

CAPÍTULO 11 – MOAGEM AUTÓGENA: UM ESTUDO EM ESCALA PILOTO

João Alves Sampaio

Engenheiro de Minas/UFPE, Mestre e Doutor em
Engenharia Metalúrgica e de Materiais/COPPE-UFRJ
Tecnologista Sênior do CETEM/MCT

Homero Delboni Junior

Engenheiro de Minas/EPUSP, Mestre em Engenharia
Mineral/EPUSP e Ph.D. University of Queensland, Austrália
Professor do Departamento de Engenharia de Minas/EPUSP

Antônio Odilon da Silva

Técnico Químico/AFE - Associação Fluminense de Educação
Técnico Químico do CETEM/MCT

1. INTRODUÇÃO

Desenvolver o melhor circuito de cominuição para um determinado minério não é uma tarefa simples e, em muitos casos, gera discussões intermináveis (Mular, 1982a). As descobertas de novos jazimentos, com minérios cada vez mais complexos, têm motivado a busca de circuitos de cominuição alternativos, descartando, em muitos casos, as opções convencionais. Nesse contexto, quando surge um novo projeto de mineração ou expansões de outros já existentes, a moagem autógena tem sido a alternativa mais procurada e discutida. Tal preferência dada às moagens autógena e semi-autógena em relação à convencional está ligada, entre outras, às seguintes vantagens:

- (i) menor custo operacional e de capital;
- (ii) menor consumo de energia por unidade de minério bruto tratado;
- (iii) maior capacidade de produção e menor consumo específico de meio moedor em g/t de minério moído;
- (iv) maior flexibilidade operacional, principalmente para moagem dos minérios com elevado conteúdo de umidade;
- (v) existência de um fluxograma mais simplificado, resultante da eliminação das etapas de britagem secundária e terciária, além da redução no manuseio de material nessas etapas.

Estas razões justificam as constantes indagações por parte daqueles que buscam o CETEM com interesses dirigidos ao processo de moagem, conforme anunciadas a seguir:

Qual a extensão das investigações para os processos de moagem autógena e semi-autógena?

Qual a quantidade de material necessária aos ensaios em escala piloto?

Qual a alternativa mais adequada, processo autógeno ou semi-autógeno?

Qual o custo dos trabalhos de pesquisa?

Qual delas insere o menor custo?

Obviamente as respostas a essas indagações estão relacionadas às investigações, em escala piloto, para cada tipo de minério em particular. Estas investigações têm como principal objetivo obter avaliações cuidadosas das variáveis, além de gerar dados consistentes para o projeto de engenharia. Assim, só os testes em unidade piloto poderão viabilizar a utilização da moagem autógena ou semi-autógena para um determinado minério, estabelecendo a capacidade do moinho para obtenção de um produto específico, sob determinadas condições.

Os estudos em unidade piloto permitem trabalhar com menor quantidade de material, obtendo-se dados confiáveis para o *scale up*, a baixos custos. A prática tem mostrado que resultados confiáveis somente poderão ser obtidos com estudos em escala piloto utilizando moinhos com diâmetros não menores que 1,5 m. Tais equipamentos reproduzem as condições de moagem que ocorrem nos moinhos industriais.

Alguns testes, utilizando pequenas quantidades de material são feitos para avaliar as características de moabilidade do minério e completar sua caracterização. Dentre eles, destacam-se: teste de competência; pêndulo; de queda e de moabilidade autógena. Esses ensaios não encerram a confiabilidade normalmente exigida para o *scale up* e são utilizados, em alguns casos, nos estudos de caracterização ou como complemento dos ensaios em unidade piloto (Weiss, 1985).

Neste Capítulo é discutida uma metodologia de testes de moagem autógena em escala piloto, a qual resultou, em parte, da experiência adquirida pelo CETEM nesta área. Aqui não se propõe esgotar o assunto, mas pretende-se que este trabalho seja uma ferramenta útil ao operador de unidade piloto, proporcionando-lhe a obtenção de resultados confiáveis, necessários aos projetos de engenharia das unidades industriais. Adicionalmente, pretende-se que a metodologia do CETEM contribua com a racionalização de ensaios, minimizando a quantidade de amostras, o número de ensaios e o tempo de duração dos mesmos. Além disso, espera-se maior reprodutibilidade dos resultados e, principalmente, sucesso nas operações em escalas piloto e industrial.

2. AMOSTRAGEM E CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO

O tipo de minério afeta o processo de moagem autógena, alterando, entre outros, a escala de produção e a granulometria do produto moído. Em certos casos, as atenções apontam para os efeitos da moagem autógena no tratamento subsequente do produto moído. Noutros, as atenções direcionam-se para os consumos de energia e de revestimentos dos equipamentos de cominuição, bem como para a capacidade de produção.

A amostragem e caracterização das amostras ou tipos de minérios para moagens autógena e semi-autógena não são triviais. Elas estão relacionadas à ampla faixa granulométrica da alimentação e à diversidade dos mecanismos de quebra. Além disso, refletem na performance dos processos de moagem, pois estes são afetados pelas características do minério, em termos da distribuição granulométrica, moabilidade e densidade. Variações nestes fatores podem afetar prontamente as condições operacionais dos circuitos tanto piloto como industrial (McPhesson e Turner, 1980).

Podem ser mencionados outros fatores dos minérios que afetam a sua moagem pelo processo autógeno ou semi-autógeno: as características petrográficas, moabilidade, densidade, composição mineralógica, abrasividade, umidade, granulometria de liberação, etc. Quando se trata de um minério complexo, deve-se considerar essas diferenças dentro do mesmo jazimento. Tais considerações permitem fazer uma avaliação do comportamento do minério, quando submetido ao processo de moagem. Dessa forma, os estudos em unidade piloto devem ser conduzidos com material representativo daquele a ser tratado na unidade industrial, levando em consideração todas as variações que lhe são peculiares, sempre em consonância com o plano de lavra da mina.

Para tanto, devem ser levados em consideração os dados geológicos da jazida, os quais fornecem informações úteis acerca dos constituintes mineralógicos do minério, a quantidade e índice de disseminação dos mesmos, número de zonas distintas do minério e as suas principais características (Wakeman, 1982). A quantidade de amostras utilizadas nos estudos em escala piloto depende do circuito de moagem a ser estudado, do tipo de minério e da mineralização do mesmo, bem como do nível de

informações que se deseja obter. Quando se trata de um minério homogêneo, isto é, com poucas variações mineralógicas, são necessários pelo menos 500 t representativas do minério bruto, para estudos em unidade piloto, usando moinho com 1,5 m de diâmetro.

Para um minério complexo com variações significativas na composição mineralógica, densidade, etc., é aconselhável estudar, em separado, cada tipo de minério, desde que ele retrate, pelo menos, 15% do total do jazimento, mas sempre obedecendo às diretrizes estabelecidas no plano de lavra da mina. A granulometria do minério para os ensaios em unidade piloto deverá corresponder a mesma que irá alimentar a unidade industrial. Quando há a necessidade de realizarem estudos detalhados, com minérios complexos, é sempre aconselhável deslocar a unidade piloto até o local da mina. Dessa forma, cria-se a oportunidade de utilizar maior quantidade de amostra e, ainda, investigar, em separado, os diferentes tipos de minérios da jazida, bem como as prováveis combinações dos tipos de minérios para compor a alimentação, se for o caso. Tais composições são importantes e permitem avaliar a necessidade de se fazer um sistema de homogeneização do minério englobando mais de um tipo. Isso permite viabilizar o processo de moagem para os tipos de minério refratários ao processo de cominuição (Mosher, 2002).

Antes do início dos ensaios, em escala piloto, devem ser tomadas alíquotas das amostras a serem investigadas, para que sejam realizadas análises químicas e mineralógicas, determinações do índice de trabalho (*work index*), umidade, etc. Também, nessa oportunidade, devem ser considerados o índice de friabilidade do minério, a quantidade de material grosso que constitui o meio moedor e, principalmente, suas características de moabilidade.

O índice de trabalho permite uma avaliação inicial da energia necessária para moagem convencional com bolas ou barras. É sempre aconselhável determinar esse parâmetro para todos os tipos de minérios testados na unidade piloto, pois é um dado útil para avaliações econômicas do projeto. O índice de trabalho não pode ser usado para determinar o consumo de energia na moagem autógena. Por outro lado, também não são aceitas as correlações feitas entre o índice de trabalho obtido com base em dados operacionais em

escala piloto ou industrial de moagem autógena, e aquele índice cuidadosamente determinado em laboratório. Os chamados índices operacionais incluem valores maiores do que aqueles padronizados por Bond.

Dados industriais indicam que as variações na capacidade do moinho são mais significativas quando varia a competência do minério, isto é, sua maior ou menor tendência à moagem autógena, do que quando varia o índice de moabilidade propriamente dito. Dessa forma, constata-se maior capacidade do moinho quando se trata de minério com elevado índice de competência, pois o meio moedor do próprio minério possui maior sobrevivência dentro do ambiente de moagem no interior do moinho. O contrário ocorre com minérios de baixo índice de moabilidade, pois o seu meio moedor possui baixa eficiência, ou seja, não há fragmentos de rocha maiores para moer os menores. Nesta classe de minérios estão incluídos os friáveis (Herbst, 2003).

O índice de abrasão pode ser utilizado para avaliar o desgaste dos revestimentos dos equipamentos nos circuitos de britagem e moagem.

3. MEDIDAS DO CONSUMO DE ENERGIA

Vários são os equipamentos e/ou sistemas utilizados na medida do consumo de energia nas unidades piloto de moagem autógena. Assim, são realizadas medidas da energia usada para mover o sistema, isto é, a energia total (E_t) fornecida ao sistema, que inclui todas as perdas. Essa energia é medida na alimentação do motor do moinho.

A energia bruta E_b é aquela determinada no eixo de saída do redutor, Figura 1. A sua determinação é feita com auxílio do freio de Prony, aplicado no eixo de saída do redutor, para uma dada velocidade, ou seja, para uma dada combinação de polias (motor/redutor). Esse método permite medir a energia bruta com base na energia total e elimina as perdas ocorridas no motor, transmissões e redutor. Recomenda-se efetuar essas determinações antes dos testes, e os valores são plotados em um gráfico, energia total *versus* energia bruta, os quais têm uma correlação linear, conforme ilustrado na Figura 2. Em geral, as medidas realizadas com o freio de Prony são feitas apenas uma vez, pois não há variações significativas dos valores para a mesma combinação de polias, resultando numa dada velocidade do moinho (Wyslouzil, 1978).

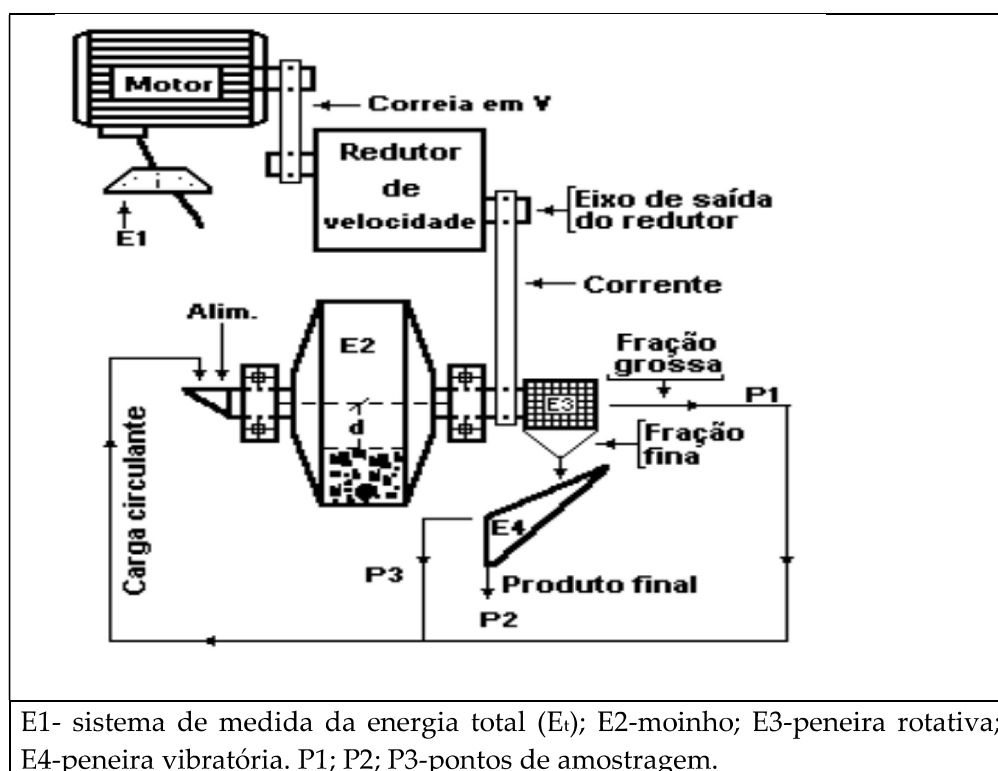


Figura 1 – Representação esquemática do circuito de moagem autógena utilizada nos estudos piloto do CETEM.

A energia vazia (E_v) é medida quando o moinho está operando vazio, ou seja, sem carga contida. Aliás, as medidas de E_v devem ser feitas ao final de cada teste, após a carga, no interior ser retirada para análise. Na prática, as determinações dos valores correspondentes de E_b e E_v , ambas no eixo de saída do redutor, são feitas com auxílio do gráfico da Figura 2. O procedimento gráfico consiste em plotar no eixo das abscissas os valores de E_t , lendo-se no eixo das ordenadas o valor correspondente de E_b ou usar uma equação similar à reta do gráfico da Figura 2. Por exemplo, para um valor de E_t igual a 13,99 kWh, o valor correspondente de E_b será 12,72 kWh, lido no eixo das ordenadas, conforme ilustrado na Figura 2. Procedimento análogo é feito para os valores de E_v (Sampaio *et al.*, 1995).

Exemplo: $E_b = 0,991 \times 13,99 - 1,143$

$E_b = 12,72 \text{ kWh}$

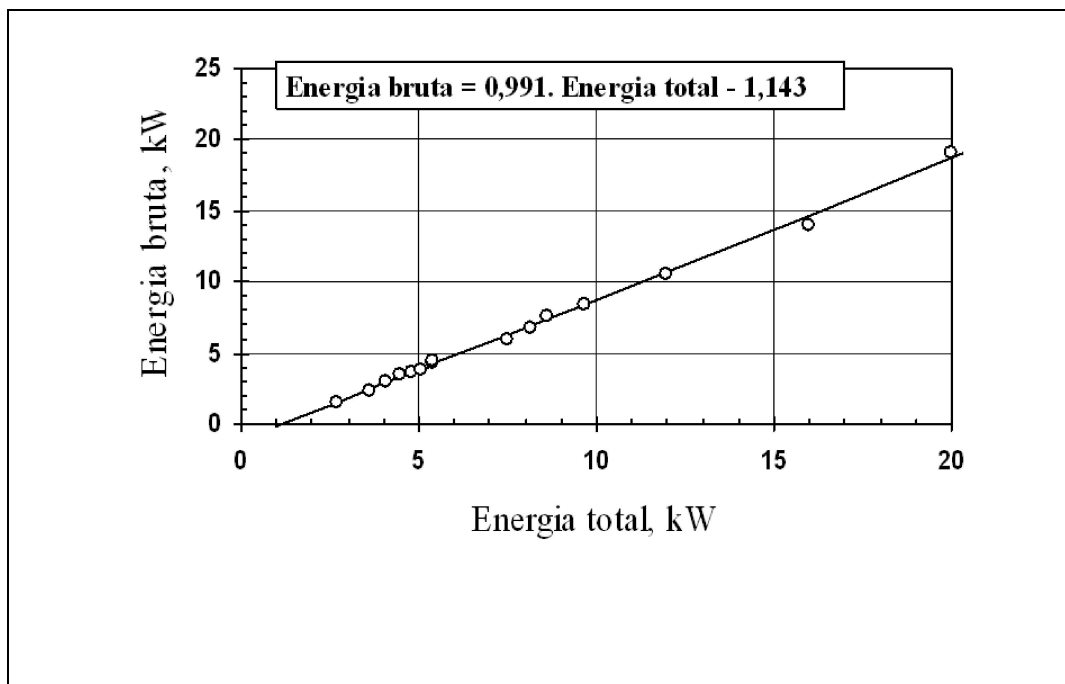


Figura 2 – Representação gráfica da energia total (E_t) em função da energia bruta (E_b). Relação obtida por meio de testes com o freio de Prony.

A energia líquida (E_l), em kWh, obtida no eixo de saída do redutor corresponde à energia bruta menos a energia vazia. Dessa forma, tem-se:

$$E_l = E_b - E_v \quad [1]$$

A energia líquida (E), em kWh/t, corresponde a E_l , calculada em [1], dividida pela vazão de alimentação do moinho (Q_A), em t/h, e no estado de equilíbrio da operação (Weiss, 1985), ou seja:

$$E = \frac{E_b - E_v}{Q_A} \quad [2]$$

No caso do exemplo ilustrado na Tabela 1, os valores calculados de E_l e (E_v), foram 12,72 e 5,84 kWh, respectivamente. Logo, o valor da energia líquida em kWh/t é:

$$E = \frac{12,72 - 5,84}{0,70} = 9,84 \text{ kWh/t}$$

Na Tabela 1 constam os resultados de um ensaio de moagem autógena para 6 h de operação. Este exemplo pode ser utilizado pelo operador como guia prático nas futuras investigações de moagem autógena em escala piloto. Adicionalmente, devem ser consideradas as informações contidas na Tabela 1 e, entre outras, as que estão a seguir relacionadas:

- (i) data, início e término do ensaio;
- (ii) distribuição granulométrica da alimentação (mm);
- (iii) abertura da grelha de descarga do moinho (mm);
- (iv) vazão da alimentação (kg/h);
- (v) malha da peneira vibratória que fecha o circuito ou as dimensões e condições operacionais do hidrociclone, se for o caso;
- (vi) volumes inicial e final da carga interna do moinho, em percentagem do seu volume interno;
- (vii) quantidade, diâmetros, etc das bolas adicionadas, no caso de moagem semi-autógena (kg e mm).

Tabela 1 – Principais dados obtidos num ensaio de moagem autógena durante 6 h de operação, na unidade piloto do CETEM, para uma alimentação de 700 kg/h, cujo valor de E_v , descontando as perdas, foi de 5,84 kWh.

Hora	CC	DM	PM	Energia (kWh/t)		
	%	%sol.	kg/h	Total	Bruta	Líquida
09:00	-	-	-	-	-	-
09:30	-	-	-	13,25	11,98	8,78
10:00	-	-	-	13,59	12,32	9,26
10:30	14	65,9	728	13,54	12,28	9,20
11:00	15	67,7	791	13,70	12,44	9,42
11:30	14	69,3	850	13,64	12,37	9,33
12:00	15	64,3	679	13,60	12,33	9,28
12:30	14	72,1	974	13,66	12,40	9,37
13:00	12	60,5	576	13,72	12,45	9,45
13:30	12	65,2	706	13,73	12,46	9,46
14:00	14	70,2	888	13,66	12,39	9,36
14:30	13	68,1	805	13,66	12,39	9,36
15:00	13	74,4	1.095	13,99	12,72	9,84
CC-carga circulante; DM-descarga do moinho; PM-produto da moagem.						

4. PROCEDIMENTO DOS ENSAIOS

Os ensaios esclarecem dúvidas quanto ao processo de moagem, autógena ou semi-autógena, consumo de energia, destino do produto moído, etc. Os dados obtidos nas operações em unidade piloto devem ser cuidadosamente revisados sobre todos os aspectos e/ou fatores que possam afetar as operações industriais. O sucesso do projeto industrial depende, sobretudo, da precisão dos dados obtidos em escala piloto, os quais são

necessários ao *scale up* (Mosher, 2002). A realização dos testes obedece a um procedimento bem planejado que favorece a economia de tempo, de amostras e proporciona a obtenção de resultados e/ou dados confiáveis. Pretende-se, com o presente trabalho, não esgotar o assunto mas, sempre atento à obtenção de dados precisos, reduzir o trabalho experimental, facilitar a otimização do processo, simplificar a operação, tornando-a mais acessível aos operadores. Assim, eles poderão executar os trabalhos experimentais, em escala piloto, de forma mais confortável e gerar dados bem mais confiáveis.

Descrição do Equipamento

O moinho, tipo cascata, utilizado na unidade piloto do CETEM, é de fabricação Koppers, com dimensões de 1830x915 mm, sendo o diâmetro interno de 1730 mm. Ele está equipado com grelhas de descarga, cuja abertura ideal é objeto de estudo. O sistema de descarga da polpa fica localizado atrás da grelha e é constituído de vários içadores de polpa, em forma de um cabo de guarda-chuva, distribuídos em posições diametralmente opostas. O sistema suspende a polpa do fundo do moinho fazendo-a fluir através do munhão de descarga. O acionamento do moinho é feito por meio de um motor Búfalo de 25CV/440V/12,5A e um redutor de velocidade de fabricados pela Transmotécnica, com eixos paralelos e razão de redução de 40:1. A transmissão entre o motor e o redutor é feita segundo três correias em V, enquanto aquela entre o eixo de saída do redutor e o moinho é feita por um sistema de corrente com auxílio de coroas dentadas. No munhão da alimentação, está instalado o *chute feede*, que facilita o processo de alimentação e, na descarga, está instalada uma peneira rotativa, que opera normalmente com uma abertura de 6,0 mm, dependendo da situação em estudo. Este equipamento é utilizado para classificação do minério assim que este ser descarregado do moinho. A alimentação do moinho é feita com auxílio de uma correia transportadora de 20 m de comprimento e 0,30 m de largura, acionada com motor de 1,5HP/220V/4,5A. Outros equipamentos utilizados na unidade piloto podem ser observados na Figura 3. A complexidade do circuito irá determinar a quantidade de equipamentos a serem utilizados na unidade piloto.



Figura 3 – Detalhes da instalação da unidade piloto de moagem autógena existente no CETEM. Em (a) pilhas de amostras para alimentação do moinho e, em (b), circuito de moagem.

Sistemas de Lubrificação da Corrente, do Redutor e dos Mancais

Inicialmente efetua-se a limpeza completa e lubrificação com graxa apropriada, dentro do prazo de validade, e da corrente de transmissão entre o eixo de saída do redutor e o moinho. Na etapa seguinte efetua-se a lubrificação do redutor de velocidade, isto é, adiciona-se óleo SAE 40 ou equivalente, dentro do prazo de validade. Sempre antes de qualquer trabalho deve-se trocar o óleo do redutor. Nunca se deve efetuar lubrificação com óleo estocado por longo período de tempo. Os mesmos cuidados devem ser tomados com a graxa lubrificante da corrente. Esse procedimento é feito apenas uma vez para cada programa de testes ou projetos.

A lubrificação dos mancais é feita por meio de óleo, seguindo um banho contínuo, sobre os mesmos. Isto é feito com auxílio de uma bomba e tanque de óleo instalados no piso inferior do moinho. Deve ser utilizado óleo MEROPA 200 ou equivalente. O sistema funciona continuamente com o bombeamento do óleo do tanque até o topo dos mancais, daí o mesmo flui por gravidade, retornando ao reservatório, conforme representação esquemática ilustrada na Figura 4.

O sistema de lubrificação deve estar ausente de poeiras ou outros tipos de contaminações que possam comprometer a qualidade do óleo utilizado. Os monitores que injetam o óleo nos mancais, não devem ficar colados aos mesmos, e a vazão de óleo nesse ponto deve ser da ordem de 1,0 L/min. Recomenda-se a utilização de óleo novo, ou seja, dentro da validade e especificações, ao iniciar um programa de testes ou projeto, garantindo assim, um bom desempenho do sistema de lubrificação e eliminando os riscos de superaquecimento dos mancais. A título de exemplo, um volume de 18 L de óleo é suficiente à execução de mais de 10 testes com duração de 10 h cada.

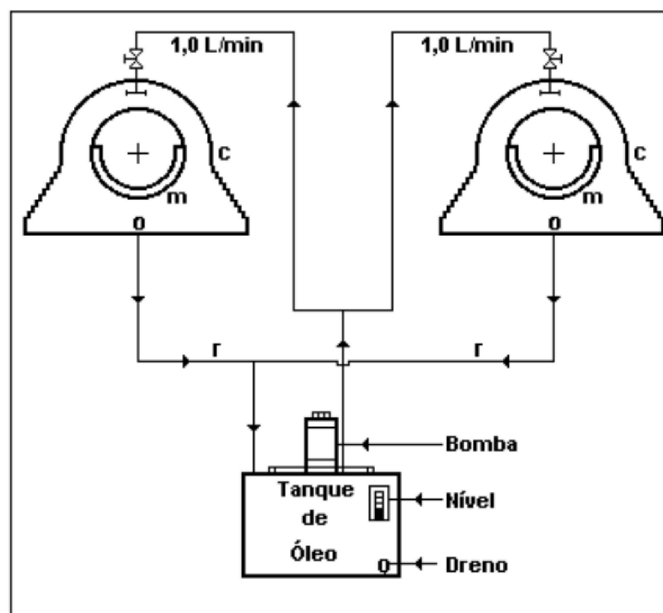


Figura 4 - Representação esquemática do circuito de lubrificação dos mancais do moinho autógeno, onde “r” retorno do óleo; “m” mancais; “c” capas dos mancais.

O operador deve tomar cuidados especiais antes do acionamento do moinho e, para isso, deve confirmar se:

- (i) não há pessoas próximas ao moinho que possam provocar algum tipo de acidente;
- (ii) a corrente de transmissão está devidamente lubrificada com graxa apropriada e se o protetor da mesma está instalado corretamente;

- (iii) todos os parafusos de sustentação do revestimento estão devidamente ajustados;
- (iv) há óleo no reservatório da bomba, sendo esta acionada, certificando-se de que o óleo flui desde os mancais até o tanque reservatório.

Após estas confirmações, o operador deve acionar cuidadosamente o moinho, tendo a certeza de que nenhum outro obstáculo pode interromper o acionamento da máquina, observando também se ela pode girar sem causar nenhum acidente. Deve ainda ser lembrado que o moinho não pode operar, em hipótese alguma, sem a devida lubrificação dos mancais. Durante os testes, o operador deve sempre verificar, em intervalos de tempo preestabelecidos, se o sistema de lubrificação está funcionando normalmente e qual a temperatura dos mancais, que deve permanecer em torno de 30°C, indicando a ausência de superaquecimento. Uma falha nesse sistema acarreta o superaquecimento dos mancais e a conseqüente danificação dos mesmos. Logo, a temperatura dos mesmos deve ser verificada de forma repetida e programada durante a operação. Também deve ser observado se há vazamento do óleo dos mancais, decorrente das imperfeições no encaixe entre os retentores e os mancais. Tal escape, normalmente não é tão significativo, no entanto, merece atenção por parte do operador. Por essa razão, deve-se completar o óleo se o remanescente no reservatório da bomba pode ainda ser utilizado ou se há necessidade da troca total do óleo.

5. CONTROLE OPERACIONAL

Alimentação do Moinho

A unidade piloto tem uma vazão de alimentação (kg/h) muito baixa, variando desde 500 até 2.500 kg/h ou mais. Como conseqüência, deve-se manter constantes as proporções de cada fração granulométrica do minério na alimentação do moinho. Este procedimento permite, ao longo de todo o ensaio, uma alimentação homogênea, isto é, com a mesma granulometria, densidade, características petrográficas, composição mineralógica, etc. Para assegurar isso, é prático no CETEM classificar o material em três frações granulométricas: +200/100; -100/50; -50 mm. Entretanto, outras alternativas

podem ser usadas em função das características do minério. Outro procedimento é utilizar a distribuição granulométrica do material após sua britagem primária. Tais dados são obtidos com auxílio de tabelas fornecidas pelos fabricantes de equipamentos (britadores). Indica-se este procedimento quando há previsão de britagem primária no projeto da unidade industrial (Dor, 1982).

Em escala piloto, a alimentação é feita por meio de uma correia transportadora, na qual cada fração do material é adicionada de acordo com a proporção que a mesma ocorre no minério bruto e com a vazão da alimentação. Geralmente são adicionados incrementos que variam de 50 a 100 kg e que reproduzem o minério bruto. Essas frações são alimentadas em intervalos de tempo preestabelecidos, de acordo com a taxa de alimentação; geralmente variam de 2 a 10 min. Exemplificando, para uma taxa de alimentação de 500 kg/h, o intervalo de tempo para adição das frações é maior que aquele correspondente a uma taxa de alimentação de 2.500 kg/h. O engenheiro responsável pela pesquisa e o operador podem modificar a metodologia de alimentação, com o propósito de atender as condições inerentes à situação em estudo (Kelly, 1982).

Carga Interna do Moinho

Ao iniciar a operação do moinho é sempre aconselhável carregá-lo com uma carga equivalente a 28% do seu volume interno. Este procedimento permite que a operação atinja o estado de equilíbrio em um intervalo de tempo menor, diminuindo o consumo da amostra disponível aos estudos.

A carga interna do moinho deve ser cuidadosamente controlada durante a operação, para evitar distúrbios operacionais. Operações com volumes de carga acima de 30% comprometem a confiabilidade dos resultados e podem favorecer o aumento desordenado da carga, causando distúrbios significativos à operação. Para minérios mais friáveis, o volume de carga tende a permanecer em torno de 30%. Este fato deve ser confirmado pelos estudos em escala piloto.

Quando o volume da carga varia, também varia o consumo de energia, porém a recíproca não é verdadeira. Há, contudo, uma regra operacional, quando ocorre uma variação no valor da energia total, algo de anormal

também ocorre no interior do moinho, ou seja, o sistema não mais se encontra no estado de equilíbrio.

Em escala piloto o controle do volume da carga pode ser feito segundo vários procedimentos. O primeiro consiste na utilização de células de carga que provem, em certa extensão, o controle do peso da carga no interior do moinho, podendo o operador observar simultaneamente a variação da mesma e do consumo de energia correspondente. Assim, ele controla de forma indireta, o volume da carga no interior do moinho (Sampaio *et al.*, 1988). A segunda opção é por meio do controle convencional, que consiste em interromper a operação, medindo-se em seguida a distância “d” entre a superfície da carga e o eixo do moinho, conforme mostra a Figura 1. Esse valor é levado ao gráfico da Figura 5, sendo então determinado o volume correspondente da carga. Essa interrupção deve ocorrer no menor intervalo de tempo possível, no máximo de 6 min.

Existem mecanismos eletrônicos que são instalados no moinho, permitindo o registro (digital ou em computador) do volume da carga interna, durante toda a operação. Esses sistemas são mais precisos e de fácil operacionalidade.

Ao final de cada teste, a carga remanescente no moinho deve ser retirada para proceder à medida do seu volume, à análise granulométrica e à investigação da fração crítica. Em alguns casos, é aconselhável fotografá-la para posteriores ilustrações dos relatórios, mostrando a forma dos seixos gerados no processo. Essa mesma carga deve ser retornada ao moinho para então iniciar o teste seguinte. Tal procedimento tem por objetivo fazer com que a operação atinja o estado de equilíbrio o mais rápido possível, minimizando o consumo de minério disponível na pilha de estoque.

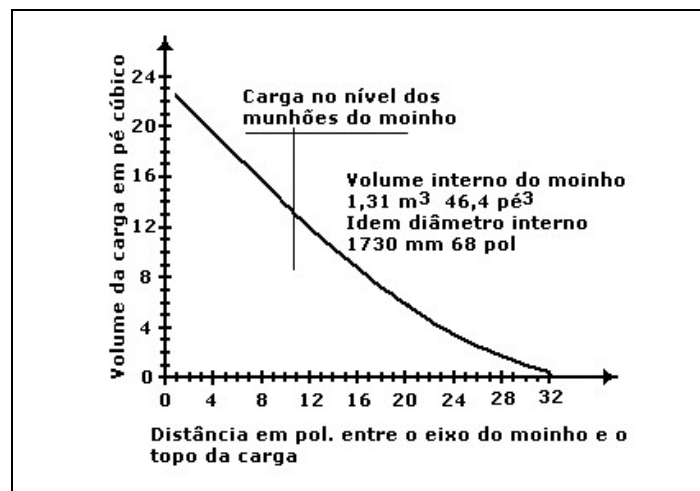


Figura 5 – Representação gráfica da relação entre o volume da carga do moinho, em pés cúbicos, e a distância, em polegadas, entre o eixo do moinho e o topo da carga.

A otimização do volume da carga no interior do moinho permite operá-lo com maior estabilidade, maximizando também o consumo total de energia requerido pelo sistema. O gráfico da Figura 6 mostra a variação (%) do volume da carga no interior do moinho e a energia total (kWh) solicitada pelo sistema (Weiss, 1985).

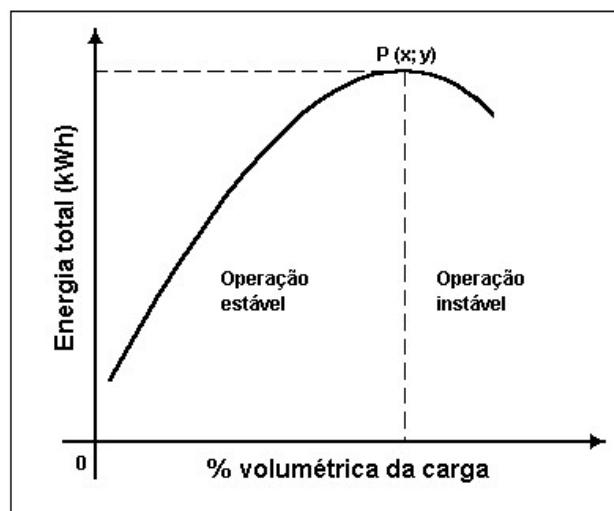


Figura 6 – Representação gráfica da relação entre o volume interno da carga no interior do moinho e do consumo total de energia (kWh) solicitado pelo sistema.

Quando a carga no interior do moinho atinge valores acima dos níveis normais, ou seja, quando o moinho enche, deve-se interromper a alimentação e continuar a operação até que a carga volte a ocupar os valores permitidos, isto é, uma fração do volume interno do moinho entre 25 e 30%. Na etapa seguinte deve-se continuar o teste com uma taxa de alimentação menor e, assim, sucessivamente até atingir o estado de equilíbrio. O processo inverso é mais aconselhável. Ele consiste em iniciar o trabalho com uma taxa de alimentação menor e depois aumentá-la gradativamente até atingir o equilíbrio, ponto P(x; y) da Figura 6.

Fração Crítica

No processo de moagem autógena ocorre, em alguns casos, a formação de uma fração de material na carga interna do moinho com uma granulometria bastante grossa para ser moída pelas rochas maiores contidas na carga e, ao mesmo tempo, bastante fina para moer a fração mais fina da carga. Essa fração do material é conhecida como fração crítica, cuja granulometria, dependendo do minério, situa-se na faixa de 25 a 75 mm. Como se observa, esse material possui efeitos importantes no processo de moagem. A formação da fração crítica causa distúrbios operacionais, aumentando o consumo de energia na moagem e a carga no interior do moinho, bem como diminuindo a sua produção e a carga circulante. A sua quantificação deve ser feita por testes em unidade piloto, nos quais se analisam entre outras, a quantidade, a sua distribuição granulométrica e a forma dos seixos gerados no processo. Assim, os testes em unidade piloto devem durar pelo menos 10 h. Entretanto, dependendo do tipo de minério e da experiência do operador, os ensaios podem ser feitos com tempo de duração de até 6 h.

Na prática, a variação no consumo de energia constitui a maneira mais usual de se perceber a formação da fração crítica. Entre outros, alguns fatores estão relacionados à formação da fração crítica, os quais podem ser:

- (i) diferenças elevadas nos índices de moabilidade dos diversos tipos de minério na alimentação, ou seja, minério com mais de um componente e diferentes resistências ao processo de moagem;
- (ii) pouco material grosso (rocha compacta) contido na alimentação;

- (iii) baixa sobrevivência das rochas no ambiente de moagem.

Das alternativas práticas usadas para evitar o inconveniente da formação da fração crítica, duas delas são mais usadas.

A primeira alternativa consiste na abertura de janelas (*pebble port*) na grelha de descarga do moinho, com dimensões adequadas à saída dos seixos, os quais são britados e retornados ao moinho, como carga circulante. O procedimento consiste em escolher uma seção da grelha original e proceder à abertura da janela. Caso haja necessidade de se abrir mais de uma janela, é recomendável a configuração das mesmas em posições diametralmente opostas na grelha. Quando se desejar descarregar os seixos mais grossos, as janelas não devem situar-se muito próximas ao fundo do moinho. No entanto, não se trata de uma regra geral, os ensaios em unidade piloto esclarecem melhor o assunto. A janela próxima ao fundo do moinho aumenta significativamente a carga circulante (Sampaio, 1995; Sampaio, 1988). Dependendo do circuito de moagem, os seixos assim retirados poderão ser aproveitados como meio moedor na moagem secundária, moagem com seixos (*pebble milling*). A segunda alternativa é a moagem semi-autógena.

Moagem Semi-autógena

Consiste na adição de bolas com diâmetros que podem variar entre 80 a 130 mm. Este procedimento transforma a moagem autógena em semi-autógena. A quantidade de bolas adicionada é calculada em função da percentagem do volume interno do moinho, assim, são adicionadas quantidades correspondentes de 2 a 12% desse volume. Os valores obtidos em escala piloto situam-se entre dois e quatro pontos percentuais abaixo dos valores utilizados em escala industrial, para um mesmo minério. Logo, cuidados especiais devem ser tomados com valores elevados, nos estudos em escala piloto.

A otimização da carga de bolas é objeto de estudo. Sugere-se a adição controlada, começando com pequenas quantidades, cujo aumento é feito de forma escalonada, ou seja, de dois em dois pontos percentuais até atingir o ponto de equilíbrio. A distribuição da carga de bolas também é objeto de estudo. Os minérios com elevados índices de moabilidades, normalmente,

requerem bolas maiores, podendo chegar a diâmetros de 130 mm. O consumo de bolas deve ser medido durante os ensaios em escala piloto. Na prática, as bolas são pesadas em balança de precisão antes e depois dos testes para, então, calcular o consumo em função da quantidade de minério moído ou do consumo de energia, ambos no mesmo intervalo.

O cálculo da quantidade de bolas a ser adicionadas é feito tomando-se como base a densidade média da carga de bolas, ou seja, 4.485,6 kg/m³. O espaço vazio entre as bolas é estimado em 42% em relação ao volume total ocupado pelas mesmas. Na Tabela 2 constam os valores das frações do volume interno do moinho, os volumes correspondentes das cargas de bolas e seus respectivos pesos.

Tabela 2 – Valores mais usados das frações do volume interno do moinho com os seus volumes correspondentes das cargas de bolas e respectivos pesos. O volume interno do moinho do CETEM é 1,31 m³, e a densidade média da carga de bolas é 4.485,6 kg/m³.

%V _i	CB (m ³)	CB (Kg)
2	0,0262	117,52
3	0,0393	176,28
4	0,0524	235,05
5	0,0655	293,81
6	0,0786	352,57
7	0,0917	411,33
8	0,1048	470,09
9	0,1179	528,85
10	0,1310	587,61
11	0,1441	646,37
12	0,1572	705,14
V _i - volume interno do moinho CB - carga de bolas		

Carga Circulante

A carga circulante na moagem autógena em escalas piloto e industrial é medida em função da percentagem da alimentação nova do moinho. No caso do circuito da Figura 1 significa a medida das frações grossas (P_1 e P_2) da peneira rotativa (tromel) e do classificador, que geralmente pode ser uma peneira vibratória ou um hidrociclone. A soma das massas de P_1 e P_2 dividida pela massa da alimentação nova multiplicada por 100 é o quociente a soma das massas de P_1 e P_2 . As medidas são feitas após a tomada de incrementos desses dois produtos em intervalos de tempo preestabelecidos, os quais são pesados e combinados para então calcular a carga circulante do sistema em relação à alimentação nova. A carga circulante dos valores operacionais mais recomendados estão compreendidos entre 50 e 80%. Existem, no entanto, operações com valores acima de 80%, mas sempre inferiores a 150%. Valores elevados da carga circulante, acima de 150%, não são recomendados. Há, contudo, indicação de instabilidade operacional do processo.

Percentagens de Sólidos na Polpa

Na moagem autógena é comum considerar a polpa de moagem em relação à fração granulométrica da carga interna abaixo de 6,0 mm e a água contida na mesma. Os valores da densidade da polpa nas operações piloto e industrial são os mesmos, variando na faixa de 60 a 70% de sólidos, sendo o valor médio usado com mais frequência. A percentagem de sólidos pode variar em função da:

- (i) distribuição granulométrica e/ou da competência do minério na alimentação;
- (ii) temperatura da polpa e do produto moído.

Em escala industrial, mais importante do que o controle da percentagem de sólidos no interior do moinho é a otimização das técnicas de variação da mesma, objetivando maximizar a produção do moinho. A sua medida em escala industrial é, em alguns casos, trabalhosa devido à dificuldade de acesso à carga interna do moinho, necessitando de técnicas especiais. Em escala piloto o processo é mais simples e pode ser feito mediante a coleta de amostras

da polpa na descarga do moinho efetuando-se, em seguida, a medida da sua densidade.

Outro procedimento para medida da percentagem de sólidos, que pode ser utilizado em escala piloto, consiste em efetuar a recomposição da polpa no interior do moinho segundo a amostragem da carga circulante, considerando a fração com granulometria abaixo de 6,0 mm. Esta fração é somada àquela com a mesma granulometria contida na alimentação nova do moinho. Com esses dados e a quantidade de água adicionada ao moinho, é possível calcular a percentagem de sólidos no interior do mesmo.

Velocidade do Moinho

A velocidade do moinho é calculada em função da percentagem da velocidade crítica (V_c) do mesmo. É definida como sendo a velocidade na qual não ocorre mais evolução da carga no interior do mesmo, isto é, a força centrífuga é suficiente para causar a aderência da carga à carcaça do moinho. Essa velocidade é calculada pela expressão empírica:

$$V_c = \frac{42,306}{\sqrt{D}} \quad [3]$$

onde:

V_c velocidade crítica em rpm;

D diâmetro interno do moinho em metros.

Para o caso do moinho do CETEM, com diâmetro interno de 1,73 m, tem-se:

$$V_c = \frac{42,306}{\sqrt{1,73}} = 32,16 \text{ rpm.}$$

A velocidade do moinho é uma das variáveis operacionais e o seu controle em escala piloto é feito por meio de um sistema de polias e de um inversor de frequência do motor do moinho. Para tal, são usadas polias de diversos diâmetros, as quais são combinadas à polia do redutor, que tem um diâmetro de 250 mm. Na Tabela 3 constam os diâmetros das diversas polias do motor do moinho usadas nas investigações piloto do CETEM. São

especificados os números das polias, diâmetros em mm, velocidade do moinho para cada polia e a fração correspondente da velocidade crítica.

A otimização da velocidade do moinho permite a maximização da sua capacidade de produção. Normalmente os valores otimizados encontram-se na faixa de 70 a 80% da velocidade crítica. No entanto, é possível encontrar moinhos operando com velocidades que variam entre 60 e 90% da velocidade crítica (Dor, 1982).

Tabela 3 – Dados relativos às polias do motor do moinho, existente no CETEM, as quais são conectadas, por meio de correias em v, à polia do redutor com diâmetro de 250 mm, bem como as velocidades correspondentes.

Polias do Motor do Moinho		Velocidade do Moinho	
Nº	Diâmetro (mm)	rpm	%V _c
01	200	19,87	59,40
02	230	21,31	63,71
03	240	23,71	70,88
04	260	24,54	73,36
05	265	25,12	75,10
06	270	25,48	76,17
07	305	29,03	86,79
rpm – rotações por minuto		%V _c – percentagem da velocidade crítica	

Amostragem do Circuito

A definição dos pontos de amostragem para controle operacional dos ensaios de moagem depende da complexidade do circuito em estudo. Assim, para circuitos mais simples, como ilustrado na Figura 1, é aconselhável a amostragem dos pontos 1, 2 e 3. Nos experimentos realizados no CETEM, tem-se reservada atenção especial com a amostragem no ponto 2, produto final da moagem. Em geral esse ponto possui uma vazão de polpa mais

elevada devido à sua diluição. Nesse caso, foram obtidos bons resultados com tempo de amostragem da ordem de 1 min. Para valores elevados da vazão a amostragem foi mais precisa com intervalo de tempo acima de 1 min. Entretanto, o plano de amostragem depende, essencialmente, do circuito estudado e da habilidade do operador. Cabe ao pesquisador responsável pelas investigações elaborar um plano de amostragem que inclui as peculiaridades inerentes ao circuito em questão.

6. COMENTÁRIOS GERAIS

Os estudos de moagem autógena em unidade piloto devem ser criteriosos, pois a obtenção de dados imprecisos implica num sério risco ao projeto industrial, comprometendo, significativamente, a capacidade da futura unidade industrial. Deve-se, sempre que possível, eliminar os riscos com estudos bem planejados em escala piloto, permitindo estudar com detalhes todas as variações inerentes ao minério. Todos os tipos de minério da jazida devem ser investigados separadamente, desde que cada tipo corresponda pelo menos a 15% da reserva total. Estes minérios serão lavrados separadamente.

Os equipamentos eletrônicos para medida da carga interna do moinho favorecem o controle mais preciso dessa variável, economizando tempo e amostra, além de prover mais conforto ao operador.

O bom desempenho da moagem autógena depende muito da competência do minério. O operador deve ter habilidade de descobrir a maneira pela qual o minério mói a si próprio, pois cada minério possui o seu próprio comportamento no ambiente de moagem. É comum afirmar que, no processo de moagem autógena, o minério é quem fala “moa-me à minha maneira”.

A evolução das técnicas de controle operacional da moagem autógena no qual tomam parte a automação, a utilização de grandes equipamentos e as técnicas especiais de homogeneização dos diferentes tipos de minérios de um mesmo jazimento, possibilitou o emprego da moagem autógena ou semi-autógena, como processo de cominuição, à maioria dos minérios. Atualmente o processo é empregado, sem dificuldades, nos novos projetos de mineração.

Isso também justifica o uso deste processo em substituição ao convencional, mesmo considerando-se os elevados investimentos.

As vantagens já discutidas da moagem autógena em relação à convencional têm posicionado esse processo na linha de frente dos novos projetos de mineração. Desse modo, constata-se mais aplicações dos processos autógeno e semi-autógeno em novos projetos de mineração no Brasil.

Finalmente, deve-se sempre ter na memória que cada minério é um novo desafio, cujo processo deve ser estudado. Nunca se deve por em prática a cópia de um processo já desenvolvido para um dado tipo de minério. Não existe um processo único de cominuição para todos os tipos de minérios. Cada caso, ou novo desafio, deve ser estudado criteriosamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barratt, D. J. e Sochocky, M. A. Wakeman, J. S. Factors which influence selection of comminution circuits. In: Mullar, A. L. e Jergensen, II; G. V. (Ed.). Design and installation of comminution circuits. SME, 1982, p.1-26.
- Dor, A. A.; Bassarear Primary grinding mills: selection, sizing and current practices. In: Mular, A. L. and Jergensen, G.V. (Ed.). Design and installation of comminution circuits. SME/AIME, 1982, p.439-473.
- Herbst, J. A.; Lo, Y. C. E Flintoff, B. Size reduction and liberation. In: Fuerstenau, M. C. E Han, K. N. (Ed.). Principles of mineral processing. SME, 2003, p.61-118.
- Kelly, E. G. e Spottiswood, D. J. Introduction to mineral processing. New York: John Wiley & Sons, 1982, p.127-168.
- Mac Pherson, A.R. e Turner, R.R. "Autogenous Grinding from tests work to purchase of a commercial unit". In: Mineral Processing Plant Design. Ed. Mullar. A.L.; Bhappu, R.B.; 3rd Ed. New York: SME, 1980, p.279-305.
- Mosher, J. e Bigg, T. Bench-scale and pilot plant tests for comminution circuit design. In: Mular, A. L.; Halbe, D. N. e Barratt, D. J. (Ed.). Mineral processing plant design, practice and control. vol.1. SME, 2002, p.123-135.

- Sampaio, J. A.; Braga, P. F. A. e Clark, J. Y. Um estudo de moagem autógena em escala piloto com o minério sulfetado de níquel de Fortaleza de Minas. In: XVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia. Anais, vol. I. Rio de Janeiro, 1995, p.148-162.
- Sampaio, J. A.; Ramos, L. T. e Constantin; M.C. Moagem Autógena de Minério de Cobre de Carajás. In:XIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia. Anais, vol. II, São Paulo, 1988, p.809-818.
- Wakeman, J. S. Ore sampling for equipment and flowsheet section. In: Mular, A. L. e Jergensen, II; G. V. (Ed.). Design and installation of comminution circuits. SME, 1982, p.43-47.
- Weiss, N.L. Wet semi-autogenous mills. Jergensen, G.V and Pena, R.F. SME mineral processing handbook. New York: Society of Mining Engineers, (section 3C - chapter 4), 1985.
- Wyslouzil, D. M. Testing methods and measurements. In: Autogenous Grinding Seminar, 26, 1978, Trondheim, Norway.