

COMINUIÇÃO

4.3 CIRCUITOS INDUSTRIAIS DE MOAGEM AUTÓGENA E SEMI-AUTÓGENA

Homero Delboni Júnior

Eng. de Minas pela EPUSP, Mestre em Engenharia Mineral pela EPUSP

Ph.D. pela University of Queensland, Austrália

Professor do Departamento de Engenharia de Minas e

de Petróleo da Escola Politécnica da USP

João Alves Sampaio (*in memoriam*)

Eng. de Minas pela UFPE, Mestre e Doutor em

Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela COPPE-UFRJ

Tecnologista Sênior do CETEM/MCTIC

INTRODUÇÃO

A operação unitária de cominuição faz parte da maioria dos empreendimentos mineiros. Assim, com exceção de finos naturais de minérios, a mineração inclui etapas de cominuição, reunindo desde o desmonte na mina até produtos finais, ou ainda, intermediários para as etapas subsequentes de transporte, concentração física ou físico-química de minerais ou metalurgia extrativa.

A energia empregada nos processos de fragmentação e os esforços mecânicos aos quais os equipamentos são submetidos modulam os custos de operação e os investimentos em circuitos industriais de britagem e moagem. Neste contexto, a melhoria no aproveitamento da energia utilizada na fragmentação apresenta desdobramentos, não apenas nas margens de lucro do empreendedor, mas também na demanda global de energia.

Equipamentos que proporcionem relações de redução mais altas resultam em instalações mais compactas, pois diminuem o número de estágios de cominuição e as respectivas instalações físicas. Da mesma forma, equipamentos de grande capacidade de processamento resultam em diminuição no número de linhas de cominuição. A combinação destas características resulta na compactação de usinas de cominuição em duas dimensões, ou seja, menos estágios e menos linhas de cominuição. Conseqüentemente, os investimentos necessários para implantação de projetos concebidos com equipamentos que operem sob relações de redução grandes e capacidades altas são muito menores, para a maioria das aplicações.

Outro aspecto que merece atenção é que o produto fragmentado influencia diretamente o rendimento de processos subsequentes de concentração. O melhor aproveitamento de recursos minerais não renováveis é, portanto, função da distribuição granulométrica resultante do circuito de cominuição adotado.

Os custos de operação associados à cominuição de minérios são função, principalmente, da granulometria requerida, do consumo de corpos moedores e peças de desgaste e do consumo de energia. Seguindo a divisão clássica da cominuição em operações de desmonte, britagem e moagem, a energia específica aumenta em uma ordem de grandeza nessa sequência. Assim, enquanto operações de desmonte de rocha por explosivo consomem cerca de 0,1 kWh/t, em britadores o índice eleva-se para magnitudes de 1,0 kWh/t, atingindo valores da ordem de 10 kWh/t em circuitos de moagem. Em etapas conhecidas como pulverização, moagem ultrafina ou micronização, o consumo específico pode atingir até 100 kWh/t.

MOAGEM AG/SAG

A moagem autógena ou semi-autógena (AG/SAG) é conduzida em moinhos tubulares de carga cadente, formados essencialmente por um cilindro e duas tampas, dotado de revestimentos internos, além de grelha na descarga. A diferença de moinhos AG/SAG em relação a moinhos de barras ou bolas é que naqueles os corpos moedores são formados pelo próprio minério, total em moinhos AG ou parcialmente em moinhos SAG. Os corpos moedores são providos pela alimentação de minério relativamente grosso, geralmente produto de britadores primários.

A ação de corpos moedores formados pelo próprio minério é denominada autógena, ou autogênese, autogeração. Assim, ao mesmo tempo em que promovem a moagem, os corpos moedores são fragmentados, estabelecendo-se um equilíbrio dinâmico que determina o desempenho do processo.

A presença de grelha na câmara de moagem impede que frações grossas, que formam os corpos moedores, sejam descarregadas do moinho.

Por maior que seja a energia recebida (kWh), as frações muito grossas da carga são submetidas a energias específicas baixas (kWh/t), justamente pela relativa grande massa que apresentam. Para rochas de elevada tenacidade, o resultado é apenas a abrasão da superfície, ou seja, cinética muito lenta de fragmentação. O resultado da ação contínua de tal espectro de energia é o arredondamento de arestas, tal qual ocorre na natureza com seixos rolados no fundo de rios ou em geleiras.

Portanto, o produto da ação da carga sobre os próprios corpos moedores é a preservação dos mesmos, além da geração de frações finas, produto de fraturas de pequena intensidade. Tais distribuições granulométricas são denominadas bimodais.

Embora haja muita confusão na literatura entre causa (mecanismos) e efeitos (produtos), a combinação entre o espectro de energia aplicada e as características do minério é que determinam a fragmentação de partículas. Desta forma, a fragmentação dos corpos moedores, conforme acima descrita, apresenta um produto essencialmente bimodal, quer seja proporcionado pelo arremesso e queda destes resultando em impacto contra revestimentos (movimento de catarata), ou pela força de atrito que ocorre nestes mesmos corpos moedores quando em movimento relativo no interior da carga do moinho (movimento de cascata).

Na moagem SAG a ação de bolas de aço potencializa o espectro de energia da carga, conforme promovida pela dinâmica da carga no interior da câmara de moagem.

As frações de tamanho intermediário da carga do moinho são formadas, tanto pelo arredondamento e conseqüente diminuição de tamanho da frações mais grossas, como pelos fragmentos de tamanho intermediário contidos na alimentação do moinho.

Os fenômenos que ocorrem na fragmentação de frações com tamanho intermediário são peculiares da moagem AG. Assim, enquanto as dimensões de tais fragmentos são ainda relativamente grandes para que sejam fraturados por corpos moedores maiores, a massa é ao mesmo tempo relativamente pequena para promover fragmentação por impacto (regime de catarata), assim como não apresentam grande área superficial para fragmentação por atrição (regime de cascata). A combinação destes dois efeitos resulta que frações intermediárias apresentam uma cinética baixa de fragmentação, ao mesmo tempo em que promovem pouca fragmentação. Tais frações são assim denominadas críticas, pois se acumulam na carga (não são moídas com intensidade) e também não moem com intensidade.

A depender do regime dinâmico da carga e característica do minério, a tendência é acumulação desta fração crítica na carga do moinho, diminuindo assim o desempenho do processo. Minérios muito tenazes resultam frequentemente em reduções drásticas na capacidade do equipamento, devido a excesso de fração crítica na carga do moinho.

As formas tradicionais de se diminuir essa acumulação de fração crítica é aumentar a frequência de interações de alta energia na carga, geralmente com aumento de velocidade de rotação do moinho, ou aumentar a quantidade de bolas na carga. A alternativa de abertura da grelha e conseqüente encaminhamento de tais frações para fora da câmara de moagem, seguida de britagem são muito eficazes.

As frações mais finas alimentadas ao moinho, ou mesmo provenientes de eventos de quebra na carga, são fragmentadas de forma análoga a moinhos de bolas, ou seja, atrição de tais partículas entre corpos moedores que apresentem diferentes velocidades relativas, mecanismo este denominado de atrição.

A combinação de todos os mecanismos acima descritos resulta em produto do moinho AG/SAG com faixas relativamente amplas de tamanho, com tamanho máximo da ordem de dezenas de centímetros, além de quantidade significativa de finos, estes menores que décimos de milímetros.

Como o produto de moinhos AG é geralmente peneirado, a fração retida em tais peneiramentos retorna ao moinho, enquanto que a fração passante se constitui no produto da etapa de moagem AG/SAG. Embora haja variações importantes, esta é a forma mais usual de configurar etapas de moagem AG/SAG.

A quantidade relativamente elevada de finos no produto de moinhos AG/SAG é uma característica fundamental desta modalidade de moagem, que a diferencia de etapas de britagem e moagem em moinhos de barras. Produtos de moagem AG/SAG podem conter entre 35 e 80% de material menor que décimos de milímetros. Tratando estes dois valores como extremos de uma escala, no primeiro caso há normalmente uma etapa secundária de moagem em moinhos de bolas, enquanto que no segundo o circuito de cominuição é configurado em estágio único de moagem AG/SAG. Portanto, a configuração de circuitos de moagem AG/SAG é um aspecto fundamental de projetos, de forma a se obter o melhor desempenho para esta modalidade de cominuição.

EVOLUÇÃO DA MOAGEM AG/SAG

Moinhos autógenos e semi-autógenos (AG/SAG) são amplamente empregados há seis décadas em circuitos industriais de cominuição, com mais de 1.500 unidades fabricadas, vendidas e implantadas neste período.

A combinação peculiar entre capacidades unitárias elevadas e relações de redução extremamente altas, determina uma demanda contínua por equipamentos com dimensões cada vez maiores.

A operação de moinhos SAG com até 42 pés de diâmetro e potência de 28 MW é hoje uma alternativa plenamente segura, tanto em termos de confiabilidade mecânica e elétrica, como em termos de desempenho de processo.

Até o final do ano de 2010, os fabricantes de equipamentos registraram vendas de mais de 1.500 moinhos para os circuitos AG/SAG, com potência instalada superior a 5 GW. Praticamente um terço da potência instalada em moinhos AG/SAG ocorreu entre 2006 e 2010.

Embora nos últimos anos tenha ganhado um impulso acentuado, o início do emprego de moagem AG/SAG confunde-se com o próprio surgimento de moinhos tubulares, pois, já na década de 1880, observava-se que determinados minérios possuíam características de autofragmentação.

Em 1907 Graham publicou aquele que é considerado o primeiro artigo sobre moagem autógena, no qual eram comparados os desempenhos de “seixos dinamarqueses” e corpos moedores do próprio minério, conforme processados na usina da Geldenhuis Deep Mines, próxima a Johannesburg, na África do Sul. A partir desta constatação, a moagem autógena vem sendo praticada continuamente na região do Rand, na África do Sul, ou seja a moagem autógena é conhecida e praticada há 110 anos.

O pioneiro da moagem autógena primária foi Alvah Hedsel, um engenheiro mecânico californiano, que desenvolveu um moinho primário, que ficou conhecido como moinho Hedsel. Após adquirir os direitos de tal equipamento, a empresa Hardinge Co. fabricou muitas unidades do renomeado moinho Hardinge-Hedsel, abandonando-o em 1936, para em 1940 lançar o moinho *Cascade*, para moagem a seco. A partir de 1950 os moinhos autógenos *Cascade* passaram a operar via úmida, em circuito fechado com classificadores.

Em 1959, moinhos autógenos foram instalados com sucesso em usinas de moagem de minério de ferro na América do Norte, aproveitando assim, as características de taconitos de gerar corpos moedores tenazes, resilientes e de alta densidade. A empresa Québec Cartier contava, nesse mesmo ano, com doze moinhos autógenos *Cascade* de 18 ft de diâmetro e 5 ft de comprimento, com potência instalada de 600 HP por unidade.

A reação dos fabricantes de equipamentos à demanda da indústria de minério de ferro por moinhos com capacidades unitárias maiores teve como consequência o surgimento de moinhos cada vez maiores, a ponto de em 1965, entrar em operação na mesma empresa um moinho com 32 pés de diâmetro e motor de 6.000 HP, com capacidade praticamente igual àquela dos doze moinhos instalados sete anos antes.

A atratividade de usinas com grandes moinhos estava baseada em menores investimentos, especialmente se comparada à opção de circuitos com muitas linhas paralelas de pares de moinhos de barras e de bolas. A economia com corpos moedores era também favorável à alternativa de moinhos autógenos. Até 1973, as usinas de minério de ferro receberam os maiores moinhos fabricados até então.

Nos anos 1970 surgiram os primeiros moinhos SAG, visto que a adição de bolas em até 12% do volume da câmara de moagem propiciou substancial elevação da capacidade aos equipamentos. Moagem SAG também tornava o processo de moagem menos suscetível a variações de características do minério processado. Como a variabilidade das jazidas de minérios de cobre era, em geral, muito maior do que as de minério de ferro, circuitos SAG tornaram-se mais populares. Nessa mesma década, muitas minas de cobre foram expandidas ou entraram em operação. A Tabela 1 apresenta um sumário da evolução dos moinhos AG/SAG.

Tabela 1. Sumário da evolução dos moinhos AG/SAG (JONES e FRESKO, 2011).

Ano	Diâmetro		Tipo	Potência do Motor	
	ft	m		MW	HP
1959	18	5,49	AG	0,45	600
1959	22	6,71	AG	0,93	1250
1962	24	7,32	AG	1,30	1750
1962	28	8,53	AG	2,61	3500
1965	32	9,75	AG	4,47	6000
1970	30	9,14	AG	5,22	7000
1973	36	11,0	AG	8,95	12000
1979	34	10,4	AG	6,56	8800
1986	32	9,75	Primeiro SAG Gearless	8,20	11000
1996	38	11,6	SAG	20	26800
1996	40	12,2	SAG	20	26800
2010	42	12,8	SAG	28	37520

Várias dificuldades foram registradas após a instalação do primeiro moinho SAG de 40 ft de diâmetro, em 1996 na usina de Cadia Hill, na Austrália. Superados tais problemas, no final de 2010 já havia 21 moinhos SAG com 40 ft de diâmetro em operação. Segundo informações de fabricantes, há projetos prontos para moinhos SAG de 44 pés de diâmetro, dotados de motor com potência superior a 30 MW (~40.000 HP).

Em termos históricos, há duas escolas de moagem AG/SAG. As diferenças principais são relativas a configuração de circuito e, principalmente, no que se refere ao aspecto do moinho, este definido como a relação entre o diâmetro e o comprimento do equipamento. A escola sul-africana apresenta aspecto 1:1 ou menor, enquanto que na escola norte-americana o aspecto é de 2:1. Cada tipo de moinho encerra configurações e aplicações específicas.

Moinhos com aspecto pequeno, 1:1 ou menor, consomem mais potência por tonelada moída, todavia, geram produtos mais finos. A escola sul-africana é muito particular, pois inclui moinhos alimentados por minérios muito fragmentados diretamente das operações de lavra, que operam em circuito fechado com ciclones, gerando produtos finais com P_{80} de até 74 μm , portanto, adequados para etapas subsequentes de flotação. Esta configuração é típica de usinas que processam minérios auríferos lavrados em minas subterrâneas. As dimensões relativamente pequenas de equipamentos de carregamento e transporte impõem um desmonte intenso e fragmentações severas, gerando ROM equivalente ao do produto de britadores primários. A operação de moinhos AG/SAG da escola sul-africana é ainda mais atípica, já que giram com cerca de 85-90% da velocidade crítica, contando com revestimentos lisos e descarga periférica.

A escola norte-americana de moagem AG/SAG surgiu da necessidade de moagem de minérios de ferro denominados taconitos, que apresentam alta abrasividade, alta densidade e liberação fina dos minerais úteis. A combinação das duas primeiras características resulta em corpos moedores adequados para a moagem autógena, enquanto que a mesma moagem autógena é favorável à terceira característica, pois os mecanismos de fragmentação da superfície dos corpos moedores promovem a geração de produtos finos. Moinhos com grande diâmetro em relação ao comprimento, com aspecto tipicamente de 2:1, proporcionam grande elevação da carga devido ao seu diâmetro e, assim, energia suficientemente alta de impacto para fragmentar blocos de grande tamanho. Como o tempo de residência é relativamente curto em moinhos AG/SAG com tal aspecto, circuitos típicos de cominuição de taconitos contam com um segundo estágio de moagem, que pode contar com moinhos de bolas, ou mesmo moinhos de seixos (*pebbles mills*), estes constituídos por frações selecionadas obtidas no produto do moinho primário.

Muitas operações de moagem da Escandinávia seguem a linha norte-americana. Neste caso, os circuitos contam com moinhos primários tipicamente quadrados (aspecto 1:1), operando em circuito aberto e seguidos por moinhos de seixos.

Ambas as escolas sul-africana e norte-americana contaram nas suas primeiras décadas de operação com moinhos AG de baixas e médias capacidades, potências instaladas típicas de até 5 MW.

A configuração com aspecto alto é típica de operações das grandes minas de cobre e ouro das Américas do Sul e do Norte, Austrália e região, bem como de minério de ferro na América do Norte. As capacidades são, geralmente, médias ou altas. Os moinhos dos sistemas AG/SAG incluem descarga através de grelha, revestimentos tipo placa e barra, velocidades típicas de rotação no intervalo de 70 a 80% do respectivo valor crítico, além de processarem minérios com um amplo espectro de tenacidades.

As configurações básicas e características típicas de circuitos de moagem AG/SAG são descritas a seguir.

CIRCUITOS INDUSTRIAIS DE MOAGEM AG/SAG

Circuito em Estágio Único (*Single Stage AG/SAG*)

A configuração de circuito de moagem em estágio único está esquematizada na Figura 1 e inclui operações com moinhos AG ou SAG. Trata-se de uma opção considerada de risco para projetos de novas operações (*greenfield*), sendo aplicada em projetos de expansão (*brownfield*) ou, ainda, em nichos para os quais essa técnica encontra-se consolidada.

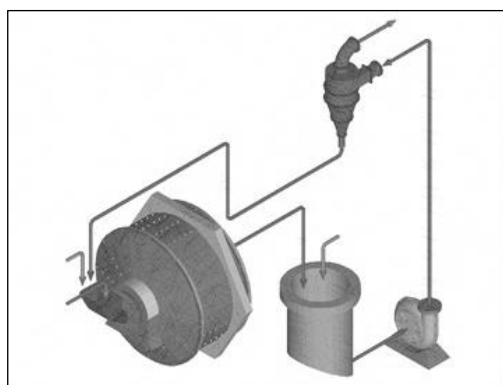


Figura 1. Ilustração esquema de circuitos AG/SAG em estágio único.
(Desenho de Chierigati, A.C.)

Se existem riscos elevados ao se adotar essa opção, há também benefícios, principalmente pela significativa redução de capital, já que em um único estágio de cominuição pode ser praticada relação de redução da ordem de 1.000:1.

Outros importantes atrativos para essa alternativa são os baixos custos relativos de operação, em razão da ausência do consumo de corpos moedores no circuito, no caso de moagem AG.

Para diminuir os riscos técnicos recomenda-se a condução de ensaios em planta piloto, portanto contínuos, de forma a ajustar as condições de operação e, principalmente, consolidar o desempenho previsto.

Operações em estágio único com circuito AG são típicas da escola sul-africana, sendo largamente empregadas pelas grandes mineradoras de ouro da região de Witwatersrand. Na mesma África do Sul, os dois moinhos da mina de Palabora, com 32 pés de diâmetro e de alto aspecto, operam desde 1977 na cominuição de minério de cobre, mesmo contando com a instalação posterior de britadores de seixos (*pebbles*).

Outros exemplos dessa configuração na África do Sul são as usinas da Rustenburg Platinum Mines, com circuito de Mortmer AG (moinho de 14 ft de diâmetro) e Amandel, com circuitos AG e SAG em estágios únicos. Na empresa Vaal Reefs, também sul-africana, os circuitos de *West Gold* iniciaram as operações com circuito SAG (moinho de 16 ft de diâmetro) em estágio único, potência de 3 MW e 90% da velocidade crítica, circuito fechado com ciclones de 1.050 mm de diâmetro. Numa segunda etapa os circuitos foram convertidos à configuração SAG e, posteriormente, as várias linhas de moagem contaram com estágios secundários em moinhos de bolas. Cada dois moinhos do circuito SAG alimentavam um moinho de bolas (16 ft de diâmetro) equipado com motor de 3 MW. Estas alterações são típicas de projetos de expansão de capacidade de circuitos existentes.

Um exemplo importante de circuito estágio único AG na Austrália é a operação de *Olympic Dam*, por sinal o maior moinho autógeno (38 ft de diâmetro) em operação no mundo. Nesta usina, o minério de cobre e urânio oriundo de mina subterrânea é moído no circuito AG e, posteriormente, submetido à lixiviação em meio ácido. A ausência de corpos moedores de aço na carga do moinho reduz a contaminação da polpa com íons ferro, diminuindo assim o consumo de ácido e, conseqüentemente, os custos da etapa de lixiviação.

Outro exemplo australiano dessa opção de circuito é a usina de Kambalda, implantada pela então WMC - *Western Mining Co.* Embora haja britador de seixos nesse circuito, o moinho autógeno de 24 ft de diâmetro em estágio único processa minério de níquel proveniente de várias minas subterrâneas da região. Na Austrália estão também instalados circuitos industriais na configuração estágio único de moagem AG/SAG nas operações de Leinster, Cannington e Brunswick.

O desempenho de circuitos AG em estágio único é muito susceptível à falta de coordenação entre a mina e a usina. Pilhas de homogeneização ou pulmão com grande capacidade relativa são de fundamental importância para garantir uma granulometria constante e *blends* adequados dos diferentes tipos de minério.

A operação do moinho requer um suprimento constante de minério competente na fração de 250 a 100 mm, além de não possuir tendência acentuada em gerar seixos arredondados, que neste caso demandaria a instalação de britadores para a cominuição de tal material. Por estas e outras razões, a caracterização do minério deve ser detalhada e, para isso, os estudos em unidades piloto são determinantes.

Circuitos com moinho SAG em estágio único são usados há mais de 25 anos, em operações de moagem de bauxita, na Austrália. Nos circuitos de Wagerup e Pinjarra (Alcoa), a bauxita lavrada é britada em britador primário e posteriormente transportada até as várias linhas de moagem. Cada linha é composta por um moinho semi-autógeno que opera em circuito fechado com peneiras DSM. Como os moinhos operam de forma contínua com as refinarias de alumina, a polpa que circula no circuito de moagem contém soda cáustica, como forma de iniciar a lixiviação alcalina dos minerais de minério (gibbsita) já nesta etapa. O produto desses circuitos é relativamente grosso, razão pela qual se empregam peneiras DSM.

Embora de pequeno porte, a moagem de McArthur River, no norte do Canadá, é bastante peculiar, pois foi instalada em subsolo para processamento de minério de urânio. Neste caso, o circuito configurado em estágio único inclui um moinho SAG, com dimensões de 9,5 ft de diâmetro por 15,5 ft de comprimento e motorização de 700 HP.

Outro exemplo de moagem SAG em estágio único é a usina de *Henderson*, que processa minério de cobre e é operada pela empresa Freeport-McMoRan, nos EUA. Nessa usina há quatro linhas de moagem, sendo três com moinhos SAG de dimensões 28 ft de diâmetro por 30 ft de comprimento.

Na América do Norte, várias minas de minério de ferro operaram há décadas no modo AG estágio único, sendo posteriormente convertidos ao sistema SAG estágio único e, em alguns casos, acrescentando moinhos de bolas, de forma a elevar a capacidade global do circuito. No Chile, a mina de El Peñon processa minério aurífero no modo SAG (15,5 ft de diâmetro) em estágio único, que opera em circuito fechado com ciclones.

No Brasil, a usina de Jacobina, na Bahia, iniciou suas operações com moagem SAG em estágio único. Após a lavra subterrânea, o minério aurífero era britado em um único estágio e, em seguida, moído em duas linhas paralelas com circuito SAG, em configuração fechada com ciclone, cujo *overflow* seguia para a etapa de lixiviação. Após a compra pela empresa Yamana, o circuito foi convertido para britagem multiestagiada e os moinhos adaptados para operação como moinhos de bolas.

Recentemente foram implantados três circuitos industriais de moagem SAG em estágio único pela empresa Yamana. Destes, o circuito de Pilar de Goiás encontra-se em operação plena, incluindo britagem de *pebbles*, com desempenho conforme previsto no projeto.

Circuito AG – Seixos (*Fully Autogenous Pebble - FAP*)

A configuração do circuito FAP (AG/SEIXOS) inclui duas etapas de moagem, sendo a primeira no modo AG e a segunda com moinho de seixos (*pebbles*), estes últimos obtidos no estágio anterior, conforme indica o desenho esquemático da Figura 2.

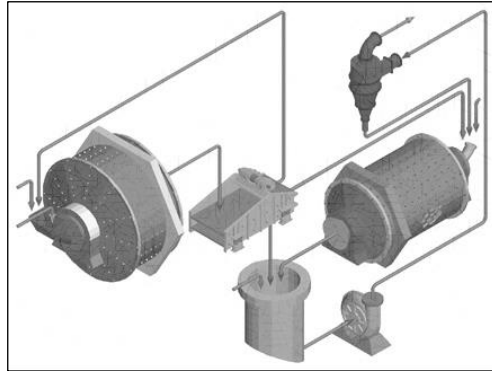


Figura 2. Moagem autógena seguida de moagem com seixos, circuito FAP.
(Desenho de Chieregati, A.C.)

A configuração FAP tornou-se uma solução para os obstáculos verificados inicialmente na configuração de estágio único, visto que as flutuações de operação e desempenho do circuito primário podem ser absorvidas pelo circuito secundário, mediante ajustes na carga circulante deste último. A indesejável acumulação da fração crítica (*pebbles*) no moinho primário transforma-se em vantagem, mediante o aproveitamento dos mesmos como corpos moedores para o estágio secundário.

Circuitos FAP demandam elevados investimentos comparados aos de moagem SAG para a mesma capacidade de circuito, porém os custos operacionais são significativamente inferiores, em função da ausência de corpos moedores.

A configuração FAP é frequente em circuitos de moagem da Suécia e Finlândia. O sistema “OG – *Outogenous*” da Outokumpu inclui um engenhoso sistema de extração dos seixos já no moinho primário, evitando assim a inclusão da peneira ilustrada na Figura 2. Esta configuração é potencialmente atrativa para minérios:

- uraníferos, em decorrência da menor geração de íons ferro na polpa;
- sulfetados, devido à moagem fina, porém sem a excessiva geração de ultrafinos;
- ferríferos, porque nesse caso há menor geração de ultrafinos, reduzindo assim as perdas em etapas de deslamagem, além de ser benéfica aos processos que incluam de filtragem e pelotização.

As usinas de Aitik e Kiruna, na Suécia, e Phihasalmi, na Finlândia, empregam há décadas o sistema FAP.

A empresa Boliden opera há 45 anos circuito industrial de cominuição configurado segundo rota FAP, no processamento do minério sulfetado de cobre proveniente da mina de Aitik, na Suécia. Após três sucessivas expansões, a empresa decidiu implantar em 2010 uma usina inteiramente nova com capacidade para processar 36 Mt/ano (MTPA). Várias alternativas de circuito de cominuição foram estudadas e a decisão foi adotar a mesma configuração FAP para o novo circuito, tendo por base os resultados obtidos no circuito até então em operação. O sistema OG foi base para as novas instalações, que assim incluíram duas linhas de moagem, cada uma constituída por um moinho AG de 38 ft de diâmetro por 43 ft de comprimento, dotado de motor de 22,5 MW, seguido de um moinho de *pebbles* de 30 ft de diâmetro por 35 ft de comprimento, dotado de dois motores de 10 MW, perfazendo assim um total de 65 MW instalados nos quatro moinhos. A configuração do circuito é extremamente peculiar, pois o produto de cada moinho de *pebbles* segue para o respectivo classificador espiral, cujo *underflow* retorna ao moinho primário, fechando assim o circuito.

Outro exemplo de circuito industrial é o instalado na mina de Kiruna, localizada ao norte do círculo polar Ártico na Suécia, que processa minério de ferro lavrado em subsolo, incluindo circuito com duas linhas de moagem. Em cada linha há um moinho primário de 21 ft de diâmetro por 17 ft de comprimento, seguido de um moinho de *pebbles* de 21 ft de diâmetro por 28 ft de comprimento. Parte da fração contida entre as malhas 35 e 6 mm, obtida no trommel do moinho primário, é encaminhada ao moinho secundário, no qual formará os corpos moedores e parte será britada e recirculada no moinho primário. A fração menor que 6 mm do moinho primário é classificada em classificador espiral, cujo *underflow* retorna ao moinho, enquanto os finos são submetidos à separação magnética. O produto do circuito secundário, com P_{80} de 45 μm , segue também para a separação magnética, flotação de apatita como subproduto, desaguamento e pelotização.

Ambas as usinas de Aitik e Kiruna são exemplos clássicos de circuitos de moagem que apresentam custo zero com corpos moedores.

No decorrer dos últimos 50 anos, várias usinas que processam minério taconítico de ferro nos EUA e Canadá adotaram a configuração FAP como alternativa ao estágio único.

Circuito AG – Bolas (*Fully Autogenous Balls - FAB*)

A configuração FAB, acrônimo para moinho AG primário, seguido de moinho de bolas no estágio secundário, está ilustrada na Figura 3.

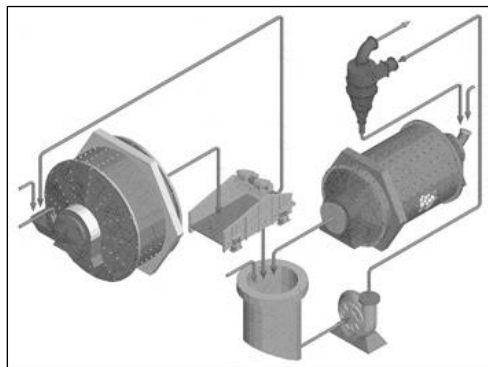


Figura 3. Ilustração esquemática da moagem autógena seguida de moagem com bolas, circuito FAB. (Desenho de Chieregati, A.C.)

O circuito FAB constitui uma alternativa adequada, em termos de consumo de energia, para minérios cuja tendência de geração de pebbles não é acentuada. Se por um lado os fragmentos grossos são corpos moedores adequados ao estágio primário, por outro as características da fração crítica são inadequadas à moagem em moinhos secundários de seixos, ou ainda, a irregularidade da vazão das mesmas compromete o desempenho global do circuito.

O aspecto mais favorável à opção FAB em relação à FAP é, portanto, a regularidade da operação de moinhos de bolas, que corrigem eventuais flutuações de desempenho do circuito primário.

Esta configuração proporciona um consumo energético específico mais próximo de circuito convencional de britagem em multi-estágios e moagem barras/bolas.

Um exemplo de sucesso de circuitos que adotaram a opção FAB é o de Bagdad, operado pela Freeport-McMoRan, nos EUA. A particularidade desse circuito é a existência de britagem de seixos em dois estágios, gerando um produto relativamente fino, que retorna ao moinho AG. O circuito de Bagdad caracteriza-se por baixos custos de produção, em função da alta eficiência energética obtida.

Um exemplo brasileiro de circuito configurado em modo FAB foi a usina da São Bento Mineração - SBM, localizada no município de Santa Bárbara, MG, que operou por cerca de 25 anos no processamento de minério aurífero lavrado em subsolo. Posteriormente, a SBM foi adquirida pela empresa AngloGold Ashanti, que atualmente processa no mesmo circuito o minério proveniente da mina de Córrego do Sítio. O circuito da SBM consistia de alimentação direta do ROM para o moinho AG com 12 ft de diâmetro por 12 ft de comprimento, cujo produto era peneirado e a fração passante encaminhada para a moagem em um moinho de bolas de 8 ft de diâmetro por 13 ft de comprimento. A economia com corpos moedores no moinho primário contribuía para a redução dos custos operacionais, que eram bastante elevados, devido também à etapa

de oxidação sob pressão dos sulfetos. O circuito opera atualmente com os mesmos equipamentos, porém com um segundo moinhos de bolas, além de dois estágios de britagem.

O circuito de Mount Isa, na Austrália, com dois moinhos de 32 pés de diâmetro, foi projetado para operar de acordo com a configuração FAB, sendo posteriormente transformado em SAB.

A alternativa FAB é normalmente considerada quando no minério a ser processado há quantidades significativas de magnetita, solucionando assim os problemas decorrentes da necessidade de proteção eletromagnética de britadores de *pebbles* na configuração SABC, descrita nas próximas seções. Este foi o caso do projeto Salobo, da Vale no Pará. Neste caso, se a opção fosse moagem SAG, seria muito difícil a remoção preferencial de bolas contidas na carga circulante que alimentaria os britadores de *pebbles*, por conta da existência de fração magnética no minério. Posteriormente a Vale decidiu adotar a configuração britagem multiestagiada com prensa de rolos (HPGR – *High Pressure Grinding Rolls*), seguida de moagem em moinhos de bolas para o circuito do Salobo.

Circuito SAG – Bolas (*Semiautogenous Balls - SAB*)

A configuração com moinho SAG primário, seguido de moinho de bolas no estágio secundário está ilustrada na Figura 4.

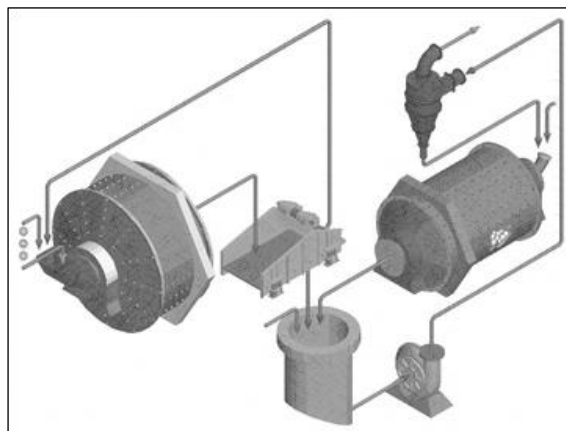


Figura 4. Ilustração esquemática da moagem semi-autógena seguida de moagem com bolas, segundo o circuito SAB. (Desenho de Chierigati, A.C.).

A alternativa de circuito SAB proporciona grande flexibilidade de operação, adequada a variações substanciais no minério alimentado. Muitas operações inicialmente projetadas no modo FAB foram convertidas para SAB, nas quais o incremento de custos com corpos moedores foi inferior ao respectivo aumento de receita com produção, este último advindo da alteração.

Esta configuração de circuito ficou praticamente consagrada para grandes projetos de cobre e ouro por cerca de uma década, iniciada em 1985, período este de grande expansão da produção mundial de estes dois metais. O circuito SAB permite amplas faixas de variação do tamanho de transferência (T_{80}) entre as etapas primária e secundária do circuito. Portanto, é possível ajustar as relações de redução entre ambas as etapas e, conseqüentemente, a distribuição de energia específica consumida (kWh/t) no circuito.

Na comparação de custos de investimento de capital, a alternativa SAB resulta em reduções de até 25% em relação aos circuitos convencionais de britagem e moagem.

Vários circuitos que iniciaram operação em configuração SAB foram posteriormente convertidos em SABC, mediante a instalação de britadores de reciclo (*pebbles*) no circuito, destacando-se os circuitos de Mount Isa, pertencente atualmente à Xtrata, na Austrália, Chuquicamata da Codelco e El Soldado da Minera Disputada, ambas no Chile. No Brasil, o exemplo é a Mineração Serra da Fortaleza, em Minas Gerais, à época operada pela RTZ do Brasil.

O projeto de expansão da usina da Kinross Brasil Mineração, localizada em Paracatu, MG, configurado em modo SAB, inclui britagem primária e moagem primária em um moinho SAG com 38 ft de diâmetro e 22 ft de comprimento, seguido de etapa secundária de moagem em quatro moinhos de bolas, estes configurados em modo fechado e reverso, com baterias de ciclones.

Circuito SAG – Britador de Reciclo - Bolas (*Semiautogenous Ball and Crusher - SABC*)

O acúmulo de determinadas frações granulométricas na carga de moinhos SAG (fração crítica) provoca a redução da vazão de alimentação e, portanto, da capacidade do circuito. A questão pode ser resolvida, ou pelo menos mitigada, mediante três alternativas básicas, descritas a seguir:

- a primeira consiste na britagem prévia de frações selecionadas na alimentação do moinho;
- a segunda inclui a fragmentação da fração crítica na própria câmara de moagem, mediante o aumento da carga de bolas e/ou da velocidade de rotação do moinho;
- se a situação persistir após atingir os limites dessas variáveis, a terceira opção é instalar grelhas com algumas aberturas ou janelas quadradas com 50 a 100 mm de aresta, denominadas *pebble ports* ou *rock ports*, de forma a permitir a saída da fração crítica da carga, para então britá-la, retornando ou não o produto ao moinho primário.

Esta última opção é a configuração SABC e está ilustrada na Figura 5. Caso o produto do britador seja encaminhado ao circuito secundário, o circuito é denominado SABC aberto (SABC-O).

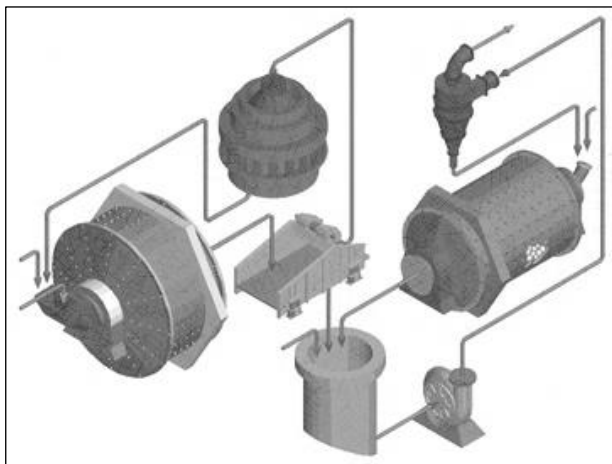


Figura 5. Ilustração esquemática da moagem semi-autógena com britagem e reciclo de *pebbles*, seguida de moagem com bolas, circuito SABC. (Desenho de CHIEREGATI, 2001)

Assim como muitas operações inicialmente projetadas no modo FAB foram convertidas para SAB, várias outras que iniciaram na última configuração foram convertidas em SABC.

No final dos anos 1990 e na década seguinte, circuitos SABC passaram a ser praticamente o padrão da indústria, quer em expansões de linhas existentes, ou ainda, em novas instalações, demonstrando assim o grau de confiança da indústria neste tipo de circuito.

Na Tabela 2 estão relacionados vários exemplos de usinas industriais que converteram os respectivos circuitos da configuração SAB para a SABC. A mesma tabela inclui o ano de conversão e o aumento de capacidade do circuito, mediante a introdução do britador de reciclo para britagem de *pebbles*. As informações foram extraídas de vários artigos publicados nas conferências SAG 2001 e 2006.

Tabela 2. Seleção de circuitos industriais que converteram circuitos SAB para SABC (2001, 2006).

Usina	Ano de Conversão	Aumento de Capacidade (%)
Huckleberry	2000	10
Newmont Lone Tree Mill	1999	10 – 15
SMC Nye Site	1998	10
Fort Knox	1998	10
Chino	1996	10
Chino	1989	30 – 60
Kennecott	1996	10 – 15
Newmont Mill #4	1996	10
National Steel	1992	10
Inco Clairabelle	1989	50
Wirralie Gold	1989	10–20
Kidston	1988	25
Similkameen	1986	8
Los Bronces	1985	15

Os incrementos de capacidade de circuito listados na Tabela 2 estão no intervalo de 8 a 60%, com maior frequência de aumentos na faixa de 10 a 15%, valores estes aceitos como típicos pela indústria.

Uma vez ajustados e bem operados, circuitos de cominuição SABC são extremamente robustos, pois absorvem amplas faixas de variações de tipos de minério, tanto no estágio primário como no secundário. Projetos de circuitos que seguem a configuração SABC incluem o menor investimento (CAPEX) por tonelada processada (R\$/t) dentre todas as demais opções de circuito. Esta última característica da alternativa SABC resulta que um circuito assim configurado oferecerá maior capacidade de alimentação por unidade monetária investida. Mesmo que o consumo energético não seja o mais baixo, aspecto este controverso, o desempenho global torna a opção SABC muito competitiva e de baixo risco.

Dentre os muitos exemplos de operações em configuração SABC podem ser citadas as usinas e diâmetros dos respectivos moinhos SAG: La Candelária (36 ft), Escondida (28, 36 e 38 ft), Collahuasi (33 e 40 ft), Pelambres (36 ft), Andina (36 ft), El Teniente (36 e 38 ft) no Chile; Fimiston (36 ft), St. Ives (24 ft), Cadia Hill (40 pés), na Austrália; Porgera (28 ft), na Papua-Nova Guiné; Freeport (34,5 e 38 ft) e Batu Hijau (38 ft), na Indonésia; Kennecott, Ray – Asarco, nos EUA; Highland Valley (32 ft), no Canadá; Antamina (38 ft) e Antapaccay (40 ft), no Peru; Alumbreira (36 ft), na Argentina.

A variante SABC-O foi adotada por algumas operações, como forma de melhor distribuir a energia de cominuição entre as etapas primária e secundária de moagem. Assim, circuitos cujo gargalo fosse moagem SAG foram convertidos para SABC-O, de forma a que os *pebbles* britados fossem encaminhados diretamente à etapa de moagem em moinhos de bolas, eliminando assim a carga circulante no moinho primário. Os circuitos das minas de *Esperanza* (40 ft) e *Confluencia* (40 ft) no Chile são exemplos de operações que optaram pela configuração SABC-O. Já o circuito da *Codelco-Andina* (36 ft) pode ser operado tanto na configuração SABC como SABC-O, portanto um circuito flexível. Outro exemplo de circuito SABC flexível é o do Sossego (38 ft), operado pela Vale, no Pará.

Após a implantação de circuitos SABC, muitas operações industriais estudaram formas diferentes de expandir a capacidade de produção, resultando em variantes que combinam opções, principalmente, na britagem de *pebbles*.

No Brasil há três circuitos em operação sob a configuração SABC, além de dois circuitos com operação paralisada. O mais antigo é o da Mineração Serra da Fortaleza, que iniciou sua operação em modo SAB e foi posteriormente convertido para SABC, que inclui ainda uma variante de britagem secundária.

O circuito do Sossego, operado pela Vale, em Canaã dos Carajás, no Pará, inclui um britador giratório primário, um moinho operando no modo SAG com 38 ft de diâmetro e 21 ft de comprimento, dotado de motor com 20 MW, dois britadores cônicos de reciclo, além de dois moinhos de bolas com 22 ft de diâmetro e 33 ft de comprimento dotados, cada um, de motor com 8,5 MW cada, com capacidade nominal de 15 Mt/ano.

A operação da Mineração Bauxita Paragominas – Hydro, conta com duas linhas de moagem configuradas de modo SABC-O, para moagem e classificação da bauxita lavrada em Paragominas, PA. O produto é transportado por mineroduto de 230 km até a refinaria da Alunorte, em Barcarena, PA. O minério, britado em dois estágios com britadores do tipo *sizer*, segue para a pilha de homogeneização, cuja retomada alimenta duas linhas de moagem, cada uma contando com um moinho SAG (28 ft) e um moinho de bolas (20 ft). Os seixos gerados no circuito SAG seguem para britagem em britadores de impacto, cujo produto é encaminhado ao circuito secundário de moagem, configurando de modo fechado com ciclones em uma das linhas de moagem e peneiras de alta frequência em outra linha.

Outra operação brasileira importante configurada em modo SABC é o circuito industrial de beneficiamento de minério cupro-aurífero de Chapada, da Mineração Maracá, grupo Yamana, localizado em Alto Horizonte, GO. O circuito industrial consta de uma única linha de moagem constituída por um circuito SAG (34 ft), seguido de um moinho de bolas (24 ft), para processamento de minério de cobre e ouro.

A configuração SABC foi também selecionada para os projetos Alemão e Cristalino, ambos de minério de cobre da Vale. Após estudos conceituais, os desempenhos foram consolidados em campanhas de moagem em escala piloto.

Embora não siga a configuração SABC, mas sim ABC (*Autogenous Ball Crusher*), a usina de Sino Iron, no litoral oeste da Austrália é, atualmente, o maior projeto de moagem autógena do mundo. O circuito foi projetado para processar 140 Mt/ano de minério magnetítico, em seis linha paralelas de moagem, cada uma formada por um moinho AG com 40 ft de diâmetro por 36 ft de comprimento, dotado de motor de 28 MW, seguido de um moinho de bolas com 26 ft de diâmetro por 45 ft de comprimento, dotado de dois motores de 7,8 MW cada. A potência total instalada na usina de Sino Iron nos 12 moinhos perfaz assim 262 MW.

Configurações do Circuito de Britagem para Circuitos AG/SAG

Comparados a circuitos tradicionais de britagem e moagem multi-estagiadas, circuitos de cominuição que incluam moagem AG/SAG apresentam configurações relativamente simples. Como a alimentação de moinhos primários AG/SAG inclui frações grossas, geralmente uma única etapa de britagem é suficiente para proporcionar uma distribuição granulométrica adequada a esta modalidade de moagem. Na Figura 6 (a) está ilustrado um fluxograma típico de britagem de circuitos industriais AG/SAG de grande porte, que consiste basicamente em um britador giratório, cujo produto segue para a pilha pulmão e desta para a alimentação da moagem.

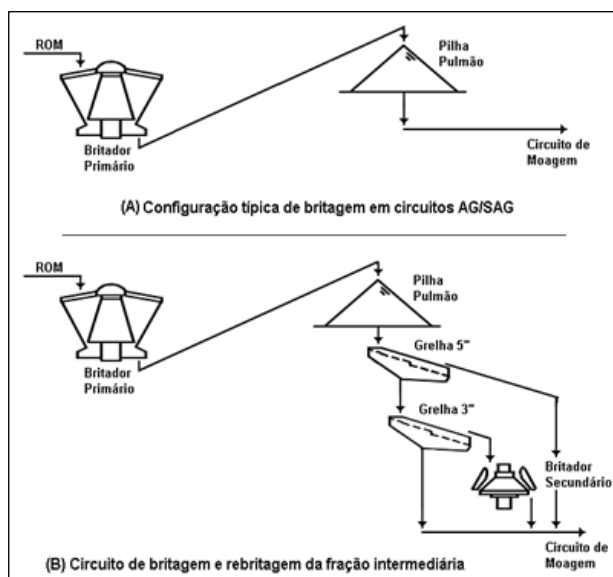


Figura 6. Configurações típicas de circuitos de britagens em linha com os circuitos AG/SAG. (Desenho de Chierigati, A.C.)

Salvo em situações excepcionais, exemplo de operações de pequeno porte com lavra em subsolo onde a fragmentação é muito intensa, a britagem primária está presente, como regra, em circuitos de moagem AG/SAG. Os grandes britadores giratórios geralmente operam com aberturas na posição fechada (APF) entre 140 a 180 mm, o que resulta em tamanho máximo de até 200 mm. Em operações de porte médio encontram-se britadores de mandíbulas e, em alguns casos, até britadores do tipo *sizer*.

Na mesma Figura 6, o fluxograma (b) representa uma variante implantada em vários circuitos, que inclui etapa secundária de britagem. Neste caso, a fração -5"+3", denominada fração crítica, é praticamente eliminada da alimentação do moinho. Trata-se de uma alternativa para operações em que o minério, ou alguns tipos de minério da jazida, possuem forte tendência a se acumular na câmara de moagem de moinhos AG/SAG. Para tais aplicações, mesmo que o circuito de moagem seja configurado em SABC, a alternativa de britagem secundária pode proporcionar aumentos significativos de produção.

A melhor forma de se avaliar o efeito da introdução de um estágio adicional de britagem ao circuito é por meio de ensaios em unidade piloto, nos quais varia-se, com relativa facilidade, a distribuição granulométrica da alimentação do moinho. Mediante o ajuste na granulometria de alimentação, estima-se o efeito de diferentes malhas de peneiramento do produto da britagem primária, ou esquemas alternativos de circuito, como britagem secundária de toda a alimentação do moinho.

Exemplos de circuitos industriais que adotaram com sucesso a opção de britagem secundária da fração crítica são a mina de Troilus, que registrou aumento de até 50% de capacidade do circuito de moagem, mina de Asarco-Ray, nos EUA, com incremento de 20%, assim como Kidston, na Austrália, além de El Teniente e Los Pelambres, no Chile. Na configuração dos circuitos de Fimiston e St. Ives na Austrália e La Coipa, no Chile inclui-se a britagem secundária de todo o produto da britagem primária.

PANORAMA BRASILEIRO

O Brasil apresenta um cenário peculiar em relação à moagem AG/SAG, se comparado a países com forte tradição de mineração, como por exemplo, Estados Unidos, Canadá, Austrália, Chile e África do Sul. Nestes países a moagem AG/SAG seguiu evoluindo nos últimos 60 anos, com muitos exemplos de operações de grande porte que incluem esta modalidade de moagem, enquanto no Brasil a evolução foi muito mais lenta e tímida. Para analisar tal panorama, a Tabela 3 apresenta um sumário das operações industriais brasileiras que contam com moinhos AG/SAG.

Tabela 3. Operações industriais brasileiras com moinhos AG/SAG.

Operação	Empresa	Minério	Configuração do Circuito	Dimensões Nominiais do Moinho (ft)	Potência Instalada nos Moinhos AG/SAG (MW)	Capacidade Nominal da Moagem (MTPA)	
1	Sossego	Vale	Cu/Au	SABC-C/O	38 x 23	20	15
2	Paragominas	Hydro	Bauxita	SABC-O	26 x 16 (2x)	4,9	14
3	Paracatu	Kinross	Au	SAB	38 x 25	20	41
4	Chapada	Yamana	Cu/Au	SABC-C	34 X 19,5	12,5	22
5	Aurizona	Luna Gold	Au	SAB	17 X 5	0,82	2,0
6	Córrego do Sítio	AnfloGold Ashanti	Au	SAB	12 x 12	0,37	0,59
7	Tucano	Beadell	Au	SSSA	24 x 26	7,0	3,5
8	Pilar	Yamana	Au	SSSAC	19 x 19	3,0	1,3
9	Mirabela	Mirabela	Ni (Co, Cu, Pt)	SABC-C	30 x 16,5	8,0	6,4
10	Serra da Fortaleza	Votorantim	Ni	SABC-C	16 x 6,3	0,65	0,55
11	Itafós	MBAc	Fosfato	SSSA	16,5 x 30	3,5	3,2
12	C1-Santa Luz	Yamana	Au	SSSA	19 x 36	6,2	2,4
13	Ernesto/Pau-a-Pique	Yamana	Au	SSSA	19 x 19	3,0	1,0
15	Jacobina	Anglo American	Au	SSSA	15 x 30	2,60	0,90
16	Igarapé Bahia	Vale	Au	SAB	12,5 x 20	1,30	0,50
					11,7 x 11	0,70	1,1
					12,8 x 12,5	0,95	1,1
17	São Bento	São Bento Mineração	Au	AB	12 x 12	0,37	0,56

Das 17 operações listadas na Tabela 3, apenas as oito primeiras encontram-se em operação plena em dezembro de 2016, uma vez que as demais foram paralisadas por exaustão de reservas, por razões econômicas, ou ainda convertidas em outra modalidade de moagem. Portanto, encontram-se em operação no Brasil nove moinhos SAG, no processamento de minérios de cobre, ouro e bauxita. Se forem consideradas todas as usinas instaladas, moinhos SAG já processaram também no Brasil, minérios de níquel e fosfato.

Embora o número de moinhos SAG no Brasil seja pequeno, representando menos de 1% de toda a potência instalada neste tipo de equipamento no mundo, há uma variedade acentuada de tipos de minério processado, assim como de capacidades e também de configurações de circuito adotadas. Vale também o registro de que o primeiro moinho AG instalado no Brasil opera há mais de 30 anos, no início com a São Bento Mineração – SBM e depois adquirido pela AngloGold Ashanti e convertido para moinho SAG. Os demais moinhos AG/SAG estão instalados em oito estados brasileiros.

A relativa pequena presença de moagem SAG no Brasil decorre da ausência, até o início da década de 1990, de grandes projetos de mineração que contassem com cominuição intensiva. Além disto, uma das características dos principais minérios brasileiros lavrados até então era a quantidade relativamente alta de finos já no produto da lavra. Estes dois fatores combinados resultaram, até meados desta mesma década de

1990, na instalação no Brasil de circuitos de cominuição em sua maioria configurados no modo tradicional. Embora houvesse exceções, a engenharia brasileira voltada à cominuição, projetou e se consolidou empregando e operando moinhos de barras e de bolas. Enquanto no Chile e Austrália, Suécia e Finlândia, Estados Unidos, Canadá e África do Sul a moagem SAG já estava consolidada há mais de 30 anos, com várias centenas de operações de pequeno, médio e grande porte, no Brasil havia ainda certa resistência ao emprego de tal modalidade de moagem.

A mesma Tabela 3 indica, que dos 18 moinhos instalados no Brasil, onze são considerados de pequeno porte, ou seja, com diâmetros nominais iguais ou menores a 20 ft, três de porte médio, ou aqueles com diâmetro nominal maior que 20 ft e menor do que 30 ft, assim como quatro moinhos de grande porte, estes últimos com diâmetros nominais superiores a 30 ft. As potências instaladas em motores nestes mesmos moinhos variam de 370 kW a 20 MW. As configurações de circuito de moagem são cinco, conforme classificação apresentada anteriormente neste texto.

Dos circuitos industriais atualmente em operação, o primeiro listado na Tabela 3 é o Sossego. Trata-se de uma operação da Vale instalada em Canaã dos Carajás, no estado do Pará, projetada para capacidade nominal de 15 MTPA em configuração SABC, que inclui um moinho SAG de 38 ft de diâmetro, dotado de motor com potência de 20 MW, além de dois moinhos de bolas, com motores de 8,5 MW cada, perfazendo assim 37 MW de potência instalada nos moinhos. O projeto Sossego marcou assim, em 2002, a primeira operação de moinho de 38 ft de diâmetro no Brasil, em um local então remoto. Conforme discutido anteriormente, o circuito foi adaptado para operar a britagem de *pebbles* tanto em modo fechado, conforme originalmente projetado, como em modo aberto, de forma a acomodar minérios de alta tenacidade.

Em 2004 entrou em operação a primeira linha de moagem do circuito industrial de Paragominas, localizado no município homônimo no Pará, contando com um moinho SAG de 26 ft de diâmetro com 4,9 MW de potência instalada, além de um moinho de bolas de 21 ft de diâmetro e motor de 7,2 MW em configuração SABC aberta. Após a instalação da segunda linha de moagem, com moinhos de mesmas dimensões, a capacidade total de alimentação do circuito foi elevada para 14 MTPA. Trata-se de um circuito com fluxograma complexo, envolvendo várias etapas de moagem, classificação, deslamagem e desaguamento, contido em uma operação também complexa que inclui mina, usina, mineroduto e desaguamento. Uma das peculiaridades do circuito de Paragominas é especificação de distribuição granulométrica do produto da moagem, resultado da combinação de especificações de transporte por mineroduto, filtração do concentrado bombeado e critérios de qualidade.

A operação de moagem SAG da Kinross em Paracatu, MG tem por base o projeto de expansão da usina de processamento de minério aurífero de baixo teor. Como forma de aumentar a reserva lavrável e a economicidade da operação, a segunda usina de

beneficiamento foi implantada em 2005 com capacidade nominal de 41 MTPA. O novo circuito, configurado de modo SAB, incluiu um moinho de SAG de 38 ft de diâmetro, dotado de motor com potência de 20 MW, além de quatro moinhos de bolas, sendo dois com diâmetro nominal de 24 ft e dois com diâmetro nominal de 26 ft, perfazendo 76 MW de potência instalada nos cinco moinhos. O circuito da Kinross Paracatu apresenta peculiaridades interessantes, principalmente a elevadíssima capacidade de transporte interno do moinho SAG, cuja vazão de alimentação nova ultrapassa 5.000 t/h de sólidos, além da combinação de um moinho SAG e quatro moinhos de bolas. A distribuição de potência instalada entre a etapa primária (26%) e a etapa secundária (74%) é rara, e deriva das características do minério processado e dos critérios de projeto, respectivamente baixa tenacidade e produto da moagem com granulometria fina.

O circuito industrial de cominuição de Chapada, da empresa Mineração Maracá, grupo Yamana, em operação desde o ano de 2005 é uma demonstração exemplar da versatilidade da moagem SAG. O minério lavrado apresenta uma variabilidade extrema, com alguns litotipos extremamente friáveis (gnaissinho) e outros muitíssimo tenazes (anfíbólio-xisto). Este cenário seria por si só, um impeditivo para emprego de moagem SAG, pois em teoria haveria variação acentuada de corpos moedores formados pelo próprio minério, o que seria deletério à estabilidade de operação e garantia de desempenho. A solução adotada foi incluir um estágio intermediário de classificação entre as etapas primária e secundária de moagem na configuração SABC, de forma a diminuir a vazão de alimentação deste último. Mediante este recurso, foi possível instalar um único moinho SAG de 34 ft de diâmetro nominal, com motorização de 12,5 MW e um único moinho de bolas com 24 ft de diâmetro nominal, dotado de motorização também de 12,5 MW, para processar os 22 MTPA registrados atualmente.

Outro exemplo de operação de operação brasileira peculiar é a de Pilar de Goiás, instalada no município homônimo e pertencente à Brio Gold. O circuito industrial está configurado como SSSAC, ou seja, moinho SAG em estágio único, com britador de *pebbles*. Trata-se de uma configuração de baixo valor de investimento, se comparada a qualquer alternativa de circuito. A instalação industrial inclui um único moinho SAG com diâmetro nominal de 19 ft e motorização de 3 MW. O minério proveniente de duas minas, ambas com lavra em subsolo, é britado em britador primário de mandíbulas e encaminhado ao moinho SAG, cuja descarga é peneirada. A fração retida é encaminhada ao britador de *pebbles*, cuja descarga retorna ao mesmo moinho SAG, enquanto que a fração passante é bombeada a uma bateria de ciclones, cuja fração grossa retorna ao moinho SAG. Já o *overflow* dos ciclones flui para um espessador e deste para o circuito de lixiviação CIL. No circuito de moagem estão também instalados concentradores centrífugos, para concentração de ouro livre contido no minério. A capacidade do circuito de Pilar de Goiás é de 1,3 MTPA.

PROJETO

Circuitos de cominuição que incluem moagem AG/SAG apresentam diferenças importantes em relação a circuitos tradicionais. Enquanto estes são geralmente configurados de forma multiestagiada, tanto nas etapas de britagem como nas de moagem, aqueles incluem moagem com elevadas relações de redução em um único equipamento. Desta forma, o método de Bond tal como inicialmente proposto (BOND, 1952), ou mesmo ampliado por Rowland (1982), não se aplica no dimensionamento e seleção de moinhos AG/SAG. Tampouco são úteis índices como W_i , mesmo para a moagem em moinhos de bolas que segue a moagem SAG em circuitos industriais configurados em modo SAB ou SABC.

Os métodos existentes para dimensionamento de moinhos AG/SAG podem ser divididos entre os que se baseiam diretamente na energia consumida e os que têm por base modelos fenomenológicos, estes últimos integrados em modelos de balanço populacional (EPSTEIN, 1948).

Dentre os métodos energéticos incluem-se o desenvolvido por Barratt (1989) e, mais recentemente aquele criado por Morrell (2004 (a)). Curiosamente, o método da pirâmide de Barratt tem por base o ensaio de W_i para moinho de barras e relações próprias para cálculo da energia específica de moagem SAG, enquanto o método de Morrell parte da equação de Bond, porém inclui ensaios específicos e patenteados para caracterização de amostras.

Modelos fenomenológicos são baseados essencialmente em balanços de massas das várias frações granulométricas que compõem a carga de minério de moinhos AG/SAG. O equilíbrio da massa de frações granulométrica individuais é modulado pela respectiva cinética de quebra, que assim representa os fenômenos envolvidos na moagem. Exemplos desta classe de modelos são os de Leung (1987), Morrell (2004 (b)), Delboni Jr. (1999) e, mais recentemente, o de Bueno (2013), este último com abordagem multicomponente, ou seja, moagem de partículas contendo composições variadas de diferentes minerais.

Embora haja diferenças significativas entre as várias categorias acima listadas, modelos continuam sendo enormes simplificações da realidade. Mesmo modelos sofisticados como os baseados no Método dos Elementos Discretos (CARVALHO, 2013) necessitam ajustes para que representem com alguma fidelidade a dinâmica da carga no interior de moinhos, assim como os fenômenos de fragmentação que ali ocorrem em função das muitas variáveis presentes e inerentes à moagem.

Independentemente da origem, modelos de moagem são baseados em dois grupos de parâmetros. O primeiro está relacionado às características do minério a ser moído, enquanto o segundo grupo refere-se às características do equipamento de moagem e condições de operação deste.

Dentre os vários ensaios criados no sentido de caracterizar amostras para a moagem AG/SAG destacam-se os seguintes:

- *MacPherson Test - MPT* (MacPherson, 1976);
- *Advanced Media Competency Test – AMCT* (Siddall, Henderson e Putland, 1996);
- *JK Pendulum Test*, depois *JK Drop Weight Test – DWT* (Napier-Munn et al, 1996);
- *Starkey Test*, depois *SPI Test®* (Starkey and Dobby, 1996);
- Ensaio DWT Reduzido – DWT-R (Chieregati, 2001);
- *SMC Test®* (Morrell, 2004 (c));
- *SAG Mill Design Test® - SMDT* (Starkey, Hindstrom e Nadasdy, 2006).

A principal distinção técnica entre os ensaios listados acima consiste no emprego de partículas individuais ou população de partículas. Os ensaios MPT, AMCT, SPI, SMDT têm por objetivo determinar a energia específica requerida para moagem AG/SAG, utilizando-se de moinhos de laboratório. Já os ensaios de pêndulo, DWT, DWT-R e SMC quantificam a tenacidade da amostra mediante a calibração de uma relação entre energia aplicada e fragmentação resultante de partículas individuais.

Outra diferença importante entre os ensaios listados acima é a de caráter comercial, pois há ensaios patenteados (SPI, SMC e SMDT), que assim só podem ser conduzidos por laboratórios licenciados, enquanto os demais são de domínio público.

Relações diretas entre energia específica consumida na moagem SAG e o índice resultante do ensaio DWT (A^*b) fornecem estimativas preliminares, e assim bastante úteis para etapas conceituais de projetos de circuito de moagem. A Figura 7 apresenta o gráfico entre estas duas variáveis, conforme proposto originalmente por Veillette e Parker (2005), apud Bailey et al. (2009).

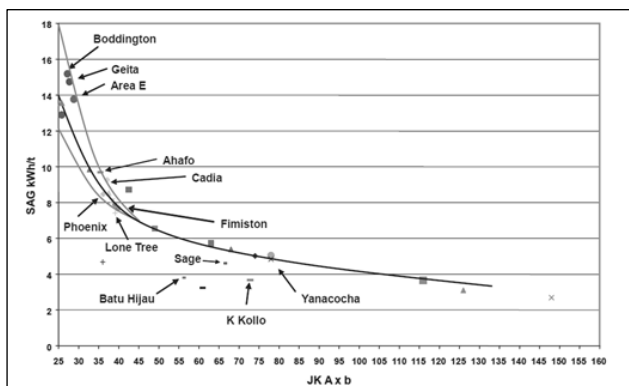


Figura 7. Energia específica de moagem SAG em função do parâmetro A^*b . (VEILLETTE e PARKER, 2005, apud BAILEY et al., 2009).

No mesmo gráfico da Figura 7 nota-se que a energia específica de moagem SAG varia entre um máximo 15 kWh/t para minérios com índice A*b próximo a 25, portanto extremamente tenazes, até um mínimo de cerca de 2,5 kWh/t para minérios com índice A*b superior a 140, portanto muito friáveis.

Há muita controvérsia na literatura específica sobre a eficiência e eficácia de cada método ou modelo matemático disponível para representar a moagem em moinhos AG/SAG. No entanto, qualquer que seja o modelo adotado, a orientação é validá-lo com base em operações industriais, de forma a compor uma base de dados abrangente e robusta. A contínua ampliação de dados validados levará a um conhecimento mais sólido das operações e, sobretudo, das limitações do modelo adotado.

O dimensionamento e seleção de moinhos AG/SAG segue a evolução típica de projetos de engenharia de circuitos industriais de beneficiamento, com etapas preliminares, intermediária e final, cada qual apresentando peculiaridades, principalmente no que se refere a conhecimentos e recursos para o próprio projeto.

Em etapas preliminares de projetos *greenfield*, o conhecimento do depósito e mesmo do minério é geralmente muito limitado. Nestas etapas não há grande disponibilidade de amostras e os recursos para a engenharia de projeto são também relativamente baixos, aliados à dificuldades logísticas, estratégicas, políticas, ambientais, além de restrições de prazo. Neste contexto, são conduzidos ensaios com amostras de litotipos predominantes, bem como simulações condicionadas a várias premissas e critérios de projeto ainda não consolidados, exemplo da escala de produção do circuito. É comum em etapas preliminares serem considerados duas ou mais configurações de circuitos de cominuição, conhecidos como estudos de *trade-off*.

Os modelos energéticos para dimensionamento de moinhos SAG estão geralmente contidos em planilhas, criadas a partir do método preconizado pelo respectivo autor. Já modelos fenomenológicos de balanço populacional encontram-se em simuladores, a exemplo do JKSimMet.

Após estudos preliminares de viabilidade técnica e econômica, o projeto de engenharia entra em etapas intermediárias, nas quais geralmente uma ou duas alternativas de circuitos de cominuição serão avaliadas em detalhe. Nestas etapas estão tipicamente presentes campanhas para geração de amostras de grande volume, quer através de campanhas de sondagens mais abrangentes e profundas, execução de poços, trincheiras, galerias, lavra experimental entre outros. Tais amostras são empregadas em campanhas de ensaios de caracterização, cujo produto é empregado nos modelos selecionados, de forma a estabelecer espectros de variação de desempenho dos circuitos de cominuição e equipamentos selecionados. Estes estudos, conhecidos como variabilidade, são frequentemente associados à sequência de lavra dos tipos de minério representados pelas respectivas amostras, gerando assim capacidades para períodos discretos (anuais, quinquenais, décadas) dos circuitos considerados e equipamentos

selecionados. É comum também escalonar-se a aquisição e instalação de equipamentos de cominuição em função, geralmente, do declínio de produção, quer seja resultante do aumento da tenacidade do minério lavrado, ou mesmo da diminuição de teores dos minérios processados.

Audidores de projetos geralmente requerem demonstrações das rotas selecionadas de processo de cominuição, para a decisão técnico-econômica final de viabilidade e rentabilidade do projeto. Estas demonstrações são particularmente determinantes na maioria de projetos financiados por bancos ou outras instituições. A forma mais adequada de demonstrar o desempenho da configuração de circuito a ser adotada no projeto, em particular para a moagem AG/SAG, é a condução de ensaios contínuos em campanha piloto.

Após a realização da campanha piloto, que pode também envolver ensaios de concentração, lixiviação e desaguamento, os resultados são empregados para calibração mais acurada dos modelos empregados, de forma a emprega-los em estudos detalhados de variabilidade de desempenho do processo. Neste ponto são dimensionados e, eventualmente, escalonados os equipamentos, para a tomada de decisão final sobre a implantação do projeto.

Os riscos técnicos associados à moagem AG/SAG são normalmente dirimidos em campanhas piloto, especialmente em países como o Brasil, que até há cerca de uma década não contavam com tradição de projetos com moagem de minérios em grande escala.

Como sinal de avanço, competência e confiabilidade da engenharia nacional brasileira, há instalações de moagem SAG implantadas no Brasil, sem execução de campanhas piloto de moagem, como a atual operação de Pilar de Goiás, do grupo Yamana.

CAMPANHAS PILOTO DE MOAGEM AG/SAG

Campanhas piloto são planejadas e executadas com objetivos de desenvolver, consolidar ou demonstrar a operação e o desempenho de moagem AG/SAG, para aplicação em projetos de novas instalações, ou ainda melhoria de desempenho de circuitos existentes. Além de gerar confiabilidade ao processo adotado, a execução de campanhas piloto resulta na geração de amostras para emprego em ensaios correspondentes a etapas posteriores à cominuição, exemplo de deslamagem, concentração, lixiviação, ou mesmo desaguamento. Pode-se inclusive gerar amostras para potenciais clientes conduzirem testes piro ou hidrometalúrgicos nos concentrados.

Embora haja benefícios inegáveis, qualquer campanha piloto requer quantidade relativamente elevada de recursos, associados à quantidade de amostras necessárias, sua obtenção, preparação e transporte, além de técnicos envolvidos, contratação de instituição que possa efetivamente conduzir a campanha, entre outros.

Amostras submetidas a ensaios são geralmente formadas por composições (*blends*) de diferentes tipos de minério, que assim representem períodos estipulados de alimentação da futura usina, ou mesmo amostras que representem extremos em características selecionadas, a exemplo de granulometria, tenacidade, densidade ou abrasividade.

Embora não haja padrões para moinhos piloto, o equipamento mais empregado para ensaios de moagem AG/SAG é o da marca Koppers, com dimensões nominais de 6 ft de diâmetro por 2 ft de comprimento, acionado por motor de 20 kW. Este valor de diâmetro é aceito pela indústria como o mínimo, para que a alimentação do equipamento inclua fragmentos com até 0,2 m (cerca de 8") de tamanho. O comprimento relativamente pequeno em relação ao diâmetro (aspecto 3:1) determina, por um lado vazão relativamente baixa de alimentação e por outro tempo de residência pequeno. Os moinhos Koppers com tais dimensões são equipamentos empregados e consagrados há décadas para campanhas piloto de moagem AG/SAG. No Brasil há um único equipamento deste tipo, que pertence ao CETEM.

Para que possam ser empregados em campanhas piloto, os moinhos devem ser monitorados continuamente em termos de potência consumida e, sobretudo, peso da carga total durante a sua operação.

A potência de operação do moinho é registrada como valor bruto, do qual deve ser descontada a potência em vazio, para que se obtenha a potência líquida de moagem. O valor médio desta última será aquele considerado para cálculo de energia específica do ensaio (kWh/t).

A necessidade de monitoramento da carga total do moinho é absolutamente fundamental para validação de ensaios, uma vez que o critério de equilíbrio e estabilidade da operação de moinhos AG/SAG tanto piloto como industriais, é o volume da carga de minério do moinho. Diferentemente de moinhos de barras ou bolas, nos quais a carga é estável, em moinhos AG/SAG a parte mais grossa da carga de minério exerce função de corpos moedores. Assim, se a carga de minério apresentar tendência, ainda que lenta, de aumento, a vazão de alimentação deverá ser reduzida para evitar sobrecarga ou mesmo entupimento do moinho. Analogamente, se a carga do moinho apresentar tendência de queda, a vazão de alimentação deverá ser aumentada, de forma a evitar a exposição do revestimento a impactos de bolas de aço.

Como a carga de minério na câmara de moagem deve ser constante, em equipamentos piloto a sua estabilidade é medida através de células de carga, que indicam, em tempo real, a massa total de bolas e minério contida em moinhos AG/SAG. A massa total da carga deverá corresponder a um volume previamente estipulado para o teste, geralmente 25% do total da câmara de moagem. A tarefa do operador deste tipo de moinho é alimenta-lo de forma dosada, mantendo assim constante a massa da carga.

A natureza variável da alimentação, assim como a sua granulometria relativamente grossa, implica na impossibilidade de se utilizar alimentadores em campanhas piloto de moagem AG/SAG. Uma forma prática e eficaz é a preparação de bateladas individuais com 100 kg cada, conforme a distribuição granulométrica estipulada, para alimentação dosada do moinho, conforme a indicação da célula de carga. Este sistema resulta que não se pode fixar de antemão a vazão de alimentação do moinho piloto; esta será obtida mediante o cômputo do número de bateladas alimentadas em um determinado intervalo de tempo.

Operações de moagem AG/SAG em planta piloto são geralmente conduzidas em etapas, uma vez que raramente o moinho de bolas apresenta capacidade suficiente para que o circuito opere de forma integrada. O produto da etapa AG/SAG é normalmente empilhado e, posteriormente, homogeneizado para alimentação dos ensaios de moagem em moinho de bolas.

As principais variáveis que podem ser ajustadas em campanhas piloto de moagem AG/SAG são as seguintes:

- abertura e área aberta da grelha;
- abertura e área aberta das *pebble ports*;
- carga e distribuição de tamanho das bolas de aço;
- circuito aberto ou fechado, com inclusão de britador de *pebbles*;
- volume total da carga;
- velocidade de rotação do moinho;
- distribuição granulométrica da alimentação nova.

Uma campanha piloto é normalmente composta por vários ensaios de curta duração (6 h) nos quais são investigadas diversas combinações entre as variáveis listadas acima. Após análises de desempenho dos ensaios de curta duração, seleciona-se uma configuração de circuito e as respectivas condições de operação, para que então seja conduzido um ensaio de longa duração (12 h), planejado para comprovação de resultados.

A título de exemplo, a Tabela 4 apresenta o sumário dos dados obtidos a partir da execução de uma campanha piloto de moagem AG/SAG, que incluiu a realização de seis ensaios de curta duração, seguidos de um ensaio final de longa duração.

Tabela 4. Sumário dos resultados – campanha de moagem AG/SAG em planta piloto.

Ensaio	Circuito	Amostra	Granulometria de Alimentação	Velocidade de Rotação do Moinho (% da Velocidade Crítica)	Carga de Bolas (%)	Número de Pebble Ports Abertas	Carga Circulante Pebbles (%)	Potência Líquida (KW)	Vazão de Alimentação (Kg/h)	Consumo Energético Específico (kWh/t)	F ₈₀ (mm)	P ₈₀ (mm)	Porcentagem Passante em 0,15 mm	Energia consumida por tonelada passante em 0,15 mm (kWh/t)	
													Alimentação	Produto	
SAG-1	SABC	Compacto	Média	79	10	4	22,4	11,3	1621	6,97	155	6,03	7,4	32,4	27,9
SAG-2	ABC	Compacto	Média	79	0	4	28,6	8,8	934	9,42	155	3,54	7,4	41,9	27,3
SAG-3	SABC-A	Compacto	Média	79	10	4	18,1	11,7	1778	6,58	155	4,90	7,4	37,6	21,8
SAG-4	SABC	Blend 70/30	Média	79	10	4	18,3	12,0	2363	5,08	139	4,89	14,1	39,9	19,7
SAG-5	SABC	Compacto	Fina	79	10	4	25,7	11,9	1890	6,30	142	7,29	11,1	29,7	33,9
SAG-6	SABC	Compacto	Grossa	79	10	4	28,8	12,0	1583	7,58	163	7,03	3,8	31,3	27,6
SAG-7	SABC	Compacto	Média	79	10	4	24,3	11,7	1674	6,99	155	6,80	7,4	32,0	28,4

A mesma Tabela 4 indica que os ensaios foram conduzidos nas seguintes condições:

- três configurações de circuito, SABC, SABC-O e ABC;
- três granulometrias distintas de alimentação nova do circuito;
- velocidade de Rotação do Moinho: 79% da velocidade crítica;
- carga de bolas: 10% no modo SAG;
- número de *pebble ports* abertas: quatro.

Para cada ensaio está registrada a respectiva potência líquida do moinho, bem como vazão de alimentação nova de sólidos, carga circulante de *pebbles*, além de P_{80} e porcentagem passante na malha 0,15 mm da alimentação nova e do produto do circuito, este último referente ao *undersize* do *trommel* acoplado ao moinho.

As análises de desempenho foram baseadas essencialmente em dois índices, a saber: consumo energético específico (CEE, em kWh/t) do ensaio, bem como energia (kWh) por tonelada gerada de fração passante em 0,15 mm. O primeiro índice é o quociente da divisão da potência líquida (kW) do moinho pela vazão de alimentação nova do circuito (t/h). Trata-se assim de um índice que não inclui o aproveitamento de energia de cominuição. Já o segundo índice foi criado para este último fim, ou seja, constitui-se na energia consumida para gerar uma tonelada de material passante na malha 0,15 mm (CEE_{0,15} em kWh/t), esta última a granulometria final do circuito. O cálculo de tal índice é obtido mediante a divisão do consumo energético específico pela diferença percentual entre porcentagens passantes no produto e na alimentação do moinho da fração granulométrica selecionada.

Nota-se pela Tabela 4 que a vazão de alimentação do circuito variou entre 934 e 2.363 kg/h, enquanto os valores extremos de potência líquida foram 8,8 e 12,0 kWh/t, respectivamente para os mesmos ensaios, SAG-2 e SAG-4. Segue-se que o menor valor de consumo energético específico de moagem (CEE) foi assim registrado para o ensaio SAG-4 (5,08 kWh/t), enquanto que o maior foi aquele correspondente ao ensaio SAG-2 (9,42 kWh/t).

Em termos de aproveitamento de energia, o melhor desempenho em termos de CEE_{0,15} foi do ensaio SAG-4 (19,7 kWh/t), enquanto que o pior foi o ensaio SAG-5 (33,9 kWh/t).

As Figuras 8, 9, 10 e 11 apresentam, a seguir, comparações detalhadas para as variáveis ensaiadas.

A Figura 8 ilustra os desempenhos da moagem para as configurações SABC e ABC de moagem, tanto em termos do CEE como do CEE_{0,15}. Nota-se assim que o CEE para a moagem AG (9,42 kWh/t) é muito superior ao valor correspondente obtido para moagem SAG (6,97 kWh/t). Portanto, o consumo de energia da moagem AG foi 35%

superior ao da moagem SAG, mantendo-se inalteradas todas as demais condições dos ensaios. Já o índice $CEE_{-0,15}$ indica que praticamente não houve variação de eficiência energética entre os dois modos de operação do moinho.

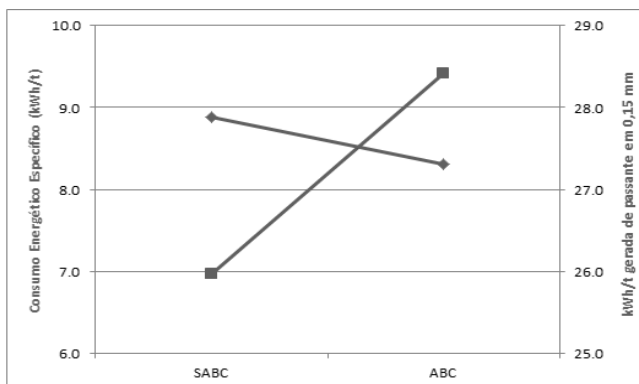


Figura 8. Influência da moagem SAG e AG no desempenho do circuito.

Os resultados acima implicariam em moinho AG significativamente maior do que o moinho SAG para a mesma aplicação, pois além de necessitar de maior potência para processar a mesma vazão, moinhos AG apresentam menor densidade de carga em relação a moinhos SAG, necessitando assim de maiores volumes para puxar a mesma potência. Por outro lado, as vantagens da moagem AG neste caso seriam a necessidade de moinhos de bolas relativamente menores, pois a geração de produto final (<0,15 mm) foi maior para a moagem AG (41,9%), em relação à moagem SAG (32,4%), além da ausência de corpos moedores na moagem primária, reduzindo significativamente os custos de operação do futuro circuito industrial.

A Figura 9 apresenta os desempenhos da moagem SAG para as configurações SABC e SABC-A de moagem, tanto em termos do CEE como do $CEE_{-0,15}$. A diferença está no encaminhamento do produto da britagem de *pebbles*, ou seja, retorna ao moinho SAG na configuração SABC ou segue para o moinho de bolas na configuração SABC-A. Nota-se que o CEE é pouco mais alto para a configuração SABC em relação à SABC-A, respectivamente 6,97 kWh/t e 6,58 kWh/t. Portanto, a abertura do circuito acarretou em queda de apenas 6% no consumo de energia da moagem SAG. Já o índice $CEE_{-0,15}$ indica 27,9 kWh/t para a configuração SABC e 21,8 kWh/t para a configuração SABC-A, ou seja, houve um melhor aproveitamento de energia para geração de produto final da segunda em relação à primeira.

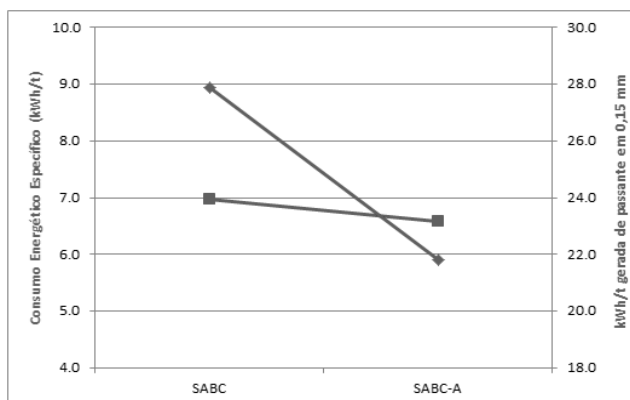


Figura 9. Influência da configuração SABC e SABC-A no desempenho do circuito.

Em termos de potência instalada total do circuito, a configuração SABC-A requer menor potência no moinho SAG e também menor potência na moagem em moinho de bolas, pois apresenta maior quantidade de finos no *undersize* da peneira do moinho SAG em relação à configuração SABC, respectivamente 37,6% e 32,4% passantes na malha 0,15 mm.

A Figura 10 apresenta os desempenhos da moagem SAG, tanto em termos do CEE como do CEE_{0,15}, para as amostras denominadas minério Compacto e Blend 70/30, esta última representando a combinação percentual entre os tipos Compacto e Friável. Como a amostra Blend 70/30 inclui minério mais friável, os resultados indicaram tanto menor CEE como CEE_{0,15} para esta amostra em relação àquela formada integralmente por minério Compacto. Enquanto o CEE para moagem SAG do minério Compacto foi 6,97 kWh/t, para o Blend 70/30 o valor foi 5,08 kWh/t, portanto uma queda de 27% do segundo em relação ao primeiro. Em termos do índice CEE_{0,15} houve também queda acentuada, de 27,9 kWh/t para 19,7 kWh/t, respectivamente para minério Compacto e Blend 70/30. Neste caso a queda foi ainda maior, de 29%.

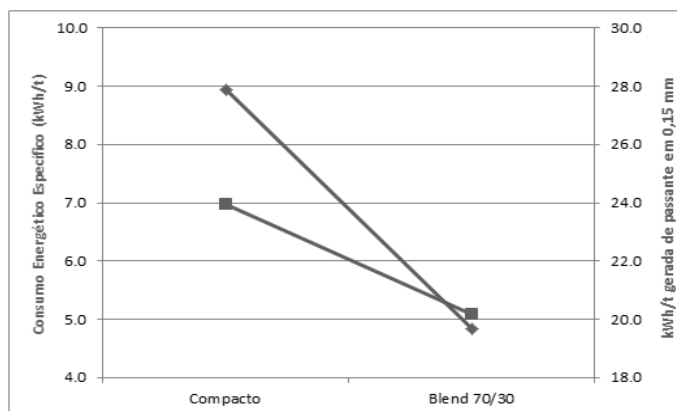


Figura 10. Influência do tipo de amostra alimentada no desempenho do circuito.

Neste caso, a implicação principal das diferenças de consumo de energia e desempenho em relação à geração de finos é o ajuste das variáveis de operação do moinho SAG para cada uma das condições. Assim, um dimensionamento do moinho SAG efetuado com base no desempenho do minério Compacto implicaria em operação com menor carga de minério para alimentação de Blend 70/30. Para evitar impactos excessivos de bolas contra o revestimento do moinho, a rotação do moinho deverá ser reduzida ou, em períodos mais longos, a operação deverá manter mais baixo o nível da carga de bolas. Já o dimensionamento do moinho SAG com base no desempenho do Blend 70/30 resultaria em diminuição de capacidade do circuito para processar minério Compacto. Alternativamente, poder-se-ia adquirir um equipamento que suportasse elevada carga de bolas, bem como motorização com potência mais elevada para operar com alimentação integral de minério Compacto.

A Figura 11 apresenta os desempenhos da moagem SAG para a amostra denominada minério Compacto, segundo três granulometrias distintas de alimentação nova do circuito, tanto em termos do CEE como do $CEE_{0,15}$. Nota-se uma redução do índice CEE de F_{80} de 163 mm para 155 mm e deste para 142 mm, respectivamente de 7,58 kWh/t, 6,97 kWh/t e 6,03 kWh/t. A redução entre os valores extremos desta série foi de 17%. No entanto, houve um aumento progressivo da energia necessária para geração de produto final ($CEE_{0,15}$), conforme a diminuição de F_{80} de alimentação nova do moinho SAG. Uma possível explicação para tal fenômeno é que a diminuição da quantidade de material grosseiro na carga do moinho acarreta na redução da geração de finos pelo mecanismo de abrasão do próprio material grosseiro. Como a quantidade de finos gerados diminui em maior taxa do que o decréscimo da CEE, a energia necessária para geração de produto final aumenta progressivamente com a diminuição da granulometria de alimentação nova.

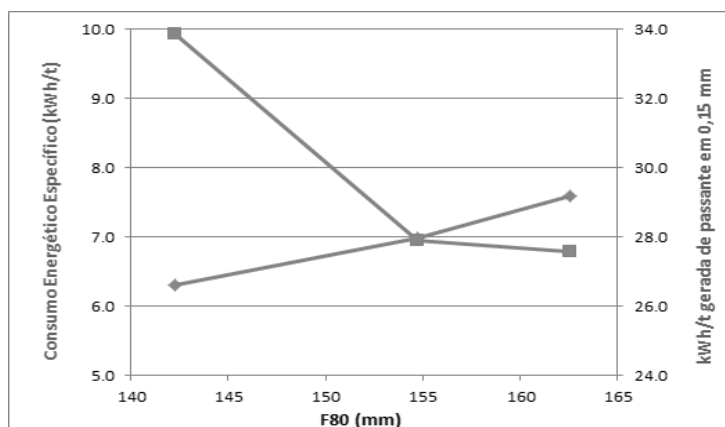


Figura 11. Influência da granulometria de alimentação no desempenho do circuito.

A menos de diminuição da abertura de descarga do britador primário, ou mesmo instalação de britagem secundária, a obtenção de granulometrias mais finas na alimentação nova de moinhos SAG é conseguida mediante aumento de energia específica (razão de carga) no desmonte do maciço rochoso. Modificações do plano de fogo podem assim gerar mais finos e, portanto, beneficiar significativamente o projeto do circuito de cominuição, ou mesmo melhorar o desempenho de operações existentes.

BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA

BAILEY, C.; LANE, G.; MORRELL, S. and STAPLES, P. What Can Go Wrong in Comminution Circuit Design?. Tenth Mill Operators' Conference Adelaide, SA, 12 - 14 October 2009

BARRATT, D.J. 1989. An update on testing, scale-up and sizing equipment for autogenous and semi-autogenous grinding circuits, in Proceedings Sag Mill Conference 1989, pp 25-46 (University of British Columbia: Vancouver).

BOND, F.C. 1952. The third theory of comminution. Transactions of American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, v. 193, p. 484-94.

BUENO, M.P. 2013. Development of a multi-component model structure for autogenous and semi-autogenous mills. Ph.D. Thesis, University of Queensland, Australia.

CARVALHO, R.M. 2013. Mechanistic modeling of semi-autogenous grinding. Tese de doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

CHIEREGATI, A.C. *Novo Método de Caracterização Tecnológica para Cominuição de Minérios*. São Paulo, 2001, 148p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

DELBONI Jr., H. 1999. A load interactive model of AG/SAG mills. Ph.D. Thesis, University of Queensland, Australia.

EPSTEIN, B. Logarithmico – Normal distribution in breakage of solids. INDUSTRIAL ENGINEERING CHEMISTRY, 40 (1948) 2281-91.

GRAHAN, K.L. 1907. Notes on some recent improvements in tube mill practice. Journal. Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa.

JONES, S.M.; FRESKO, M. 2011. Autogenous and semi-autogenous mills 2010 update. in proceedings Autogenous and Semi-Autogenous Grinding Technology (University of British Columbia: Vancouver).

LEUNG, K. 1987. An energy based ore specific model for autogenous and semi-autogenous grinding. Ph.D. Thesis, University of Queensland, Australia.

MACPHERSON, A.R. 1976. A simple method to predict the autogenous mill requirements for processing ore from a new deposit. SME Preprint No. 76-B-327. Littleton, CO: SME.

MORRELL, S. (a) An alternative energy–size relationship to that proposed by Bond for the design and optimization of grinding circuits. IJMP - International Journal of Mineral. Process, 74 (2004) 133-141.

MORRELL, S. 2004 (b). A new autogenous and semi-autogenous mill model for scale-up, design and optimization. Minerals Engineering, v. 17/3, pp 437-445.

ROWLAND Jr. C. Selection of rod mills, ball mill, pebble mill and regrind mills. In: Andrew L. Mular and Gerald V. Jergensen, II (Editores) Design and installation of comminution circuits. Society of Mining Engineers. p. 393-438. 557p. New York, 1982.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

CONFERÊNCIAS SAG 1989, 1996, 2001, 2006, 2011 e 2015. International autogenous and semiautogenous grinding and high pressure Grinding roll technology, Vancouver, Canada.

MORRELL, S. 2004 (c). Predicting the specific energy of autogenous and semiautogenous mills from small diameter drill core samples, Minerals Engineering, v. 17/3, pp. 447-451.

NAPIER-MUNN, T.J.; MORRELL, S.; MORRISON, R.D. and KOJOVIC, T. Mineral cominution circuits. Their Operation and Optimisation, Julius Kruttchintt Mineral Research Centre/University of Queensland, 1996 (JKMRC Monograph Series in Mining and Mineral Processing).

SIDDALL, B. HENDERSON, G. PUTLAND, B. 1996. factors influencing sizing of SAG mills from drill core samples, in proceedings Autogenous and Semi-Autogenous Grinding, pp. 463-473 (University of British Columbia: Vancouver).

STARKEY, J. and DOBBY, G. 1996. Application of the Minnovex SAG power index at five Canadian SAG plants, in roceeding Autogenous and Semi-Autogenous Grinding, pp. 345-360 (University of British Columbia: Vancouver).

STARKEY, J.; HINDSTROM, S. and NADASDY, G. 2006. SAG design testing: What it is and why it works, in Proceeding Autogenous and Semi-Autogenous Grinding, pp IV-240 (University of British Columbia: Vancouver).