



## EFEITO DE CORPOS MOEDORES NÃO ESFÉRICOS EM MOAGEM VERTICAL

SILVA, J.F.L.<sup>1,2</sup>, ARAÚJO, D.R.<sup>2</sup>, CASTRO, E.F.<sup>2</sup>, MACHADO, L.C.R.<sup>2</sup>, MONTENEGRO, L.C.M.<sup>1</sup>,  
RUSSO, J.F.C.<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Departamento de Engenharia de Minas. e-mail:  
jonathan.limasilva@gmail.com

<sup>2</sup>Anglo American, Complexo Minas Rio

### RESUMO

O Vertimill™ tem sido amplamente utilizado em circuitos de moagem de ultrafinos. No Projeto Anglo American Minas Rio, torna-se um processo essencial para a adequação de todo o minério produzido para transporte através do maior mineroduto do mundo e um item prioritário na busca por maior eficiência energética e redução de custos operacionais. Ao contrário da operação de moagem de bolas convencional, em que o corpo moedor é expurgado com a polpa por meio de transbordo ou grelha, o corpo moedor no Vertimill™ é transportado pelo produto apenas quando atinge um tamanho muito pequeno. Assim ocorre o acúmulo de corpos moedores com baixa esfericidade e distribuição de tamanho bastante reduzida. Com base nisso, o objetivo deste trabalho é apresentar o estudo do impacto da esfericidade e tamanho desses meios de moagem sobre a eficiência energética e desgaste do revestimento, que alcançou ganhos em torno de 8% com classificação dos corpos moedores e 18% ao fazer uma recarga completa com bolas novas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Vertimill™, Corpos Moedores, Eficiência Energética.

### ABSTRACT

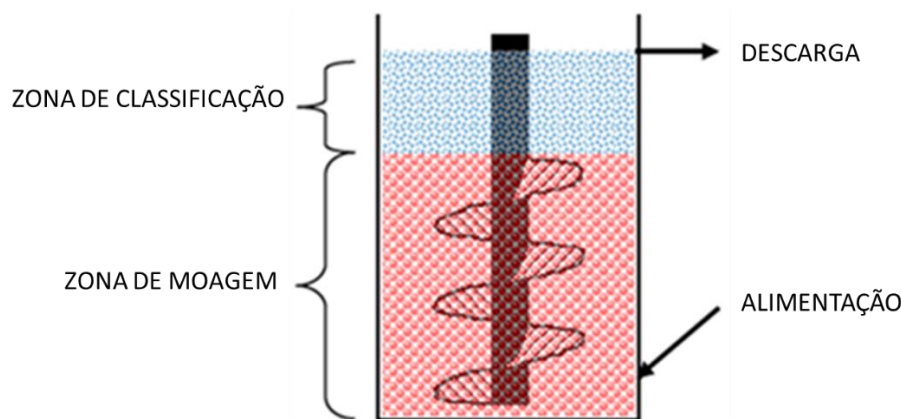
The Vertimill™ has been widely used in ultrafine grinding circuits. At Anglo American Minas Rio Project, it becomes an essential process for the adequacy of all ore produced for transportation via the world's largest pipeline and a priority item in the quest for greater energy efficiency and reduction in operating costs. Unlike the ball milling operation where the grinding media are purged with the pulp via overflow or grate, Vertimill™ grinding media are only transported to the product when they reach a very small size. Thus, occurs the accumulation of grinding media with low sphericity and size distribution greatly reduced. Based on this, the aim of this work is to present the study of impact of the sphericity and size of these grinding media on energy efficiency and liners wear, which reached gains around 8% with grinding media classification and 18% when make a completely recharge with new balls.

**KEYWORDS:** Vertimill™, Grinding Media, Energy Efficiency.

## 1. INTRODUÇÃO

Os moinhos verticais normalmente consistem de uma câmara de moagem estacionária preenchida com corpos moedores (metálicos ou cerâmicos) e um agitador interno giratório que é responsável pela movimentação da carga, gerando um grande número de colisões entre os corpos moedores e o minério.

Um Vertimill™ normalmente opera com uma carga de bola de aproximadamente 2/3 da altura, formando assim, duas zonas claramente definidas dentro do moinho: uma zona de moagem e uma zona de classificação (Figura 1). Na zona de moagem, preenchida com corpos moedores, as partículas do minério estão sofrendo esforços em contato com os corpos moedores. Na zona de classificação as partículas mais finas se deslocam para o transbordo do moinho enquanto as partículas mais grossas retornam para a zona de moagem (Mazzinghy, 2012).



**Figura 1. Representação esquemática das zonas de moagem e classificação em moinhos verticais (Mazzinghy, 2012 – adaptado pelo autor).**

Devido este mecanismo de funcionamento os moinhos verticais vêm sendo amplamente utilizados em moagem ultrafina (Radziszewski & Allen, 2014). Testes com Vertimill™ em escala piloto concluíram que a função de seleção específica (baseada em energia) é em média 35% maior do que um moinho de bolas convencional para uma mesma aplicação (Mazzinghy *et al.*, 2015).

O projeto Minas-Rio, uma propriedade da Anglo American localizada no Brasil, iniciou suas operações no final de 2014. A produção do projeto é de 24,5 Mtpa de *Pellet Feed*, obtida por flotação reversa de minério de ferro. O circuito de remoagem Minas-Rio é atualmente a maior instalação da Vertimill™ no mundo, composta por dezesseis VTM-1500, em circuito fechado com hidrociclones. Este circuito tem como objetivo adequar a granulometria do concentrado para transporte via mineroduto. A Figura 2 mostra o fluxograma do projeto Minas-Rio.

No caso do Minas Rio, o underflow do ciclone é direcionado por gravidade para a alimentação dos moinhos. A polpa é, portanto, direcionada através da zona de moagem antes de atingir a zona de classificação. O material de maior tamanho recircula para a zona de moagem, enquanto as partículas finas são transportadas pela polpa para o transbordo do moinho e, em seguida, para o tanque de alimentação dos hidrociclones completando a carga circulante. A Figura 3 apresenta uma foto das instalações industriais.

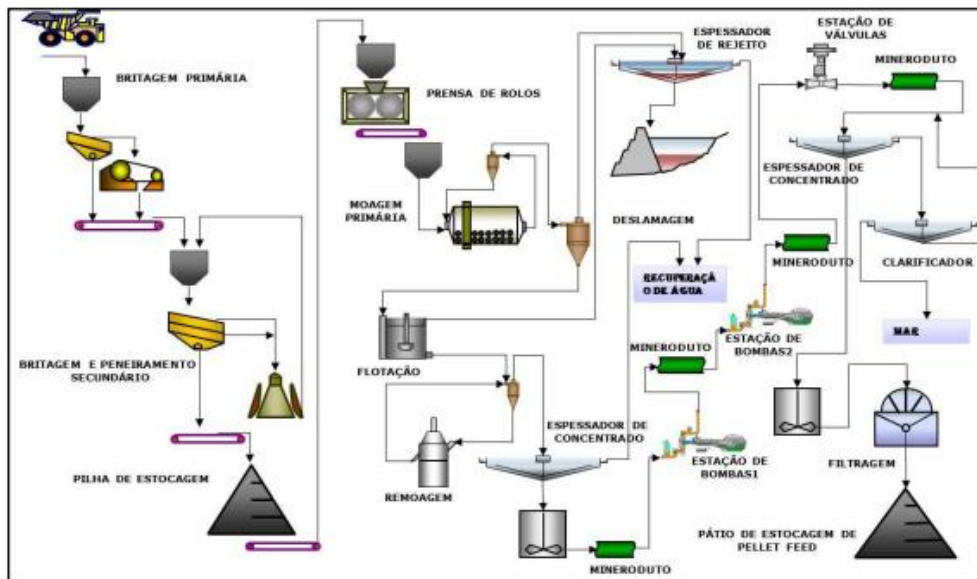


Figura 2. Fluxograma do Minas Rio.



Figura 3. Circuito de remoagem do Minas Rio: cada prédio corresponde a uma linha de remoagem composta por oito moinhos e quatro baterias de hidrociclones classificando o concentrado em circuito fechado (acervo do autor).

A eficiência de um processo moagem depende de sua capacidade de colocar as partículas do minério em contato umas com as outras e com os corpos moedores para causar a quebra de partículas com o uso mínimo de energia). Em uma moagem vertical, as variáveis que afetam a eficiência deste processo estão relacionadas aos corpos moedores (tamanho, densidade e forma), a velocidade de rotação do eixo e as propriedades da polpa (tamanho das partículas, densidade, concentração de sólidos e resistência do minério (Lichter & Davey, 2006; Jankovic, 2003).

A distribuição de tamanho e formato dos corpos moedores é assunto de estudo em todos os processos de moagem convencional. Entretanto, no processo de moagem vertical há uma característica inerente e específica: os corpos moedores não são expurgados do moinho, como acontece em um moinho de bolas convencional (Mazzinghy, 2012). Deste modo,

estudar a influência do diâmetro e forma dos corpos moedores na moagem vertical e quantificar os seus efeitos é essencial para buscar a máxima eficiência.

Sinnott *et al.* (2011) realizaram um estudo de formato de corpos moedores usando o método de elementos discretos (DEM), considerando quatro diferentes esfericidades apresentadas na Figura 4.

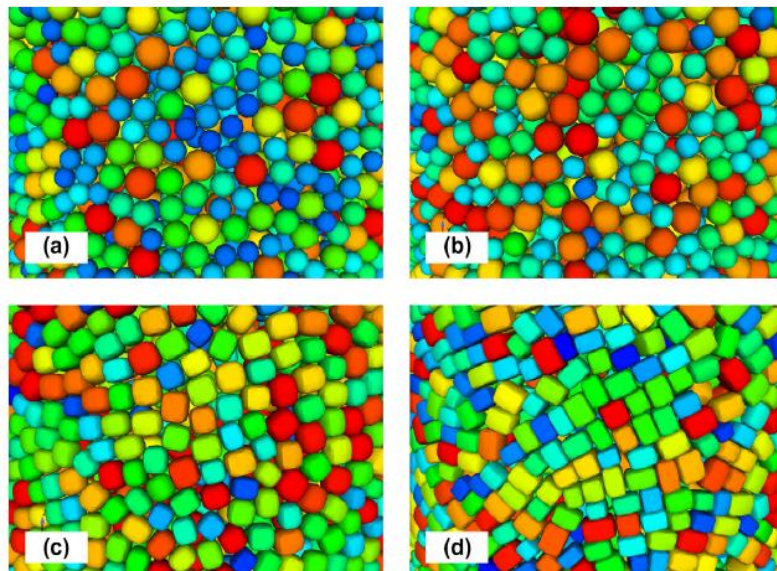


Figura 4. Formato dos corpos moedores simulados usando DEM (Sinott *et al.*, 2011).

Este estudo sugere que meios não esféricos em moinhos verticais resultam em um impacto negativo no desempenho de moagem devido à uma menor fluidez da carga na zona de moagem levando a taxas de cominuição reduzidas, redução no volume de leito ativo disponível para moagem e dificuldade na percolação da polpa pelos corpos moedores, maiores taxas de desgaste abrasivo para o parafuso e níveis reduzidos de energia de colisão em grande parte da carga, levando a um menor consumo de energia. Também os corpos moedores não esféricos tendem a empacotar firmemente perto das paredes do moinho, formando uma camada quase sólida em torno da carcaça do moinho.

Segundo Sinott *et al.* (2011), o efeito do formato do corpo moedor também afeta a potência do sistema. De acordo com os resultados das simulações em DEM, a potência decresce com a redução da esfericidade do corpo moedor.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Com o objetivo de avaliar a influência dos corpos moedores no processo de moagem vertical do Minas Rio foram realizados dois trabalhos. O primeiro, em laboratório, com o objetivo de avaliar o requerimento energético para cada tipo de corpo moedor e o segundo, em escala industrial, para avaliar além da eficiência de moagem, o efeito no desgaste do revestimento.

### 2.1. Testes de moabilidade em bancada

Os testes de moagem em bancada foram realizados com amostras de concentrado da flotação e um moinho de bolas tubular convencional, conforme Tabela 1. Os testes seguiram

os mesmos procedimentos usados pelo fornecedor do equipamento (Metso) para dimensionar o consumo específico de energia para o Vertimill™. O procedimento envolve a moagem do material em intervalos de tempo crescentes (15, 30, 45 e 60 min) e avaliada a sua curva de moagem na malha 325# (0,044 mm).

A energia específica (kWh/t) foi calculada a partir do consumo de energia líquido medido (kW), massa (t) e tempo de moagem (h) para atingir a especificação do produto (84% < 0,044 mm).

**Tabela 1. Dados do moinho de bancada.**

Diâmetro (mm)	208	Enchimento de polpa – U (fração)	1.0
Comprimento (mm)	208	Velocidade crítica (fração)	0.76
Porosidade (fração)	0.40	Concentração de sólidos (%)	70
Carga de Bolas – J (fração)	0.42		

O colar utilizado em cada teste foi confeccionado da seguinte forma:

- 1) Corpos moedores novos (12 mm);
- 2) Amostra tal qual: Corpos moedores coletados no moinho;
- 3) Material classificado > 6,5 mm a partir da amostra 2;
- 4) Material classificado < 6,5 mm a partir da amostra 2.

## 2.2. Testes industriais

Com o objetivo de avaliar o desempenho comparativo entre moinhos com corpos moedores esféricos e não esféricos foi realizado um estudo baseado em amostragens industriais e um estudo de desgaste do revestimento da espiral.

Para a realização deste trabalho foram definidos dois moinhos de controle e com trocas de revestimento concomitantes. Após a drenagem de sua carga de corpos moedores e a troca de revestimento, um dos moinhos só receberia reposição de corpos moedores novos e o segundo teria sua carga retornada para o moinho com o reaproveitamento de toda sua carga ao longo da vida útil do revestimento.

Diante deste contexto, foram realizadas amostragens de polpa na alimentação e descarga destes moinhos com análise granulométrica para avaliação do grau de redução de cada moinho.

Ao longo da vida útil do revestimento também foram realizadas drenagens das cargas a cada 1000 h aproximadamente com o objetivo de realizar a digitalização do desgaste do revestimento. Neste trabalho foi utilizado um digitalizador manual devido aplicação em espaço reduzido. Este equipamento utiliza a tecnologia chamada “Triangulação 3D de Laser” a qual é baseada na emissão de um feixe de laser sobre a superfície a ser escaneada e a captação de seu posicionamento ocorre através de uma câmera (De Mattos, 2013).

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos testes em moinho de bancada estão apresentados na Tabela 2. O consumo de energia específica para os corpos moedores novos foi de 4,64 kWh/t e os corpos

moedores reutilizados apresentaram um consumo 17,8% maior (5,47 kWh/t). Realizando a classificação dos corpos moedores foram alcançados 5,00 kWh/t para as bolas acima de 6,5 mm e 12,25 kWh/t para o material abaixo de 6,5 mm, o que corresponde a incrementos de 7,6% e 163,9% em comparação com os corpos moedores novos.

**Tabela 2. Energia específica (kWh/t) para diferentes colares de corpos moedores em escala de bancada.**

Jar Test	Bolas Novas 12 mm	Bolas Reutilizadas	Bolas Classificadas (> 6,5 mm)	Bolas Classificadas (< 6,5 mm)
SE (kWh/t)	4,64	5,47	5,00	12,25
$\Delta$ kWh/t	-	17,8%	7,6%	163,9%

Nos testes industriais foram coletadas amostras dos corpos moedores dos moinhos de controle após aproximadamente 4000 h de operação. Percebe-se na Figura 5 que na amostra do moinho que utilizou bolas reaproveitadas há uma parte da carga com baixo nível de esfericidade.



**Figura 5. Foto dos corpos moedores com reposição de (a) bolas novas e (b) bolas reutilizadas**

Nas amostragens em escala industrial foi encontrada uma diferença de 18,01% no grau de redução de cada moinho entre o moinho apenas com bolas novas e o moinho com apenas bolas reutilizadas, conforme Tabela 3.

**Tabela 3. Grau de redução obtido em amostragem industrial.**

Parâmetros	Bolas Novas	Bolas Reutilizadas	$\Delta$ (Reutilizadas - Novas)
Potência (kW)	972,4	996,4	2,47%
F80 ( $\mu$ m) UF Cicloneagem	73,4	84,0	14,44%
P80 ( $\mu$ m) descarga VTM	48,0	67,0	39,58%
Grau de Redução (F80/P80)	1,53	1,25	-18,01%

As imagens dos escaneamentos do revestimento da base da helicoidal dos dois moinhos em 1000 h de operação estão apresentadas na Figura 6. Os números apresentados em cada escaneamento refletem a distância entre a superfície da medição e a superfície original da peça.

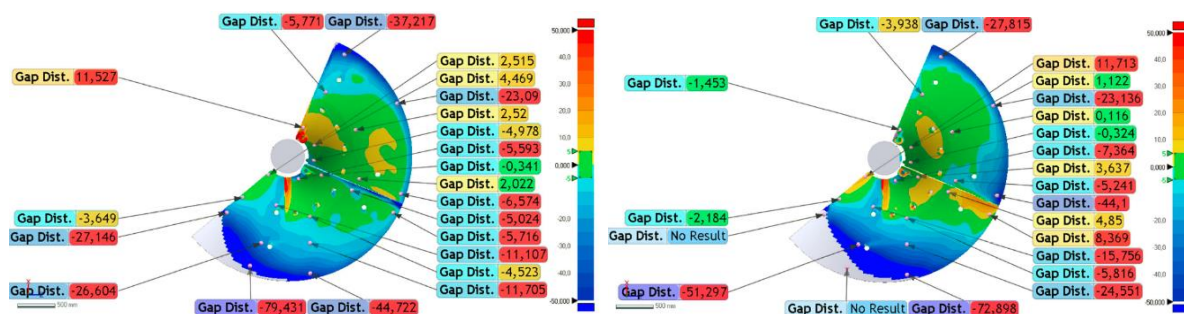


Figura 6. Superfície escaneada do revestimento da base da helicoidal. a) Moinho com bolas novas, b) Moinho com bolas reutilizadas.

A partir dos dados volumétricos do escaneamento 3D foram construídos os gráficos da Figura 7. Nestes gráficos estão apresentados a massa de cada peça (a – Base da Helicoidal, b – Revestimento Intermediário) e as horas em operação no momento do escaneamento. A relação entre a massa da peça e as horas da operação define pela inclinação da reta como a taxa de desgaste (kg/h) de cada revestimento.

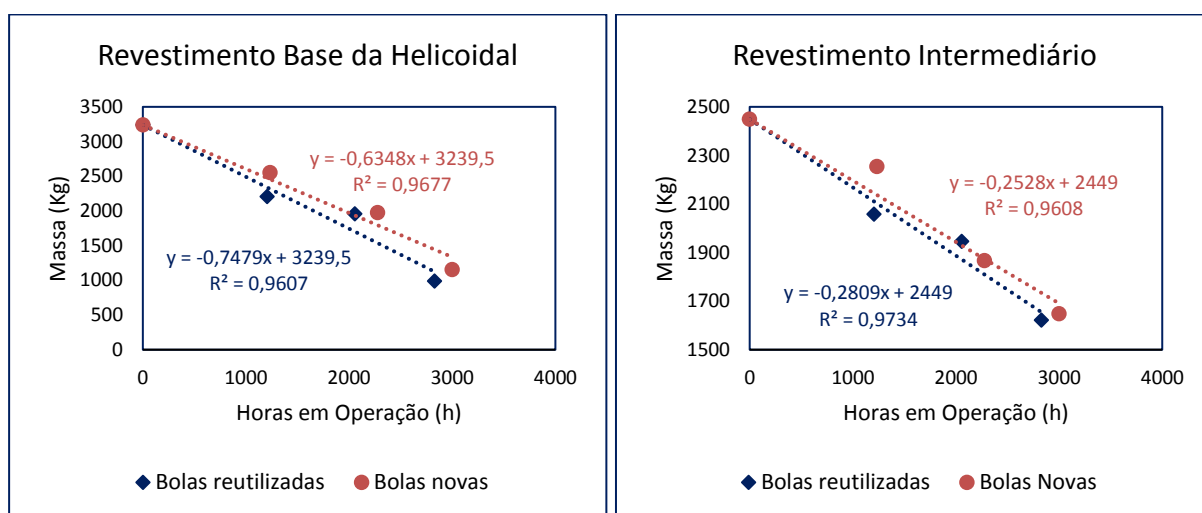


Figura 7. Curva de desgaste dos revestimentos da Base da Helicoidal e do Intermediário.

Os dados sumarizados das taxas de desgaste estão apresentados na Tabela 4. A taxa de desgaste do revestimento da Base da Helicoidal apresentou um desgaste de 634,8 g/h no revestimento com bolas novas e 747,9 g/h para o moinho de bolas reutilizadas, o que representa uma taxa de desgaste 17,82% maior. Para o revestimento Intermediário o moinho com bolas reutilizadas apresentou desgaste 11,12% maior (280,9 g/h contra 252,8 g/h).

Tabela 4. Taxa de Desgaste do revestimento (g/h) obtida pelo escaneamento 3D.

Revestimento	Bolas Novas	Bolas Reutilizadas	$\Delta$ (Reutilizadas – Novas)
Base da Helicoidal	634,8	747,9	17,82%
Intermediário	252,8	280,9	11,12%
Desgaste Base/Intermediário	2,51	2,66	6,03%

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados dos testes de bancada indicaram um aumento relativo de 7,6% no consumo específico de energia no Vertimill carregado com bolas classificadas e o resultado com bolas reutilizadas indica um aumento relativo de 17,8% no consumo específico de energia em relação aos testes com corpos moedores novos.

Os dados industriais apresentaram uma piora de 18,0% no grau de redução do moinho utilizando bola reutilizada e um desgaste de revestimento de 17,82% maior na base da helicoidal em comparação com os dados do moinho com bolas novas.

Estes resultados estão de acordo com as simulações realizadas por Sinnott *et al.* (2011) que usando o método de elementos discretos (DEM) relatou que o desempenho de moagem em moinhos verticais se deteriora fortemente ao utilizar corpos moedores não esféricos.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Agradecimento especial à Anglo American pelo apoio na realização deste trabalho.

#### 6. REFERÊNCIAS

De Mattos, V. Digitalização Tridimensional Aplicada à Manutenção de Equipamentos Industriais. Disponível em: <http://www.esx-engenharia.com.br/>, 2013.

Jankovic, A. Variables affecting the fine grinding of minerals using stirred mills. Minerals Engineering 16. Elsevier, 2003. 9p.

Mazzinghy, D. B. Metodologia para escalonamento e simulação de moinho vertical [manuscrito] Douglas Batista Mazzinghy. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Belo Horizonte, 2012. 162 p.

Mazzinghy, D.B., Russo, J.F.C., Lichter, J., Schneider, C.L., Sepúlveda, J., Videla, A. The Grinding Efficiency of the Currently Largest Vertimill Installation in the World. SAG Conference, Vancouver, 2015. 15p.

Lichter, J.K.H. & Davey, G.. Selection and size of ultrafine and stirred grinding mills. In: Komar Kawatra, S. (Ed.), Advances in Comminution. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., Denver, 2006, 69-86.

Radziszewski, p.; Allen, J. Towards a better understanding of stirred milling technologies – Estimating power consumption and energy use. 46th Annual Canadian Mineral Processors Operators Conference. Ottawa, Canada. Janeiro, 2014.

Sinnott, M.D., Cleary, P.W., Morrison, R.D. Is media shape important for grinding performance in stirred mills? Minerals Engineering 24 (2011) 138–151.