

METODOLOGIAS PARA ESCALONAMENTO DE MOINHOS PARA PRODUÇÃO DE PELLET FEED: DESAFIOS, AVANÇOS E DESENVOLVIMENTOS NO PROJETO DO MANGANÊS DO AZUL¹

*Claudio Luiz Schneider²
Delciane Porfiro³
Marcus Emrich⁴
Helder Silva Souza⁵*

Resumo

O projeto de produção de *pellet feed* de manganês da Vale propiciou uma série de oportunidades para desenvolvimento e aprimoramento de metodologias e técnicas de escalonamento de moagem. O projeto contemplou ensaios de moagem com cylpebs e barras de diversas amostras de minério de manganês, tanto em escala de bancada como em escala piloto. Com base neste trabalho experimental, o procedimento de Herbst-Fuerstenau para escalonamento de moagem convencional foi aprimorado. Uma nova técnica de escalonamento de moinhos de barras também foi desenvolvida e testada. Aspectos relacionados à geração de superfície específica e à reologia da polpa de minério de manganês foram estudados.

Palavras-chave: Moagem; Escalonamento; Moinho de barras; Superfície específica.

BALL AND ROD MILL SCALE UP FOR PRODUCTION OF PELLET FEED: CHALLENGES AND DEVELOPMENTS FOR THE AZUL MANGANESE ORE

Abstract

Vale's manganese pellet feed project has provided with a unique opportunity for development and improvement of scale up procedures and the associated laboratory methodologies. A number of batch and pilot scale tests were carried out for several samples of manganese ore. Based on the extensive experimental work the experimental procedure for the Herbst-Fuerstenau scale up procedure was improved. Also, a new technique for scaling up rod mills was developed and validated. Some aspects related to the generation of specific surface and pulp rheology were also studied.

Key words: Grinding; Scale up; Rod mill; Specific surface.

¹ *Contribuição técnica ao 40º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 11º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 19 a 22 de setembro de 2010, Belo Horizonte, MG.*

² *Engenheiro de Minas, CETEM, Chefe do Serviço de Desenvolvimento de Produtos Minerai*

³ *Engenheiro de Minas, VALE, Departamento de Marketing e Tecnologia de Ferrosos Gerência Geral de Desenvolvimento e Pesquisa de Ferrosos.*

⁴ *Engenheiro Metalúrgico, VALE, Departamento de Marketing e Tecnologia de Ferrosos Gerência Geral de Desenvolvimento e Pesquisa de Ferrosos.*

⁵ *Engenheiro de Minas, VALE, Gerência Geral de Mineração de Manganês*

1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste projeto é a produção de *pellet feed* de manganês com $60\% < 45 \mu\text{m}$ e não mais do que $6.000 \text{ cm}^2/\text{g}$ a partir de *sinter feed* de manganês. Um dos problemas é a excessiva geração de finos e uma tendência definitiva dos minérios de manganês de produzirem superfícies específicas acima de $6.000 \text{ cm}^2/\text{g}$ na moagem convencional com bolas. A solução convencional seria lançar mão de uma etapa de deslamagem, porém com as desvantagens conhecidas: perda de recuperação, aumento dos custos operacionais, maior investimento e a geração de um passivo. As alternativas propostas neste trabalho foram estudar a utilização da moagem com barras e da moagem convencional, porém com carga de cylpebs.

A alternativa com cylpebs é bastante conhecida, e sabe-se que cargas de cylpebs são menos eficientes na geração de finos do que cargas equivalentes de bolas. Neste caso esta ineficiência é desejada. O escalonamento de Herbst-Fuerstenau⁽¹⁾ de moinhos carregados com cylpebs segue exatamente o mesmo procedimento utilizado para bolas, e os ensaios de moagem de batelada são executados com cargas de equilíbrio de cylpebs na mesma condição da moagem industrial que está sendo projetada.

No caso da moagem com barras, esta aplicação é peculiar. Em geral amostras de *pellet feed* de manganês apresentam um A80 na faixa de 4 mm a 3 mm. O produto desejado tem um P80 em torno de $80 \mu\text{m}$. Em um cenário otimista, isto resulta em uma razão de redução de $RR = 3000/80 = 37,5$. Sabe-se⁽²⁾ que a razão de redução ótima para aplicações com moinhos de barras não ultrapassa 20 e que moinhos de barras operando com razões de redução muito diferentes da ótima proposta por Bond ($R_{ro} = 8 + 5L/D$, onde D é o diâmetro e L o comprimento) são muito ineficientes. Do ponto de vista da engenharia, a hipótese da moagem de barras deveria ter sido abandonada em função destas limitações. Porém, que alternativa poderia ser utilizada se a rota com cylpebs não fosse satisfatória? A outra questão importante é a do escalonamento de moinhos de barras. Não existe, em princípio, uma técnica de escalonamento para este tipo de moinho baseada em modelos de balanço populacional (MBP), porém o MBP para moinhos de barras é bem estabelecido e disponível em simuladores. O desafio colocado aqui é desenvolver uma técnica de escalonamento baseada no MBP existente. Tradicionalmente, moinhos de barras são escalonados usando-se o método de Bond baseado no ensaio padrão para moagem com barras, porém o método de Bond se encontra obsoleto em função das vantagens inerentes aos MBPs que permitem a utilização de simuladores com resultados bastante acurados.

O trabalho envolveu a caracterização de diversas amostras de minério de manganês: três amostras de pelito rico, duas de pelito tabular, duas de manganês detrítico e duas amostras compostas. Amostras menores foram enviadas ao CETEM para os ensaios de moagem de batelada com cylpebs e barras para determinação de parâmetros de MBP. As amostras maiores foram enviadas ao Centro de Tecnologia de Ferrosos (CTF) da Vale para ensaios de moagem em circuito aberto com cylpebs e barras, no moinho piloto do CTF. Os ensaios de moagem contínua buscavam produzir *pellet feed* de manganês na especificação de projeto para posteriores ensaios de pelotização e queima. A principal vantagem de ensaios em aberto é a rápida estabilização, com somente duas a três horas de moagem necessárias. Para tanto, o moinho piloto era inicialmente carregado com a massa calculada de *holdup* a partir da densidade aparente medida no *sinter feed* de



manganês. A taxa de alimentação inicial era prevista a partir dos parâmetros medidos no Cetem e regulada de acordo com passante em 45 μm após a uma hora de moagem. O produto amostrado após a estabilização era medido quanto à granulação e superfície específica Fisher. Ensaios em aberto produzem todos os dados necessários para calibração do sistema de escalonamento, ou seja os parâmetros de transporte e classificação na descarga, além de servirem para testar, no caso da moagem com *cylpebs*, ou desenvolver, no caso da moagem com barras, o modelo de escalonamento.

Outro aspecto importante do projeto foi a previsão da superfície específica dos produtos na simulação da planta industrial. A idéia básica era calibrar um fator de forma a partir das medidas nos produtos gerados no CTF. Os resultados deste trabalho são até surpreendentes, e relatados aqui.

2 METODOLOGIA DOS ENSAIOS DE BATELADA

Uma carga de equilíbrio de *cylpebs* foi obtida em Vitória a partir de um moinho industrial carregado com *cylpebs*. Uma fração desta carga foi enviada ao Cetem para ser utilizada como carga do moinho de batelada. Esta carga de equilíbrio não apresenta corpos moedores grandes, e em geral o diâmetro dos *cylpebs* não excede 30 mm. Assim, é possível realizar os ensaios de batelada em um moinho pequeno, neste caso o moinho de 254 x 254 mm do CETEM, normalmente utilizado com bolas de 25,4 mm para o procedimento de escalonamento de Austin.⁽³⁾ Para os ensaios com barras foi utilizado o moinho de 305 x 305 mm do Cetem com uma carga de barras de equilíbrio de Bond (Gaudin-Shumman com inclinação igual a 3,01) e diâmetro maior de 31,75 mm. Este moinho não é ideal para ensaios com barras do ponto de vista prático em função da razão de aspecto 1:1. Isto pode causar o atravessamento das barras durante os ensaios e muito cuidado deve ser tomado ao preencher o moinho para que o ensaio não seja perdido. De fato, pelo menos três ensaios foram perdidos completamente durante esta campanha, resultando em trabalho dobrado e perda de tempo. De qualquer forma, este moinho, maior do que o moinho utilizado para as moagens com *cylpebs*, é conveniente porque com barras o espaço intersticial (porosidade formal da carga) é de aproximadamente 18%, resultando em um *holdup* similar ao *holdup* do moinho menor com *cylpebs*, com 40% de espaço intersticial. Na verdade, o *holdup* dos ensaios com barras sempre foi em torno de 83% do *holdup* com *cylpebs*. O enchimento de minério deve ser sempre 100% no procedimento de escalonamento de Herbst-Fuerstenau, e a massa de alimentação sempre foi calculada a partir da densidade aparente medida da amostra. A densidade aparente foi medida utilizando o método recomendado para o ensaio do índice de trabalho de Bond, com proveta graduada de um litro. Os dois moinhos têm oito levantadores de carga igualmente espaçados.



Figura 1: Resultado de um ensaio com barras e 70% de sólidos após um longo tempo de moagem.

Como o ensaio de Herbst-Fuerstenau é consideravelmente simples, foi inicialmente estipulado que os ensaios de moagem deveriam ser feitos com água, nos tradicionais 70% de sólidos, cumprindo-se assim o requerimento de similaridade do ensaio com a moagem industrial. Os primeiros tempos de moagem procederam normalmente. Procura-se estabelecer uma sequência de quatro tempos de moagem sendo que o último tempo de moagem deve produzir uma distribuição granulométrica próxima ou um pouco mais fina do que o produto desejado no circuito industrial. Inicialmente, com 70% de sólidos, as moagens se desenvolvem normalmente, porém, com a produção de finos, a viscosidade da polpa tende a aumentar e, no caso deste minério de manganês, muito antes de atingirmos a granulação do produto desejado a polpa forma uma pasta de alta viscosidade. Nesta circunstância, a moagem literalmente não ocorre, e os corpos moedores colam uns nos outros e nas paredes do moinho. Este desastre é mostrado na Figura 1 para a carga de barras.

Com isso, ficou claro que não seria possível moer o minério de manganês com 70% de sólidos, que é uma concentração de praxe para moagem industrial. A polpa de minério de manganês realmente tem propriedades reológicas peculiares. Assim foi adotada uma estratégia mais segura e que hoje é a metodologia empregada no CETEM para ensaios Herbst-Fuerstenau: emprestando da metodologia desenvolvida por Austin, a série de quatro ensaios é executada a seco. Ao final do último tempo de moagem, e assumindo-se que a granulação do produto é mais fina que a especificação do projeto, uma amostra com massa conhecida é retirada para um ensaio simples de adição de água para determinar a concentração de água mínima para liquefação da polpa. Para tanto o técnico de laboratório adiciona alíquotas de água à amostra seca, e testa o estado de liquefação da amostra com um bastão de vidro. A balança deve ser tarada com o bastão de vidro para que se possa determinar a concentração de sólidos facilmente. Esta prática resultou em uma concentração de sólidos de 55% para os ensaios com minério de manganês.

O tempo de moagem ideal para os ensaios é de difícil previsão. Idealmente os tempos de moagem escolhidos deveriam gerar quantidades semelhantes de

massa abaixo do tamanho alvo. Aqui, o tamanho alvo é igual a 45 micrômetros e o produto especificado deve conter 60% passante no tamanho alvo. A amostra a ser ensaiada pode conter partículas menores que o tamanho alvo, e este valor é a % em massa passante no tamanho alvo e no tempo zero, $M(45, t_0)$. Se o objetivo é 60% passante no quarto tempo de moagem, podemos projetar que a massa passante no tamanho alvo para cada tempo deve ser aproximadamente:

$$M(45, t_i) = M(45, t_0) + i \{60 - M(45, t_0)\} / 4 \quad (1)$$

Isso assegura que os ensaios de moagem produzam distribuições granulométricas distintas para cada tempo e que estes produtos varram o espectro de produção de partículas de produto a partir de todos os tamanhos de partículas de alimentação. De certa forma, estamos assegurando que as funções quebra e seleção tenham sido avaliadas a partir da quebra de todas as partículas que produzirão partículas de produto na moagem industrial.

Estimar o primeiro tempo de moagem é praticamente impossível, e o valor só pode ser obtido por tentativa e erro. Os outros tempos de moagem podem ser calculados aproximadamente usando a quebra de primeira ordem como base:

$$\frac{dm}{dt} = -kt \quad (2)$$

onde m é a massa de material remanescente maior do que o tamanho alvo. A taxa de quebra k pode ser estimada a partir do primeiro tempo de moagem e refinada à medida que os ensaios progridem. A equação (2) deve produzir estimativas acuradas dos tempos de moagem desde que não haja uma fração muito grande de partículas na região anormal de quebra (partículas grandes demais para quebra pela maior bola/barra na carga).

Com isso, o procedimento dos ensaios em batelada, seja de barras ou de bolas ficou estabelecido da seguinte forma:

- medir a distribuição granulométrica da alimentação e sua densidade aparente.
- calcular a massa de material necessária para enchimento intersticial igual a 100% com o valor medido de densidade aparente.
- quartear duas amostras iguais, uma para os ensaios a seco e outra para o ensaio a úmido.
- preparar uma carga de equilíbrio para o moinho a ser utilizado, compatível com a alimentação do moinho industrial. Em geral, se a alimentação nova do circuito de moagem industrial for grosseira, isso requer uma carga com corpos moedores grandes e um moinho de batelada com diâmetro compatível. Em geral pode-se escolher uma carga de bolas de equilíbrio com tamanho da bola maior igual a, no mínimo, 5x o tamanho máximo de partículas. Por exemplo, para *sinter feed*, com tamanho máximo igual a 8 mm, devemos utilizar uma carga de bolas de equilíbrio de no mínimo 40 mm. Bolas menores implicam em uma influência forte da região anormal de quebra, e isso é, em geral, indesejável. O diâmetro do moinho a ser utilizado segue a mesma relação, ou seja, no mínimo 5x maior do que o diâmetro do maior corpo moedor. Moinhos de laboratório muito grandes, por outro lado, dificultam a amostragem da carga e são de difícil manuseio. Moinhos de grande diâmetro são necessários somente quando os ensaios requerem corpos moedores de grande diâmetro.
- selecionar um tempo curto de moagem para o primeiro ensaio a seco. Aqui precisamos de sorte. O resultado obtido forma a base para a seleção dos

tempos de moagem para os ensaios seguintes, utilizando a taxa de primeira ordem na equação (2) como base. Um resultado típico deste procedimento é mostrado na Figura 2.

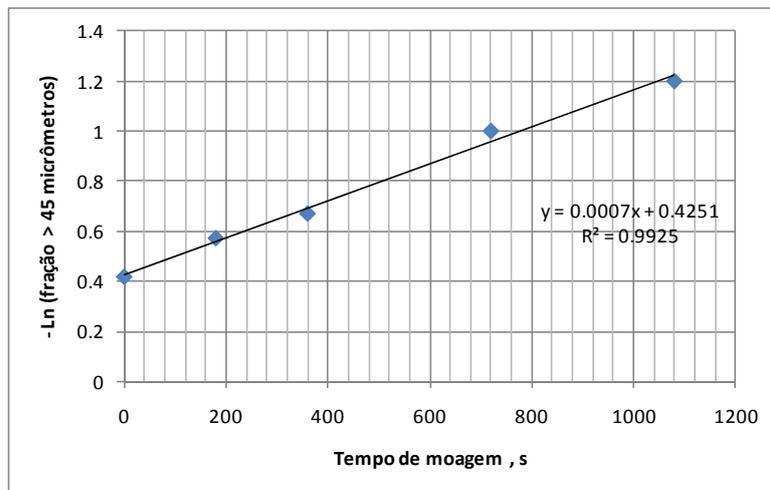


Figura 2: Fração remanescente maior que o tamanho alvo versus tempo de moagem para uma amostra composta e moagem com barras.

- com a amostra mais fina obtida no último ensaio, medir a % de sólidos máxima para o ensaio a úmido. Isso assegura que no ensaio a úmido não ocorrerá moagem de pasta. Se o valor máximo medido for maior do que 75% de sólidos, a moagem a úmido pode ser feita com 70% de sólidos, como de praxe.
- proceder ao ensaio a úmido com 5% de sólidos a menos do que o valor obtido em 6. Neste projeto, foi estabelecido um valor de 55% de sólidos para todas as moagens a úmido. O tempo de moagem a úmido pode ser estimado, inicialmente, em 50% do tempo final de moagem a seco.

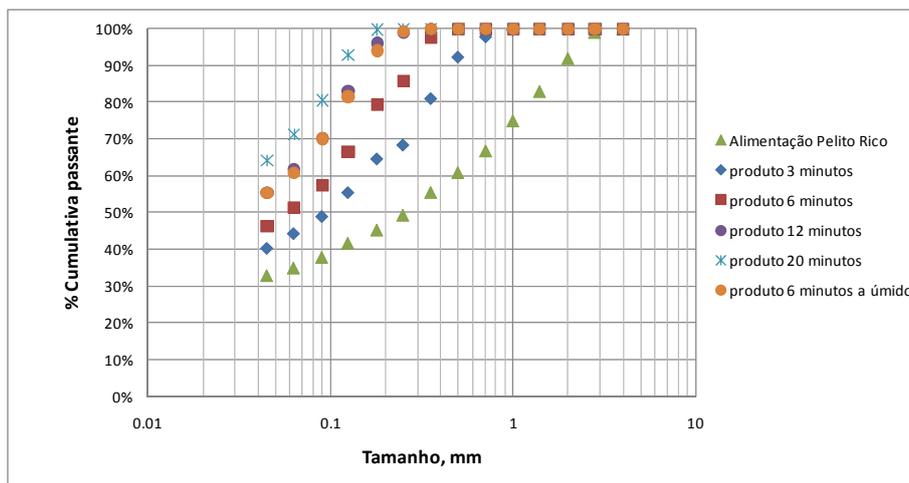


Figura 3: Ensaios de batelada com barras e uma amostra de Pelito Rico.

Em geral, pode-se medir a potência de moagem durante os ensaios com um medidor de potência conectado a um computador. No Cetem é utilizado um alicate Wattímetro modelo ET-4090, marca Minipa. Isto é uma boa alternativa ao uso de um torquímetro, já que o alicate não requer calibração e pode ser facilmente

adaptado a qualquer tipo de moinho. Um resultado típico de uma série de ensaios de moagem de batelada é mostrado na Figura 3.

No caso dos minérios de manganês, a diferença entre as taxas de moagem a seco e a úmido pode ser muito maior do que os 30% predicados por Bond (fator de correção para moagem a seco = 1,3), como pode ser visto na Figura 3, onde a moagem a úmido de 6 minutos produziu um produto com praticamente a mesma granulação da moagem a seco de 12 minutos. Isso indica um ganho de eficiência de 100% para este minério moído com 55% de sólidos.

3 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS EM BATELADA

O objetivo aqui é determinar parâmetros das funções seleção e quebra. Os modelos destas funções devem ser escolhidos de acordo com os modelos do simulador de plantas utilizado no escalonamento, neste caso, o Modsim. O modelo de escalonamento de Herbst-Fuerstenau, designado HFSU no Modsim, é o modelo base para o escalonamento do moinho no caso da moagem com cylpebs. Nesta implementação, o modelo da função seleção, S_i , é o modelo atribuído a Rajamani:

$$\ln\left(\frac{S_i}{S_1}\right) = \zeta_1 \ln(dp_i / dp_0) + \zeta_2 \ln(dp_i / dp_0)^2, \quad \text{min}^{-1} \quad (3)$$

onde S_1 , ζ_1 e ζ_2 são os parâmetros a ser determinados. dp_i é o tamanho representativo de partícula na classe i , e dp_0 é um tamanho de normalização, $dp_0 = 1\text{mm}$. A função quebra, $B_{i,j}$, disponível no modelo HFSU é descrita pelo modelo padrão de Austin:

$$B_{i,j} = \phi \left(\frac{dp_{i-1}}{dp_j}\right)^\gamma + (1-\phi) \left(\frac{dp_{i-1}}{dp_j}\right)^\beta, \quad n \geq i > 1, dp_i > dp_j \quad (4)$$

onde ϕ , γ e β são os parâmetros de modelo a ser determinados. Já o modelo do moinho de barras, designado RODM, foi implantado com a função seleção de Austin:

$$S_i = \frac{S_1 (dp_i / dp_0)^\alpha}{1 + \left(\frac{dp_i}{\mu}\right)^\lambda}, \quad \text{min}^{-1} \quad (5)$$

onde S_1 , α , μ e λ são os parâmetros requeridos. O modelo da função quebra é o mesmo de equação (4). Os ensaios em batelada são basicamente projetados para conter o mínimo de informações necessárias para a determinação de todos os parâmetros de modelo.

A determinação dos parâmetros pode ser feita através de uma rotina de minimização, construída em torno do modelo de balanço populacional para moagem em batelada. O mesmo MBP descreve os ensaios de batelada com barras, cylpebs e bolas, portanto a mesma rotina de minimização, com uma função objetivo apropriada, pode ser utilizada em todos os casos.

A questão importante aqui é a interpretação dos resultados com modelos que incluem a região de quebra anormal. Normalmente, não queremos dimensionar moinhos que incluem a região de quebra anormal, já que isso pode acarretar ineficiência e problemas operacionais. Portanto, deseja-se que o moinho opere fora da região de quebra anormal, e isso significa que o *top size* da alimentação deve ser limitado a um tamanho menor do que o máximo da função seleção ou que o

diâmetro maior dos corpos moedores deve gerar uma função seleção com máximo maior que o *top size* da alimentação. Quando o ensaio de batelada é realizado completamente fora da região de quebra anormal, que é o caso aqui, e também é desejado em ensaios de projeto, os dados experimentais não podem produzir parâmetros da região de quebra anormal que tenham algum significado físico. Portanto μ e λ da eq. (5) e ζ_2 da eq. (3) não podem ser determinados. Porém, pode-se incluir estes parâmetros na análise de forma que os valores não interfiram nos resultados da simulação. Por exemplo, se escolhermos um valor de μ suficientemente grande, estaremos garantindo que o modelo da eq. (5) produza um máximo maior do que o *top size* da alimentação, e a simulação resultante será uma simulação de um moinho operando fora da região de quebra anormal. Deve-se ressaltar que, com estes parâmetros, não é possível reduzir a relação diâmetro dos corpos moedores / *top size* da alimentação. Em projetos de moinhos, isso é perfeitamente possível, e de fato, a distribuição granulométrica da alimentação sempre terá o *top size* de *sinter feed* e as cargas de projeto serão iguais as cargas de corpos moedores testadas.

A etapa de obtenção dos parâmetros de MBP inclui, portanto, parâmetros que não tem significado físico por força dos modelos disponíveis no simulador. A alternativa a isso seria incluir modelos sem a região de quebra anormal no simulador. Esta alternativa é arriscada porque o usuário deve sempre estar consciente da existência da região de quebra anormal e dos problemas operacionais e ineficiências que podem resultar da operação de moinhos nesta região de tamanhos.

O aplicativo BatchMill, descrito em Schneider e Souza⁽⁴⁾, foi expandido para calcular dois valores do parâmetro $S1$ simultaneamente, um referente à taxa de moagem a seco e o outro referente à taxa de moagem a úmido. No caso do minério de manganês, a razão $S1^{wet} / S1^{dry}$ varia muito com o tipo de minério e a porcentagem de sólidos utilizada nos experimentos. Os resultados para oito amostras testadas com barras e cylpebs são mostrados na Figura 4. Em média, a taxa de moagem com cylpebs aumenta 243% quando água é adicionada a 55% de sólidos. O aumento para moagem com barras é de 202%. A média geral é de 222%.

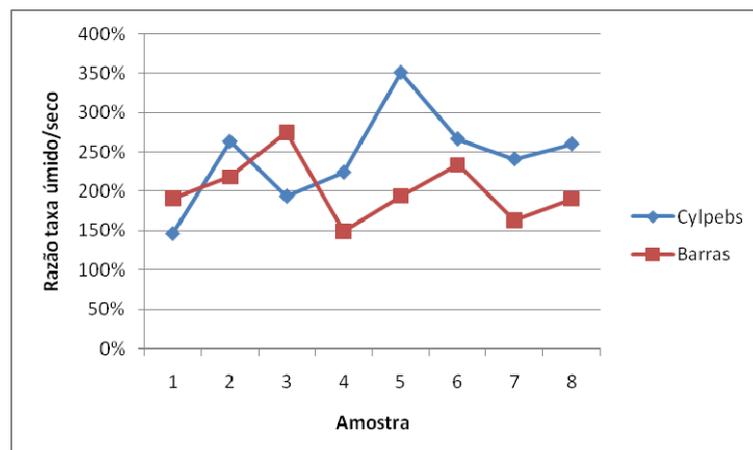


Figura 4: Razão entre as taxas de moagem a úmido e a seco para oito amostras de minério de manganês moídas com barras e cylpebs.

4 METODOLOGIA PARA OS ENSAIOS EM ESCALA PILOTO

O moinho piloto do CTF tem 0,57 m de diâmetro interno e 1,53 m de comprimento. É um moinho ideal para o tipo de ensaio requerido neste projeto já que é de fácil manuseio, ou seja, a carga moedora do moinho pode ser trocada com facilidade. Para $J = 35\%$, são necessários aproximadamente 633 kg de cylpebs e 878 kg de barras. Além da carga de corpos moedores, o moinho era inicialmente cheio com minério com uma massa equivalente a $U = 100\%$. Para uma densidade aparente de $2000 \text{ cm}^3/\text{kg}$, isso equivale a 49 kg de alimentação para a moagem com barras e 102 kg para a moagem com cylpebs.

O objetivo primário dos ensaios piloto é produzir amostras de *pellet feed* moído com $60\% < 45 \mu\text{m}$. As moagens com barras e cylpebs em circuito aberto estabilizam rapidamente. Durante os ensaios a fração passante em $45 \mu\text{m}$ é medida periodicamente. Quando o valor obtido não varia o ensaio é considerado estabilizado, e uma amostra de produto é retirada para análise granulométrica e medição da superfície específica Fisher. A taxa de alimentação é a variável de controle, e dependendo do resultado, a taxa de alimentação é ajustada para mais ou menos, objetivando-se obter $60\% < 45 \mu\text{m}$, e o ensaio repetido, até obter-se o objetivo com o moinho estabilizado. Neste ponto, quantidades grandes de produto foram geradas de cada amostra para ensaios de pelotização e queima. Os diversos resultados obtidos servem como base para simulação, e os dados são utilizados para:

- obter parâmetros de transporte;
- obter informações relevantes para o escalonamento da moagem com barras; e
- estudar a dependência da superfície específica com a granulação do produto.

5 PARÂMETROS DE TRANSPORTE E CLASSIFICAÇÃO PARA MOAGEM COM CYLPEBS

O modelo de transporte é, em geral, baseado em três misturadores perfeitos em série^(5,6) com classificação interna. O modelo que tem sido mais apropriado é quase que invariavelmente dois misturadores pequenos seguidos de um misturador grande em circuito fechado com um classificador. O modelo de classificação pode ter diversas formas. Aqui foi utilizado o modelo logístico, com dois parâmetros:

$$c_i = \frac{1}{1 + (dp_i / D_{50})^\lambda}, \quad \lambda = \frac{-2.1972}{\ln(SI)} \quad (6)$$

D_{50} é o tamanho de partícula com probabilidade igual de ser recirculada para o moinho ou ser transmitida para o produto e SI é a nitidez de separação. O valor de SI varia entre 1, para separações nítidas e 0 para separações ineficientes. c_i é a probabilidade da partícula de tamanho dp_i ser transmitida para produto. Esta classificação é interna e não deve ser confundida com o classificador externo, geralmente um hidrociclone fechando o circuito de moagem. Quanto maior o valor do parâmetro D_{50} , menor a probabilidade de partículas contidas no *holdup* do terceiro misturador sejam recirculadas e, portanto menor o efeito de classificação interna.

Neste projeto foram realizados vários ensaios de moagem contínua com diferentes amostras de minérios de manganês, e com parâmetros de MBP conhecidos. Isto representa uma oportunidade ímpar para avaliar o comportamento dos parâmetros de classificação. Sabe-se que os parâmetros na eq. (6) são principalmente função da viscosidade da polpa que por sua vez varia com o minério, % de sólidos e granulação. Assim, os parâmetros de transporte deveriam ser relacionados à viscosidade da polpa no produto da moagem contínua, porém e infelizmente, estas medidas, não foram feitas de forma sistemática, jê que não havia uma preocupação com este fenômeno na concepção do projeto, cujo foco é a variabilidade e o escalonamento. Alternativamente, a superfície específica gerada no produto da moagem pode ser a variável mais altamente correlacionada com a viscosidade da polpa, e a variação dos parâmetros de classificação é mostrada em função da superfície específica Fisher do produto na Figura 5.

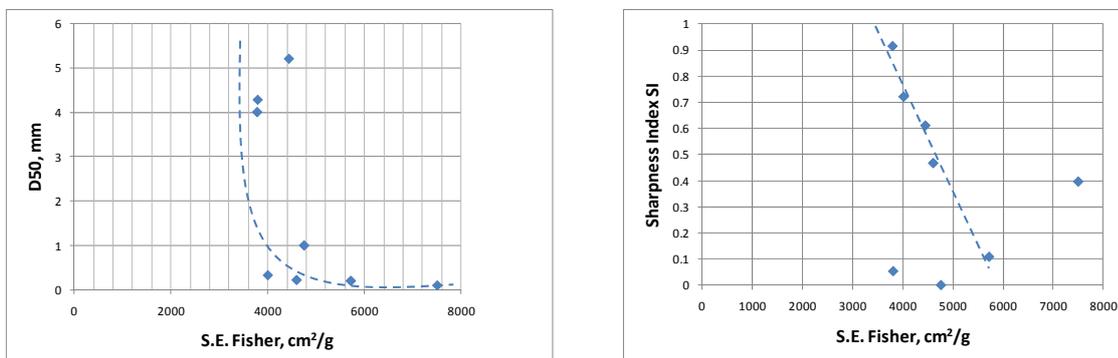


Figura 5: Parâmetros de classificação versus superfície específica Fisher para diversas amostras de minérios de manganês em diversas condições de moagem com cylepbs.

Pode-se ver claramente que o valor de D_{50} começa a cair rapidamente a partir de $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$, quando o efeito de classificação no overflow começa a ser reduzido pelo aumento da viscosidade. Quando a S.E. atinge valores da ordem de $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$, a viscosidade é alta o suficiente para transportar todos os tamanhos de partícula para fora do moinho, junto com a polpa, e o valor de D_{50} é da ordem de algumas dezenas de micrômetros. Isso é indicado pela linha tracejada no gráfico.

Mesmo que uma correlação razoável tenha sido obtida para o diâmetro de corte, a nitidez de separação parece ter uma relação mais complexa com a viscosidade. A linha tracejada mostra uma tendência clara de que a nitidez de separação cai na medida em que o efeito de classificação se torna menos importante, porém alguns pontos no gráfico não permitem conclusões que não especulativas. De fato, espera-se que a nitidez de separação seja reduzida à medida que a viscosidade aumenta e o efeito de classificação se torne menos importante. No entanto, é importante considerar que, em geral, moinhos de bolas são projetados para operar em uma região de viscosidade que promova o efeito de classificação no overflow, mas que, ao mesmo tempo, transporte a maioria das partículas para o produto. Para os ~58% de sólidos dos ensaios da Figura 5, o produto do moinho deve, necessariamente, apresentar uma viscosidade correspondente a $S.E. > 4.000 \text{ cm}^2/\text{g}$, caso contrário o efeito de classificação se tornaria tão relevante que o moinho entraria em condição de sobrecarga. Isso, obviamente, é indesejado.

6 ESCALONAMENTO DA MOAGEM COM BARRAS

O escalonamento da moagem com barras pode ser feito a partir do tempo de residência da polpa no moinho de barras contínuo. Um fato interessante é que o mesmo moinho utilizado na moagem com cylpebs foi carregado com barras no CTF, e, embora a configuração do orifício do produto tenha sido exatamente igual nos dois casos, nenhum efeito de classificação no overflow foi observado na moagem com barras, em todas as condições testadas. Este fato leva à conclusão inexorável de que o transporte na moagem com barras é essencialmente de fluxo pistão na direção do eixo do moinho. Como não existe um volume (misturador perfeito) para o qual as partículas maiores possam ser recirculadas, não há classificação, e todo o material que chega à descarga é transportado para o produto. Portanto, o modelo de transporte é absolutamente direto, e o tempo de residência de todos os sólidos é dado pela razão entre o volume de moagem e a taxa de alimentação. Portanto, o tempo de residência dos sólidos é definido uma vez que o volume de moagem possa ser calculado.

O volume de moagem foi estabelecido como o volume do moinho disponível para transporte menos o volume das barras. O volume disponível para transporte é definido como o volume da seção cilíndrica delimitada pelo diâmetro do orifício de descarga. A geometria é simples e demonstrada na Figura 6.

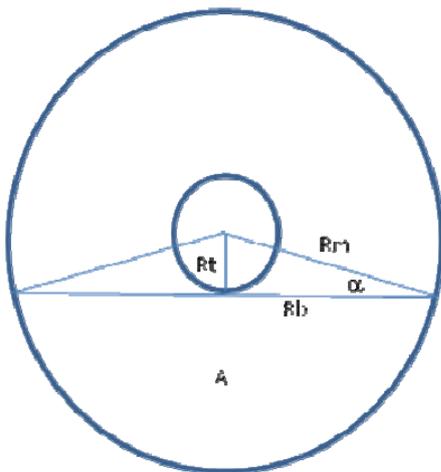


Figura 6: Variáveis definidas para o cálculo do volume de moagem e o detalhe o moinho piloto do CTF carregado com barras, mostrando o orifício de descarga.

Assim, o volume de moagem pode ser calculado da seguinte forma:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{Rt}{Rb}\right) \quad (7)$$

$$Rb = \sqrt{Rm^2 - Rt^2} \quad (8)$$

$$A = \pi Rm^2 \frac{\pi - 2\alpha}{2\pi} - Rt Rb \quad (9)$$

$$V_{moagem} = L(A - \pi Rm^2 [1 - \phi] J) \quad (10)$$

onde J é a carga de barras e ϕ é a porosidade formal do leito de barras (~18%).

Para os diversos ensaios realizados no CTF, o tempo de residência real pode ser calculado com base na eq. (10) e na taxa de alimentação do moinho. O tempo de residência simulado pode ser definido como o tempo de residência que, na simulação do ensaio contínuo, produz uma distribuição granulométrica simulada igual à medida no ensaio. A correlação entre o tempo de residência simulado e o tempo de residência calculado é o fator de escalonamento. Isso é mostrado na Figura 7 para os diversos ensaios realizados no CTF.

Essencialmente, a Figura 7 mostra que o tempo de residência calculado deve ser multiplicado por um fator igual a 0.89 para obter-se o tempo de residência que simula a granulação do produto, a partir dos parâmetros de MBP obtidos em ensaios em batelada. Isto é essencialmente um sistema de escalonamento.

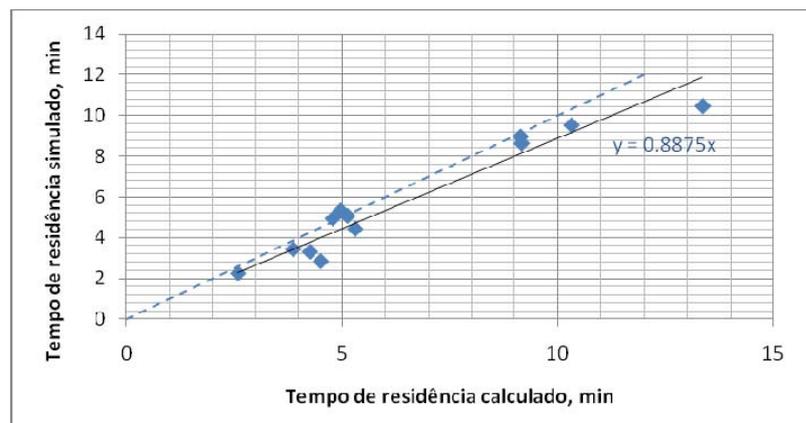


Figura 7: Tempo de residência calculado, eq. (10) versus tempo de residência simulado na moagem com barras.

Deve-se levar em consideração que, em todas as simulações, foi utilizado um coeficiente exponencial que descreve a velocidade relativa das partículas no moinho de barras, igual a 0.1. Este coeficiente diferencial de velocidade foi proposto por Rogovin et al.,⁽⁷⁾ e tem sido adotado em MBPs por Austin, Klimple e Luckie⁽³⁾ e King.⁽⁸⁾ No entanto, parece claro, a partir dos resultados obtidos nestes ensaios, que não há velocidade diferencial de transporte de partículas em um moinho de barras contínuo, mesmo porque as partículas maiores são desintegradas muito mais rapidamente neste tipo de moinho, e a probabilidade de uma partícula de diâmetro relativamente grande ser transportada na carga de barras é, conseqüentemente, muito pequena. Assim, parece claro que o valor do coeficiente é nulo, e o modelo do moinho de barras contínuo é, essencialmente, igual ao modelo da moagem em batelada, com o tempo de moagem substituído pelo tempo médio de residência no moinho contínuo. Esta conclusão advém de dois fatos observados neste projeto a partir de vários ensaios de moagem contínua:

- o transporte em moinhos de barras é essencialmente de fluxo pistão, sem classificação interna; e
- não há velocidade diferencial de transporte de partículas de diferentes tamanhos.

O escalonamento baseado em potência, ao estilo Herbst-Fuerstenau, também foi testado para os ensaios piloto realizados no CTF, com resultados desastrosos. Em suma, o escalonamento pela potência prevê uma taxa de moagem muito maior do que aquela observada em realidade. Isto é importante porque demonstra que nem sempre a taxa de moagem está associada à potência utilizada, o este método

não pode ser utilizado indiscriminadamente. Com isso, até mesmo o método de Bond para moagem de barras se torna altamente suspeito. Porém, moinhos de barras têm limitações e não podem ser fabricados para as altas capacidades demandadas atualmente, e a sua aplicação é, portanto, restrita a operações de baixa capacidade. Com isso, a faixa prática de escalonamento é muito limitada, e a correlação de Bond pode ser utilizada com alguma confiança.

7 FORMA DE PARTÍCULAS IRREGULARES E A S.E. FISHER

Um parâmetro importante na pelotização é a superfície específica. Neste projeto a superfície específica Fisher foi medida para todos os produtos de moagem contínua no CTF, bem com as distribuições granulométricas até 45 micrômetros.

Um dos requerimentos do escalonamento é prever a S.E. gerada no produto do moinho industrial. Isso é possível se o fator de forma das partículas é conhecido, bem como a distribuição granulométrica. Sabemos que o fator de forma para partículas irregulares deve ser sempre em torno de 9 ou 10. Se a distribuição granulométrica é conhecida, a S.E. pode ser calculada por:

$$S.E. = \int_{\lim_{dp \rightarrow 0}}^{\infty} \frac{f(dp) \psi}{\rho dp} ddp \quad (11)$$

onde $f(dp)$ é a distribuição granulométrica em volume, ρ é a densidade da partícula de tamanho dp e ψ o fator de forma. Para esferas $\psi = 6$ e para partículas irregulares $\psi > 6$. Como o simulador pode calcular distribuições granulométricas até tamanhos muito pequenos, e sabendo que, por definição $f(0) = 0$, a eq. (11) é definida para qualquer distribuição granulométrica desde que o fator de forma ψ não varie com o tamanho. Este modelo está disponível no simulador de plantas Modsim™. Assim, os valores medidos de S.E. Fisher podem ser utilizados para o cálculo de ψ em todos os ensaios, tanto com cylebs como barras. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 8.

Os resultados mostram que, para valores de S.E. Fisher menores do que $\sim 5.000 \text{ cm}^2/\text{g}$ o comportamento é previsto pela eq. (11) com $\psi \approx 11$. Este valor é perfeitamente viável e possível para partículas irregulares. Para S.E. $>$ que $5.000 \text{ cm}^2/\text{g}$, o fator de forma parece aumentar com a superfície específica. Este comportamento é, claramente, um artefato, já que as partículas de minério de manganês, mesmo finamente moídas, não podem apresentar fatores de forma da ordem de 20, como mostrado na Figura, já que isso implicaria em partículas extremamente delgadas e/ou achatadas.

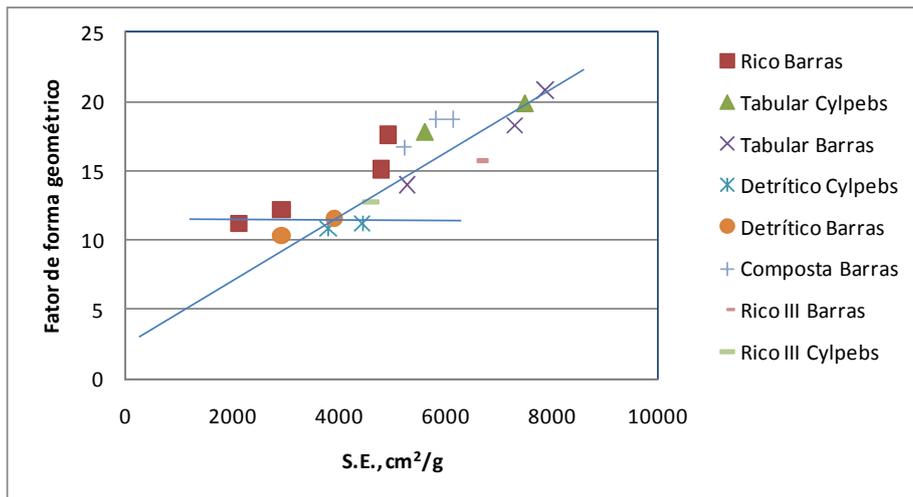


Figura 8: Fatores de forma calculados e valores de S.E. medidos para os diversos ensaios de moagem contínua.

O resultado mostrado na Figura 8 indica que o permeâmetro Fisher tende a superestimar os valores de superfície específica para partículas com S.E. > 5000 cm²/g. Como valores acima deste limite são comumente medidos em amostras de *pellet feed* de manganês, um método alternativo deveria ser utilizado para este tipo de minério.

8 CONCLUSÕES

O método de Herbst-Fuerstenau é um método seguro para escalonamento de moinhos com cylpebs (e bolas). Todos os ensaios em escala piloto confirmaram os resultados obtidos em laboratório. Pode-se utilizar três misturadores perfeitos em série com pós-classificação no overflow em todos os casos. Os parâmetros de classificação são basicamente uma função da reologia da polpa. Em geral, quando a viscosidade é muito alta, não há classificação no overflow, e o produto do moinho tem a mesma distribuição granulométrica do *hold up* do terceiro misturador. Para polpas mais diluídas, ocorre classificação na descarga, e o valor do *D50* da classificação diminui com o aumento da diluição. Por este mesmo motivo, o aumento da diluição para valores extremos produz valores de *D50* de classificação muito baixos, e o moinho pode entrar na condição de *overfill* quando a viscosidade da polpa não é suficiente para transportar as partículas do *holdup* para a descarga. Na moagem de barras, este efeito não existe, e o moinho de barras pode ser operado com qualquer nível de diluição, desde que a polpa se comporte como um líquido.

Moinhos de barras são, basicamente, canos, e o transporte das partículas é essencialmente caracterizado por fluxo pistão. Embora mistura angular possa e deva ocorrer dentro do moinho de barras, esta mistura não afeta o transporte axial. Como resultado, o moinho de barras contínuo se comporta como o moinho de barras de batelada, com o tempo de residência substituindo o tempo de moagem. Assim, o escalonamento da moagem de barras pode ser feito com base no tempo de residência, que resulta da taxa de alimentação e do volume interno do moinho disponível para transporte. Aparentemente, não existe uma velocidade diferencial de transporte proporcional ao tamanho de partículas, como esperado teoricamente. O método de escalonamento de Herbst-Fuerstenau não pode ser utilizado na

moagem com barras e, provavelmente, o método de Bond também não se aplica, já que este método é, igualmente, baseado em energia.

Medidas de superfície específica Fisher são limitadas a valores de no máximo 5000 cm²/g para minérios de manganês. Para valores acima de 5000 cm²/g a S.E. Fisher medida não acompanha o comportamento da distribuição granulométrica, e valores mais altos que o esperado são invariavelmente obtidos.

REFERÊNCIAS

- 1 HERBST, J. A.; FUERSTENAU, D. W. Mathematical Simulation of Dry Ball Milling Using Specific Power Information. **Transactions of the Society of Mining Engineers-AIME**, v.254, p. 343-348, December 1973.
- 2 ROWLAND, C. A. Rod Mills. In: N. L. Weiss (Ed.). **SME Mineral Processing Handbook**. New York, New York: SME, v.1, 1985, p. 3C-44 - 3C-56.
- 3 AUSTIN, L. G.; KLIMPLE, R. R.; LUCKIE, P. T. **Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling**. SME, New York, 1984.
- 4 SCHNEIDER, C. L.; SOUZA, A. S. Modelamento das propriedades de quebra de minérios de ferro de Carajás. In: VI Brazilian Symposium on Iron Ore, 2005, Florianópolis. XXXV Ironmaking and Raw Materials Seminar, VI Brazilian Symposium on Iron Ore. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005. v. 2. pp. 669-680.
- 5 SCHNEIDER, C.L. **Measurement and Calculation of Liberation in Continuous Grinding Circuits**, Ph.D. Thesis, Department of Metallurgical Engineering, The University of Utah, 1995.
- 6 SCHNEIDER, C.L. Ball Mill Scale-up, In: **Scale-up in Metallurgy**, M. Lackner Ed., ProcessEng Engineering GmbH, Viena, 2010, First Edition, p. 309.
- 7 ROGOVIN, Z.; CASALI, A.; HERBST, J.A. Tracer study of mass transport and grinding in a rod mill. **Intl Jnl of Mineral Processing** 22 (1988) pp.149-167.
- 8 KING, R.P. **Modeling & Simulation of Mineral Processing Systems**. Butterworth-Heinemann, Oxford, (2001).