

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Dissertação de Mestrado

Efeito dos parâmetros de processo na potência de moinhos verticais

Autor:

Jonathan Felipe de Lima Silva

Orientador: Dr. Luiz Claudio Monteiro Montenegro

Coorientador: Dr. Luís Cláuzio de Rennó Machado

Agosto de 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Jonathan Felipe de Lima Silva

EFEITO DOS PARÂMETROS DE PROCESSO NA POTÊNCIA DE MOINHOS
VERTICAIS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia
Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais
como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em
Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Área de concentração: Tecnologia Mineral e Meio Ambiente

Orientador: Dr. Luiz Claudio Monteiro Montenegro

Coorientador: Dr. Luís Cláuzio de Rennó Machado

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG

2019

S586e Silva, Jonathan Felipe de Lima.
Efeito dos parâmetros de processo na potência de moinhos verticais [recurso eletrônico] / Jonathan Felipe de Lima Silva. – 2019.
1 recurso online (xii, 70 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Luiz Claudio Monteiro Montenegro.
Coorientador: Luís Cláuzio de Rennó Machado.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 127-129.
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia de minas - Teses. 2. Tecnologia mineral - Teses.
3. Minérios de ferro - Teses. 4. Eficiência energética - Teses. I.
Montenegro, Luiz Cláudio Monteiro. II. Machado, Luís Cláuzio de Rennó.
III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV.
Título.

CDU: 622(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA,
MATERIAIS E DE MINAS/MP

UFMG

ATA DA DEFESA DA DISSERTAÇÃO DO ALUNO JONATHAN FELIPE DE LIMA SILVA

Realizou-se, no dia 05 de setembro de 2019, às 14:00 horas, Sala: 4240, Escola de Engenharia, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de dissertação, intitulada *Efeito dos parâmetros de processo na potência de moinhos verticais*, apresentada por JONATHAN FELIPE DE LIMA SILVA, número de registro 2017721136, graduado no curso de ENGENHARIA DE MINAS, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em ENGENHARIA METALÚRGICA, MATERIAIS E DE MINAS, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Luiz Claudio Monteiro Montenegro - Orientador (UFMG), Prof(a). Roberto Galery (UFMG), Prof(a). Douglas Batista Mazzignhy (UFMG), Prof(a). Luis Cláuzio Rennó Machado (Anglo American).


A Comissão considerou a dissertação:

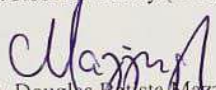
Aprovada

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.
Belo Horizonte, 05 de setembro de 2019.


Prof(a). Luiz Claudio Monteiro Montenegro (Doutor)


Prof(a). Roberto Galery (Doutor)


Prof(a). Douglas Batista Mazzignhy (Doutor)


Prof(a). Luis Cláuzio Rennó Machado (Doutor)

À Deus,
À minha esposa e amiga Bárbara,
Aos meus pais e meu irmão.

"Um, lembre-se de olhar para as estrelas e não para baixo, para seus pés. Dois, nunca desista do trabalho. Trabalho dá significado e propósito, e a vida está vazia sem eles."

(Stephen Hawking)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram com a confecção deste trabalho e, em especial:

Ao professor Luiz Cláudio pela orientação e apoio.

Ao amigo Luís Cláuzio pelas sugestões, ensinamentos e orientação profissional.

Aos amigos Elias Castro, Paulo Mapa, Douglas Mazzinghy, Lorene Fonseca e André Silveira pelo suporte, direcionamento e projetos compartilhados.

À Anglo American, em especial, ao Denílson Araújo e Leonardo Queiroz por darem liberdade e apoio para a confecção deste trabalho.

À Metso pela disponibilização dos dados e parceria neste projeto.

À equipe da Gerência de Qualidade e Processo e da Gerência de Operação de Usina por todos os desafios trabalhados juntos e a todos aqueles que com profissionalismo e dedicação trabalharam na execução dos ensaios.

SUMÁRIO

| | | |
|-------------|--|-----------|
| 1. | INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2. | OBJETIVOS..... | 4 |
| 3. | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 5 |
| 3.1. | Moagem Vertical..... | 5 |
| 3.2. | Fundamentos de Cominuição | 8 |
| 3.3. | Modelos Matemáticos de Cominuição | 11 |
| 3.3.1. | Modelo de Balanço Populacional | 12 |
| 3.3.2. | Índice de Trabalho Operacional..... | 14 |
| 3.3.3. | Energia Específica por Tamanho (SSE) | 15 |
| 3.3.4. | Modelo de Potência em Moinhos de Laboratório..... | 16 |
| 3.4. | Modelo de Potência em Moinhos Verticais..... | 16 |
| 3.4.1. | Modelo de DUFFY | 17 |
| 3.4.2. | Modelo de JANKOVIC & MORELL..... | 18 |
| 3.4.3. | Modelo de NITTA | 19 |
| 3.5. | Fatores que influenciam o Processo em Moinhos Verticais | 20 |
| 3.5.1. | Corpos Moedores | 20 |
| 3.5.2. | Grau de enchimento dos Moinhos | 23 |
| 3.5.3. | Velocidade de rotação do agitador..... | 24 |
| 3.5.4. | Concentração de sólidos | 24 |
| 3.5.5. | Tempo de Moagem | 25 |
| 3.5.6. | Revestimento da espiral | 25 |
| 4. | MATERIAIS E MÉTODOS | 31 |
| 4.1. | Amostragens Industriais e Coleta de Dados..... | 32 |
| 4.2. | Testes de moagem em bancada..... | 33 |
| 4.3. | Análise Granulométrica | 34 |
| 4.4. | Concentração de sólidos | 34 |
| 4.5. | Medição da altura da carga dos moinhos | 35 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.6. | Medição de Potência | 36 |
| 4.7. | Escaneamento 3D do revestimento..... | 36 |
| 4.8. | Construção do modelo | 37 |
| 5. | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 38 |
| 5.1. | O efeito dos corpos moedores | 38 |
| 5.2. | O desgaste do revestimento..... | 40 |
| 5.3. | A relação entre altura da carga moedora e o desgaste do revestimento. | 44 |
| 5.4. | O efeito da concentração de sólidos..... | 47 |
| 5.5. | Consumo de potência em vazio..... | 49 |
| 5.6. | Modelo de Potência | 51 |
| 6. | CONCLUSÕES..... | 54 |
| 7. | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 55 |
| | REFERÊNCIAS..... | 56 |
| | ANEXOS | 62 |
| | APÊNDICE..... | 70 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 - Fluxograma do processo produtivo do Minas-Rio (acervo do autor). | 3 |
| Figura 3.1 - Moinho vertical ou moinho de torre – Tower Mill (adaptado por MAZZINGHY, 2012). | 5 |
| Figura 3.2 - Componentes principais do Vertimill™ (METSO, 2006). | 7 |
| Figura 3.3 - 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). | 7 |
| Figura 3.4 - Zona de moagem em vermelho e zona de classificação interna em azul (MAZZINGHY, 2012, adaptado pelo autor). | 8 |
| Figura 3.5 - Mecanismos de quebra existentes na cominuição (adaptado de KELLY & SPOTISWOOD, 1982). | 9 |
| Figura 3.6 - Representação da distribuição de partículas após a quebra. (adaptado de GUPTA & YAN, 2006). | 13 |
| Figura 3.7 - Distribuição da função quebra para minérios de alta resistência (“duros”) e baixa resistência (“macios”) (adaptado de GUPTA & YAN, 2006). | 13 |
| Figura 3.8 - Função Quebra acumulada para o moinho vertical e o moinho convencional (STEHR et al., 1987, adaptado pelo autor). | 14 |
| Figura 3.9 - Formato dos corpos moedores simulados usando DEM (SINOTT <i>et al.</i> , 2011). | 22 |
| Figura 3.10 - Curva de potência como função da esfericidade do corpo moedor (SINOTT <i>et al.</i> , 2011, adaptado pelo autor). | 23 |
| Figura 3.11 - Movimento da carga em moinho com agitador helicoidal. a) Perfil da velocidade; b) Distribuição de Velocidade Vertical de velocidade angular e c) Distribuição de Velocidade Angular (JANKOVIC & MORELL, 1997, adaptado pelo autor). | 26 |
| Figura 3.12 - Evolução do desgaste do revestimento (Metso, 2018, adaptado pelo autor). | 27 |
| Figura 3.13 - Moinho com revestimento em fim de vida útil e nomenclatura utilizada para diferenciação dos revestimentos (acervo do autor). | 27 |
| Figura 3.14 - Desgaste excessivo do revestimento inferior (acervo do autor). | 28 |
| Figura 3.15 - Metodologia de medição do dimensional do revestimento (METSO, 2018, adaptado pelo autor). | 29 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.16 – Desenho esquemático da triangulação 3D de laser (De Mattos, 2013).... | 29 |
| Figura 3.17 - Exemplo de escaneamento 3D aplicado ao revestimento do Vertimill™ (acervo do autor)..... | 30 |
| Figura 4.1 - Fluxograma esquemático para amostragem e coleta de dados dos instrumentos (acervo do autor). | 32 |
| Figura 4.2 - Amostragem da alimentação da bateria de hidrociclone. | 33 |
| Figura 4.3 - a) Foto do procedimento de medição do grau de enchimento. b) Foto do artefato utilizado para realizar a medição (ESTEVEZ <i>et al.</i> , 2018). | 35 |
| Figura 4.4 – Desenho esquemático do moinho com suas dimensões (adaptado pelo autor). | 36 |
| Figura 4.5 - Procedimento de Escaneamento 3D do revestimento do moinho (acervo do autor)..... | 37 |
| Figura 5.1 -Fotos dos corpos moedores com reposição de (a) bolas novas e (b) bolas reutilizadas | 40 |
| Figura 5.2 - Modelo 3D gerado a partir do escaneamento do revestimento..... | 40 |
| Figura 5.3 -Superfície escaneada do revestimento da base da helicoidal. a) Moinho com bolas novas, b) Moinho com bolas reutilizadas. | 41 |
| Figura 5.4 - Visão do perfil de desgaste dos dois revestimentos. a) Moinho com bolas novas, b) Moinho com bolas reutilizadas. | 41 |
| Figura 5.5 - Curva de desgaste do revestimento da Base. | 42 |
| Figura 5.6 - Curva de desgaste do revestimento 1º Intermediário..... | 42 |
| Figura 5.7 - Dados de Potência ao longo da operação do revestimento. | 44 |
| Figura 5.8 - Evolução da altura da carga de corpos moedores nos moinhos ao longo da vida útil do revestimento..... | 45 |
| Figura 5.9 - Relação entre Potência / Altura da Carga de Bolas ao longo da vida útil do revestimento..... | 46 |
| Figura 5.10 - Relação entre potência e altura da carga ao longo da vida útil do revestimento em três moinhos agrupados..... | 47 |
| Figura 5.11 - Relação entre Potência e Concentração de sólidos na polpa. | 48 |
| Figura 5.12 - Relação entre Potência / Altura da Carga e Horas em Operação em moinhos preenchidos apenas com água e corpos moedores..... | 49 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.13 - Medição de Potência ao longo da drenagem do corpo moedor no moinho 0414-MB-06..... | 50 |
| Figura 5.14 - Medição de Potência ao longo da drenagem do corpo moedor no moinho 0416-MB-02..... | 51 |
| Figura 5.15 - Gráfico do ajuste do modelo de potência..... | 53 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1.I – Moinhos Verticais em operação no Brasil (BERGERMAN, 2013)..... | 2 |
| Tabela 3.I - Variáveis utilizadas nos modelos de potência para moinhos verticais (RADZISZEWSKI & ALLEN, 2014, adaptado pelo autor)..... | 17 |
| Tabela 3.II - Relação entre tamanho de corpo moedor e número de bolas por unidade de massa (LICHTER & DAVEY, 2006)..... | 21 |
| Tabela 4.I - Dados do moinho de bancada..... | 34 |
| Tabela 5.I. Energia específica (kWh/t) para diferentes colares de corpos moedores em escala de bancada..... | 38 |
| Tabela 5.II. OWI e SSE ₄₄ obtidos em amostragem industrial comparando a utilização de corpos moedores novos e reutilizados. | 39 |
| Tabela 5.III. Taxa de Desgaste do revestimento (g/h) obtida pelo escaneamento 3D.... | 43 |
| Tabela 5.IV Resumo da medição de potência dos moinhos antes e após a drenagem dos corpos moedores (média de um minuto)..... | 51 |

RESUMO

O circuito de remoagem do Minas-Rio é a maior planta de moagem vertical do mundo na atualidade. Esta foi projetada com dezesseis equipamentos de 1500 HP cada para processar 24,5 milhões de toneladas de *Pellet Feed* concentrados por flotação reversa de minério de ferro e adequar este material para transporte via mineroduto. Esta etapa do processo é crucial para o desempenho do sistema de produção pois uma baixa produtividade pode causar restrições de produção à montante ou o não atingimento das especificações de segurança do único modal de transporte do produto. Deste modo, o objetivo deste trabalho foi estudar as principais variáveis que influenciam o processo da moagem vertical e avaliar o seu impacto na produtividade do equipamento. Para a realização deste estudo foram realizados ensaios de moagem em laboratório e amostragens no circuito industrial para acompanhamento do desempenho ao longo da vida útil dos revestimentos dos moinhos. Com estes dados foi possível definir os efeitos do revestimento, da densidade de polpa, dos corpos moedores e da altura da carga moedora na potência dos moinhos. Na última etapa do trabalho foi construído um modelo matemático para prever a potência dos moinhos e assim, dar subsídios para se definir a melhor estratégia operacional do sistema.

Palavras-chave: Vertimill, Minério de Ferro, Eficiência energética.

ABSTRACT

The Minas-Rio regrind circuit is the largest vertical milling plant in the world today. It was designed with sixteen equipment of 1,500 HP each to process 24.5 million tons of Pellet Feed concentrated by reverse flotation of iron ore and adjust this material for transportation via pipeline. This process step is crucial for production system performance as low productivity can cause upstream production constraints or failure to meet safety specifications of the product's transport. Thus, the objective of this work was to study the main variables that influence the vertical grinding process and to evaluate their impact on the equipment productivity. To carry out this study, laboratory grind tests and industrial samplings were done throughout the life of the mill liners. With these data it was possible to define the effects of the liners, the slurry density, the grinding media and the height of the media charge. In the last stage of the work was built a mathematical model to predict the power of the mills and thus, give subsidies to define the best operational strategy of the system.

Keywords: Vertimill, Iron Ore, Energy efficiency.

1. INTRODUÇÃO

No contexto global da mineração e com a redução na oferta de jazidas minerais de alto teor, a moagem se tornou um processo imprescindível para a viabilização de projetos de baixo teor e com dificuldades de liberação. No entanto, o processo de moagem, em especial a moagem de ultrafinos, é um estágio que possui alto consumo energético em relação a todo o processo de beneficiamento mineral (RADZISZEWSKI & ALLEN, 2014).

Este alto consumo de energia é necessário para promover a redução das partículas a uma faixa de granulometria muito fina visando atender às propriedades do processo subsequente ou ao requisito do produto final. Deste modo, é notório que o processo de moagem tem se tornado uma das áreas de maiores desenvolvimentos com o objetivo de aumentar sua eficiência e transformá-lo em um processo mais sustentável (WANG & FORSBERG, 2003).

Os moinhos de bolas convencionais têm sido usados para moagem há muitos anos, mas o problema básico desta aplicação é que a energia consumida pelo moinho convencional é limitada pelo trabalho exercido na movimentação de todo o conjunto carcaça-corpos moedores. Na moagem convencional, em baixas velocidades e com grandes corpos moedores, são gerados esforços principalmente de impacto e abrasão. Entretanto, quando as partículas estão em uma faixa ultrafina, estes dois modos de esforços não atuam de modo eficiente. O consumo de energia cresce exponencialmente em partículas abaixo de 75 μm e praticamente se limitando à geração de partículas entre 45 e 40 μm (WANG & FORSBERG, 2003; JANKOVIC & MORRELL, 1997).

Com o objetivo de beneficiar estes minérios o interesse na moagem vertical vem crescendo nos últimos 20 anos e vários trabalhos foram publicados neste período. Nesta gama de trabalhos, a utilização de circuitos para moagem de materiais finos com moinhos verticais vem apresentando ótimos casos de sucesso em comparação com moinhos de bolas (RADZISZEWSKI & ALLEN, 2014). Nestes equipamentos a hélice rotaciona

lentamente transportando a carga de bolas em trajetória ascendente no centro do moinho e em trajetória descendente na borda da hélice. Este padrão de fluxo associado à velocidade lenta da rosca permite que as partículas estejam sempre em contato com a carga moedora e assim, gerando maior probabilidade de quebra das partículas (HASAN, 2016).

No mundo todo tem-se mais de 450 moinhos verticais em operação sendo 66 aplicados em processos de tratamento de minério de ferro (METSU, 2018). No Brasil, a aplicação do moinho vertical está distribuída em sete unidades industriais em um total de 31 moinhos em operação, sendo que destes, 16 moinhos se encontram na usina do Projeto Minas-Rio, localizado no município de Conceição do Mato Dentro, estado de Minas Gerais (Tabela 1.I).

Tabela 1.I – Moinhos Verticais em operação no Brasil (BERGERMAN, 2013).

| Projeto | Empresa | Minério | Estado | Tipo de Moinho | Unidades |
|------------------|----------------|----------------|---------------|-----------------------|-----------------|
| Sossego | Vale | Cobre | Pará | VTM-1500 | 2 |
| Salobo | Vale | Cobre | Pará | VTM-1500 | 8 |
| Chapada | Yamana Gold | Cobre | Goiás | VTM-1000 | 1 |
| Paracatu | Kinross | Ouro | Minas Gerais | VTM-1250 | 1 |
| Caraíba | Caraíba | Cobre | Bahia | VTM-200 | 1 |
| Germano | Samarco | Ferro | Minas Gerais | VTM-1500 | 1 |
| Minas-Rio | Anglo American | Ferro | Minas Gerais | VTM-1500 | 16 |

O processo em estudo neste trabalho é o circuito de beneficiamento da Anglo American na Mina do Sapo o qual foi projetado para produzir 24,5 Mtpa de *Pellet Feed*. O processo de produção do Minas-Rio se inicia em um circuito a seco composto por duas etapas de britagem, uma de mandíbula e a outra cônica, e uma etapa de prensagem com a utilização de HPGR. Após esta etapa se inicia o circuito a úmido, este circuito é composto por uma moagem primária, composta por moinhos de bolas de tamanho 26'x42', deslamagem e concentração por flotação em *tank cell*. O concentrado do processo de flotação é destinado ao circuito de remoagem que tem como função adequar a granulometria deste

material para transporte via mineroduto até a filtragem localizada no porto de Açú, no estado do Rio de Janeiro (Figura 1.1).

O circuito de remoagem do Minas-Rio é composto por duas linhas compostas de oito moinhos Vertimill™ cada. De acordo com os dados de projeto do Minas-Rio, o material a ser bombeado pelo mineroduto deve possuir um P_{80} de 36 μm com uma capacidade de produção de 190 t/h por moinho vertical e um consumo específico total de 5,9 kWh/t do circuito de remoagem.

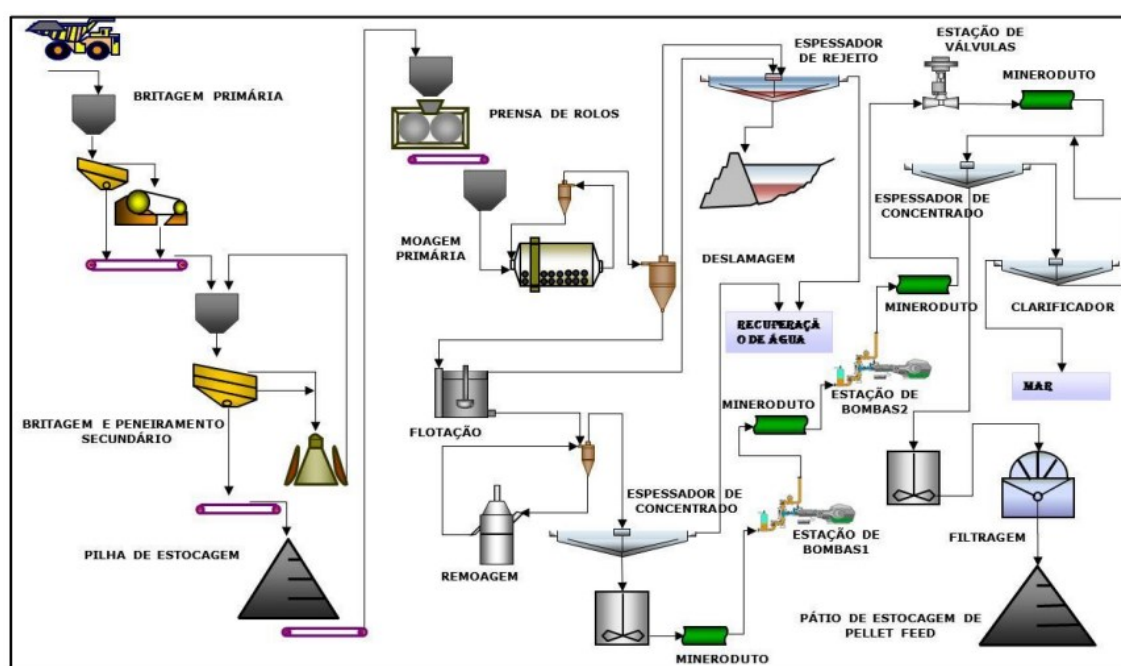


Figura 1.1 - Fluxograma do processo produtivo do Minas-Rio (acervo do autor).

Com estes níveis de produtividade e consumo energético faz-se necessário um estudo dos parâmetros de processo que influenciam a eficiência energética de um circuito de remoagem e uma avaliação de sua aplicabilidade para aumento da produtividade dos moinhos. Dentre estes parâmetros destacam-se: taxa de alimentação; distribuição de tamanho das partículas; resistência do minério à fragmentação; concentração de sólidos na polpa; características do corpo moedor (distribuição de tamanho, formato e densidade), altura do leito de bolas, desgaste da espiral e desempenho da classificação por hidrociclones (JANKOVIC, 2003; BERGERMAN, 2013; RADZISZEWSKI & ALLEN, 2014; DUFFY, 1994).

2. OBJETIVOS

Estudar a influência do diâmetro e forma dos corpos moedores, percentual de sólidos, grau de enchimento na moagem vertical e quantificar os seus efeitos no circuito industrial do Minas-Rio buscando o aumento da produtividade e eficiência energética do processo à medida que a espiral se desgasta.

Criar um modelo de potência para prever o comportamento do moinho ao longo da vida útil do revestimento a fim de subsidiar a estratégia operacional de troca de revestimento.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados o histórico de desenvolvimento dos moinhos verticais, as teorias e os modelos de cominuição, estudos relacionados às variáveis que afetam o desempenho da moagem e o descritivo técnico da usina de beneficiamento do Minas-Rio que servirão de base para os estudos propostos neste trabalho.

3.1. Moagem Vertical

O conceito de moagem com agitador e corpos moedores esféricos foi apresentado em 1928 (RADZISZEWSKI & ALLEN, 2014). Este tipo de equipamento era utilizado para condicionamento da superfície das partículas, através de atrição, antes da etapa de flotação (HERBST & SEPULVEDA, 1978).

O primeiro modelo de moinho vertical, conhecido como moinho de torre (*Tower Mill*) foi desenvolvido no Japão, na década de 1950, pela *Kubota Tower Mill Corporation*, para aplicações em moagens finas e ultrafinas, e foi o primeiro moinho vertical aplicado na indústria mineral, conforme desenho esquemático na Figura 3.1 (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006).

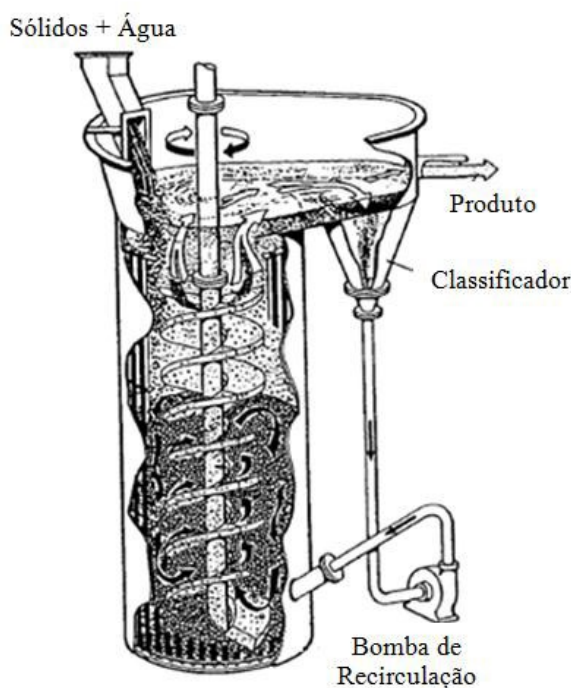


Figura 3.1 - Moinho vertical ou moinho de torre – Tower Mill (adaptado por MAZZINGHY, 2012).

Diferentemente dos moinhos de bolas convencionais, onde o movimento da carga é dado pelo movimento rotacional da carcaça e do revestimento do moinho, nos moinhos verticais o movimento da carga e dos corpos moedores é dado pela rotação de um eixo com uma espiral interna enquanto a carcaça do moinho é estacionária. Nos moinhos de torre, a alimentação em polpa entra na base do equipamento e é reduzida em tamanho pela ação da abrasão, onde as partículas finamente moídas são carregadas pela polpa e transbordam para um classificador. As partículas com granulometria acima da desejada recirculam pela parte inferior da câmara de moagem. A eficiência de moagem é aumentada de acordo com a pressão relativamente alta entre os corpos moedores e as partículas a serem moídas (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006).

O Vertimill™, fabricado pela Metso, tem basicamente o mesmo princípio de funcionamento do Tower Mill e foi introduzido na década de 1990 (RADZISZEWSKI & ALLEN, 2014). A Figura 3.2 mostra os componentes principais do Vertimill™ no modelo original. Este equipamento não requer sistema de resfriamento devido à baixa rotação da rosca. Em sua carcaça são instalados revestimentos magnéticos que retêm os corpos moedores criando uma camada de proteção ao equipamento. A rosca é composta por placas metálicas de desgaste que precisam ser trocadas a cada seis meses, aproximadamente, na base da helicoidal e a cada um ano nos revestimentos do topo (HASAN, 2016).

Nos projetos recentes, Germano da Samarco e o Projeto Minas-Rio da Anglo American, a alimentação do moinho vertical é realizada diretamente pela parte inferior do moinho e a descarga ocorre por transbordo pela parte superior do moinho, sendo destinada para uma classificação por hidrociclone em circuito fechado (Figura 3.3).

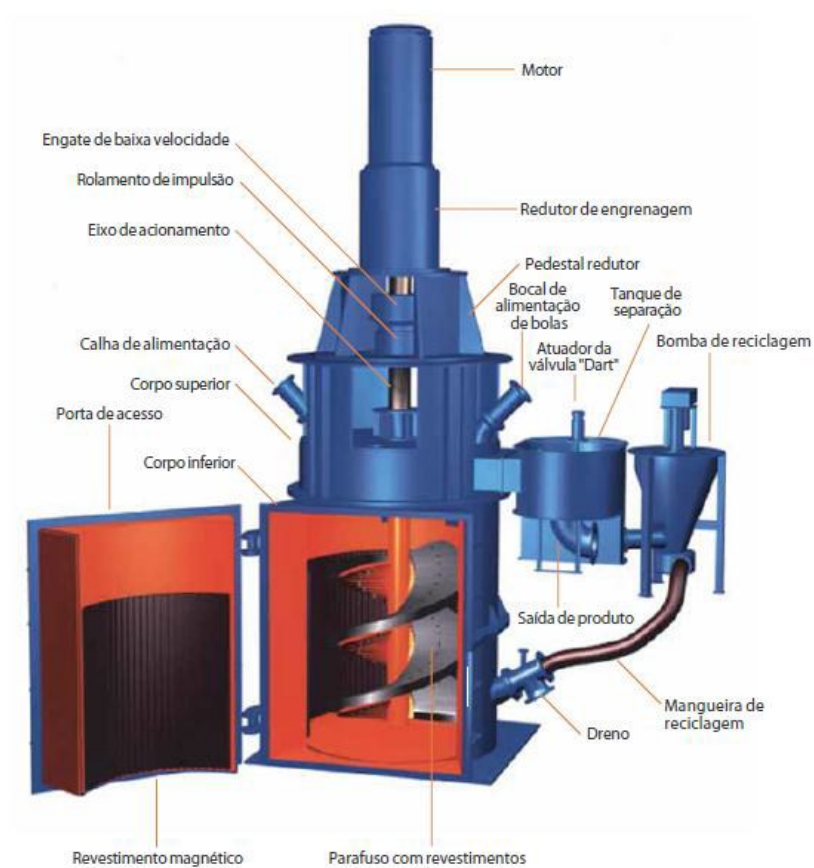


Figura 3.2 - Componentes principais do Vertimill™ (METSO, 2006).



Figura 3.3 - 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).

Segundo MAZZINGHY (2012), o moinho vertical possui duas zonas distintas em seu interior, uma zona de moagem, na qual o material é cominuído e uma zona de classificação (interna), localizada acima da zona de moagem e na qual o material sofre classificação. A Figura 3.4 apresenta a zona de moagem na cor vermelha e a zona de classificação interna na cor azul.

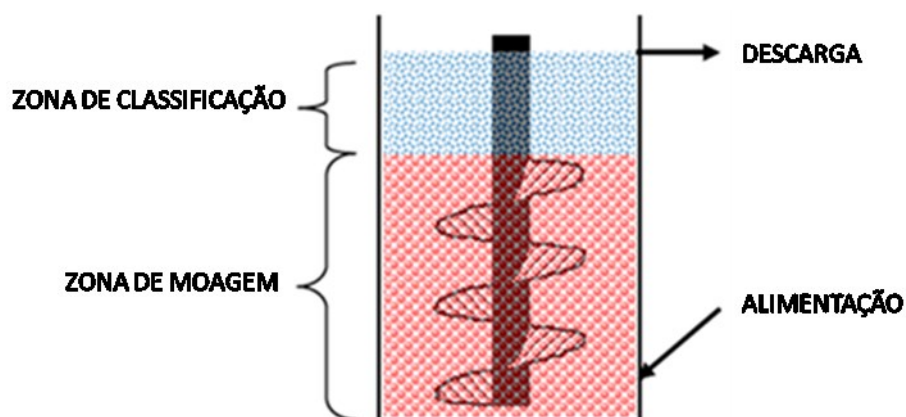


Figura 3.4 - Zona de moagem em vermelho e zona de classificação interna em azul (MAZZINGHY, 2012, adaptado pelo autor).

Portanto, considera-se como zona de moagem, o volume ocupado com os corpos moedores, cujo limite superior deve estar abaixo do topo da espiral. Acima deste ponto tem-se uma zona de classificação interna na qual as partículas com intervalo de tamanhos maiores retornam até a zona de moagem. As partículas com intervalo de tamanho mais fino ou próximo do tamanho desejado saem do moinho por transbordo em direção ao tanque separador (MAZZINGHY *et al.*, 2015).

3.2. Fundamentos de Cominuição

Pode-se definir a cominuição como um processo no qual materiais particulados são reduzidos de tamanho. Esta redução de tamanho pode ser realizada seja por desmonte de rochas, britagem ou moagem, a depender dos produtos que serão obtidos e os respectivos tamanhos adequados aos processos subsequentes ou aos usos finais (BERGERMAN, 2013).

Segundo BERALDO (1987), para que ocorra a fratura de uma partícula mineral, é necessário que a força aplicada na mesma seja maior que sua resistência. Além disso, a

quebra da partícula é função de sua natureza e de como são aplicadas as forças do processo de cominuição.

Existem três mecanismos de fratura presentes nos processos de cominuição que podem ser descritos abaixo e na Figura 3.5 (KELLY & SPOTISWOOD, 1982; BERALDO, 1987):

- **Abrasão:** aplicação de força de forma insuficiente para provocar uma fratura em toda a partícula. Há a concentração de esforços localmente, que provoca o aparecimento de pequenas fraturas, com o surgimento de uma distribuição granulométrica de partículas finas ao lado da partícula original, cujo o diâmetro é pouco diminuído. Este mecanismo ocorre devido abrasão entre partículas e bolas-partículas;
- **Compressão:** aplicação de força de forma lenta onde o esforço é aliviado com o aparecimento de fraturas. Desse tipo de fratura resultam fragmentos de diâmetros equivalentes. Este tipo de mecanismo é típico em britadores (mandíbulas, giratórios e cônicos) e em moinhos quando as partículas são comprimidas entre os corpos moedores e/ou partículas maiores;
- **Impacto:** aplicação de força de forma rápida e em intensidade muito superior à resistência da partícula. Mecanismo encontrado em britadores de impacto ou em moinhos na zona de queda dos corpos moedores. A resultante deste mecanismo é uma distribuição de partículas finas.

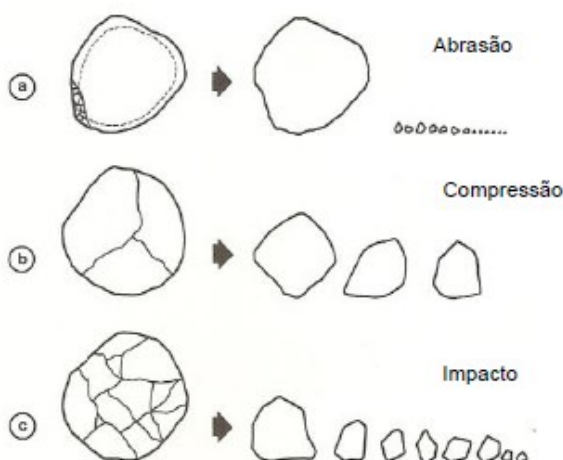


Figura 3.5 - Mecanismos de quebra existentes na cominuição (adaptado de KELLY & SPOTISWOOD, 1982).

Segundo GALÉRY (2002), a distribuição característica do produto de um processo de cominuição depende além da natureza das forças de coesão interna das partículas como também da forma de energia e da intensidade com que estas energias são aplicadas sobre a partícula. Do mesmo modo, SCHONERT (1991) ressalta que na moagem de partículas finas é necessário submeter esforços contínuos para que ocorra a quebra, ou seja, isto resulta em um aumento no consumo de energia neste processo.

Em outro trabalho SCHONERT (1990) cita os fatores que fazem com que a moagem de finos tenha um maior consumo de energia:

- i. Quanto menor o tamanho da partícula maior é a resistência desta partícula à quebra;
- ii. Abaixo de determinado tamanho, os materiais frágeis podem se deformar de forma plástica. Sendo assim, há uma maior dificuldade de quebra destes materiais;
- iii. Quanto menor o tamanho da partícula maior são as forças de arraste do meio e, portanto, alteram de forma mais intensa o movimento das partículas. Ao exercer força sobre estas partículas há a geração de um contra fluxo na direção oposta à localização da partícula. Deste modo, a probabilidade de colisão entre partícula e corpo moedor se reduz e o processo de cominuição se torna mais difícil;
- iv. Partículas menores possuem maior probabilidade de aglomeração e recobrimento dos corpos moedores. Esses dois efeitos diminuem a ação de moagem sobre as partículas.

SCHONERT (1990) também afirma que os moinhos com carga agitada fornecem forças 65% maiores que os moinhos convencionais. O autor ressalta que os moinhos de carga agitada são mais eficientes para materiais finos, pois nestes casos há uma maior necessidade de aplicação de corpos moedores de menores diâmetros. Os corpos moedores de menor diâmetro intensificam as zonas ativas de moagem acarretando em uma maior probabilidade de colisão bola-partícula para um mesmo volume da carga.

WELLENKAMP (1999) afirma que os equipamentos de moagem fina e ultrafina devem ser projetados com objetivo do melhor desempenho fluidodinâmico e serem adequados

para operações em alta velocidade. Quanto menor a granulometria da partícula maior será a influência da viscosidade para o transporte.

Portanto, pode-se observar que as operações de remoagem demandam maior consumo específico de energia, devido às características das partículas a serem quebradas – com menor número de falhas e com comportamento elástico – e pelos aspectos fluidodinâmicos que dificultam a aplicação dos equipamentos industriais. Então, para que o consumo de energia elétrica seja reduzido na operação de moagem fina de minérios, deve-se buscar equipamentos que forneçam a maior razão energia por volume, assim como maior probabilidade de contatos entre os corpos moedores e as partículas para que sejam maximizados os esforços sobre as partículas. Devem também possuir dinâmica interna adequada de forma a aumentar a aplicação de energia sobre as partículas e operem predominantemente com os mecanismos de abrasão e compressão. Sendo assim, por todas estas características, pode-se afirmar que os moinhos de carga agitada mostram grandes vantagens em relação aos moinhos convencionais (BERGERMAN, 2013).

3.3. Modelos Matemáticos de Cominuição

Durante os últimos anos a aplicabilidade dos modelos modernos de cominuição vem sendo mais constantes, devido a necessidade de otimização de processos de moagem sem que seja necessário o investimento em testes de escala industrial ou aumentar a assertividade em novos projetos (KING, 2001; MAZZINGHY *et al.*, 2017).

Um modelo pode ser útil na predição da granulometria do produto ou na avaliação do desempenho do processo. Vários tipos de modelamento vêm sendo empregados para explicar os fenômenos que ocorrem na moagem vertical: modelos mecanicistas, empíricos e técnicas de modelagem computacional como Método dos Elementos Discretos (DEM) e Fluidodinâmica Computacional (CFD) (HASAN, 2016).

Diante deste contexto, MORRELL *et al.* (1993) usaram com sucesso o modelo de balanço populacional para descrever a quebra de partículas em moinhos verticais. DUFFY (1994), JANKOVIC & MORELL (1997), JANKOVIC (1999) e NITTA *et al.* (2006) estudaram

sobre o consumo de potência e o desempenho dos corpos moedores. MAZZINGHY *et al.* (2012, 2014 e 2015), desenvolveram um modelo para definição dos parâmetros de quebra e prever a granulometria do produto a partir de um moinho de bolas em escala laboratorial.

3.3.1. Modelo de Balanço Populacional

O modelo de balanço populacional se aplica como ferramenta para trabalhos que objetivam a correta modelagem do processo e avaliem a eficiência energética de um circuito de moagem. Este modelo possui vantagem ao modelo empírico de BOND (1952) por considerar todas as faixas granulométricas do material (SEPÚLVEDA, 2004).

O modelo de balanço populacional baseia-se na lei de conservação da massa, ou seja, em um processo de cominuição, a variação de determinada massa m contida em uma fração granulométrica i é definida por uma taxa de desaparecimento, $S_i m_i(t)$, e uma taxa de acréscimo relacionada à quebra das frações j para a fração i , $b_{ij} \cdot S_j \cdot m_j(t)$, conforme Equação 3 e apresentada esquematicamente na Figura 3.6 (AUSTIN ET AL., 1984):

$$\frac{dm_i(t)}{dt} = -S_i m_i(t) + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} \cdot S_j \cdot m_j(t) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

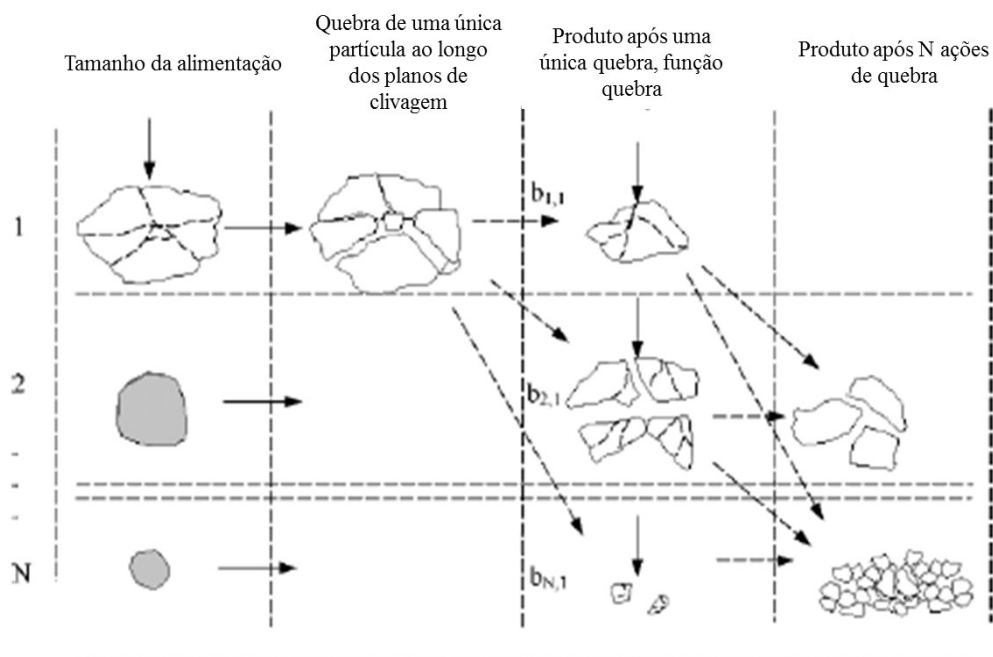


Figura 3.6 - Representação da distribuição de partículas após a quebra. (adaptado de GUPTA & YAN, 2006).

Na Figura 3.7 está representado o comportamento comparativo da função quebra para minérios de diferentes resistências.

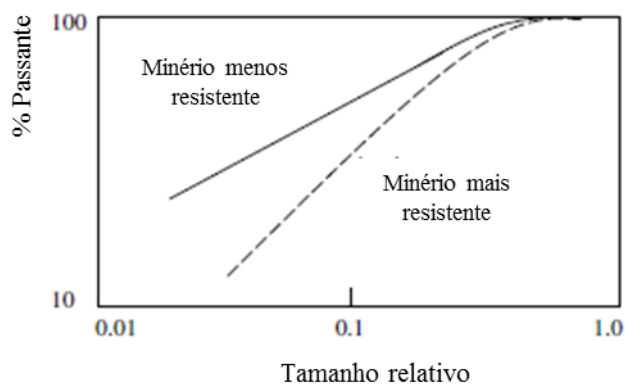


Figura 3.7 - Distribuição da função quebra para minérios de alta resistência ("duros") e baixa resistência ("macios") (adaptado de GUPTA & YAN, 2006).

STEHR *et al.* (1987) realizaram um estudo comparativo entre moinhos de bolas convencionais e moinhos verticais através do modelo de balanço populacional, Figura 3.8.

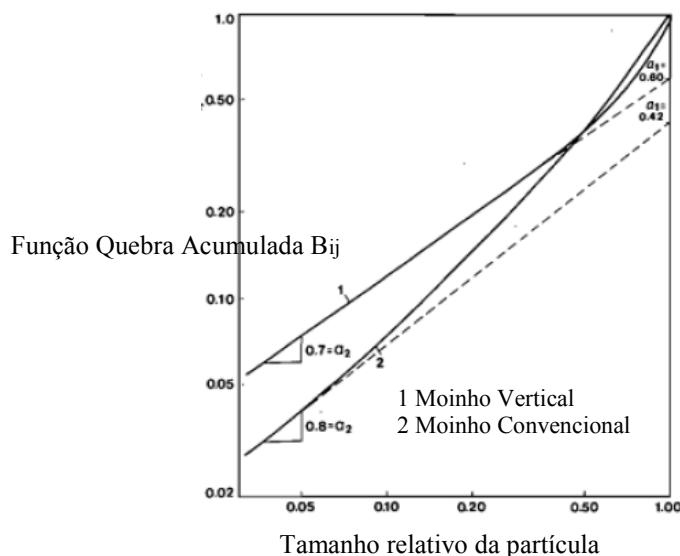


Figura 3.8 - Função Quebra acumulada para o moinho vertical e o moinho convencional (STEHR et al., 1987, adaptado pelo autor).

Estas curvas obtidas demonstram que o moinho vertical produz alta proporção de partículas finas e um pouco maior quantidade de partículas próximas ao tamanho inicial.

3.3.2. Índice de Trabalho Operacional

O índice de trabalho operacional *OWI* é descrito conforme a equação 7 (BOND, 1952). Este índice utiliza os dados industriais para avaliar o desempenho do circuito de cominuição: energia específica e granulometrias de alimentação e produto. O *OWI* é utilizado largamente nos estudos relacionados à moagem devido sua assertividade histórica e abordagem simplificada.

$$OWI = \frac{E}{10 \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \quad (2)$$

Onde,

OWI = Índice de trabalho operacional (kWh/t);

E = Consumo específico de energia (kWh/t);

*F*₈₀ = 80% passante na alimentação (μm);

$P_{80} = 80\%$ passante no produto (μm).

3.3.3. Energia Específica por Tamanho (SSE)

PALANIANDY et al. (2015) introduziram o conceito de Energia Específica por Tamanho (SSE, Size Specific Energy) para avaliar o grau de redução dos moinhos verticais em alternativa ao modelo do OWI. Segundo PALANIANDY et al. (2015) e BALLANTYNE (2019), o OWI não é adequado para avaliação de desempenho nos moinhos verticais, pois o mesmo se baliza apenas pelo tamanho 80% passante na alimentação e produto. Enquanto para o SSE, a avaliação de desempenho do circuito pode ser feita de forma independente para qualquer faixa de tamanhos.

Como alguns exemplos de aplicação deste método tem-se, PALANIANDY et al. (2015) que avaliaram o desempenho da moagem vertical pela geração de material abaixo de 75 micrômetros (moagem secundária e terciária) e 25 micrômetros para remoagem; ESTEVES et al. (2019) que utilizaram a geração em 38 micrômetros para avaliação de moagem vertical em laboratório e CASTRO et al. (2018) que utilizaram o tamanho em 44 micrômetros para avaliação de diferentes tipos de minério em escala de laboratório. Este último, por sua vez, é a referência para utilização neste trabalho, visto que foi utilizado o mesmo tamanho referência para o controle industrial da remoagem no Minas-Rio, conforme Equação a seguir.

$$SSE_{44} = \frac{SE}{(P_{44} - F_{44})/100} \quad (3)$$

Onde:

SSE_{44} - Size Specific Energy (kWh/t);

SE - Energia Específica (kWh/t);

F_{44} - fração passante em 44 μm da alimentação (%);

P_{44} - fração passante em 44 μm do produto (%).

3.3.4. Modelo de Potência em Moinhos de Laboratório

Rowland (1986) desenvolveu uma equação para cálculo de potência em moinhos de pequeno porte, até 0,76 m de diâmetro. Segue abaixo a equação:

$$kW_b = 6,3D^{0,3} \sin \left[51 - 22 \left(\frac{2,44 - D}{2,44} \right) \right] (3,2 - 3V_p) C_s \left[1 - \frac{0,1}{2^{(9-10C_s)}} \right] \quad (4)$$

Onde:

kW_b – Potência por tonelada de bolas no eixo pinhão (kW);

D – Diâmetro do moinho interno ao revestimento (m);

V_p – Fração do volume do moinho ocupado pelas bolas;

C_s – Fração da velocidade crítica.

A partir desta potência calculada e o tempo de moagem, é possível obter a energia consumida no processo de moagem e, assim, correlacionar com os dados obtidos pelas granulometrias e/ou superfícies específicas da alimentação e do produto.

3.4. Modelo de Potência em Moinhos Verticais

Devido ao recente desenvolvimento dos moinhos verticais de grande porte, ainda não existem na literatura modelos que representam de forma acurada estes processos. A seguir serão apresentados alguns modelos disponíveis atualmente e que serão objeto de estudo deste trabalho. Os modelos atuais, baseados em moinhos de pequeno porte, possuem falhas devido ao efeito escala, velocidade de rotação do eixo, zona morta e desgaste do revestimento da helicoidal.

RADZISZEWSKI & ALLEN (2014) sumarizaram alguns modelos de potência existentes de acordo com as variáveis utilizadas na construção dos mesmos, Tabela 3.I.

Tabela 3.I - Variáveis utilizadas nos modelos de potência para moinhos verticais (RADZISZEWSKI & ALLEN, 2014, adaptado pelo autor).

| Variáveis | Jenczewski (1972) | Herbst, Sepulveda (1978) | Weit, Schwedes (1987) | Tuzun (1993) | Duffy (1994) | Gao (1996) | Jankovic (1999) |
|--------------------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------|--------------|--------------|------------|-----------------|
| Velocidade de rotação | X | X | X | X | X | X | X |
| Diâmetro do moinho | X | X | X | X | | | X |
| Densidade de polpa | | | X | X | | X | X |
| Altura da carga | | X | | X | X | | X |
| Diâmetro da helicoidal | X | | | | X | | X |
| Densidade da carga | | | | X | X | | X |
| Densidade dos corpos moedores | | X | | | | X | X |
| Diâmetro do corpo moedor | | X | | | X | | X |
| Diâmetro do eixo | | | X | | | | X |
| Número de passos da helicoidal | | | | | X | | X |
| Atrito | | | | | | | X |
| Massa de corpos moedores | X | | | | | | X |
| Comprimento do impelidor | | | X | | | | |
| Espessura da rosca | | | | | | | X |

Nos subcapítulos a seguir serão descritos três modelos amplamente utilizados para moinhos verticais e que serão objetos de comparação para o estudo atual.

3.4.1. Modelo de DUFFY

DUFFY (1994) realizou estudos empíricos com dados de cinco operações com moinhos verticais, sendo uma em escala piloto e quatro em escala industrial de pequeno porte. Na proposição do modelo o autor assumiu que a densidade da carga e a velocidade do agitador está linearmente relacionada com a potência do moinho de torre. Deste modo, a equação obtida para a potência líquida (kW) está expressa conforme equação abaixo:

$$P_{liq} = 0,0743 L \omega \rho_c d^{0,111} D_e^{3,057} T_e^{0,572} \quad (5)$$

Sendo,

L = altura do leito de bolas (m);

ω = velocidade angular da espiral (rpm);

ρ_c = densidade efetiva da carga moedora (t/m^3);

d = tamanho médio das bolas (mm);

D_e = diâmetro da espiral (m);

T_e = número de passos da espiral.

A densidade efetiva da carga moedora (ρ_c) pode ser calculada conforme equação abaixo:

$$\rho_c = \rho_b(1 - \varepsilon) + \varepsilon\rho_p \quad (6)$$

Sendo:

ρ_c = densidade efetiva da carga moedora (t/m^3);

ε = fração de vazios entre as bolas (adimensional);

ρ_b = densidade das bolas (t/m^3);

ρ_p = densidade da polpa (t/m^3).

DUFFY (1994) também desenvolveu uma equação empírica para previsão da potência em vazio (P_{vaz}) do moinho vertical (sem carga moedora, minério e água), conforme equação abaixo:

$$P_{vaz} = 0,000134\omega W D_e^{0,57} \quad (7)$$

Sendo:

P_{vaz} = potência em vazio (kW);

ω = velocidade angular da espiral (rpm);

D_e = diâmetro da espiral (m);

W = peso da espiral (kg).

3.4.2. Modelo de JANKOVIC & MORELL

JANKOVIC & MORELL (1997) desenvolveram uma equação empírica para previsão de potência líquida de moagem P_{liq} através de medidas de potência de cinquenta e oito

operações distintas em escala de laboratório, piloto e industrial, conforme equação a seguir:

$$P_{líq} = \frac{2,05\rho_c D_e^{1,96} \theta^{0,65} L^{0,98} d^{0,17}}{1000} \quad (8)$$

Sendo:

$P_{líq}$ = potência líquida de moagem (kW);

ρ_c = densidade efetiva da carga moedora (kg/m³);

D_e = diâmetro da espiral (m);

θ = velocidade periférica da espiral (m/s);

L = altura do leito de bolas (m);

d = diâmetro médio das bolas (mm).

Neste estudo de JANKOVIC & MORELL foi utilizada a seguinte equação para calcular a densidade efetiva da carga moedora:

$$\rho_c = (1 - \varepsilon)(\rho_b - \rho_p) \quad (9)$$

3.4.3. Modelo de NITTA

NITTA et al. (2006) desenvolveram uma outra equação para estimar a potência absorvida da rede P_{ele} consumida por um moinho vertical. Para este modelo foram utilizados dados de moinhos verticais de pequena capacidade.

$$P_{ele} = 312L_{ef}^{0,8847} D_e^{2,232} 60\omega^{1,232} d_{gap} \quad (10)$$

sendo:

P_{ele} = potência elétrica ou absorvida da rede (kW);

L_{ef} = altura efetiva do leito de bolas (m);

D_e = diâmetro da espiral (m);

ω = velocidade angular da espiral (rpm);

d_{gap} = distância entre a espiral e a parede do moinho vertical (m).

3.5. Fatores que influenciam o Processo em Moinhos Verticais

Na recente literatura sobre a remoagem em moinhos verticais há vários estudos para avaliar a influência dos parâmetros de moagem e quantificar o impacto na eficiência do uso de energia de moagem.

O desempenho da moagem depende de sua capacidade de colocar partículas em contato umas com as outras e com o corpo moedor para causar a quebra de partículas com o menor uso de energia (LICHTER & DAVEY, 2006). Assim, a concentração de sólidos e o tempo de residência das partículas na zona de moagem são parâmetros significativos do processo. JANKOVIC (2003) mencionou que a eficiência de moagem depende principalmente do corpo moedor (tamanho, densidade, forma), da velocidade do moinho e das propriedades do minério (granulometria da alimentação, densidade dos sólidos e resistência à moagem).

Segundo DUFFY (1994) a principal variável que impacta a eficiência da moagem de moinhos verticais é o tamanho de bola, em seguida, o percentual de sólidos na polpa e o grau de enchimento do moinho.

ROCHA *et al.* (2018) realizaram estudos em escala laboratorial e concluiu que a granulometria do produto da moagem é influenciada pela velocidade de rotação do agitador e do tamanho dos corpos moedores. Concluíram também que as condições operacionais possuem influência apenas na função seleção. Enquanto a função quebra está associada apenas às características do minério.

3.5.1. Corpos Moedores

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).

Segundo JANKOVIC & MORELL (1997) nos moinhos verticais podem ser usados diferentes tipos de corpos moedores. No entanto, o fator que mais afeta a potência dos moinhos é a massa dos corpos moedores.

Nos estudos de WANG & FORSBERG (2003) foi comprovado que a forma e o tamanho do corpo moedor afetam a ação de moagem entre o corpo moedor e a partícula. As bolas menores geram uma melhor utilização da energia devido à criação de alta intensidade de energia no contato partícula-bola em comparação com tamanhos de bolas maiores.

LICHTER & DAVEY (2006) testaram diferentes tamanhos de corpos moedores em um Vertimill™ e concluíram que corpos moedores de 5 mm possuem maior eficiência na produção de partículas finas em comparação com corpos moedores de 18 e 10 mm. MAZZINGHY *et al.* (2014) concluíram que a eficiência de moagem é função da área superficial da carga moedora e, portanto, quanto menor o diâmetro do corpo moedor maior será a eficiência energética. Segue Tabela 3.I com a relação entre diâmetro do corpo moedor, área superficial da carga e número de esferas por tonelada.

Tabela 3.II - Relação entre tamanho de corpo moedor e número de bolas por unidade de massa (LICHTER & DAVEY, 2006).

| Diâmetro do Corpo Moedor mm | Área Superficial m²/t | Número de Bolas, por t | Número de Bolas, normalizado |
|--|---|-----------------------------------|---|
| 20 | 83,3 | 66.315 | 1 |
| 15 | 111,1 | 157.190 | 2,4 |
| 10 | 166,7 | 530.516 | 8 |
| 5 | 333,3 | 4.144.132 | 62 |
| 3 | 555,6 | 19.684.758 | 296 |
| 2 | 833,3 | 66.314.560 | 1000 |

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 3.9.

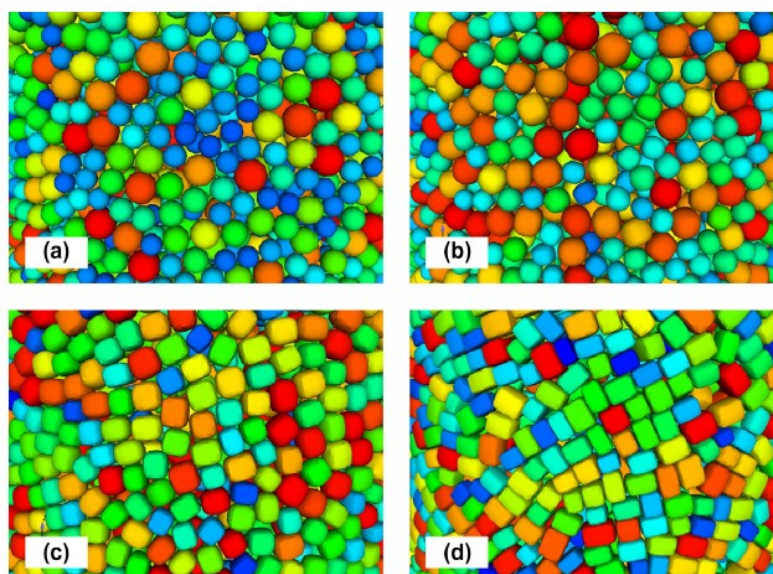


Figura 3.9 - Formato dos corpos moedores simulados usando DEM (SINOTT *et al.*, 2011).

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 revestimento da rosca 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 próximo das paredes do moinho, formando uma camada quase sólida de material inerte na parte inferior do moinho.

Segundo SINOTT *et al.* (2011), o efeito do formato do corpo moedor também afeta a potência do sistema, Figura 3.10. De acordo com os resultados das simulações em DEM, a potência decresce com a redução da esfericidade do corpo moedor.

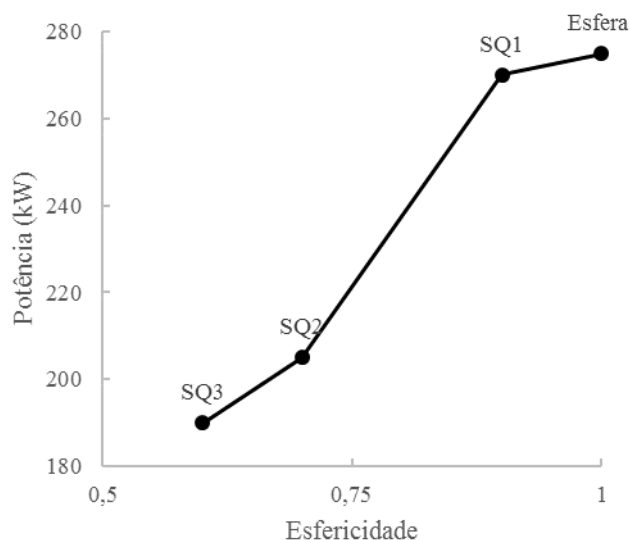


Figura 3.10 - Curva de potência como função da esfericidade do corpo moedor (SINOTT *et al.*, 2011, adaptado pelo autor).

3.5.2. Grau de enchimento dos Moinhos

O grau de enchimento é uma variável operacional muito importante para os moinhos verticais. O aumento da carga de corpos moedores tem influência no aumento da potência do moinho e no aumento da zona ativa de moagem resultando em maior probabilidade de quebra das partículas (HASAN, 2016).

MAZZINGHY *et al.* (2015) fizeram um estudo para avaliar o consumo de potência de um Vertimill™ sem carga de corpos moedores. Neste trabalho, realizado em um moinho VTM 1500, foi obtido que 130 kW dos 1119 kW disponíveis foram gastos apenas para rotação do eixo e da espiral, o que resulta em 11,6% da potência instalada no equipamento. No entanto, os autores ressaltam que parte da carga do moinho permaneceu na zona morta do equipamento e não escoou completamente. Deste modo, este trabalho sugere que utilizar 10% da potência instalada como consumo de potência em vazio é uma estimativa conservadora a ser utilizada nos cálculos de potência requerida.

3.5.3. Velocidade de rotação do agitador

O aumento de velocidade do agitador aumenta a intensidade das forças dentro do moinho e, portanto, é uma variável essencial na operação do moinho vertical. Ela influencia na interação entre o corpo moedor e as partículas do minério aumentando a frequência de contato bola-partícula, mas também aumentando a intensidade da colisão. Deste modo, aumentar a velocidade de agitação reduz a granulometria do produto e a maior eficiência energética ocorrerá quando a intensidade destas interações for suficiente para superar as interações intra-partículas e/ou propagar quebra nas partículas (HASAN, 2016; ROCHA, 2018).

3.5.4. Concentração de sólidos

ZHENG *et al.* (1996) afirmaram que a concentração de sólidos é uma variável importante na operação de moinho agitado, pois tem um impacto direto sobre a finura do produto e o consumo de energia. LICHTER & DAVEY (2006) mencionaram que o Vertimill™ pode operar em uma faixa razoavelmente ampla de porcentagem de sólidos, 50% a 80% de sólidos. A concentração ideal de sólidos depende da densidade específica do material e do tipo de corpos moedores.

A concentração ótima de sólidos na polpa aumenta o rendimento do moinho e minimiza o consumo específico de energia. Abaixo do nível ideal, a água lava as partículas da superfície do corpo moedor, reduzindo a probabilidade de as partículas receberem contato com os corpos moedores. Portanto, a energia é dissipada em energia térmica devido às colisões entre os corpos moedores. Enquanto que concentrações de sólidos maiores, aumentam acentuadamente a viscosidade da polpa e reduz a energia de impacto entre corpos moedores. A concentração de sólidos no moinho agitado depende da velocidade do agitador, do tipo de minério e da granulometria da moagem (LICHTER & DAVEY, 2006; HASAN, 2016).

3.5.5. Tempo de Moagem

Tempo de moagem, também referido como tempo de residência, indica quanto tempo a partícula permanece na zona de moagem. O tempo de moagem é um parâmetro crítico na operação do moinho vertical e ela define o quão fino será seu produto e também, a sua eficiência energética. A granulometria do produto se reduz com o aumento do tempo de moagem e caso, a partícula permaneça tempo maior que o necessário, pode ocorrer a sobre moagem. Um tempo ótimo garante que as partículas permaneçam na zona de moagem o máximo de tempo necessário sem que ocorra redução na eficiência energética. O tempo de moagem em moinhos verticais depende da configuração do circuito e das necessidades do processo. Em geral, para alcançar elevado grau de redução, as partículas necessitam permanecer o máximo de tempo na zona de moagem e o exato valor dependerá de sua característica mineralógica (HASAN, 2016).

3.5.6. Revestimento da espiral

O revestimento nos moinhos verticais tem como função proteger a espiral e elevar os corpos moedores movimentando a carga. Durante a rotação do eixo os corpos moedores ficam, em sua maioria, alocados acima da espiral (JANKOVIC & MORELL, 1997).

Deste modo, o movimento da carga em um moinho vertical é um resultado direto das ações de elevação e rotação geradas pelo eixo helicoidal. Sendo assim, a carga em movimento possui o mesmo ângulo do revestimento. Quando o corpo moedor se aproxima do topo da carga, ele se dispersa e se direciona à parede externa do moinho. A partir deste ponto, a carga inicia seu movimento descendente permanecendo em movimento angular, em processo de desaceleração, até o pé da carga conforme apresentação esquemática na Figura 3.11 (JANKOVIC & MORELL, 1997).

MAZZINGHY *et al.* (2018) estudaram o comportamento da potência do moinho ao longo da vida útil do revestimento através de simulações de DEM (Método de Elementos Discretos). O estudo apresentou a existência de uma perda de potência do moinho na ordem de 63% com o desgaste da espiral. Segundo os autores, esta perda de potência está

atrelada à redução da massa total do revestimento e também à redução da movimentação da carga devido redução na área superficial da helicoidal.

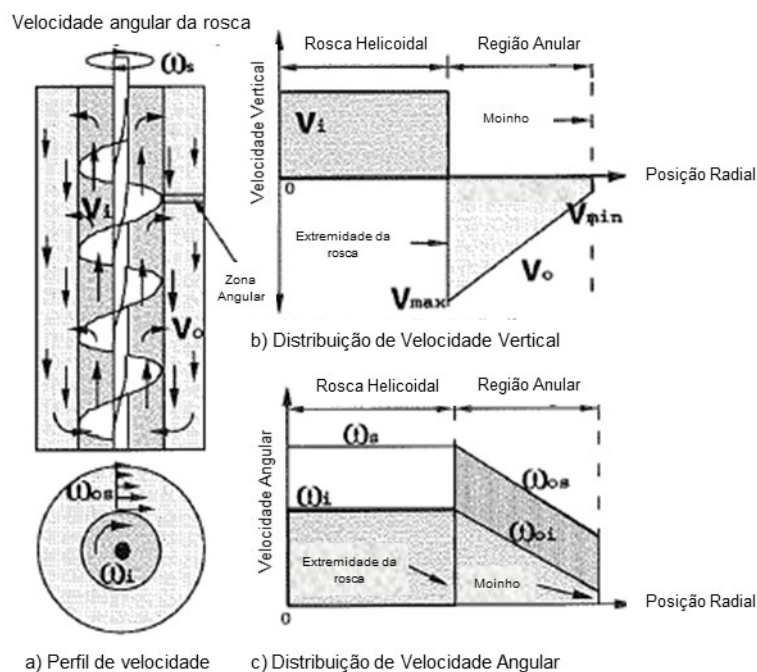


Figura 3.11 - Movimento da carga em moinho com agitador helicoidal. a) Perfil da velocidade; b) Distribuição de Velocidade Vertical de velocidade angular e c) Distribuição de Velocidade Angular (JANKOVIC & MORELL, 1997, adaptado pelo autor).

Devido ao perfil de movimentação de carga demonstrado na Figura 3.11, o desgaste do revestimento ocorre da extremidade da helicoidal para o seu interior. Sendo que, o revestimento inferior possui um desgaste maior que os superiores. Na Figura 3.12 está apresentada a evolução do desgaste do revestimento ao longo de sua vida útil e na Figura 3.13, a foto de um moinho com o revestimento em fim de vida útil com a nomenclatura utilizada no Minas-Rio para diferenciação das peças de revestimento: Base, 1º Intermediário, 2º Intermediário e Superior. Sendo que, os três últimos possuem a mesma geometria e a diferenciação se baseia apenas na posição de instalação do mesmo.

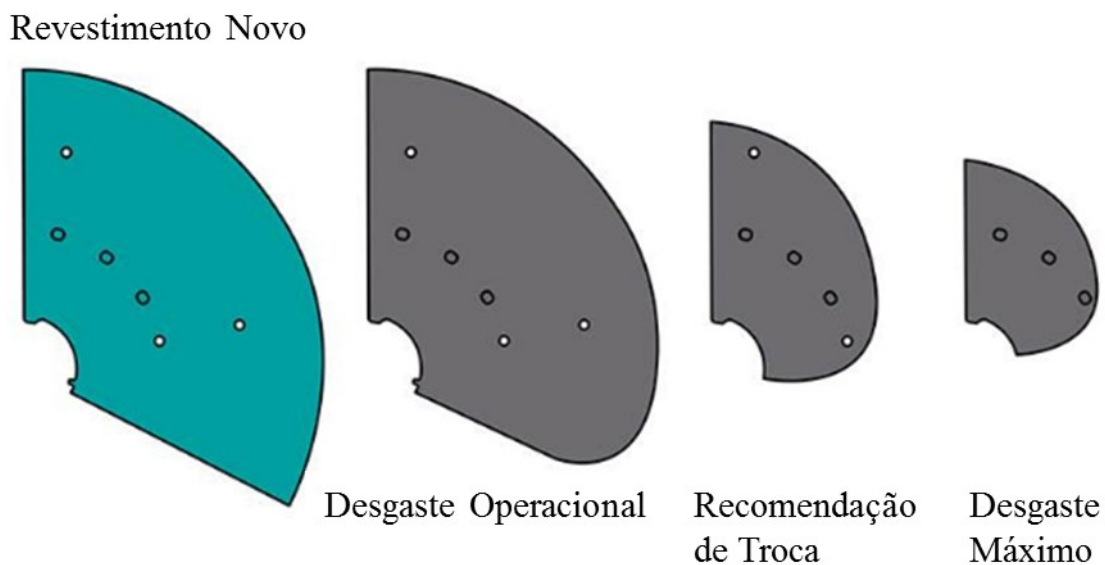


Figura 3.12 - Evolução do desgaste do revestimento (Metso, 2018, adaptado pelo autor).

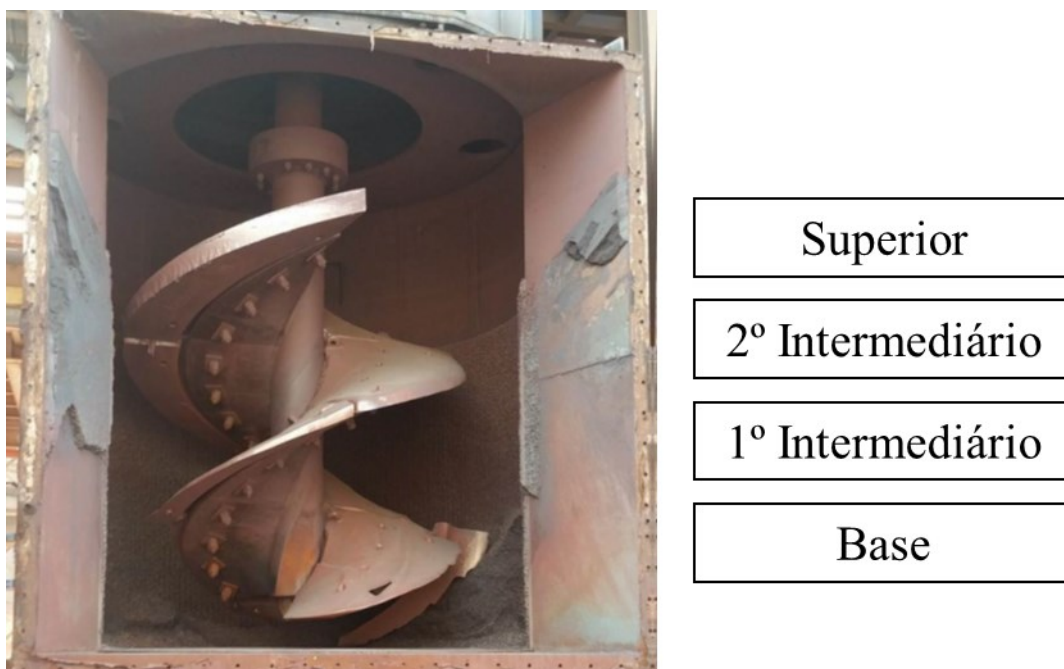


Figura 3.13 - Moinho com revestimento em fim de vida útil e nomenclatura utilizada para diferenciação dos revestimentos (acervo do autor).

No entanto, caso ocorra um atraso na manutenção do equipamento poderá ocorrer um excessivo nível de desgaste do revestimento, podendo causar a quebra do revestimento ou o desgaste da própria espiral. Como pode ser observado na Figura 3.14, o desgaste excessivo do revestimento causou uma ruptura no mesmo expondo a espiral ao desgaste.



Figura 3.14 - Desgaste excessivo do revestimento inferior (acervo do autor).

Portanto, faz-se necessário o acompanhamento do desgaste do revestimento para que possa ser planejada a troca do revestimento no tempo correto. Este ponto de troca deve ser definido com base no desempenho de processo, na integridade do equipamento e no custo operacional.

Conforme orientação do fabricante devem ser realizadas medições do desgaste da espiral ao longo da vida útil para que seja determinada a sua curva de desgaste e assim, realizar a troca do revestimento no melhor momento. Na Figura 3.15 está apresentado um esquema de medição das dimensões da placa para construção da curva de desgaste. Como pode ser observado, o perfil de desgaste do revestimento é acentuado na região de levantamento dos corpos moedores e reduz gradativamente de modo não linear até a outra extremidade da peça.

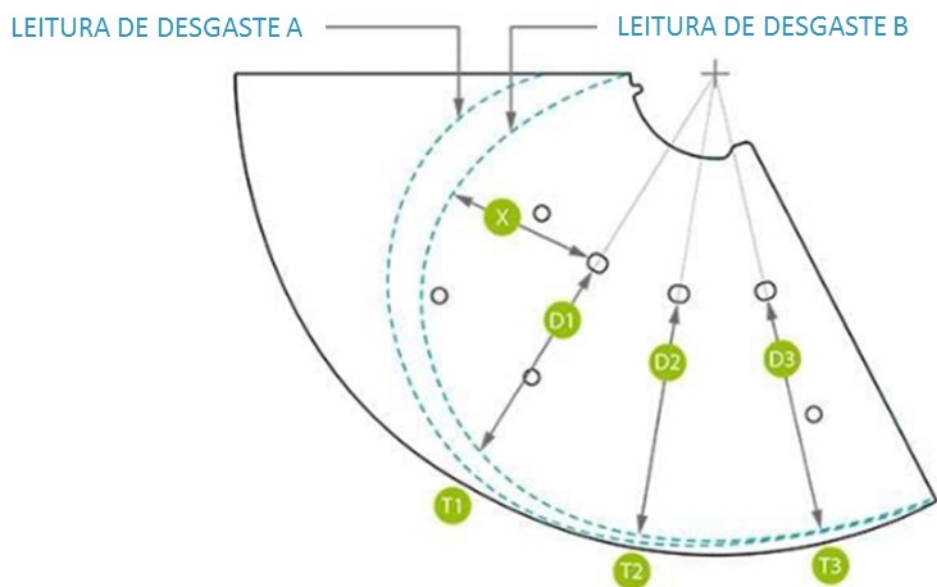


Figura 3.15 - Metodologia de medição do dimensional do revestimento (METSO, 2018, adaptado pelo autor).

Com o avanço de tecnologias de imagem e devido ao desgaste não linear do revestimento fez-se necessário o desenvolvimento da técnica de escaneamento a laser para descrever o perfil de desgaste do revestimento (Figura 3.16).

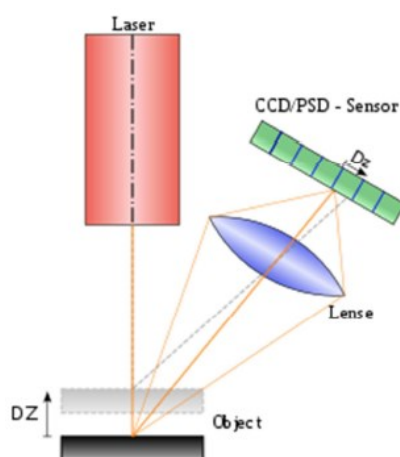


Figura 3.16 – Desenho esquemático da triangulação 3D de laser (De Mattos, 2013).

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).

Na Figura 3.17 está apresentado um exemplo de aplicação do escaneamento 3D em um moinho vertical. O escaneamento possibilita a avaliação além da largura, da espessura da placa e de possíveis “caminhos preferenciais” dos corpos moedores, fazendo assim, uma avaliação completa do perfil de desgaste do revestimento.

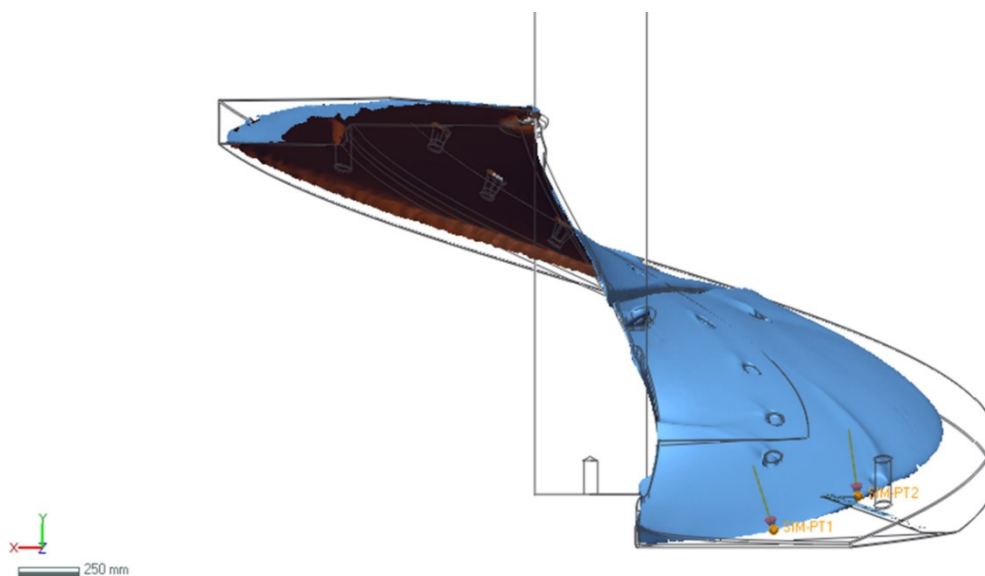


Figura 3.17 - Exemplo de escaneamento 3D aplicado ao revestimento do Vertimill™ (acervo do autor).

No entanto, os métodos aplicados para medição do desgaste do revestimento possuem uma desvantagem operacional. Para a realização deste trabalho é necessário que o moinho esteja parado e que toda a carga de corpos moedores seja drenada. Portanto, a definição da curva de desgaste do revestimento é necessária, mas deve-se também avaliar e correlacionar outros parâmetros para que operacionalmente ocorra uma predição do desgaste dos revestimentos.

Diante deste contexto, ESTEVES *et al.* (2018) e LINO *et al.* (2018) desenvolveram estudos para predizer o desgaste dos revestimentos de moinhos verticais. ESTEVES *et al.* (2018) utilizaram a vibração do sistema de acionamento do moinho para avaliar qual a frequência de vibração que correlacionava com o desgaste. Por outro lado, LINO *et al.* (2018) desenvolveram uma técnica de termografia para avaliar as zonas de calor na carcaça do moinho e correlacionar o desgaste do revestimento ao tamanho da “zona morta” criada na base inferior do equipamento.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Na primeira fase do trabalho foram avaliadas, em escala de laboratório, as influências dos diferentes tamanhos e formas de corpos moedores no desempenho do processo de cominuição.

Na segunda fase do trabalho, em escala industrial, foram avaliadas as influências dos corpos moedores, concentração de sólidos na polpa e o desgaste da espiral no consumo energético e produtividade do circuito de remoagem. A realização deste estudo contemplou a condição do número de moinhos presentes no Minas-Rio. Desta forma, foram realizados testes em diversas condições operacionais sem que ocorresse uma penalização na produção de concentrado.

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 recebeu 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 da superfície do revestimento e quantificar o seu desgaste. Neste trabalho foi utilizado um digitalizador manual devido aplicação em espaço reduzido.

Nos subcapítulos a seguir serão elencados os procedimentos técnicos que foram utilizados na confecção do trabalho.

4.1. Amostragens Industriais e Coleta de Dados

Durante a realização dos testes industriais foram coletadas amostras de polpa para a realização de caracterização tecnológica e fechamento de balanço de massa. As amostras foram coletadas nos respectivos pontos, conforme Figura 4.1: Alimentação Nova, Alimentação da Classificação, *Overflow* da Classificação, *Underflow* da Classificação e Produto dos Moinhos.

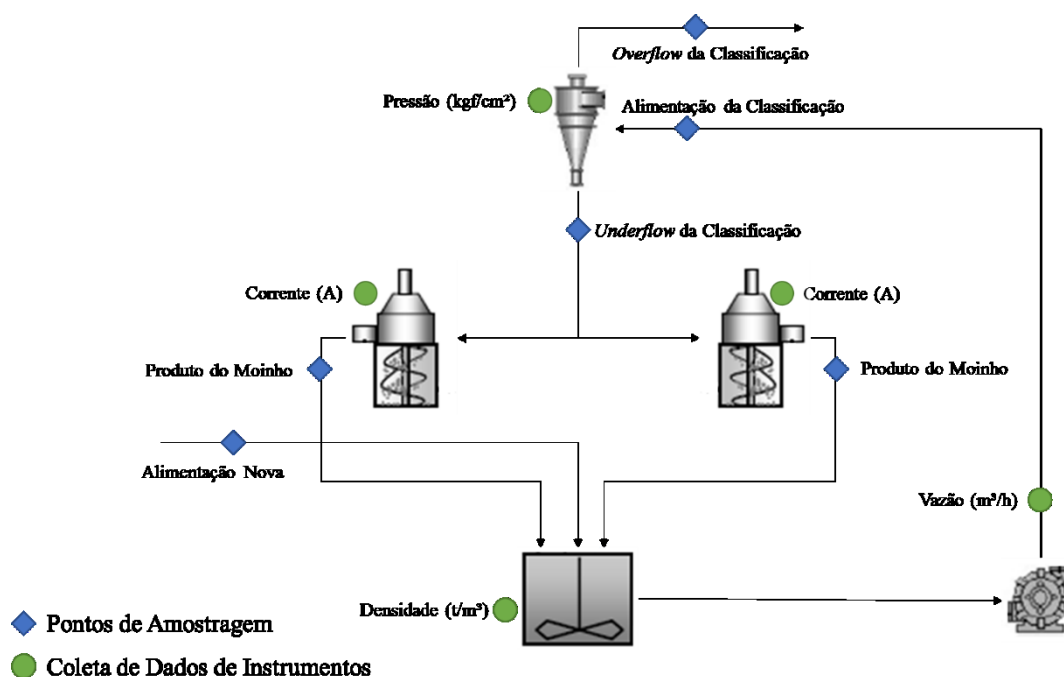


Figura 4.1 - Fluxograma esquemático para amostragem e coleta de dados dos instrumentos (acervo do autor).

Para obtenção dos parâmetros dos equipamentos e fluxos medidos foram coletadas informações provenientes do sistema de automação da Anglo, *PIMS*[®]. Os dados coletados foram: vazões de polpa nas tubulações de alimentação da classificação, pressão da classificação, densidade do tanque de alimentação e corrente elétrica dos moinhos, conforme Figura 4.1. Além dos dados dos medidores *online*, foram realizadas medições de potência dos moinhos conforme explicado no capítulo 4.6.



Figura 4.2 - Amostragem da alimentação da bateria de hidrociclone.

Com a amostragem destes pontos, Figura 4.2, e com a vazão de alimentação dos hidrociclones foi possível determinar a partição de massa para *underflow*, fluxo de alimentação dos moinhos e, assim, calcular a energia específica de cada moinho. Além disso, com a medição do F_{80} (alimentação nova) e P_{80} (*overflow* do hidrociclone), foi possível calcular o OWI e correlacioná-lo com o tamanho de bolas.

4.2. Testes de moagem em bancada

Os testes de moagem em bancada foram realizados com amostras de alimentação nova do circuito e um moinho de bolas tubular convencional, conforme Tabela 4.I. O procedimento foi realizado nos mesmos moldes dos testes usados pelo fornecedor do equipamento (Metso) para estimar 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) em uma determinada faixa de tamanho.

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

Tabela 4.I - 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:

- a. Corpos moedores novos (12 mm);
- b. Amostra tal qual: Corpos moedores coletados no moinho;
- c. Material classificado $> 6,5$ mm a partir da amostra b;
- d. Material classificado $< 6,5$ mm a partir da amostra b.

4.3. Análise Granulométrica

A análise granulométrica foi realizada pelo método de peneiramento. O processo de peneiramento foi realizado em um equipamento suspenso e à úmido. O peneiramento foi realizado com injeção de água e finalizado quando o passante na última foi totalmente classificado, isto é, quando a água passante na última peneira estivesse clarificada. As peneiras utilizadas foram 425 μm , 300 μm , 212 μm , 150 μm , 106 μm , 74 μm , 53 μm , 44 μm e 38 μm .

4.4. Concentração de sólidos

A concentração de sólidos foi obtida através da medição da massa da polpa e medição da massa dos sólidos após a sua secagem. A razão entre o peso seco e o peso total é definida como a concentração de sólidos.

4.5. Medição da altura da carga dos moinhos

Para a realização da medição da altura do leito de bolas é necessário primeiramente que seja interrompida a alimentação do moinho iniciando-se o procedimento de parada e limpeza do equipamento (*grind out*). O procedimento consiste na interrupção da alimentação de polpa e injeção de água de lavagem para a completa diluição de polpa. O acompanhamento é realizado pela descarga do moinho até que tenha apenas água em seu interior. Após este processo pode-se fechar a válvula de água e desligar o motor de acionamento do moinho.

Com o equipamento parado é realizada a introdução de uma corda com uma esfera de material não metálico na tubulação de alimentação de corpos moedores até que este atinja a carga de bolas do moinho, conforme Figura 4.3. Após este procedimento é retirada a corda e medida a distância entre o ponto de lançamento e o leito de corpo moedor. Com o dimensional do equipamento é possível obter a altura da carga do moinho (Figura 4.4).



Figura 4.3 - a) Foto do procedimento de medição do grau de enchimento. b) Foto do artefato utilizado para realizar a medição (ESTEVES *et al.*, 2018).

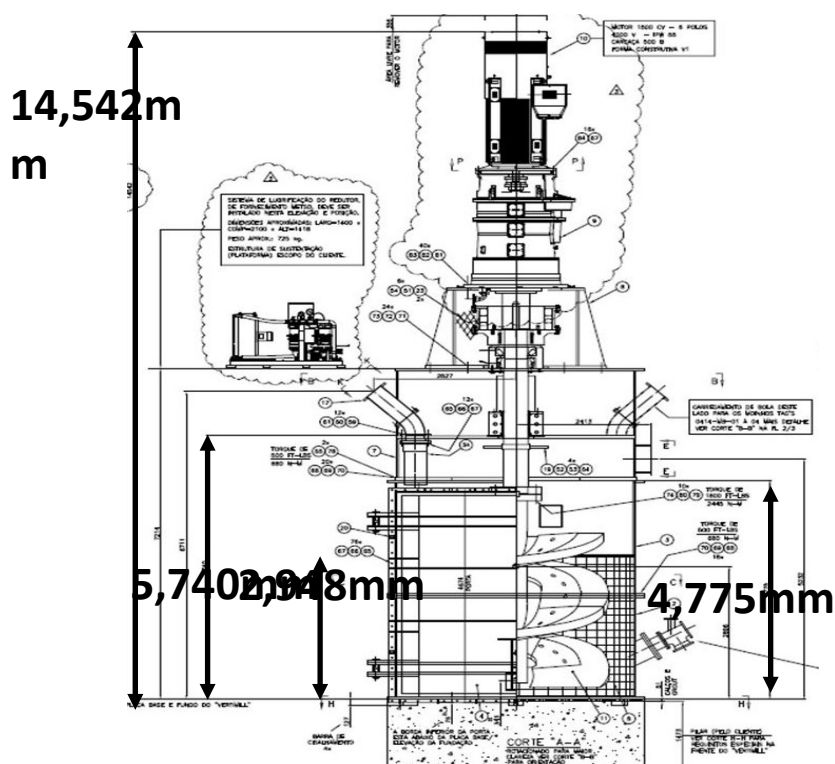


Figura 4.4 – Desenho esquemático do moinho com suas dimensões (adaptado pelo autor).

4.6. Medição de Potência

A medição de potência demanda atuação da equipe de manutenção elétrica para instalar o analisador de energia na sala elétrica. O analisador de energia utilizado foi o MARH-21, o qual foi programado para medir tensões, correntes, potências reais, reativas e aparentes; e fator de potência em todos os testes. Na instalação do equipamento, foi necessária a parada do equipamento para garantir a segurança do eletricitista na sala elétrica. Os dados da medição foram exportados para planilhas a fim de serem realizadas as análises dos equipamentos.

4.7. Escaneamento 3D do revestimento

O escaneamento 3D do moinho é realizado após a drenagem completa da carga e limpeza interna do moinho. Com a superfície do revestimento limpa, são inseridos pequenos pontos de ímãs sobre a superfície. A utilização destes ímãs tem como objetivo gerar os

pontos de referência para a triangulação a laser (Figura 4.5). Na sequência é realizada a leitura da distância dos ímãs por meio da triangulação a laser e os dados são digitalizados em software específico. Para este trabalho foi realizado o procedimento de escaneamento nas peças do revestimento da Base e 1º Intermediário.

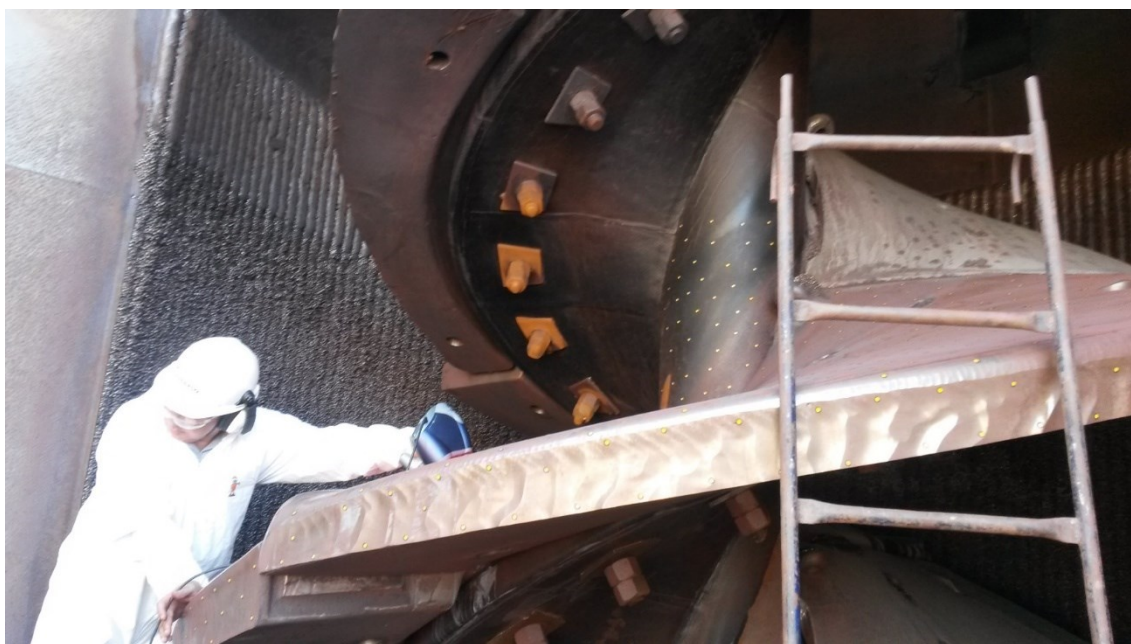


Figura 4.5 - Procedimento de Escaneamento 3D do revestimento do moinho (acervo do autor).

4.8. Construção do modelo

A construção do modelo foi realizada utilizando regressão multivariada com base nos dados coletados industrialmente. Na análise dos dados e modelagem foi utilizado o software estatístico Minitab®.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo está apresentado em subcapítulos em função dos estudos dos seguintes parâmetros relacionados ao moinho vertical: corpos moedores, revestimento, altura da carga moedora, concentração de sólidos na polpa, potência em vazio e modelo de potência.

5.1. O efeito dos corpos moedores

Nos testes em moinho de bancada o objetivo foi determinar o consumo energético para atingimento da granulometria desejada, 84% passante em 0,044 mm. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.I. O consumo específico de energia para os corpos moedores novos foi de 4,91 kWh/t, enquanto os corpos moedores reutilizados apresentaram um consumo de 6,10 kWh/t, ou seja, 24,3% maior que para corpos moedores novos.

Tabela 5.I. Energia específica (kWh/t) para diferentes colares de corpos moedores em escala de bancada.

| Resultados | Bolas Novas 12 mm | Bolas Reutilizadas | Bolas Classificadas ($\geq 6,5$ mm) | Bolas Classificadas ($< 6,5$ mm) |
|---------------------------------------|----------------------|-----------------------|--|---|
| EE (kWh/t) | 4,91 | 6,10 | 5,22 | 13,31 |
| Δ EE | - | 24,3% | 6,3% | 171,1% |
| SSE ₄₄ (kWh/t -0,044mm) | 15,25 | 18,96 | 16,21 | 41,35 |

Após realizada a classificação dos corpos moedores, o consumo energético do ensaio formado por material acima de 6,5 mm foi de 5,22 kWh/t, o que representa um valor 6,3% maior que os obtidos com corpos moedores novos, mas 14,5% menor que o ensaio com a antes do peneiramento. Enquanto isto, o ensaio com os corpos moedores abaixo de 6,5 mm obteve um consumo energético de 13,31 kWh/t, ou seja, 171,1% maior que a carga de corpos moedores novos em escala de laboratório. Estes resultados se contrapõem aos estudos que indicam que quanto maior a superfície específica da carga maior é a eficiência de moagem na geração de finos. No entanto, os corpos moedores classificados abaixo de

6,5 mm apresentam geometria não esférica (Figura 5.1) e, portanto, conforme estudos de SINOTT *et al.* (2011), ocorre uma degradação da eficiência do processo.

Em escala industrial os resultados apresentaram uma diferença de 73,4% no SSE₄₄ comparando o moinho com bolas novas e o moinho com bolas reutilizadas (7,7 e 13,4 kWh/t 0,044mm, respectivamente). Em termos de WI Operacional (OWI) a diferença obtida foi de 134,44% entre os dois moinhos (10,1 kWh/t para o moinho com bolas novas e 23,6 kWh/t para o moinho com bolas reutilizadas). É importante ressaltar que no circuito do Minas-Rio os produtos dos oito moinhos se juntam na carga circulante para alimentação dos hidrociclone. Deste modo, a abordagem utilizada neste estudo teve como base a alimentação e produto do moinho, ou seja, desconsiderando o efeito da classificação e mistura da polpa no tanque de alimentação.

Tabela 5.II. OWI e SSE₄₄ obtidos em amostragem industrial comparando a utilização de corpos moedores novos e reutilizados.

| VTM | Bolas Novas | Bolas Reutilizadas | Δ (Reutilizadas - Novas) |
|---|--------------------|---------------------------|---------------------------------|
| Alimentação Nova (t/h) | 119,8 | 108,8 | -9,2% |
| Alimentação Moinho (t/h) | 391,1 | 374,0 | -4,4% |
| Potência (kW) | 972,4 | 996,4 | 2,5% |
| SE (kWh/t) | 2,5 | 2,7 | 7,1% |
| F80 (μm) Alim. Moinho | 73,4 | 82,0 | 11,7% |
| P80 (μm) Prod. Moinho | 50,0 | 67,5 | 34,9% |
| OWI (kWh/t) | 10,07 | 23,61 | 134,4% |
| % -0,044 mm Alim. Moinho | 41,53 | 33,32 | -19,8% |
| % -0,044 mm Prod. Moinho | 73,67 | 53,19 | -27,8% |
| SSE₄₄ moinho (kWh/t 0,044 mm) | 7,73 | 13,41 | 73,4% |

Após 4000 horas de operação, momento de troca do revestimento, foram coletadas amostras dos corpos moedores dos dois moinhos. Na Figura 5.1 é possível observar que no moinho com bolas reutilizadas parte da carga era formada por material não esférico. Novamente, estes resultados corroboram o estudo de SINOTT *et al.* (2011) que, através de simulação DEM, afirmaram que os corpos moedores não esféricos resultam em um impacto negativo no desempenho de moinhos verticais devido à uma redução da fluidez na zona de moagem.



Figura 5.1 -Fotos dos corpos moedores com reposição de (a) bolas novas e (b) bolas reutilizadas

5.2. O desgaste do revestimento

Com base nos moinhos de controle, bolas novas e reutilizadas, foram realizados escaneamentos do revestimento a cada 1000 horas aproximadamente. Na Figura 5.2 está apresentado o resultado do escaneamento do moinho operando com carga composta apenas por bolas novas e o volume obtido para as peças.

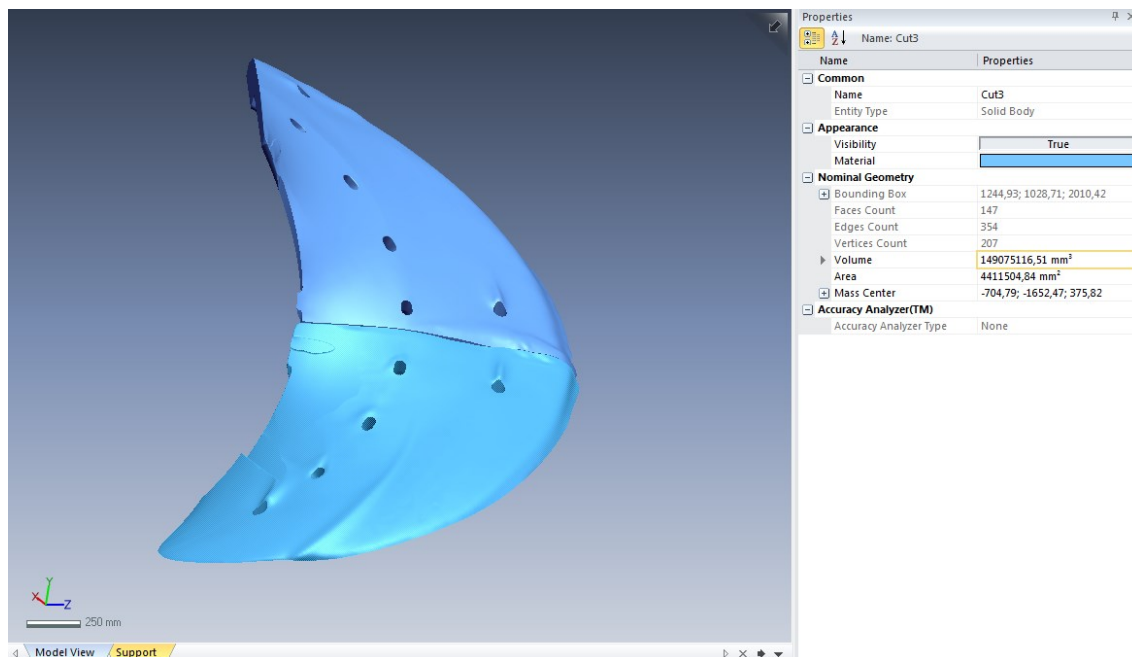


Figura 5.2 - Modelo 3D gerado a partir do escaneamento do revestimento.

A partir das superfícies geradas no escaneamento foram criados diagramas de calor que mostram a evolução do desgaste do revestimento, conforme apresentado nas Figuras 5.3 e 5.4. Os números apresentados em cada escaneamento refletem a distância entre a superfície da medição e a superfície original da peça. É possível observar nestas imagens a diferença de desgaste entre os dois moinhos após 1000 horas de operação.

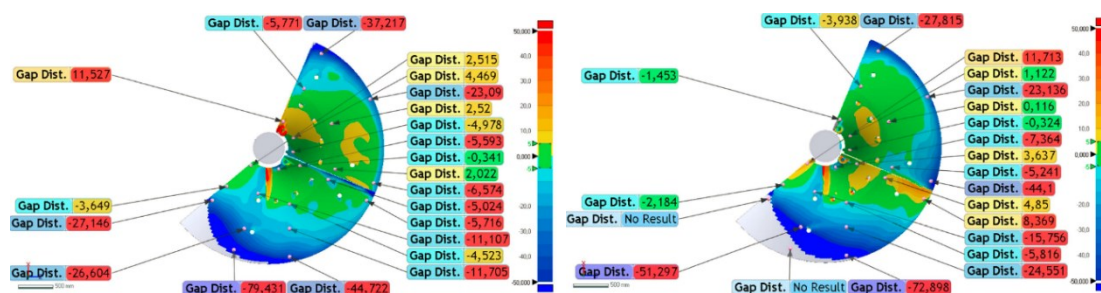


Figura 5.3 -Superfície escaneada do revestimento da base da helicoidal. a) Moinho com bolas novas, b) Moinho com bolas reutilizadas.

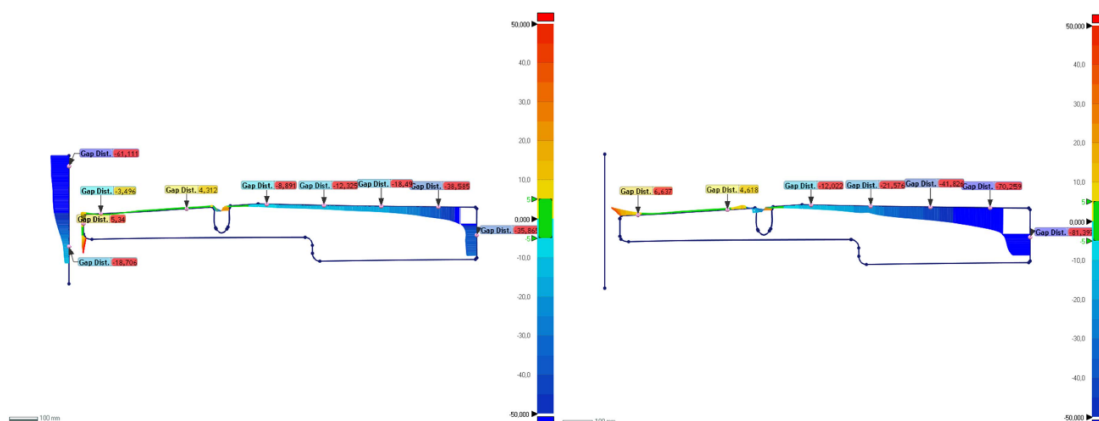


Figura 5.4 - Visão do perfil de desgaste dos dois revestimentos. a) Moinho com bolas novas, b) Moinho com bolas reutilizadas.

A partir dos dados volumétricos do escaneamento 3D foram construídos os gráficos da Figura 5.5 e 5.6. Nestes gráficos estão apresentados a massa de cada peça (5.5 – Base da Helicoidal, 5.6 – 1º Intermediário) e as horas em operação no momento do escaneamento.

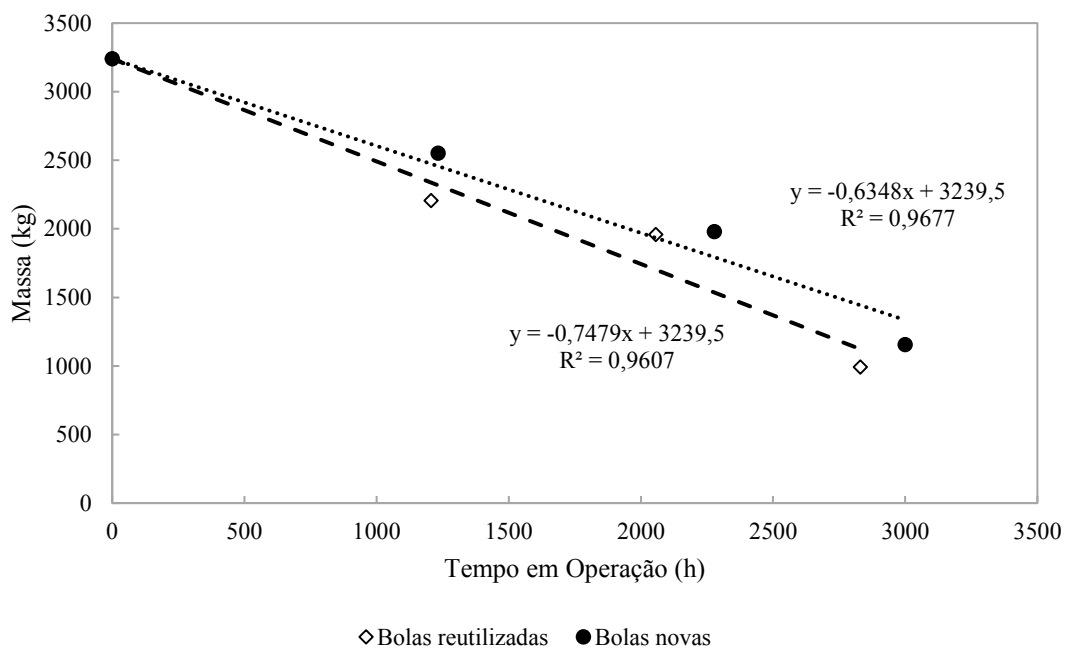


Figura 5.5 - Curva de desgaste do revestimento da Base.

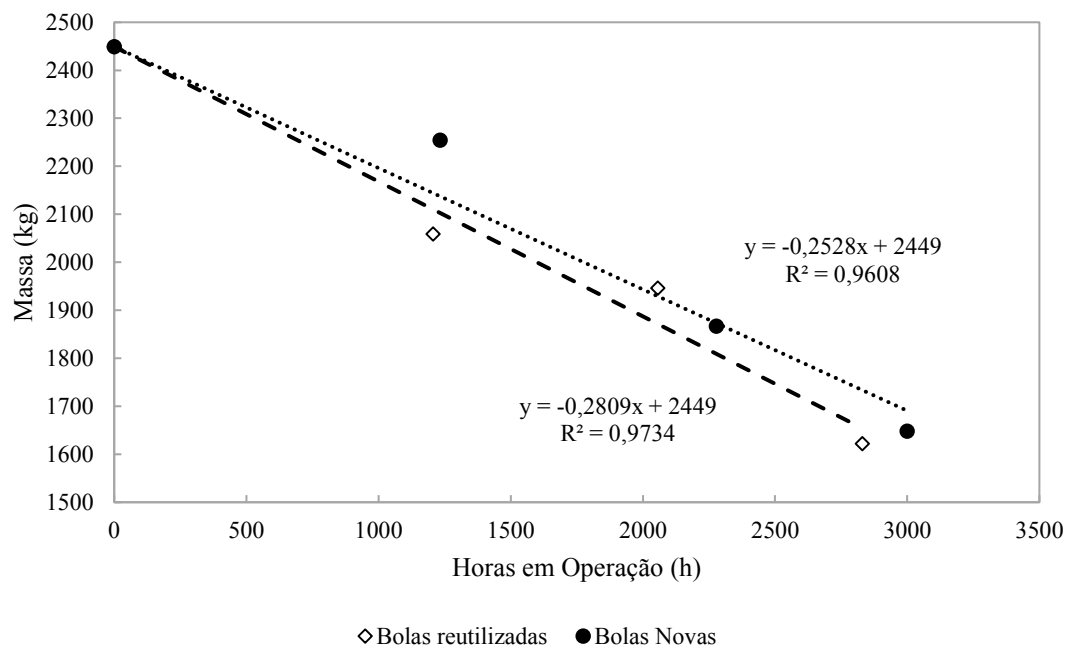


Figura 5.6 - Curva de desgaste do revestimento 1º Intermediário.

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:

$$M_H = (-D).H + M_o \quad (11)$$

Onde:

M_H = Massa do revestimento em H horas em operação (kg);

D = inclinação da reta obtida que representa a taxa de desgaste do revestimento (kg/h);

H = Horas em operação do revestimento (h);

M_o = Massa inicial do revestimento (kg);

Os dados sumarizados das taxas de desgaste estão apresentados na Tabela 5.III. A taxa de desgaste do revestimento da base apresentou um desgaste de 635 g/h no revestimento com bolas novas e 748 g/h para o moinho de bolas reutilizadas, o que representa uma taxa de desgaste 17,8% maior. Para o revestimento intermediário o moinho com bolas reutilizadas apresentou desgaste 11,1% maior (281 g/h contra 253 g/h).

Tabela 5.III. Taxa de Desgaste do revestimento (g/h) obtida pelo escaneamento 3D.

| Revestimento | Bolas Novas | Bolas Reutilizadas | Δ (Reutilizadas – Novas) |
|---------------------------------|-------------|--------------------|---------------------------------|
| Base | 635 | 748 | 17,8% |
| 1º Intermediário | 253 | 281 | 11,1% |
| Desgaste Base/ 1º Intermediário | 2,5 | 2,7 | 6,0% |

O impacto dos corpos moedores no desgaste do revestimento confirma a tese de SINOTT *et al.* (2011) que concluíram que os corpos moedores não esféricos aumentam a taxa de desgaste abrasivo do revestimento. Parte deste princípio se dá pelo empacotamento destes corpos moedores nas paredes do moinho e aumentando a resistência à rotação do eixo.

Os resultados do perfil de desgaste também confirmam o estudo de JANKOVIC & MORELL (1997) que indicavam que o desgaste do revestimento ocorria de sua

extremidade para o seu interior e que o revestimento inferior possui uma taxa de desgaste superior aos demais revestimentos.

5.3. A relação entre altura da carga moedora e o desgaste do revestimento

Nesta etapa do trabalho foram definidos três moinhos de controle com o objetivo de avaliar o comportamento da potência e altura da carga moedora em relação ao desgaste do revestimento do moinho. O desgaste do revestimento foi considerado linear ao longo de sua operação (Capítulo 5.2) e deste modo, pode-se avalia-lo em função das horas de operação do revestimento.

Em unidade operacional deseja-se manter a potência do moinho estável ao longo do tempo para que não ocorra momentos de redução de produção ou excesso de potência disponível. Deste modo, estes moinhos mantiveram a potência dentro de uma faixa de trabalho entre 850 e 1000 kW, para uma concentração de sólidos variando entre 78 e 80%, Figura 5.7. A estabilidade da potência do moinho é diretamente ligada à frequência de reposição dos corpos moedores que, neste caso, a reposição de corpos moedores se dava entre 2 e 3 dias de intervalo.

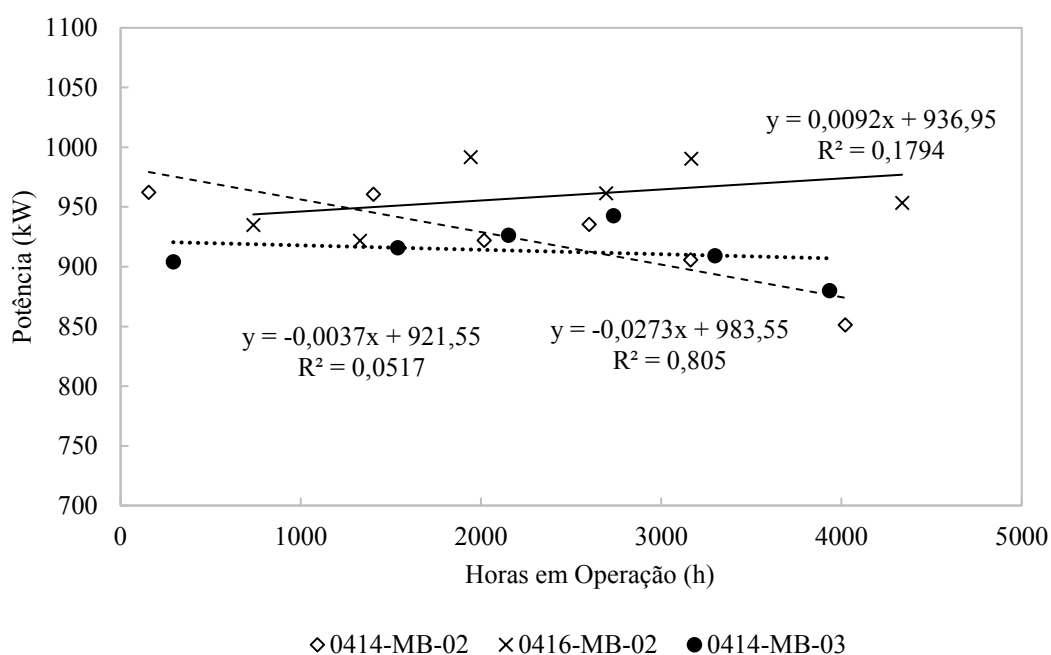


Figura 5.7 - Dados de Potência ao longo da operação do revestimento.

Deste modo, para manter a potência dos equipamentos dentro da faixa desejável de trabalho, é necessário que sejam repostos corpos moedores além da quantidade necessária para suprir o desgaste dos mesmos. Esta adição extra de corpos moedores se reflete no aumento da altura da carga de corpos moedores nos moinhos, conforme apresentado na Figura 5.8.

Esta condição apresentada corrobora ao estudo apresentado por MAZZINGHY *et al.* (2018) que, em simulações DEM, demonstraram que há redução na potência do moinho com o desgaste do revestimento devido à perda de massa e a redução em sua área de levantamento da carga. Portanto, a elevação da altura da carga atua na minimização deste efeito com uma maior utilização dos revestimentos superiores.

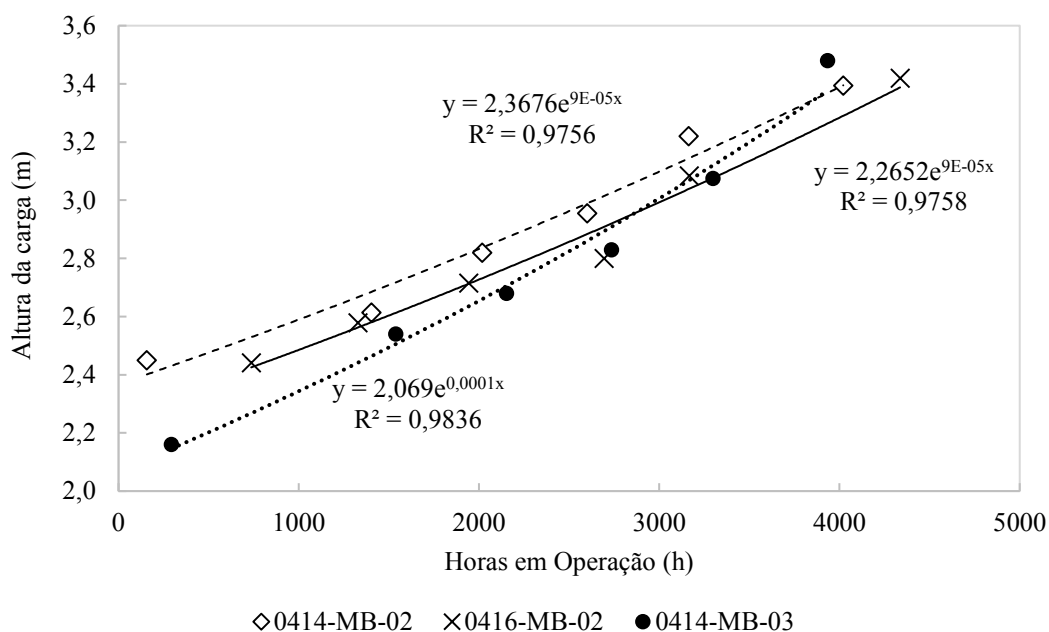


Figura 5.8 - Evolução da altura da carga de corpos moedores nos moinhos ao longo da vida útil do revestimento.

Deste modo, ao introduzir o conceito da relação de potência com a altura da carga ao longo da operação do moinho encontra-se uma relação linear, Figura 5.9. As regressões obtidas tiveram o R^2 variando entre 0,93 e 0,97 e que, para dados industriais, pode-se admitir uma forte correlação entre as duas variáveis.

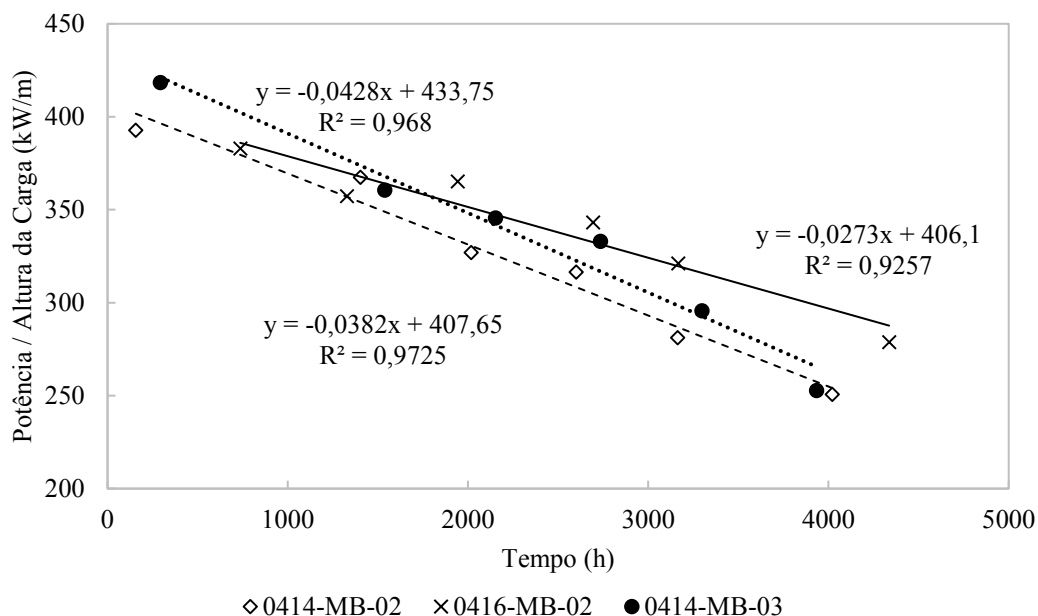


Figura 5.9 - Relação entre Potência / Altura da Carga de Bolas ao longo da vida útil do revestimento.

Com o objetivo de estabelecer uma relação única entre estas variáveis, foram agrupados os dados obtidos nos três moinhos, chegando assim a uma relação linear com R^2 de 0,89, Figura 5.10. Deste modo, pode-se afirmar que há uma perda de eficiência dos moinhos ao longo da vida útil do seu revestimento pelo uso dos corpos moedores para manutenção da potência. Portanto, pode-se concluir que o consumo de bolas em um moinho vertical é composto por três fatores: compensação do desgaste dos corpos moedores, preenchimento do volume de revestimento gasto e aumento da altura da carga para compensação da perda de eficiência no levantamento dos corpos moedores.

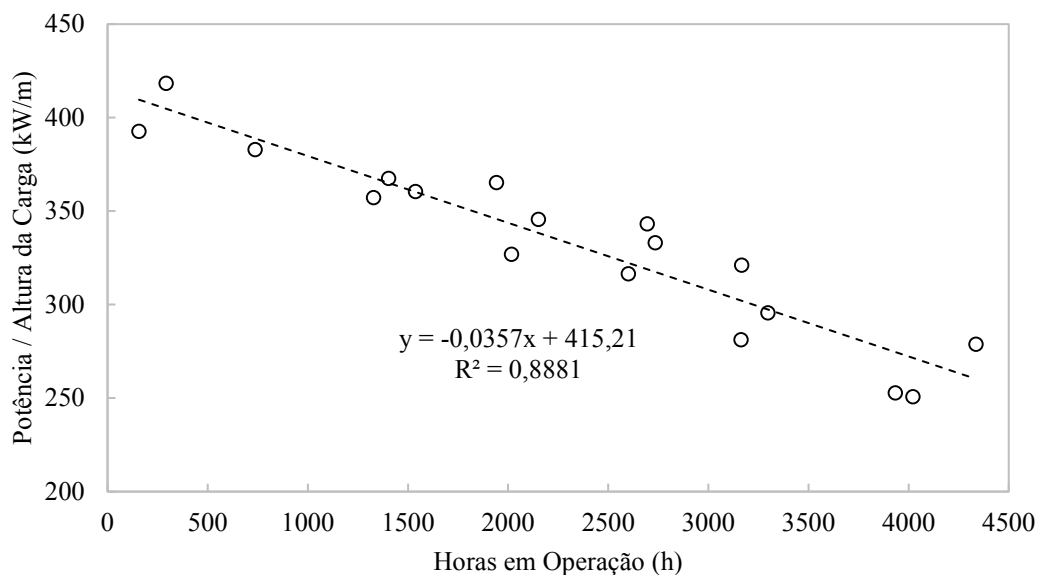


Figura 5.10 - Relação entre potência e altura da carga ao longo da vida útil do revestimento em três moinhos agrupados.

5.4. O efeito da concentração de sólidos

Com o objetivo de avaliar a influência da concentração de sólidos na polpa, foi realizado um teste de avaliação do efeito desta variável na potência dos moinhos. Para isto, foram escolhidos quatro moinhos, de diferentes desgastes de revestimento e altura da carga, para variar a concentração de sólidos na polpa com adição extra de água na bacia dos hidrociclones e medição de potência. O resultado apresentado na Figura 5.11 estabelece que há uma forte relação linear (R^2 variando de 0,94 a 1,00) entre as variáveis concentração de sólidos e potência.

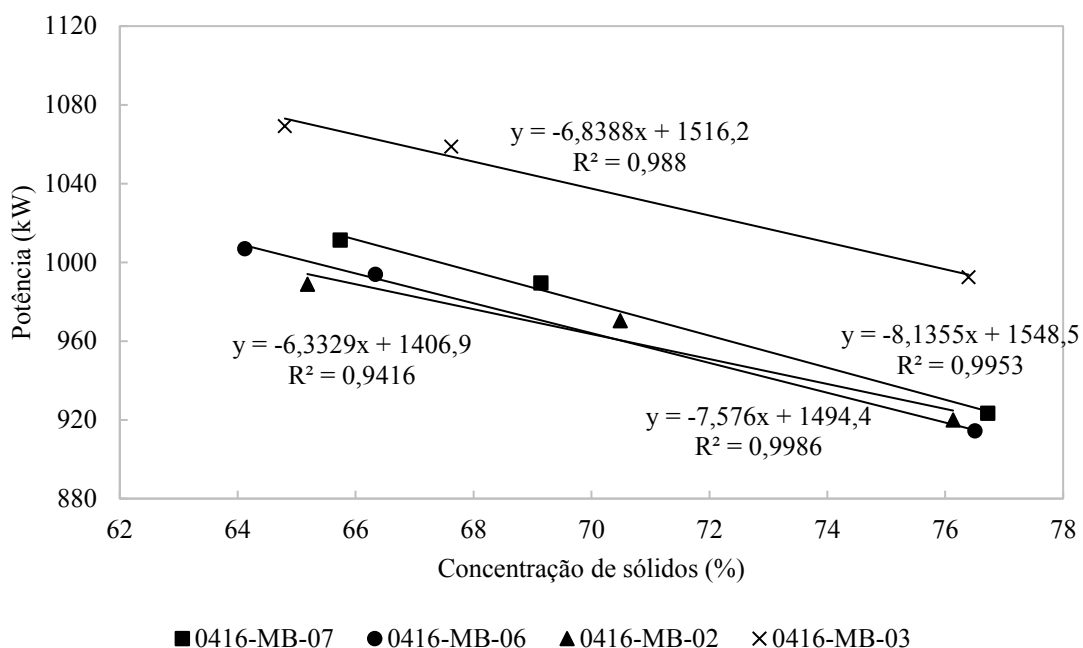


Figura 5.11 - Relação entre Potência e Concentração de sólidos na polpa.

Esta relação corrobora com o modelo de JANKOVIC & MORELL (1997) que demonstraram que o aumento da densidade da polpa reduz a potência dos moinhos. Entretanto, esta relação é contrária ao exposto por DUFFY (1994) que correlacionava diretamente potência e densidade de polpa e também contrária ao estudo de NITTA *et al.* (2006) cujo modelo de potência não contemplava a utilização desta variável.

Este fenômeno pode ser explicado pelo acréscimo da força de empuxo ocasionado pelo aumento da densidade da polpa e consequente redução da força resultante exercida pela espiral para elevação da carga moedora. Por exemplo, comparando a força resultante para elevação de um corpo moedor ($7,75 \text{ t/m}^3$) em água e em uma polpa com concentração de 76% de sólidos e densidade específica do minério $4,9 \text{ t/m}^3$, a força resultante é 23% menor na polpa independente do diâmetro do corpo moedor (ver Apêndice 1).

Em um segundo momento, visto que a concentração de sólidos é um parâmetro que influencia a potência dos moinhos e que os dados operacionais contemplavam uma faixa de trabalho entre 78 e 80% de sólidos, foi realizado uma nova coleta de dados em onze moinhos apenas com corpos moedores e água. Nesta condição o efeito da concentração de sólidos foi retirado e a relação linear entre potência / altura da carga e horas de

operação do revestimento foi mantida ($R^2 = 0,96$). Esta relação pode ser observada no gráfico da Figura 5.12.

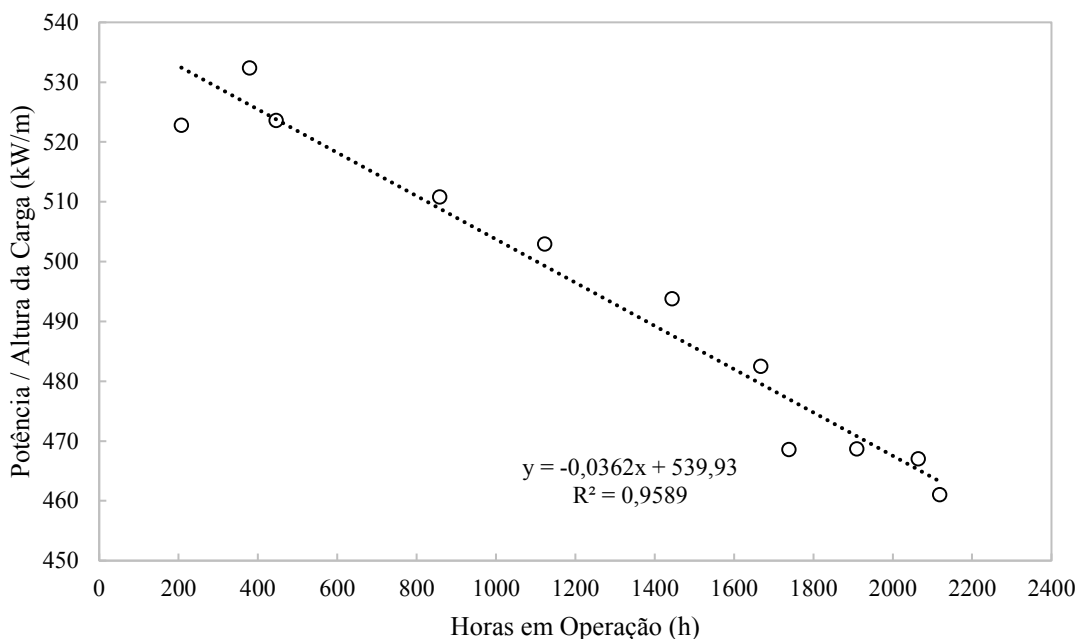


Figura 5.12 - Relação entre Potência / Altura da Carga e Horas em Operação em moinhos preenchidos apenas com água e corpos moedores.

5.5. Consumo de potência em vazio

Com o objetivo de avaliar o consumo de potência do moinho sem corpos moedores, ou seja, quantificar o consumo energético para acionamento do eixo com o revestimento da helicoidal, foi realizado o mesmo procedimento estudado por MAZZINGHY et al. (2015). Conforme estudo anterior, o moinho apresentou dificuldade na drenagem total da carga e, assim, foi proposto 10% da potência total como um fator de ajuste entre o consumo de energia total e o consumo efetivo sobre a carga moedora.

Portanto, foram escolhidos dois moinhos para realizar o procedimento de drenagem total da carga, polpa e corpos moedores, e medição contínua de potência em intervalos de um segundo. Seguem os dados apresentados na Figuras 5.13 e 5.14.

No primeiro moinho, Figura 5.13, foi iniciado o processo de abertura da comporta e em seis minutos mais de 70% da potência já havia reduzido com a drenagem da carga de

corpos moedores. No entanto, a partir deste momento, ocorreu redução na vazão de saída de corpo moedor devido à dificuldade de drenagem do mesmo. Assim, foi realizado novo procedimento de fechamento da comporta, injeção de água no interior do moinho e nova abertura da comporta. Com este procedimento houve nova drenagem da carga até o completo esvaziamento do moinho. No ponto de finalização do procedimento a potência do moinho esteve em 52,8 kW (média do último minuto de operação).

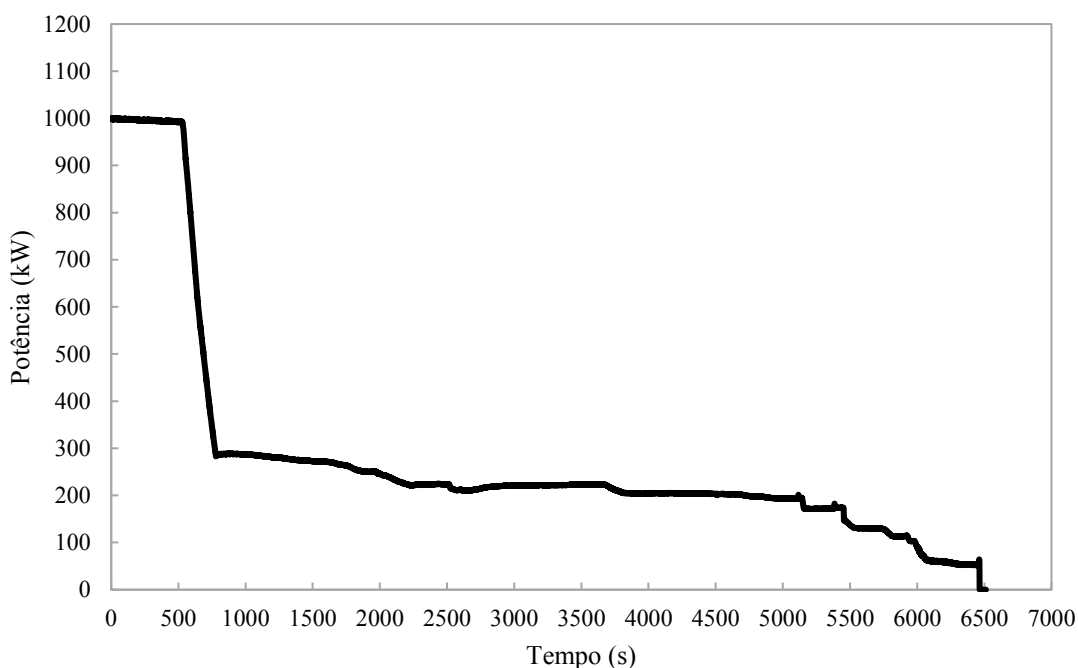


Figura 5.13 - Medição de Potência ao longo da drenagem do corpo moedor no moinho 0414-MB-06.

Sabendo da necessidade de um procedimento adicional de lavagem no moinho, o segundo moinho obteve sua drenagem de forma mais rápida, Figura 5.14. No primeiro procedimento, em seis minutos, houve redução de mais de 80% da carga e assim, fechou-se a comporta para nova lavagem do moinho. Após este procedimento, a drenagem da carga foi continuada até sua finalização em potência de 55,6 kW (média do último minuto de operação).

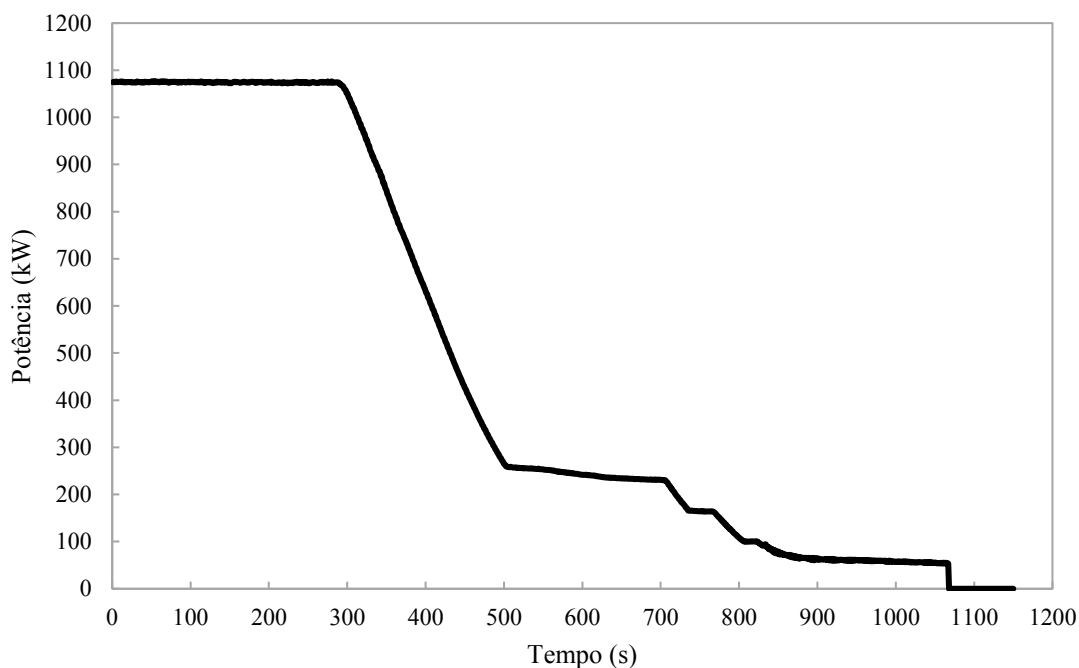


Figura 5.14 - Medição de Potência ao longo da drenagem do corpo moedor no moinho 0416-MB-02.

Portanto, com estes resultados é possível estabelecer, conforme Tabela 5.IV, um valor médio de 54,2 kW como consumo de potência para acionamento do eixo e do revestimento da helicoidal. Esta fração representa 4,8% da potência nominal do moinho.

Tabela 5.IV Resumo da medição de potência dos moinhos antes e após a drenagem dos corpos moedores (média de um minuto).

| Moinho | Potência antes da drenagem (kW) | Potência após a drenagem (kW) |
|--------------|------------------------------------|----------------------------------|
| 0414-MB-06 | 993,1 | 52,8 |
| 0416-MB-02 | 1072,1 | 55,6 |
| Média | | 54,2 |

5.6. Modelo de Potência

Com o objetivo de avaliar o melhor modelo de potência a ser empregado para prever o comportamento dos moinhos do Minas-Rio foi realizada primeiramente uma análise qualitativa dos modelos em relação aos principais parâmetros de processo (densidade de polpa, revestimento e altura da carga moedora).

Em relação à densidade de polpa, conforme citado no item 5.4, este parâmetro tem relação inversa com a potência dos moinhos. Dentre os modelos estudados, apenas o modelo de JANKOVIC & MORELL (1997) possui a mesma relação. Sendo que o modelo de DUFFY (1994) possui em seu modelo uma relação de aumento da potência com o aumento da densidade e o modelo de NITTA *et al.* (2006) não contempla a densidade de polpa.

Por outro lado, em relação ao desgaste do revestimento nenhum modelo apresentou estudo com este parâmetro. Os modelos apresentam o diâmetro da espiral como parâmetro de suas equações, mas, como visto no item 5.2, o revestimento não se desgasta linearmente no sentido radial e, portanto, há uma grande possibilidade de erro de estimativa deste parâmetro.

Deste modo, por se tratar de um modelo que irá subsidiar estratégias operacionais, como por exemplo a troca de revestimento optou-se, para os estudos do Minas-Rio e para a base de dados obtida, a criação de um modelo próprio para a predição da potência dos moinhos através do ajuste do modelo de NITTA *et al.* (2006) com a adição do desgaste do revestimento e densidade de polpa. Foi realizada a escolha deste modelo pela atual aplicação deste modelo e sua construção baseada em moinhos industriais de pequeno porte.

A base de dados utilizada contemplou informações obtidas em 23 amostragens industriais com variações de altura da carga moedora, vida útil do revestimento, densidade de polpa e medições de potência. Com estas informações foi criado um ajuste do modelo de NITTA *et al.* (2006) conforme equação apresentada abaixo:

$$P_{líq} = 509 + 0,6087Nitta - 0,07508H - 199,6Dp \quad (12)$$

Onde,

$P_{líq}$ = Potência líquida do moinho (kW). Potência líquida é a potência total do equipamento subtraída do consumo de potência em vazio (54,2 kW);

$Nitta$ = Potência líquida obtida pelo modelo (kW);

H = Horas em operação do revestimento (h);

Dp = Densidade de polpa (t/m^3).

Nesta equação estão apresentados alguns efeitos descritos nos capítulos 5.2, 5.3 e 5.4:

- a) a relação positiva entre o modelo original e a potência do moinho;
- b) a relação positiva entre altura da carga e potência (parâmetro interno ao modelo original);
- c) o efeito negativo da densidade de polpa e do tempo de operação do revestimento.

Na Figura 5.15 está apresentado o gráfico de aderência ao modelo com R^2 de 0,99 que confirma o ótimo ajuste do polinômio para o caso estudado.

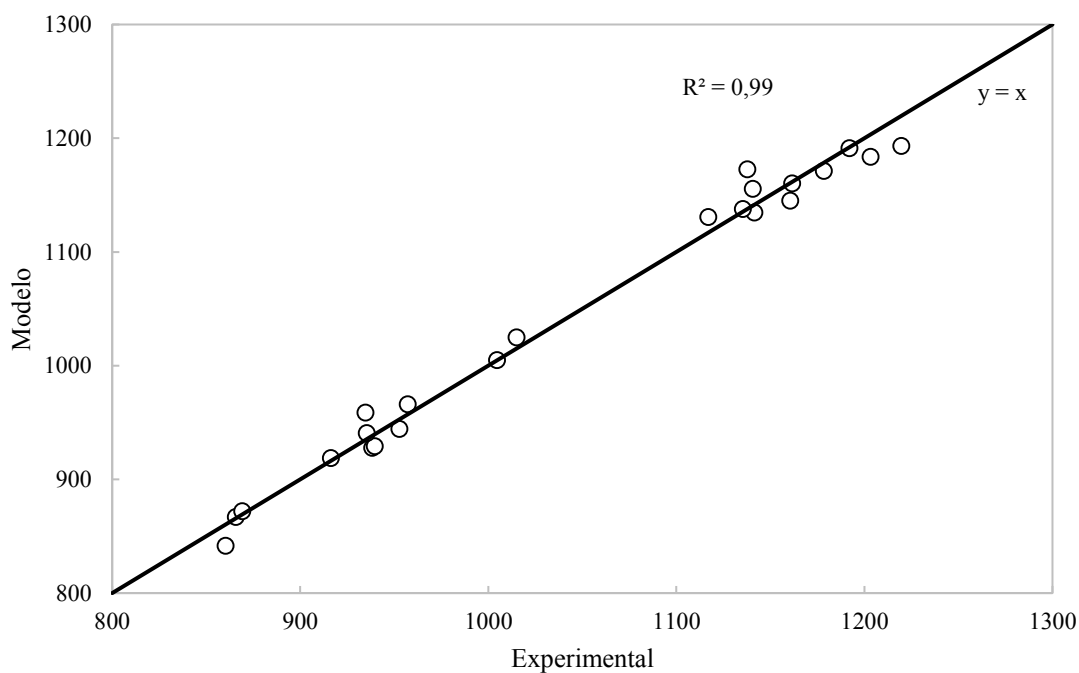


Figura 5.15 - Gráfico do ajuste do modelo de potência.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram estudados os efeitos dos corpos moedores na produtividade dos moinhos verticais. Os resultados apresentaram que o acúmulo gradual de corpos moedores não esféricos e de pequena granulometria impactam severamente o desempenho do processo. Deste modo, sugere-se que para este tipo de equipamento deve-se, periodicamente, realizar a drenagem e classificação dos corpos moedores, ou, em casos mais extremos, fazer a substituição completa da carga.

Os corpos moedores não esféricos também afetam em grande escala o desgaste dos revestimentos, o qual apresentou desgaste considerado linear em relação às horas de operação. Este desgaste do revestimento causa redução na potência dos moinhos ao longo tempo, o qual é controlado pelo aumento da altura da carga dos moinhos. Esta elevação da carga causa um consumo maior de corpos moedores para suprir o volume do revestimento e compensar a potência do equipamento.

A densidade de polpa altera a potência do equipamento. Pelos dados obtidos, em operação com polpa e somente com água, observou-se que o aumento da densidade de polpa reduz a potência do moinho.

Com os resultados apresentados neste trabalho foi possível construir um ajuste do modelo de NITTA *et al.* (2006) para prever a potência do equipamento em função do grau de enchimento, percentual de sólidos e horas em operação do revestimento.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Avaliar o efeito das variáveis estudadas neste trabalho (densidade de polpa, revestimento e grau de enchimento) na granulometria do produto devido a variação da altura e comportamento da zona de moagem e zona de classificação do moinho vertical.

REFERÊNCIAS

AUSTIN, L.G.; KLIMPEL, R.R.; LUCKIE, P.T. Process Engineering of Size Reduction, SME – AIME, 1984.

BALLANTYNE, G. Assessing comminution energy efficiency with the Size Specific Energy (SSE) approach. 16th European Symposium on Comminution & Classification (ESCC 2019), Leeds, Reino Unido, 2019. 2p.

BERALDO, J. L. 1987. Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1987. 143p.

BERGERMAN, Maurício Guimarães. Dimensionamento e simulação de moinhos verticais. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo. São Paulo, 2013. 282 p.

BOND, F.C. The Third Theory of Comminution. AIME Trans., Vol. 193, pp. 484, 1952.

CASTRO, E.C.; RUSSO, J.F.C.; TURRER, H.D.G; NASCIMENTO, C.M.; SANTOS, L.A.; SILVA, J.F.L. Avaliação do consumo energético da remoagem de concentrado de minério de ferro com o aumento do teor de sílica. 19º Simpósio de Mineração, 4ª ABM Week, São Paulo, 2018. 11p.

CHARLES, R. J. Energy-size reduction relationships in comminution. Trans AIME, vol. 203, pp. 80-88, 1957.

DATTA, A.; RAJAMANI, R. K. Modelling of Ball Mill Product Size Distribution with Impact Energy Spectra Data. SME Annual Meeting, Denver, Colorado, 1999, 7p.

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

DUFFY, S. M. Investigation into the Performance Characteristics of Tower Mills, Master Thesis - University of Queensland, JKMRRC, Brisbane, Australia, 1994.

ESTEVEES, P.M.; MAZZINGHY, D.B.; GALÉRY, R.; FILHO, B.C.; SILVA, J.F.L.; RUSSO, J.F.C. Predictive Modelling of Vertical Stirred Mills Liner Wear Using Vibration Signature Analysis. 11th International Comminution Symposium, Cape Town, South Africa, 2018, 18p.

ESTEVEES, P.M.; MAZZINGHY, D.B.; HILDEN, M.; YAHYAEI, M.; POWELL, M.; GALÉRY, R. Qualitative evaluation of the grinding efficiency of a gravity induced stirred mill using the size specific energy approach. 16th European Symposium on Comminution & Classification, Leeds, Reino Unido, 2019. 2p.

GALÉRY, R. Moagem: Modelagem de Parâmetros de Quebra Através da Análise da Energia de Fragmentação, Belo Horizonte, Tese de Doutorado, CPGEM, Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.

GUTIÉRREZ, L.; SEPÚLVEDA, J.E. Dimensionamiento y Optimización de Plantas Concentradoras mediante Técnicas de Modelación Matemática. Publicación CIMM – Centro de Investigacion Minera y Metalúrgica, Santiago, Chile, 1986.

HERBST, J.A. & FUERSTENAU, D.W. Scale-Up Procedure for Continuous Grinding Mill Design Using Population Balance Models, International Journal of Mineral Processing, Vol.7, pp. 1-31, 1980.

GUPTA, A.; YAN, D.S. Mineral Processing Design and Operation. Cap. 10: Mathematical Modelling in Comminution. 2006, p. 255-292.

GUTIÉRREZ, L.; SEPÚLVEDA, J.E. Dimensionamiento y Optimización de Plantas Concentradoras mediante Técnicas de Modelación Matemática. Publicación CIMM – Centro de Investigacion Minera y Metalúrgica, Santiago, Chile, 1986

HASAN, M. Process Modelling of Gravity Induced Stirred Mills. Tese PhD. The University of Queensland, Australia, 2016, 211p.

HERBST J. A. & SEPULVEDA J. L. Fundamentals of Fine and Ultrafine Grinding in a Stirred Ball Mill, International Powder and Bulk Solids Handling and Processing: Proceedings held Rosemount Illinois, Vol. 16-18, pp. 452-470, 1978.

HOGG, R. & FUERSTENAU, D.W. Power Relations for Tumbling Mills, Trans. SME-AIME, Vol. 252, pp. 418-432, 1972.

JANKOVIC, A.; MORELL, S. Power Modelling of Stirred Mills. Proceedings of the Second UBC-McGill Bi-Annual International Symposium on Fundamentals of Mineral Processing and the Environment. Ontario, Canada. 1997.

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

KELLY, E.G.; SPOTTISWOOD, D. J. Introduction to Mineral Processing. New York: Wiley, 1982, 491p.

KING, R.P. Modelling & Simulation of Mineral Processing Systems. Oxford: Butterworth Heinemann, 2001. 403p.

KLIMPEL, R.R. Slurry rheology influence on the performance of mineral/coal grinding circuits. Mining Engineering, 1982, p.1665-1668.

KLIMPEL, R.R. The impact on industrial grinding circuits of changing and/or controlling the slurry rheology. Comminution Practices, Ed. S. K. KAWATRA, SME, Littleton Colorado, 1997, pp. 1-9.

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.

LINO, M.F.M.; COUTINHO, R.O.; MELO, S.G.; SILVA, J.F.L.; MENEZES, K.T.; BARBOSA, E.T.; DUARTE, M.S.; MOURA, R.C. Definição do momento ideal de intervenção no revestimento espirado dos moinhos verticais (Vertimill), através de termografia infravermelha. 33º Congresso Brasileiro de Manutenção e Gestão de Ativos, Belo Horizonte, 2018.

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.; SCHNEIDER, C. L.; GALÉRY, R. Moinho Vertical de Carga Agitada: Uma Revisão. Série Tecnologia Mineral. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013. 39p.

MAZZINGHY, D.B.; RUSSO, J.F.C.; VIDELA, A.; TORO, H.; SCHNEIDER, C.L. Evaluation of Media Size on the Regrinding Efficiency of an Itabirite Iron Ore. XXVII International Mineral Processing Congress, Santiago, 2014, 8p.

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.

MAZZINGHY, D. B.; LICHTER, J. SCHNEIDER, C.L.; GALÉRY, R.; RUSSO, J.F.C. Vertical stirred mill scale-up and simulation: Model validation by industrial samplings results. *Minerals Engineering* 103-104. Elsevier. 2017. 7p.

MAZZINGHY, D. B.; ESTEVES P.M.; FAIOLI, D.T.; ANDRADE, K.H; RIBEIRO, F.S. Qualitative Analysis of the Screw Liner Wear Prediction in Vertical Stirred Mills by

the Discrete Element Method. 11th International Comminution Symposium, Cape Town, South Africa, 2018, 10p.

METSO. VERTMILL® Grinding Mill Reference List. Julho, 2018.

METSO. Blog: When to change Vertimill™ liners and how to do it safely!. <https://www.metso.com/blog-hub/service-tips/blog-when-to-change-vertimill-liners-and-how-to-do-it-safely/>. Visitado em 14/06/2019.

NITTA, S., FURUYAMA, T., BISSOMBOLO, A., MORI, S. Estimation of the Motor Power of the Tower Mill through Dimensional Analysis, Proc. XXIII International Mineral Processing Congress, pp.158-161, 2006.

PALANIANDY, S.; POWELL, M.; HILDEN, M.; ALLEN, J.; KERMANSHAHI, K.; OATS, B.; LOLLBACK, M. (2015) VertiMill® – Preparing the feed within floatable regime at lower specific energy. Minerals Engineering, v.73, p.44-52.

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.

ROCHA, D.; SPILLER, E.; MILLER, H.; TAYLOR, P. Prediction of the Product Size Distribution of a Laboratory Vertical Stirred Mill. 11th International Comminution Symposium, Cape Town, South Africa, 2018, 8p.

ROWLAND, C. A. Ball Mill Scale-Up – Diameter Factors. In: SOMASUNDARAM, P. Advances in Mineral Processing. New York, Society of Mining Engineers, Inc., American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 1986. p. 605-617.

SCHONERT, K. Aspects of very fine grinding. Littleton: SME, 1990. Chap. 9, p. 155-172.

SCHONERT, K. Advances in comminution: fundamental and impacts of technology. In: International Mineral Processing Conference, 17., 1991, Dresden. Proceedings. Dresden: IMPC, 1991. P.1-21.

SEPÚLVEDA, J.E. Methodologies for the Evaluation of Grinding Media Consumption Rates at Full Plant Scale. Minerals Engineering, 17, pp. 1269-1279, 2004.

SINOTT, M. D.; CLEARY, P. W.; MORRISON, R. D. Is media shape important for grinding performance in stirred mills? Minerals Engineering 24, 2011, p. 138-151.

STEHR, N., MEHTA, R. K. & HERBST, J. A. Comparison of Energy Requirements for Conventional and Stirred Ball Milling of Coal-Water Slurries. Coal Preparation, 4, 1987, p.209-226.

VIEIRA, M.G. Efeitos da reologia de polpa e avaliação de dispersantes como aditivos de moagem na remoagem de um concentrado de minério de ferro. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. 2011. 151p.

WANG, Y & FORSBERG, E. International overview and outlook on comminution technology. Stockholm: Swedish Mineral Processing Research Association, 2003. 121p. (Working Paper. Lulea University of Technology, Department of Chemical Engineering and Geosciences).

WELLENKAMP, F.J. Moagem fina e ultrafina de minerais industriais: uma revisão. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 1999. 56p.

WILLS, B.A., NAPIER-MUNN, T.J. Will's Mineral Processing Technology – An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. Elsevier Science & Technology Books, 2006, 444p.

ZHENG, J., HARRIS, C. C. & SOMASUNDARAN, P. 1996. A study on grinding and energy input in stirred media mills Powder Technology, 86, 171-178.

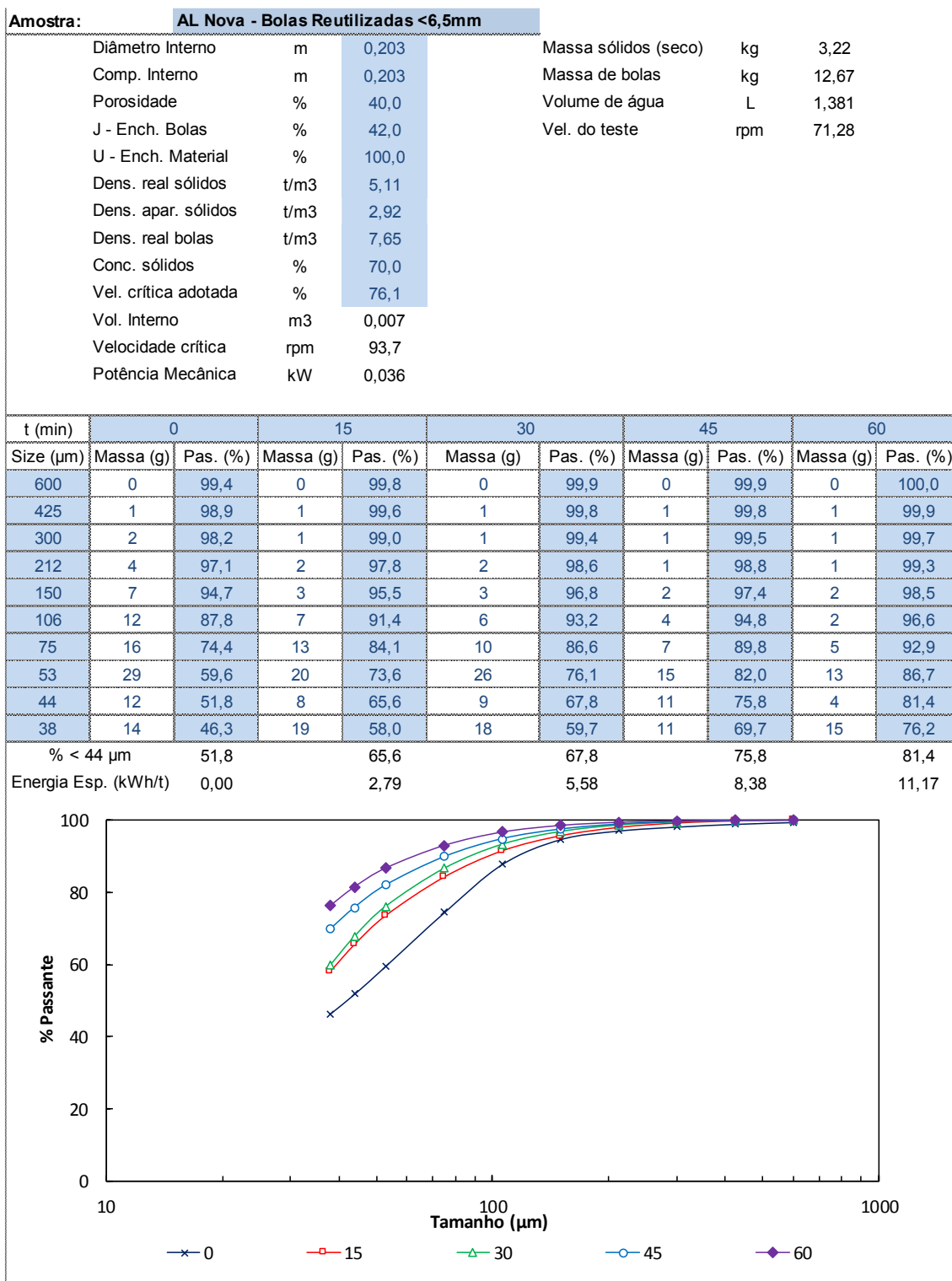
ANEXOS

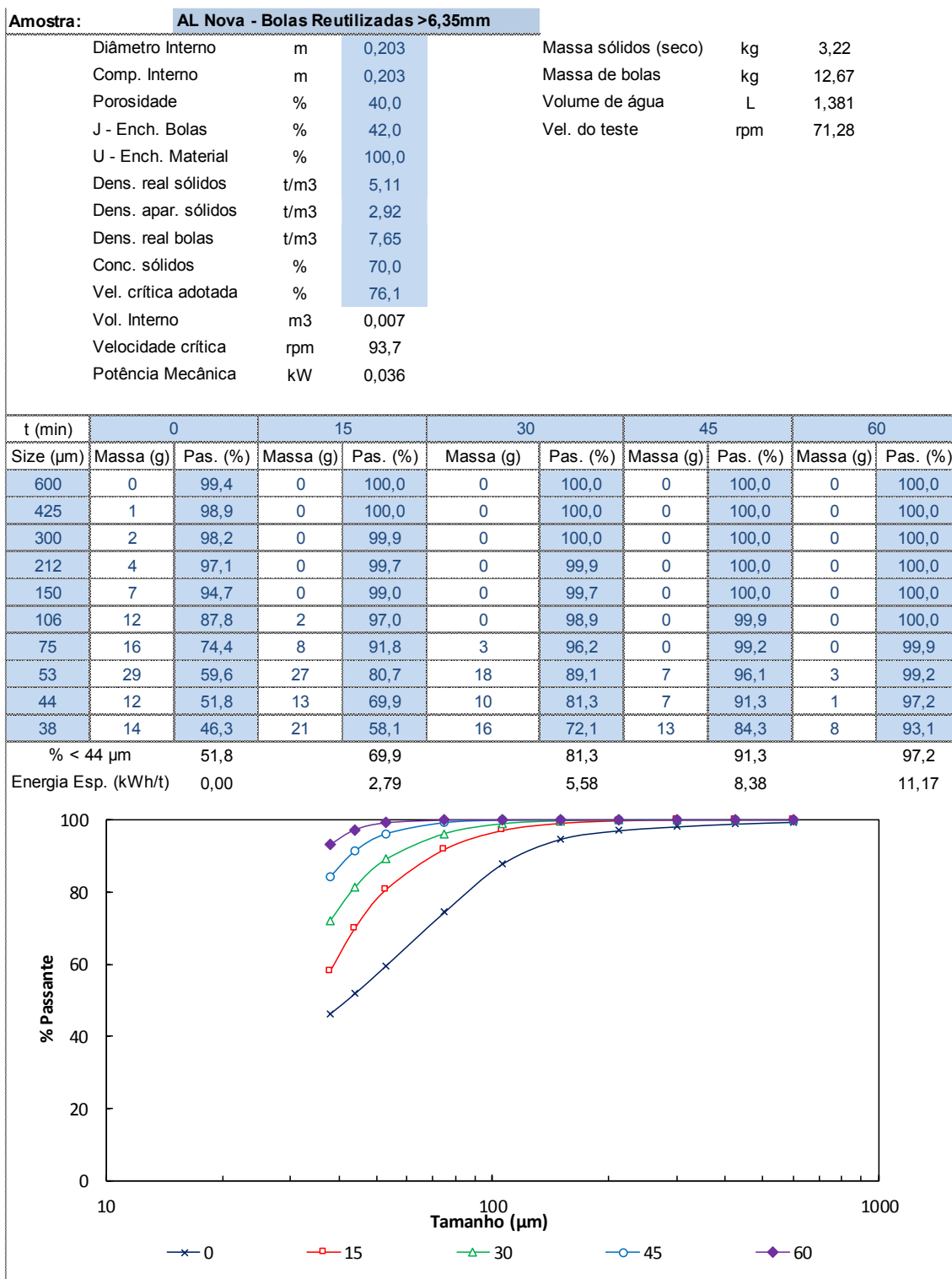
A – Testes de Moagem em Laboratório

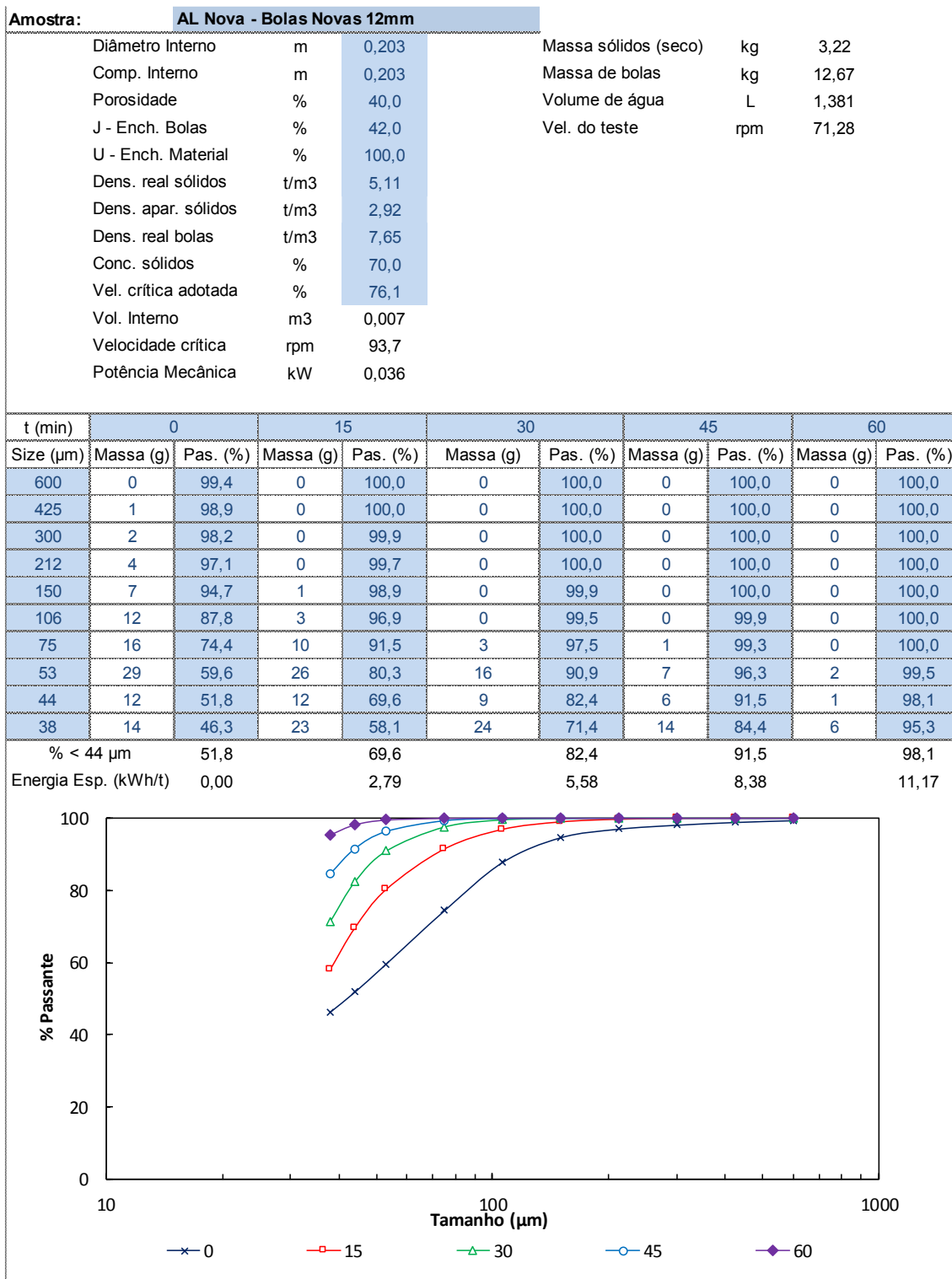
| Amostra: | | AL Nova - Bolas Tal Qual | | | | |
|----------------------|------------------|--------------------------|----------------------|-----|-------|--|
| Diâmetro Interno | m | 0,203 | Massa sólidos (seco) | kg | 3,22 | |
| Comp. Interno | m | 0,203 | Massa de bolas | kg | 12,67 | |
| Porosidade | % | 40,0 | Volume de água | L | 1,381 | |
| J - Ench. Bolas | % | 42,0 | Vel. do teste | rpm | 71,28 | |
| U - Ench. Material | % | 100,0 | | | | |
| Dens. real sólidos | t/m ³ | 5,11 | | | | |
| Dens. apar. sólidos | t/m ³ | 2,92 | | | | |
| Dens. real bolas | t/m ³ | 7,65 | | | | |
| Conc. sólidos | % | 70,0 | | | | |
| Vel. crítica adotada | % | 76,1 | | | | |
| Vol. Interno | m ³ | 0,007 | | | | |
| Velocidade crítica | rpm | 93,7 | | | | |
| Potência Mecânica | kW | 0,036 | | | | |

| t (min) | 0 | | 15 | | 30 | | 45 | | 60 | |
|----------------------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| Size (µm) | Massa (g) | Pas. (%) | Massa (g) | Pas. (%) | Massa (g) | Pas. (%) | Massa (g) | Pas. (%) | Massa (g) | Pas. (%) |
| 600 | 0 | 99,4 | 0 | 100,0 | 0 | 100,0 | 0 | 100,0 | 0 | 100,0 |
| 425 | 1 | 98,9 | 0 | 100,0 | 0 | 100,0 | 0 | 100,0 | 0 | 100,0 |
| 300 | 2 | 98,2 | 0 | 99,9 | 0 | 100,0 | 0 | 100,0 | 0 | 100,0 |
| 212 | 4 | 97,1 | 0 | 99,7 | 0 | 100,0 | 0 | 100,0 | 0 | 100,0 |
| 150 | 7 | 94,7 | 1 | 99,1 | 0 | 99,8 | 0 | 100,0 | 0 | 100,0 |
| 106 | 12 | 87,8 | 2 | 97,9 | 1 | 99,0 | 0 | 99,9 | 0 | 100,0 |
| 74 | 16 | 74,4 | 6 | 94,8 | 5 | 96,3 | 1 | 99,4 | 0 | 99,8 |
| 53 | 29 | 59,6 | 22 | 83,2 | 20 | 86,2 | 10 | 96,1 | 6 | 98,0 |
| 44 | 12 | 51,8 | 14 | 72,2 | 17 | 74,0 | 2 | 90,3 | 1 | 94,6 |
| 38 | 14 | 46,3 | 21 | 62,7 | 23 | 63,0 | 20 | 81,5 | 13 | 89,2 |
| % < 44 µm | 51,8 | | 72,2 | | 74,0 | | 90,3 | | 94,6 | |
| Energia Esp. (kWh/t) | 0,00 | | 2,79 | | 5,58 | | 8,38 | | 11,17 | |

Gráfico de linhas mostrando a porcentagem de material que passa por peneiras de diferentes tamanhos (38, 44, 53, 74, 106, 150, 212, 300, 425, 600 µm) em função do tempo de moagem (0, 15, 30, 45, 60 minutos). O eixo X é o tamanho da peneira em micrômetros (logarítmico) e o eixo Y é a porcentagem de material que passa. Cinco séries de dados são mostradas: 0 min (x), 15 min (□), 30 min (△), 45 min (○) e 60 min (◇). Todas as séries mostram um aumento na porcentagem de material que passa com o tempo, convergindo para 100% para peneiras maiores.

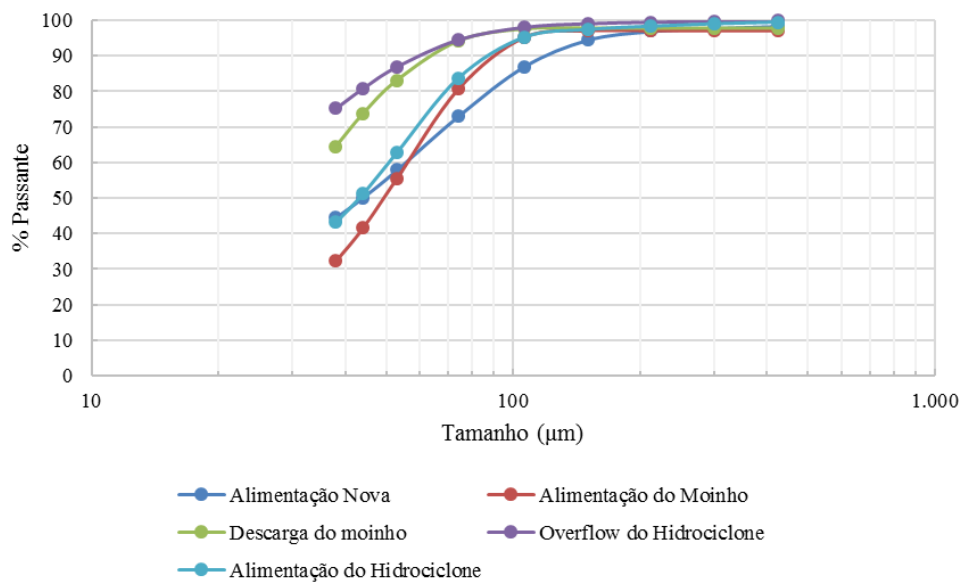




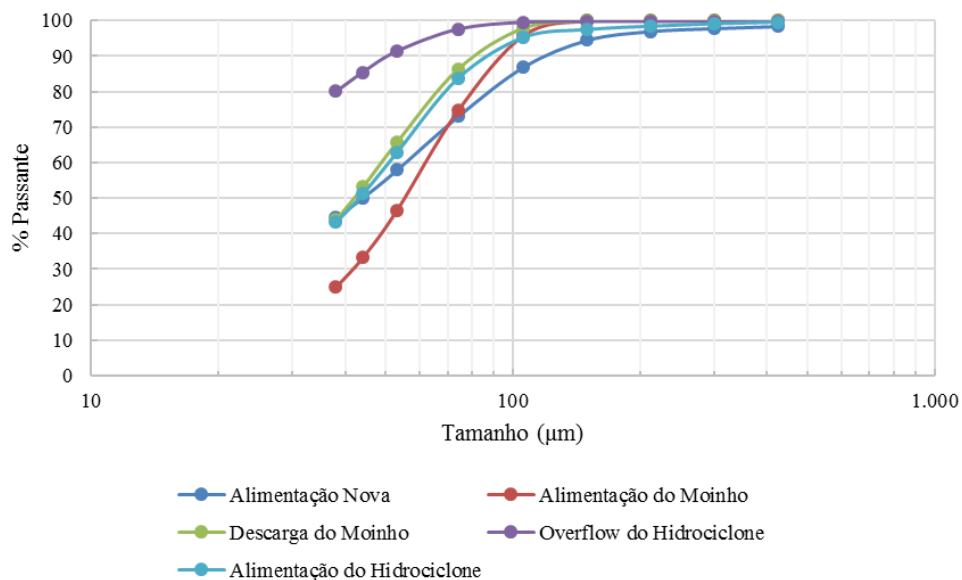


B – Amostragem Industrial

Curvas granulométricas



Curvas granulométricas obtidas na amostragem no moinho com bolas novas.



Curvas granulométricas obtidas na amostragem no moinho com bolas reutilizadas.

Dados coletados na amostragem industrial

| Hidroclones | Bolas Novas | Bolas Reutilizadas |
|---------------------------------------|--------------------|---------------------------|
| Vazão de polpa (m ³ /h) | 1351,9 | 1277,5 |
| Concentração sólidos (%) | 40,7 | 40,7 |
| Densidade solidos (t/m ³) | 5,08 | 5,08 |
| Densidade polpa (t/m ³) | 1,49 | 1,49 |
| Vazão polpa (t/h) | 2008 | 1898 |
| Vazão de sólidos (t/h) | 817,4 | 772,5 |
| Partição | | |
| Ciclones abertos | 4 | 4 |
| Vazão solidos (t/h) por ciclone | 204,36 | 193,11 |
| Alimentação ciclone (t/h) | 510,90 | 482,78 |
| Concentração sólidos OF (%) | 15,90 | 15,37 |
| Concentração sólidos UF (%) | 78,00 | 78,20 |
| Partição para UF (%) | 76,55 | 77,47 |
| Underflow (t/h) | 391,09 | 374,01 |
| Overflow (t/h) | 119,81 | 108,77 |
| Carga circulante (%) | 326,44 | 343,85 |
| Moinhos | | |
| Corrente (A) | 176,1 | 179,3 |
| Potência (kW) | 972,4 | 996,4 |

C – Modelo de Potência

Modelo de Regressão Multivariada no software Minitab® para estimar a potência dos moinhos através do ajuste do Modelo de Nitta com as variáveis Horas em Operação e Densidade de Polpa.

Análise de Regressão: Potência Líquida versus Modelo ... s; Densidade

Análise de Variância

| Fonte | GL | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-----------------|----|----------|----------|---------|---------|
| Regressão | 3 | 336831 | 112277 | 475,98 | 0,000 |
| Modelo de Nitta | 1 | 11775 | 11775 | 49,92 | 0,000 |
| Horas | 1 | 15455 | 15455 | 65,52 | 0,000 |
| Densidade | 1 | 230324 | 230324 | 976,41 | 0,000 |
| Erro | 19 | 4482 | 236 | | |
| Total | 22 | 341313 | | | |

Sumário do Modelo

| S | R2 | R2(aj) | R2(pred) |
|---------|--------|--------|----------|
| 15,3586 | 98,69% | 98,48% | 98,02% |

Coefficientes

| Termo | Coef | EP de Coef | Valor-T | Valor-P | VIF |
|-----------------|----------|------------|---------|---------|-------|
| Constante | 509 | 119 | 4,26 | 0,000 | |
| Modelo de Nitta | 0,6087 | 0,0862 | 7,07 | 0,000 | 16,75 |
| Horas | -0,07508 | 0,00928 | -8,09 | 0,000 | 14,52 |
| Densidade | -199,60 | 6,39 | -31,25 | 0,000 | 1,70 |

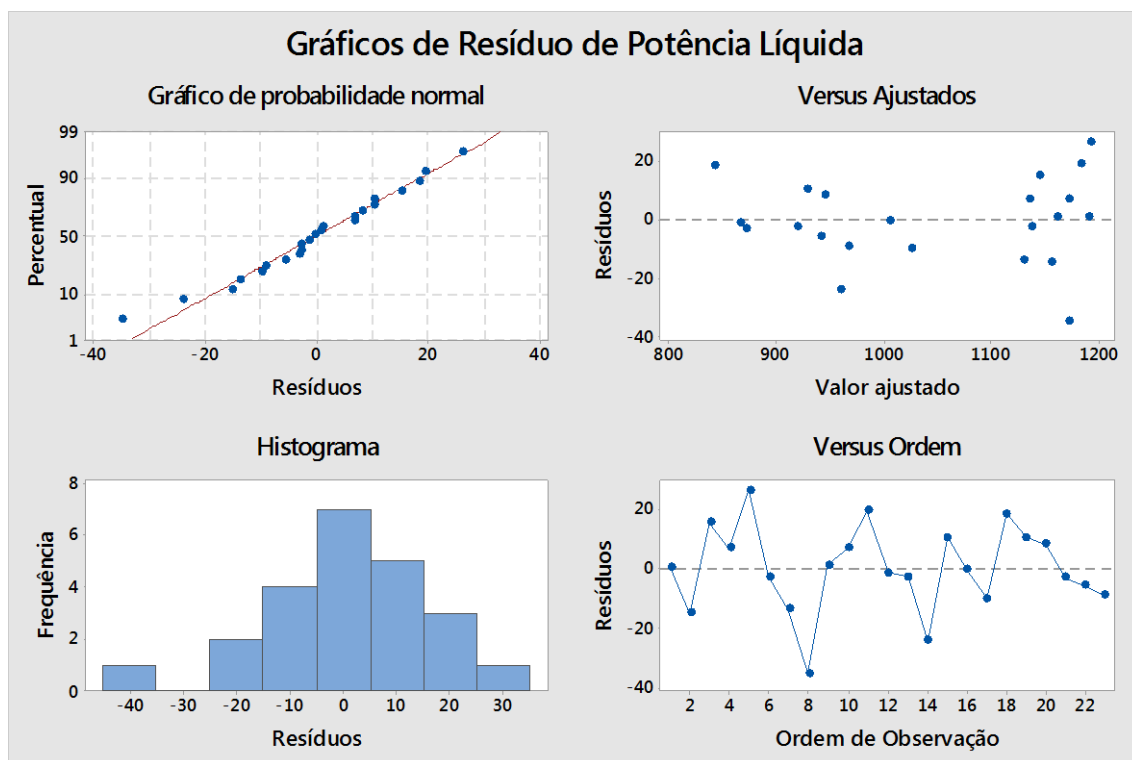
Equação de Regressão

$$\text{Potência Líquida} = 509 + 0,6087 \text{ Modelo de Nitta} - 0,07508 \text{ Horas} - 199,60 \text{ Densidade}$$

Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

| Obs. | Potência Líquida | Ajuste | Resíd | Resíd Pad | R |
|------|------------------|---------|--------|-----------|---|
| 8 | 1137,81 | 1172,95 | -35,14 | -2,44 | R |

R Resíduo grande



APÊNDICE

Relação entre peso e empuxo para um corpo moedor

Dado um corpo moedor de densidade ρ_{bola} (t/m^3), diâmetro d (m) e Volume V_{bola} (m^3) tem-se que a força peso exercida por ele é igual a:

$$P = \rho_{bola} \cdot V_{bola} \cdot g \quad (14)$$

onde g é a aceleração da gravidade (m/s^2).

E a força de empuxo, dado uma polpa de densidade ρ_{polpa} é igual a:

$$E = \rho_{polpa} \cdot V_{bola} \cdot g \quad (15)$$

Portanto, a força resultante obtida pode ser descrita por:

$$R = P - E = \rho_{bola} \cdot V_{bola} \cdot g - \rho_{polpa} \cdot V_{bola} \cdot g \quad (16)$$

$$R = V_{bola} \cdot g \cdot (\rho_{bola} - \rho_{polpa}) \quad (17)$$

Conclui-se então que a força resultante se reduz com o aumento da densidade da polpa e aumenta com o aumento da densidade do corpo moedor.