

CAPÍTULO 2

COMINUIÇÃO

*Homero Delboni Jr.**

1. INTRODUÇÃO

A operação unitária de cominuição está presente na maioria dos empreendimentos mineiros. Assim, com exceção de minérios naturalmente cominuídos, a mineração inclui etapas de fragmentação, englobando desde o desmonte na mina até produtos finais, ou ainda intermediários para etapas subseqüentes de transporte, concentração física de minerais ou metalurgia extrativa.

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

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

Os custos associados à fragmentação de minérios são função, entre outros aspectos, da granulação requerida e acompanham o consumo de energia específica. Seguindo a divisão clássica da fragmentação em operações de desmonte, britagem e moagem, a energia específica aumenta em uma ordem de magnitude nessa seqüência. 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 kWh/t, atingindo valores da ordem de 10 kWh/t em circuitos de moagem. Em etapas conhecidas como pulverização, moagem fina ou micronização, o consumo específico pode atingir até 100 kWh/t.

Em função do impacto em aspectos econômicos e ambientais, o desempenho de processos de fragmentação é objeto de estudos sistemáticos há cerca de 150 anos. O estabelecimento das assim chamadas "leis de cominuição" é praticamente contemporâneo às primeiras patentes de equipamentos de britagem. Os debates acalorados entre Rittinger e Kick demonstravam, sobretudo, as dificuldades de se parametrizar, de maneira abrangente e relativamente simples, a energia associada a eventos de fragmentação.

* Prof. Doutor da EPUSP – Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Minas da USP – Universidade de São Paulo.

Seguindo essa mesma linha de abordagem, Bond propõe uma equação paramétrica no final dos anos 1950 (Bond, 1952) que atingiria uma sobrevida espetacular. Além de parâmetro usado no dimensionamento dos moinhos, o Work Index de Bond transformou-se em um índice amplamente empregado para caracterizar minérios quanto à cominuição.

Ainda hoje, as leis de Kick, Rittinger e Bond fornecem boas estimativas preliminares para cálculo de energia necessária às etapas de britagem, moagem e moagem fina, respectivamente. Os três pesquisadores criaram assim modelos empíricos, no melhor sentido do termo, ou seja, resultam de criterioso aprendizado tendo por base a extensiva observação de eventos individuais e coletivos de fragmentação de minérios.

Em particular as contribuições de Bond resultaram num método de cálculo de potência consumida por moinhos, ensaios de caracterização de minérios quanto à abrasão e britagem, além de cálculo de tamanhos máximos de corpos moedores.

Na década de 1980, um relatório do *U.S. National Materials Advisory Board* para melhoria do desempenho energético de circuitos de cominuição estimou que 1,5% de toda a energia elétrica gerada naquele país era utilizada em circuitos industriais de britagem e moagem, incluindo a energia empregada para produção de corpos moedores. O mesmo estudo indicou que essas melhorias poderiam acarretar em diminuição de 20 MWh anuais, que a preços atuais significariam cerca de 109 US\$.

O aporte de recursos que se seguiu nessa década propiciou a consolidação de grupos e instituições dedicadas à pesquisa do tema, não apenas nos E.U.A., mas também no Canadá e Austrália. O foco das linhas de pesquisa foi desenvolver modelos matemáticos para melhor entendimento de mecanismos de cominuição e aplicação em equipamentos industriais.

Em paralelo, os esforços da indústria de fabricação de equipamentos de cominuição resultaram em fortes crescimentos nos tamanhos de britadores e, principalmente, moinhos. Esse impulso dos fornecedores de equipamentos foi motivado pelo surgimento de muitas minas de ouro e cobre. Em ambos os casos, o cenário era de forte demanda dos metais e exaustão de jazidas com alto teor, o que levou as mineradoras a optar pela lavra de depósitos com teores mais baixos, porém, sob elevadas taxas de produção.

O cenário que dominou as décadas subseqüentes foi de grupos de pesquisa dedicados a dois temas principais. O primeiro tema foi o desenvolvimento de métodos mais elaborados de previsão de desempenho de equipamentos e, o segundo, liderado pela indústria de equipamentos, com dedicação ao projeto e construção de equipamentos com maiores potências instaladas.

Atualmente, os resultados mais significativos dos esforços de pesquisa e desenvolvimento são simuladores integrados, amplamente empregados nas áreas de projeto e melhoria de desempenho de circuitos de britagem e moagem. Como as pesquisas, na sua

maioria foram subsidiadas pela própria indústria, os avanços se deram na modelagem de equipamentos mais comuns em usinas industriais de minérios metálicos. Áreas como tratamento dos minerais industriais que incluem, por exemplo, britagem por impacto, moagem a seco e micronização, receberam proporcionalmente menor atenção.

Atualmente a principal vertente de pesquisas aplicadas à fragmentação constitui-se na assim denominada visão holística do processo, qual seja, integração das operações de britagem e moagem ao desmonte, bem como a previsão de grau de liberação do produto moído.

A integração com as operações de desmonte surgiu durante a década de 1990 em vários estudos de caso (Bearman, 1995) sobre a influência da fragmentação no desmonte sobre o desempenho de circuitos de britagem. Em A motivação de tais estudos foi o aumento de produção de circuitos industriais e/ou a melhoria na qualidade de produtos.

Os métodos conhecidos como Mina-Usina incluem rotinas de previsão da curva de desmonte com base nas características da rocha e do maciço rochoso, plano de fogo, características dos explosivos, entre as principais variáveis. O minério desmontado é então simulado em etapas de britagem, seguidas de moagem.

Já em 1998 o JKMRRC da Austrália provia serviços em bases comerciais do então recém criado programa *Mine-to-Mill*. Desde então são registrados vários relatos de aumentos significativos de produção resultantes da implementação de programas semelhantes.

A previsão do grau de liberação é uma etapa que, apesar de complexa por natureza, resulta em avanços importantes, na atualidade. Nesse caso a caracterização tecnológica tem importância fundamental, notadamente na definição da textura do minério e sua estrutura cristalina. A forma de aplicação de energia e sua relação com o fraturamento determinam a liberação das espécies presentes.

A quantificação da liberação dos minerais presentes é a etapa que deverá ligar modelos de equipamentos de cominuição aos de concentração, como flotação e métodos densitários.

Na área de equipamentos estão consolidadas operações que contam com britadores cônicos com 1000 hp de potência instalada, que proporcionam relações de redução de 8:1, moinhos SAG com potência instalada de 22 MW que processam até 6000 t/h de alimentação nova, bem como moinhos de bolas com 26 pés de diâmetro e potência instalada de 20 khp.

As usinas de britagem e moagem de grande capacidade implementadas na última década apresentam poucos equipamentos por operação unitária, grande potência instalada e alta capacidade de processamento, contrastando assim com configurações típicas de usinas dos anos 1970 e 1980, quais sejam, britagens multi-estagiadas e muitas linhas de moagem operando em paralelo.

Outros equipamentos que merecem destaque pelas respectivas evoluções são os britadores de eixos dentados (*Sizers*) e os britadores de impacto com eixo vertical (*VSI – vertical shaft impactors*).

Os primeiros são evoluções de equipamentos tradicionalmente empregados em britagem de carvão, que mediante o reforço estrutural e a inclusão de pontas de metal duro são atualmente aplicados em britagem primária e secundária de minérios com resistência intermediária e alta. Os britadores de impacto com eixo vertical têm aplicação em etapas quaternárias de britagem ou ainda na produção de areia artificial. A aplicação desses equipamentos deve considerar aspectos econômicos de desgaste e magnitude de carga circulante.

Uma comparação simples entre os equipamentos de cominuição instalados em usinas atuais e aqueles implementados há 25 anos, mostra os resultados de evoluções em equipamentos pré-existentes, ou seja, os princípios empregados e a concepção mecânica de moinhos e britadores são essencialmente os mesmos.

Poucos são os equipamentos que podem ser considerados revolucionários, contrastando assim com a tendência de evolução contínua. Dentre os novos equipamentos destaca-se o moinho de rolos de alta pressão (*HPGR- High Pressure Grinding Rolls*).

Mesmo que não seja considerada totalmente original, dada a existência de precursores, é inegável que as inovações incorporadas aos HPGR ampliaram o espectro de aplicações. Dentre os fatores que contribuíram para o crescente sucesso do moinho de rolos de alta pressão estão a faixa granulométrica do produto, consumo energético e a criação de micro-fissuras que proporcionam a diminuição da resistência do produto e/ou maior acessibilidade à lixiviação de minérios portadores de metais preciosos. Esses aspectos serão abordados em detalhe nas próximas seções do presente capítulo.

A área de controle de processos de cominuição apresentou um crescimento surpreendente nas últimas duas décadas, acompanhando assim pelo desenvolvimento dos computadores. Se na década de 1970 os sistemas mais modernos eram aplicados a malhas simples de controle, atualmente os sistemas especialistas incluem técnicas sofisticadas como inteligência artificial, redes neurais etc. Esses sistemas são aplicados com sucesso em usinas industriais de cominuição, em controles otimizantes de malhas isoladas ou de processos integrados.

2. MOINHOS DE ROLOS DE ALTA PRESSÃO

Este equipamento foi inventado com base em estudos de física das fraturas conduzidos em partículas individuais e leitos de partículas pelo prof. Klaus Schöenert em 1979-80. As primeiras prensas de rolos industriais foram instaladas em 1985-86 na indústria cimenteira para fragmentação de farinha crua e clínquer.

As primeiras tentativas de emprego do equipamento em britagem de minérios resultaram em desgaste acentuado da superfície dos rolos, gasto este que limitou a aplicação do equipamento a minérios pouco abrasivos ou em operações que justificassem os custos associados como, por exemplo, no processamento de minérios diamantíferos. Nesse caso, a preservação de fragmentos centimétricos pode significar ganhos significativos.

A instalação de moinhos de rolos de alta pressão na usina de Argyle, Austrália, no final da década de 1990, marca o início dessa tendência, que chega atualmente a mais de 25 unidades instaladas nesse setor.

Dentre as primeiras tentativas frustradas de aplicação a minérios resistentes e abrasivos, merece registro a instalação industrial da mina de Sierrita, da Phelps Dodge nos E.U.A. na década de 1990. Nesse caso foram processadas, entre 1995 e 1996, aproximadamente 7 Mt de minério de cobre, índice RCS (Resistência à Compressão Simples) superior a 300 MPa. A baixa disponibilidade mecânica e os custos de operação foram os principais fatores responsáveis pela parada dos equipamentos, a partir de 1997.

Um marco importante nessa área foi o desenvolvimento de uma configuração de revestimento dotada de cravos de metal duro que propiciam a formação de uma camada de minério que fica aderida aos rolos. Os resultados satisfatórios da aplicação desse tipo de revestimento em operações de minério de ferro, proporcionaram um rápido crescimento do equipamento para produção de *pellet feed*.

Esses resultados motivaram a empresa Newmont a instalar, em 2003, uma unidade piloto, na mina de Lone Tree Mine, para testes com minérios auríferos considerados abrasivos e resistentes. Os resultados foram considerados satisfatórios, pois o custo com revestimentos foi estimado em US\$ 0,5/t, compatível, portanto, com instalações de moagem.

Recentemente duas importantes operações industriais resolveram adotar prensas de rolos nos respectivos circuitos industriais, uma na Austrália (Boddington) e outra no Peru (Cerro Verde). Curiosamente, uma dessas operações, a de Cerro Verde localizada próximo a Arequipa no Peru, é de propriedade da Phelps Dodge.

Os progressos registrados ultimamente em campanhas de teste piloto e operações industriais motivaram empresas de mineração a considerar a inclusão de moinho de rolos de alta pressão, como alternativa em circuitos industriais de cominuição. Como o equipamento preenche uma lacuna na indústria, o seu crescimento deverá ser acentuado nos

próximos anos, mesmo considerando-se que já existem mais de 500 unidades em operação.

Com a consolidação em aplicações de minérios competentes e/ou abrasivos, bem como alimentação relativamente grossa, a alternativa de emprego do moinho de rolos de alta pressão em circuitos de britagem e moagem permitirá uma grande flexibilidade na definição de fluxogramas, pois o equipamento poderá ser empregado, tanto em circuitos com moinhos AG/SAG, como em britagem multi-estagiada, seguida de moagem em moinhos de bolas. Esta última alternativa é, na verdade, uma volta ao circuito tradicional das décadas de 1960 e 1970, com a moinho de rolos de alta pressão substituindo estágio final de britagem, bem como a etapa de moagem em moinhos de barras, este último há tempos sepultado para circuitos de grande capacidade.

Trata-se assim de um movimento pendular, que caminha no sentido de reduções de Capex, com poucos equipamentos de altas relações de redução, ou no sentido de diminuição de Opex, mediante o propalado menor consumo energético em circuitos de britagem multiestagiada e moinhos de bolas.

A revolução nesse caso é poder contar com britadores com até 5 MW de potência instalada, evitando assim os altos custos de capital com várias linhas de britadores em paralelo.

Uma comparação baseada apenas em potência instalada, portanto sem computar qualquer benefício proporcionado por um ou outro equipamento, a maior moinho de rolos de alta pressão disponível (5,7 MW) substituiria sete dos maiores britadores atualmente em operação (750 kW).

O dimensionamento de moinhos de rolos de alta pressão segue, como em moinhos, métodos energéticos e de modelagem matemática com base em balanços populacionais. O primeiro é praticamente regra na indústria de equipamentos, enquanto que o segundo inclui grande avanço, com base em estudos pioneiros desenvolvidos no JKMRC da Austrália por L.A. Tondo, em meados da década de 1990.

3. PROJETO

Sem levar em consideração os extremos eufóricos ou céticos da indústria de fabricação de equipamentos, a boa notícia é a ampliação do espectro de alternativas que o engenheiro de processos terá para selecionar fluxogramas, selecionar e dimensionar equipamentos que, em conjunto, apresentem a melhor solução técnica e econômica para circuitos industriais de cominuição.

Os argumentos favoráveis ou detratores a equipamentos individuais de britagem ou moagem deverão ser verificados em campanhas de planta piloto, que incluam diversas alternativas de configuração e equipamentos. O resultado da etapa de testes deverá ser a

seleção das alternativas tecnicamente viáveis, seguida do dimensionamento dos principais equipamentos industriais de processo.

A fase seguinte compreenderá as análises de variabilidade de desempenho do(s) circuito(s) selecionado(s), em função das características dos vários tipos de minério que compõem o depósito mineral. A qualidade dos modelos matemáticos empregados é de fundamental importância nessa fase dos trabalhos, ou seja, a plataforma de simulação deverá ser suficientemente robusta para reproduzir o desempenho dos vários tipos de minério no circuito. Caso não tenham sido submetidos a testes, em escala piloto, com diferentes tipos de minério, recomenda-se uma campanha de consolidação, cujo escopo dependerá essencialmente das características dos vários minérios considerados.

Nesse contexto, recomenda-se incluir as etapas de concentração para verificar as recuperações metalúrgicas e teores obtidos em cada rota, para cada tipo de minério.

À essa altura, o ideal é que haja integração dos resultados obtidos nas simulações com o modelo geológico do depósito mineral. Sugere-se a criação de um modelo de blocos interpolado contendo propriedades geometalúrgicas, como por exemplo, valores de vazão de alimentação do circuito, recuperações mássicas e teores de concentrado. O produto desse trabalho será a atribuição a cada bloco de lavra, do desempenho, tanto em termos de quantidade, como de qualidade do concentrado gerado pelo circuito industrial. O seqüenciamento da lavra fornecerá então resultados de produção discretizados por períodos, que podem ser mensais, semestrais ou anuais.

A existência de eventuais períodos em que não sejam atingidas as metas de produção ou especificações estabelecidas, deverá orientar os dimensionamentos, com eventuais inclusões de equipamentos ou alteração do modo de operação, de forma a nivelar os resultados.

Os dados e informações, assim consolidados, deverão ser submetidos a análises econômicas para estabelecimento do circuito final de cominuição.

As etapas, já mencionadas, constituem-se na linha mestra de uma abordagem integrada para projetos de circuitos industriais de cominuição. Evidentemente que a sua execução pressupõe quantidades significativas de recursos, além de outras dificuldades de natureza logística, estratégica, políticas, além de restrições de prazo e verbas.

Embora repleta de dificuldades, a etapa de definição do circuito e equipamentos deve ser encarada como investimento e não como custo, pois a seleção da rota mais adequada a cada caso, certamente será refletida em melhor lucratividade global do empreendimento e aproveitamento de recursos naturais não renováveis.

Um exemplo bastante didático dessa abordagem foi o adotado pela Mineração Bauxita de Paragominas – MBP/CVRD. Na etapa de definição de configuração de circuito foram comparadas as rotas de combinação de moinhos de barras e bolas com moinho SAG e de bolas. Após as duas campanhas piloto foram executados os respectivos dimensiona-

mentos e projetos de engenharia. As análises técnica e econômica favoreceram a alternativa SAG/bolas que foi assim adotada para o projeto. A fase seguinte consistiu na montagem de uma planta piloto em Paragominas, PA, para processar vários tipos de minérios. Além de consolidar o projeto, os resultados dos testes foram empregados para obter índices de desempenho relativo entre os vários tipos de minério, bem como gerar amostras para condução de testes específicos de sedimentação, filtragem, entre outros.

4. MOAGEM AG/SAG

Moinhos autógenos (AG) e semi-autógenos (SAG) são amplamente empregados em circuitos industriais de cominuição que envolvam uma ampla gama de capacidade de processamento. 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 com 38 e 40 pés de diâmetro e potência de 20 MW é hoje, em termos de processo, uma alternativa plenamente segura e já se tem notícias de projetos de unidades substancialmente maiores.

Até o final do ano 2000, os fabricantes de equipamentos registraram vendas de mais de 1.000 circuitos AG/SAG, com potência instalada superior a 2,7 GW. Somente nos últimos cinco anos do período, houve um crescimento de cerca de 17% na potência instalada, mostrando assim uma curva fortemente ascendente no emprego de tais equipamentos.

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

Em 1908 é publicado pelo AIMME - *American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, o primeiro trabalho descrevendo moinhos com corpos moedores formados pelo próprio minério. Nas décadas subseqüentes houve várias invenções creditadas a Hedsel e desenvolvimentos pela empresa Hardinge, resultando no moinho autógeno comercial Hardinge-Hedsel, praticamente em paralelo aos desenvolvimentos da empresa canadense Aerofall, esta última fundada em 1946.

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 competentes e de alta densidade. A empresa Quebec Cartier, contava nesse mesmo ano com doze moinhos de 18 pés de diâmetro, com potência instalada de 600 hp, por unidade. A reação dos fabricantes à pressão da indústria de minério de ferro por moinhos com maiores capacidades unitárias, teve como consequência o surgimento de moinhos cada vez maiores, a ponto de, em 1966, entrar em

operação um moinho com 32 pés de diâmetro e motor de 6.000 hp, com capacidade praticamente igual à dos doze moinhos instalados sete anos antes.

A atratividade de usinas com grandes moinhos estava baseada em menores investimentos, se comparada à opção de circuitos como 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, já que com a adição de bolas em até 12% do volume da câmara de moagem, a capacidade dos equipamentos era substancialmente elevada, bem como tornavam-se 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. Na Tabela 1 consta um sumário da evolução dos circuitos AG/SAG.

Tabela 1 - Sumário da evolução de moagem com os circuitos AG/SAG (Jones, 2006)

Ano	Moinho	Diâmetro (pé)	Motor (hp)	Ano	Moinho	Diâmetro (pé)	Motor (hp)
1959	AG	18	600	1965	AG	32	6.000
1959	AG	22	1.250	1973	AG	36	12.000
1962	AG	24	1.750	1996	SAG	38	26.800
1962	AG	28	3.500	1996	SAG	40	26.800

Em função dos problemas enfrentados pelo primeiro moinho de 40 pés, instalado em 1996 na usina de Cadia Hill na Austrália, a segunda unidade foi instalada quase dez anos depois.

Segundo informações de fabricantes, há projetos prontos para moinhos SAG de 42 e 44 pés de diâmetro, este último dotado de motor com 30 MW de potência, pouco mais de 40.000 hp.

Em termos gerais, há atualmente duas configurações de moinhos AG/SAG, quais sejam a norte-americana com aspecto, ou relação diâmetro:comprimento, de 2:1 ou maior, bem como a européia/sul-africana com aspecto 1:1 ou menor. Cada tipo de moinho apresenta aplicação específica.

Moinhos com aspecto baixo, quais sejam, com relação diâmetro:comprimento 1:1 ou menor, consomem mais potência por tonelada moída, mas em contrapartida geram produtos mais finos. A escola sul-africana é muito particular, pois inclui moinhos alimentados por R.O.M., que operam em circuito fechado com ciclones, gerando produtos finais com P80 de 200 malhas, Tyler, para etapas subseqüentes de flotação. Essa configuração é típica de usinas que processam minérios auríferos lavrados em minas subterrâneas. As

dimensões relativamente pequenas de equipamentos de carregamento e transporte impõem a prática de severa fragmentação no desmonte, cujo produto equivale assim ao de um britador primário típico. A operação desses moinhos é ainda mais atípica já que giram a cerca de 90% da velocidade crítica, contam com revestimentos lisos e descarga periférica.

A escola europeia segue basicamente a mesma linha, porém com moinhos primários tipicamente quadrados (aspecto 1:1), operando sob circuito aberto e seguidos, via de regra, por moinhos autógenos secundários, já que os corpos moedores destes são parte do produto dos moinhos primários.

Em ambas as escolas predominam moinhos AG com baixas e médias capacidades, potências instaladas típicas de até 5 MW. O maior moinho vendido sob tal configuração tem dimensões de 24 x 29,5 pés, com potência instalada de 7,2 MW.

A configuração com aspecto alto é típica de operações das grandes minas de cobre das Américas do Sul e do Norte, Austrália e região, no processamento de minérios auríferos, bem como minério de ferro na América do Norte. As capacidades são, geralmente, médias ou altas. Os moinhos AG/SAG desse grupo apresentam 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 características. As cinco configurações básicas de circuito são descritas a seguir.

4.1 Circuito em Estágio Único

A configuração de circuito de moagem em estágio único, apresentada de forma esquemática na Figura 1, inclui operações tanto com moinhos AG como com SAG. Trata-se de uma opção de risco para projetos de novas operações (*greenfield*), sendo portanto, atualmente adotada em projetos de expansão (*brownfield*), ou ainda em nichos onde essa técnica encontra-se consolidada.

Se existem maiores riscos ao se adotar essa opção, há também benefícios, principalmente pela significativa redução de capital, já que em um único estágio pode ser praticada relação de redução de 1.000:1! Outros importantes atrativos para essa alternativa são os baixos custos relativos de operação, uma vez que não há consumo de corpos moedores no circuito.

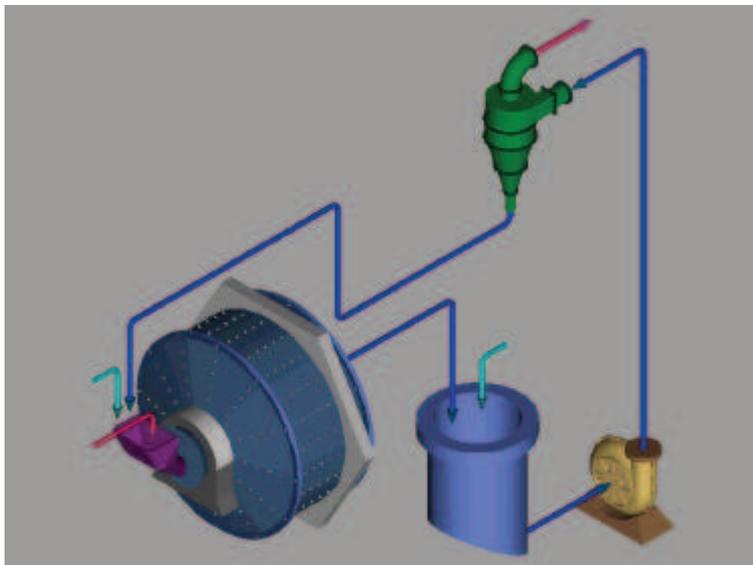


Figura 1 – Ilustração esquema do circuito AG/SAG em estágio único

Operações em estágio único com moinho AG são típicas da escola sul-africana, sendo largamente empregada pelas grandes mineradoras de ouro da região de Witwatersrand. Na mesma África do Sul, os dois moinhos de alto aspecto da mina de Palaborwa, com 32 pés de diâmetro, operam desde 1977 com 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 (14 pés) e Amandel, com moinhos AG e SAG em estágios únicos. Nas empresa Vaal Reefs, também sul-africana, nos circuitos de West Gold Plants houve uma seqüência de alterações de circuito que iniciou as operações como SAG (16 pés) em estágio único, potência de 3 MW e 90% da velocidade crítica, circuito fechado com ciclones de 1.050 mm de diâmetro. Em uma segunda etapa os moinhos foram convertidos para SAG e posteriormente as várias linhas de moagem contaram com estágios secundários, com moinhos de bolas. Cada dois moinhos SAG alimentavam um moinho de bolas (16 pés), que opera com potência de 3 MW.

Na Austrália, moinhos AG em estágio único são encontrados em Olympic Dam, por sinal o maior moinho AG (38 pés) em operação no mundo. O minério de cobre e urânio oriundo de mina subterrânea é posteriormente submetido à lixiviação ácida, razão pela qual a contaminação da polpa com íons ferro proveniente do desgaste de bolas aumentaria os custos associados à moagem SAG e/ou com moinhos de bolas.

Outro exemplo australiano dessa opção de circuito é a usina de Kambalda implantado pela então WMC - Western Mining Co. Embora haja britador de seixos no circuito de

Kambalda, o moinho AG (24 pés) em estágio único, processa minério de níquel proveniente de várias minas subterrâneas da região.

As operações AG em estágio único são muito sensíveis 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 blendagem adequada entre 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 apresentar tendência acentuada em gerar seixos arredondados, que nesse caso demandaria instalação de britadores para reciclagem desse material após britagem.

Circuito 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 composta por um moinho SAG que opera em circuito fechado com peneiras DSM. Como os moinhos operam de forma contínua com as fábricas de alumina, a polpa que circula no circuito de moagem contém soda cáustica, como forma de iniciar a lixiviação dos minerais de minério (gibbsita, bohemita e diáspero) já nessa 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 sub-solo. Nesse caso o circuito configurado no estágio único inclui um moinho SAG, com dimensões 9,5X15,5 pés (diâmetro x comprimento) conta com 700 hp de potência e processa minério de urânio.

Outro exemplo de moagem SAG em estágio único é a usina de Henderson, que processa minério de cobre, operada pela empresa Phelps Dodge, nos E.U.A. Nessa usina há quatro linhas de moagem sendo três com moinhos SAG com dimensões 28X30pés (diâmetro x comprimento).

Várias minas de minério de ferro, na América do Norte, operaram há décadas no modo AG estágio único, sendo posteriormente convertidas para SAG estágio único e, em alguns casos adicionando moagem em moinhos de bolas, elevando assim a capacidade global do circuito. No Chile, a mina de El Peñon processa minério aurífero em um moinho SAG (15,5 pés) em estágio único, que opera em circuito fechado com ciclones.

No Brasil, a usina de Jacobina, operada pela Yamana, na Bahia, após a lavra subterrânea, o minério aurífero é britado em um único estágio e na seqüência moído em duas linhas de moinhos SAG, sob configuração fechada com ciclones, cujo overflow segue para a etapa de lixiviação.

4.2 Circuito AG – Seixos (FAP)

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

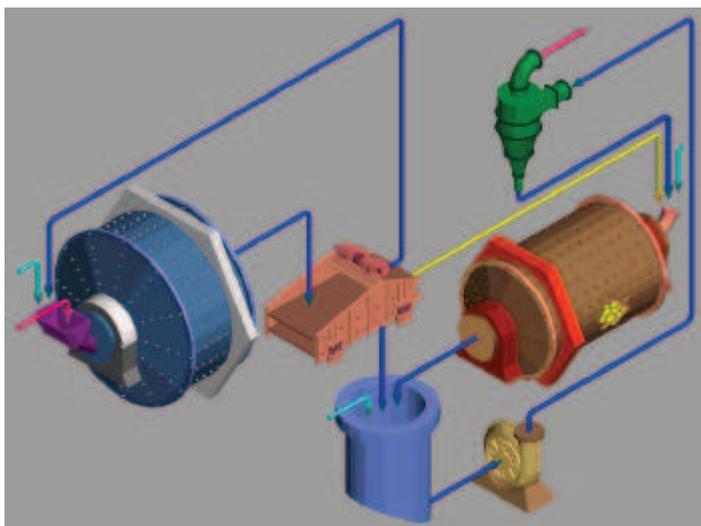


Figura 2 – Moagem autógena seguida de moagem com seixos, circuito FAP.

A configuração FAP constitui uma solução para os problemas verificados na configuração de estágio único, uma vez 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 de seixos, no moinho primário transforma-se assim em vantagem, mediante o aproveitamento dos seixos como corpos moedores no estágio secundário.

Circuitos FAP representam maiores investimentos do que circuitos SAG para a mesma capacidade de circuito, porém os custos operacionais são significativamente inferiores, em função de desgastes com corpos moedores e revestimentos.

A configuração FAP é freqüente em circuitos de moagem da Suécia e Finlândia. O sistema "OG – Outogenous" da Outokumpu inclui um engenhoso sistema de obtenção dos seixos já no moinho primário, evitando assim a inclusão da peneira como ilustrado na Figura 2.

Essa configuração é potencialmente atrativa para minérios de urânio, devido à menor geração de íons ferro na polpa, minérios sulfetados, devido à moagem fina, porém sem a excessiva geração de ultrafinos e minérios de ferro, já que nesse caso a menor geração de ultrafinos é benéfica aos processos de filtragem e pelotização.

Exemplos de usinas que empregam o sistema FAP na Escandinávia são Aitic, na Suécia e Phihasalmi, na Finlândia, ambas na moagem de minérios sulfetados.

No caso do circuito da mina de Kiruna, localizada no norte da Suécia, que processa minério de ferro lavrado em sub-solo, o circuito consiste em duas linhas de moagem, cada uma contando com um moinho primário, de 21 pés de diâmetro por 17 pés de comprimento, seguido de um moinho de seixos de 21x 28 pés. Parte da fração -35+6 mm obtida no tromel do moinho primário é encaminhada ao moinho secundário, onde formará os corpos moedores e parte será britada e recirculada no moinho primário. A fração -6 mm do moinho primário é classificada em classificador espiral, cuja fração grossa retorna ao moinho e os finos sendo submetidos a separação magnética. O produto do circuito secundário segue também para a separação magnética, flotação de apatita, desaguamento e pelotização.

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

4.3 Circuito AG – Bolas (FAB)

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

O circuito FAB constitui uma alternativa adequada, em termos de consumo de energia, para minérios densos, porém muito competentes. Se por um lado os fragmentos grossos são corpos moedores adequados ao estágio primário, por outro as características da fração crítica não são adequadas para 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 pode assim corrigir eventuais flutuações de desempenho do circuito primário. Essa configuração apresenta consumo energético específico mais próximo de circuito convencional de britagem multi-estagiada e moagem barras/bolas.

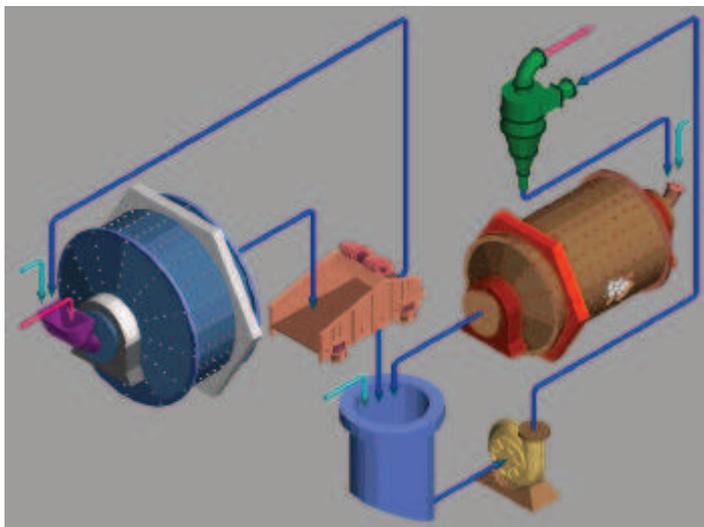


Figura 3 - Ilustração esquemática da moagem autôgena seguida de moagem com bolas, circuito FAB.

Um exemplo de sucesso de circuitos que adotaram a opção FAB é o de Bagdad, operado pela Phelps Dodge, nos E.U.A. A particularidade desse circuito é a presença de britagem de seixos em dois estágios, gerando assim um produto relativamente fino, que retorna ao moinho AG. O circuito de Bagdad apresenta baixos custos de produção em função, principalmente, da alta eficiência energética.

Um exemplo brasileiro é a usina da São Bento, que opera há cerca de 20 anos e está localizada em Minas Gerais. O minério aurífero lavrado em sub-solo é encaminhado ao moinho primário (12X12 pés) e, na seqüência, ao estágio secundário composto por um moinho de bolas (8 pés) que opera em circuito fechado com ciclones. Não há portanto britagem no circuito. A economia com corpos moedores no moinho primário contribui para redução dos custos de operação, que são bastante altos, principalmente devidos à etapa de extração do ouro.

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

A alternativa FAB foi considerada no projeto Salobo, da CVRD, devido às características de competência e densidade do minério. A inclusão de um britador de reciclo no circuito reforçou a opção pela moagem primária AG, devido à grande quantidade de magnetita que seria separada na carga circulante, caso a opção fosse moagem SAG.

4.4 Circuito SAG – Bolas (SAB)

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

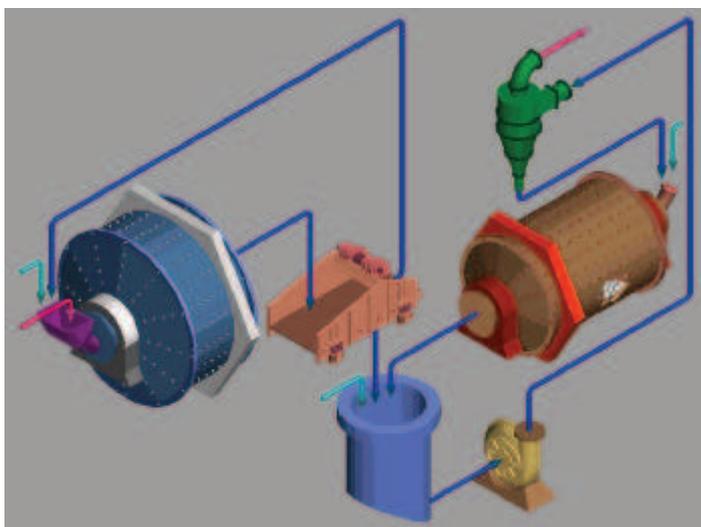


Figura 4 – Ilustração esquemática da moagem semi-autógena seguida de moagem com bolas: circuito SAB.

A alternativa de circuito SAB possui grande flexibilidade de operação, adequada assim a variações substanciais no minério alimentado. Muitas operações inicialmente projetadas no modo FAB foram convertidas para SAB, onde o incremento de custos com corpos moedores foi inferior ao incremento de produção advindo com a alteração.

Esse circuito foi praticamente regra para grandes projetos de cobre e ouro na década de 1985 até 1995. O circuito permite variações, sob faixas amplas, do tamanho de transferência (T80) entre os circuitos primário e secundário, ou seja, é possível ajustar as relações de redução entre ambos e, conseqüentemente a distribuição de energia específica no circuito.

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

Dentre os exemplos de operações que iniciaram sob o modo SAB destacam-se os circuitos de Mount Isa, pertencente atualmente à Xtrata na Austrália, Chuquicamata da Codelco e El Soldado da Minera Disputada, ambas no Chile.

Vários circuitos que iniciaram sob configuração SAB foram posteriormente convertidos em SABC, mediante a instalação de britadores de reciclo no circuito. No Brasil, destaca-se a Mineração Serra da Fortaleza, em Minas Gerais, à época operada pela RTZ do Brasil.

O projeto de expansão da usina da RPM - Rio Paracatu Mineração, localizada em Minas Gerais incluirá, após totalmente implantado, britagem primária e moagem primária em

moinho SAG (38 pés) e secundária em moinhos de bolas, com aproveitamento dos cinco moinhos existentes.

4.5 Circuito SAG – Britador de Reciclo - Bolas (SABC)

A acumulação de determinadas frações granulométricas na carga do moinho (fração crítica) resulta na limitação da taxa de alimentação nova e, portanto, na capacidade do circuito. O problema pode ser resolvido, ou pelo menos mitigado, mediante três alternativas básicas.

A primeira consiste na britagem prévia de frações selecionadas da alimentação do moinho.

A segunda inclui a fragmentação da assim denominada fração crítica na própria câmara de moagem, mediante aumento da carga de bolas e/ou aumento da velocidade de rotação do moinho. Se o problema persistir após atingir os limites nessas variáveis, a segunda opção é instalar grelhas com aberturas maiores (50 a 100 mm), as denominadas *pebble ports* ou *rock ports*, de forma a permitir a saída dessa fração da carga, para então britá-la, retornando o produto ao moinho primário. Esta última opção é denominada SABC e está ilustrada na Figura 5 que se segue. Caso o produto do britador seja encaminhado ao circuito secundário, o circuito é denominado SABC aberto.

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

Nos últimos dez anos, circuitos SABC passaram a ser praticamente padrão da indústria, quer em expansões de linhas existentes ou ainda em novas instalações, demonstrando assim o grau de confiança nesse tipo de circuito.

Na Tabela 2 estão ilustrados alguns exemplos de usinas industriais que converteram os respectivos circuitos da configuração SAB para 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 seixos. As informações foram extraídas de vários artigos publicados nas Conferências SAG 2001 e 2006.

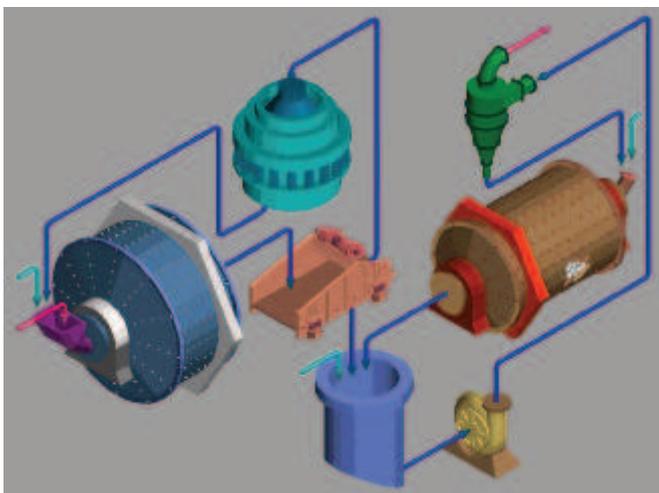


Figura 5 – Ilustração esquemática da moagem semi-autógena com britagem de seixos e seguida de moagem com bolas, circuito SABC.

Tabela 2 – Sumário da evolução das moagens em circuitos AG/SAG (SAG 2001, 2006)

Mina	Ano da 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 nos estágios primário como no secundário. Sob o ponto de vista de projeto, possuem o menor investimento unitário (\$/t) dentre todas as demais opções de circuito.

Esta última característica da alternativa SABC resulta que um circuito, assim configurado, apresentará a maior capacidade de alimentação por unidade monetária considerada. Mesmo que o consumo energético não seja o mais adequado, assunto este ainda controverso, o desempenho global faz da opção SABC a mais competitiva e, atualmente, a de menor risco.

Dentre os muitos exemplos de operações sob configuração SABC podem ser citadas as usinas de La Candelária (36 pés), Escondida (38 pés), Collahuasi (32 e 40 pés'), Pelambres (36 pés), Andina (36 pés), El Teniente (36 pés) no Chile, Fimiston (36 pés), St. Ives (24 pés), Cadia Hill (40 pés), na Austrália, Porgera (28 pés), na Papua-Nova Guiné; Freeport (34,5 e 38 pés) e Batu Hijau (38 pés) na Indonésia, Kennecott, Ray – Asarco, nos E.U.A. Highland Valley (32 pés), no Canadá, Antamina (38 pés), no Peru, Alumbrera (36 pés), na Argentina.

No Brasil há dois circuitos em operação sob a configuração SABC. 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 outro é o circuito do Sossego, operado pela CVRD, em Canaã dos Carajás, no Pará, que inclui um britador giratório primário, um moinho SAG (38 pés), dois britadores cônicos de reciclo, além de dois moinhos de bolas (22 pés), com capacidade nominal de 15 Mt/ano.

A configuração SABC foi também selecionada para os projetos Alemão e Cristalino, ambos de minério de cobre da CRVD, tendo por base estudos conceituais, posteriormente consolidados por campanhas de moagem em escala piloto.

Dentre os projetos que estão em fase final de implantação, sob modo SABC, destacam-se Bauxita de Paragominas, da CVRD e Cobre Chapada, da Yamana.

As etapas de definição de circuito, dimensionamento dos equipamentos e estudos de variabilidade do Projeto Bauxita de Paragominas já foram descritas no presente trabalho. O minério será britado em dois estágios com britadores de eixos dentados, seguido de empilhamento e retomada para alimentação de duas linhas de moagem. Cada uma contará com um moinho SAG (28 pés) e um moinho de bolas (20 pés). Os seixos gerados no moinho SAG seguirão para britagem em britadores de impacto, cujo produto será encaminhado ao circuito secundário, configurando assim SABC aberto.

O Projeto Chapada, que está sendo implantado em Goiás pela empresa Yamana, contará com uma única linha de moagem constituída por um moinho SAG de 34 pés de diâmetro seguido de um moinho de bolas (26 pés), para processamento de minério cupro-aurífero.

4.6 Configurações do Circuito de Britagem para Circuitos AG/SAG

O circuito de cominuição em instalações que constam de moagem em circuitos AG/SAG possui configuração relativamente simples, se comparada a outras alternativas de moagem. Como a alimentação de moinhos primários SAG, e principalmente AG, inclui fragmentos grossos, geralmente uma única etapa de britagem é suficiente para proporcionar uma distribuição granulométrica adequada à moagem. Na Figura 6 ilustra-se um desenho esquemático típico de circuitos industriais de grande porte, que consistem basicamente em um britador giratório, cujo produto segue para uma pilha pulmão e desta para a alimentação da moagem.

A menos de operações de pequeno ou médio porte onde a lavra é executada em subsolo, a etapa de britagem primária garante, via de regra, tamanho máximo de alimentação ao moinho. Os grandes britadores giratório operam com aberturas (APF) de 5,5 a 6 polegadas, o que resulta em tamanho máximo de aproximadamente 8", sujeito a efeito forma dos fragmentos. Em operações menores encontram-se britadores de mandíbulas e, em alguns casos, até britadores de eixos dentados.

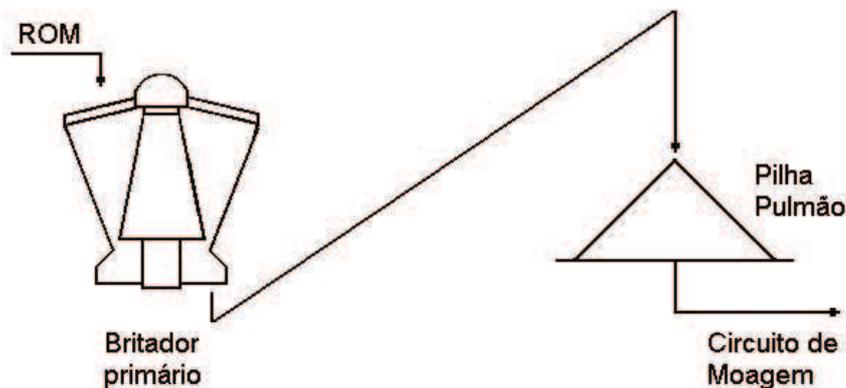


Figura 6 – Configuração típica de britagem em circuitos AG/SAG.

Uma variante que foi implantada em vários circuitos inclui a etapa de britagem secundária, conforme ilustrado na Figura 7 que se segue.

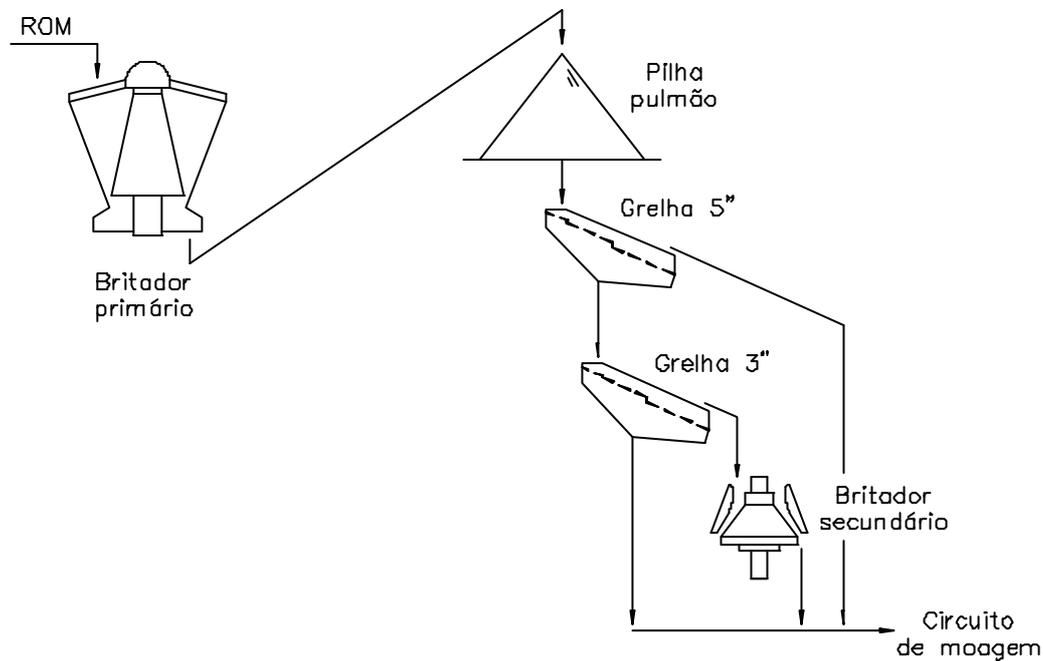


Figura 7 – Circuito de britagem com rebitagem da fração intermediária

Nesse caso, a fração crítica é praticamente eliminada da alimentação do moinho. Trata-se assim de uma alternativa para operações em que o minério, ou alguns tipos de minério do depósito mineral, apresentem forte tendência de 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 campanhas piloto, onde se pode variar com relativa facilidade a distribuição granulométrica da alimentação do moinho. Mediante o ajuste na granulação estima-se o efeito de diferentes malhas para o peneiramento do produto da britagem primária, ou também 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, onde foi registrado aumento de até 50% de capacidade do circuito de moagem, mina de Asarco-Ray, nos E.U.A., com incremento de 20%, assim como Kidston na Austrália. Na configuração britagem secundária de todo o produto da britagem primária podem ser citados os circuitos de Fimiston e St. Ives na Austrália e La Coipa, no Chile.

Apesar de ser largamente empregada, pela maioria das empresas de mineração de grande porte do mundo, a aceitação da moagem em moinhos AG/SAG, como alternativa segura para circuitos de cominuição foi progressiva em função, principalmente, da evolução dessa técnica. Além disso, moinhos AG e principalmente SAG estiveram durante décadas e ainda estão na vanguarda da indústria em termos de dimensões e potência instalada. Esse cenário de aplicação de materiais, métodos de projeto e técnicas construtivas inéditas tem, evidentemente, como ônus, os ajustes necessários no início de operação dos maiores equipamentos até então fabricados.

Embora esse contexto seja reconhecido são comuns os relatos de insucessos de operações industriais que, de alguma forma, enfrentaram situações desse tipo. Cabe lembrar que mesmo com moinhos de bolas, de tecnologia de projeto, fabricação, implantação e operação até então consolidados, ocorreram fatos semelhantes como, por exemplo, nos moinhos da usina de Bouganville, projeto este da RTZ na então Papua-Nova Guiné. Nessa usina o desempenho de moinhos de 18 pés' de diâmetro, os maiores até então projetados foi muito aquém do estipulado.

Um elenco de preconceitos, má-informação, conservadorismo e mitos associados à moagem AG/SAG está relacionado abaixo.

- Consumo energético específico mais alto;
- Dimensionamento empírico;
- Necessidade de grande massa de minério para ensaios preliminares;
- Baixa flexibilidade dos circuitos;
- Operação complexa e instável;
- Grandes variações de desempenho em função dos tipos de minério;
- Pré-operação longa e dispendiosa.

A análise dos insucessos iniciais ou definitivos de operações com moinhos AG/SAG aponta para algumas causas comuns que, individual ou combinadamente, apresentaram alguma contribuição, quais sejam:

- Ausência/insuficiência de informações sobre as características tecnológicas do minério;
- Baixo conhecimento das jazidas em termos de graus de variabilidade do minério;
- Critérios inconsistentes de projeto, como relação de redução, carga circulante e potência;
- Critérios de dimensionamento inadequados;
- Técnicas complexas para projeto de novas instalações e otimização de circuitos existentes;

- Técnicas inadequadas para controle do processo;
- Custos de capital decrescentes somente com o advento de equipamentos de grande porte;
- Baixo grau de entendimento de conceitos e peculiaridades associadas ao processo;
- Inexperiência em projetos de revestimentos, grelhas, mecanismos de descarga, etc. para grandes moinhos;
- Instrumentação precária.

Vários dos itens listados acima podem ser enfrentados na fase de viabilidade final do projeto, mediante campanhas de ensaio piloto, seguida de dimensionamento e seleção dos equipamentos. O modelo matemático calibrado do circuito completo será empregado para simular as variações de desempenho do futuro circuito industrial em função das características dos vários tipos de minério presentes na jazida, conforme resultados de ensaios sobre amostras de testemunhos de sondagens.

Um acompanhamento detalhado da elaboração das especificações técnicas dos equipamentos e análises criteriosas das propostas técnicas de fornecedores são também etapas fundamentais do processo. Nessa fase podem ser evitados problemas futuros advindos de configuração de grelhas e perfis de revestimento inadequados.

A posta-em-marcha do circuito industrial deve ser balizada como uma etapa de transição entre o projeto/construção e a operação do circuito industrial, diferente portanto da visão de seqüências estanques do empreendimento. O comprometimento com o desempenho global do circuito deve assim marcar essa transição, de forma a aproveitar a sinergia entre as equipes que conceberam o projeto e aquelas encarregadas de operar o circuito industrial.

As técnicas de simulação com base em modelagem matemática são recursos comprovadamente eficazes tanto no dimensionamento dos equipamentos de processo, como na fase de posta-em-marcha, bem como para otimizações contínuas de operações industriais de britagem e moagem. Entretanto, devido à natureza dos modelos e a complexidade dos fenômenos envolvidos, a representação fiel do desempenho de equipamentos e processos está baseada na qualidade das calibrações efetuadas que, por sua vez, dependem de dados representativos da operação modelada. Assim, o ajuste de modelos que representem os mecanismos de fragmentação e transporte que ocorrem na câmara de moagem definem plataformas de simulação, que podem ser empregadas desde análises de sensibilidade de cada variável de operação até modificações no circuito.

5. PANORAMA BRASILEIRO

A combinação entre as peculiaridades de muitos minérios brasileiros e o ambiente político/econômico do país moldaram a indústria mineral brasileira e suas características.

Iniciando pelo bem mineral de maior peso nas exportações, os depósitos brasileiros de minério de ferro possuem porções significativas de minério de alto teor de ferro e baixos teores de impurezas. As usinas implantadas para tratamento de minérios de alto teor incluíram assim circuitos de britagem e peneiramento, ou ainda aproveitamento de finos naturais de alto teor. A ocorrência de finos naturais com teor mais baixo motivou a construção de usinas dotadas de etapas de concentração. A cominuição intensiva de minérios de ferro só entrou em cena com a decisão de aproveitar, mediante moagem, os itabiritos do Quadrilátero Ferrífero. A moagem de produtos intermediários para pelotização também tem grande importância relativa no setor.

Assim, grande parte da produção brasileira de minério de ferro não depende de cominuição intensiva como, por exemplo, minérios que ocorrem na América do Norte ou na Escandinávia.

Outro setor que, embora importante, inclui somente operações de britagem e classificação é a indústria de bauxita, muito embora a etapa de fabricação de alumina seja iniciada com a moagem do minério de alumínio. Nesse caso é comum a combinação de moinhos de barras e bolas e, mais recentemente, circuitos de moagem SAG no projeto integrado Bauxita de Paragominas e Alumina da Alunorte, em implantação pela CVRD.

No setor de minério de fosfato, as principais usinas brasileiras processam minérios de porções alteradas de depósitos minerais com origem magmática. O circuito padrão consiste em britagem multi-estagiada, seguida de etapas de moagem em moinhos de barras e bolas. A grande quantidade de finos nesses minérios torna os circuitos de britagem e moagem peculiares, incluindo separação magnética em cargas circulantes ou entre etapas de moagem, bem como vários estágios de classificação para promover a concentração separada da apatita contida nos finos. As usinas de Catalão e Tapira da Ultrafertil e Araxá da Bunge estão assim configuradas.

Como os principais depósitos de minério de nióbio ocorrem nessas mesmas chaminés alcalinas de minério de fosfato, o fluxograma das usinas de tratamento é semelhante ao acima descrito.

Ainda no setor de matérias-primas para a indústria de fertilizantes, as usinas de Taquari, SE, e Cajati, SP, respectivamente de minérios de potássio e fósforo, possuem moagem unitária com moinhos de barras em circuito fechado.

A produção brasileira de concentrados de metais básicos não se encontra entre as maiores do mundo e advém, à exceção da usina do Sossego/CVRD que entrou em operação em 2004, de operações de pequeno e médio porte.

Nas minas de pequeno e médio porte, a lavra é subterrânea, cujo produto alimenta usinas com etapas de britagem, peneiramento, moagem e classificação, seguidas de concentração por flotação de minerais sulfetados e/ou, no caso do zinco, de minerais silicatados. Nesse setor há várias usinas com moagem unitária, ou seja, contam com um único estágio de moagem em moinhos de bolas à exemplo das usinas de Morro Agudo e Vazante, MG, da Votorantim Metais e Mineração Caraíba, BA.

A mineração de ouro, no Brasil, também não inclui circuitos de grande capacidade, a menos da RPM, pertencente à Kinross, que processa minério com teor da ordem 0,5 g/t. As demais empresas operam minas subterrâneas com circuitos de cominuição de pequena capacidade.

Atualmente, a RPM processa em circuito de britagem multi-estagiada e moagem unitária em quatro linhas de moinhos de bolas, cerca de 19 MTPA, estando em fase adiantada o projeto de ampliação para 50 MTPA, mediante a inclusão de moinho SAG e moinho de bolas, bem como o aproveitamento dos moinhos existentes.

As usinas do Queirós e Crixás da Mineração Morro Velho, bem como Fazenda Brasileiro da Yamana adotam também moagem unitária em moinhos de bolas, alimentada pelo produto de circuitos de britagem. Assim como estas, o minério tratado na usina de Jacobina, da Yamana, provém de mina subterrânea, de onde é encaminhado para britagem e moagem unitária em moinhos SAG. O fluxograma da usina da Mineração São Bento sem britagem, sendo a cominuição efetuada em um moinho AG, seguido de um moinho de bolas.

O fluxograma das principais usinas que processam minério de manganês, da jazida do Azul da CVRD e de Corumbá da RTZ, incluem etapas de britagem e peneiramento e, na usina do Azul, classificação em classificadores espiral. A produção de bióxido de manganês no Azul inclui moagem a seco em um circuito com moinho de rolos Raymond.

Os depósitos brasileiros de minérios de níquel incluem minérios sulfetados ou oxidados. Na primeira categoria destaca-se a Mineração Serra da Fortaleza – MSF, implantada pela empresa Rio Tinto e posteriormente adquirida pela Votorantim Metais. Nesse circuito, conforme sumarizado anteriormente, a configuração SAB foi adotada inicialmente sendo posteriormente convertida em SABC, contando ainda com britagem secundária.

A cominuição de minérios oxidados de níquel, geralmente, conta apenas com estágios de britagem. O projeto Níquel do Vermelho, que deverá ser implantado pela CVRD, no Pará, inclui operações de britagem em equipamento de rolos dentados, lavagem, classificação em ciclones, atrição e peneiramento de alta frequência.

A produção de cassiterita, de origem aluvionar, marcou o início das operações de minas de minério de estanho na região norte do Brasil. Posteriormente, o estanho contido em minérios primários aumentou sua participação no cenário nacional.

Na mina do Pitinga, localizada no Amazonas, há estágios de britagem e moagem, em moinhos de barras, para processar o minério granítico. Na mina do Bom Futuro, localizada em Rondônia, predominam moinhos de martelos em várias operações de pequeno porte.

O Brasil é um grande produtor mundial de cimento e, portanto, processa grandes quantidades de calcário, a principal matéria-prima mineral dessa indústria. Os circuitos de britagem apresentam peculiaridades em função, principalmente, das características de baixa abrasividade e resistência baixa a média à britagem e moagem, dos calcários brasileiros. A britagem é executada em circuitos multiestagiados que incluem combinações de britadores de mandíbulas ou giratórios em grandes operações, além de britadores cônicos secundários e terciários. Britadores de impacto são largamente empregados na indústria cimenteira, pois apresentam uma combinação favorável de relações de redução e capacidades muito altas. Circuitos configurados com britadores de impacto apresentam assim alta capacidade e menor número de estágios, se comparados a outros tipos de britadores.

A moagem na indústria cimenteira é efetuada a seco em moinhos multicâmaras ou de rolos de alta pressão. Os primeiros consistem em moinhos tubulares dotados de divisão intermediária formando duas câmaras, a primeira contendo bolas de maior diâmetro enquanto que na segunda, a carga conta com bolas de menor diâmetro relativo. Os moinhos de rolos verticais são equipamentos adequados à geração de produtos finos e, segundo alguns autores, possuem menor consumo energético específico, quando se compara o desempenho destes com moinhos de bolas. Os sistemas de moagem operam em circuito fechado e incluem aeroclassificadores, exaustores e filtros.

A indústria de agregados para a construção civil apresenta grande importância no setor mineral, dado o grande volume de produção, principalmente em regiões metropolitanas das grandes cidades brasileiras. Trata-se de um setor onde predominam britadores de mandíbulas e cônicos, em circuitos de britagem multi-estagiada até etapas terciária ou quaternária, dependendo dos produtos finais comercializados.

6. TENDÊNCIAS E PERSPECTIVAS

Seguindo-se as tendências observadas até o momento, as operações de circuitos de cominuição continuarão a representar os maiores itens de custo operacional em usinas de tratamento de minérios, quer seja pelo consumo de energia e/ou revestimentos e corpos moedores. Melhorias na eficiência de utilização de energia e diminuição do desgaste de revestimentos e corpos moedores continuarão assim, a representar os principais desafios para os grupos dedicados a pesquisas nessa área.

A reconhecida resistência da indústria de mineração e, em particular dos fabricantes de equipamentos de britagem e moagem, a rápidas mudanças tecnológicas, é fundamentada nos altíssimos investimentos necessários, cujos retornos previstos dependem de

combinações favoráveis de projetos adequados, que implantados resultem em operação estável e segura. Esses fatores, associados ao longo tempo de maturação, praticamente determinam a defasagem tecnológica entre o que se pratica na indústria e os desenvolvimentos recentes no setor.

O cenário torna-se ainda mais particular ao se considerar um ingrediente típico das engenharias, qual seja, que os grandes desenvolvimentos registrados no setor são oriundos da própria indústria, ou de pesquisadores a ela diretamente ligados.

Se a descrição apresentada é válida para aspectos de evolução e revolução em desenvolvimento de equipamentos, a área de aplicação de métodos e processos mostra um panorama muito diferente. Se por um lado as patentes da maioria dos britadores e moinhos em operação datam de muitas décadas, as técnicas empregadas atualmente para projeto de novas instalações e, sobretudo, na melhoria de desempenho de instalações existentes são radicalmente diferentes das praticadas há algumas décadas.

Nesse contexto, as técnicas de simulação com base em modelagem matemática são recursos comprovadamente eficazes, tanto no dimensionamento de equipamentos, como em circuitos integrados de processo. Uma vez configurado e calibrado, um simulador pode assim representar a operação de um circuito completo de britagem, peneiramento, moagem e classificação, quer seja para fins de projeto ou ainda de exploração de alternativas para melhoria de desempenho de circuitos existentes, geralmente via aumento de capacidade.

Os principais modelos matemáticos empregados nos simuladores são de natureza empírica e fenomenológica. Na primeira categoria destacam-se os modelos de ciclones, principalmente de Lynch (Nageswararao) e Plitt, ambos originalmente desenvolvidos no final da década de 1970. Modelos fenomenológicos dominaram o início da aplicação do método do balanço populacional a equipamentos de britagem e moagem.

O grande interesse em melhora de desempenho de circuitos industriais motivou o desenvolvimento de modelos que associam mecanismos de fragmentação e transporte que ocorrem em moinhos e britadores a variáveis essencialmente fenomenológicas. Assim, variáveis como taxa de quebra, obtidas inicialmente somente por meio de retro-cálculo são associadas, em modelos mais recentes, a parâmetros que determinam a movimentação da carga na câmara de moagem, como velocidade de rotação e grau de enchimento.

Modelos classificados como fundamentais ganharam importância relativa nos últimos anos. Superada a limitação inicial de longos períodos de processamento em super-computadores, métodos de elementos discretos são atualmente consolidados para análise, por exemplo, de movimentação da carga em moinhos em função de perfil de revestimento.

Embora não sejam utilizados em simuladores de processo, integrados portanto em circuitos completos de cominuição, a tendência é o aprimoramento de modelos fundamentais que assim deverão ser progressivamente mais empregados nessa área.

Sistemas especialistas deverão proporcionar evolução contínua e progressiva presença em circuitos industriais de moagem.

A alta nos preços das *commodities* de origem mineral registrada nos últimos anos mudou, de forma inédita, a indústria mineral. Embora afeita a demanda altas, porém restritas a alguns produtos, nem as previsões mais otimistas poderiam prever um mercado fortemente demandado por metais e outros produtos de origem mineral, como o atual.

Os resultados imediatos desse aquecimento do mercado são a profusão de novos projetos e expansões de operações existentes. Em ambos os casos há necessidade de mão-de-obra capacitada, quer em fabricantes de equipamentos, empresas de engenharia ou demais provedores de serviços. Nesse contexto, a tendência é de demanda por capacitação em técnicas modernas de modelagem e, principalmente, simulação de processos que embora não substituam a experiência acumulada de engenheiros de processos, permitem analisar casos industriais mais detalhadamente, determinar a influência de variáveis de operação e projeto, no desempenho de circuitos, fazer estudos de sensibilidade, comparar alternativas de processos, entre outros aspectos.

Com a tendência salutar, nos cursos de graduação, de formar engenheiros mais ecléticos do que especialistas, não cabe o ensino de técnicas sofisticadas de modelagem matemática em disciplinas de engenharia de minas. Esse assunto deve merecer atenção em programas de pós-graduação, bem como em cursos de extensão/especialização para profissionais envolvidos nessa área.

Os rumos de trabalhos de pesquisa devem ser estabelecidos, não apenas em função das vocações individuais dos pesquisadores, mas sobretudo na capacidade do corpo de pesquisadores dos centros de pesquisa e universidades. Programas de mestrado devem ser dirigidos, principalmente a pesquisas aplicadas nas áreas de atuação de engenheiros que optem por aprofundamento de conhecimento, nas respectivas áreas de atuação ou recém formados que optem pela carreira de pesquisa e ensino. O núcleo de centros de excelência dedicados à formação de doutores devem ser formados por pesquisadores maduros e engenheiros com reconhecida dedicação às linhas de pesquisa selecionadas. Nesses ambientes, o foco deve ser a inovação tecnológica em áreas definidas como prioritárias para a região em que se encontram ou, alternativamente, em âmbito nacional.

A falta de tradição de fomento da indústria mineral brasileira às instituições de pesquisa merece ser revista, principalmente no atual ambiente próspero do setor. A proposição de alternativas para reversão desse cenário é portanto um desafio.

Um dos exemplos de comprovado sucesso é o modelo australiano, que tem por base a AMIRA, acrônimo para *Australian Mineral Industry Research Association*, instituição especialmente criada para a gestão de recursos destinados à pesquisa, que provêm tanto do governo como da própria indústria.

As atividades principais da AMIRA compreendem a prospecção de oportunidades, a composição de programas de pesquisas baseados na seleção de grupos especializados em cada área de conhecimento, bem como a promoção desses programas, mediante a divulgação aos potenciais patrocinadores e beneficiários dos resultados obtidos. Além dessas atividades principais, a AMIRA faz a gestão dos recursos para pesquisas assim obtidos, quer sejam de instituições ou órgãos governamentais, ou da própria indústria.

Esse modelo que está implantado, há cerca de trinta anos na Austrália, poderia ser o ponto de partida para iniciativas, no Brasil, de alavancar o envolvimento direto da indústria mineral local, em projetos de pesquisa aplicada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bond, F.C. 1952. The third theory of comminution. Transactions of American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, v.193, p. 484-94
- Jones, S.M. 2006. Autogenous and semiautogenous mills 2005 update. International autogenous and semiautogenous grinding technology 2006. v.1, p. 398-425
- Conferências SAG 2001 e 2006. International autogenous and semiautogenous grinding technology 2001 e 2006, Vancouver, Canada.
- BEARMAN, R.A., 1995. Crushing plant performance a function of blast fragmentation? 4th Nordic Conference on Aggregates Research, Helsinque