambientes de sedimentação da superfície do globo terrestre. No senso lato incluem também qualquer material proveniente das atividades biológicas. O critério da classificação das rochas sedimentares segue vários princípios, normalmente combinados entre si, como o ambiente, o tipo de sedimentação, constituição mineralógica ou tamanho das partículas (Leinz, 1975).

Rochas metamórficas. Tanto as rochas magmáticas como as sedimentares podem ser levadas por processos geológicos a condições diferentes daquelas nas quais se formou a rocha. Estas novas condições podem determinar a instabilidade dos minerais pré-

existentes, estáveis nas antigas condições em que foram formadas. Estas rochas sofrem então transformações sob ação destas novas condições de temperatura, pressão, presença de agentes voláteis ou fortes atritos, adaptando-se, assim, a estas novas condições. Esta adaptação é que dão origem à formação das diferentes rochas denominadas rochas metamórficas. Dependendo do caso, poderá ou não mudar a composição mineralógica, mas a textura muda obrigatoriamente. Normalmente podem ocorrer tanto a recristalização dos minerais preexistentes como também a formação de novos minerais, graças à mudança da estrutura cristalina sob as novas condições de pressão, temperatura, ou ainda graças à combinação química entre dois ou mais minerais formando um novo mineral, agora compatível e estável sob as novas condições reinantes (Leinz, 1975).

### 3.1.3. Minério

Minério é toda rocha constituída de um mineral ou agregado de minerais contendo um ou mais minerais valiosos, possíveis de serem aproveitados economicamente. Esses minerais valiosos, aproveitáveis como bens úteis, são chamados de minerais-minério. O mineral ou conjunto de minerais não aproveitados de um minério é denominado ganga (Lins, 2004). Os minérios podem ser, então, trabalhados economicamente num dado local, em uma determinada época e por um certo lucro (Galery, 2012).

### 3.1.4. Depósitos e Jazidas Mineraias

Os minerais fazem parte dos recursos naturais de um país, ao lado das terras para agricultura, das águas (de superfície e subterrânea), biodiversidade etc. Os estudos geológico e hidrológico básicos de um país ou região são realizados, via de regra, por seu serviço geológico ou entidade equivalente, que os disponibiliza para o público. No Brasil, essa missão está a cargo da CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Como as matérias-primas mineraias possíveis de serem utilizadas diretamente ou transformadas pela indústria encontram-se distribuídas de maneira escassa na crosta terrestre, cabe às empresas de mineração, com base nas informações geológicas básicas, realizarem a pesquisa mineral em áreas previamente selecionadas, em busca de depósitos de potencial interesse econômico. Feitas a quantificação e qualificação do corpo mineral

(cubagem), tem-se um depósito mineral. Quando este apresenta condições tecnológicas e econômicas de ser aproveitado, tem-se finalmente uma jazida mineral (Lins, 2004).

O minério é explorado da jazida por meio de operações de lavra (a céu aberto ou subterrânea) na mina. O produto da mina, o minério lavrado, é frequentemente denominado ROM ("run-of-mine"), que vem a ser a alimentação da usina de beneficiamento (Lins, 2004).

O preço de mercado de um determinado bem mineral, importante para a definição de uma jazida, está condicionado a um elevado número de variáveis. Entre outras, salientamos: frequência em que ocorrem esses minerais na crosta terrestre, complexidade na lavra e beneficiamento, distância da mina ao mercado consumidor etc. Vale ressaltar, porém, o aspecto circunstancial, pois em dependência da conjuntura político-econômica um depósito pode passar a ser uma jazida ou vice-versa (Lins, 2004).

### **3.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA MATÉRIA-PRIMA**

#### **3.2.1. Tamanho Máximo e Distribuição Granulométrica**

O tamanho máximo dos blocos contidos no ROM é um dos fatores que influencia diretamente na escolha do modelo de britador a ser utilizado e por consequência no fator de redução das partículas e capacidade de produção. O tamanho máximo da alimentação nos estágios intermediários de britagem é função das condições operacionais dos estágios anteriores.

A distribuição granulométrica da alimentação é importante na escolha do tipo de instalação. Assim, por exemplo, o conteúdo de finos na alimentação define a conveniência ou não de um escalpe prévio da alimentação do britador. Entre outros, os fatores econômicos e operacionais definem a extensão do escalpe (Figueira, 2004).

#### **3.2.2. Conteúdo de argila e umidade**

Os minérios que apresentam um alto conteúdo de argila e elevada umidade, impossibilitam praticamente a britagem em granulometria de 20 – 25 cm, pois

dificultam o peneiramento e a operação de alguns tipos de britadores. Britadores giratórios, cônicos e de mandíbulas são altamente sensíveis à presença de argila e à umidade no minério (Figueira, 2004).

### 3.2.3. Clivagem

Quando minerais são submetidos a uma força externa destrutiva, como um forte impacto por um martelo, estes se rompem. Existem várias maneiras de rompimento físico, ou seja desintegração mecânica, no qual, clivagem, partição e fratura são típicos. Certos minerais se rompem sempre ao longo de determinadas superfícies planas paralelas. Tal tipo é denominado de clivagem. As micas e grafita, possuem um plano de clivagem desenvolvida em uma direção, rompendo-se na forma de placas. Piroxênios e anfibólios possuem clivagem desenvolvida em duas direções, rompendo-se na forma colunar. A halita (NaCl; sal comum) possui clivagem muito destacada em três direções, rompendo-se na forma cúbica. O berilo e apatita também têm clivagem, porém, são menos desenvolvidas (Tabela 3.1). Clivagem é originada da estrutura cristalina do mineral, ou seja, a configuração ou coordenação de átomos ou íons. Portanto, o mineral se rompe sempre segundo direções paralelas aos planos de configuração atômica, sendo obviamente paralelas aos planos de cristalização. Existem minerais, tal como quartzo, que possuem planos de cristalização bem desenvolvidos, porém não acompanhados por clivagem (Peroni, 2003).

Tabela 3.1- Clivagens e Fratura (Peroni, 2003).

<b>Clivagem</b>	<b>Forma Exemplar</b>	<b>Desenvolvimento</b>	<b>Exemplos</b>
Um plano	Quebrar-se em folhas	Alto	Micas, Grafita, Clorita
		Baixo	Diamante
Dois planos	Quebrar-se em colunas	Alto	Piroxênios, Anfibólios
		Baixo	Olivina
Três planos	Quebrar-se em pedaços angulosos	Alto	Plagioclásio, Calcacita
		Baixo	
Sem clivagem	Fratura conchoidal	-	Quartzo

Clivagem: está relacionada com o rompimento da estrutura cristalina do mineral, produzindo-se superfícies planas definidas. Se dá paralelamente aos planos de maior coesão. Tipos: perfeita, boa, regular, indistinta (Peroni, 2003).



Figura 3.1 – Tipos de clivagem (Peroni, 2003).

#### 3.2.4. Fratura

Existem minerais que se rompem na direção não sendo paralela aos planos do cristal. O plano de rompimento deste tipo não é reto. Tal modo é denominado de fratura. São conhecidas descritivamente algumas formas de fratura. Está relacionada com a maneira ou a forma como ele se rompe quando isto não ocorre ao longo das superfícies de clivagem ou de partição. Superfície de fraqueza irregular ou curva resultante da quebra de um mineral (Peroni, 2003).

- Fratura conchoidal: fratura mais comum, com superfícies lisas e curvadas de modo semelhante à superfície interna de uma concha. Este tipo é observado comumente em quartzo e vidro.
- Fratura acicular: rompimento na forma de agulhas ou fibras finas.
- Fratura serrilhada: rompimento segundo uma superfície de forma dentada, irregular, com bordas angulosas.
- Fratura irregular: rompimento formado por superfícies rugosas e irregulares.

### 3.2.5. Densidade do material

Os britadores são equipamentos que apresentam como constante a capacidade volumétrica de produção. Assim, a capacidade desses equipamentos, expressa em t/h, é proporcional à densidade do minério (Figueira, 2004).

### 3.2.6. Forma da Partícula

A forma das partículas é importante na definição da boca (Gap) de entrada dos equipamentos. Para materiais lamelares exige-se uma relação entre a boca de entrada e o tamanho máximo das partículas maior do que a geralmente requerida para minérios não lamelares (Figueira, 2004).

### 3.2.7. Dureza

A dureza no sentido mineralógico corresponde a um parâmetro de resistência mecânica da superfície dos minerais. Quanto maior for força de interligação entre os átomos constituintes, tanto maior será a dureza. A dureza do mineral é definida através de ensaios de risco entre dois minerais, isto é, quando a superfície de um mineral é riscada por um outro mineral ou não. Em 1832, Mohs apresentou uma escala com 10 minerais padrões, denominada de escala Mohs (Tabela 3.2). A dureza pode não ser igual em todas as direções é, portanto, uma propriedade vetorial (Peroni, 2003).

O talco, padrão mineral de dureza 1, é facilmente riscado pela unha, porém o gipso, dureza 2, não é muito fácil de ser riscado pela unha. A calcita, padrão de dureza 3, é facilmente riscada por prego, porém, o ortoclásio, de dureza 6, não é riscado. O quartzo, padrão de dureza 7, não é riscado mesmo por canivete de aço. Calcário e mármore são compostos quase totalmente de minerais carbonatos, cuja dureza é baixa (dureza 3), portanto, essas rochas podem ser cortadas por serras de aço. Por outro lado, rochas graníticas (de sentido comercial), que contêm minerais de alta dureza, tais como quartzo (dureza 7) e feldspato potássico (dureza 6), precisam de serras diamantadas para corte. Nota-se que todas as rochas holocristalinas de granulometria grossa, que não são mármore, são chamadas comercialmente de “granito”. O rubi e a safira são minerais da espécie do coríndon. Por causa da sua alta dureza (dureza 9), o custo de lapidação é alto.

O diamante (dureza 10) é constituído por firme rede tetraédrica de carbono, que não pode ser riscado por nenhum outro mineral. O único material que pode lapidar diamante é o próprio diamante (Peroni, 2003).

Tabela 3.2- Escala de dureza relativa de risco, definida por Mohs (Peroni, 2003).

Dureza	Padrão	Composição Química	Observações
1	Talco	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	Risca-se com unha
2	Gipsita	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Risca-se com plástico comum e prego
3	Calcita	$CaCO_3$	Risca-se com prego e canivete de aço
4	Fluorita	$CaF_2$	Risca-se com lima de aço e vidro de quartzo
5	Apatita	$Ca_5(PO_4)_3(OH,F,Cl)$	Material constituinte de ossos de animais
6	Ortoclásio	$KAlSi_3O_8$	Não se risca com prego. Dureza do vidro comum
7	Quartzo	$SiO_2$	Não se risca com canivete de aço e vidro comum
8	Topázio	$Al_2SiO_4(OH,F)_2$	Não se risca com lima de aço
9	Coríndon	$Al_2O_3$	Material correspondente a abrasivo "alundum"
10	Diamante	C	Nenhum material pode riscar o diamante

### 3.2.8. Tenacidade

Tenacidade é uma medida da habilidade de um material em absorver energia até a sua fratura. Vários termos são utilizados como sinônimos ou associados à definição de tenacidade: friável (frágil, quebradiço), maleável, séctil, dúctil, flexível e elástico. Os dois termos, dureza e tenacidade, de uma maneira ou de outra correspondem à forma que os bens minerais respondem às forças de fragmentação a que são submetidos. Fatores importantes para definir esta propriedade é a forma geométrica do corpo de prova, bem como a maneira com que a carga é aplicada. (Galery, 2011).

- Frágil: o mineral é rompido ou pulverizado facilmente por pequenos esforços. Calcopirita e minerais de argila são exemplos (Peroni, 2003).
- Maleável: o mineral é estendido por uma força compressiva, transformando-se em uma lâmina fina ou folha por meio de deformação plástica permanente. Elementos nativos do grupo do cobre (platina, ouro, prata e cobre) possuem esta propriedade (Peroni, 2003).

- Sécil: o mineral é cortado por faca ou canivete em folhas finas. Os elementos nativos do grupo do cobre têm esta propriedade (Peroni, 2003).
  
- Dúctil: o mineral é extraído e alongado por uma força distensional formando fios, por deformação plástica. Elementos nativos do grupo do cobre têm esta propriedade (Peroni, 2003).
  
- Flexível: diante de um esforço, o mineral se deforma plasticamente, e não retoma a sua forma original mesmo após a retirada do esforço. Elementos nativos do grupo do cobre têm esta propriedade (Peroni, 2003).
  
- Elástico: diante de um esforço, o mineral se deforma, porém, retoma a sua forma original após a retirada do esforço. Quase todos os minerais demonstram esta propriedade diante de esforço pequeno (Peroni, 2003).

#### 3.2.9. Abrasividade

A abrasividade corresponde à capacidade que um material possui de arranhar ou desgastar, por fricção, outro material. A abrasividade é determinada pela análise/testes do material a ser transportado para que possamos especificar cada componente do equipamento que estiver em contato com o material, a fim de evitar um desgaste prematuro de componentes internos (UFBA, *Transporte de Granéis*).

#### 3.2.10. Coesão

É a força de atração entre átomos e moléculas que constituem um corpo, e que resiste a que este se quebre. A fragmentação das partículas se dá pelo rompimento das forças de coesão ao longo das superfícies que se formam. A distribuição característica do produto de fragmentação depende não só da natureza das forças de coesão interna das partículas como também da forma de energia e da intensidade com que elas foram aplicadas sobre a partícula (Galery, 2011).

### 3.2.11. Resistência à Compressão

Dada a força de atração entre os átomos e moléculas (coesão), quanto mais forte for o ligamento entre os cristais, maior a resistência à compressão. Quando a tensão supera as energias de ligação química, as mesmas se rompem e a trinca se propaga de forma acelerada e desordenada. Após a ruptura e uma vez cessada a causa da deformação, os fragmentos resultantes retornam a sua forma de equilíbrio (Galery, 2011).

### 3.2.12. Velocidade de Propagação de Onda

Dependendo da intensidade da energia aplicada, as partículas não têm condições de dissipar imediatamente toda a energia absorvida e distribuem a mesma para um número muito grande de trincas, podendo ocorrer propagação da trinca com ramificações sucessivas e ruptura em diversos fragmentos. Quando a energia for de impacto de alta intensidade, a propagação da trinca atinge a velocidade máxima. Mesmo que forças compressivas não consigam gerar forças de cisalhamento capazes de provocar fratura, os reflexos das ondas compressivas provocadas por uma região não solicitada da partícula podem gerar tracionamento suficiente para causar ruptura nas trincas presentes no material que se propagam em ramificações sucessivas. A condição de impacto envolve a propagação da onda de choque e provoca ramificação da trinca em alta velocidade. Esse processo ocorre de forma aleatória e desordenada (Galery, 2011).

### 3.2.13. Corrosividade

Minérios corrosivos impõem condições especiais na escolha dos materiais e equipamentos usados na instalação (Figueira, 2004).

## **3.3. MECANISMOS DE FRAGMENTAÇÃO**

### 3.3.1. Compressão ou Esmagamento

Partículas são comprimidas entre duas superfícies. A força é aplicada de forma mais lenta, de tal maneira que este esforço possa ser diminuído com o aparecimento das

fraturas nas partículas. O número de fragmentos resultantes é, em geral, pequeno, e o tamanho das partículas resultantes é próximo ao da partícula original (Galery, 2012).



Figura 3.2 - Esquema de fratura por compressão. Kelly e Spottiswood (1982)

### 3.3.2. Choque ou Impacto

A força aplicada é muito superior à resistência da partícula, causando o aparecimento de um grande número de partículas em uma ampla faixa granulométrica. Há utilização de energia cinética ( $mV^2/2$ ) através de uma massa que normalmente descreve trajetórias circulares e se choca com blocos ou partículas. É o que apresenta maior eficiência energética, mas, normalmente sua aplicação é mais restrita aos materiais menos abrasivos (Galery, 2012).



Figura 3.3 - Esquema de fratura por choque ou impacto. Kelly e Spottiswood (1982)

### 3.3.3. Cisalhamento (Abrasão)

Ocorre quando as partículas se acham colocadas entre superfícies com movimentos de sentido contrário. Neste caso, a força aplicada é insuficiente para provocar a fratura em toda a partícula, resultando em pequena diminuição da partícula original e a geração de partículas finas (Galery, 2012).



Figura 3.4 - Esquema de fratura por Cisalhamento (Abrasão). Kelly e Spottiswood (1982)

### 3.4. GRAU DE REDUÇÃO

Endente-se por grau de redução a relação entre o tamanho das arestas dos maiores fragmentos da alimentação do equipamento de cominuição, e o tamanho das arestas dos maiores fragmentos do produto gerado pelo mesmo.

Os diferentes equipamentos de cominuição apresentam graus de redução máximos distintos, da mesma forma minérios constituídos de composições mineralógicas distintas apresentam, também, valores de resistência à fragmentação, distintos (Santana D. C, 2009). Portanto o grau de redução obtido em uma operação de cominuição é, de maneira generalizada, função de dois aspectos técnicos: Tipo de equipamento de cominuição e tipo de minério.

### 3.5. CONCEITO E ESTÁGIOS DE BRITAGEM

Genericamente, britagem pode ser definida como o conjunto de operações que objetiva a fragmentação de blocos de minérios vindos da mina, levando-os a granulometrias compatíveis para utilização direta ou para posterior processamento.

A britagem é um estágio no processamento de minérios, que utiliza, em sucessivas etapas, equipamentos apropriados para a redução de tamanhos convenientes, ou para a liberação de minerais valiosos de sua ganga. É aplicada a fragmentos de distintos tamanhos, desde rochas de 1000 mm até 10 mm. Não existe um circuito padrão para britar os diferentes tipos de minério. Geralmente a operação de britagem é feita dentro dos estágios convenientes.

Normalmente, para haver uma liberação satisfatória do mineral valioso, é necessário que o minério seja reduzido a uma granulometria fina. Nestas condições, a fragmentação desenvolve-se por meio de três estágios, isto é, grossa, intermediária e fina ou moagem. Nos dois primeiros estágios a fragmentação é realizada em britadores e

no último estágio, em moinhos. Não há rigidez quanto aos estágios de britagem, porém, normalmente se usa a classificação mostrada na Tabela 3.3 (Figueira, 2004).

Tabela 3.3- Classificação dos estágios de britagem (Figueira, 2004).

<b>Estágio de Britagem</b>	<b>Tamanho Máximo de Alimentação (mm)</b>	<b>Tamanho Máximo de Produção (mm)</b>
Britagem Primária	1000	100,0
Britagem Secundária	100	10,0
Britagem Terciária	10	1,0
Britagem Quaternária	5	0,8

### 3.5.1. Britagem Primária

Os britadores empregados são os de grande porte e sempre operam em circuito aberto. A britagem primária é realizada a seco e tem uma razão de redução em torno de 8:1. Para este estágio são utilizados os seguintes tipos de britadores: britador de mandíbulas, britador giratório, britador de impacto e o de rolos dentado. A Tabela 3.4 apresenta um quadro comparativo das características desses equipamentos (Figueira, 2004).

### 3.5.2. Britagem Secundária

Entende-se por britagem secundária, de forma geral, todas as gerações de britagem subsequentes à primária. Tem como objetivo na maioria dos casos a redução granulométrica do material para a moagem. É comum na britagem secundária o descarte prévio da fração fina na alimentação, com a finalidade de aumentar a capacidade de produção. Esta operação é chamada “escalpe” (Figueira, 2004).

Os equipamentos normalmente utilizados são:

- britador giratório secundário;
- britador de mandíbulas secundário;
- britador cônico;
- britador de martelos;
- britador de rolos.

Os britadores giratórios, mandíbulas e martelos são semelhantes àqueles empregados na britagem primária, apenas tendo dimensões menores (Figueira, 2004).

Tabela 3.4 - Quadro comparativo dos britadores primários (Figueira, 2004).

<b>Características Consideráveis</b>	<b>Britador de Mandíbulas</b>	<b>Britador Giratório</b>
Capacidade	Bom para capacidades baixas e médias (1000 t/h)	Bom para capacidades médias e altas
Granulometria do Produto	Recomendado quando é indesejável grande quantidade de finos no produto. O top size do produto é alto para materiais lamelares	Idêntico ao de mandíbulas quanto a finos. Mas apresenta top size 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 top size 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 top size do produto é alto
<b>Características Consideráveis</b>	<b>Britador de Impacto</b>	<b>Britador de Rolo Dentado</b>
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 se fazer o trabalho de britagem primária e secundária em uma só máquina	Alto. 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

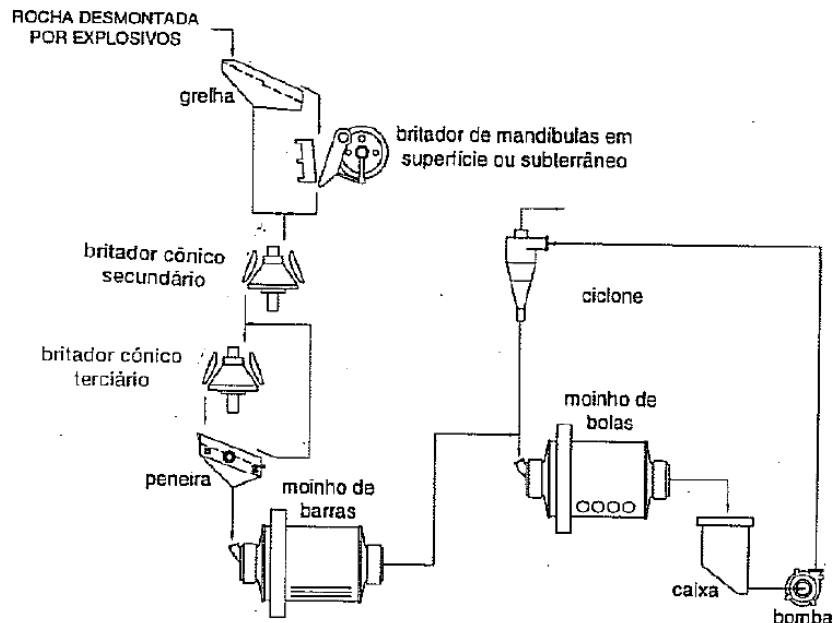


Figura 3.5 – Circuito clássico de cominuição (Chaves, 2003).

Neste circuito nota-se que as últimas etapas de britagem e moagem são operadas em circuito fechado, com peneiras no primeiro caso e com ciclones no segundo (classificação granulométrica). O circuito clássico com seus equipamentos corretamente dimensionados cumpre muito bem seus objetivos (Chaves, 2003).

As operações de cominuição podem ser feitas a seco e a úmido. “a úmido” significa que a moagem é feita numa polpa com água suficiente para o transporte dos sólidos. “A seco” significa com a umidade natural do minério, isto é, sem adição de água no processo o que é possível somente até certo limite de umidade (Chaves, 2003).

### 3.6. ASPECTOS ENERGÉTICOS DA FRAGMENTAÇÃO

A grande questão que se apresenta é que a maior parte da energia aplicada nos equipamentos de fragmentação (britadores e moinhos) é perdida através de deformação, atrito, ruído dentre outros, de forma que somente uma pequena fração de energia aplicada fica disponível para a fragmentação do material.

A teoria da cominuição se desenvolveu considerando dois aspectos principais: a energia aplicada e o tamanho das partículas obtidas a partir de uma condição inicial. A teoria mais antiga é atribuída a Rittinger (1867) na qual a energia consumida na redução do tamanho é proporcional à área da nova superfície produzida. Kick, em 1885, propôs

uma segunda teoria cujo enunciado diz que o trabalho necessário à fragmentação é proporcional à redução em volume das partículas. A equação proposta por Bond, mais recentemente (1952), é baseada na teoria de Rittinger. Considera-se, contudo, neste caso, que o trabalho aplicado é proporcional ao comprimento das fissuras iniciais que se desenvolvem no faturamento.

A equação de Bond é ainda utilizada hoje, com aplicação de fatores de correção. O valor de  $W_i$  cuja determinação é feita em laboratório com procedimento padronizado, está relacionado com a maior ou menor facilidade que o material apresentará com relação à sua fragmentação (Galery, 2012).

Hukki, em 1961 verificou que cada uma dessas equações propostas tinha aplicação em certas faixas granulométricas (Galery, 2012).

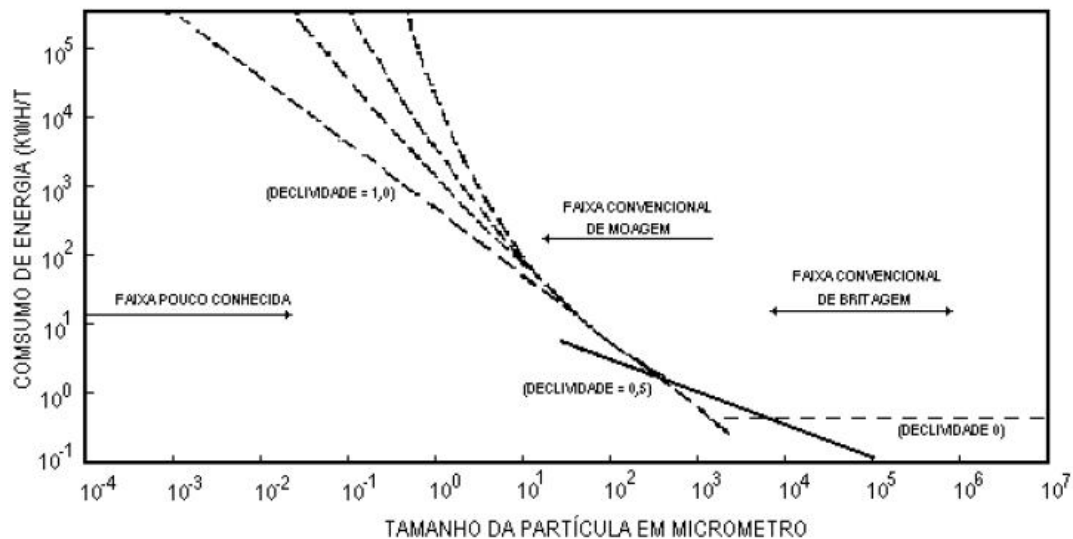


Figura 3.6 – Relação entre energia fornecida e tamanho da partícula na cominuição (Figueira, 2004).

A modelagem do processo de fragmentação tem sido desenvolvida modernamente, levando em conta a cinética de fraturamento das partículas, buscando-se uma relação entre os parâmetros desses modelos e as variáveis operacionais.

### 3.7. EQUIPAMENTOS DE BRITAGEM

#### 3.7.1. Britadores Fixos

#### 3.7.2. Britador de Mandíbulas

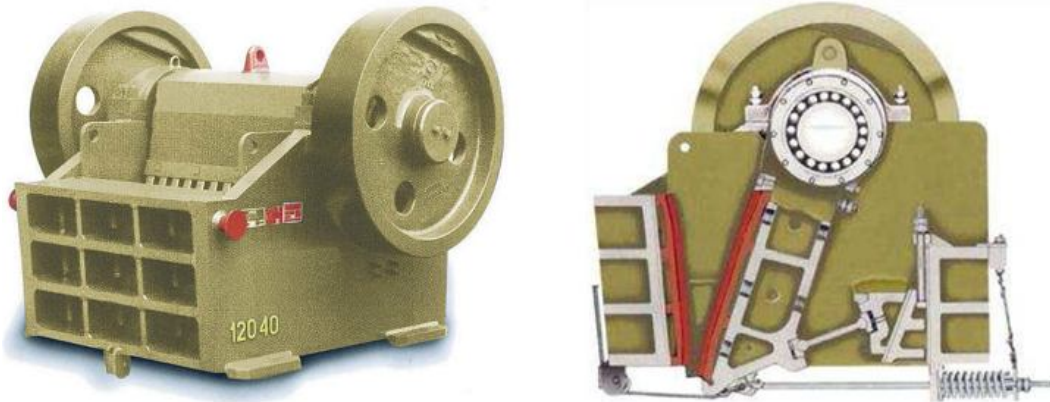


Figura 3.7 - Britador de Mandíbulas de um Eixo (Metso, 2005).

Os britadores de mandíbulas caracterizam-se pela existência de duas superfícies, sendo uma fixa e outra móvel. O material é fragmentado pela aproximação e pelo afastamento da placa móvel (velocidade entre 100 e 300rpm), sendo o material escoado por gravidade. O tipo blake, no qual a placa móvel é presa no topo, caracteriza-se por ter uma abertura de alimentação fixa e uma abertura de saída variável, e é o mais utilizado na prática. Existem dois tipos de britadores, neste caso, com um eixo (Figura 3.7) e com dois eixos (Figura 3.8) (Galery, 2012).

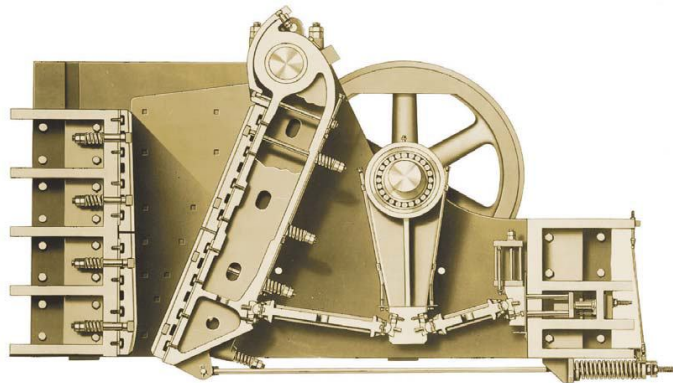


Figura 3.8 - Britador de Mandíbulas de dois Eixos (Metso, 2005).

Os britadores de mandíbulas de 2 eixos (tipo Blake) são indicados especialmente para britagem primária de materiais extremamente resistentes, duros e/ou abrasivos, em pedreiras, minerações e indústrias. Têm larga aplicação na britagem de ferro-ligas, os quais apresentam normalmente alta dureza. Os britadores de 2 eixos apresentam grande facilidade de operação e caracterizam-se principalmente pelo menor consumo de peças de desgaste, quando comparados com os britadores de um eixo. Através do eixo sem excentricidade, consegue-se movimento puramente pendular da mandíbula móvel, fazendo com que a britagem se dê, essencialmente por compressão; o material britado desce somente por gravidade, sem ser arrastado pelas mandíbulas. Dessa forma, o atrito sobre as mandíbulas é minimizado, aumentando sua vida útil. Também a velocidade de oscilação do queixo, menor que nos britadores de 1 eixo, contribui para maior duração das mandíbulas (Metso, 2005).

### 3.7.3. Britador Giratório

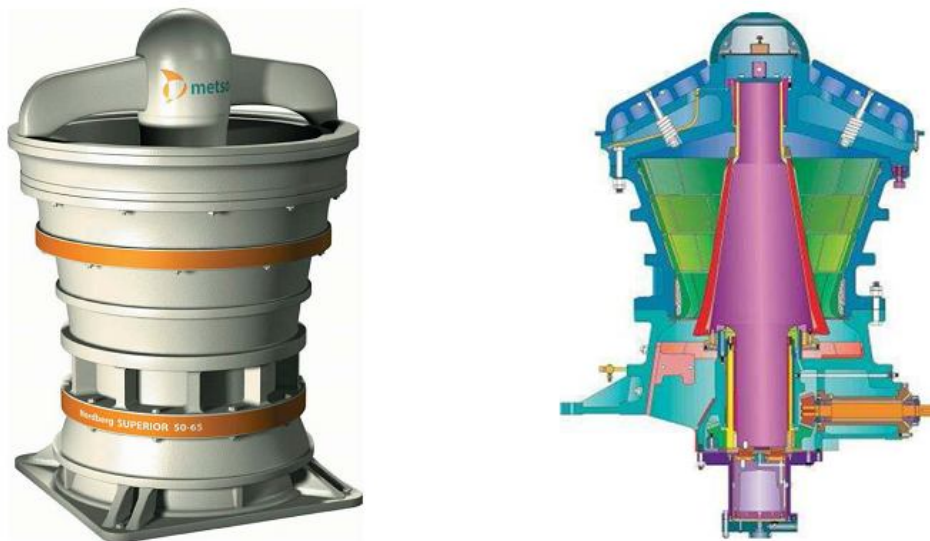


Figura 3.9- Britador Giratório (Metso, 2005).

Os britadores giratórios são constituídos de uma superfície externa, em forma de tronco de cone com vértice para baixo, e uma interna, com vértice para cima. A superfície interna descreve um movimento circular (rotação entre 85 e 150rpm) de tal maneira que, considerando-se um ponto fixo na superfície externa, verifica-se que a aproximação e o afastamento dessa superfície em relação a fixa. Os britadores giratórios, de forma

contrária aos britadores de mandíbula, realizam a fragmentação durante todo o ciclo de operação, apresentando maior capacidade quando comparados com britadores de mandíbula. São os equipamentos mais utilizados para alimentações próximas ou maiores que 1.000 t/h. Os grandes britadores giratórios podem operar recebendo alimentação diretamente de caminhões, dispensando o uso de alimentadores. A utilização de grelhas para o escalpe da alimentação é opcional e depende das características do material a ser britado (Galery, 2012). Para otimizar os custos operacionais e melhorar o formato do produto, é recomendada a alimentação abundante, mantendo a boca de entrada do britador sempre cheia de material (Metso, 2005).

#### 3.7.4. Britador Cônico



Figura 3.10 - Britador Cônico (Metso, 2005).

O britador cônico possui o mesmo princípio de operação do britador giratório. Contrariamente ao que ocorre no britador giratório, no cônico, o manto e o cone apresentam longas superfícies paralelas, para garantir um tempo longo de retenção das partículas nessa região. No britador giratório a descarga se dá pela ação da gravidade, enquanto que no cônico, a descarga é condicionada ao movimento do cone. O movimento vertical do cone, para cima e para baixo, controla a abertura de saída, para tal, utilizam-se dispositivos hidráulicos (Figueira, 2004). Os britadores cônicos são os mais utilizados para a britagem secundária. Normalmente os fabricantes recomendam a utilização de um silo e alimentador antes do britador cônico para manter a câmara de britagem sempre cheia, visando aumentar a eficiência de britagem e manter o desgaste uniforme.

### 3.7.5. Britador de Impacto

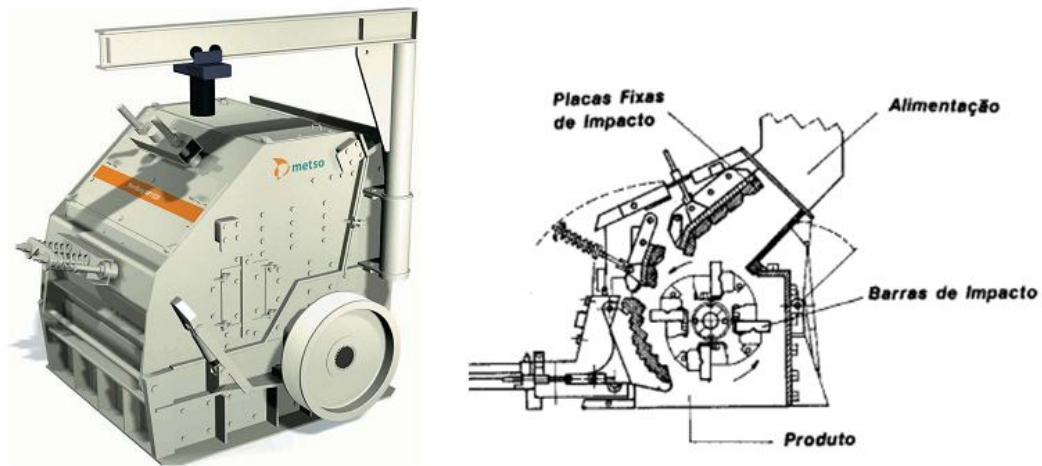


Figura 3.11 – Britador de Impacto com eixo horizontal (Metso, 2005) (Galery, 2012).

No britador de impacto, a fragmentação é feita por impacto ao invés de compressão. Por meio do movimento das barras (500 até 3.000 rpm), parte da energia cinética é transferida para o material, projetando-o sobre as placas fixas de impacto onde ocorre a fragmentação. A desvantagem do uso desse equipamento é que apresenta elevado custo de manutenção e grande desgaste, não sendo aconselhável seu uso, no caso de rochas abrasivas e de materiais com valor da sílica equivalente ou maior que 15%. Estes equipamentos são escolhidos para britagem primária, onde se deseja uma alta razão de redução e alta porcentagem de finos (Figueira, 2004). Atualmente existem três tipos de britadores de impacto com larga aplicação, britador de impacto com eixo horizontal (Figura 3.11), britador de impacto com eixo vertical (Figura 3.12) e britador de martelos (Figura 3.13).



Figura 3.12 – Britador de Impacto com eixo Vertical (Metso, 2005).

O britador de impacto com eixo vertical constitui uma excelente unidade de cominuição terciária ou quaternária, combinando diversas ações de fragmentação numa única máquina, para processar praticamente qualquer material, seja ele abrasivo ou friável, sendo mais tolerável aos materiais aderentes que outros tipos de britador. O britador de impacto com eixo vertical, com sua habilidade de produzir materiais finos com baixo custo, destinados, por exemplo, à alimentação de moinhos, sinter feed ou operações de lixiviação, é a máquina ideal para substituir dispendiosos e ineficientes equipamentos de cominuição. A adição de um impactor de eixo vertical a um circuito de cominuição já existente pode economizar consideráveis recursos de capital quando um aumento de produção se faz necessário. Processa ampla gama de materiais, inclusive rochas duras e altamente abrasivas. A cominuição por impacto de alta velocidade obtida num britador como este melhora a resistência e o formato da pedra, reduzindo o teor de umidade do produto e facilitando o peneiramento, gerando ao mesmo tempo produtos superiores a um menor custo (Metso, 2005). As desvantagens do uso desse equipamento são o elevado custo de manutenção e o grande desgaste, não sendo aconselhável seu uso, no caso de rochas abrasivas e de materiais com valor da sílica equivalente ou maior que 15% (Figueira, 2004).

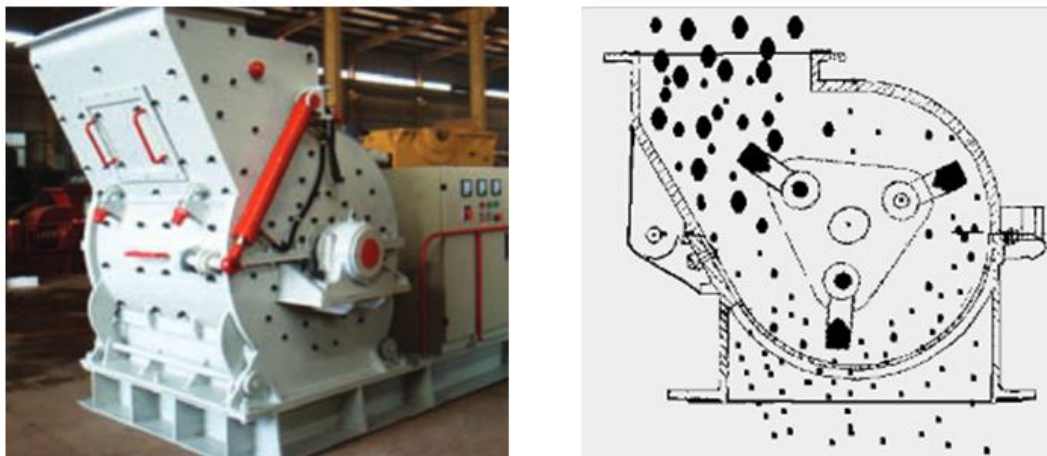


Figura 3.13 – Britador de Martelo (FMS).

O Britador de Martelo é utilizado nas áreas de metalurgia, química, cimento, construção e mineração, sendo utilizado em britagem média e fina. A resistência à compressão não é mais de 320Mpa. São utilizados para materiais friáveis. Este britador possui uma câmara onde o material é britado através do choque entre os martelos fixados por um rotor e as placas fixas. Fornece uma melhor distribuição granulométrica do agregado reciclado para ser empregado em sub-bases e bases de rodovias e são menos suscetíveis a materiais que não podem ser britados como barras de aço presente nas estruturas de concreto armado, entretanto, seu custo de manutenção é maior e os agregados graúdos reciclados são de qualidade inferior se comparados com os agregados produzidos pelo britador de mandíbula. Na máquina de britagem de martelo o motor faz o rotor girar em alta velocidade através de correia e no rotor há vários marteletes. Quando o material atinge a área de trabalho dos marteletes, os martelos rotatórios os tritura em alta velocidade de rotação e os produtos que são britados no tamanho requerido podem ser descarregados pela saída e se tornam os produtos finais; os produtos de tamanho grande retornam à área de britagem pelos marteletes para serem retriturados até que atinjam o tamanho desejado (FMS).

Velocidades periféricas altas proporcionam granulometrias mais finas dos produtos, mas elevam os níveis de desgaste, reduzindo a durabilidade dos martelos e grelhas. Sua escolha está diretamente relacionada com o material e a abertura de grelha a ser utilizada. Recomenda-se o uso de uma determinada abertura de grelha, que permita

atingir os índices de granulometria requeridos para o produto. Quanto menor a abertura, melhor a moagem obtida, mas a um custo superior de desgaste (Metso, 2005).

### 3.7.6. Britador Sizer

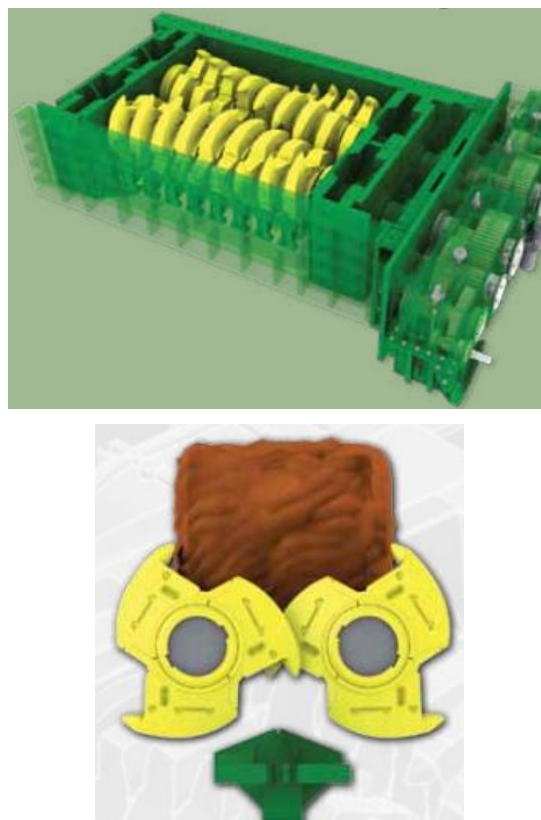


Figura 3.14 – Britador *Sizer* (MMD, 2011).

O conceito básico do Sizer é o uso de dois rotores com dentes amplos, sobre eixos de pequeno diâmetro, acionados em baixa velocidade por um redutor direto de alto torque. A tecnologia Sizer é baseada em três princípios fundamentais, os quais interagem no momento da britagem de materiais. Os princípios exclusivos são: “a quebra em três estágios”, a “peneiragem rotativa” e a “disposição da rolagem profunda dos dentes”. Inicialmente, o material é preso pelas superfícies principais dos dentes do rotor oposto. Estes sujeitam a rocha a cargas de múltiplos pontos, induzindo tensão no material capaz de explorar quaisquer deficiências naturais. No segundo estágio, o material é quebrado em tensão por estar sujeito a uma carga de três pontos, aplicada entre as superfícies dos dentes frontais sobre um rotor e faces traseiras de outro rotor. Quaisquer protuberâncias do material que ainda permaneçam de tamanho desproporcional são quebradas

conforme os rotores as cortam através dos dentes fixos da barra de britagem, conseguindo assim um tamanho de produto controlado tridimensionalmente. A concepção do rotor dentado entrelaçado permite que o livre fluxo de material subdimensionado passe através dos espaços continuamente mutantes gerados pelo movimento dos eixos relativamente lento. A rolagem profunda dos dentes desloca o material maior para uma extremidade da máquina e ajuda a espalhá-lo através da extensão completa dos rotores. Esta característica pode também ser usada para rejeitar material desproporcional à máquina (MMD, 2011).

A distância entre-centros combinada com a configuração do dente controla o tamanho máximo do material de alimentação que a unidade pode processar de forma eficiente.

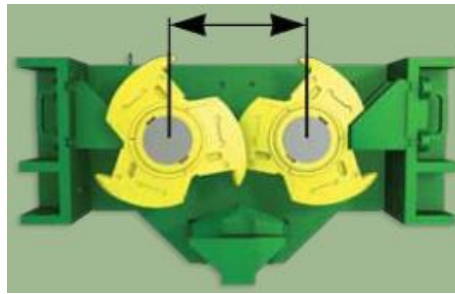


Figura 3.15 – Britador *Sizer*. Distancia entre eixos (MMD, 2011).

O comprimento de admissão tem um efeito principal sobre o volume do material que a unidade pode processar.

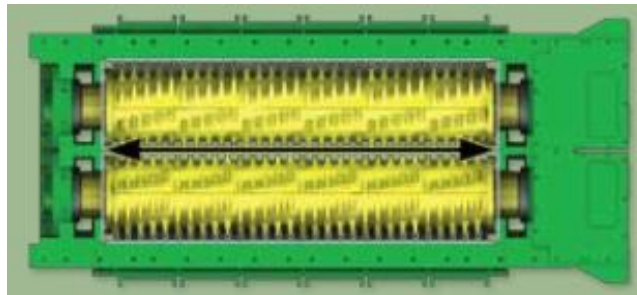


Figura 3.16 – Britador *Sizer*. Comprimento de admissão (MMD, 2011).

A circulação para dentro é o método normal de operação para a maioria das configurações de dente e deve ser usada para materiais úmidos e viscosos. Em Sizers secundários e terciários, a circulação para fora pode ser usada em certos materiais para

produzir um produto menor do que é possível quando circulando para dentro (MMD, 2011).

É uma das máquinas mais versáteis e pode ser fornecida para funções de britagem primária, secundária e terciária, dependendo da configuração do dente. Esta máquina pode ser construída como centros fixos, centros ajustáveis ou como uma unidade de rotor único com uma gama de configurações de dente para adequar-se a aplicações individuais. Comprimentos diferentes estão disponíveis para habilitar o processamento de maiores ou menores tonelagens, e pode ser de acionamento único ou duplo, dependendo da capacidade de produção e do material a ser processado (MMD, 2011).

### 3.7.7. Britador de Rolo Dentado

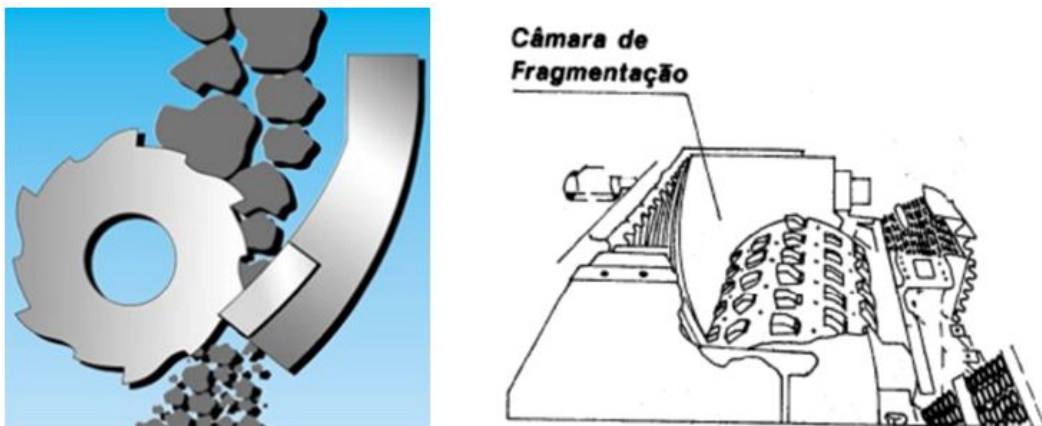


Figura 3.17 – Britador de rolo dentado (Rocha, 2010) (Figueira, 2004).

O britador de rolo dentado consiste basicamente de um rolo dentado móvel e uma carcaça fixa, como está apresentado na figura 3.17. O movimento giratório do rolo provoca a compressão e o cisalhamento do material entre os dentes e a placa fixada à câmara ou contra outro rolo dentado. Tem emprego limitado devido ao grande desgaste dos dentes, por ser sensível à abrasão. É aconselhável sua aplicação para rochas de fácil fragmentação e também para britagens móveis, dada as pequenas dimensões do equipamento. Possui alta tolerância à umidade da alimentação, sendo na britagem primária o equipamento que produz menos finos (Figueira, 2004). São equipamentos mais adequados a materiais friáveis, fibrosos e pouco abrasivos como: calcário, carvão, fosfato e minérios de ferro (Galery, 2012).

O britador de duplo rolo dentado distingue-se do britador Sizer, principalmente pela sua robustez e volante de inércia que auxilia na energia transferida para o processo de britagem em um rolo fixo e outro móvel. Este tipo de britador possui rolos com diâmetros maiores, o sentido de rotação dos rolos é exclusivamente na direção central e a velocidade de rotação é relativamente maior quando comparada com as utilizadas no britador Sizer, Os dentes do britador de rolo dentado não se entrelaçam como os Sizer.

### 3.7.8. Britador de Rolos

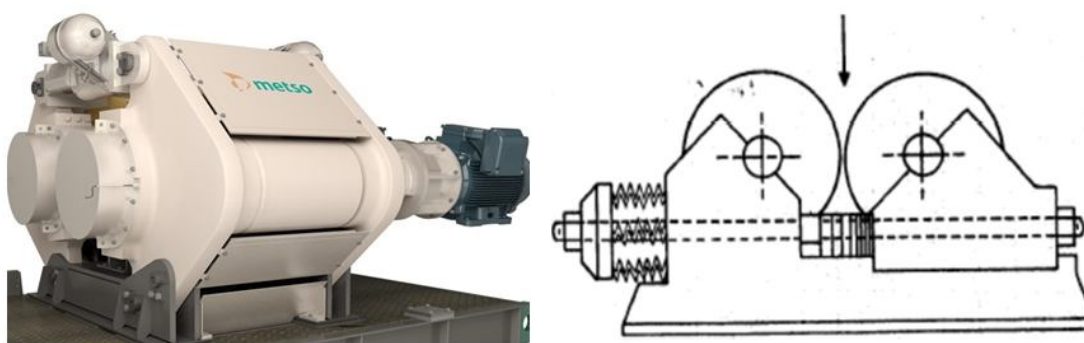


Figura 3.18 – Britador de rolos (Figueira, 2004).

Este equipamento consta de dois rolos de aço girando à mesma velocidade, em sentidos contrários, guardando entre si uma distância definida. São destinados a materiais friáveis ou de fácil fragmentação. A alimentação é feita, lançando-se os blocos de minério entre os rolos cujo movimento faz com que os mesmos sejam forçados a passar pela distância fixada previamente por parafusos de ajuste. Esta ação promove a fragmentação dos blocos. Este tipo de britador possui uma forte limitação quanto à granulometria da alimentação, pois a mesma é limitada pela distância fixada entre os rolos e os diâmetros dos mesmos (Figueira, 2004).

Os britadores de rolos, graças às suas características, são máquinas especialmente destinadas à obtenção de produtos de tamanho médio a fino e ao mesmo tempo necessite limitar a geração de finos. São aplicados normalmente em materiais de baixa e média dureza, tais como: bauxita, carvão mineral e vegetal, sinter, dolomita, grafite etc. Britam sem problemas mesmo os materiais difíceis para outros tipos de britadores, como por exemplo, materiais contendo finos e úmidos. A relação de redução do material depende da abertura entre os rolos e do tipo de revestimento usado, ficando

porém no máximo em torno de 1:3. A alimentação dos britadores de rolos deve consistir de materiais previamente peneirados, com tamanho máximo limitado pela distância entre os rolos. Os revestimentos dos rolos podem variar de acordo com o material (Metso, 2005).

### 3.7.9. Britadores Móveis

As operações de lavra estão cada vez mais complexas e dinâmicas e exigindo novos sistemas que acompanhem esse dinamismo, o que significa que os equipamentos de processo têm de ser mais adaptáveis a fim de ajustar-se melhor a gama de métodos de lavra e beneficiamento da matéria prima mineral disponível.

As plantas de britagem podem ser estacionárias (montadas sobre fundações de concreto) ou semi-móveis, apoiadas sobre sapatas. À medida que a operação de mineração avança, as plantas de britagem semi-móveis podem ser realocadas no interior da mina usando-se reboques de múltiplas rodas ou esteiras de transporte. Normalmente as escavadeiras alimentam o material bruto para os caminhões basculantes tipo Fora de Estrada que o transportam para a planta de britagem. O objetivo da planta de Britagem Totalmente Móvel é eliminar completamente a necessidade de caminhões. A Britagem Totalmente Móvel sempre é posicionada próximo à escavadeira de tal forma que sua operação não é interrompida. O material é britado a um tamanho transportável e descarregado em um Sistema de Transportadores Deslocáveis e Fixos. Para aumentar a flexibilidade do sistema, existe ainda a possibilidade de se adicionar um “Transfer Bridge”. Na maioria dos casos, pode-se ainda utilizar as escavadeiras a cabo ou hidráulicas já existentes para alimentação da Britagem Totalmente Móvel. A altura e a geometria da moega são similares à da caçamba do caminhão (ThyssenKrupp).

O conceito de Britagem Totalmente Móvel pode ser utilizado em todas as operações de mineração onde a escavadeira puder escavar o minério diretamente da frente de lavra, com ou sem explosão (ThyssenKrupp).



Figura 3.18 – Britagem Totalmente Móvel (ThyssenKrupp).

Atualmente encontramos disponíveis no mercado vários equipamentos para lavra móvel tanto para aplicações com baixas taxas de produção quanto para grandes minerações com altas taxas de produção. A seguir serão mostrados alguns exemplos de máquinas desenvolvidas para o conceito de lavra móvel.



Figura 3.19 – Britador Móvel de Mandíbula (SANDVIK).



Figura 3.20 – Britador Móvel de Cone (SANDVIK).



Figura 3.21 – Britador Móvel de Impacto (SANDVIK).



Figura 3.22 – Peneira Móvel (SANDVIK).



Figura 3.23 – Escalper Móvel (SANDVIK).



Figura 3.24 – Britagem e Peneiramento Montados Sobre Rodas (SANDVIK).

#### 4. ESTUDO DE CASO

Após a apresentação de algumas definições básicas, das características físicas da matéria-prima, de algumas informações importantes sobre o processo industrial de beneficiamento de minério e dos principais mecanismos de fragmentação bem como as forças envolvidas no processo de cominuição, será mostrado através do estudo hipotético como as mudanças nas características do ROM impactam diretamente nos equipamentos de britagem provocando investimentos e paradas na usina não planejadas, aumentando o custo de produção por tonelada e uma possível redução na produção anual caso não sejam previamente conhecidas e consideradas no processo de dimensionamento e escolha dos equipamentos bem como durante o período de planejamento anual da produção.

##### Início da Lavra

O circuito mostrado no fluxograma abaixo (Figura 4.1) foi dimensionado para processar minério de ferro a uma taxa de 3.000t/h sendo alimentado com um ROM cujo top size é de 1200mm, a densidade aparente do material de 2,2 t/m<sup>3</sup> e uma participação de Jaspelito de até 2% (características mostradas nas tabelas 4.1 e 4.2).

A planta é alimentada através do basculamento de caminhões fora de estrada (150 toneladas métricas) diretamente na moega (área útil 300m<sup>3</sup>).

O alimentador retira o material da moega a uma taxa de 3.000 t/h lançando-o na grelha vibratória de malha 200mm que tem a função de escalpe, retirando o material que está abaixo de 200mm do britador primário, deixando retido somente o que é necessário britar, assim o britador é calculado para trabalhar com somente 16,6% da massa total.

O fluxo que alimenta o britador Sizer é composto pelo passante da grelha mais o material proveniente da britagem primária. O referido britador secundário tem o sentido de giro de dentro para fora para permitir a passagem do material subdimensionado através dos espaços continuamente mutantes, e o retido é quebrado nas extremidades.

Após a passagem pelo britador Sizer o material segue para uma pilha de regularização para homogeneização uma vez que o mesmo vem de diferentes frentes de lavra e pode ter variações consideráveis na relação minério/ganga.

A próxima etapa é retomar o material homogeneizado e direcioná-lo para alimentar o peneiramento vibratório que retira e direciona o material já dentro das especificações de mercado para a pilha de produto e o material que ainda está acima segue para o britador cônico terciário que em circuito fechado faz o ajuste final do produto que posteriormente é embarcado para ser vendido ao mercado consumidor.

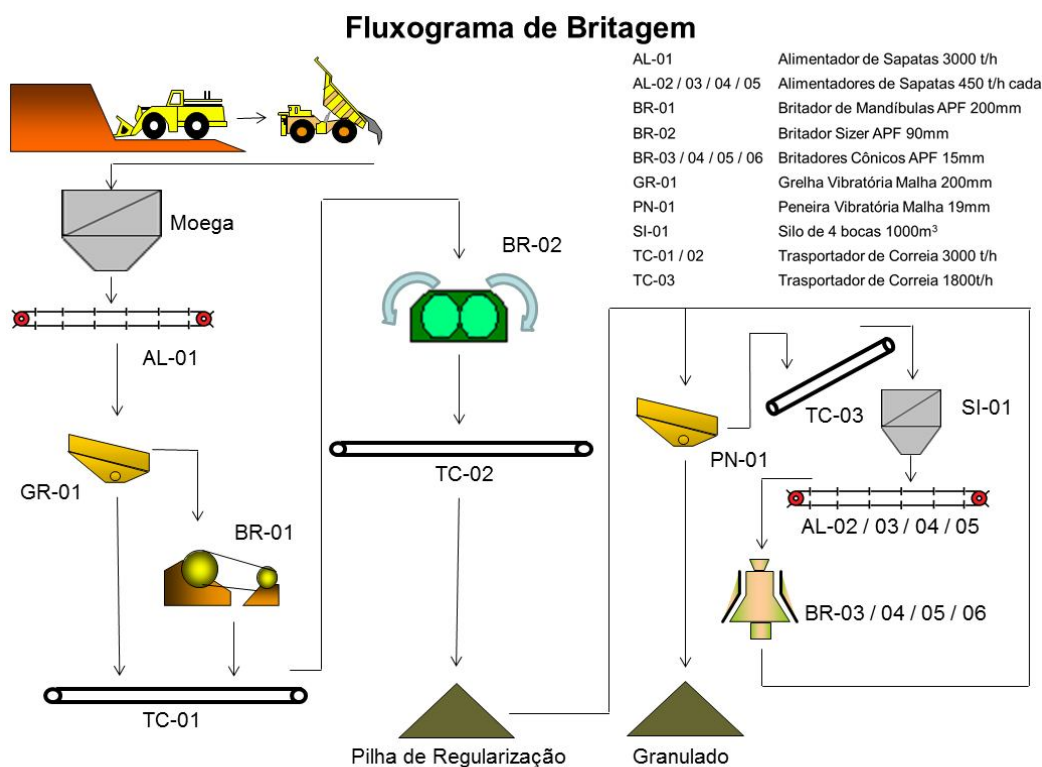


Figura 4.1. Fluxograma Britagem Primária, Secundária e Terciária Inicial

Tabela 4.1. Tabela de Dados do Material de Alimentação

ROM	Participação %	Índice Abrasão (g)	Resistência Compressão (MPa)	Work Índice (kWh/st)	Densidade t/m <sup>3</sup>
Hematita Friável	65 a 100%	0,22 a 0,34	72 a 100	11 – 15	2,2
Canga estrutural	Até 20%	0,08	70 a 105	8 – 12	*
Jaspelito	até 2%	0,68 a 1,22	262 a 350	14 – 18	*

Tabela 4.2. Tabela Granulométrica Inicial

Tamanho (mm)	ROM	Alimentação Sizer	Produto sizer
1200	100	100	100
1000	95,2	100	100
850	92,9	100	100
750	90,9	100	100
600	88,8	100	100
400	86,5	100	100
250	83,4	98,5	100
190	79,3	84,1	100
130	74,7	77,3	100
90	73,1	75,2	98
45	71,8	72,4	89,5
31	69,6	70,1	74,7
22	66,5	66,9	70,2
16	62,9	63,5	46,0
13	59,6	60,2	28,4
9,4	56,5	57,1	14,8
6,6	53,4	54,0	11,5
4,8	50,6	51,3	10,0
3,4	47,2	47,8	7,4
2,4	41,1	41,7	6,7
1,7	35,9	36,5	6,1
1,2	30,5	31,0	5,5
0,85	26,3	26,8	4,8
0,6	22,8	23,2	4,2
0,42	18,2	18,6	3,5
0,3	13,9	14,2	3,1
0,21	10,6	10,9	2,4
0,16	7,3	7,6	1,8
0,11	4,1	4,4	1,3
0,075	0,9	1,1	0,6
0,052	0,0	0,3	0,0
0,037	0,0	0,0	0,0

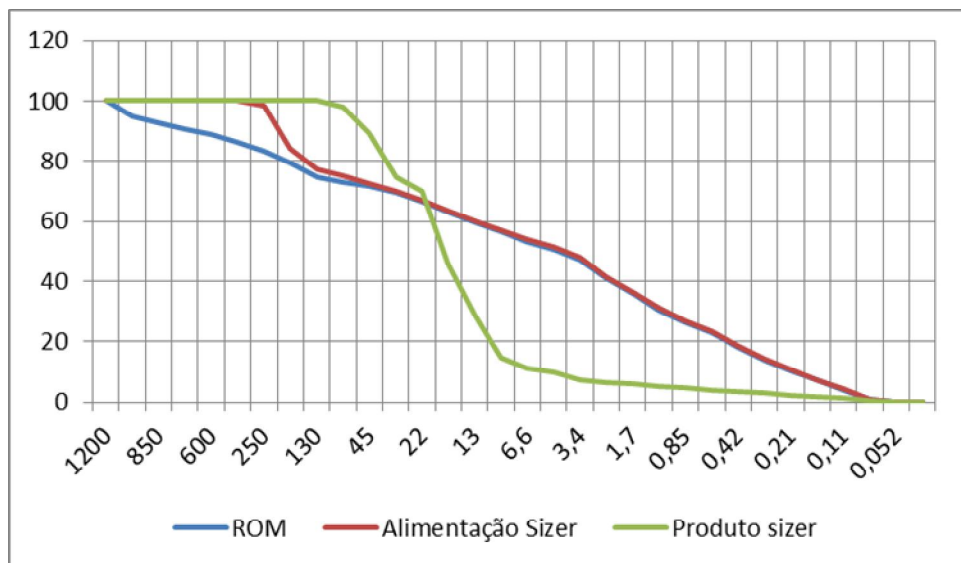


Figura 4.2. Gráfico da Tabela 4.2

#### Após alguns anos de lavra

Após alguns anos de lavra, foram observadas três mudanças importantes na planta de beneficiamento: Diminuição do fluxo de material no britador de mandíbulas; Aumento significativo da frequência de troca dos dentes e revestimento do britador Sizer; Diminuição da massa na britagem terciária (britadores cônicos).

Posteriormente a observação, foram feitos novos estudos e testes para atualizar as informações sobre as características do material de alimentação (ROM), a fim de obtermos maiores detalhes para ajustar a planta ao “novo” ROM, e o resultado encontra-se abaixo nas tabelas (4.3 e 4.4).

Tabela 4.3. Tabela de Dados do Material de Alimentação

ROM	Participação %	Índice Abrasão (g)	Resistência Compressão (MPa)	Work Índice (kWh/st)	Densidade t/m <sup>3</sup>
Hematita Friável	65 a 100%	0,22 a 0,34	72 a 100	11 – 15	2,2
Canga estrutural	Até 20%	0,08	70 a 105	8 – 12	*
Jaspelito	até 15%	0,68 a 1,22	262 a 350	14 – 18	*

Tabela 4.4. Tabela Granulométrica

Tamanho (mm)	ROM	Alimentação Sizer	Produto sizer
1200	100	100	100
1000	97,6	100	100
850	96,5	100	100
750	96	100	100
600	95,5	100	100
400	94	100	100
250	92,7	98,6	100
190	91	95,7	100
130	89	91,5	100
90	87	89,2	98
45	81	81,8	91,7
31	77	77,5	80,6
22	74	74,5	77,5
16	69,2	69,8	63,3
13	65,5	66,1	49,2
9,4	61	61,6	37,1
6,6	54	54,6	20,9
4,8	46,1	46,8	10,1
3,4	42,3	42,9	9,1
2,4	38,4	39	8,2
1,7	37	37,6	7,9
1,2	36	36,5	7,4
0,85	30,8	31,3	6,5
0,6	26,9	27,3	5,6
0,42	23,1	23,5	4,6
0,3	19,2	19,5	3,7
0,21	15,4	15,7	2,8
0,16	11,5	11,8	1,9
0,11	7	7,3	1,5
0,075	3	3,2	0,7
0,052	0	0,2	0,7
0,037	0	0,1	0

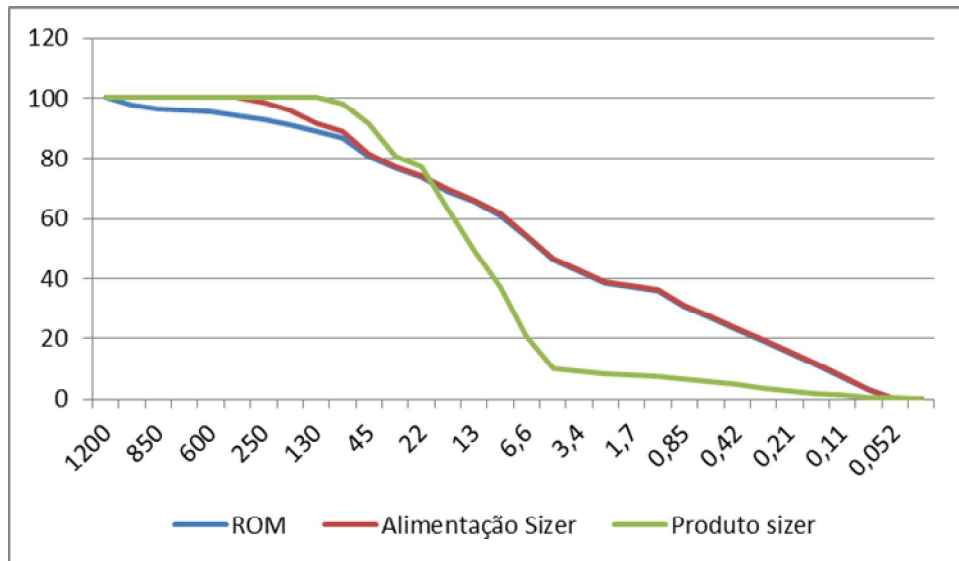


Figura 4.3. Gráfico da Tabela 4.4

O fluxo de material no britador de mandíbulas teve uma redução de 16,6% para 7,3% (comparando as tabelas 4.2 e 4.4), onde o mesmo passou a trabalhar muito abaixo da capacidade nominal. Mesmo trabalhando abaixo da capacidade nominal o desgaste do equipamento e a frequência com que a APF (abertura na posição fechada) tem ficado fora da regulagem correta aumentaram. Com o aumento de partições cada vez mais finas no ROM aliado ao aumento da participação do material com alta resistência a compressão e abrasividade (Jaspelito), o fluxo do minério no britador Sizer passou a promover um desgaste altíssimo a ponto de deixá-lo economicamente inviável. Os impactos nos britadores cônicos foram menores em termos de desgaste mas não ao ponto de serem inexistentes. O maior impacto na britagem terciária foi a redução de 29,8% para 22,5% da massa retida na peneira que posteriormente seguia para os britadores.

Diante do novo cenário, serão tomadas algumas medidas com a premissa de evitar ao máximo a troca de qualquer um dos britadores, uma vez que são equipamentos caros e que causam um grande impacto na produção caso sejam substituídos.

Quanto ao britador de mandíbulas, após analisar os prós e contras do que poderia ser feito, optou-se por não fazer alterações e admitir um gasto desnecessário de energia já que o mesmo trabalhará muito abaixo da capacidade nominal.

No britador Sizer cuja mudança nas características do ROM o havia inviabilizado, será implantado uma peneira vibratória (escalpe) para retirar o material abaixo de 90mm do fluxo, evitando desgaste além do normal no referido britador. Com a diminuição de material no Sizer, reduziremos a velocidade de rotação dos eixos para atenuar ainda mais o desgaste por abrasão. Outra alteração, foi mudar o sentido de giro dos eixos anteriormente de dentro para fora passando a se movimentar de fora para dentro. Com a alteração do sentido de giro, conseguimos dois ganhos imediatos, um deles, é a eliminação de um ponto de desgaste (carcaça) já que a britagem acontecerá no centro do equipamento, o outro ganho, é que ao girar de fora para dentro, o britador sizer consegue desenvolver uma força de compressão maior (característica do equipamento) o que é bastante interessante para este novo cenário devido ao aumento da participação do material mais duro no ROM.

Levando em consideração que os equipamentos e construções são dimensionados de maneira bem justa, será necessário construir um novo prédio ao lado do prédio existente para abrigar a nova peneira vibratória, o britador Sizer que precisará ser relocado e os novos transportadores TC04 e TC05 que farão o transporte do material até a peneira e retornarão com o produto do sizer para o processo (como mostrado na Figura 4.4).

Devido a redução de 7,3% (Tabela 4.4) da massa retida na PN-01 e visando manter o mesmo grau de enchimento na mesma, a velocidade da correia TC-03 será reduzida para entrar em conformidade com a nova taxa, por consequência, teremos uma economia de energia na referida correia.

Também em função da redução da taxa, o silo (SI-01) que sucede a correia TC-03 passará a ter uma autonomia maior (anteriormente 73min para 98min aproximadamente).

Na britagem terciária a alteração fica a cargo do desligamento de um dos conjuntos alimentador/britador cônico ficando este como reserva no processo e a operação passará a acontecer em três conjuntos.

Após a implantação de todas as medidas corretivas desencadeadas pela mudança nas características da alimentação, chegamos ao fluxograma mostrado na figura 4.4.

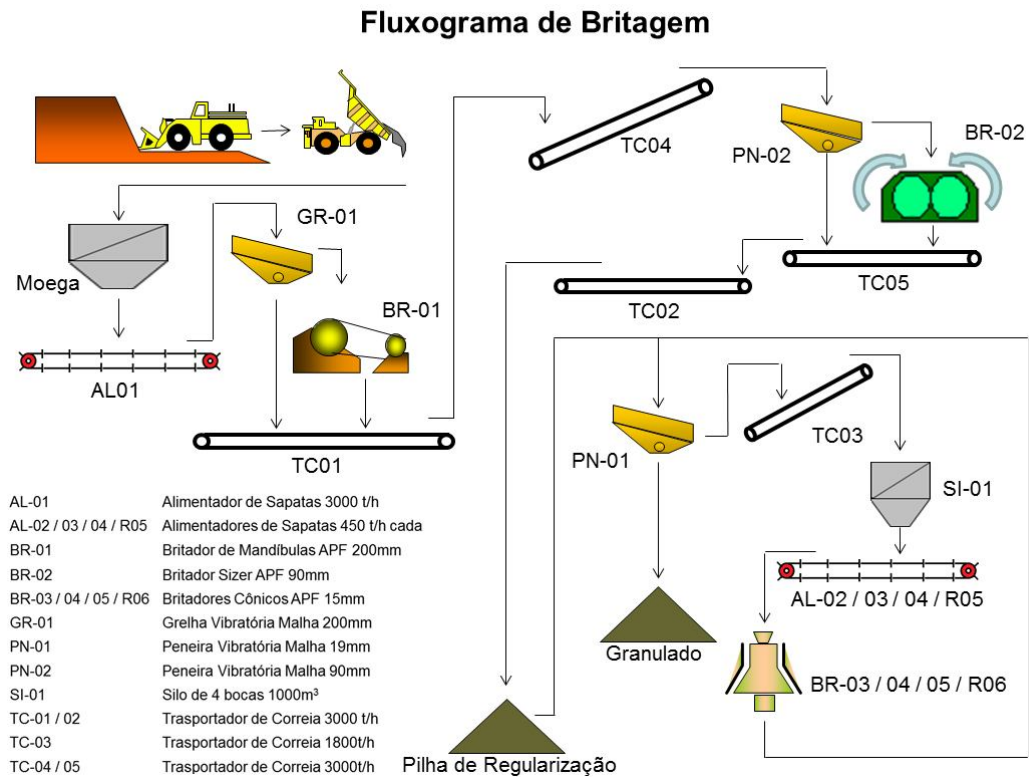


Figura 4.4. Fluxograma Britagem Primária, Secundária e Terciária Final

Com a inserção dos três novos equipamentos e após fazer os ajustes necessários, a planta voltou a operar com boa eficiência e o desgaste dos equipamentos retornou para patamares aceitáveis.

## 5. CONCLUSÕES

Analisando as mudanças que foram feitas para minimizar os problemas nos equipamentos de britagem em função da mudança nas características do minério, aparentemente podem parecer pequenas, com pouca interferência e relativamente baratas, mas, na prática não são, impactam diretamente na produção da mina (antes e durante a implantação das modificações), aumentam as despesas operacionais, elevam o custo de produção da tonelada do produto, por consequência diminuem o lucro líquido da empresa e por fim tem o agravante de ser um problema que poderia ter sido evitado.

Para o dimensionamento e a escolha correta dos equipamentos de britagem visando obter um desempenho equilibrado, dentro dos padrões economicamente aceitáveis e minimizando problemas futuros, é fundamental para o profissional que o fará, ter em mãos os dados completos das características do minério a ser processado durante toda a vida útil da jazida bem como o planejamento de lavra do decapeamento ao o pit final.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHAVES, Arthur Pinto; PERES, Antônio Eduardo Clark; Teoria e Prática do Tratamento de Minérios – Britagem, Peneiramento e Moagem. Volume 3, 2. ed. São Paulo, Brasil: Signus Editora, 2003.

FIGUEIRA, H. V. O.; ALMEIDA, S. L. M.; LUZ, A. B. *Cominuição*. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. *Tratamento de minérios*. 4ª Edição Revisada e Ampliada. Rio de Janeiro: CETEM-CNPq-MCT, 2004. Capítulo 4, páginas 113-194.

FMS. Formats Construction Machinery Co., Ltd

<http://pt.trituradoras-de-roca.com/Britador-fixo/Britador-de-martelo.html>

GALERY, R. *Fragmentação de Minérios: Primeira Parte*. Belo Horizonte: UFMG, 2011. 23p.

GALERY, R. *Fragmentação de Minérios: Primeira Parte*. Belo Horizonte: UFMG, 2012. 86p.

KELLY, E.G.; SPOTTISWOOD, D.J. *Introduction to Mineral Processing*. New York: Jhon Wiley & Sons, 1982.

LEINZ, V.; Amaral, S. E.; *Geologia Geral*, 6ª Edição, Editora Nacional, 1975.

LINS, F.A.F.; LUZ, A. B. *Tratamento de minérios*. 4ª Edição Revisada e Ampliada. Rio de Janeiro: CETEM-CNPq-MCT, 2004. Capítulo 1, 3p.

METSO. *Manual de Britagem Metso*. 6ª Edição. 2005. 501p.

MMD. *Mineração sustentável*. 2011.

Museu "HEINZ EBERT".; *Departamento de Petrologia e Metalogenia*. (DPM/IGCE/UNESP), 2003

<http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/introducao.html>

PERONI, Rodrigo; Mineralogia – Estudo dos Minerais.; UFRGS

[http://www.ufrgs.br/demin/discpl\\_grad/geologia1/peroni/apostilas/4mineralogia\\_2003.pdf](http://www.ufrgs.br/demin/discpl_grad/geologia1/peroni/apostilas/4mineralogia_2003.pdf)

ROCHA, S. D. F. *Tratamento de Minérios: Fragmentação*, UFMG, 2010.

SANDVIK. *Catálogo de produtos*

<http://www.sandvikmobiles.com/pt/products>

SANDVIK. *Catálogo Sandvik CR600 series Sizer*. 2010. 8p.

SANTANA D. C.; CHARBEL P. A.; *Tratamento de Minérios*: Instituto Técnico de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás : IFG, 2009. Capítulo 1, 6p.

THYSSENKRUPP. *Catálogo ThyssenKrupp Hammer and Mammut Crusher*. Stirling, 2003. 2p.

UFBA. *Transporte de Granéis*: Capítulo 3: Característica dos Materiais 13p.;

[http://www.transportedegraneis.ufba.br/Apostila/CAP3\\_CaracMateriais.pdf](http://www.transportedegraneis.ufba.br/Apostila/CAP3_CaracMateriais.pdf)