

FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ADELSON CARNEIRO JÚNIOR
CLARA HELENA MENDES BARBOSA
ISABELA CARDOSO BARROS
RAYLLA MACESSINE DE PAULA

**ESTUDO COMPARATIVO DE SISTEMAS DE BRITAGEM SECUNDÁRIA PARA O
MINÉRIO DE FERRO**

VOLTA REDONDA

2019

FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ESTUDO COMPARATIVO DE SISTEMAS DE BRITAGEM SECUNDÁRIA PARA O
MINÉRIO DE FERRO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário de Volta Redonda como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Alunos:

Adelson Carneiro Júnior

Clara Helena Mendes Barbosa

Isabela Cardoso Barros

Raylla Macessine de Paula

Orientador:

Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

VOLTA REDONDA

2019

FOLHA DE APROVAÇÃO

Alunos:

Adelson Carneiro Júnior

Clara Helena Mendes Barbosa

Isabela Cardoso Barros

Raylla Macessine de Paula

ESTUDO COMPARATIVO DE SISTEMAS DE BRITAGEM SECUNDÁRIA PARA O MINÉRIO DE FERRO

Orientador:

Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

Prof. Me. Rui Aurélio Barbosa

Aos professores e alunos do
Curso de Engenharia Mecânica
do UniFOA.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente à Deus por ter nos dado toda a sabedoria, saúde, força e coragem. Agradecemos nossos familiares, amigos que nos apoiaram e fortaleceram. Agradecemos também aos professores, funcionários do UniFOA. Por fim, o nosso muito obrigado a todos que dê alguma forma contribuíram durante a nossa jornada acadêmica.

RESUMO

O estudo comparativo de sistemas de britagem secundária para o minério de ferro tem como objetivo específico a confrontação de soluções para os britadores de mandíbula e de rolos a partir das análises dos processos, peças de desgaste, especificação dos produtos e custos dos britadores. Os métodos e procedimentos utilizados neste trabalho se inicia com a análise do sistema físico em que será realizada a caracterização dos britadores de uma forma geral, e uma caracterização específica dos britadores de mandíbulas e de rolos. Em seguida, é produzida a construção dos modelos físicos em que serão adotadas as premissas do projeto. Após, a solução das alternativas e especificação dos componentes, esta é constituída com base na análise e construção dos modelos físicos. Posteriormente, a comparação entre os britadores de mandíbula e o de rolos para o processo de britagem secundária de minério de ferro ocorrerá em função da quantidade de potência requerida e disponível, o consumo de energia elétrica, o desgaste das peças em contato direto, o peso dos britadores, a capacidade de operação e quanto ao custo dos britadores. Logo, é exercida a opção tecnológica na qual aborda vantagem e desvantagem do britador de rolos em correspondência ao britador de mandíbula. Por fim, a partir de todas as análises e cálculos elaborados, chega-se à conclusão de que o britador de rolos é mais adequado para o processo de britagem secundária e o britador de mandíbula mais apropriado na britagem primária.

Palavras-chave: Britagem Primária, Britagem Secundária, Britador de Rolos, Britador de Mandíbula, Minério de Ferro.

ABSTRACT

The comparative study of secondary crushing systems for iron ore specifically aims confrontation solutions for jaw and roll crushers from the analysis of processes, wear parts, specification of the products and costs of crushers. The methods and procedures used in this study is initialized with the analysis of the physical system is performed where the characterization of crushers in general and a specific characterization of jaw and roll crushers. Then it is produced the construction of physical models that project assumptions will be adopted. After the solution of the alternatives and specification of the components, it is recognized based on analysis and construction of physical models. After this, the comparison between the jaw and rolls crushers to the process of secondary crushing of iron ore will occur depending on the amount of required and available power, energy consumption, the wear of the parts in direct contact, the weight of crushing, the operating capacity and as the cost of crushers. Therefore, technology option is exercised in which discusses advantages and disadvantages of the rolls crusher in correspondence to the jaw crusher. Finally, from all analyzes and elaborate calculations, one comes to the conclusion that the roll crusher is most suitable for the process of secondary crushing and jaw crusher the most appropriate for primary crushing.

Key-words: Primary Crushing, Secondary Crushing, Roller Crusher, Jaw Crusher, Iron Ore.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fundamentação teórica.	16
Figura 2 - Fluxograma característico de beneficiamento de minério.	23
Figura 3 - Tipos de minérios de ferro.	24
Figura 4 - Esquema de mecanismo de abrasão.	24
Figura 5 - Esquema de mecanismo de impacto.	25
Figura 6 - Representação de fragmentação do britador de mandíbulas de um eixo.	28
Figura 7 - Representação de um britador de mandíbulas de dois eixos.	28
Figura 8 - Estrutura da movimentação de britador de mandíbula de dois eixos.	29
Figura 9 - Representação de um britador de impacto.	29
Figura 10 - Esquema de britador de rolos dentados.	30
Figura 11 - Representação de um britador de rolos.	31
Figura 12 - Representação esquemática de britador de impacto vertical.	33
Figura 13 - Tipos de motores elétricos.	35
Figura 14 - Tipos de motores hidráulicos.	37
Figura 15 - Subdivisão de motores de corrente alternada.	41
Figura 16 - Caixa redutora de engrenagens com dentes helicoidais.	42
Figura 17 - Ilustração do acoplamento de pinos.	47
Figura 18 - Ilustração do acoplamento <i>perflex</i>	48
Figura 19 - Ilustração do acoplamento com garras.	48
Figura 20 - Ilustração do acoplamento de fita de aço.	49
Figura 21 - Ilustração do acoplamento de engrenagens.	49
Figura 22 - Ilustração do acoplamento de lâminas.	49
Figura 23 - Ilustração do acoplamento T10.	51
Figura 24 - Ilustração do acoplamento T20.	51
Figura 25 - Ilustração do acoplamento T41, T42, T 44 e T45.	51
Figura 26 - Ilustração do acoplamento T90.	52
Figura 27 - Ilustração do acoplamento F.	52
Figura 28 - Ilustração do acoplamento FT.	53
Figura 29 - Ilustração do acoplamento GC02 e GC05.	53
Figura 30 - Figura 14 – Ilustração do acoplamento G20 e GV20.	54
Figura 31 - Ilustração do acoplamento GR20.	54

Figura 32 - Ilustração do acoplamento WLX.	55
Figura 33 - Ilustração do acoplamento WLX-B.	55
Figura 34 - Ilustração do acoplamento <i>WPflex</i>	56
Figura 35 - Ilustração do acoplamento CINV.	56
Figura 36 - Ilustração do acoplamento CC.	57
Figura 37 - Ilustração do acoplamento LT.	57
Figura 38 - Ilustração do acoplamento CF.	57
Figura 39 - Ilustração do acoplamento <i>max dynamic</i>	58
Figura 40 - Ilustração do volante de inércia.	59
Figura 41 - Ilustração da roda livre e contra recuos.	61
Figura 42 – Abordagem sequencial da metodologia.	62
Figura 43 - Matriz de funcionamento do britador.	64
Figura 44 - Distribuição de tamanhos	66
Figura 45 – Gráfico da relação entre tamanho máximo de material e porcentagem da alimentação.	70
Figura 46 – Gráfico do fator de umidade para britadores giratórios e mandíbula.	71
Figura 47 - Vista em corte de um britador de mandíbulas de dois eixos.	76
Figura 48 - Vista em corte de um britador de mandíbulas de um eixo.	78
Figura 49 - Ilustração de uma câmara de britagem.	79
Figura 50 - Abertura na posição aberta de britadores de mandíbula.	80
Figura 51 - Gráfico das curvas granulométricas para britadores de mandíbulas com circuito aberto.	83
Figura 52 - Desenho representativo do britador de um rolo.	87
Figura 53 - Tipos de formatos para os dentes dos rolos.	87
Figura 54 - Esquema representativo do britador de dois rolos dentados.	88
Figura 55 - Gráfico da capacidade do britador de rolos dentados.	91
Figura 56 - Gráfico da curva granulométrica dos britadores de rolos.	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Categorização dos estágios de britagem.....	26
Tabela 2 - Comparação dos tipos de atuadores.	38
Tabela 3 - Relação do tamanho máximo e estágio da atividade.....	68
Tabela 4 - Densidade aparente dos materiais britados.	69
Tabela 5 - Relação de <i>Work Index</i>	69
Tabela 6 - Relação das propriedades físicas dos materiais.....	69
Tabela 7 - Fator relacionado ao tipo de material	72
Tabela 8 - Fator relacionado ao método de alimentação.	73
Tabela 9 - Fator relacionado a jornada de trabalho do equipamento.	73
Tabela 10 - Diferenças entre o britador de mandíbula de I e II eixos.	78
Tabela 11 - Especificações técnicas do britador de II eixos.....	80
Tabela 12 - Capacidades de produção do britador de II eixos.....	81
Tabela 13 - Classificação da alimentação de entrada do britador.	81
Tabela 14 - Classificações para abertura de saída na posição fechada do britador de mandíbula.	82
Tabela 15 - Relação percentual do desgaste da mandíbula fixa e móvel.	83
Tabela 16 - Relação do desgaste em peças em função do índice de abrasão.	84
Tabela 17 - Pesos aproximados de peças de desgaste.	85
Tabela 18 - Relação comparativa dos modelos de britadores de rolos.....	89
Tabela 19 - Relação dos modelos e especificações dos britadores de rolos.....	90
Tabela 20 - Relação de desgaste e revestimento dos rolos.....	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA – Abertura de Entrada do Britador

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

APA – Abertura de Saída na Posição Aberta

APF – Abertura de Saída na Posição Fechada

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral

CSN – Companhia Siderúrgica Nacional

FAÇO – Fábrica de Aço Paulista S. A.

IEC – *International Electrotechnical Commission*

IFG – Instituto Federal de Goiás

METSO – Empresa de Maquinário Industrial

NBR – Norma Brasileira

NEMA - *National Electrical Manufacturers Association*

PTI – *Power Transmission Industries*

ROM – *Run Of Mine*

WEG – Empresa de Equipamentos Eletroeletrônicos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivo Geral	15
1.2	Objetivo Específico	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Britagem de Minérios	16
2.1.1	Lavra	17
2.1.2	Minério bruto	18
2.1.3	Cominuição	18
2.1.4	Classificação	19
2.1.5	Concentração	19
2.1.6	Desaguamento	21
2.1.7	Manuseamento de materiais	22
2.1.8	Práticas industriais	23
2.2	Britagem	24
2.3	Britadores	26
2.3.1	Britagem primária	26
2.3.2	Britagem secundária	31
2.3.3	Britagem terciária	32
2.4	Acionamentos	33
2.4.1	Acionamento elétrico	34
2.4.2	Acionamento pneumático	36
2.4.3	Acionamento hidráulico	37
2.5	Acionamentos de Britadores	39
2.6	Motores	39
2.6.1	Motores para mineração	40
2.6.2	Motores elétricos	40

2.6.3	Prescrição para uso de motores	41
2.7	Redutores	42
2.7.1	Redutores na mineração	43
2.7.2	Relação de transmissão	45
2.8	Acoplamento	46
2.8.1	Acoplamento flexível	47
2.8.2	Acoplamentos para britadores	50
2.9	Volante de Inércia	58
2.9.1	Volante de inércia para britadores	60
3	METODOLOGIA	62
3.1	Análise do Sistema Físico	62
3.2	Construção dos Modelos Físicos	63
3.3	Solução Alternativa e Especificação dos Componentes	63
3.4	Comparação	64
3.5	Opção Tecnológica	65
4	DESENVOLVIMENTO	66
4.1	Análise do Sistema Físico	66
4.1.1	Caracterização dos britadores	66
4.1.2	Caracterização dos britadores de mandíbulas	75
4.1.3	Caracterização dos britadores de rolos	86
4.2	Construção dos Modelos Físicos	92
4.3	Solução Alternativa e Especificação dos Componentes	93
4.3.1	Britador de mandíbula	93
4.3.2	Britador de rolos	98
4.4	Comparação	103
4.4.1	Comparação entre os britadores de mandíbula e o de rolos para processo de britagem secundária de minério de ferro	103

4.5	Opção Tecnológica	106
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	107
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108

1 INTRODUÇÃO

A mineração no Brasil, é a base econômica e financeira devido ao potencial dessa nação em relação ao seu solo. Pode ser definida como o ato de extrair substâncias que tenham valor econômico, nas denominadas jazidas. Os métodos de extração são classificados como subterrâneo ou a céu aberto.

O tratamento de minérios, é realizado por algumas etapas, tal como: métodos de lavra; cominuição em que se agrupa em britagem e moagem; classificação e peneiramento; concentração a partir de métodos de seleção, separação do meio denso, separação gravimétrica, separação magnética e flotação; após ocorre o desaguamento pela filtragem, sedimentação ou secagem e por fim, ocorre a estocagem e o transporte desses materiais destinados as práticas industriais.

Visando a fragmentação dos blocos de minérios, é empregado o princípio de energia mecânica utilizando alguns mecanismos tendo como exemplo: abrasão por cisalhamento, impacto e compressão.

Para que o minério se apresente na forma em que é utilizado em indústrias siderúrgicas para a produção de aço, na qual geralmente é empregado, o minério percorre alguns estágios de processamento.

Os britadores são equipamentos que visam fragmentar os minérios ao ponto de reduzir sua granulometria e dando-lhes forma adequada. Denotam estágios de processamento como britador primário, secundário, terciário e eventualmente quaternário. Se diferenciam pela sua razão de redução, iniciando na britagem primária e dependendo de sua finalidade, posteriormente são efetuados os estágios subsequentes.

A escolha desses equipamentos, é baseada na dimensão da granulometria e a característica do material a ser fragmentado. É de extrema relevância a seleção dos britadores atrelada a sua aplicação, de modo que, a partir das análises dos processos, a produção cubra o quanto antes o valor que foi destinado na compra do equipamento.

A comparação entre os custos e especificações do produto se apresenta para a seleção mais viável do tipo de britador a se empregar de acordo com o estudo de caso.

1.1 Objetivo Geral

Elaborar padrões de estudos a partir dos conceitos de engenharia para o estudo comparativo de sistemas de britagem secundária para o minério de ferro utilizado na mineração, bem como os britadores primários, secundários e terciários, abrangendo conteúdos fundamentais sobre o beneficiamento do minério e demonstrando a relevância da granulometria dos grãos, visto que, afeta diretamente a qualidade e a competitividade em se tratando sobre a exportação de minérios.

1.2 Objetivo Específico

Efetuar a confrontação de soluções para os britadores de mandíbula e rolos no processo de britagem secundária a partir das análises dos processos, especificações dos produtos, determinação das peças de desgastes e do custo financeiro para assim realizar a escolha mais viável.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA



Figura 1 - Fundamentação teórica.

Fonte: Os autores

2.1 Britagem de Minérios

A fundamentação teórica da revisão bibliográfica será realizada conforme Figura 1.

O beneficiamento do minério de ferro é feito pela variação de processos que tem como objetivo, baseado no material decorrente da extração, concentrar e separar o que se deseja desses minerais, sem que ocorra a alteração das compatibilidades física e química dos mesmos.

Deste modo, por meio de procedimentos de concentração pretende-se transportar os materiais denominados de ganga, que são agrupamentos de minerais que não podem ser vantajosos de um minério, dos que são valiosos analisados de acordo com a economia.

Os procedimentos para executar o tratamento de minérios, podem ser expostos da maneira a seguir.

2.1.1 Lavra

É a primeira etapa da extração das substâncias minerais, que é exercida nas jazidas, onde são os locais de reservas naturais.

Pode ser realizada com tratores, escavadeiras ou até mesmo explosivos em caso de minérios distante da superfície a ser extraída.

Existem métodos de lavras, que podemos destacar: lavra em cavas, lavra por tiras, lavra subterrânea, lavra em meia encosta. É classificada em: lavra a céu aberto e subterrânea.

- a) lavra em meia encosta: quando a lavra é feita acima da superfície, como em encostas, morros, elevações. Situação frequente em pedreiras que extraem os agregados;
- b) lavra em cava: quando a lavra é exercida abaixo da superfície, devido aos requisitos topográficos;
- c) lavra por tiras: conhecida também por *Stripping Mining*, na medida em que se realiza a extração, os níveis de rocha estéril são reaproveitados para ocupar o espaço que é deixado pelo deslocamento do minério.
- d) lavra subterrânea: quando a lavra é detectada em locais distantes da superfície. A topografia facilita esse método.

A determinação de cada método deve ser analisada pelas particularidades geométricas e geológicas dos constituintes mineralizados a tornarem-se lavrados.

A rocha sem valor econômico que é encontrada na lavra, é chamado de material estéril. Geralmente esse material é depositado em um local próximo à mina, devendo ter cuidado para minimizar ao máximo o impacto ambiental.

2.1.2 Minério bruto

Conhecido como ROM (*Run Of Mine*), designado como o material extraído da mina que é destinado para o beneficiamento da forma como é encontrado.

Pelos processos de mineração do Brasil, posteriormente esse material irá para um britador primário, podendo ir para o peneiramento, lavagem ou ser estocado em aparelhagens para seu tratamento.

2.1.3 Cominuição

É a redução de tamanho, em que pretende-se liberar os minerais que serão úteis sujeitos a concentração, corpos com formato e tamanho desejados e o aperfeiçoamento da superfície típica, para que esteja habilitado para os métodos seguintes. Podem ser agrupados em duas categorias: britagem e moagem; respectivamente cominuição inicial e final.

2.1.3.1 Britagem

Se aplica quando se pretende uma redução de tamanho dos produtos com granulometria que seja superior a 10 mm. Pode ser classificada como britagem: primária, secundária, terciária e em alguns casos, quaternária. Em cada uma dessas classes deseja-se obter uma relação de redução. São utilizados equipamentos como: britador de mandíbulas, giratório, de rolos, cônicos e de impacto, que pode ser horizontal e vertical.

2.1.3.2 Moagem

Se aplicada quando pretende uma redução do tamanho dos produtos com granulometria inferior a 10 mm. É também desenvolvida pelas relações de redução. São compreendidos com os mesmos mecanismos de britagem, podendo ser essencialmente compressão, cisalhamento e impacto. Utilizando-se equipamentos como moinhos vibratórios, de impacto, de rolos e moinhos tubulares rotativos, podendo ser de bolas e barras.

2.1.4 Classificação

De uma forma abrangente, compõe-se na segmentação de partículas baseado na proporção física. São categorizadas em: classificação e peneiramento.

2.1.4.1 Peneiramento

É um processo do tipo mecânico que separa as partículas utilizando uma superfície perfurada. As partículas com tamanhos inferiores que a abertura, voltam-se a atravessar a mesma e as de tamanhos superiores a abertura propendem a se reter na superfície. Se utilizam alguns equipamentos como as peneiras rotativas, estáticas e as vibratórias.

2.1.4.2 Classificação

É especificada como um processo que visa a separação, em que é baseado na velocidade da sedimentação dessas partículas imergidas em um fluido que geralmente são o ar e a água, ocasionando os processos de aereoseparação e hidroclassificação. Os fenômenos pertinentes a mecânica dos fluidos são os mecanismos incluídos.

Na aereoseparação são utilizados equipamentos como os aereoseparadores dinâmicos e os ciclones. Contudo, na hidroclassificação, são utilizados os hidroclassificadores, classificadores espirais, os hidrociclones e os cones estáticos. Geralmente, são estes equipamentos em maior utilização.

2.1.5 Concentração

A finalidade do processo é realizar a regeneração dos minerais fundamentais incluídos em um minério de forma que esteja o máximo possível concentrada. Para selecionar o método vai depender das propriedades desses minerais que serão separados e da natureza do minério. Pode-se salientar dessas propriedades: densidade, cor, suscetibilidade magnética, o tamanho relativo das partículas, a solubilidade, a condutividade elétrica e a molhabilidade superficial.

2.1.5.1 Seleção

Pode-se dizer que é um método antigo, realizado visualmente por meio de inspeção. Os minerais significativos são separados manualmente do resto. É utilizada em casos particulares, pelo desembolso da mão de obra.

Nos dias atuais é realizado de modo mecanizado usando dispositivos de identificação, separação e detecção. É aplicado por exemplo, na recuperação de minerais nobres.

2.1.5.2 Separação por meio denso

É baseado na diferença de densidade que existe entre os minerais. Se utiliza um meio fluido que tenha densidade média a dos outros minerais avaliados para efetivar a fragmentação. Pode-se dizer que é eficiente com materiais com granulometria grosseira. São exemplos de equipamentos empregados: cones, tambores e centrifugadores. É aplicado por exemplo, em produção de fluorita e carvão.

2.1.5.3 Separação gravimétrica

Já foi o método de seleção indispensável para o beneficiamento de minérios, e ainda hoje continua sendo importante. Apresenta baixo custo com vantajosos resultados. É baseado também na diferença de densidade entres minerais usando um meio fluido para exercer a separação. São utilizados equipamentos como mesas vibratórias, cones, jigues e espirais. É praticada na produção de monazita, ilmenita, zirconita, como por exemplo.

2.1.5.4 Flotação

É um processo predominante atualmente em várias categorias de minérios, correspondente pela sua seletividade e versatilidade. Se adota no tratamento de minério tanto de baixo teor, quanto para os de moagem fina para cumprir a liberação pretendida. O processo se fundamenta na conduta físico-químico da face externa de partículas minerais em uma

suspensão que seja aquosa. Utilizam-se depressores, modificadores e coletores designados como reagentes específicos. É empregado em equipamentos pneumáticos e mecânicos, e se aplica em produção de cloretos, fluorita, sulfetos, areias quartzosas de alta pureza, talco, entre outros.

2.1.5.5 Separação magnética

O determinador neste processo é a propriedade de suscetibilização magnética. Os minerais podem ser agrupados em três classes de acordo com um campo magnético natural ou induzido: diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos; respectivamente nenhuma atração, média e fraca atração e forte atração. Os processos podem ser elaborados por via úmida e seca. É empregada na produção de feldspatos, areias quartzosas, nefelina sienitos e seus equipamentos são as correias, filtros, tambores e rolos.

2.1.6 Desaguamento

A água exerce uma função significativa no beneficiamento de minérios. Entretanto, em uma estipulada fase do processo, precisa-se realizar sua retirada para alcançar produtos em pequena escala de umidade. Existem operações que são atribuídas para estabelecer o desaguamento.

2.1.6.1 Filtragem

É o método atingido pelo acesso forçado de uma suspensão aquosa pelo meio de um elemento que irá filtrar e reter os elementos sólidos em sua superfície. O processo pode ser intermitente ou contínuo, por efeito de pressão induzida ou ação de vácuo. Utilizam-se equipamento como disco, tambor, correia que são os filtros à vácuo, e se usam os filtros prensa.

2.1.6.2 Sedimentação

É uma técnica utilizada no desaguamento que é alcançada pela aglomeração de partículas sólidas que estejam em suspensão em um líquido pela influência única da força da gravidade. São agrupadas em duas categorias: clarificação e espessamento. A clarificação objetiva a retirada dos elementos sólidos existentes em uma suspensão diluída. Já o espessamento, dispõe-se de uma aglomeração ou concentração satisfatória de sólidos.

Utilizam-se flocculantes, que são designados como reagentes específicos que visam favorecer as operações. São aplicados equipamentos como clarificadores, espessadores e cones, principalmente.

2.1.6.3 Secagem

É realizada pelo meio de evaporação pela ação do calor e quando se deseja um baixo nível de umidade. O custo é alto, visto que a água precisa sofrer vaporização para sua retirada do material. Se utilizam os secadores de bandejas, de leito fluidizado e os rotativos.

2.1.7 Manuseamento de materiais

A estocagem e o transporte dos materiais representam grandes operações no beneficiamento de minérios, sendo solicitado em cada uma das etapas do processo.

As áreas onde ocorre a estocagem são indispensáveis em cada uma das etapas podendo ser antes do tratamento de minérios, durante e depois.

Esse manuseio compreende produtos secos, sólidos e suspensão aquosa dos elementos minerais (DUTRA, 2008).

Pode-se observar na Figura 2, um fluxograma característico de beneficiamento de minério.

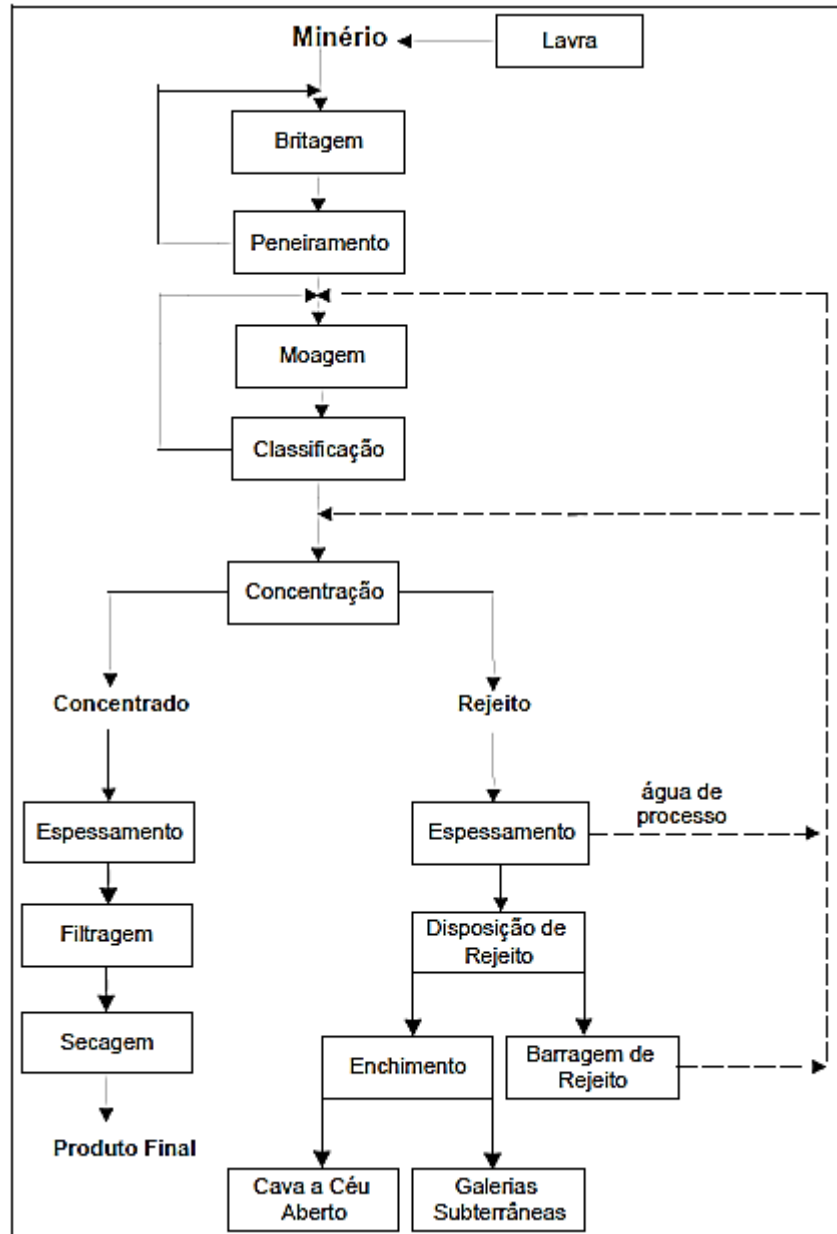


Figura 2 - Fluxograma característico de beneficiamento de minério.

Fonte: CETEM

2.1.8 Práticas industriais

O mercado procura alguns produtos principais do minério de ferro como: *pellet feed* com granulometria menor que $0,15\text{ mm}$, *sínter feed* com granulometria entre $0,15\text{ mm}$ e $6,3\text{ mm}$ e granulado com granulometria maior que $6,3\text{ mm}$. Esses produtos são utilizados no

abastecimento de alto-forno para se produzir aço e ferro gusa em indústrias siderúrgicas. A Figura 3 mostra os tipos de minérios de ferro.



Figura 3 - Tipos de minérios de ferro.

Fonte: CSN

2.2 Britagem

É definida como um agrupamento de operações com a finalidade de fragmentação de blocos de minérios que são vindos de uma mina, conduzindo-os a alcançar a granulometria conciliável subsequente ao processamento ou para a utilização direta. Considera-se britagem como um dos estágios do processamento de minério.

Há mecanismos de fragmentação que utilizam energia mecânica para danificar a aglutinação dos blocos e partículas. Podemos citar três mecanismos: abrasão por cisalhamento, impacto e compressão.

- a) abrasão por cisalhamento: ocorre no momento em que, os fragmentos das rochas entram em contato com distintas superfícies metálicas ou em contato entre si, de maneira a estarem realizando movimento relativo. Observe a Figura 4.

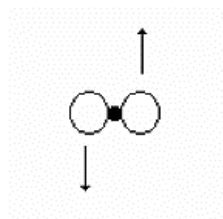


Figura 4 - Esquema de mecanismo de abrasão.

Fonte: Tratamento de Minérios II – IFG

- b) impacto: é realizado usando a energia cinética por meio de uma massa, que efetua movimento circular e que irá colidir com as partículas ou blocos. Ver Figura 5.

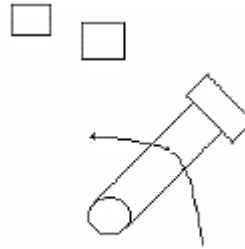


Figura 5 - Esquema de mecanismo de impacto.

Fonte: Tratamento de Minérios II – IFG

- c) compressão: na qual ocorre a compressão das partículas ou blocos entre no mínimo, duas superfícies.

A britagem é empregada a distintos tamanhos de fragmentos, podendo variar entre rochas de 1000 mm e 10 mm . Não há, por exemplo, um circuito padrão para realizar a fragmentação das distintas categorias de minério. Normalmente a partir dos estágios pertinentes é realizada a operação de britagem.

Dizemos que há uma liberação convincente do mineral apropriado, quando o minério é reduzido a uma granulometria fina. Podemos dizer, que a fragmentação se realiza mediante a três estágios: granulometria fina ou moagem, intermediária e grossa. Em britadores a fragmentação é realizada nos estágios de granulometria grossa e intermediária, e a granulometria fina é alcançada através de moinhos.

Não existe severidade relacionada aos estágios, geralmente usa-se a classificação apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Categorização dos estágios de britagem.

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

Fonte: CETEM

2.3 Britadores

Há distintos tipos de britadores, britador de rolos, britador cônico, britador giratório, britador de mandíbulas e britador de rolo dentado. Esses são os tipos mais usuais em aplicações industriais.

Podemos descrever os tipos de britadores de acordo com sua classificação dos estágios de britagem. Os mais aplicáveis nas indústrias são: britagem primária, secundária e terciária.

2.3.1 Britagem primária

Usualmente são os britadores de grande porte. Operam em circuito aberto, pois não existe carga circulante, ou seja, o material não irá voltar para o equipamento em que é realizada a cominuição. Não há escalpe, sendo que escalpe é a retirada de finos em operações de britagem. É efetuado a seco, e sua razão de redução é de aproximadamente 8 : 1.

Neste estágio se utiliza os britadores a seguir: britador de mandíbula, britador giratório, britador de impacto e o de rolos dentado.

O britador giratório é aplicado para grandes capacidades de material que serão fragmentados. Ele é utilizado para abastecimento por qualquer lado, permite uma baixa capacidade de armazenamento em seu topo e seu custo é baixo.

2.3.1.1 Britador de mandíbulas

Equipamento empregado para realizar a britagem primária, a qual apresenta blocos de grandes variações e dimensões de tamanho no momento do abastecimento.

É composto por uma mandíbula móvel em contato ao excêntrico, podendo ser ligado indiretamente ou diretamente, que irá fornecer o afastamento e aproximação entre a mandíbula fixa e a móvel. Desta forma, o bloco do material abastecido pela entrada do britador irá descer pelas mandíbulas recebendo então o impacto que é encarregado pela fragmentação.

Podem ser categorizados pelo distinto conjunto de peças do acionamento da mandíbula móvel em dois tipos: britador de um eixo e dois eixos (Figuras 6 e 7). Conhecidos também como *Dodge* e *Blake*, nesta ordem.

O britador de um eixo possui movimento elíptico, enquanto o de dois eixos a mandíbula móvel apresenta movimento pendular (Figura 8). O custo do britador de dois eixos é alto aproximadamente 50% a mais do que os de um eixo e é mais apropriado para materiais de difícil desintegração e abrasivos.

Os britadores de mandíbulas são especificados pelas dimensões de abertura de abastecimento ou alimentação.

Pelo ajuste da descarga é possível estabelecer a granulometria do produto, visto que sua razão de redução é próxima de 5 : 1.

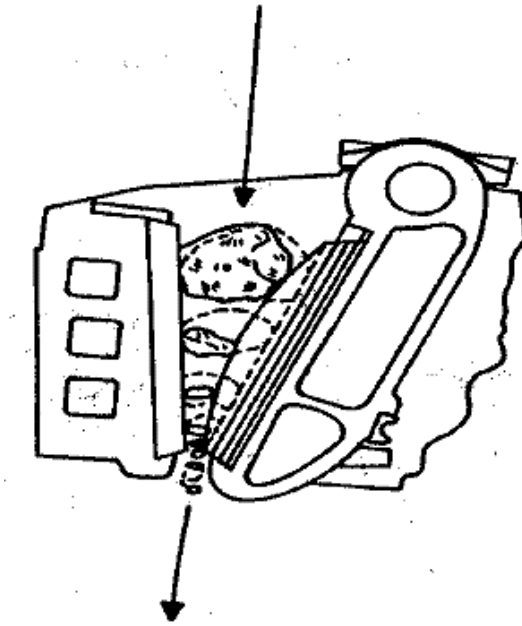


Figura 6 - Representação de fragmentação do britador de mandíbulas de um eixo.

Fonte: CETEM

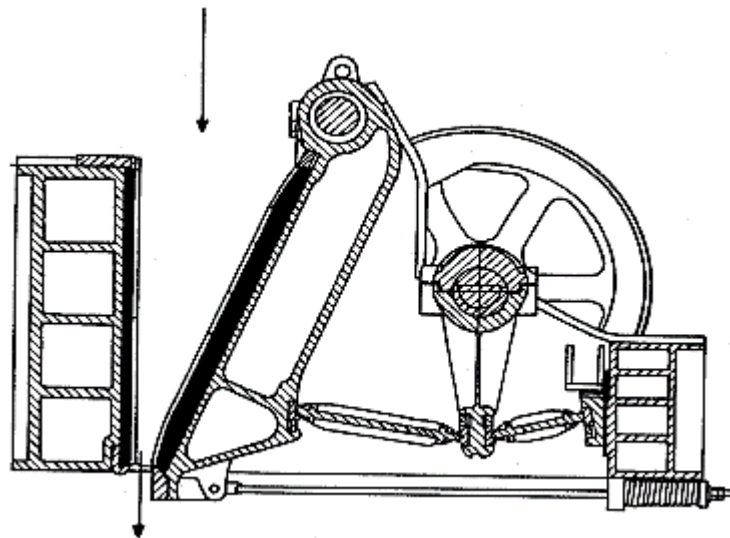


Figura 7 - Representação de um britador de mandíbulas de dois eixos.

Fonte: CETEM

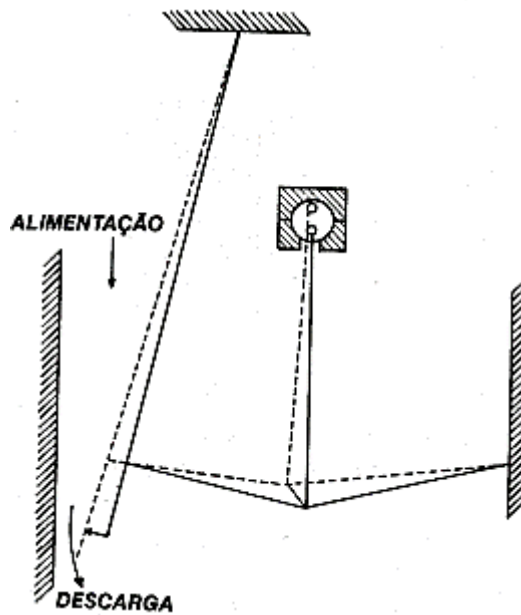


Figura 8 - Estrutura da movimentação de britador de mandíbula de dois eixos.

Fonte: CETEM

2.3.1.2 Britador de impacto

Ao invés de compressão, neste britador (Figura 9) a fragmentação é realizada por meio do impacto. Através da movimentação das barras, uma parcela de energia cinética será transferida para o material lançando-o em cima das placas fixas onde é efetuada a fragmentação.

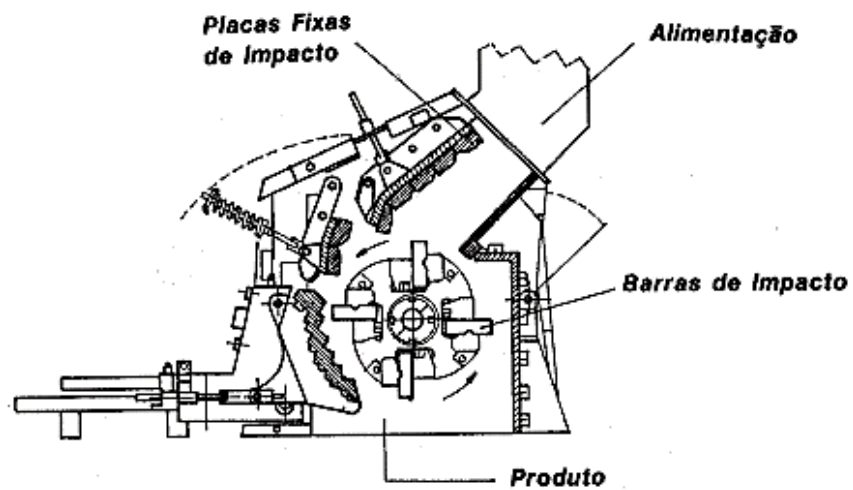


Figura 9 - Representação de um britador de impacto.

Fonte: CETEM

Contudo, esse equipamento apresenta desvantagens tal como seu alto custo de manutenção e elevado desgaste. Não é recomendado para rochas abrasivas e materiais que contenham valor da sílica superior ao correspondente de 15%. É orientado no qual se requer alta percentagem de finos e razão de redução.

2.3.1.3 Britador de rolo dentado

Compõe-se essencialmente de uma carcaça fixa e um rolo dentado móvel. Como observado na Figura 10.

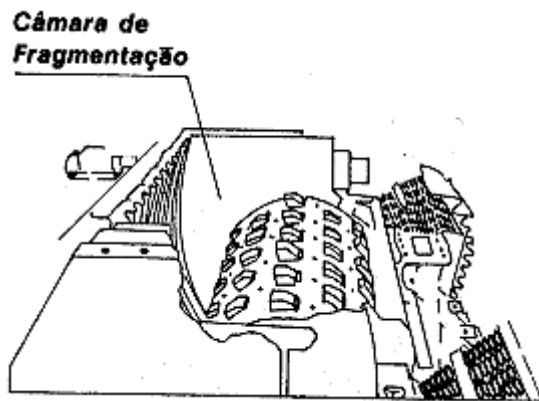


Figura 10 - Esquema de britador de rolos dentados.

Fonte: CETEM

Quando o rolo fizer um movimento giratório, ocasionará no cisalhamento e compressão do material entre a placa inserida na câmara e os dentes.

A utilização é restrita, pelo motivo dos dentes serem sensíveis a abrasão e ao alto desgaste do dente. Seu emprego é recomendado para britagens móveis e em rochas que tenham facilidade de fragmentação. Dispõe de alta complacência em relação a umidade presente no abastecimento.

2.3.2 Britagem secundária

Normalmente, são todas as gerações posteriores a britagem primária. Objetiva-se a redução da granulometria do material subsequente à moagem. A fim de elevar a capacidade de produção, ocorre o descarte da porção fina na alimentação.

Geralmente utilizam os equipamentos tal como: britador de rolos, britador cônico, britador de martelos, britador de mandíbulas secundário e britador giratório secundário.

Pode-se dizer, que os britadores de martelos, mandíbulas e giratórios são análogos aos empregados na britagem primária, porém apresentam dimensões menores.

O britador cônico baseia-se na mesma premissa do britador giratório, entretanto no cônico a descarga é dada pela atuação da gravidade e o cone e o manto possui uma superfície paralela longa que assegura uma boa retenção de elementos nesta região.

2.3.2.1 Britador de rolos

Consiste em um equipamento (Figura 11) que possui dois rolos, que são constituídos de aço, que giram em sentidos opostos, na mesma velocidade a partir de uma distância determinada. São atribuídos a materiais frágeis e que tenham facilidade de fragmentação.

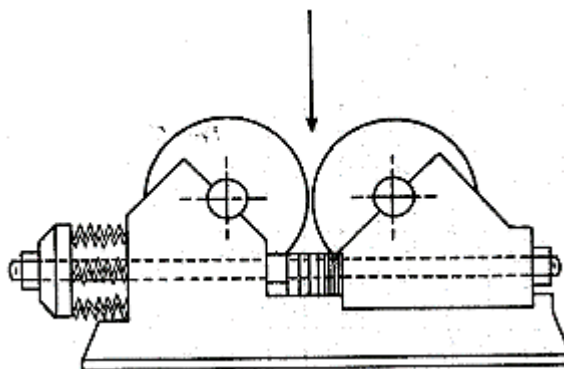


Figura 11 - Representação de um britador de rolos.

Fonte: CETEM

O abastecimento é realizado projetando-se os blocos de minérios por meio de rolos, do qual esse movimento vai fazer com que os rolos sejam submetidos a passarem pela distância predeterminada mediante a parafusos de ajuste, fazendo com que seja efetuado a fragmentação dos blocos.

Relativamente sobre a granulometria de abastecimento, este tipo de britador apresenta um grande limite em relação aos diâmetros e a distância estabelecida entre os rolos.

2.3.3 Britagem terciária

Usualmente é considerado o final dos estágios de britagem, mesmo tendo indústrias que realizam o quarto estágio, esse fator irá depender da granulometria desejada do produto.

Geralmente utiliza-se equipamentos tal como o britador cônico, que alcance aproximadamente razão de redução de 6 : 1 ou 4 : 1. Devido ao fato de necessitar um máximo controle desses equipamentos, trabalham em circuito fechado, em que o material vai retornar ao equipamento onde é realizado a cominuição.

2.3.3.1 Britador de impacto vertical

É designado como o equipamento que produz modificação nos elementos das partículas alcançando forma arredonda ou cúbica. Essa forma só é possível devido aos mecanismos na câmara de britagem e no rotor do britador. Mecanismo estes como: abrasão, atrição e impacto.

Uma fração do material abastecido vai para o rotor que, lançando o material a velocidades altas em oposição as paredes da câmara, está coberto com o material próprio da colisão das partículas mutuamente e são fragmentadas. Uma parte desse material que passou por fora no rotor assumirá formato de cascata e colidirá em contraposição as partículas que se movimentaram no interior do respectivo rotor. Observe na Figura 12.

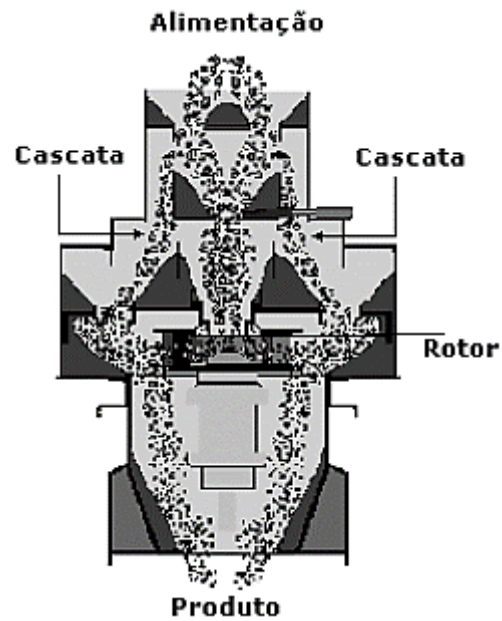


Figura 12 - Representação esquemática de britador de impacto vertical.

Fonte: CETEM

Esse formato de cascata dos elementos oferece alguns benefícios de modo que: realize um aumento da capacidade do processamento do britador, controle de granulometria, atenuação do consumo de energia no processo e diminuição da despesa de peças desgastadas (CETEM, 2010).

2.4 Acionamentos

O acionamento de equipamentos e máquinas mecânicas depende das características do tipo de carga que será acionada para definir qual o tipo de acionamento mais apropriado. Os acionadores são dispositivos capazes de gerar o movimento inicial desejado, em uma máquina ou equipamento qualquer, e podem ser classificados em dispositivos de:

- a) acionamento elétrico;
- b) acionamento pneumático;
- c) acionamento hidráulico.

2.4.1 Acionamento elétrico

Quando existe a disponibilidade de energia elétrica, geralmente a melhor opção para o acionamento de movimentos mecânicos se encontra representada na utilização de motores elétricos, que cobrem uma grande faixa de potências de *mW* à *MW* (STEPHAN, 2008).

Estes, disponibilizam menor velocidade e força (quando comparados aos acionamentos hidráulicos). Também promovem maior precisão, repetitividade e são mais “limpos” em sua utilização. Nos últimos anos, o acionamento de equipamentos e máquinas mecânicas através de motores elétricos tem sido assunto de grande relevância no contexto econômico (FRANCHI, 2015).

Alguns exemplos de acionamentos elétricos são:

- a) motores passo-a-passo (controle em malha fechada ou aberta);
- b) servo-motores DC (controle em malha fechada e mais usados).

Classificação geral dos motores elétricos de acionamento (Figura 13):

- a) motores de corrente contínua (CC): estes motores são bastante conhecidos por seu controle eficiente e preciso de velocidade, sendo amplamente empregados em operações nas quais são exigidas tais características;
- b) motores de corrente alternada (AC): são amplamente empregados, de maneira geral, pelo fato de que a distribuição local de energia elétrica é realizada sob forma de corrente alternada. São também bastante utilizados por sua simplicidade, construção robusta, possuem custo de fabricação relativamente baixo e excelentes características de funcionamento. Estima-se que 90% dos motores fabricados são motores de indução de gaiola (FRANCHI, 2015).

A classificação dos motores AC do tipo de indução se dá em:

- síncronos: operam com velocidade fixa;

- assíncronos: operam, geralmente, em velocidade constante, variando ligeiramente com a carga mecânica aplicada ao eixo do motor.

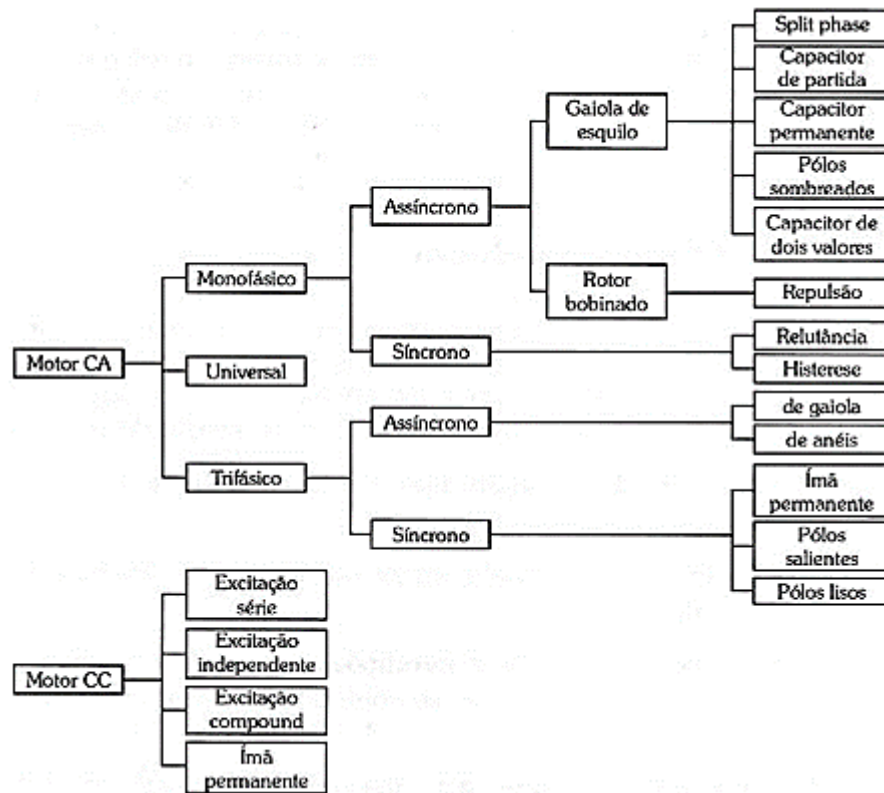


Figura 13 - Tipos de motores elétricos.

Fonte: Acionamentos Elétricos (C. M. FRANCHI, 5. ed.)

A seleção de qual motor utilizar vai depender da aplicação a qual o motor estará sujeito e quais as possibilidades do investidor. Alguns fatores a se levar em conta são:

- fonte de alimentação: podem ser de corrente contínua ou alternada, de um ou mais polos, tensão (ex.: 127 V, 220 V ou 380 V) e frequência (ex.: 50 Hz ou 60 Hz);
- condições ambientais: agressividade do meio, ou seja, a condição do local a qual o motor será instalado (ex.: mineradora), a altitude, temperatura do local de instalação;
- exigências da carga e condições de trabalho: potência necessária, rotação, esforços mecânicos solicitados, ciclos de operação;

- d) consumo necessário e a manutenção;
- e) controle: torque, velocidade, posição, corrente de partida (esse depende das exigências da carga).

2.4.2 Acionamento pneumático

Conforme estudado anteriormente, motores elétricos são dispositivos capazes de converter energia elétrica em energia mecânica. Outro meio de promover o acionamento de máquinas dá-se pela utilização de acionadores pneumáticos.

Este tipo de acionamento é realizado através de um dispositivo capaz de converter energia fluida (ar comprimido) em energia mecânica (STEWART, 1977).

A divisão dos motores pneumáticos se dá em dois tipos:

- a) motores tipo rotativo: motores pneumáticos de engrenagens e de palhetas são dois exemplos de motores rotativos. Podem ter a velocidade entre 4.000 e 25.000 *rpm* e desenvolver até 3 *HP*;
- b) motores tipo de reciprocção: um exemplo deste tipo é a combinação de um cilindro e um pistão. São bastante utilizados quando há a necessidade de maior potência e menores rotações como em serviços pesados com brocas perfuratrizes (mineração).

A pneumática faz uso do ar comprimido como meio de transmissão de potência. Assim, os motores pneumáticos funcionam de maneira segura com baixo custo de instalação, torque elevado de partida, uma rápida aceleração, podem ter sua velocidade variada e são bastante compactos. Porém faz-se necessário a instalação de um compressor, que irá gerar o ar comprimido necessário para o funcionamento do motor acionador.

2.4.3 Acionamento hidráulico

Neste tipo de acionamento, a energia oriunda da pressão fluida de um líquido (óleo) é convertida em energia mecânica através de motores hidráulicos (Figura 14). Estes permitem valores em grande escala de força e de velocidade; a maior desvantagem é o seu custo elevado. São amplamente utilizados em ambientes nos quais os componentes elétricos podem gerar princípios de incêndios.

O acionamento se dá pela combinação de uma bomba hidráulica e um motor de fluido que pode ser de pistões, de palhetas e de engrenagens (STEWART, 1977).

- a) motor de engrenagem: é um dispositivo de deslocamento fixo e são encontrados, geralmente, com a potência produzida na faixa de 200 *HP*;
- b) motor de palhetas: também de deslocamento fixo, estão operando com uma faixa de potência na saída de até 300 *HP*;
- c) motor de pistões: podem ser encontrados em modelos radiais e axiais. Este pode ser um motor de deslocamento fixo ou variável, o que vai depender da angulação entre o eixo geométrico do cilindro e o eixo de saída. Sua faixa de potência na saída está na casa dos 150 *HP*.

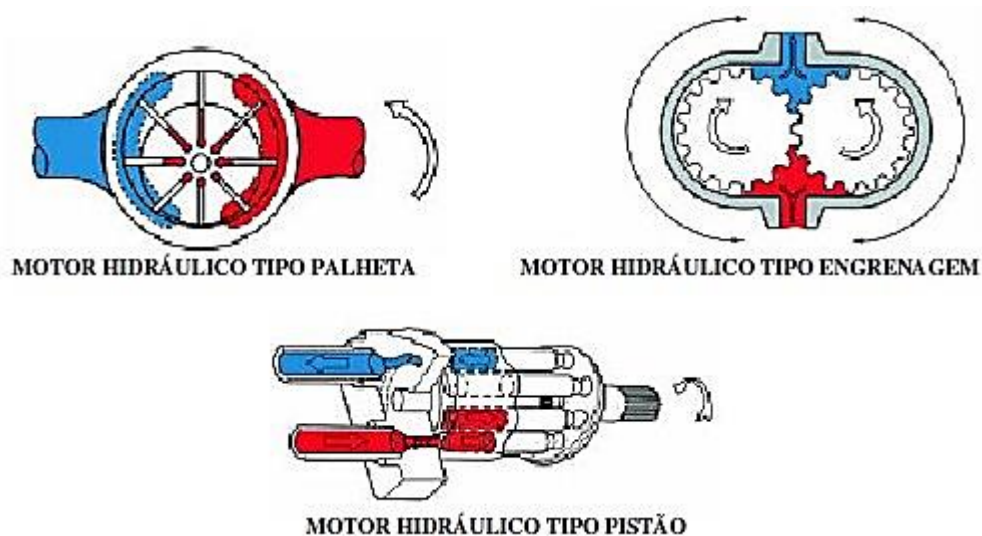


Figura 14 - Tipos de motores hidráulicos.

Tabela 2 - Comparação dos tipos de atuadores.

Tipo	Capacidade de Carga	Rigidez (sem transmissão)	Inércia	Tamanho (Peso-Volume)	Qualidade de Movimento
Elétrico	Pequena / Média	Baixa	Alta	Alto	Alto
Pneumático	Média	Baixa	Baixa	Médio	Baixo
Hidráulico	Alta	Alta	Baixa	Baixo	Médio
Característica		Hidráulico	Pneumático	Elétrico	
Relação carga/peso		Altíssima	Alta	Baixa (sem transmissão)	
Relação rigidez/peso		Altíssima	Média	Baixíssima (sem transmissão)	
Relação inércia/carga		Baixíssima	Baixa	Alta	
Tipo	Limitação de movimento	Repetitividade	Velocidade	Facilidade de controle	Custo
Elétrico	Sem limitação	Média / Alta (limitada pela transmissão)	Alta	Alto	Médio
Pneumático	Alta limitação (pistão)	Baixa	Alta	Média com o uso de válvulas proporcionais	Baixo
Hidráulico	Alta limitação (pistão)	Alta	Média	Boa com o uso de servo válvulas	Alto

Fonte:<http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/17829/material/atuadores.pdf>

É observado na Tabela 2, a comparação entre os tipos de atuadores.

2.5 Acionamentos de Britadores

Dentre os três tipos de acionamentos (elétrico, pneumático e hidráulico) e dada a necessidade de trabalho em uma mineradora, que possui ambiente altamente agressivo, de alta contaminação sólida e que precisa garantir a segurança e a flexibilidade das operações, o acionamento elétrico possui grande variedade e aplicabilidade. Os motores elétricos, indicados para acionamento de máquinas pesadas na mineração, como o caso dos britadores, são constituídos de ferro fundido de elevada qualidade, a fim de garantir maior durabilidade e um excelente desempenho em condições adversas.

Estes tipos de motores devem possuir fator de proteção IP 55, que é definido pela norma IEC 60529, na qual o IP é um padrão internacional que avalia e classifica a proteção de máquinas e equipamentos eletrônicos. O fator IP 55 assegura que o motor tenha proteção contra poeiras e jatos d'água. Além disso, segundo manual de britagem da METSO, os motores responsáveis pelo acionamento de britadores devem atender uma faixa de potência que varia de aproximadamente 300 a 1000 kW (METSO, 2002).

No mercado atual temos uma grande variedade de acionamentos elétricos, com capacidade, tamanho, especificações diferentes o que torna amplo e diversificado o seu uso.

Dessa forma, com a alta diversidade a aplicabilidade do acionamento elétrico, estes podem, por exemplo, atender a atividade de britagem primária, secundária e terciária, além de possuir bom desenvolvimento ao trabalhar em conjunto com outros dispositivos, o que contribui para obtenção das necessidades requeridas do processo.

2.6 Motores

Equipamento usado para converter outras energias em forma de energia mecânica, objetivando impulsionar movimento a uma máquina. A escolha pelo modelo correto é significativa, pois será o dispositivo de partida para o funcionamento confiável e estável operacionalmente.

2.6.1 Motores para mineração

Em uma planta de beneficiamento do minério, os britadores devem ser acionados por componentes que se adaptem às propriedades dos minerais de tal forma que ocorra harmonia em todo processo. É necessário avaliar: velocidade, torque, diferentes tipos de acoplamento e técnicas de resfriamento (WEG, 2014).

2.6.2 Motores elétricos

Na área da mineração é indicado o uso de motores elétricos, pois favorece as vantagens da energia elétrica – versatilidade, melhor rendimento, construção simples e simplicidade de comando. Isso já que, o processo de beneficiamento é de alta contaminação sólida, crítico e rigoroso.

Atualmente encontram-se vários tipos de motores, os principais são: corrente contínua e corrente alternada. Os motores de corrente contínua, tem um fluxo constante e ordenado de elétrons, estes são mais caros, pois é necessário converter a corrente alternada – fornecida pela concessionária em corrente contínua.

Além disso, os motores de corrente alternada (Figura 15) apresentam algumas vantagens como: aumento do intervalo de manutenção, maior grau de proteção e menor relação peso/potência se comparado aos motores de CC.

Os motores de corrente alternada podem se subdividir conforme proposta (FILHO, 2007):

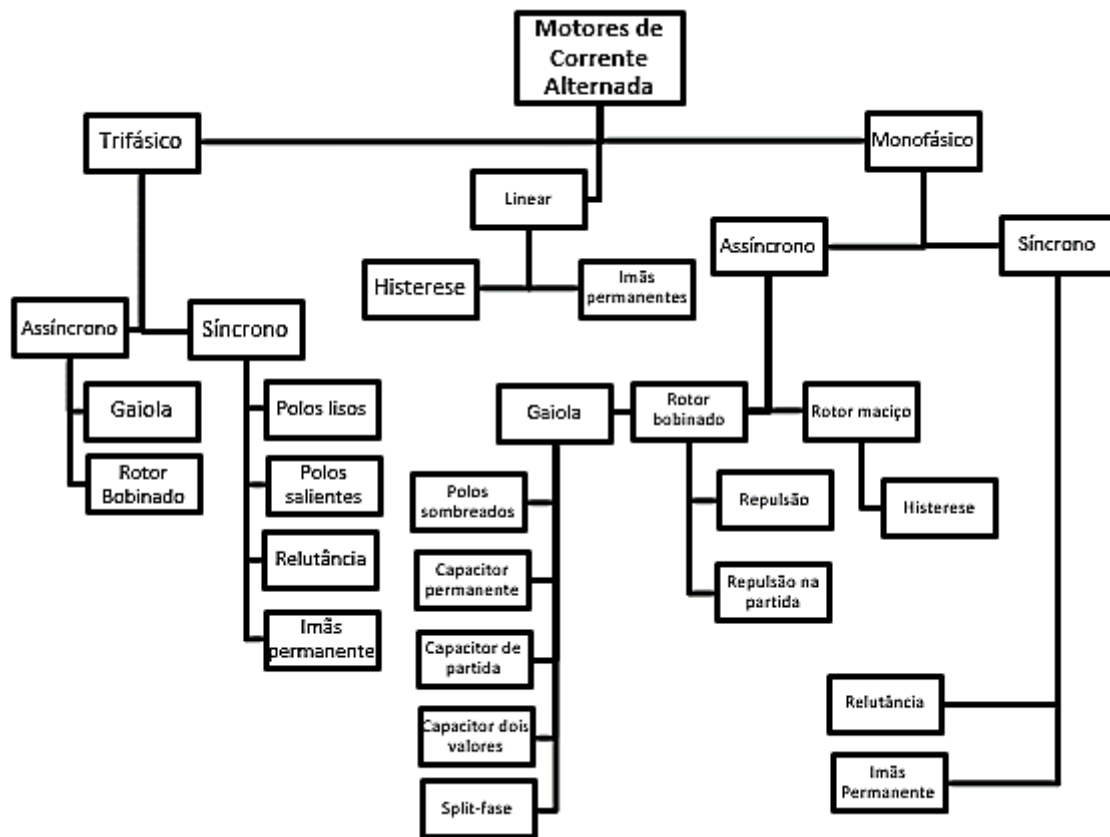


Figura 15 - Subdivisão de motores de corrente alternada.

Fonte: Instalações Elétricas Industriais (J.M. FILHO, 7. ed.)

Devido a atividade de cominuição e a crescente inovação em tecnologias, os equipamentos de fragmentação utilizam motores elétricos trifásicos e de acordo com a aplicação e demanda são selecionados modelos que satisfaçam a necessidade, podendo ser assíncrono ou síncrono.

2.6.3 Prescrição para uso de motores

Os motores também precisam estar de acordo com a norma IEC 60529:2001 (cancelada e substituída pela: ABNT NBR IEC 60529:2017), que qualifica e analisa a proteção de equipamentos eletrônicos contra a invasão de membros do corpo, poeira e água. Em relação à aplicação em questão é imprescindível que os motores tenham fator de proteção IP 55 – protege o motor contra poeira e jatos de água.

Vale destacar que os motores devem cumprir também os requisitos da *NEMA* – *National Electrical Manufacturers Association*, corporação baseada nos Estados Unidos, que também determina modelos usados em produtos elétricos.

A identificação quanto à cor externa da carcaça dos motores é de suma importância. Por exemplo, são tingidos externamente com a “cor laranja segurança”, equipamentos elétricos confeccionados para a utilização nas atividades de extração do minério ou movimentação que gere muita poeira indicando maior classe de proteção do invólucro das máquinas.

Devido à padronização de RPM (rotações por minuto) do acionador, que concedem energia mecânica através de rotações para um eixo impulsionar uma máquina, essas nem sempre estão compatíveis ao dispositivo a ser acionado, tornando-se necessário o uso de um redutor.

2.7 Redutores

Instrumento mecânico que restringe a velocidade – rotação de um acionador. É usado quando se pretende transmitir potência ou impulso de um eixo rotativo para outro, encontra-se muitas possibilidades disponíveis para essa transmissão como: correias planas, transmissões com volantes de atrito, correias em V, transmissões com correntes, correias dentadas sincronizadas, e transmissões por engrenagens (COLLINS, 2006).

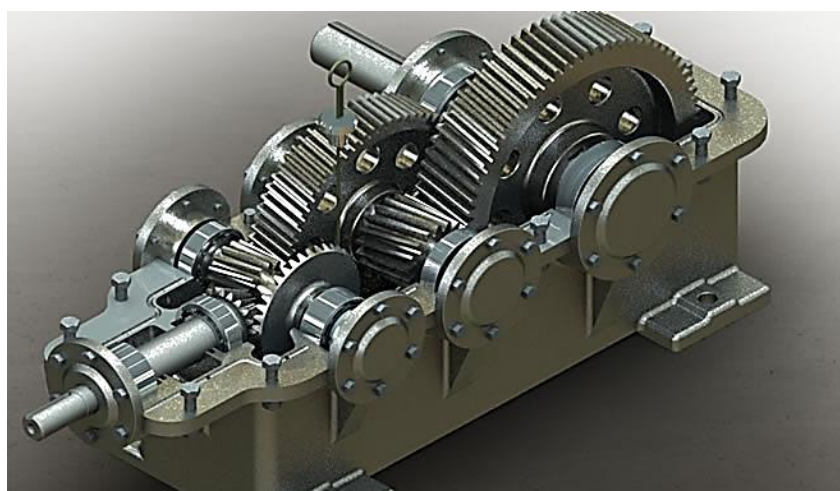


Figura 16 - Caixa redutora de engrenagens com dentes helicoidais.

Fonte: <https://industria hoje.com.br/redutor-velocidade>

O instrumento mecânico é constituído por: carcaça, engrenagens, eixos de entrada e saída, rolamentos e mancais (Figura 16).

2.7.1 Redutores na mineração

No âmbito da mineração trataremos as reduções sendo realizadas por engrenagens, devido sua grande capacidade de transmissão e utilização em condições severas, além de melhorar e intensificar a operação do dispositivo a ser acionado.

O acionador de um britador estará acoplado a um redutor, no qual se espera: movimento uniforme, suave, livre de deslizamento, a alta velocidade, sincronismo preciso e elevada eficiência, assim a seleção de um sistema de engrenamento adequado irá satisfazer estes critérios, além de ser o mais comum e com maior aplicabilidade nas indústrias.

Existem diversos tipos de engrenagem que vão variar de acordo com a necessidade do processo, podendo ser: sistema coroa e rosca sem fim, cônicas ou ainda, cilíndricas.

As engrenagens cilíndricas são as mais comuns que se encontram no mercado, e são utilizadas para as mais diversas finalidades, como na indústria e em acessórios que estão diretamente ligados ao nosso cotidiano.

As engrenagens cilíndricas podem ter os seguintes formatos de dentes: retos e helicoidais. Podem ser fabricadas a partir do plástico ou metal, para utilização em equipamentos é preferível o metal devido à necessidade de resistência. Caracterizam-se por ter velocidade angular constante, simplicidade em relação ao dimensionamento, fabricação e montagem.

Sempre funcionam em conjunto, e podem ter dimensões distintas. Em um par de engrenagens, a maior é nomeada coroa e a menor é o pinhão. Elas transferem o movimento de rotação entre o eixo que podendo ser: paralelo ou concorrente, isso vai se sujeitar ao tipo de dente que a engrenagem possui.

Engrenagens cilíndricas retas – dispõem de dentes retos e conduz rotação entre eixos paralelos. Indicada para aplicação em baixa velocidade, senão apresenta alto ruído.

Engrenagens cilíndricas helicoidais – apresentam dentes em formato de hélice e podem transmitir velocidade tanto paralelamente quanto em eixos que formam um ângulo entre si.

Recomendada para propagações de altas velocidades, porque são mais silenciosas do que as de dentes retos.

As cônicas executam a alteração de rotação e sentido do eixo e podem ser encontradas com dentes: espirais ou helicoidais e retos. Cada um desses tipos possui uma particularidade.

Engrenagens cônicas com dentes retos – adequada para equipamentos de baixo porte, que tenham rotação limitada.

Engrenagens cônicas com dentes espirais – caracterizada por atenuar a interação devido ao formato dos dentes minimizarem o impacto entre as peças.

Engrenagens cônicas com dentes helicoidais – desenvolvidas para disposição com alta rotação e os dentes desse perfil de engrenagem são dispostos no sentido transversal em relação ao eixo. A transmissão pode ser feita em eixos paralelos ou em eixos que criam um ângulo entre si.

A utilização da engrenagem sem fim é recomendada quando há necessidade de diminuir a velocidade transmissão de força para uma segunda engrenagem objetivando a não sobrecarga do equipamento. Utilizada em altas velocidades e a transmissibilidade da engrenagem sem fim é bem menor.

Essas características fazem com que os sistemas de coroa roscas sem fim sejam utilizados para seguridade de maquinários, pois a possibilidade de se parar o movimento é conseguido operando como uma trava.

Esses sistemas se têm a possibilidade de reduzir movimentos rotatórios e ao mesmo tempo propicia um maior torque no momento de impulso de uma máquina.

Os modelos citados acima são as possibilidades disponíveis hoje no mercado para montar uma caixa de redução, levando-se em conta que essas engrenagens estarão em um meio agressivo (britador). As escolhas serão feitas objetivando a melhor aplicação e bom funcionamento.

2.7.2 Relação de transmissão

Segundo Collins (2006), um par de engrenagens em contato, é usualmente chamado de engrenamento, ou seja, a forma mais simples de um trem de engrenagens. Um trem de engrenagens é uma ordem de múltiplas engrenagens acopladas de tal maneira que a velocidade de saída, o torque ou sentido de rotação desejada são obtidos utilizando-se condições de entrada específica.

A relação de redução para uma engrenagem em um trem, em que todas possuem eixos de rotação fixos, pode ser definida como:

$$\frac{w \text{ saída}}{w \text{ entrada}} = \frac{n \text{ saída}}{n \text{ entrada}} = \pm \left| \frac{\text{produto do } n^{\circ} \text{ de dentes das engrenagens motoras}}{\text{produto do } n^{\circ} \text{ de dentes das engrenagens movidas}} \right|$$

Onde:

$w \text{ saída}$ – Velocidade angular de saída

$w \text{ entrada}$ – Velocidade angular de entrada

$n \text{ saída}$ – Número de rotações de saída

$n \text{ entrada}$ – Número de rotações de entrada

Os componentes dos redutores sofrem muito desgastes durante a sua operação precisando de manutenção ou monitoramento constante de suas condições.

A manutenção preventiva controla e acompanha para quando forem sinalizados problemas como baixa produtividade, ruídos ou cheiros estranhos aconteça à intervenção antes de acontecer falha. O monitoramento é feito a partir de sensores que captam informações de funcionamento e enviam esses dados para uma central. Assim você consegue aperfeiçoar os resultados de toda operação.

A corretiva é a manutenção mais onerosa, visto que você terá sua operação paralisada, atrasos de entregas, mão de obras improdutivas, etc.

Além disso, os itens de lubrificação e refrigeração se tornam ainda mais importantes para engrenagens helicoidais e cônicas devido a componentes adicionais de deslizamento e para conjuntos com coroa sem-fim o aquecimento é tão significativo que, frequentemente são necessários sistemas de lubrificação com bombas (COLLINS, 2006).

2.8 Acoplamento

Acoplamentos são conjuntos mecânicos, compostos por elementos de máquina, que são utilizados para fazer a conexão entre dois eixos, sendo que um terá uma fonte de potência como um motor e o outro terá uma perda de potência como a máquina estabelecida. Essa conexão tem o objetivo de transmitir torque/ potência, e inclui benefícios no sistema como: a redução de vibrações, compensação de desalinhamentos e absorve choques. Desta forma, o acoplamento ele prolonga o tempo de vida dos redutores, moto redutores e máquinas acionadas.

Os acoplamentos são separados em duas classificações: rígidos e flexíveis. Dentro dessas classificações, existem diversos tipos como: móveis, de precisão, lâminas, engrenagem e hidráulicos. Essa simples divisão resulta em uma alta diversidade de modelos de acoplamentos, assim, sua seleção dependerá do projeto e suas necessidades.

Os acoplamentos rígidos são utilizados para unir os eixos (ou árvores) de forma que não haja movimentação dos eixos, tornando-se uma peça única. Estes são mais simples, baratos, oferecem mais rigidez na junta quando comparados aos flexíveis, porém, necessitam de alinhamento preciso entre os eixos a serem acoplados, visto que após o aperto do acoplamento, o desalinhamento resultará em reações, e assim atarefará o acoplamento, eixo e mancal do sistema.

Há dissemelhantes modelos de acoplamentos rígidos como: flanges, flanges aparafusados, com luva de compressão ou aperto, de disco ou prato e rígido nervurado.

Como o desalinhamento está presente na maioria dos casos, não seria diferente para o sistema de acionamento do britador, assim são utilizados os acoplamentos flexíveis.

2.8.1 Acoplamento flexível

Os acoplamentos flexíveis são utilizados para suavizar a transmissão mecânica entre os eixos, evitando os movimentos grosseiros e permitindo o trabalho da máquina com desalinhamento dos eixos axial, radial e angular, além de possíveis vibrações.

Esses acoplamentos são classificados em duas associações:

- a) elásticos: esses acoplamentos possuem um elemento elástico como borracha, grade ou mola para fazer a ligação entre os cubos. Estes são utilizados para transmitir rotação, movimentos torcionais, acalma picos de cargas, choques e ruídos de máquinas;
- b) não elásticos: esses acoplamentos têm características semelhantes ao citado acima, porém, apresentam restrição no movimento torcional. Eles são aplicados quando há necessidade de reversão constante ou sincronismo torcional.

Está incluso nos acoplamentos não elásticos e nos acoplamentos elásticos:

- a) acoplamentos de pinos: possuem pinos de aço com mangas de borracha para transmissão; Ver Figura 17.

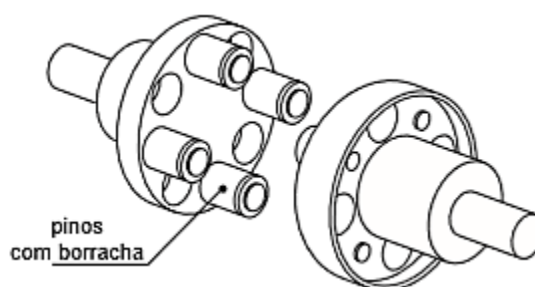


Figura 17 - Ilustração do acoplamento de pinos.

Fonte: Apostila Telecurso 2000

- b) acoplamento *perflex*: possuem dois discos unidos por uma ligação de borracha apertada por anéis de pressão e possibilita o jogo longitudinal dos eixos; Conforme Figura 18.

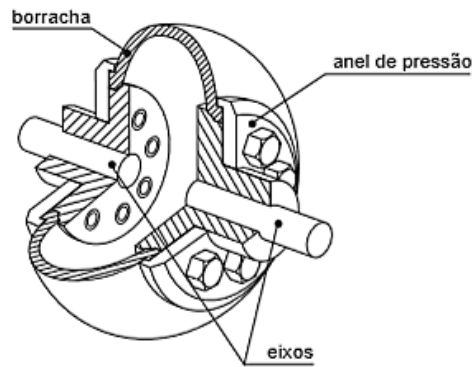


Figura 18 - Ilustração do acoplamento *perflex*.

Fonte: Apostila Telecurso 2000

- c) acoplamento elástico com garras: possuem garras compostas por tocos de borracha que são encaixadas nas aberturas do contra disco; Ver Figura 19.

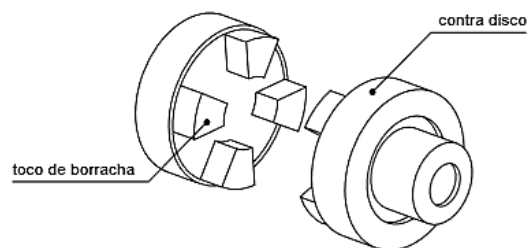


Figura 19 - Ilustração do acoplamento com garras.

Fonte: Apostila Telecurso 2000

- d) acoplamento elástico de fita de aço: possuem dois cubos munidos de flanges ranhuradas, sendo que tem uma grade elástica montada que liga os cubos. O conjunto está localizado em duas tampas que possuem juntas de encosto e retentor elástico junto ao cubo. Além de o espaço entre os cabos e as tampas ser preenchido com graxa; Figura 20.

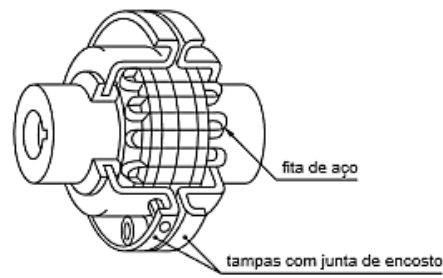


Figura 20 - Ilustração do acoplamento de fita de aço.

Fonte: Apostila Telecurso 2000

- e) acoplamentos de engrenagem: possuem dois cubos de composição com entalhes superficiais que engatam em entalhes intrínsecos em uma luva que se concilia sobre os dois cubos; Figura 21.

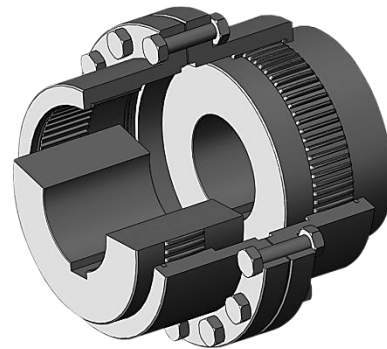


Figura 21 - Ilustração do acoplamento de engrenagens.

Fonte: Antares Acoplamentos

- f) acoplamento de lâminas: possuem dois cubos, um espaçador central e dois conjuntos de lâminas aparafusadas, Figura 22.



Figura 22 - Ilustração do acoplamento de lâminas.

Fonte: Aciobras

Além desses tipos citados acima, pode-se destacar os acoplamentos de: disco deslizante, de corrente, de mola, de discos flexíveis, de fole e de luva flexível.

2.8.2 Acoplamentos para britadores

Como abordado acima, o britador necessitará de acoplamentos elásticos para que suporte o desalinhamento no eixo e não force o conjunto. De acordo com o catálogo de acoplamentos PTI, pode-se utilizar acoplamentos das Linhas F, T, G, WLX, WLB e *WPFlex* que possuem um FS de 2,75 ou acoplamentos RD que possuem um FS de 2,75, ou acoplamentos *max dynamic* que possuem um FS de 3,0. Vale ressaltar que FS significa fator de serviço.

2.8.2.1 Acoplamentos de grades elásticas T

É um acoplamento de grade com seção trapezoidal e produzido em aço ligado de alta resistência temperado e revenido para dureza de molas. Apresenta uma rápida instalação devido as grades T serem de camada simples e terem facilidade para encaixe nos rasgos dos cubos, além da tampa bipartida.

Esse tipo de acoplamento apresenta onze modelos, são eles: tipo T10 engate justo, tipo T20 engate próximo, tipo T31 espaçador total, tipo T35 meio espaçador, tipo T41, T42, T44 e T45 torque controlado, tipo T50 eixo flutuante, tipo T50 semi-flexível, tipo T63 freio a disco, tipo T70 alta velocidade, tipo T90 volante, tipo T10/G82 espaçador.

Devido às características do britador, a seleção do acoplamento poderá ser realizada entre os modelos: T10, T20, T41, T42, T44, T45 e T90.

- a) T10: acoplamento com a tampa bipartida, possui pino interno que livra o giro na reversão, modelo para locais menores e é de uso geral, Figura 23.

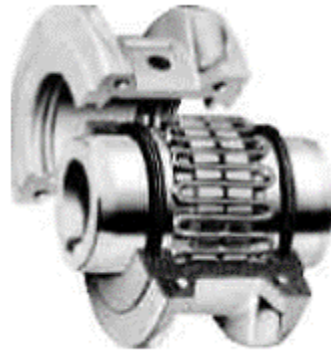


Figura 23 - Ilustração do acoplamento T10.

Fonte: PTI – FALK

- b) T20: acoplamento com tampa bipartida, ideal para velocidades mais altas e é de uso geral, Figura 24.

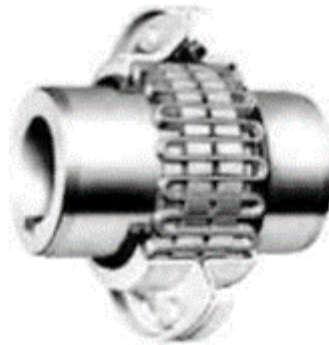


Figura 24 - Ilustração do acoplamento T20.

Fonte: PTI – FALK

- c) Tipo T41, T42, T44 e T45: acoplamento com domínio de torque por intermédio de lonas de fricção contra sobrecargas temporárias, Figura 25.

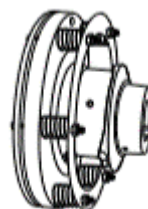


Figura 25 - Ilustração do acoplamento T41, T42, T 44 e T45.

Fonte: PTI

- d) Tipo T90: acoplamento que possibilita maior capacidade de torque e é aproveitado para unir o volante de um motor à máquina acionada, Figura 26.

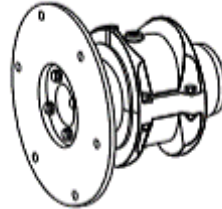


Figura 26 - Ilustração do acoplamento T90.

Fonte: PTI

2.8.2.2 Acoplamentos de grades elásticas F

O tipo F é um acoplamento tradicional, utilizado em mais de 90% das instalações, podendo assim ser utilizado em todas as aplicações industriais, sendo essas, verticais ou horizontais.

Esse tipo de acoplamento apresenta quatro modelos, são eles: tipo F, tipo FL, tipo FT Torque Controlado e tipo BW Polia de Freio.

Devido às características do britador, a seleção do acoplamento poderá ser realizada entre os modelos: F e FT.

- a) F: acoplamento flexível com ajuste com interferência para utilização em sistemas de mancais, conforme Figura 27.

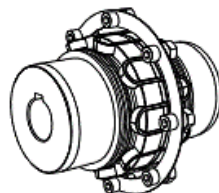


Figura 27 - Ilustração do acoplamento F.

Fonte: PTI

- b) FT: acoplamento com controle de torque através de lonas de fricção contra sobrecargas temporárias, ver Figura 28.

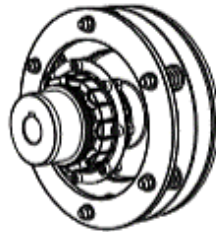


Figura 28 - Ilustração do acoplamento FT.

Fonte: PTI

2.8.2.3 Acoplamentos tipo G

Os acoplamentos G são acoplamentos de engrenagens que possuem capacidade de furação e torque nominal superior. Esses acoplamentos são rígidos torcionalmente, assim compensam desalinhamentos angulares, radiais e axiais, se enquadrando na classificação flexível não elástico.

Esse tipo de acoplamento apresenta doze modelos, são eles: tipo GC02 e GC05, tipo GC05 eixo flutuante, tipo G20 e GV20, tipo G32 espaçador total, tipo G52 e GV52, tipo G52 e GV52 eixo flutuante, tipo G62 e 66, tipo G63, tipo GL20 e GL52, tipo G70 e G72, tipo GP20, GP52 e GP82, tipo G82 e tipo GR20.

Devido às características do britador, a seleção do acoplamento poderá ser realizada entre os modelos: GC02, GC05, G20, GV20 e GR20.

- a) tipo GC02 e GC05: acoplamentos são compostos por duas caixas e uma tampa só, além de ser aplicado quando tem pouco espaço disponível, ver Figura 29.

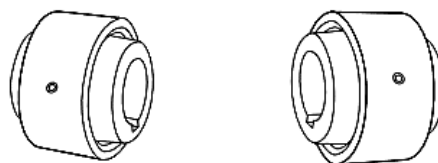


Figura 29 - Ilustração do acoplamento GC02 e GC05.

Fonte: PTI

- b) tipo G20 e GV20: acoplamentos de duplo engrenamento ideal para aplicações horizontais, além do Tipo G tem capacidade até 8.190.000 *N.m*, ver Figura 30.

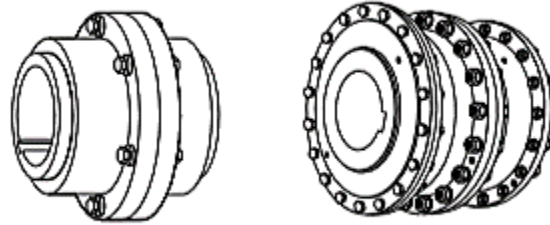


Figura 30 - Figura 14 – Ilustração do acoplamento G20 e GV20.

Fonte: PTI

- c) tipo GR20: acoplamento que possui cápsulas de corte quando estiver sujeito a sobrecarga, assim, quando os pinos quebrarem, o equipamento será desconectado mecanicamente, evitando danos, ver Figura 31.

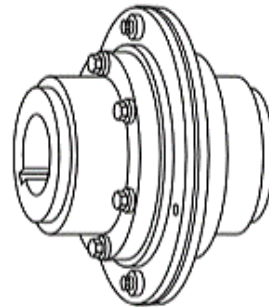


Figura 31 - Ilustração do acoplamento GR20.

Fonte: PTI

2.8.2.4 Acoplamentos WLX e WLX-B

Os acoplamentos flexíveis WLX E WLX-B (Figura 32 e 33) possuem uma relação melhor de capacidade por peso, atuam de forma confiável na transmissão, têm uma flexibilidade para suportar desalinhamentos angulares, radiais e axiais e diminuem as forças de reações nos

mancais dos equipamentos instalados. Vale ressaltar que este acoplamento foi projetado para possibilitar vida útil infinita.



Figura 32 - Ilustração do acoplamento WLX.

Fonte: PTI



Figura 33 - Ilustração do acoplamento WLX-B.

Fonte: PTI

2.8.2.5 Acoplamentos *WPflex*

Os Acoplamentos *WPflex* (Figura 34) são de instalação e troca rápida, assim não precisam ser removidos, o que reduz o tempo de equipamento parado. Estes suportam eixos de 186 *mm* e cargas de toque até 15028 *N.m*, além de possuírem baixo custo inicial e facilidade de instalação.



Figura 34 - Ilustração do acoplamento *WPflex*.

Fonte: PTI

2.8.2.6 Acoplamentos tipo RD

Este acoplamento é capaz de eliminar 50% das causas de quebras dos rolamentos devido ao fato de absorver desalinhamentos, além de eliminar ruídos. Permite também um isolamento elétrico entre os eixos, incluindo facilidade na montagem e na reposição da banda elástica. Ressalta-se que este não possui lubrificação.

Esse tipo de acoplamento apresenta dez modelos, são eles: cubo invertido (CINV), disco de freio (DF), com espaçador (ES), cubo com carretel (CC), cubo axial (AX), limitador de torque (LT), polia de freio (PF), eixo flutuante (EF), com bloqueio de segurança (BS), cubo com flange (CF).

Devido às características do britador, a seleção do acoplamento poderá ser realizada entre os modelos: CINV, CC, LT e CF.

- a) cubo invertido (CINV): este acoplamento é uma opção de montagem do cubo normal, Figura 35.

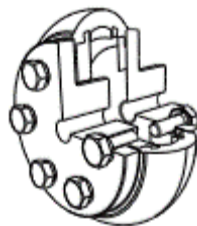


Figura 35 - Ilustração do acoplamento CINV.

Fonte: PTI

- b) cubo com carretel (CC): este acoplamento é utilizado quando realiza a montagem diretamente sobre o volante do motor, Figura 36.

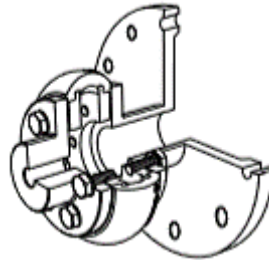


Figura 36 - Ilustração do acoplamento CC.

Fonte: PTI

- c) limitador de torque (LT): este acoplamento é utilizado para evitar sobrecarga de transmissão, Figura 37.

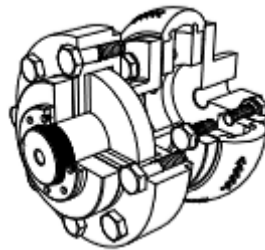


Figura 37 - Ilustração do acoplamento LT.

Fonte: PTI

- d) cubo com flange (CF): este acoplamento é utilizado quando existe mínimo local entre o volante do motor e a máquina acionada, Figura 38.

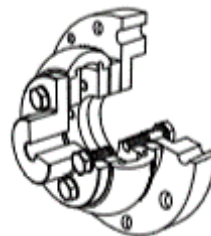


Figura 38 - Ilustração do acoplamento CF.

Fonte: PTI

2.8.2.7 Acoplamentos *max dynamic*

Os acoplamentos *max dynamic* (Figura 39) são dos tipos *perflex*, protegem as instalações contra empenamento e impactos, possuem fácil substituição ou manutenção, e têm a elasticidade mais alta durante o funcionamento. Ressalta-se o ruído minimizado e a substituição sem a separação do motor ou conector devido à estrutura fácil.



Figura 39 - Ilustração do acoplamento *max dynamic*.

Fonte: PTI

2.9 Volante de Inércia

No desenho esquemático adotado durante essa Seleção do Sistema de Acionamento de Britadores, o item posterior ao acoplamento é o volante de inércia. Este está entre os acoplamentos responsáveis principalmente pela junção dos eixos, e o britador. O volante de inércia, também conhecido como *flywheel*, é uma roda que após o acionamento do motor, começa girar e não para sem ação externa ou força de atrito, seguindo assim as leis da física como o princípio de conservação de energia e o princípio da inércia.

O funcionamento do volante de inércia apresenta como principal fundamento a ideia de Newton, conforme o enunciado:

“Todo corpo permanece parado ou em movimento retilíneo uniforme (MRU) a menos que uma força seja aplicada nele.” (NEWTON, 1687).

Assim, o motor fornece o torque ao sistema, sendo essa, a força do conjunto para inicialização do processo. Após a partida, o volante permanecerá em movimento retilíneo uniforme, o que resultará em um armazenamento de energia mecânica, devido este fato, o volante é considerado uma bateria. Esse armazenamento possibilitará uma economia da energia elétrica sem apresentar problemas ambientais, e permitirá a regularização das rotações do sistema sem variação da velocidade.

A Figura 40 representa um volante de inércia para melhor ilustração.



Figura 40 - Ilustração do volante de inércia.

Fonte: <https://erenovable.com/volante-de-inercia/>

O britador é um equipamento de grande porte que pode apresentar durante o processo de britagem, alterações de velocidades e torques devido a diferença da granulometria do minério na entrada deste equipamento, assim, se faz necessário a presença do volante de inércia.

2.9.1 Volante de inércia para britadores

O volante de inércia é, geralmente, uma roda com diâmetro de vinte e oito centímetros e sete centímetros de espessura, sendo que este possui um furo no centro para encaixar o eixo. Normalmente, o volante pesa cerca de trinta quilogramas e apresenta cem mil rotações por minuto. Vale ressaltar que este equipamento necessita de um acoplamento com conjunto de bobinas na roda.

O material do volante varia de acordo com o fabricante podendo ser de materiais a base de fibras de carbono, o que aumenta a resistência às forças centrífugas, além de aumentar a densidade e diminuindo o volume, e em aços fundidos como ASTM A216 que podem apresentar ranhuras para correias.

Com o mesmo princípio do volante de inércia, existem outros elementos como: o volante de motor, roda livre e contra recuos. O volante de motor é utilizado em empresas automobilísticas.

2.9.1.1 Roda livre e contra recuos

A roda livre possibilita o giro com liberdade e o contra recuo impossibilita algum deslocamento da máquina no sentido oposto ao do motor.

De acordo com o catálogo da *Vulkan*, para britadores de rolos consideramos rendimentos 0,72 e 0,85. E para britadores de martelos, são considerados rendimentos de 0,87 e 0,93.

Seguindo o mesmo catálogo, os contra recuos possuem dois tipos: contra recuos sem mancais próprios e contra recuos com mancais incorporados e braço de torção.

Para os britadores, utilizaremos os contra recuos sem mancais próprios, assim devem ser acoplados mantendo o homocentrismo entre os anéis externos e o cubo. Estes não necessitam de manutenção.

A figura 41 representa uma roda livre e contra recuos para melhor ilustração.



Figura 41 - Ilustração da roda livre e contra recuos.

Fonte: <https://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/automatizacao-e-robotica/copaflex/produtos/acessorios/contra-recuo-1>

2.9.1.1.1 Contra recuos sem mancais próprios

Possuem quatro modelos: FXMS 31 a 101, FXMS 85 a 240, VXMS - 20 - 30 e VXMS - 180 – 30.

Podem-se utilizar todos para os britadores, desta forma, temos:

- a) FXMS 31 a 101: apresenta um modelo com gaiola nova, além de assegurar máxima capacidade de torque e resistência à fadiga;
- b) FXMS 85 a 240: garante equilíbrio entre torque e tolerâncias de batimento;
- c) VXMS 20 – 30: possui basculamento centrífugo e aceita todos os tipos de lubrificação;
- d) VXMS 180 – 30: possui basculamento centrífugo e pode ser utilizado como conciliação com a roda livre em acionamentos lentos.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo encontram-se os métodos e procedimentos utilizados para o Estudo Comparativo de Sistemas de Britagem Secundária para o Minério de Ferro, conforme Figura 42.

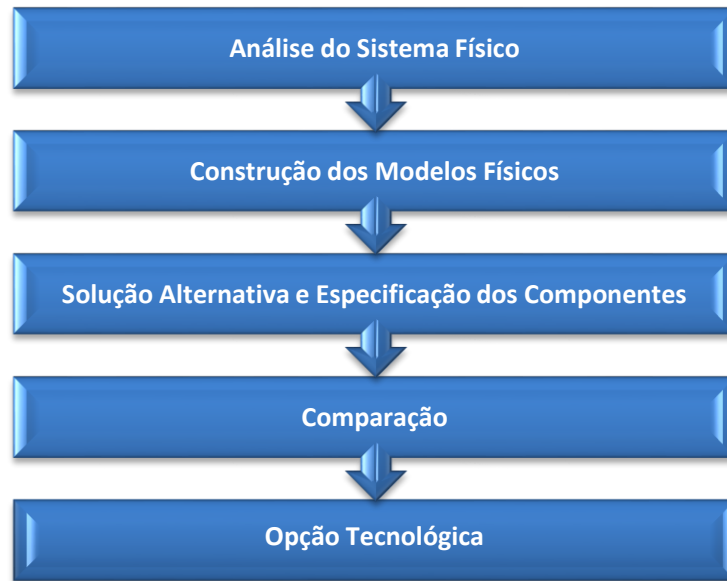


Figura 42 – Abordagem sequencial da metodologia.

Fonte: Os autores

3.1 Análise do Sistema Físico

Enumerar minuciosamente as características dos modelos em relação à construção física de acordo com as premissas de projeto. Primeiramente foi arbitrado que seria trabalhado com os britadores de mandíbula e rolos, a partir dessa decisão aprofundou-se o estudo de caso individualmente para uma futura comparação.

Definir qual tipo de força será aplicada para quebra do material, além de determinar qual a importância do minério de ferro, ou seja, como e onde ele será inserido dentro do mercado para seu cliente final.

Esclarecer também sobre as particularidades dos britadores de mandíbulas e rolos como: limitações de projeto, modelos e séries existentes de acordo com manuais, características construtivas, segurança, esforços necessários e custo.

É importante destacar que os equipamentos serão categorizados para uma mesma circunstância de cominuição, utilizando a mesma memória de cálculo para eles sem diferenciação.

A capacidade é aquele rendimento máximo que se pode desenvolver, neste caso será necessário determinar duas capacidades a real e a de instalação. A capacidade real é encontrada através de dados tabelados, já a capacidade de instalação leva em consideração, por exemplo, tamanho, peso, horas de funcionamento e através delas chegaremos a uma única solução. O esperado ao fim desses cálculos é que um desses britadores se apresente com potência mais avançada em relação ao outro.

3.2 Construção dos Modelos Físicos

A partir da análise do sistema físico, serão determinadas as premissas de projeto para se construir o modelo físico, ou seja, será construído o modelo físico para os britadores de mandíbula e rolos de forma que eles atendam aos mesmo requisitos em um mesmo processo de cominuição, para que assim, seja possível a comparação de forma precisa.

3.3 Solução Alternativa e Especificação dos Componentes

A solução das alternativas é realizada com base na análise e na construção dos modelos físicos, e conseqüentemente após, será feita a especificação dos componentes. A solução e a especificação são realizadas de forma separada para os dois tipos de britadores, partindo desde o modelo do manual até o custo do equipamento. Observe a Figura 43.

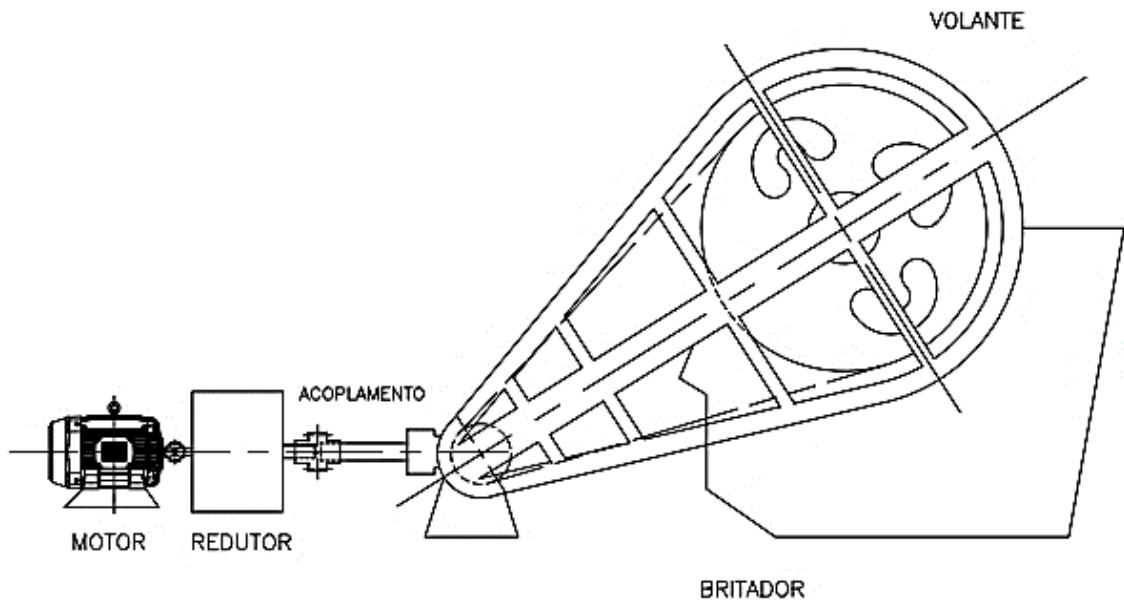


Figura 43 - Matriz de funcionamento do britador.

Fonte: Os autores

3.4 Comparação

Após a realização dos processos citados acima como: análise do sistema físico, construção dos modelos físicos, solução alternativa e especificação dos componentes, serão realizadas uma análise comparativa entre os britadores de mandíbulas e de rolos.

A comparação das opções estabelecidas tem a função de examinar as principais características positivas e negativas desses tipos de britadores para que dessa forma, a escolha seja a mais adequada para o processo de britagem secundária. Evitando assim, erros de projetos, custos desnecessários com instalações inadequadas e permitindo uma melhor eficiência do equipamento.

3.5 Opção Tecnológica

Comparados os britadores selecionados em estudo, iniciar-se-á a busca por opções tecnológicas. Estas proporcionam melhorias no processo, aperfeiçoando o rendimento e o custo benefício do equipamento. As opções poderão ser as mais variáveis, dependendo apenas de estudos e protótipos que comprovem as melhorias, baseadas nas vantagens e desvantagens da utilização do britador selecionado.

4 DESENVOLVIMENTO

4.1 Análise do Sistema Físico

4.1.1 Caracterização dos britadores

O processo de britagem consiste na quebra de material pela ação da força de compressão, impacto ou cisalhamento aplicada através de movimento periódico de aproximação e afastamento entre superfícies, a Figura 44 retrata a diferença em relação à distribuição de tamanhos. Os equipamentos discutidos a partir desse tópico realizarão cominuição por compressão.

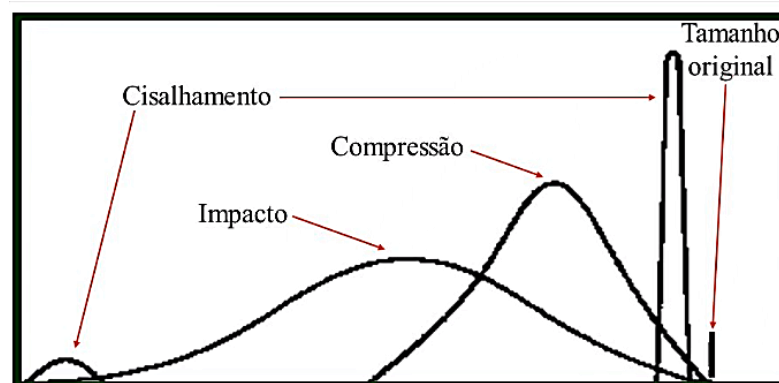


Figura 44 - Distribuição de tamanhos

Fonte: <https://slideplayer.com.br/slide/83983/>

As operações de cominuição se fazem necessárias na realidade por diversas razões:

- Permitir o manuseio do material de mineração;
- Permitir o transporte contínuo;
- Permitir a utilização do minério;
- Permitir sua separação através do processo de concentração (concentrador, rejeitos e produtos intermediários).

Será separado minuciosamente um todo ou partes dos componentes do britador de mandíbulas e o britador de rolos (britagem secundária). O material utilizado para análise do comportamento nos dois britadores será o minério de ferro.

O metal (de onde se obtém o ferro) que é o quarto elemento mais presente da crosta terrestre, de cuja composição demanda de 4,5% em massa, superado apenas pelo oxigênio, o silício e o alumínio. Embora faça parte da composição de vários minerais, somente alguns destes podem ser economicamente explorados para a obtenção do ferro, quer pela quantidade desse elemento nesses minerais, quer pela concentração ou distribuição desses nas rochas que compõe os corpos de minério.

Os minérios de ferro economicamente explorados podem ser classificados segundo com a composição química do mineral que fornece o elemento metálico.

Do ponto de vista metalúrgico, o minério de ferro é dividido em três categorias, de acordo com a granulometria: finos para sinter (*sinter feed*), finos para pelotas (*pellet feed*) e granulado (*lump ore*). O minério granulado compreende a faixa de granulometria entre 200 mm e 12,5 mm; já os finos para sinter, entre 12,5 mm e 0,15 mm; e os finos para pelotas, inferior a 0,15 mm. Para análise do projeto, será considerado o minério granulado.

As nomenclaturas dos minérios de ferro explorados para utilização comercial são: itabirito, hematita e canga. Os corpos de minério hematítico são mais homogêneos, constituídos basicamente de hematita, basicamente – sendo assim, ricos em ferro (teores superiores a 64% - alto teor) – e encontrados em proporções variáveis na forma de lentes imersas das camadas de itabirito.

Vale destacar que o circuito de cominuição pode ser classificado como aberto ou fechado. No circuito aberto, temos apenas uma etapa de cominuição, o material passa em uma passagem já fica na granulométrica desejada, não tem controle da granulometria do produto.

Já o circuito fechado pode ser direto, reverso ou misto e é utilizado quando se deseja controle granulométrico do produto. Nessas configurações temos a utilização de equipamentos como peneiras, ou seja, o material classificado mais grosso retorna ao circuito.

Nesse trabalho foi utilizado circuito aberto para as considerações a seguir, tendo em vista que estamos utilizando um processo mais grosseiro que é a britagem.

Para determinação da abertura de alimentação, tamanho final do produto britado foi baseado na Tabela 3.

Tabela 3 - Relação do tamanho máximo e estágio da atividade.

Tamanho máximo			
Estágio	Relação de redução	Alimentação	Produto
britagem primária	8:1	5 a 21/2 ft	> 1ft a 4"
britagem secundária	6 a 8:1	25" (cônicos)	4 a 3/4"
britagem terciária	4 a 6:1		1 a 1/8"
britagem quaternária	até 20	3" ou 1/4"	12" a 20#
moagem grossa	até 20	3/4" a 3/8"	6 a 35#
moagem fina	100 a 200	1/2"	fino

Fonte: Livro Teoria e Prática do Tratamento de Minérios, Vol. 3, 2º edição.

Capacidade real é indicada nas tabelas com variações em função da densidade aparente dos materiais a serem britados, *work index*, fator de tamanho da alimentação e fator de umidade.

A capacidade real (Q) de qualquer britador pode ser calculada da seguinte forma:

$$Q = Q_t \times A \times B \times C \times D$$

Onde:

Q_t – Capacidade tabelada (m^3/h)

Para o britador de mandíbulas irá ser baseado na Tabela 13 e o de rolos a Tabela 20.

Quando as capacidades forem indicadas numa faixa, usar sempre valor inferior para maior segurança, pois o limite superior foi calculado para condições favoráveis.

A – Densidade aparente dos materiais britados t/m^3

Tabela 4 - Densidade aparente dos materiais britados.

t/m³	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,1	2,2	2,3	2,4
Fator A	0,75	0,81	0,88	0,94	1	1,06	1,13	1,19	1,25	1,31	1,38	1,44	1,5

Fonte: Manual de Britagem da Faço, 3. ed. p. 2-06.

Se a capacidade é indicada em m^3/h , o fator $A = 1$

B – *Work Index*

Tabela 5 - Relação de *Work Index*.

Wi	10	12	14	18	22
B	1,15	1,1	1	0,9	0,8

Fonte: Manual de Britagem da Faço, 3. ed. p. 2-06.

Tabela 6 - Relação das propriedades físicas dos materiais.

Material	Work Índex Wi	Índice de Abrasão Ai	SiO₂ contida %	Resistência a compressão kg / cm²	Densidade Aparente t/m³
Magnetita	8.3 ± 2.5	(0,50 ± 0.20)	-	-	2,2
Hematita	11.3 ± 3.1	(0,35 ± 0.20)	-	-	2,4
Dolomita	10.3 ± 3.5	0.01 - 0.05	0 - 10	500 - 2000	1,55
Calcário	11.9 ± 2.8	0.001 - 0.3	0 - 10	500 - 2000	1,5
Gneisse	15.4 ± 3.5	0.50 ± 0.10	60 - 70	2000 - 3000	1,6
Granito	15.7 ± 5.8	0.55 ± 0.11	55 - 75	2000 - 3000	1,6
Quartzito	15.8 ± 2.8	0.75 ± 0.12	85 - 99	1500 - 3000	1,65
Diabásio	18.5 ± 4.3	0.30 ± 0.10	50 - 60	2500 - 3500	1,65
Basalto	20.8 ± 3.9	0.20 ± 0.09	40 - 50	3000 - 4000	1,6
Carvão	14 ± 4	-	-	-	0,8
Coque	20 ± 5	-	-	-	0,6
Clinker	11,7 ± 2	0.032	-	-	1,2

Fonte: Manual de Britagem da Faço, 3. ed. p. 14-11.

C – Fator do tamanho de alimentação

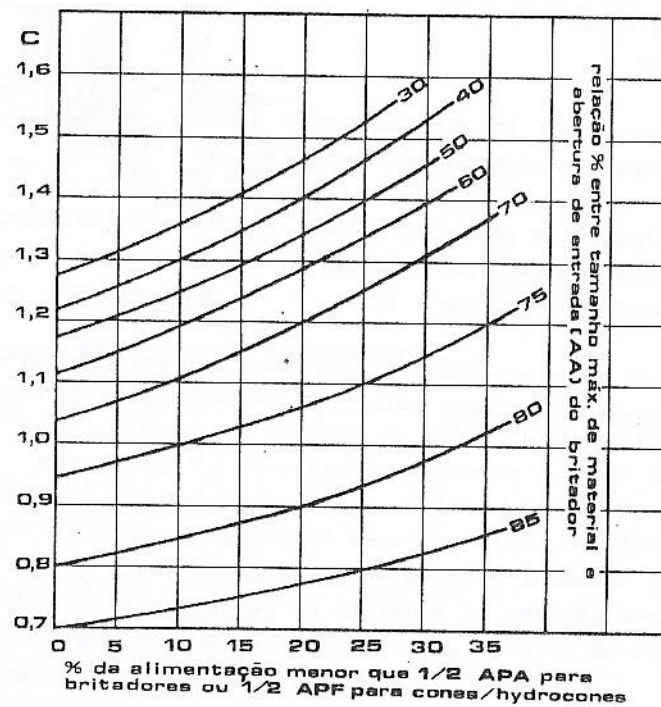


Figura 45 – Gráfico da relação entre tamanho máximo de material e porcentagem da alimentação.

Fonte: Manual de Britagem da Faço, 3. ed. p. 2-07.

Nesta etapa é necessário consulta à curva granulométrica, na qual cada britador terá sua particularidade.

D – Fator de umidade. Determinado conforme Figura 46.

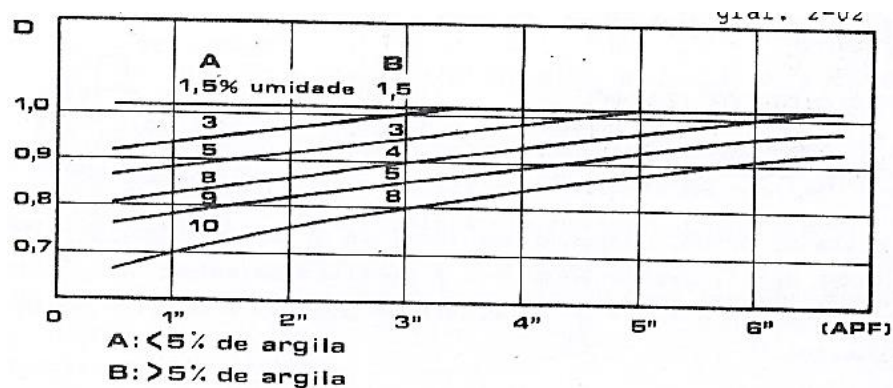


Figura 46 – Gráfico do fator de umidade para britadores giratórios e mandíbula.

Fonte: Manual de Britagem da Faço, 3. ed. p. 2-07.

O beneficiamento a úmido é um dos principais processos empregados pelas mineradoras para concentrar minério de ferro. A umidade presente no minério decorre desse beneficiamento além da que já faz parte da composição física do mineral. Devido a isso, o concentrado possui uma umidade residual de, aproximadamente, 9% a 12,5%.

Os cálculos de produção de britagem baseados simplesmente nas tabelas de capacidade de produção de máquinas, não podem ser consideradas como valores reais de produção da instalação.

Para melhor compreensão, esclarecem-se os seguintes conceitos:

Capacidade de uma instalação é a produção calculada, baseada somente nas tabelas de capacidade das máquinas, não se considerando os fatores que podem afetar estas capacidades. Pode ser chamada de “produção instantânea da instalação”.

Produção de uma instalação é a quantidade efetivamente produzida pela instalação durante um período de tempo significativo (semanas, meses, etc.).

Pode ser obtida a produção de instalação, considerando-se os seguintes fatores:

- a) Tamanho da instalação;
- b) Esquema de instalação;
- c) Tipo de material;
- d) Método de alimentação;
- e) Equipamentos usados;
- f) Jornada de trabalho;
- g) Manutenção;
- h) Pilha intermediária, etc.

É difícil prever qual será a variação entre a capacidade e a produção de uma instalação.

Obtém-se a produção de uma instalação pela seguinte fórmula:

$$Q_p = C \times K_1 \times K_2 \times K_3$$

Onde:

Q_p – Capacidade de produção da instalação (m^3/h)

C – Produção real (m^3/h)

K_1 – Fator tipo de material

Tabela 7 - Fator relacionado ao tipo de material

Calcário	1,2
Granito	1
Basalto	0,9
Minério de Ferro	0,8

Fonte: Manual de Britagem da Faço, 3.ed. p. 8-12

Conforme a Tabela 7, nas considerações utilizaremos o minério de ferro.

K_2 – Fator método de alimentação (ver Tabela 8).

Tabela 8 - Fator relacionado ao método de alimentação.

Modo de alimentação	Inst. Peq	Inst. Grande
Alimentador com pré-silo	0,95	0,95
Alimentador com tre-monha	0,9	0,85
Alimentação manual	0,8	0,6

Fonte: Manual de Britagem da Faço, 3. ed. p. 8-12

Para o modo de alimentação, foi utilizado o alimentador com pré-silo e uma instalação pequena.

K_3 – Fator jornada de trabalho (observar Tabela 9).

Tabela 9 - Fator relacionado a jornada de trabalho do equipamento.

Instalação	Horas trabalhadas (h/dia)		
	8-10	11-15	16-24
Pequena	0,9	0,8	0,75
Grande sem pilha intermediária	0,85	0,75	0,7
Grande com pilha intermediária	0,9	0,8	0,75
Grande com pilha intermediária e rebitadores giratórios	0,95	0,85	0,8

Fonte: Manual de Britagem da Faço, 3. ed. p. 8-12

Nesse fator foi decidido por uma instalação pequena tendo disponibilidade de 24 horas para produção.

Pode-se também acrescentar o cálculo empiricamente da potência necessária a ser aplicada, para cálculos simplificados, ou quando não se dispuser de dados experimentais, para se calcular a energia aplicada, pode-se admitir o seguinte: a metade da potência instalada é consumida na britagem propriamente dita, a energia aplicada será aproximadamente:

$$E = \frac{\text{Potência do motor (HP)}0,5}{1.36 C} \left(\frac{kWh}{t} \right)$$

Onde:

C – Capacidade da máquina (t/h)

Uma vez obtido o valor de E , calcula-se o E_T .

$$E_T = Q_p \times \gamma_a \times E \quad (kWh)$$

Onde:

Q_p – Capacidade de produção da instalação (m^3/h)

γ_a – Densidade aparente (t/m^3)

E – Energia aplicada (kWh/t)

Além da capacidade real e de instalação também será determinado o cálculo de duração das peças de desgaste. O custo operacional de qualquer instalação de britagem ou moagem está diretamente relacionado com a potência aplicada e consumo de peças de desgaste. Os estudos realizados correlacionam o desgaste de metal em peças com energia despendida, em função das características de abrasividade do material processado.

Os dados estão relacionados com índice de abrasividade (A_i – *abarasion index*) que é determinado pelo método comparativo de BOND (necessidades energéticas são expressas pelo fator denominado (“*work index*”).

O grau de aproveitamento da peça depende não somente do tipo de equipamento, mas também, em grande parte, do regime operacional da máquina, podendo se apresentar bastantes divergentes para os mesmos equipamentos e materiais processados, operados em condições diferentes (tamanho de alimentação, abertura de trabalho, grau de enchimento).

O cálculo da vida útil da peça é dado por:

$$V = C \times p \times \frac{10}{E_t g}$$

Onde:

V – Vida útil da peça (H)

C – Peso total da peça (kg)

E_T – Energia gasta no processo por hora (kWh)

g – Desgaste (g/kWh)

Para cada britador será feita considerações de desgaste particulares.

4.1.2 Caracterização dos britadores de mandíbulas

Os britadores de Mandíbulas podem ser de I ou II eixos. De forma sucinta irá ser abordado o funcionamento dos dois. A Figura 47 possui esquematicamente os elementos mecânicos ativos de uma placa metálica móvel (mandíbula móvel), que se desloca em movimento retroativo (aproxima-se e afasta-se) de uma placa metálica fixa (mandíbula fixa). A distância entre as duas mandíbulas na extremidade superior do britador é muito importante e chamada de “*gap*”.

O fragmento de minério a ser britado é esmagado quando inserido no espaço entre as duas mandíbulas, durante o movimento de aproximação. Os fragmentos resultantes escapam para baixo, durante o movimento de afastamento, cada qual se movendo até uma posição em que fique retido pelas mandíbulas e seja outra vez esmagado na aproximação da mandíbula móvel.

A mandíbula móvel desloca-se em torno de um eixo cêntrico. O movimento é promovido por outro eixo, excêntrico, que aciona uma biela. Esta biela está unida entre duas placas rígidas de metal, chamadas “abanadeiras”. A abanadeira da direita tem sua extremidade fixa à extremidade da esquerda sobe e desce com o deslocamento da biela, percorrendo um arco de círculo e empurrando a ponta inferior da biela para frente e depois retornando com ela. A abanadeira da esquerda tem um movimento mais complexo: a ponta direita dela sobe e desce e

Já no britador de I eixo (Figura 48), os elementos mecânicos ativos são novamente as duas mandíbulas. A móvel aproxima-se e afasta-se da mandíbula fixa. A partícula introduzida no espaço entre as duas mandíbulas é esmagada durante o movimento de aproximação. Durante o movimento de afastamento, os fragmentos resultantes escoam para baixo até ficarem contidos pelas mandíbulas e serem esmagados no próximo movimento de aproximação.

A mandíbula móvel movimentada-se, neste modelo, em torno de um ciclo excêntrico. O movimento, neste modelo, em torno de um eixo excêntrico. O movimento é gerado neste eixo excêntrico, que aciona a extremidade superior da mandíbula móvel num movimento circular. Esta mandíbula está ligada a uma única abanadeira, que tem sua extremidade à direita fixa. A extremidade à esquerda da abanadeira sobe e desce com o movimento da mandíbula, percorrendo um arco de círculo e empurrando a ponta inferior da mandíbula para frente e para baixo e depois retornando com ela para trás e para cima. A mandíbula móvel tem então um movimento mais complexo que no modelo anterior: toda ela sobe e desce e vai para frente e retorna num movimento circular (e não mais reto como o anterior).

Também tem o tirante para manter todo o sistema solidário. A regulagem da abertura é feita pelo calço, tem-se uma regulagem atrás do calço, para permitir uma regulagem fina e mais rápida, além dos dois volantes que exercem as mesmas funções que no britador de dois eixos.

À vista do exposto, verifica-se que a mandíbula móvel do britador de um eixo (chamado de *Dodge*) executa um movimento circular, com componentes de velocidade na direção do fechamento e abertura das mandíbulas e componentes de velocidade ao longo do plano das mandíbulas. Isto favorece o aparecimento de forças de atrito entre mandíbulas e partículas.

Desta forma, o desgaste das mandíbulas no britador de um eixo é maior que no de dois eixos (chamado de *Blake*), em que o movimento da mandíbula móvel só tem a componente abrir e fechar. Esta característica é que define a utilização do britador *Blake*: ele tem uso obrigatório cada vez que se trabalhe com algum minério abrasivo. Por essa razão, decidiu-se classificar e defender a utilização do britador de mandíbula de dois eixos.

Observa-se na Tabela 10, as principais diferenças entre o britador de mandíbulas de I e II eixos.

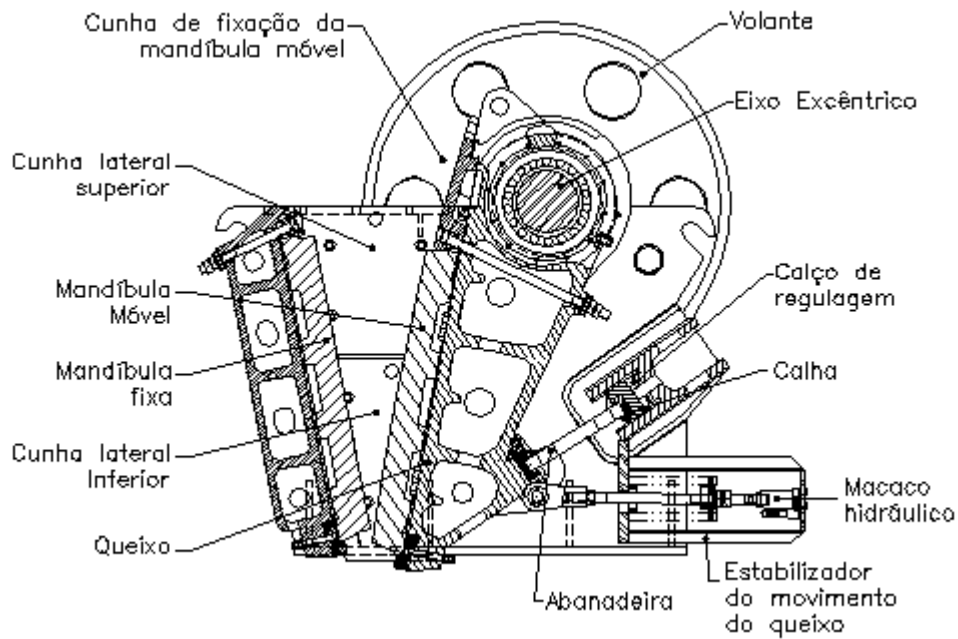
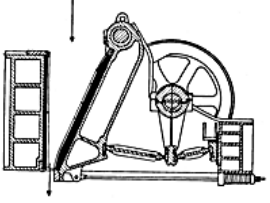
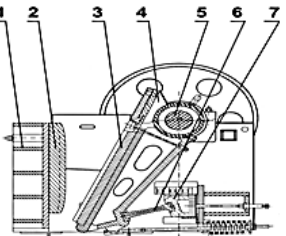


Figura 48 - Vista em corte de um britador de mandíbulas de um eixo.

Fonte: <http://reducaosolidos.tripod.com/mandibulas.htm/>

Tabela 10 - Diferenças entre o britador de mandíbula de I e II eixos.

		Tamanho (mm)	Potência (KW)	Velocidade (rpm)	Relação de Redução	Características e Aplicações
Britador de Mandíbulas	Blake (2 eixos)	 125 (gape) x 150 (largura) a 1600 x 2100	2,25 a 225	300 a 100	Média 7:1 Limites 4:1 a 9:1	Britador de mandíbula padrão para britagens primárias e secundárias de rochas duras e muito abrasivas. Produto relativamente grosseiro, com poucos finos. O volante acumula energia.
	1 eixo (Extríco Superior)	 125 x 150 a 1600 x 2100	2,25 a 400	300 a 120	Média 7:1 Limites 4:1 a 9:1	Restrito a tamanhos pequenos devido limitações estruturais, eficiência energética ligeiramente mais baixa que o Blake, inadequado para rocha muito dura e abrasiva.

Fonte: Livro Teoria e Prática do Tratamento de Minérios, Vol. 3, 2º edição.

Será tratado o britador de mandíbulas de dois eixos pertencendo à classificação de britagem secundária, isso se torna necessário para análise do desempenho dele comparado com o de rolos posteriormente.

Características construtivas:

- construção super reforçada, resistente as mais altas solicitações de abrasão e impacto;
- baixo custo de manutenção, facilidade de substituição e longa vida útil das peças de desgaste;
- britagem se dá basicamente por compressão, o material britado desce por gravidade, sem ser forçado pelas mandíbulas, dessa forma o atrito sobre as mandíbulas é minimizado, aumentando a vida útil.

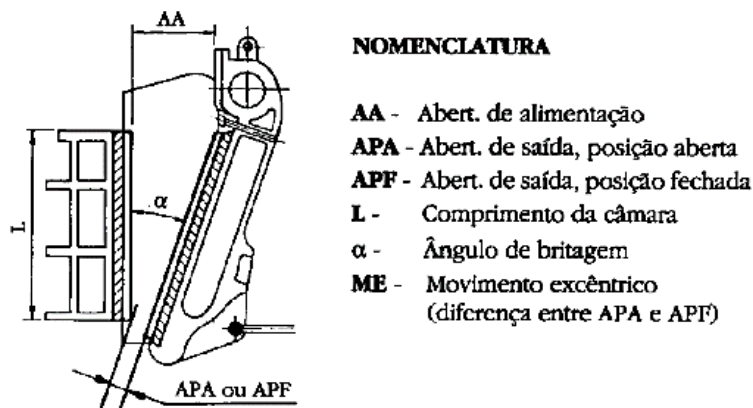


Figura 49 - Ilustração de uma câmara de britagem.

Fonte: manual-de-britagem-faco-capitulo 2

Como é observado na Figura 49, APA é usado para britadores de mandíbulas e giratórios. Se obtido em pesquisa os dados do APF, deve-se acrescentar sempre o movimento excêntrico (ME) para obter APA.

APF é utilizado para rebitadores de cone.

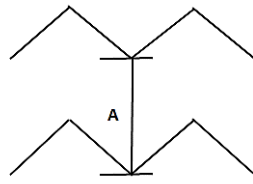


Figura 50 - Abertura na posição aberta de britadores de mandíbula.

Fonte: Manual de Britagem da Faço, 3. ed. p. 2-02

A abertura da boca de saída na posição aberta “A” (Figura 50) é a distância entre a ponta de uma mandíbula e o fundo da cavidade da outra.

Outro ponto importante é o tamanho dos equipamentos de britagem, são referidos a uma ou duas dimensões características. Para os britadores de mandíbulas usam-se duas dimensões da abertura de entrada: o *gap* e a largura da mandíbula móvel. Exemplo: 10060 – representa um britador de mandíbula de 60 *cm* de *gap* 100 *cm* de largura da mandíbula.

De acordo com o Manual de Britagem (FAÇO, 1982), tem-se algumas especificações técnicas do britador de mandíbulas de II eixos (Tabela 11) para auxílio do cálculo de capacidade real:

Tabela 11 - Especificações técnicas do britador de II eixos.

Máquina	Peso	Peso Export	Volume Saída	GD ²	Motor		Correia em V		Polia diâmetro externo (mm)		Tamanho máx de caçamba
	kg	kg	m ³	Kg x m ²	Hp	Polia	Quant	Canal	60Hz	50Hz	J ³
4535B	7500	8000	4,3	330	25-30	VI	5	C	260	300	-
9060B	32000	33000	22	11000	75-100	VI	7	D	400	470	1 1/4
12090B	72000	73500	40	53000	150-200	VI	10	D	415	490	1 3/4
48" x 60" A-1	127000	130000	70	95000	200-250	VI	10	E	520	615	3
60" x 84" A-1	200000	205000	95	320000	400-500	VIII	13	E	600	710	5

Fonte: Manual de Britagem da Faço, 3. ed. p. 2-15

Tabela 12 - Capacidades de produção do britador de II eixos.

Máquina	RPM	Excent. (mm)	Movimento Queixo	Abertura de Saída - Posição Fechada													
				1"	2"	3"	4"	4 1/2"	5"	6"	7"	8"	9"	10"	12"	14"	
4535B	300	13	1"	10-13	15-20	20-25	25-32										
9060B	250	19	1"			40-50	50-65	55-70	60-75	70-90	80-100						
12090B	180	27,5	1 1/2"				90-110	95-120	100-125	110-140	125-160	140-180	160-200	180-220			
48" x 60" A-1	180	44,5	1 1/2"				170-250	180-280	190-310	210-310	230-310	240-360	260-390	300-400			
60" x 84" A-1	120	38	1 1/2"									400-500	450-560	50-620	580-720	650-800	

Fonte: Manual de Britagem da Faço, 3. ed. p. 2-15

Foi baseado também na Tabela 14 que auxilia no tamanho máximo de abertura de entrada (AA) e capacidade do britador, vale destacar que se adota como premissa uma produção de 200 t/h. Cálculos realizados no próximo tópico confirmaram a utilização do modelo 12090B (ver Tabela 12).

Tabela 13 - Classificação da alimentação de entrada do britador.

Modelo	Alimentador tamanho da entrada (mm)	Tamanho máximo de entrada (mm)	Capacidade (t/h)	Energia Elétrica (kw)	Tamanho total LxWxH(mm)
PE 150 x 250	150 x 250	125	1 - 5	5.5	875x758x850
PE 250 x 400	250 x 400	210	5 - 20	15	1450x1315x1296
PE 400 x 600	400 x 600	340	25 - 65	30	1565x1732x1586
PE 500 x 750	500 x 750	425	45 - 80	55	1892x2054x1853
PE 600 x 900	600 x 900	500	70 - 150	55 - 75	2520x1840x2303
PE 750 x 1060	750 x 1060	630	130 - 260	110	2620x2302x3110
PE 900 x 1200	900 x 1200	750	220 - 500	110 - 132	3789x2826x3025
PE 1000 x 1200	1000 x 1200	850	250 - 700	132	3889x2826x3025
PE 1200 x 1500	1200 x 1500	1020	400 - 1000	160 - 220	4200x3750x3820

Fonte: <https://www.bedandbreakfastdecovik.nl/britador/britador-de-mandibula.html>

Para a realização dos cálculos, foi utilizada a Tabela 13. Com as informações contidas nesta tabela, dá-se a possibilidade de comparação e escolha a partir da identificação da capacidade em t/h, possibilitando assim, a analogia de acordo com as premissas de projeto.

A Tabela 14 indica a granulometria em % aproximada de acordo com o material processado, possibilitando o cálculo para abertura de saída do britador com posição fechada.

Tamanho da pedra (mm)	Abertura de saída na posição fechada APF (mm)									
	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
550										100
500									100	98
450								100	98	95
400						100	100	97	93	89
350						99	96	92	87	82
300					100	94	89	83	77	72
275				100	96	90	84	78	71	65
250				98	92	85	78	71	64	58
225			100	94	87	79	71	63	57	52
200		100	97	89	80	70	62	55	50	46
175		99	91	81	70	60	53	47	43	40
150	100	94	83	75	58	50	44	40	36	33
125	98	85	67	56	47	40	36	31	29	26
100	89	70	53	43	35	30	27	23	21	19
75	70	49	38	30	25	21	19	17	15	13
63	57	40	31	25	20	17	15	13	12	11
50	43	30	23	19	15	13	12	10	9	8
40	33	23	18	14	12	10	9	8	7	6
28	21	15	12	9	8	7	6	5	4,5	4
20	14	10	8	6	5	4,5	4	3,5	3	2,5
13	9	7	5	4	3,5	3	3	2,5	2	1,5
10	6	4,5	3,5	3	2,5	2,5	2	2	1,5	1

Tabela 14 - Classificações para abertura de saída na posição fechada do britador de mandíbula.

Fonte: file:///C:/Users/30027527/Downloads/Britador%20de%20Mandibulas%20-%20Especifica%C3%A7%C3%B5es%20T%C3%A9cnicas.pdf

Para realizar o cálculo do fator do tamanho de alimentação é necessário consultar a curva granulométrica (Figura 51) - determinação das dimensões das partículas do agregado e de suas respectivas porcentagens de ocorrência, do britador de II eixos, lembrando que foi determinado como premissa o circuito aberto.

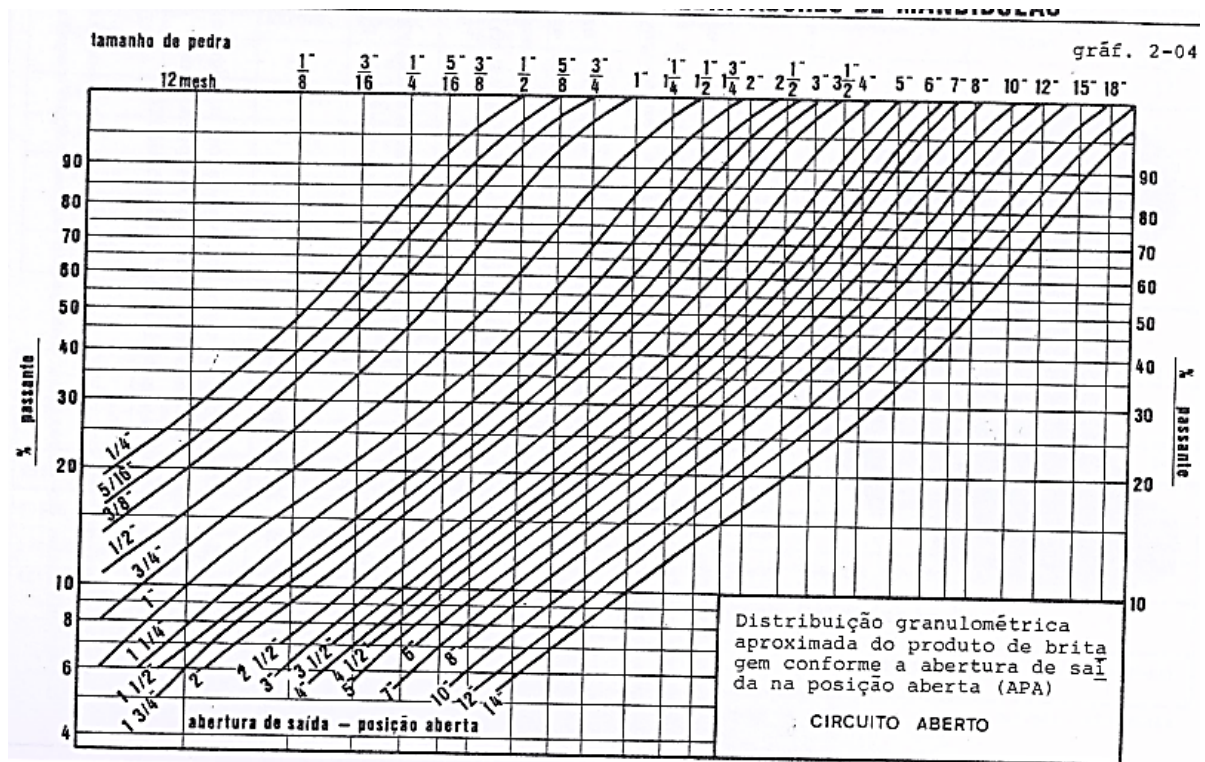


Figura 51 - Gráfico das curvas granulométricas para britadores de mandíbulas com circuito aberto.

Fonte: Manual de Britagem da Faço, 3. ed. p. 2-19

Os cálculos de duração das peças de desgaste são de suma importância, pois está relacionado com o custo operacional como guia, foi usado os seguintes números de aproveitamento percentual das peças para o britador de mandíbulas de II eixos conforme a Tabela 15.

Tabela 15 - Relação percentual do desgaste da mandíbula fixa e móvel.

Peça de desgaste	Característica da Alimentação	Abertura de Saída	Aproveitamento(%)
Mandíbula fixa e móvel	Operação com material de distribuição granulométria uniforme, com tamanho máximo de 70-80% de abertura de entrada no britador	grande ou média	40 - 50
		pequena	30 - 40
	Operação com material com granulométria concentrada ou com tamanho máximo inferior a 50% da boca de alimentação	grande ou média	20 - 30
		pequena	15 - 25

Fonte: Manual de Britagem da Faço, 3. ed. p. 2-19

O índice de abrasão revela a propriedades dos materiais e as possíveis influências que elas estão sujeitas a sofrer como remoção de material de um corpo, devido ao contato com um corpo mais duro. Dessa forma, a Tabela 16 a seguir possibilitará informar posteriormente o desgaste que as mandíbulas e dos rolos serão submetidos.

Tabela 16 - Relação do desgaste em peças em função do índice de abrasão.

DESGASTE DE PEÇAS EM FUNÇÃO DO ÍNDICE DE ABRASÃO (g/kwh)														
Índice de abrasão (Ai)	Brit. 1 eixo		Brit. 2 eixos		Brit.gir.HYDR		Rebr.Côn	Brit. Rolos	Moinho de Barras		Moinho de Bolas			
	Mand. Fixa	Mand. Móvel	Mand. Fixa	Mand. Móvel	Manto Rev.	Manto Rev.	Manto Rev.	Rolos	Via úmida		Via úmida		Via seca	
									Barras	Revest.	Bolas	Revest.	Bolas	Revest.
0,02	6,5	3,5	2	1,5	1,1	0,8	0,9	3,7	53	3	27	3	3	0,3
0,025	6,5	4	2	1,5	1,1	0,8	0,9	4,2	53	4	34	3	3,5	0,3
0,03	7	4	2	1,5	1,1	0,8	0,9	4,8	62	5	39	3	4	0,4
0,04	7	4	2	1,5	1,2	0,9	1	6	71	6	46	3,5	4,5	0,4
0,05	7,5	4,5	2,5	2	1,2	0,9	1	7	77	6,5	51	4	5	0,5
0,06	8	4,5	2,5	2	1,3	0,95	1,1	8	81	7	55	4,5	5,5	0,5
0,08	8,5	5	3	2,5	1,4	1	1,2	9	88	7,5	63	5	6	0,6
0,1	9	5,5	3	2,5	1,5	1,1	1,4	11	93	8	69	5,5	7	0,7
0,12	10	6	3,5	3	1,7	1,2	1,5	12	98	8	74	6	7,5	0,7
0,14	11	7	4	3	1,8	1,3	1,6	13	101	8,5	78	6,5	8	0,8
0,16	12,5	7	4	3	2	1,4	1,7	14	105	9	82	6,5	9	0,9
0,18	14	8	5	4	2,1	1,5	1,8	16	107	9	85	7	9,5	0,9
0,2	15	9	5	4	2,4	1,7	2	17	110	9,5	89	7	10	1
0,22	16	10	6	5	2,5	1,8	2,2	18	112	10	92	7	10,5	1
0,25	19	11	6	5	2,8	2	2,5	20	116	10	96	7,5	11	1,1
0,3	24	14	8	6	3,5	2,5	3	22	120	11	103	8	12	1,2
0,35	30	18	10	8	4,5	3	3,5	24	124	11,5	108	8,5	13	1,3
0,4	39	22	13	10	5	3,5	4,5	27	128	12	113	9	14	1,4
0,45	49	28	16	13	6,5	4,5	5,5	29	131	12,5	118	9	15	1,5
0,5	62	36	21	17	8,5	6	7	31	134	12,5	122	9,5	16	1,6
0,55	79	46	26	21	10,5	7	9	32	137	13	126	9,5	16,5	1,6
0,6	100	58	33	26	13	9	11	35	139	13,5	130	10	17	1,7
0,7	160	93	53	42	18	13	16	38	144	14	137	10,5	18	1,8
0,8	257	149	86	68	28	20	24	42	148	14,5	143	11	20	2

Fonte: Fonte: Manual de Britagem da Faço, 3. ed. p. 8.24

Para tornar possível o cálculo do desgaste de cada mandíbula necessita-se do peso de cada uma conforme o modelo de máquina escolhido. A seguir, na Tabela 17, têm-se os pesos das peças que se referem às peças *standard*, existindo alternativas mais pesadas.

Tabela 17 - Pesos aproximados de peças de desgaste.

Máquina	Mand. Fixa	Mand. Móvel
45358	170 kg	150 kg
9060B	900 kg	920 kg
12090B	2300 kg	2150 kg
150120 (48x60)	3900 kg	5000 kg

Fonte: Manual de Britagem da Faço, 3. ed. p. 8-22

O cálculo da vida útil para o britador de mandíbulas deve ser realizado de forma separada, ou seja, terá uma estimativa em horas da vida útil para mandíbula móvel e fixa.

Além da vida útil, irá ser calculada também a produção por mandíbula que se dá através da fórmula:

$$Prod = V \times Q_P \times \gamma_A$$

Onde:

Prod – Produção por mandíbula (*t*)

V – Vida útil da mandíbula (*h*)

Q_P – Capacidade de produção da instalação (*m³/h*)

γ_A – Densidade aparente (*t/m³*)

Todos os cálculos para estudo de caso desse trabalho são de caráter estatístico. Assim, os resultados são de orientação para o dimensionamento de estoque e avaliação de custos operacionais.

4.1.3 Caracterização dos britadores de rolos

Os britadores de rolos, graças às suas características, são máquinas especialmente destinadas à produção de tamanho médio a finos, são aplicados normalmente em materiais de baixa e média dureza. Britam sem problemas mesmo os materiais mais difíceis, como por exemplo, materiais contendo finos e úmidos.

Características construtivas:

- a) os mancais dos rolamentos são totalmente protegidos contra pó e umidade por meio de um sistema de labirinto;
- b) possibilidade imediata de grande aumento na produção pela variação da rotação;
- c) a transmissão pelo sistema de correntes é silenciosa e promove a absorção de eventuais choques;
- d) sistemas de molas de alívio em caso de entrada de corpos estranhos ou sobrecargas;
- e) a transmissão entre os rolos e a inversão de rotação é feita por pneus, o que permite a variação da distância entre os centros, sem a necessidade do uso de engrenagem de dentes corrigidos.

Os revestimentos dos rolos podem ser lisos, ondulados ou dentados, o que depende das características do material podendo ter saliências denteadas ou sulcos côncavos e é feito de um material especial fundido. Os britadores de rolos podem ser: de um rolo, dois rolos, de rolo liso ou de quatro rolos. A máquina pode ser operada tanto hidraulicamente quanto por um mecanismo motorizado.

O britador de um rolo (Figura 52) aplica-se geralmente como britador primário e é usado em estações baseadas na queima de carvão, indústria química, jazidas, pedreira, indústrias de ferro e aço.

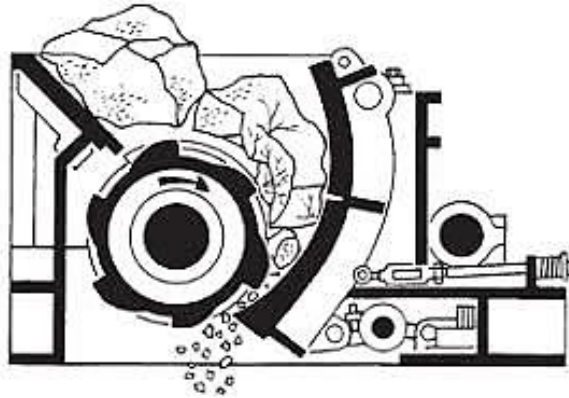


Figura 52 - Desenho representativo do britador de um rolo.

Fonte: <http://www.dequi.eel.usp.br/~tagliaferro/britadores>

O britador de dois rolos dentados (Figura 54) é utilizado como britador primário e secundário em processos que exigem a geração de grãos de tamanho mais definidos. São alimentados por materiais brutos como, por exemplo, coque, minério, sedimento, calcário e etc.

Os rolos de trituração são rotacionados individualmente em sentidos opostos por meio de motores elétricos e correia, o diâmetro e a velocidade dos rolos e a forma dos dentes (Figura 53) são escolhidos de acordo com o material de alimentação e o tamanho final desejado.

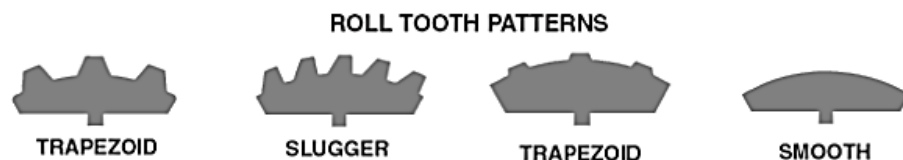


Figura 53 - Tipos de formatos para os dentes dos rolos.

Fonte: <http://www.dequi.eel.usp.br/~tagliaferro/britadores>

O espaço entre os rolos pode ser ajustado mecânica, hidráulica ou eletromecanicamente. São de alta capacidade, necessitam de poucos reparos, longa durabilidade, fácil reposição dos componentes da máquina, grande diversidade de aplicações, geração mínima de pedaços minúsculos e trituração branda.

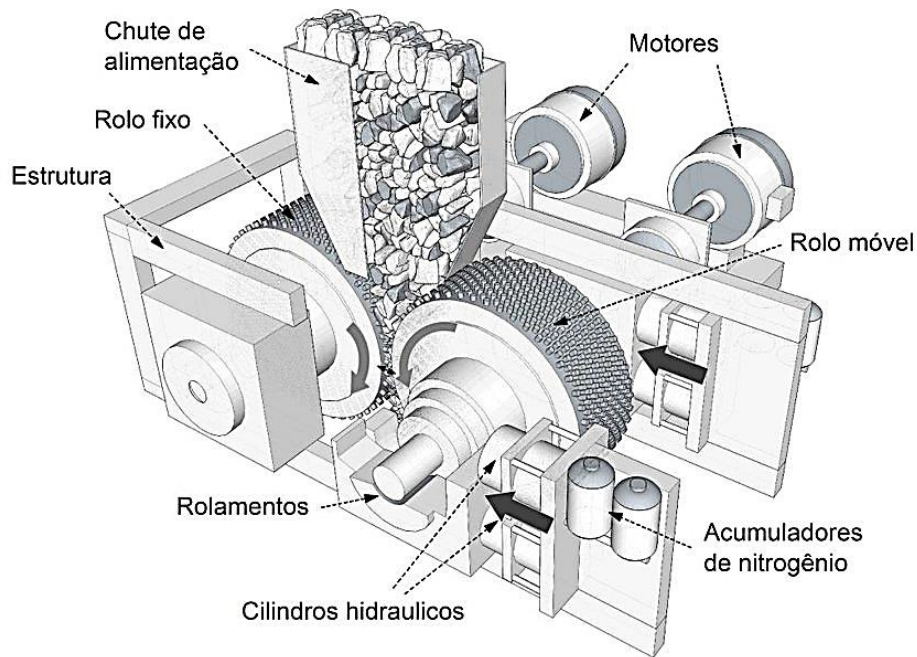


Figura 54 - Esquema representativo do britador de dois rolos dentados.

Fonte: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Esquema-da-prensa-de-rolos-BARRIOS-2015_fig1_326688980

Já o britador com dois rolos lisos possui aplicação em processos de coqueificação de plantas, indústrias químicas, indústrias de reciclagem e indústrias de cerâmica. Modo de operação, características e vantagens iguais ao do britador de dois rolos.

Britador de quatro rolos é utilizado como britador primário ou secundário em processos que exigem pedaços muito pequenos e um baixo conteúdo de poeira. O material passa por duas etapas de trituração em que todos os rolos compartilham de um sistema integrado para evitar sobrecargas, os ajustes da velocidade e do diâmetro dos rolos garantem um desgaste mínimo.

Tabela 18 - Relação comparativa dos modelos de britadores de rolos.

Tipo de Britador						
	Mandíbulas	Giratório	de 1 Rolo	de 2 Rolos	de Rolos lisos	de 4 Rolos
Capacidade	> 400 t/h	> 300 t/h	> 1200 t/h	> 2000 t/h	> 250 t/h	> 200 t/h
Razão de redução	> 1: 7	> 1: 8	> 1:6	> 1: 6	> 1: 5	> 1:4
Tamanho do material	>1250 mm	> 350 mm	> 800 mm	> 1500 mm	> 80 mm	> 20 mm
Tamanho final dos pedaços	< 20 mm	< 52 mm	15 - 150 mm	15 - 300 mm	< 1 mm	< 1 mm

Fonte: <http://www.dequi.eel.usp.br/~tagliaferro/britadores>

Conforme características e especificações, levando-se em conta os pré-requisitos de projeto desse trabalho que são: britagem secundária de minério de ferro, em um circuito aberto, com capacidade mínima de 200 t/h, foi usado o britador de dois rolos dentados (ver Tabela 18).

De acordo com o Manual de Britagem (FAÇO, 1982) e da nossa aplicação, foi utilizado o Modelo Série 100.

Características construtivas:

- a) cada rolo é acionado independentemente por um conjunto de acionamento constituído de um motor, correias e um redutor montado sobre o próprio eixo do rolo, garantindo um funcionamento livre e silencioso;
- b) um dos rolos é deslizante sobre guias e apoiado sobre um sistema de alívio de molas, para proporcionar regulagem de abertura e proteger a máquina de objetos não britáveis;

- c) equipados com protetor de pó fechado, com acessos facilitados para a troca dos revestimentos e com flange superior e inferior para a conexão das bicas de alimentação e descarga;
- d) revestimentos dos rolos fabricados em segmentos de 60°, travados com chavetas e parafusos no rotor garantem trocas simples e rápidas;
- e) nos rolos dentados, quando houver perigo de adentrar na máquina corpos não britáveis de grandes circunferências, um dos rolos poderá ser equipado opcionalmente com chave zero.

Seguem, na Tabela 19 as especificações técnicas do britador de rolos. De acordo com os dados é possível a determinação do modelo de britador que melhor se enquadra nas premissas adotadas inicialmente.

Tabela 19 - Relação dos modelos e especificações dos britadores de rolos.

Máquina		10075		100100		100120	
		Liso	Dentado	Liso	Dentado	Liso	Dentado
Motor	HP	2 x 30	2 x 40	2 x 40	2 x 50	2 x 50	2 x 60
	Polos	IV	IV	IV	IV	IV	IV
Peso s/ motor	ton	11	11	14	14	16	16
Volume Export.	m ³	14,5	14,5	21,3	21,3	22,5	22,5
Larg dos Rolos	mm	750	750	1000	1000	1200	1200

Fonte: Manual de Britagem da Faço, 3ª Ed., Pág. 2-63

Onde:

Velocidade periférica dos rolos: 2 – 6 *m/s*

Abertura entre rolos: 0 – 20 *mm*

Diâmetro nominal das placas dos rolos: 100 *mm*

Os rolos dentados têm tamanho máximo de alimentação de 100 a 300 *mm* e deve-se aplicar valores máximos para menores velocidades periféricas. A capacidade dos britadores é representada na Figura 55.

Para realização dos cálculos da capacidade real e de instalação necessita-se da curva granulométrica dos britadores de rolos, considerando circuito aberto conforme Figura 56.

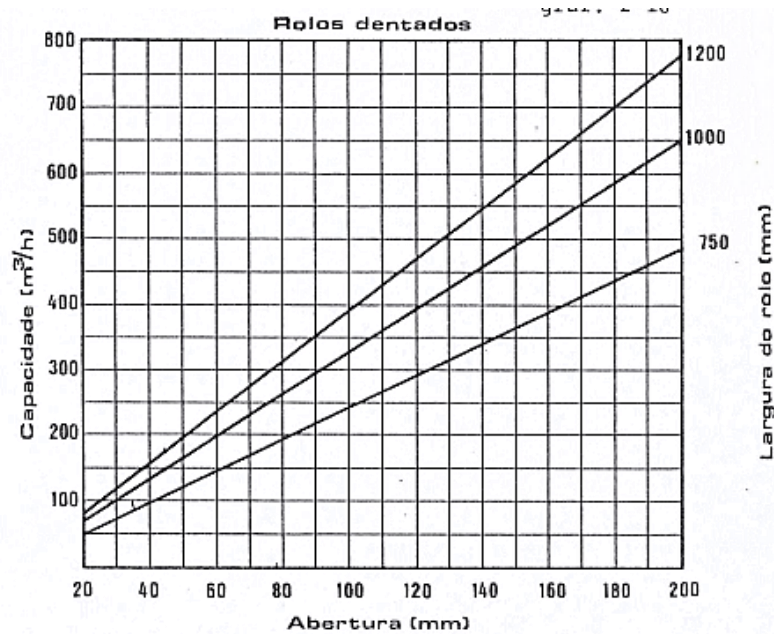


Figura 55 - Gráfico da capacidade do britador de rolos dentados.

Fonte: Manual de Britagem da Faço, 3 ed. p. 2-64

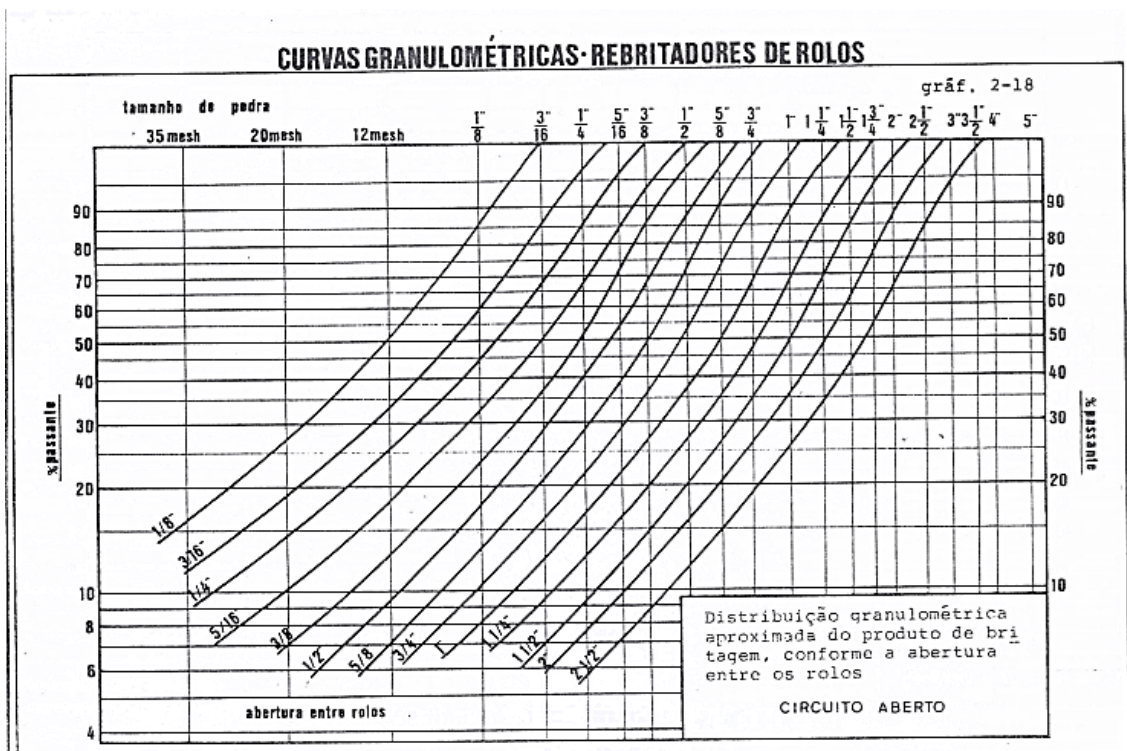


Figura 56 - Gráfico da curva granulométrica dos britadores de rolos.

Fonte: Manual de Britagem da Faço, 3 ed. p. 2-65.

Dessa forma, foi seguido o mesmo passo a passo para o desenvolvimento dos cálculos como determinado no britador de mandíbula. Primeiramente especificou-se a capacidade real, depois a capacidade de instalação, a quantidade de energia aplicada no processo e por fim o grau de aproveitamento (desgaste) nos rolos.

Para estimativa do desgaste utilizamos a Tabela 20 como parâmetro de projeto.

Tabela 20 - Relação de desgaste e revestimento dos rolos.

Peça de Desgaste	Característica da Alimentação	Abertura de Saída	Aproveitamento (%)
Revestimento do Rolo	Alimentação Abundante	média ou grande	45 - 60
		pequena	30 - 40
	Alimentação Insuficiente	média ou grande	30 - 40
		pequena	15 - 25

Fonte: Manual de Britagem da Faço, 3. ed. p. 8-21

Portanto, com o agrupamento dessas informações ditas até o presente momento através de tabelas, gráficos e manuais que foram selecionados de acordo com as premissas de projeto, é possível determinar a solução alternativa e especificar os componentes de projeto.

4.2 Construção dos Modelos Físicos

Para a análise comparativa entre os britadores de rolos e mandíbulas, foi necessária uma construção de modelo físico semelhante para ambos os britadores, para que o cálculo fosse realizado com as variáveis iguais, ou seja, foram adotadas as mesmas premissas de projeto, são elas:

- a) britagem secundária;
- b) capacidade – 200 t/h;
- c) tamanho da abertura – 900 mm;
- d) tamanho máximo da alimentação – 300 mm;
- e) tamanho da abertura na saída do britador – 140 mm;
- f) tamanho do produto – 102 a 19 mm;

- g) produto – minério de ferro (hematita);
- h) propriedades do minério de ferro/hematita;
- i) alimentação com pré-silo;
- j) instalação pequena;
- k) horas de trabalho – 16h a 24h.

4.3 Solução Alternativa e Especificação dos Componentes

4.3.1 Britador de mandíbula

Para o projeto, foi escolhido como ponto de partida o britador de mandíbula 12090B, sendo que de acordo com o manual da Faço na Tabela 11 ele apresenta capacidade teórica de $90 \text{ m}^3/\text{h}$ e potência do motor de 150 a 200 *HP*.

A escolha deste modelo foi a partir do catálogo como mostra a Tabela 13, com o qual foram selecionados dois modelos que atendiam a capacidade requisitada no projeto e assim, convertida a potência dos mesmos para *HP* para poder compará-los com os modelos do manual que foi utilizado como base.

Para determinar a APF do britador, utilizou-se a Tabela 14 (comparação tamanho do produto com APF), assim, pode-se observar que a escolha de 4" foi para que o britador operasse com uma folga.

A partir deste passo, que foi a seleção de um modelo para a análise, é necessário calcular a capacidade real do britador, a qual a importância e a fórmula foram mencionadas acima no item 4.1.1, desta forma, temos:

$$Q_R = Q_T \times A \times B \times C \times D$$

Onde:

$$Q_t = 90 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (valor indicado na Tabela 11)}$$

$$A = 1,5, \text{ devido a densidade aparente } \gamma a = 2,4 \text{ t/m}^3 \text{ (valor indicado na Tabela 4)}$$

$B = 1$, devido ao *work index* do minério de ferro (hematita) ser igual a 14 (fator com o valor indicado na Tabela 5)

Para calcular o fator C , deve-se primeiro fazer a relação entre o tamanho máximo do material e a abertura de entrada do britador (AA), assim, obtêm-se:

$$Rel = \frac{300}{900} \rightarrow 0,3333 = 33\%$$

Posteriormente, deve-se calcular a % de alimentação menor que $1/2 \times APA$. Como o valor da APA para este modelo será $5 \frac{1}{2}$ ($4'' + 1 \frac{11}{2}$) faz se necessário a interpolação para obtenção do dado, lembrando que está análise é feita baseada na curva granulométrica como mostra a Figura 51, assim tem-se:

Curva 5'':

$x(\%)$	$y(\prime)$
46	2,5
x	2,75
55	3

$$\frac{46 - x}{46 - 55} = \frac{2,5 - 2,75}{2,5 - 3} \rightarrow x = 50,5\%$$

Curva 6'':

$x(\%)$	$y(\prime)$
41	2,5
x	2,75
48	3

$$\frac{41 - x}{41 - 48} = \frac{2,5 - 2,75}{2,5 - 3} \rightarrow x = 44,5\%$$

Curva 5,5”:

$x(\%)$	$y(\text{"})$
5	50,5
5,5	x
6	44,5

$$\frac{5 - 5,5}{5 - 6} = \frac{50,5x}{50,5 - 44,5} \rightarrow x = 47,5\%$$

Logo, baseando-se na Figura 45 – relação entre tamanho máximo de material e porcentagem da alimentação e adotando o pior caso, $C = 1,6$.

Fator $D = 0,84$, devido a umidade adotada de 10% e a $APF = 4$ “ (valor indicado no Figura 46 – fator de umidade para britadores giratórios e mandíbula).

Com todos os fatores calculados, pode-se obter:

$$Q_R = 90 \times 1,5 \times 1 \times 1,6 \times 0,84$$

$$Q_R = 181,44 \text{ m}^3/\text{h}$$

A capacidade real para o britador 12090B é $181,44 \text{ m}^3/\text{h}$, porém deve-se calcular a capacidade de produção como explicado no item 4.1.1. Assim tem-se:

$$Q_P = Q_R \times K_1 \times K_2 \times K_3$$

Os fatores K_1, K_2, K_3 foram retirados das tabelas 7, 8 e 9. Desta forma:

$$K_1 = 0,8$$

$$K_2 = 0,95$$

$$K_3 = 0,75$$

Lembra-se que a adoção desses valores foi explicada no item 4.1.1.

Portanto:

$$Q_p = 181,44 \times 0,8 \times 0,95 \times 0,75$$

$$Q_p = 103,42 \text{ m}^3/\text{h} \text{ ou } Q_p = 248 \text{ t/h}$$

Observa-se que o britador 12090B atendeu as premissas, principalmente sendo superior a capacidade de 200 t/h , desta forma, ele foi utilizado para a análise comparativa.

Para realizar a análise comparativa, além de contar com os valores fornecidos no manual, foi determinada a energia aplicada por tonelada de produto, a potência utilizada para atender as premissas, o gasto total de energia para o processo, a vida útil das mandíbulas fixa e móvel, a produção pelas mandíbulas fixa e móvel e o custo do equipamento.

Para determinar a energia aplicada por tonelada de produto, utilizou-se a fórmula:

$$E = \frac{\text{Pot do motor (HP)} \times 0,5}{1,36 \times Q_p}$$

Adotou-se a menor potência para maior segurança, assim $Pot = 150 \text{ HP}$.

$$E = \frac{150 \times 0,5}{1,36 \times 248}$$

$$E = 0,22 \text{ kwh/t}$$

Desta forma, a potência necessária para a produção de 200 t/h, é dada por:

$$N = E \times 200$$

$$N = 0,22 \times 200$$

$$N = 44 \text{ kW} \text{ ou } N = 59 \text{ HP}$$

O gasto total de energia para o processo foi de:

$$E_T = Q_p \times \gamma_a \times E$$

$$E_T = 103,42 \times 2,4 \times 0,22$$

$$E_T = 54,6 \text{ kWh}$$

Para o cálculo do desgaste da mandíbula, adotando $A_i = 0,35$ como mencionado no item 4.1.3, analisa-se a Tabela 16 e obtêm-se os valores para mandíbula fixa = 10 g/kWh e mandíbula móvel = 8 g/kWh .

O grau de aproveitamento da mandíbula é analisado na Tabela 15, a qual como visto acima, este problema possui uma relação entre o tamanho máximo do material e a abertura de entrada do britador inferior a 50% (33%), e considerando a abertura de saída média, obtêm-se o valor de 25% de grau de aproveitamento.

O peso das mandíbulas é obtido através da Tabela 17, verificando que são de 2300 kg e 2150 kg para mandíbulas fixa e móvel respectivamente.

Desta forma, pode-se calcular a vida útil da mandíbula através da fórmula:

$$V = c \times p \times \frac{10}{E_T \times g} (\text{horas})$$

Para a mandíbula fixa:

$$V = 2300 \times 25 \times \frac{10}{54,6 \times 10}$$

$$V = 1.053 \text{ horas}$$

Para a mandíbula móvel:

$$V = 2.150 \times 25 \times \frac{10}{54,6 \times 8}$$

$$V = 1.230 \text{ horas}$$

Para determinar a produção por mandíbula, utiliza a fórmula:

$$Prod. = V \times Q_P \times \gamma_A$$

Assim, tem-se para mandíbula fixa:

$$Prod. = 1.053 \times 103,42 \times 2,4$$

$$Prod. = 261.363 \text{ toneladas}$$

E para mandíbula móvel:

$$Prod. = 1.230 \times 103,42 \times 2,4$$

$$Prod. = 305.295,8 \text{ toneladas}$$

O custo do britador foi estipulado a partir do peso deste e aplicado um fator de correção, desta forma, o britador de mandíbula custará aproximadamente R\$ 4.800.000,00.

4.3.2 Britador de rolos

Para poder realizar a comparação entre os modelos de mandíbula e rolos, foi escolhido o britador de rolos dentados 10075, pois é o que mais se aproxima e atende as premissas de projetos, assim, de acordo com o manual da Faço, a Tabela 19 identifica as especificações técnicas do modelo adotado.

A Figura 55 permite a identificação da capacidade teórica a partir da abertura de 140 mm ($5 \frac{1}{2}''$), a qual foi utilizada no modelo 12090B ($APA = 5 \frac{1}{2}''$), e a curva da largura de 750 mm , desta forma, obtêm-se capacidade teórica de $350 \text{ m}^3/\text{h}$ e potência do motor de 40 HP .

A escolha pelo modelo de rolo dentado foi considerada o tamanho máximo de alimentação, sendo que para este pode ser de até 300 mm (valor utilizado igual para britador de mandíbula).

Após a seleção, deve-se calcular a capacidade real para o modelo, desta forma, tem-se:

$$Q_R = Q_T \times A \times B \times C \times D$$

Onde:

$$Q_t = 350 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (valor indicado Figura 55)}$$

$$A = 1,5, \text{ devido a densidade aparente } \gamma_a = 2,4 \text{ t/m}^3 \text{ (valor indicado na Tabela 4)}$$

$B = 1$, fator devido ao *work index* do minério de ferro (hematita) ser igual a 14 (valor indicado na Tabela 5)

Para calcular o fator C , deve-se primeiro fazer a relação entre o tamanho máximo do material e a abertura de entrada do britador (AA), assim, obtêm-se:

$$Rel = \frac{300}{900} \rightarrow 0,3333 = 33\%$$

Posteriormente, deve-se calcular a % de alimentação menor que $A \times \frac{1}{2}$. Como o valor da A para este modelo será $5 \frac{1}{2}''$, consulta-se a Figura 56 e deve-se fazer a interpolação entre os valores de 76 mm e 63 mm , visto que $\frac{1}{2} A = 70 \text{ mm}$. Assim:

$x(mm)$	$y(\%)$
63	55,68
70	x
76	65,53

$$\frac{63 - 70}{63 - 76} = \frac{55,68 - x}{55,68 - 65,53} \rightarrow x = 61\%$$

Logo, baseando-se na Figura 45 – Relação entre tamanho máximo de material e porcentagem da alimentação e adotando o pior caso, $C = 1,6$.

Fator $D = 0,90$, devido a umidade adotada de 10% e a $A = 5 \frac{1''}{2}$. (valor indicado no Figura 46 – fator de umidade para britadores giratórios e mandíbula).

Com todos os fatores calculados, pode-se obter:

$$Q_R = 350 \times 1,5 \times 1 \times 1,6 \times 0,9$$

$$Q_R = 753 \text{ m}^3/\text{h}$$

A capacidade real para o britador 12090B é $753 \text{ m}^3/\text{h}$, porém deve-se calcular a capacidade de produção como explicado no item 4.1.1. Assim tem-se:

$$Q_P = Q_R \times K_1 \times K_2 \times K_3$$

Os fatores K_1, K_2, K_3 foram retirados da Tabela 7, 8 e 9. Desta forma:

$$K_1 = 0,8$$

$$K_2 = 0,95$$

$$K_3 = 0,75$$

Lembra-se que a adoção desses valores foi explicada no item 4.1.1.

Portanto:

$$Q_p = 753 \times 0,8 \times 0,95 \times 0,75$$

$$Q_p = 430,92 \text{ m}^3/h \text{ ou } Q_p = 1034,2 \text{ t/h}$$

Observa-se que o britador 10075 atendeu as premissas, principalmente sendo superior a capacidade de 200 t/h.

Para realizar a análise comparativa, além de contar com os valores fornecidos no manual, foi determinada a energia aplicada por tonelada de produto, gasto total de energia para o processo, a vida útil dos rolos, a produção por rolo, a potência útil, o rendimento e o custo do equipamento.

Para determinar a energia aplicada por tonelada de produto, foi utilizada a fórmula:

$$E = \frac{\text{Pot do motor (HP)} \times 0,5}{1,36 \times Q_p}$$

Adotou-se a potência determinada nas especificações técnica Tabela 19, assim $Pot = 40 \text{ HP}$.

$$E = \frac{40 \times 0,5}{1,36 \times 1034,2}$$

$$E = 0,014 \text{ kWh/t}$$

Desta forma, a potência necessária para a produção de 200 t/h, é dada por:

$$N = E \times 200$$

$$N = 0,014 \times 200$$

$$N = 2,8 \text{ kW} \text{ ou } N = 3,75 \text{ HP}$$

O gasto total de energia para o processo foi de:

$$E_T = Q_p \times \gamma_a \times E$$

$$E_T = 430,92 \times 2,4 \times 0,014$$

$$E_T = 14,5 \text{ kWh}$$

Para o cálculo do desgaste do rolo, adota-se $Ai = 0,35$ como mencionado no item 4.1.3, posteriormente, analisa-se a Tabela 16 e obtêm-se os valores para rolos = 24 g/kWh .

O grau de aproveitamento dos rolos é analisado na Tabela 20, considera-se a alimentação abundante com abertura média, resulta-se um aproveitamento de 45%.

O peso dos rolos é obtido através da equação:

$$C = \frac{((\pi \times 50^2) \times 750 \times 7850)}{(1000)^3}$$

$$C = 46,2 \text{ Kg}$$

Desta forma, pode-se calcular a vida útil do rolo através da fórmula:

$$V = C \times p \times \frac{10}{E_T \times g} (\text{horas})$$

$$V = 46,2 \times 45 \times \frac{10}{14,5 \times 24}$$

$$V = 59 \text{ horas}$$

Para determinar a produção por rolo, utiliza a fórmula:

$$Prod. = V \times Q_P \times \gamma_A$$

$$Prod. = 46,2 \times 430,9 \times 2,4$$

$$Prod. = 61.741,7 \text{ toneladas}$$

Lembrando que o modelo escolhido conta com dois rolos iguais, assim, a vida útil e a produção serão iguais para os dois.

O custo do britador foi estabelecido a partir do peso deste e atribuído um fator de correção, desta forma, o britador de rolos custará aproximadamente R\$ 800.000,00.

4.4 Comparação

4.4.1 Comparação entre os britadores de mandíbula e o de rolos para processo de britagem secundária de minério de ferro

Este item tem por objetivo a comparação entre o britador de mandíbulas 12090B e o britador de rolos 10075 quanto a potência requerida, ao consumo de energia de operação, ao peso do equipamento, ao desgaste das peças de contato direto, à capacidade de processamento e ao custo de cada equipamento para o processo de britagem secundário de minério de ferro. Analisando as premissas de projeto descritas no item 4.2 e através dos cálculos necessários realizados em 4.3, segue abaixo.

4.4.1.1 Quanto à potência requerida e disponível

Baseando-se nas premissas definidas para o processo de britagem secundária, na cominuição do produto requerido com o britador de mandíbulas 12090B a potência requerida

para britagem de 200 t/h de minério é de 44 kW (59 HP), sendo que, conforme visto no manual da Faço na Tabela 11, a potência do motor disponível varia de 150 à 200 HP.

No britador de rolos 10075 selecionado, quando a potência disponível é de 40 HP, a potência requerida para o mesmo processamento de 200 t/h de minério é de 2,8 kW (3,75 HP), uma margem significativamente segura de operação. Seguramente, pode-se dizer que a utilização do britador de rolos é mais ideal pelo fato de utilizar uma potência menor e assim, afeta diretamente também no consumo, que será abordado no próximo item.

4.4.1.2 Quanto ao consumo de energia elétrica

Como pode-se notar no item anterior, a potência utilizada para o processo com o britador de mandíbulas 12090B é em torno de quinze vezes maior comparado ao britador de rolos 10075. Conseqüentemente, o consumo de energia elétrica, que é diretamente proporcional à potência utilizada, é para o britador de mandíbula e de rolos de 54,6 kWh e 14,5 kWh, respectivamente. Verifica-se que a utilização do britador de rolos neste quesito é mais vantajosa.

4.4.1.3 Quanto ao desgaste das peças de contato direto

Para os britadores de mandíbulas, as peças que sofrem maior desgaste e que serão abordadas aqui são as mandíbulas fixa e móvel. Com os cálculos de projeto, foi verificado que as mandíbulas possuem uma vida útil mínima de 1053h de operação e 261.363 t de minérios processados. Já para os britadores de rolos, os rolos que são as peças de contato direto possuem vida útil de 59h e produção máxima 61.741,7 t de minério processado. Analisando este caso, pode-se afirmar que a durabilidade das mandíbulas é bem maior, comparado a durabilidade dos rolos, possibilitando menos interrupções de processo para troca e um menor custo de reposição.

4.4.1.4 Quanto ao peso dos britadores

Nesta comparação, nota-se uma grande diferença em relação ao peso de todo conjunto em cada tipo. O britador de mandíbula selecionado para o processo possui 72 t enquanto o britador de rolos possui apenas 15,4 t.

4.4.1.5 Quanto à capacidade de operação

Diante dos dados levantados em relação à capacidade de produção, o britador de mandíbulas 12090B possui capacidade de processamento de $103,42 \text{ m}^3/\text{h}$ (248 t/h) para as premissas de projeto. Já o britador de rolos 10075, para os mesmos dados de projeto possui capacidade de $430,92 \text{ m}^3/\text{h}$ (1034,2 t/h).

Pode-se notar que o britador de rolos é, aproximadamente, quatro vezes mais eficiente que o de mandíbula quanto à capacidade, e isso se dá ao fato de que a área de cominuição no britador de rolos opera de maneira contínua e constante na fragmentação do minério, sendo mais eficiente neste aspecto.

4.4.1.6 Quanto ao custo de cada britador

Os custos dos equipamentos analisados foram levantados baseando-se no peso e aplicando fatores de correção devido à variedade de alguns componentes em cada equipamento. De forma geral, o britador de mandíbulas 12090B tem um custo estimado de R\$ 4.800.000,00 enquanto o britador de rolos 10075 tem um custo de R\$ 800.000,00.

Uma enorme diferença comparando os mesmos equipamentos ao mesmo processo secundário de britagem com as mesmas premissas de projeto.

Portanto, nota-se que a utilização de um britador de rolos para o processo de britagem secundária é bem mais vantajosa devido à vários quesitos, tanto operacionais como também econômicos, quando comparado à um britador de mandíbulas. O britador de mandíbulas 12090B acaba sendo mais vantajoso quando aplicado ao processo de britagem primária, em que as faixas granulométricas são maiores.

4.5 Opção Tecnológica

Conforme visto na comparação dos britadores, foi definido através da análise dos cálculos realizados que o britador de rolos 10075 é muito mais eficiente para o processo de britagem secundária. Algumas vantagens que ele possui sobre o britador de mandíbulas, conforme observado anteriormente, é que ele é mais barato, consome menos energia durante o processo necessitando de menor potência, é mais leve, possui capacidade de produção elevada e permite também a obtenção de um produto uniforme com pequenas quantidades de finos, além de serem superiores na britagem de produtos úmidos e pegajosos. Como desvantagem, tem um desgaste acelerado dos rolos, necessitando sua substituição em menos de três dias quando operando *24h/dia*, o que gera um grande impacto no tempo de produção, além de um alto custo na troca de rolos.

Em 2012, à METSO lançou no mercado o britador de rolos HRC 8050, que é indicado para produção de finos. Este possui um sistema de regulagem simples, no qual há um aumento da pressão hidráulica do britador determinado pelo aumento da produção. Um dispositivo posicionado na superfície dos rolos controla a produção de finos, reajustando o revestimento quando este apresenta níveis relevantes de desgaste, possibilitando evitar um desgaste mais acentuado e ampliando a vida útil dos rolos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pela observação dos aspectos analisados sobre o estudo comparativo de sistemas de britagem secundária para o minério de ferro, foi realizada uma comparação entre os britadores de mandíbula e de rolos levando em consideração aspectos operacionais e econômicos.

A confrontação referiu-se sobre questões como a quantidade de potência requerida e disponível, o consumo de energia elétrica, o desgaste das peças em contato direto, o peso dos britadores, a capacidade de operação e quanto ao custo dos britadores.

Pode-se notar que a partir das análises realizadas, o britador de rolos é o mais indicado para sistemas de britagem secundária por ter um custo menor, baixo peso, consumir menos energia durante o processo, necessitar de menos potência e possuir uma maior capacidade de produção quando comparado ao britador de mandíbulas.

A partir dos cálculos realizados, pode-se dizer que o britador de mandíbulas é mais apropriado para processos de britagem primária, por possuir faixas granulométricas maiores. A durabilidade das mandíbulas fixa e móvel que são as peças que sofrem um maior desgaste, quando comparadas ao britador de rolos, é bastante superior. Para processos de britagem secundária o britador de rolos é a melhor opção por, entre todas as diferenças vantajosas, o fator custo ser bem melhor.

Portanto, foi alcançado o objetivo uma vez que, a partir de vários critérios, estudos e conceitos já discutidos, o britador de rolos foi selecionado como o mais adequado para o sistema de britagem secundária para o minério de ferro.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

JESUS, Carlos Antônio Gonçalves de. **FERRO/AÇO**. Disponível em:

<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/3-1-2013-minerio-de-ferro-e-aco>. Acesso em: 27 maio 2019.

SANTANA, Dulcinéia de Castro; CHARBEL, Paulo André. **Notas de Aula do Curso Técnico de Mineração: Tratamentos de Minérios II - Parte I – Britagem**. 2009. 68 p.

Trabalho Acadêmico – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Goiás, 2009.

LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Silvia Cristina Alves.

Tratamento de Minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

NERES, Fabrícia. **ATUADORES**. Disponível em:

<http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/17829/material/atuadores.pdf>. Acesso em: 27 maio 2019.

FAÇO. **MANUAL DE BRITAGEM**. 3.ed. São Paulo: Fábrica de Aço Paulista, 1982.

VELOSO, Norwil. **A Era das Máquinas: A Mecanização da Britagem**. Disponível em:

<http://www.revistamt.com.br/Materias/Exibir/a-mecanizacao-da-britagem?Pagina=1>. Acesso em: 28 maio 2019.

II Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais. **BENEFICIAMENTO DE MINERAIS INDUSTRIAIS**. Disponível em:

http://www.pg.utfpr.edu.br/ppgep/anais/artigos/eng_civil/13%20BENEFICIAMENTO%20DE%20MINERA%20INDUSTRIAIS.pdf. Acesso em: 29 maio 2019.

SANTOS, Cleiton. **11ª Semana de Tecnologia Metroferroviária - Fórum Técnico Análise Comparativa entre Acionamento C. C. E C. A. Em Sistemas de Tração**. Disponível em:

<http://www.aeamesp.org.br/biblioteca/stm/11SMTF050923T07.pdf>. Acesso em: 1 jun. 2019.

BLOG PARAÍSO DAS BOMBAS. **Tudo O Que Você Precisa Saber Sobre Motores Para Mineração**. Disponível em: <https://blog.paraisodasbombas.com.br/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-motores-para-mineracao/>.

Acesso em: 1 jun. 2019.

ANDRADE, Thales. **9 Tipos de Engrenagens e Suas Aplicações**. Disponível em: https://fluxoconsultoria.poli.ufrj.br/blog/projetos-mecanicos/9-tipos-de-engrenagens/?gclid=EAIaIQobChMIgqnjitTN4QIVkp6fCh1SIANSEAAAYASAAEgK-__D_BwE. Acesso em: 1 jun. 2019.

SOUZA, Gabriel. **ACOPLAMENTOS**. Disponível em: <https://blog.acoplastbrasil.com.br/o-que-sao-acoplamentos/>. Acesso em: 3 jun. 2019.

COLLINS, Jack A. **Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas: Uma Perspectiva de Prevenção da Falha**. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

POWER TRANSMISSION INDUSTRIES. **Catálogo de Acoplamentos**. 1. ed. São Paulo: PTI, 2014. 104 p.

VULKAN DRIVE TECH (São Paulo). **Contra-Recuos e Rodas Livres de Alta Rotação**. 4. ed. São Paulo: PTI, 2010. 20 p.

STEWART, Harry L. **Pneumática & Hidráulica**. 3. ed. São Paulo: Hemus, 2002.

FRANCHI, Claiton Moro. **Acionamentos Elétricos**. 5. ed. São Paulo: Érica, 2014.

STEPHAN, Richard M. **Acionamento, Comando e Controle de Máquinas Elétricas**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2008.

FILHO, João Mamede. **Instalações Elétricas Industriais**. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

ZL EQUIPAMENTOS. **Catálogo de Especificações Técnicas – Britador de Mandíbulas**. Disponível em: http://zlequipamentos.com.br/wp-content/uploads/2014/09/4._britador_de_mandibulas_-_especificacoes_tecnicas.pdf. Acesso em: 10 out. 2019

METSO. **Catálogo de Aplicações Não Metálicas - HRC 800**. Disponível em: https://www.metso.com/globalassets/saleshub/documents---episerver/hrc8_pt.pdf. Acesso em: 11 out. 2019.

BRITO, Kleber Borgo de. **Análise da Etapa de Cominuição do Projeto Vargem Grande Itabiritos**. 2013. 55 f. Monografia apresentada à Universidade Federal de Minas Gerais para obtenção do título de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Minerais.

REVISTA DE MANUTENÇÃO E TECNOLOGIA. **Soluções Para A Maior Eficiência Na Britagem**. Disponível em: <http://www.revistamt.com.br/Materias/Exibir/solucoes-para-a-maior-eficiencia-na-britagem>. Acesso em: 19 out. 2019.