

Cominuição é o conjunto de operações de redução de tamanhos de partículas minerais, executado de maneira controlada e de modo a cumprir um objetivo predeterminado. Isso inclui as exigências de controlar o tamanho máximo dos produtos e de evitar a geração de quantidades excessivas de finos.

As operações de cominuição são necessárias na realidade industrial por diversas razões:

- 1) para permitir o manuseio do material de mineração: um pedaço de rocha de 44" só pode ser movimentado por uma caçamba de 4 jd^3 . É muito volumoso, $1,4 \text{ m}^3$, e pesado – se for um bloco de calcário ou de granito, pesará 3,8 t. Esse material precisa, portanto, ter o seu volume reduzido para poder ser movimentado;
- 2) para permitir o transporte contínuo: transportadores de correia são, em princípio, muito mais convenientes que caminhões ou outros veículos a diesel, pois custam mais barato, usam energia elétrica, são silenciosos e, sobretudo, operam continuamente. Entretanto, são limitados quanto ao tamanho das peças que podem transportar: para cada largura de correia existe um tamanho máximo capaz de ser transportado sem problemas (que é de aproximadamente um terço da largura da correia). Então, para qualquer transporte em transportadores de correia, o minério precisa estar britado;
- 3) para permitir a utilização do minério: a brita para concreto ou pavimentação deve ter tamanhos bem definidos; para ser queimado em grelhas, o carvão precisa ser graúdo e isento de finos, e para ser queimado em maçaricos, precisa estar finamente pulverizado; calcário para calagem de solos deve estar numa granulometria suficientemente fina para oferecer uma área de superfície adequada a uma boa dissolução pelos ácidos do solo, mas não tão fina que

leve o calcário a ser arrastado pelo vento e a corrigir o solo do terreno vizinho...;

- 4) para liberar as partículas dos minerais úteis e dos minerais de ganga e permitir a sua separação, por meio dos processos de concentração, em concentrados, rejeitos e produtos intermediários.

As operações de cominuição são a britagem e a moagem. Elas são diferentes não só em termos da faixa de tamanhos considerada, mas principalmente dos mecanismos de redução de tamanhos envolvidos. Nos processos de britagem, as partículas grosseiras sofrem a ação de forças de compressão ou de impacto. Os processos de moagem se restringem às frações mais finas e utilizam mecanismos de abrasão e arredondamento (quebra de arestas).

A britagem, dependendo de forças de compressão, impacto ou cisalhamento, exige um volume de partícula em que possa se desenvolver. Fica, portanto, restrita aos tamanhos maiores. A fratura se desenvolve segundo as tensões principais de cisalhamento, com inclinação constante em relação à direção das tensões de compressão. Em consequência, as partículas tendem a apresentar certa cubicidade e faces relativamente planas.

A britagem tem, necessariamente, uma relação de redução (RR) pequena: as forças aplicadas são elevadas e a geometria do equipamento tem importância fundamental. A moagem leva a relações de redução grandes e usualmente é feita em dois estágios: a grossa em moinho de barras e circuito aberto, e a fina em moinho de bolas e circuito fechado. No total são distinguidos seis estágios, relacionados na Tab. 1.1 (a britagem quaternária e a moagem grossa se superpõem no que se refere à faixa de tamanhos considerada, embora difiram quanto ao equipamento de cominuição).

Um exemplo de circuito de cominuição que envolve britagem e moagem – que até alguns anos atrás seria considerado um exemplo clássico da etapa de preparação (por preparação entende-se etapas de cominuição e separação por tamanho associadas) – é apresentado na Fig. 1.1.

Tab. 1.1 ESTÁGIOS DE BRITAGEM

Estágio	Relação de redução	Tamanho Máximo	
		Alimentação	Produto
Britagem primária	8:1	5 a 2 ½ ft	> 1 ft a 4"
Britagem secundária	6 a 8:1	25" (cônicos)	4 a 3/4"
Britagem terciária	4 a 6:1	Depende da câmara do britador	1 a 1/8"
Britagem quaternária	até 20	3" ou 1 ¼"	12" a 20#
Moagem grossa	até 20	3/4" a 3/8"	6 a 35#
Moagem fina	100 a 200	1/2"	fino

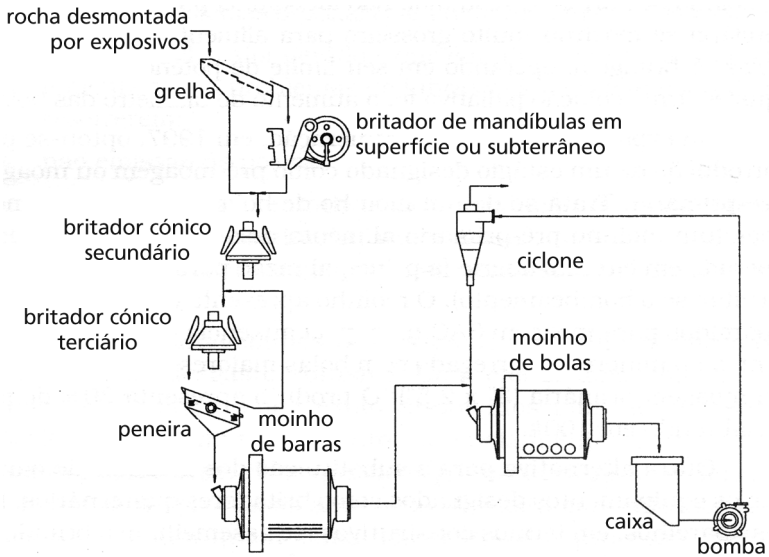


Fig. 1.1 Circuito "clássico" de cominuição

Fonte: adaptada de Beraldo (1987).

Nesse circuito nota-se que as últimas etapas, tanto da britagem quanto da moagem, são operadas em circuito fechado, com peneiras no primeiro caso e ciclones no segundo.

O circuito clássico, com seus equipamentos dimensionados corretamente, cumpre bem seus objetivos, mas apresenta um sério problema

operacional ligado aos moinhos de barras. Esses moinhos geram menos finos que os moinhos de bolas, característica importante para a operação em circuito aberto, porém são passíveis de paradas frequentes e prolongadas, causadas principalmente pelo atravessamento de barras dentro do moinho. Em casos extremos, há necessidade de romper com maçarico a carcaça do moinho, e o tempo de parada pode atingir vários dias.

Entre os projetistas de equipamentos de cominuição existe uma busca contínua por equipamentos e circuitos que dispensem o moinho de barras. Dois exemplos brasileiros de solução para o problema são discutidos a seguir.

Na Caraíba Metais (atual Caraíba Mineração), foi adotado um circuito semelhante ao “circuito clássico”, mas sem o moinho de barras. O resultado não foi bom. O produto da britagem terciária mostrou-se muito grosseiro para alimentar os moinhos de bolas. A britagem, operando em seu limite de potência, não tolerou ajustes. Uma solução paliativa foi o aumento do diâmetro das bolas.

Na expansão da Samarco Mineração, em 1997, optou-se pela introdução de um estágio designado como pré-moagem ou moagem pré-primária. Trata-se de um moinho de bolas de grandes dimensões (um moinho pré-primário alimenta dois moinhos primários), operado em circuito aberto (a principal razão para o circuito aberto é evitar o bombeamento). O moinho apresenta características de aparelhos para moagem SAG mas, pela ausência de blocos competentes no minério, é carregado com bolas maiores que as utilizadas na moagem primária (3" × 2,5"). O produto apresenta 30% de material retido em 100#.

Outra alternativa para a substituição dos moinhos de barras são os equipamentos designados como britadores quaternários. Esses aparelhos, em termos construtivos, assemelham-se a britadores cônicos terciários, porém o princípio de fragmentação, “cominuição interpartículas”, pode ser considerado como intermediário entre a britagem e a moagem, pois ocorrem tanto compressão quanto abrasão. O britador quaternário fabricado pela Nordberg recebeu o nome de Gyradisc. Máquina semelhante foi desenvolvida pela Allis Chalmers (atual Metso),

mas foi retirada de linha, não constando da 6ª edição do *Manual de britagem* da empresa. Um britador quaternário da Faço chegou a ser utilizado na Mineração Casa de Pedra. Os equipamentos introduzidos na década de 1980 apresentavam problemas mecânicos, exigindo excesso de manutenção, exatamente a mesma grande limitação dos moinhos de barras.

Outras alternativas serão discutidas na seção 1.6.

As operações de cominuição podem ser feitas a seco ou a úmido. “A úmido” significa que a moagem é feita numa polpa com água suficiente para o transporte dos sólidos; “a seco” significa com a umidade natural do minério, isto é, sem adição de água, o que é possível somente até um certo limite de umidade.

A regra do Tratamento de Minérios é a operação a úmido na moagem e a seco na britagem. As vantagens do processamento a úmido são muitas:

- ◆ facilidade de transporte do material: a seco são necessários ventiladores ou sistemas especiais para remover o material já moído;
- ◆ dissipação do calor gerado (que é elevado): esse calor frequentemente causa problemas de lubrificação muito difíceis de resolver;
- ◆ não emissão de poeiras.

Têm sido feitas tentativas de introdução de britadores a úmido, operação denominada *water flush*, mas os resultados são questionados. Parece haver um aumento sensível do desgaste das mandíbulas.

A única vantagem dos processos de cominuição a seco é a redução do desgaste abrasivo. Com efeito, uma polpa é um sistema eletrolítico, no qual estão dissolvidos íons de diferentes espécies. Ela é sempre, portanto, potencialmente corrosiva. Os processos corrosivos, eletroquímicos por natureza, são acelerados na presença de processos abrasivos. O efeito conjunto dos dois processos é maior que a soma dos efeitos dos processos individuais, o que se chama sinergismo. Por essa razão, minérios e minerais muito abrasivos têm de ser obrigatoriamente moídos a seco, assim como minerais que não podem ser contaminados com o ferro removido dos corpos moedores e revestimentos. Outra

razão para moer a seco é a reação do material que está sendo cominuído com a água, como nos casos de clínquer de cimento portland ou de sal de cozinha.

O problema das poeiras na cominuição a seco é o mais sério de todos. Para abatê-las são necessários periféricos que aumentam o investimento e o custo operacional, e que consomem muita energia. A Tab. 1.2 compara as virtudes e os defeitos dos processos a seco e a úmido na operação de moagem (os números referem-se à moagem de minério com ganga silicosa). A Fig. 1.2 mostra uma instalação de moagem a seco e os periféricos associados. É notável a importância dos periféricos e a sua predominância em relação ao moinho.

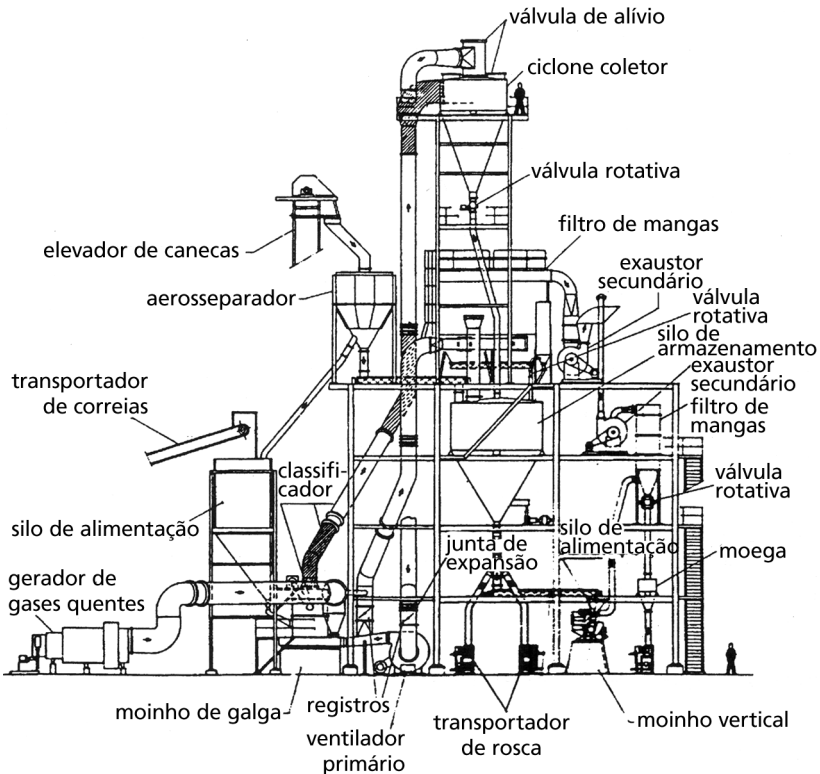


Fig. 1.2 Circuito de cominuição a seco

Tab. 1.2 COMPARAÇÃO ENTRE MOAGEM A SECO E A ÚMIDO

Item	A úmido	A seco
Consumo de energia	3/4	1
Equipamentos periféricos	Desnecessários	Essenciais
Condições de trabalho (poeiras)	Boas	Ruins
Transporte	Facilitado	Difícil
Operação em circuito fechado	Mais eficiente; mais barata	-
Mistura no moinho (homogeneidade do produto)	Melhor	-
Aquecimento do moinho	Inexistente	Crítico
Nível de ruído	Menor	Maior
Consumo metálico (desgaste)	100	20
Contaminação com ferro	-	Menor
Manutenção/substituição de peças de desgaste	-	Menor
Reação com a carga	-	Não ocorre
Work index operacional (kWh/st)	12	16
Potência consumida (kWh/t)	9	12
Potência dos periféricos (kWh/t)	1	4
Custo da energia (US\$ 0,01/t a US\$ 0,15/KWh)	15	24
Consumo metálico (lb bolas/t)	1,43	0,34
Consumo metálico (US\$ 0,01/t a US\$ 0,08/lb)	11,4	2,7
Consumo metálico (lb revestimento/t)	0,30	0,07
Consumo metálico (US\$ 0,01/t a US\$ 0,14/lb)	4,2	1,0
kWh/lb de revestimento	30	175

1.1 Equipamentos

Existem inúmeros tipos de britadores. Nem todos, entretanto, têm aplicação industrial tão generalizada que mereçam destaque. O interessado deverá procurar a literatura especializada. Os que examinaremos estão descritos no Quadro 1.1.

QUADRO 1.1 Tipos de britadores a serem examinados

Família	Tipo	Função
Mandíbulas	1 eixo ou Dodge	Primários a terciários
	2 eixos ou Blake	Primários
	Giratórios	Primários
	Cônicos <i>standard</i>	Secundários
Giratórios	Cônicos <i>short head</i>	Terciários
	Interpartículas	Quaternários/moagem grossa
Impacto	Britadores de eixo horizontal	Primários a terciários
	Britadores de eixo vertical	Secundários e terciários
	Moinhos de martelo	Terciários e quaternários
Especiais	Bradford	Primários
	Outros	Carvão e minerais moles

Os moinhos mais usados no Tratamento de Minérios são os moinhos de carga cadente – moinhos de bolas, de rolos e de seixos –, além dos moinhos autógenos. Eles são estudados no Cap. 3.

Nos britadores de mandíbulas, a energia é aplicada às partículas por compressão das mandíbulas; nos britadores da família dos giratórios, por compressão entre manto e cone. A fratura ocorre ao longo do plano principal de cisalhamento. Nos britadores de impacto, por sua vez, a energia cinética do impactor é aplicada à partícula e ocorre a fratura.

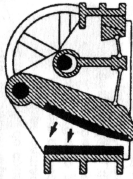
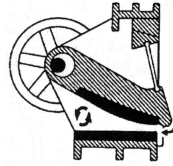
O Quadro 1.2 resume algumas das características principais dos tipos de britadores mencionados, incluindo outros equipamentos que serão vistos mais adiante.

1.1.1 Britadores de mandíbulas

A Fig. 1.3 mostra um esquema construtivo de um britador de mandíbulas de dois eixos. Os elementos mecânicos ativos desse

Quadro 1.2 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS BRITADORES E DE OUTROS EQUIPAMENTOS

Tamanho (mm)	Potência (k-W)	Velocidade (rpm)	Relação de redução	Características e aplicações
125 (gape) x 150 (larg) a 1.600 x 2.100	2,25 a 225	300 a 100	Média 7:1 Limites 4:1 A 9:1	Originalmente, o britador de mandíbulas padrão para as britagens primária e secundária de rochas duras e muito abrasivas. Também para material grudento. Produto relativamente grosseiro, com poucos finos. O volante acumula a energia.
125 x 150 a 1.600 x 2.100	2,25 a 400	300 a 120	Média 7:1 Limites 4:1 A 9:1	Originalmente, restrito a tamanhos pequenos, por limitações estruturais. Atualmente, nos mesmos tamanhos do Blake, o qual procurou substituir, pois o excêntrico superior favorece a alimentação e a descarga, permitindo maiores velocidades e maior capacidade, porém com maior desgaste, em razão de forças de atrição, e eficiência energética ligeiramente mais baixa. Inadequado para rocha muito dura e abrasiva.

Blake
(2 eixos)1 eixo
(excêntrico superior)




BRITADORES DE MANDÍBULAS

Quadro 1.2 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS BRITADORES E DE OUTROS EQUIPAMENTOS (CONT.)

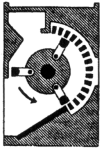



Tamanho (mm)	Potência (kW)	Velocidade (rpm)	Relação de redução	Características e aplicações
760 (passagem) x 1.400 (diâm. da base do cone) a 2.135 x 3.300	5 a 750	450 a 110	Média 8:1 Limites 3:1 A 10:1	Cone e manto com perfil aberto para cima. Utilizado para britagem primária ou secundária, gerando poucos finos. Mais alto, maior capacidade e mais adequado para alimentações grosseiras do que o britador de mandíbulas. Projetado para grandes capacidades.
Giratório				
600 (diâm. do cone) a 3.050	22 a 600	290 a 220	Britagem secundária 6:1 a 8:1	Cone e manto com perfil convergente. Utilizado para britagem secundária e terciária. Existem diferentes perfis de câmara para produtos sucessivamente mais finos. Britadores terciários são frequentemente alimentados afogados.
Cônico				
900 (diâm. do manto) a 2.100	100 a 400	325 a 260	Britagem terciária 4:1 a 6:1 2:1 a 4:1	Para britagem muito fina ou quaternária. Alimentação afogada e baixo ângulo do cone causam fratura entre as camadas da partícula, reduzem o desgaste e fornecem uma forma de partícula mais cúbica. Compete com o moinho de barras na faixa de utilização e funciona mais como moinho do que como britador. Inadequado para material aderente.
Quaternário				

FAMÍLIA DOS BRITADORES GIRATÓRIOS

Quadro 1.2 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS BRITADORES E DE OUTROS EQUIPAMENTOS (CONT.)

Tamanho (mm)	Potência (kW)	Velocidade (rpm)	Capacidade (t/h)	Relação de redução	Características e aplicações
500 (diâm.) x 450 (larg.) a 1.500 x 2.100	15 a 300	60 a 23	20 a 1.500	até 7:1	Basicamente, um britador primário ou secundário, adequado para materiais brandos, friáveis e não abrasivos, tais como carvão e calcário. Melhor que os britadores de mandíbulas e giratório para material úmido e aderente.
					
Rolo único					
750 (diâm.) x 350 (larg.) a 1.800 x 900 ou 860 x 2.100	27 a 112	150 a 50	20 a 2.000	3:1	A baixas relações de redução, o produto produz comparativamente poucos finos.
					
2 rolos					
2.100 (diâm.) x 3.650 (compr.) a 4.300 x 9.750	7 a 112	18 a 12	400 a 2.000	carvão run-of-mine a produto de 40 a 1.500 mm	Britagem de carvão run-of-mine a um top size predeterminado (com um mínimo de finos). Permite a remoção de rejeitos grosseiros.
					
BRADFORD					
BRITADORES					

Quadro 1.2 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS BRITADORES E DE OUTROS EQUIPAMENTOS (CONT.)

Tamanho (mm)	Potência (kW)	Velocidade (rpm)	Capacidade (t/h)	Relação de redução	Características e aplicações
Abertura de alim. 160 x 230 a 640 x 1.470	11 a 375	1.800 a 600	até 2.500	até 20:1 circuito aberto até 40:1 circuito fechado	A câmara é fechada por uma grelha. Diversos modelos; reversível/não reversível, câmara ajustável/não ajustável, granulador, de anel, à prova de entupimento. Parte da quebra por impacto, parte por atrito. Utilizado para britagens primária, secundária e terciária; gera formas cúbicas e grande quantidade de finos. O material não pode ser duro ou abrasivo.
					
Abertura de alim. até 1.400 x 2.300	até 450	até 900	até 2.500	até 40:1 circuito fechado	Câmara aberta para britagens primária, secundária e terciária de materiais brandos e friáveis. Recomendado quando são requeridos elevada relação de redução, alta capacidade, produto bem classificado, formas cúbicas e mínimo de finos. A quantidade de finos gerados é função da velocidade.
					
750 (diâm.) a 1.300	22 a 260	1.500 a 480	5 a 80		Podem ter 1, 2, 4 ou 6 gaiolas concêntricas que giram em sentidos opostos. A alimentação é feita no centro da câmara interna e é centrifugada para fora, sendo sujeita a forças de impacto cada vez maiores a cada estágio.
685 (diâm. do rotor) a 990	55 a 150	2.300 a 1.400	200 a 100	3:1 	A alimentação é centrifugada pelo rotor. Um fluxo vertical provoca choque entre as partículas e intenso trabalho de abrasão. Essencialmente, um britador terciário para rocha muito dura e abrasiva. Menos desgastoso e um produto mais cúbico em relação aos moinhos de martelos.

MAQUINA DE IMPACTO

Fonte: adaptado de Kelly e Spottiswood (1982).

tipo de britador são uma placa metálica móvel (mandíbula móvel), que se move em movimento reccivo (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 *gape*.

O fragmento de rocha ou minério a ser britado é introduzido no espaço entre as duas mandíbulas e esmagado durante o movimento de aproximação. Os fragmentos resultantes escoam para baixo, durante o movimento de afastamento, cada qual se deslocando até uma posição em que fique contido pelas mandíbulas e seja novamente esmagado na próxima aproximação da mandíbula móvel.

A mandíbula móvel movimenta-se em torno de um eixo cêntrico. O movimento é gerado por um outro eixo, excêntrico, que aciona uma biela. Essa biela está ligada a duas placas rígidas de metal, chamadas “abanadeiras”. A abanadeira da direita tem sua extremidade à direita

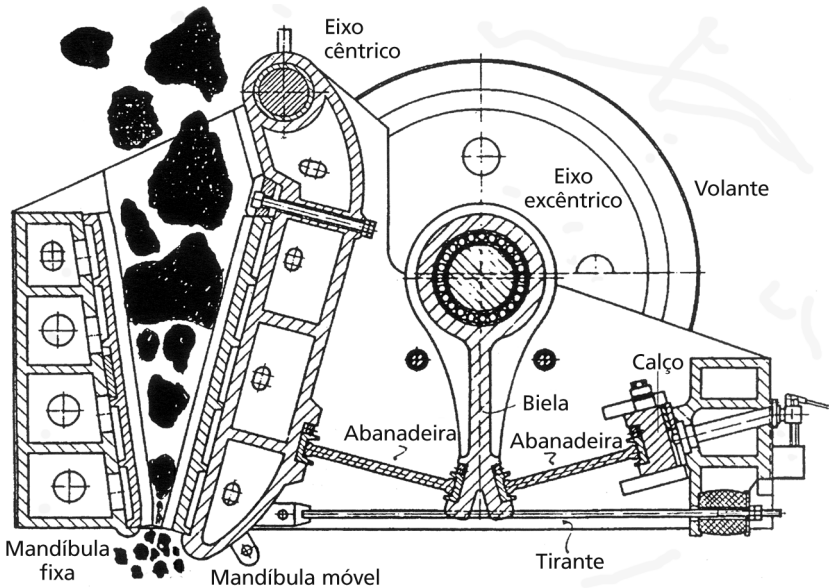


Fig. 1.3 Corte de um britador de mandíbulas de dois eixos

Fonte: IBAG (s.n.t.).