

Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG
Engenharia de Minas

Thiago Henrique Dainezi

DESENVOLVIMENTO DE UM ENSAIO LABORATORIAL PARA O
DIMENSIONAMENTO DE MOINHOS VERTICAIS

Poços de Caldas/MG

2014

**DESENVOLVIMENTO DE UM ENSAIO LABORATORIAL PARA O
DIMENSIONAMENTO DE MOINHOS VERTICAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Unidade Curricular TCC II (ICT318) do
Instituto de Ciência e Tecnologia da
Universidade Federal de Alfenas, campus de
Poços de Caldas.

Área de concentração: Moagem Mineral

Orientador: Mauricio Guimarães Bergerman

FICHA CATALOGRÁFICA

D133d *Dainezi, Thiago Henrique.*

Desenvolvimento de um ensaio laboratorial para o dimensionamento de moinhos verticais. / Thíago Henrique Dainezi;

Orientação de Maurício Guimarães Bergerman. Poços de Caldas: 2014.

38 fls.: il.; 30 cm.

Inclui bibliografias: fls. 34

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas) –

Universidade Federal de Alfenas– Campus de Poços de Caldas, MG.

Thiago Henrique Dainezi

Desenvolvimento de um ensaio laboratorial para o dimensionamento de moinhos verticais

A banca examinadora abaixo-assinada aprova o Trabalho apresentado à Unidade Curricular Trabalho de Conclusão de Curso II (ICT218), do curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Alfenas (Unifal-MG), campus de Poços de Caldas, como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel e Engenharia de Minas

Aprovada em: 16 de julho de 2014

Examinador: Maurício Guimarães Bergerman

Instituição: Universidade Federal de Alfenas (Unifal-MG)

Assinatura: 

Examinador: Tiago Antônio Magalhães Filho

Instituição: Unifal-MG

Assinatura: 

Examinador: Daniela Gomes Horta

Instituição: Unifal-MG

Assinatura: 

AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo que concedeu em minha vida.

Aos meus pais Pedro e Marta por não pouparem esforços em garantir que eu tivesse todas as oportunidades que me levaram até este momento e ainda por incentivar-me e guiar-me em toda minha trajetória de vida para buscar além de conhecimentos teóricos a construção de um caráter humano e digno acima de tudo.

À minha irmã Isabela, família e amigos pelo apoio incondicional dedicado em todas as situações e sobretudo nas horas mais desafiadoras.

Ao meu orientador e amigo Prof. Mauricio Guimarães Bergerman pela paciência e dedicação em me orientar durante todo o processo de elaboração deste trabalho e ainda durante o transcorrer do curso de graduação.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram de maneira direta e indireta para a realização deste momento.

RESUMO

A utilização de moinhos verticais na indústria mineral vem ganhando destaque nas últimas décadas, quando granulometrias mais finas passaram a ser exigidas, principalmente por tais equipamentos apresentarem maior eficiência energética para moagem fina e remoagem em comparação aos equipamentos tradicionais (moinhos tubulares). O dimensionamento destes equipamentos ainda é fortemente embasado por experiências anteriores, metodologias proprietárias dos fornecedores de equipamentos e plantas piloto, criando a necessidade do desenvolvimento de ensaios laboratoriais confiáveis para guiar tais trabalhos. Este trabalho apresenta ensaios laboratoriais com moinho de jarros para dimensionamento de moinhos verticais segundo uma abordagem energética. São apresentadas comparações entre os ensaios com Jarros de 8x10” (em aço carbono e aço inox) atualmente utilizados na indústria e o ensaio com Jarro de 6x8” proposto por Bergerman (2013), bem como comparação com dados industriais e análise do consumo de corpos moedores. O ensaio com Jarro de 6x8” mostrou-se de maior praticidade em relação aos demais e ainda obteve resultados compatíveis aos industriais com diferença inferior a 2% (enquanto os outros ensaios resultaram em discrepâncias da ordem de 10%), indicando sua representatividade frente à realidade industrial e ser uma ferramenta indicada ao dimensionamento de moinhos verticais.

PALAVRAS-CHAVE: dimensionamento, moinho vertical.

ABSTRACT

The use of vertical mills in the mineral industry has increased in recent decades, when finer grain sizes became required, specially because such equipment have higher energy efficiency for fine grinding and regrinding comparing to traditional equipment (horizontal ball mills). Former experiences, proprietary methodologies of equipment's suppliers and pilot plants still ground the sizing of this equipment, creating the need to develop reliable batch tests to guide such work. This work shows batch tests with Jar mill for sizing vertical mills according to an energy approach. Comparisons between 8x10" jars (carbon steel and stainless steel) currently used in the industry and 6x8" jars proposed by Bergerman (2013) are presented, also compared with industrial data and consumption of grinding balls is analysis. The test with 6x8" jar proved to be more practical than others and still showed results compatible to industrial data less than 2% difference (while the other tests resulted in differences in the order of 10%), indicating their representativeness throughout the industrial reality and being a tool for the sizing vertical mills.

KEY-WORDS: sizing, vertical mill.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tower Mill.....	13
Figura 2 - Consumo energético na moagem.....	15
Figura 3 - Jarros utilizados no procedimento laboratorial.....	18
Figura 4 - Equipamento laboratorial de moagem.....	18
Figura 5 - Curvas granulométricas em diferentes tempos de moagem.....	21
Figura 6 - Curvas granulométricas em diferentes tempos de moagem.....	21
Figura 7 -Curvas granulométricas em diferentes tempos de moagem.....	22
Figura 8 - Curvas granulométricas em diferentes tempos de moagem.....	22
Figura 9 - Curvas granulométricas em diferentes tempos de moagem.....	23
Figura 10 - Curvas granulométricas em diferentes tempos de moagem.....	23
Figura 11 - Curvas granulométricas em diferentes tempos de moagem.....	24
Figura 12 - Curvas granulométricas em diferentes tempos de moagem.....	24
Figura 13 - Curvas granulométricas em diferentes tempos de moagem.....	24
Figura 14 - Consumo energético Jarro 8x10” aço inox.....	25
Figura 15 - Consumo energético Jarro 8x10” aço.....	25
Figura 16 - Consumo energético Jarro 6x8” aço inox.....	26
Figura 17 - Consumo energético médio para o Jarro 8x10” de Aço Inox.....	27
Figura 18 - Consumo energético médio para o Jarro 8x10” de Aço.....	27
Figura 19 - Consumo energético médio para o Jarro 6x8” de Aço Inox.....	28
Figura 20 - Consumo energético médio para os diferentes Jarros utilizados.....	28

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Características específicas dos ensaios.	19
Tabela 2 - Variações de massa dos corpos moedores	30
Tabela 3 - Análise granulométricas e valores de P ₉₈ e P ₉₉ para o ensaio 1 em Jarro 6x8”	33
Tabela 4 - Análise granulométricas e valores de P ₉₈ e P ₉₉ para o ensaio 2 em Jarro 6x8”	33
Tabela 5 - Análise granulométricas e valores de P ₉₈ e P ₉₉ para o ensaio 3 em Jarro 6x8”	34
Tabela 6 - Análise granulométricas e valores de P ₉₈ e P ₉₉ para o ensaio 1 em Jarro 8x10” Aço Carbono	34
Tabela 7 - Análise granulométricas e valores de P ₉₈ e P ₉₉ para o ensaio 2 em Jarro 8x10” Aço Carbono.	34
Tabela 8 - Análise granulométricas e valores de P ₉₈ e P ₉₉ para o ensaio 3 em Jarro 8x10” Aço Carbono.	35
Tabela 9 - Análise granulométricas e valores de P ₉₈ e P ₉₉ para o ensaio 1 em Jarro 8x10” Aço INOX.	35
Tabela 10 - Análise granulométricas e valores de P ₉₈ e P ₉₉ para o ensaio 2 em Jarro 8x10” Aço INOX.	35
Tabela 11 - Análise granulométricas e valores de P ₉₈ e P ₉₉ para o ensaio 3 em Jarro 8x10” Aço INOX.	36

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. JUSTIFICATIVA.....	9
3. OBJETIVO.....	10
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
4.1 Moagem.....	12
4.2 O moinho vertical.....	13
4.3 O dimensionamento de equipamentos de moagem.....	15
5. MÉTODOS E TÉCNICAS.....	17
6. RESULTADOS.....	20
6.1 O consumo de corpos moedores.....	29
7. CONCLUSÃO.....	31
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32
APÊNDICE A.....	33

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de alta tecnologia atualmente chamada “High Tech”, presente em nossos celulares, tablets, carros interativos e outros, desvia a atenção da sociedade leiga das atividades tecnológicas voltadas para a indústria de base como a mineração, mascarando o fato de que sem as matérias primas provenientes da natureza não seria possível quaisquer das tecnologias utilizadas em nosso cotidiano.

O desenvolvimento de técnicas e equipamentos mais eficientes e econômicos para indústria mineira beneficia não só este setor, mas a sociedade em geral, por proporcionar maior oferta de matérias primas e preços mais atrativos.

A humanidade faz usos de recursos minerais desde seu primórdio. Com a evolução tecnológica através dos séculos se desenvolveram novas aplicações industriais para minerais, em contrapartida houve uma exaustão da maioria das jazidas de altos teores, principalmente de materiais metálicos, e conseqüente fácil beneficiamento (HARTMAN e MUTMANSKY, 2002).

No início da mineração, quando a humanidade passou a buscar elementos “raros” como moedas de barganha, depósitos tipo placer de gemas e ouro eram explorados intensamente por técnicas rudimentares, assim como jazidas com teores extremamente altos de cobre e estanho alimentaram o desenvolvimento da era do bronze.

Não é difícil de compreender que quanto maior é a procura por elementos minerais que em geral não são abundantes na natureza, mais rapidamente as reservas vão se esgotando e mais difícil será a descoberta de novas jazidas. Vivemos em um cenário onde cada vez mais a recuperação metalúrgica dos elementos metálicos vai exigir processos de alta complexibilidade em virtude dos baixos teores e também difícil liberação.

Nos processos voltados para minerais de baixo teor ou baixo grau de liberação geralmente são empregados circuitos de remoagem, devido a exigência de granulometrias extremamente finas para liberação dos minerais às etapas de concentração e metalurgia. Os processos de moagem tradicionais, principalmente no caso dos moinhos tubulares de carga cadente de bolas, não são eficazes energeticamente para tal aplicação.

Atualmente uma das opções aos tradicionais moinhos de bolas que vem se mostrando energeticamente mais eficiente na moagem de finos são os moinhos verticais de carga agitada por impelidor. O presente trabalho busca apresentar tais equipamento e principalmente validar

um ensaio laboratorial de fácil execução e baixa necessidade de massa de amostra para auxiliar em seu dimensionamento para aplicações na indústria mineral.

2. JUSTIFICATIVA

Os moinhos verticais são em geral aplicados nas etapas de remoagem, as quais utilizam concentrado rougher provenientes da flotação ou material não concentrado de granulometria bastante fina. Uma das dificuldades operacionais de ensaios laboratoriais aplicados aos moinhos verticais é a limitação de amostras de teste nas fases iniciais de projeto (quando não existe ainda uma planta industrial em operação que possa fornecer amostras em maior quantidade).

As amostras utilizadas devem atender as especificações de projeto industrial para que os resultados sejam aplicados ao dimensionamento dos equipamentos reais. Os trabalhos iniciais referentes ao dimensionamento de estruturas industriais voltadas a área mineral devem ser bastante detalhados a fim de minimizar os riscos envolvidos no projeto, que devido à natureza dos empreendimentos são, por natureza, elevados.

Dessa forma, quando está disponível apenas o material “bruto”, proveniente da mina, é necessário que todos os procedimentos de cominuição, classificação e concentração sejam realizados em equipamentos laboratoriais, cuja capacidade de processamento é extremamente reduzida e o custo unitário bastante elevado (devido à demanda de tempo e pessoal para operação).

O ensaio que se deseja validar neste trabalho, necessita de cerca de 500 g de amostra, massa que representa a metade da amostra requerida em ensaios tradicionais. Inicialmente pode-se parecer que esta redução de amostra é insignificante, principalmente quando falamos da indústria mineira que tradicionalmente movimenta as maiores massas de produtos entre quaisquer outras indústrias, mas para a produção de 1.000g de concentrado rougher é necessário a flotação de mais de 10.000g em células laboratoriais com capacidade em torno de 1.000g de minério, sem mencionar a difícil cominuição realizada em britadores e moinhos de bancada. Outra grande vantagem é a facilidade de manipulação do jarro menor em comparação com o tradicional.

Os moinhos verticais já encontram-se instalados em diversas usinas ao redor do mundo e mesmo com tal difusão ainda não existe um método de previsão do consumo

específico de energia de moagem para posterior dimensionamento destes equipamentos tomado por unanimidade entre os profissionais projetistas.

A confrontação entre os dados laboratoriais com os industriais fornecidos por empresas mineradoras proporcionará a avaliação da compatibilidade dos métodos laboratoriais com a realidade industrial e fornecerá argumentos para uma maior difusão da utilização destes ensaios como parâmetro de projeto, contribuindo também na expansão da utilização desta tecnologia energeticamente mais eficiente para remoagem.

3. OBJETIVO

O presente trabalho de conclusão de curso tem por principal objetivo a avaliação de ensaios laboratoriais utilizando moinho de jarros como opção de referência ao dimensionamento de moinhos verticais para a indústria de mineração, comparando ensaios em jarros de 8x10” utilizados tradicionalmente com o ensaio em jarro de 6x8” proposto por Bergerman (2013) buscando sua validação, além de analisar os resultados obtidos com jarros construídos em aço inoxidável e aço carbono determinando a influência destes sobre a moagem. As discussões acerca da validação dos ensaios levarão em conta ainda a comparação dos resultados laboratoriais com dados técnicos industriais da planta de beneficiamento do Sossego da empresa Vale S.A. em operação no país.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os minerais disponíveis na natureza são recursos aproveitados das mais diversas formas a milhares de anos pela sociedade humana. Mesmo minerais de aplicação mais simples até os considerados nobres e caros tem que passar por algum tipo de procedimento ou processamento para tornar possível sua aplicação ao uso humano.

Dentre as diversas operações unitárias que são utilizadas no beneficiamento mineral uma que merece grande destaque é a cominuição. Segundo Chaves e Peres (2009), “cominuição é o conjunto de operações de redução de tamanhos de partículas minerais, executado de maneira controlada e do modo a cumprir um objetivo pré-determinado”. Dentre tais objetivos pré-determinados encontram-se a obtenção da granulometria exigida nos processos subsequentes e o controle da excessiva geração de particulados finos.

As operações de cominuição mineral são divididas basicamente em britagem e moagem (CHAVES e PERES, 2009), no entanto este tipo de classificação varia muito de autor para autor, juntamente com as granulometrias associadas a cada classificação. Uma classificação mais detalhada da etapa de moagem é fornecida por (JANCOVIK, 2003), onde está subdividida de acordo com sua granulometria resultante em convencional, remoagem, moagem fina e moagem ultrafina. Nos procedimentos industriais tal operação se faz indispensável para possibilitar o manuseio adequado do material lavrado, já que qualquer tipo de transporte ou carregamento tem limites de tamanho de partícula a ser aplicada por restrições de dimensões de equipamento, tecnologia empregada ou mesmo pela massa de grandes blocos demandarem equipamentos extremamente potentes em seu deslocamento enquanto a mesma massa disposta em partículas menores pode ser manuseada por um equipamento muito menos potente e barato.

Quando visamos transportes contínuos as restrições granulométricas são ainda mais imprescindíveis. As correias transportadoras, bombas de polpa e minerodutos resultam em grande economia de energia e despesas no traslado de grandes volumes de minerais, no entanto, estes equipamentos só são aplicáveis a uma granulometria específica que dificilmente é encontrada no material *in situ*, fazendo da cominuição uma operação préviaindispensável.

Os minerais não podem ser aplicados diretamente na sociedade, mesmo os que não passam por processos de concentração ou tratamento químico, como é o caso da brita. Rochas competentes como o gnaisse ou o basalto possuem propriedades bastante interessantes na utilização como agregado para construção civil onde são utilizadas em sua forma natural, no entanto cada aplicação de concreto armado a lastro ferroviário demanda granulometrias específicas indispensáveis ao bom desempenho do material. Outro exemplo de material que em virtude do tipo de aplicação demanda granulometria específica é o carvão mineral, que quando queimado em grelhas precisa ser graúdo e estar livre de finos e quando queimado em maçaricos deve estar pulverizado (CHAVES e PERES, 2009).

Nos minerais que demandam beneficiamentos mais complexos a cominuição é a base de todo o processo, pois é a partir desta operação que são liberados os minerais de interesse, possibilitando posterior separação destes de sua ganga.

A etapa inicial de cominuição é a britagem, onde a relação de redução das partículas é menor (relação entre o tamanho inicial e final da partícula) e a energia mecânica aplicada pelos britadores sobre os blocos é extremamente elevada. Neste processo blocos de rocha são reduzidos a partículas de cerca de um sexto de seu tamanho inicial, sendo a aplicação de sucessivos processos de britagem indispensável na maior parte das usinas de beneficiamento

mineral. Os mecanismos de redução das partículas são principalmente compressão e impacto (CHAVES e PERES, 2009).

Após as partículas assumirem dimensões adequadas à sua introdução em circuitos de moagem estas são destinadas aos moinhos, equipamento de cominuição onde a relação de redução de tamanho de partículas é muito mais elevada que a atingida nos britadores. Nesta etapa as partículas podem ser cominuídas até atingir granulometrias muito finas, compatíveis ao silte ou argila.

4.1 Moagem

Segundo Chaves e Peres (2009), “a moagem compreende as operações de cominuição na faixa de tamanhos abaixo de $\frac{3}{4}$ ” e é efetuada mediante os mecanismos de arredondamento das partículas, quebra de pontas e abrasão”. Os principais equipamentos de moagem utilizados atualmente são moinhos horizontais de carga cadente constituídos de um grande e robusto cilindro metálico girado ao redor de seu eixo central por potentes motores elétricos. O equipamento promove a movimentação das partículas em seu interior juntamente com os corpos moedores utilizados.

Tradicionalmente os principais corpos moedores utilizados são bolas (moinho de bolas e SAG) e barras metálicas (moinho de barras) ou mesmo blocos maiores que as partículas que se deseje cominuir constituídos do próprio material processado (moinhos autógenos).

A faixa usual de operação de tais moinhos é definida para alimentação como material abaixo de 3 – 4 mm (moinhos de bolas) e de 3 – 6 mm (moinhos de barras), sendo que os produtos gerados normalmente apresentam granulometria variando entre 5 e 100 mm dependendo das condições de operação (tempo de residência, formato e carga de corpos moedores) e das propriedades do minério. Na prática tais granulometrias apresentam significativas discrepâncias em decorrência do tipo de circuito empregado e do material de alimentação (CHAVES e PERES, 2009).

O consumo específico de energia em moinhos de bolas aumenta significativamente para produtos de granulometria abaixo de 75 μm , devido a suas limitações técnicas para tal procedimento, principalmente em decorrência do tamanho de bolas utilizado (superior a 25 mm) e ao método de quebra aplicado sobre as partículas, que nestes equipamentos alia abrasão e impacto (BERGERMAN, 2013). Quanto menor o tamanho da partícula menos eficiente é sua quebra por impacto por haver maior quantidade de energia dissipada pelo

impacto entre os próprios corpos moedores e o tamanho de bolas interfere diretamente na dimensão dos interstícios ocupados pelo minério a ser cominuído sendo que para moagens mais finas se faz necessário corpos moedores menores (BERGERMAN, 2013)

4.2 O moinho vertical

O moinho vertical de carga agitada por impelidor foi criado no Japão na década de 1950 pela empresa Kubota Tower Mill Corporation, com o objetivo de ser aplicado em moagens finas e ultrafinas com uma eficiência energética superior a dos equipamentos disponíveis na época. Este foi o primeiro moinho vertical a ser aplicado na indústria e pode ser chamado de moinho de torre ou Tower Mill. A Figura 1 ilustra a configuração básica dos primeiros moinhos verticais.

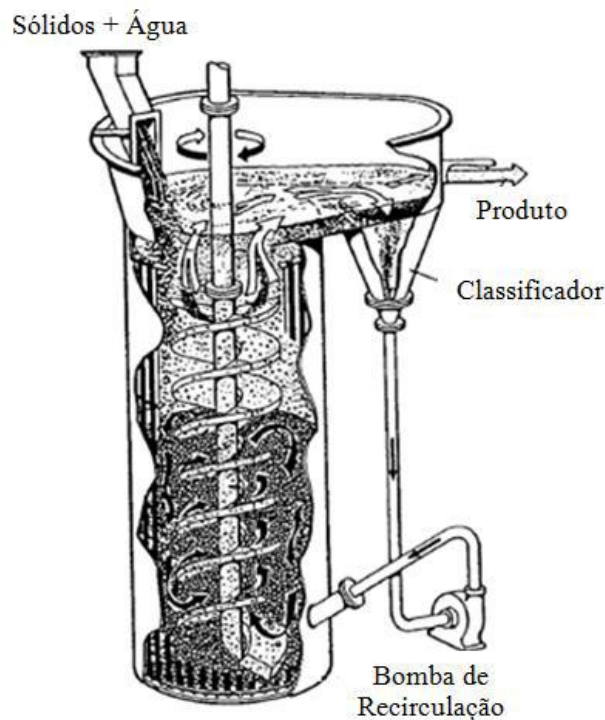


Figura 1 - Tower Mill.
Fonte: Mazzingly (2002).

Os moinhos verticais são equipamentos compostos, basicamente, de um tanque cilíndrico dotado internamente de impelidor na forma de espiral que promove a agitação dos corpos moedores e da polpa. O movimento do impelidor se dá através de um motor elétrico instalado na parte superior do equipamento e conectado a este por um sistema de redução.

A fabricante de equipamentos para indústria mineira, METSO tem se mostrado atualmente como líder mundial na produção de moinhos verticais, a nomenclatura comercial de seu produto é *Vertimill*®, presente no mercado desde 1990 que possui basicamente o mesmo princípio de funcionamento do *Tower Mill* (MAZZINGLY, 2002).

Bergerman (2013) afirma que ao contrário dos moinhos tubulares de bolas, nos quais a rotação do corpo cilíndrico imprime movimento aos corpos moedores, os moinhos agitados por impelidores, proporcionam a movimentação da carga por “agitadores” ou impelidores internos ao corpo principal do moinho, enquanto a parte cilíndrica mantém-se estática.

Os moinhos verticais apresentam vantagens e desvantagens quando comparados aos tradicionais moinhos de bolas. Segundo Mazzingly (2002) as vantagens apresentadas por tais equipamentos são:

- Menor geração de ruído;
- Menor espaço de instalação;
- Menor quantidade de periféricos;
- Instalação simples e rápida;
- Bases civis mais simples;
- Maior segurança, devido à menor exposição de partes móveis;
- Menor consumo de energia por tonelada de minério processado;
- Menor consumo de corpos moedores e revestimentos.

Segundo o mesmo autor, as desvantagens dos moinhos verticais frente aos moinhos de bolas são principalmente sua baixa capacidade, a capacidade de processamento destes equipamentos vem evoluindo substancialmente como pode ser verificado no recente lançamento da Metso o *Vertimill* modelo VTM 4500 com potência de 4,5MW, e a necessidade de retirada de toda a carga moedora para inspeção e/ou manutenção devido à tecnologia empregada. Outra desvantagem a ser citada é a restrita faixa de operação destes equipamentos, que operam apenas com alimentação de granulometria reduzida.

A eficiência energética do moinho vertical frente ao moinho de bolas pode ser melhor visualizada na Figura 2. Nota-se que à medida que moagens finas e ultrafinas são requeridas, o moinho de carga agitada é mais eficiente energeticamente que seu concorrente, já quando visa-se moagens mais granulares, ou dentro de faixas convencionais, a melhor opção ainda são os moinhos de bolas.

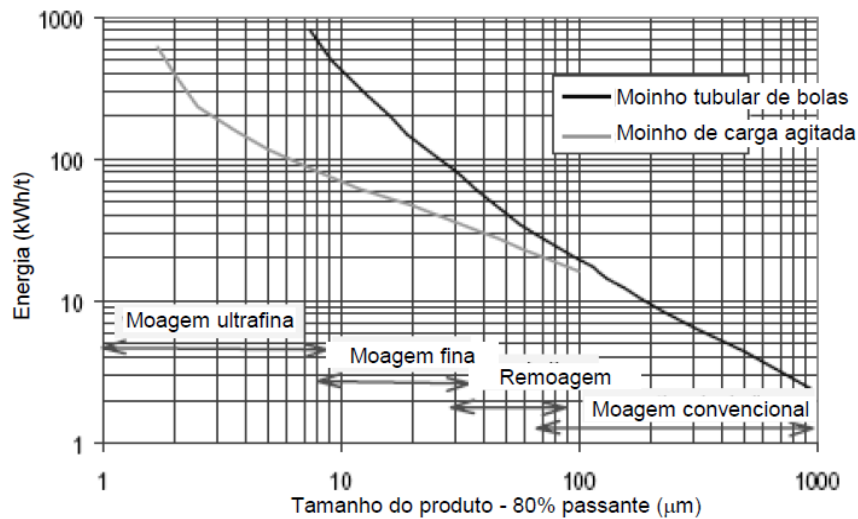


Figura 2 - Consumo energético na moagem.
 Fonte: Jankovic (2003). Adaptado por Bergerman (2013).

Em um moinho vertical a carga de corpos moedores e a polpa de minério são movimentados pelo impelidor, de forma a não ocorrerem significativas quedas destes corpos e conseqüentemente não existindo quebra por impacto, diferentemente dos moinhos de bolas. O movimento interno da carga do moinho aliado ao rolamento dos corpos promove quebra por atrição ou abrasão, eficiente para partículas finas (BERGERMAN, 2013).

4.3 O dimensionamento de equipamentos de moagem

As teorias relativas à cominuição relacionam-se com a energia necessária para redução do tamanho das partículas. As duas primeiras teorias apresentadas neste contexto foram de Rittinger e de Kick, que relacionam a energia gasta com a área e a relação de redução após a cominuição, respectivamente. Contudo essas teorias não eram totalmente satisfatórias, pois não se mostraram válidas nas faixas usuais de trabalho da moagem. Dessa maneira, Bond, após vários testes laboratoriais e comparações com resultados industriais, desenvolveu uma terceira teoria representada pela Equação 1 (HONÓRIO, 2010).

$$W = \frac{10WI}{\sqrt{P}} - \frac{10WI}{\sqrt{F}} \quad , \quad (1)$$

onde WI é o *work index*, que numericamente corresponde ao trabalho, expresso em kWh/t, necessário para reduzir o minério, desde um tamanho infinito até um material 80% passante

na abertura. P e F correspondem à abertura das peneiras da série Tyler na qual passam 80% do material do produto e da alimentação, respectivamente.

O teste para determinar o WI visa calcular, através de um circuito fechado de moagem, com uma determinada carga circulante estabilizada, a quantidade de produto menor que a malha pré-determinada denominada malha teste, produzido pelo número calculado de rotações do moinho de bolas.

Este procedimento é realizado em moinho de bolas tubular em escala laboratorial de dimensões, número e tamanhos de corpos moedores padronizados. Os trabalhos de Bond norteiam o dimensionamento de moinhos de bolas e barras a décadas, e mesmo com o avanço tecnológico das simulações computacionais, seu método ainda é a base de todo o planejamento de instalações tradicionais de moagem na indústria mineral. No entanto, na aplicação para remoagem tal procedimento se mostrou impreciso, devido à faixa granulométrica de operação não atender as especificações do ensaio.

Para os moinhos verticais o dimensionamento ainda é fortemente embasado por experiências anteriores e aplicação de plantas piloto. A Metso disponibiliza planta piloto a seus clientes na cidade de York, Estados Unidos. Este tipo de procedimento tem grande importância nos projetos de usinas, mas é de difícil operação já que são requeridas grandes massas de amostra e ainda acrescenta-se os custos de transporte até a unidade teste, fazendo com que seja aplicado após testes laboratoriais para confirmação dos dados.

Os fabricantes de moinhos verticais desenvolveram ensaios simplificados para o dimensionamento de circuitos de remoagem segundo uma abordagem energética (semelhante a Bond). Entretanto, tais ensaios não são padronizados e apresentam pouco detalhamento na literatura. Dentre estes, o ensaio utilizado pela Metso inclui o uso de ensaio de moagem com jarros aliado a testes de WI, podendo ser aplicado resultados de planta piloto. Os procedimentos consistem basicamente em três etapas (descritas sucintamente pelo fabricante) (METSO, 2013):

- Determinação do WI de Bond, com utilização dos fatores EF4 para alimentação de maior granulometria e o EF5 para moagem abaixo de 74 μ m, quando necessário são realizados ajustes no F₈₀ e vazão.
- Ensaio de jarro, não detalhado, divulgado apenas que o revestimento do jarro de aço é liso, necessita de pequena amostra, trata-se de um ensaio reprodutível e que são usados fatores de correção baseados na experiência industrial.
- Ensaio em planta piloto de 3kW com utilização de 2 a 4 toneladas de material.

Existem outros ensaios de mesma abordagem disponíveis atualmente, em sua maioria com a utilização de moinho de jarros, no entanto sem uma padronização e correlações entre diferentes ensaios que permitam uma ampla utilização em projetos como visto anteriormente com Bond.

A abordagem energética do dimensionamento de instalações de moagem é guiada pela extrapolação dos dados obtidos em pequena escala acerca do gasto energético necessário à cominuição de um material à granulometria requerida ou simplesmente a correlação entre a energia aplicada e a granulometria resultante do processo de cominuição.

Neste aspecto é de extrema importância a equação proposta por ROWLAND (1986) para estimativa de potência requerida de moinhos de bolas com diâmetro inferior a 0,76m. Apresentada na Equação 2:

$$P_{bola} = 6,3 * D_m^{0,3} * sen\left(51 - 22\left(\frac{2,44 - D_m}{2,44}\right)\right) * (3,2 - 3J) * V_c * \left(1 - \frac{0,1}{2^{(9-10V_c)}}\right) \quad (2)$$

sendo:

P_{bola} = potência no eixo pinhão (kW/t de bolas);

D_m = diâmetro interno do moinho (m);

J = enchimento de bolas (volume de bolas carregado no moinho);

V_c = fração da velocidade crítica.

Ao aplicarmos na Equação 2 as características físicas e de operação do moinho utilizado podemos calcular a potência específica gasta na moagem em equipamentos de pequeno porte (diâmetro inferior a 0,76m). Esta informação é empregada no dimensionamento de equipamentos de moagem extrapolando-se a potência obtida laboratorialmente às necessidades industriais.

5. MÉTODOS E TÉCNICAS

Os ensaios de moagem foram realizados em moinho laboratorial de jarros, com a utilização de três jarros diferentes, 6”x8” de aço inox, 8”x10” de aço inox e 8”x10” de aço carbono (a partir deste momento este jarro será tratado apenas por jarro de aço), todos os

modelos apresentam interior liso. Os jarros utilizados podem ser visualizados na Figura 3. O equipamento utilizado (moinho de jarros), bem como a disposição do jarro neste, pode ser melhor visualizado na Figura 4.



Figura 3 - Jarros utilizados no procedimento laboratorial.
Fonte: Acervo pessoal do autor.



Figura 4 - Equipamento laboratorial de moagem.
Fonte: Acervo pessoal do autor.

O equipamento utilizado não apresenta mostrador referente ao número de rotações por minuto a que o jarro é submetido, para este controle é utilizado um tacômetro digital marca Minipa modelo MDT-2238A para calibração do moinho. Esta calibração deve ser realizada antes da colocação do jarro com a amostra (a carga moedora deve estar presente no jarro durante a aferição).

A carga de cada jarro corresponde a aproximadamente 40% de sua capacidade total, sendo que a polpa (amostra mais água) ocupa apenas os interstícios dos corpos moedores, não se sobressaindo a seu volume aparente. Para respeitar tais condições, as massas de amostra e água variam de acordo com o tamanho do jarro e densidade do material a ser moído, os valores correspondentes a cada ensaio com a amostra de minério de cobre, proveniente da mina do Sossego pertencente à empresa Vale podem ser visualizados na Tabela 1. A amostra

foi coletada em 13 de dezembro de 2011, detalhes acerca da amostragem utilizada e características do material estão disponíveis em Bergerman (2013).

Tabela 1 - Características específicas dos ensaios.

Tipo de jarro	Tamanho	Interior	Velocidade do jarro (rpm)	Porcentagem de sólidos (massa)	Massa de minério (g)	Massa de água (g)
Aço carbono	8x10	Sem barras	71,3	50	1007	1007
Aço inox	8x10	Sem barras	71,3	50	1007	1007
Aço inox	6x8	Sem barras	82,35	50	530	530

Os corpos moedores são formados por esferas de aço com diâmetro de 12,7mm, a massa de esferas é constante em todos os ensaios que utilizam o mesmo jarro, sendo esta massa de 7,657kg para o jarro menor e de 15,870Kg para o maior. Para a prática foi utilizado um suprimento de cerca de 20 Kg de esferas de aço, sendo que a fim de medir o consumo de corpos moedores, no início dos trabalhos foram pesadas 20 esferas aleatórias sendo o procedimento repetido ao termino dos ensaios para cálculo da diferença de massas.

Toda a massa de esferas utilizada passou pelo mesmo número de ensaios de moagem, de forma a sofrer um desgaste uniforme. As esferas foram reutilizadas durante todos os ensaios de moagem.

Inicialmente a carga de corpos moedores é pesada e transferida ao jarro. As amostras são pesadas de acordo com a massa previamente determinada. Em um balde plástico de capacidade três litros, é adicionada parte da água previamente determinada e em seguida a amostra, com movimentos circulares mistura-se até a formação de uma polpa. Após homogeneização esta polpa é transferida ao jarro de ensaio sobre as esferas, utilizando-se o restante da água para lavar o balde de mistura e outros acessórios utilizados na homogeneização a fim de retirar toda amostra neles contida.

O jarro parcialmente preenchido com a polpa e a carga moedora é fechado com sistema de parafuso que “prensa” uma tampa metálica revestida nas bordas com borracha, de maneira a veda-lo. O jarro vedado é colocado no moinho previamente calibrado e este é acionado durante o tempo estabelecido ao ensaio (tempo controlado por cronômetro digital).

Ao término da moagem a polpa é separada dos corpos moedores por lavagem com auxílio de uma peneira, sendo posteriormente armazenada em recipiente plástico para decantação. Após decantação é retirado o excesso de água da polpa e o material sólido é secado em estufa a 60°C durante 36 horas. Após secagem o material é quarteado e uma

amostra de cerca de 100 gramas passa por peneiramento manual a úmido nas peneiras, 100#, 140#, 200#, 270# e 400#.

O retido em cada malha é submetido a secagem a 80°C por 24 horas e posteriormente pesado, o passante final passa por decantação e nas mesmas condições. Os resultados obtidos são registrados para posterior confecção das curvas granulométricas, cálculo dos erros referentes aos ensaios e análise, nestes procedimentos será utilizado o software Excel.

Neste trabalho foram realizados 36 ensaios de moagem, divididos em três baterias de ensaios para cada um dos jarros, sendo utilizados quatro diferentes tempos de moagem (5, 10, 20 e 30 minutos) de forma a que cada ensaio foi repetido por três vezes.

Por limitações do procedimento de peneiramento utilizado, em relação a granulometria excessivamente fina característica deste tipo de moagem, não foi possível a obtenção do P₈₀ (parâmetro amplamente utilizado na indústria), para tal se faz necessária análise granulométrica por difração a laser ou técnica similar. Nas análises subsequentes utilizaremos principalmente o parâmetro P₉₈, por sua importância na prática industrial e representatividade dentro dos resultados experimentais.

6. RESULTADOS

Após as etapas experimentais foi possível a obtenção de curvas granulométricas para cada ensaio realizado e conseqüentemente a determinação do P₉₈ e P₉₉ (granulometria onde 98% e 99% respectivamente do produto é passante).

As curvas granulométricas referentes às baterias de ensaios (com tempos de moagem variados) realizados com o jarro 8x10” fabricado em aço Inox são apresentadas nos gráficos da Figura 5, Figura 6 e Figura 7.

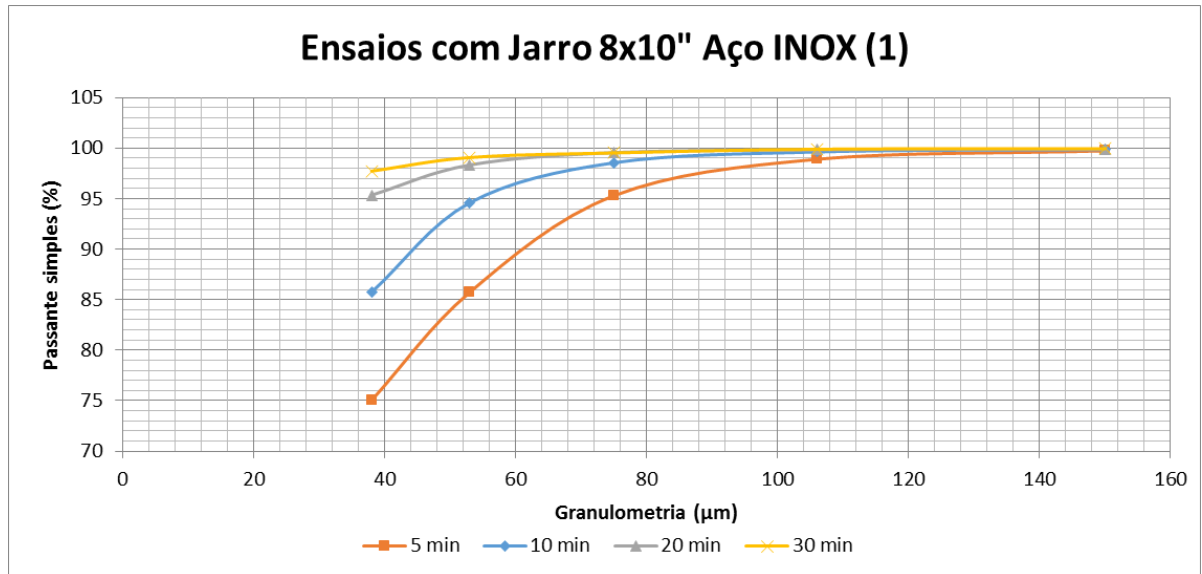


Figura 5 - Curvas granulométricas em diferentes tempos de moagem

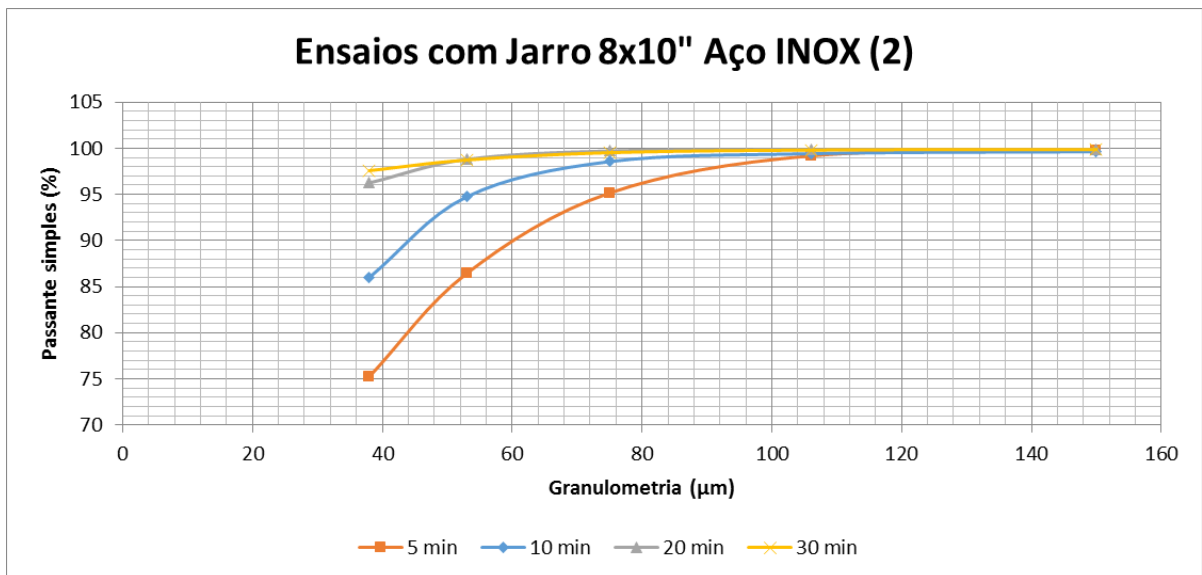


Figura 6 - Curvas granulométricas em diferentes tempos de moagem.

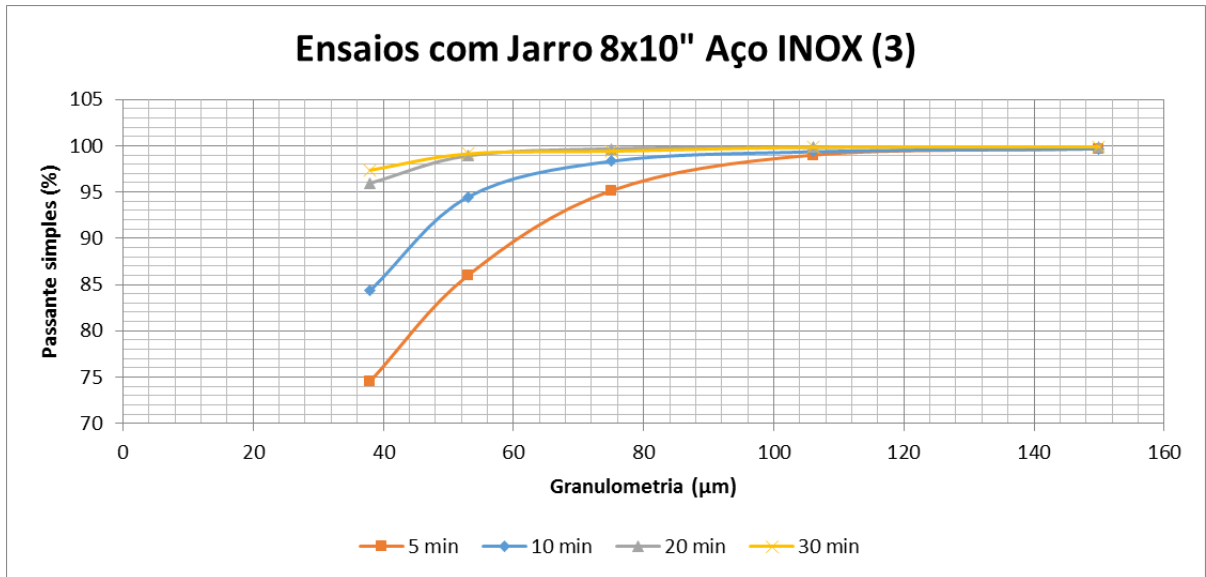


Figura 7 - Curvas granulométricas em diferentes tempos de moagem.

As curvas granulométricas referentes às baterias de ensaios (com tempos de moagem variados) realizados com o jarro 8x10" fabricado em aço convencional são apresentadas nos gráficos da Figura 8, Figura 9 e Figura 10.

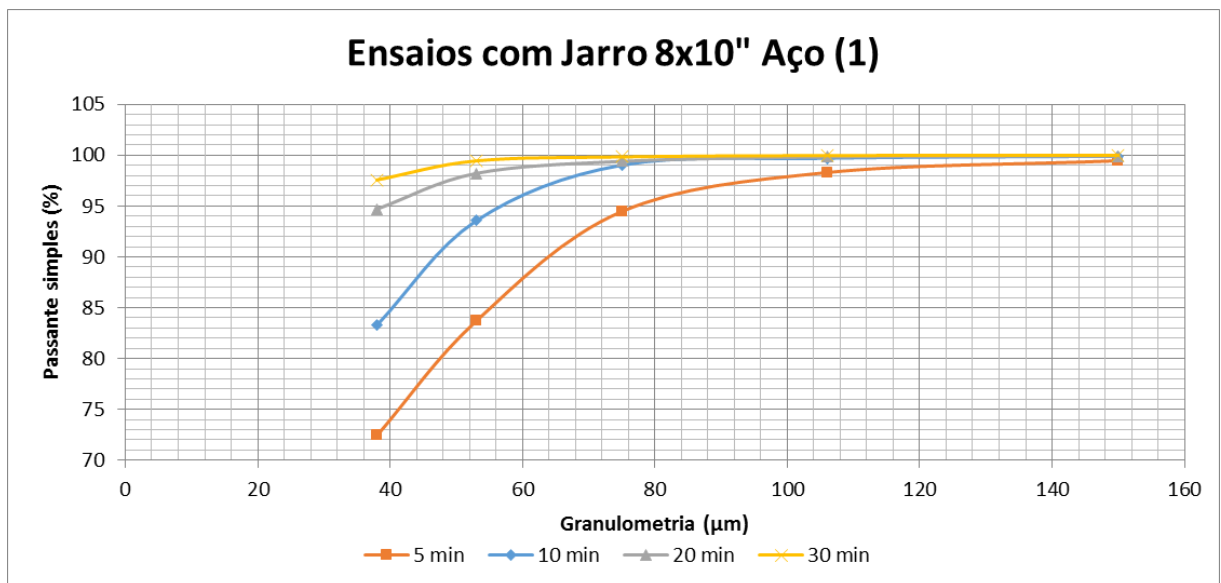


Figura 8 - Curvas granulométricas em diferentes tempos de moagem.

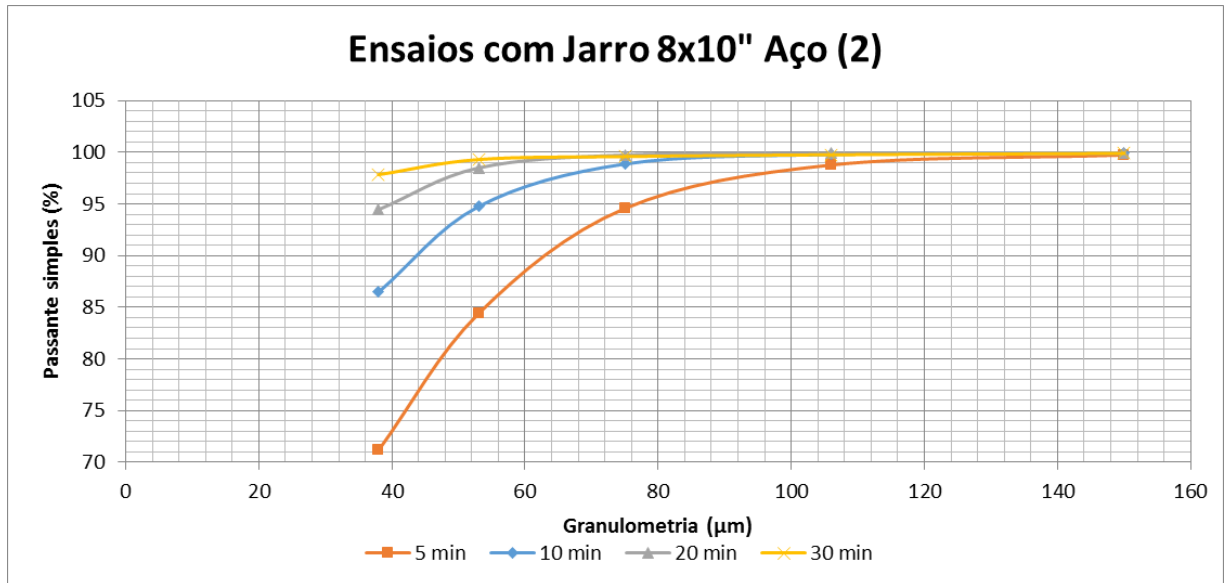


Figura 9 - Curvas granulométricas em diferentes tempos de moagem.

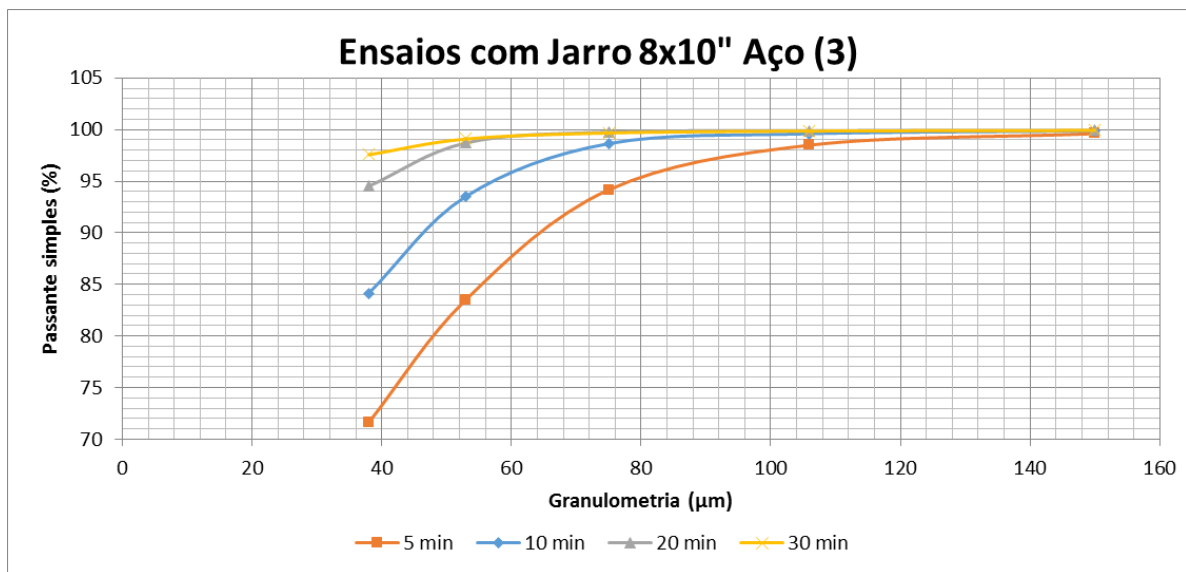


Figura 10 - Curvas granulométricas em diferentes tempos de moagem.

As curvas granulométricas referentes às baterias de ensaios (com tempos de moagem variados) realizados com o jarro 6x8'' fabricado em aço INOX são apresentadas nos gráficos da Figura 11, Figura 12 e Figura 13.

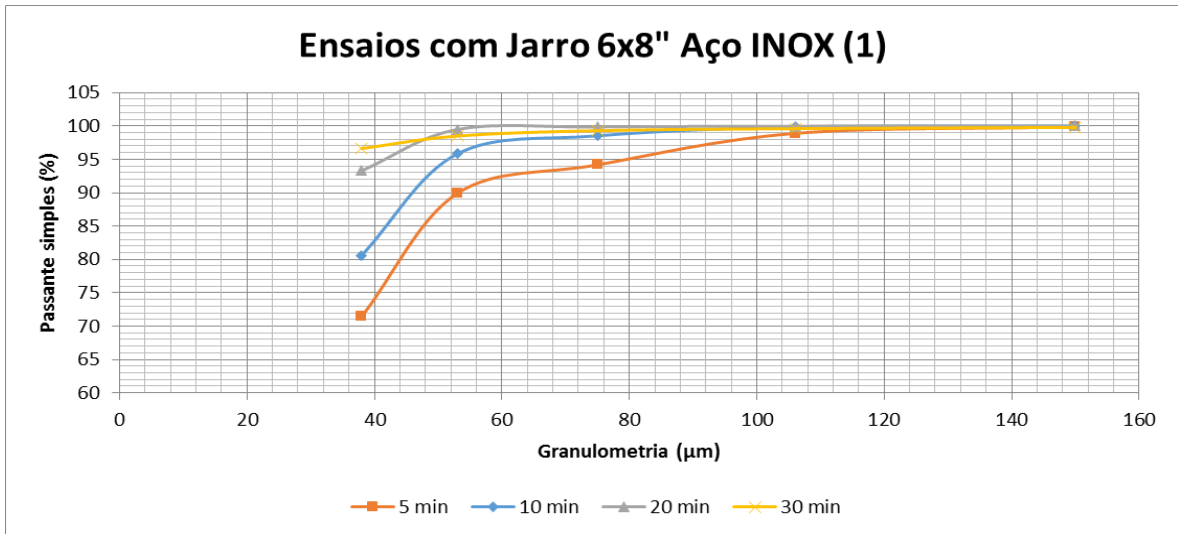


Figura 11 - Curvas granulométricas em diferentes tempos de moagem.

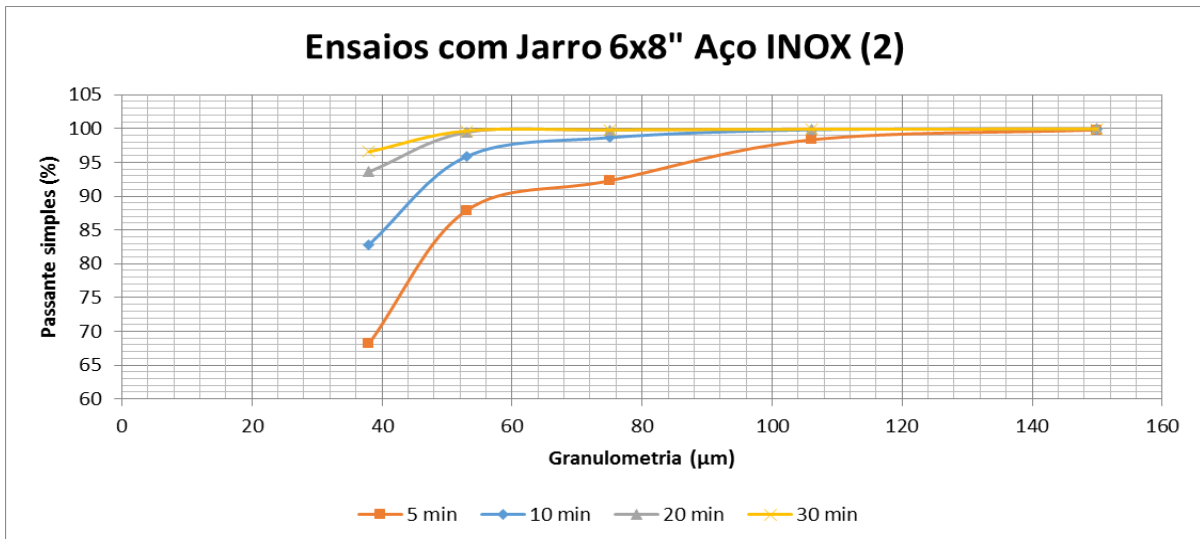


Figura 12 - Curvas granulométricas em diferentes tempos de moagem.

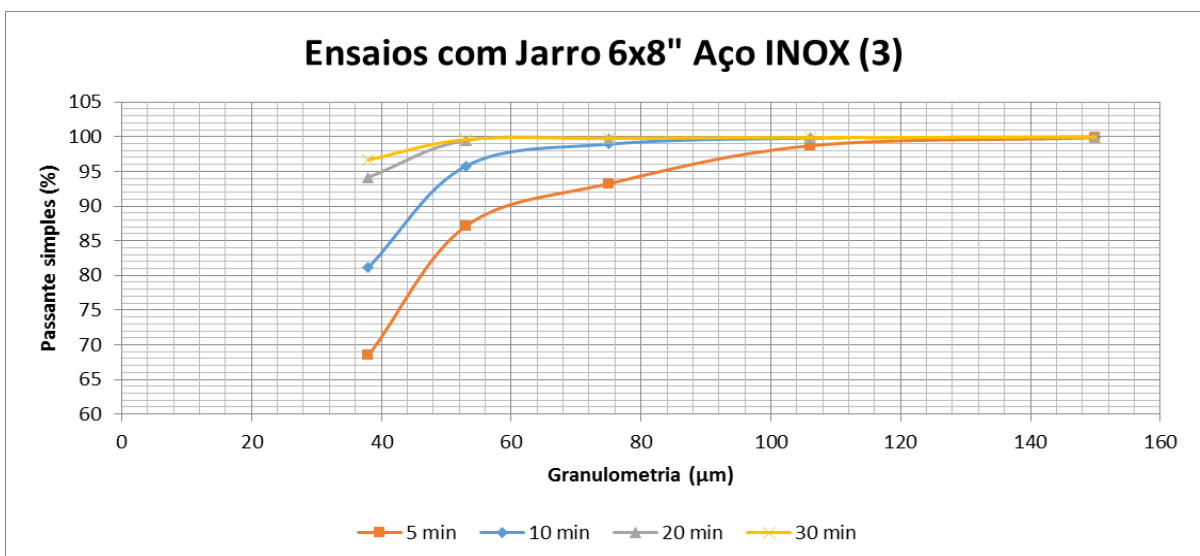


Figura 13 - Curvas granulométricas em diferentes tempos de moagem.

Os ensaios realizados visam o dimensionamento de moinhos verticais segundo uma abordagem energética, para tal se fez necessário a aplicação das características dos jarros utilizados bem como as variáveis de enchimento e tempo destes na Equação 2 para o cálculo da potência consumida em cada ensaio. Os resultados deste gasto energético por tonelada de minério moído bem como o P₉₈ resultante são apresentados em forma de gráfico na Figura 14, Figura 15 e Figura 16. Cada gráfico apresenta três curvas, cada qual referente a uma das baterias de ensaios com variação de tempo (onde parâmetros de enchimento e tipo de jarro são constantes).

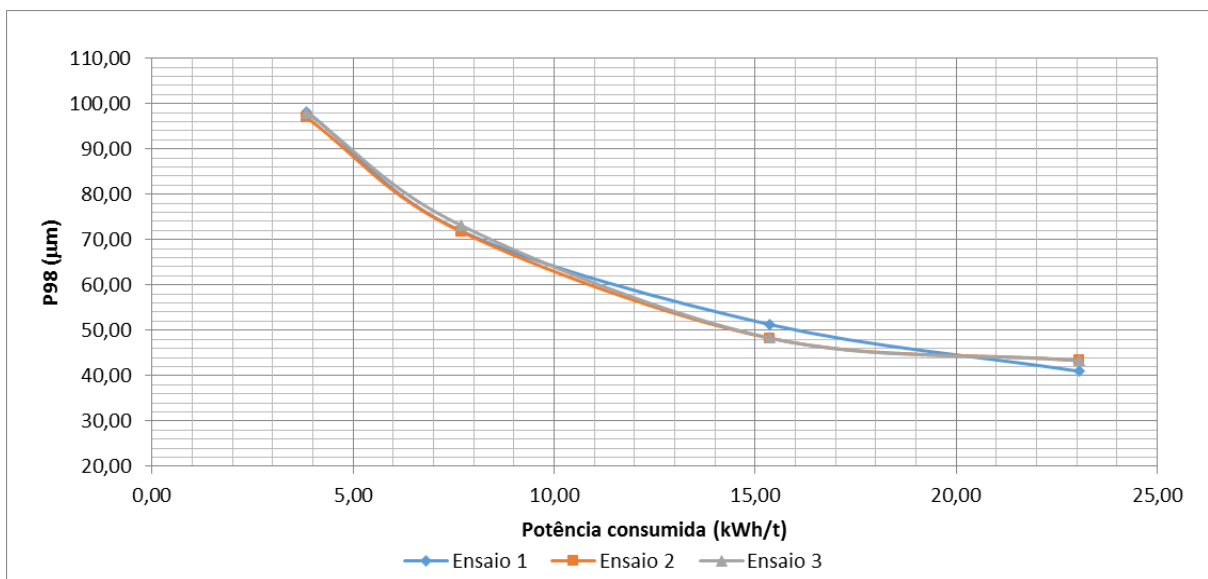


Figura 14 - Consumo energético Jarro 8x10" aço inox.

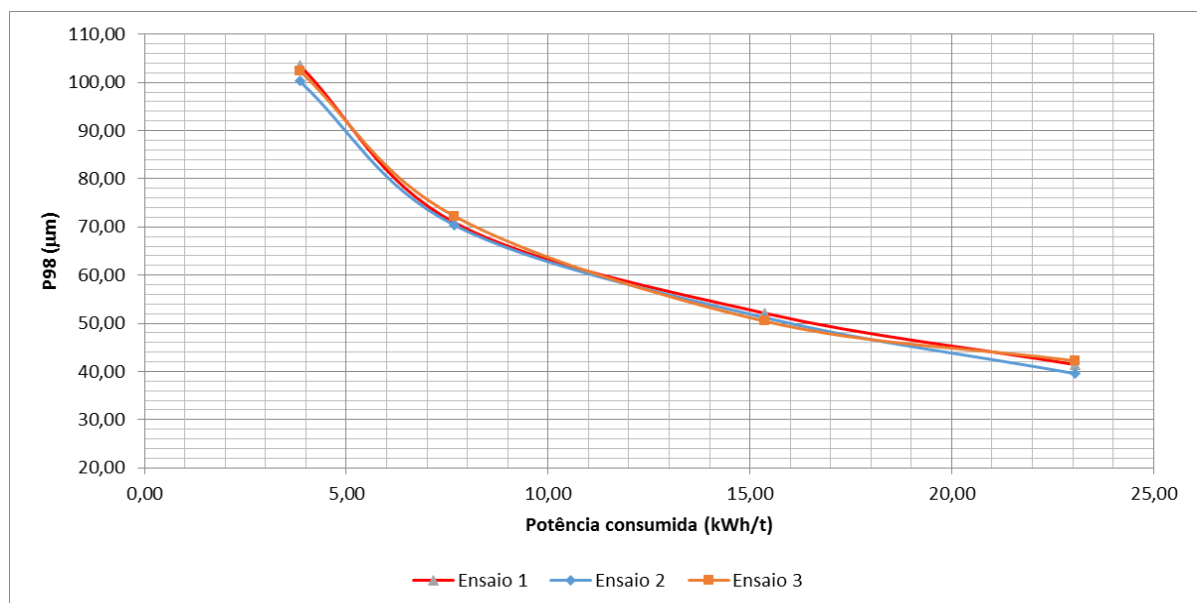


Figura 15 - Consumo energético Jarro 8x10" aço.

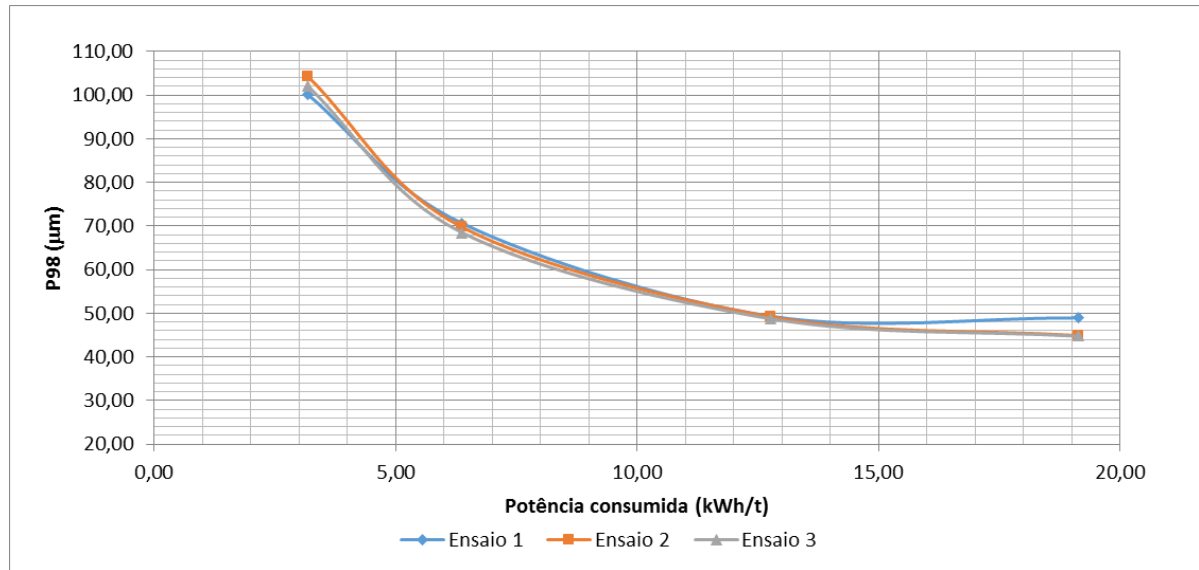


Figura 16 - Consumo energético Jarro 6x8'' aço inox.

Nos três gráficos apresentados podemos observar que as curvas se apresentam sistematicamente sobrepostas, designando a alta repetibilidade de tais ensaios. Esta característica é de grande importância por dar confiabilidade na aplicação dos três ensaios como ferramentas de estudo dentro da moagem mineral e garantir que seguidos os procedimentos anteriormente descritos obteremos resultados experimentais confiáveis e passíveis de verificação em diferentes laboratórios.

Quando adotamos práticas laboratoriais para dimensionamento de estruturas industriais é indispensável que os ensaios em pequena escala sejam reproduzíveis, pois em caso contrário seus resultados podem ser interpretados como meras ocasionalidades e não serem passíveis de embasar projetos industriais de grande escala monetária.

Para uma análise mais aprofundada dos resultados se fez necessária uma abordagem estatística dos dados, dessa forma é possível visualizar o erro experimental associado aos resultados dos ensaios, segundo Bergerman (2013) as incertezas acerca do cálculo da potência energética (Equação 2) são desprezíveis nesta análise por aferirem influência desprezível sobre os resultados finais, desta forma são abordados neste trabalho apenas as incertezas experimentais. A seguir são apresentados nas Figuras 17, 18 e 19 os resultados médios do consumo específico de energia nos ensaios de moagem em relação ao P98 obtido bem como o erro experimental associado a estes.

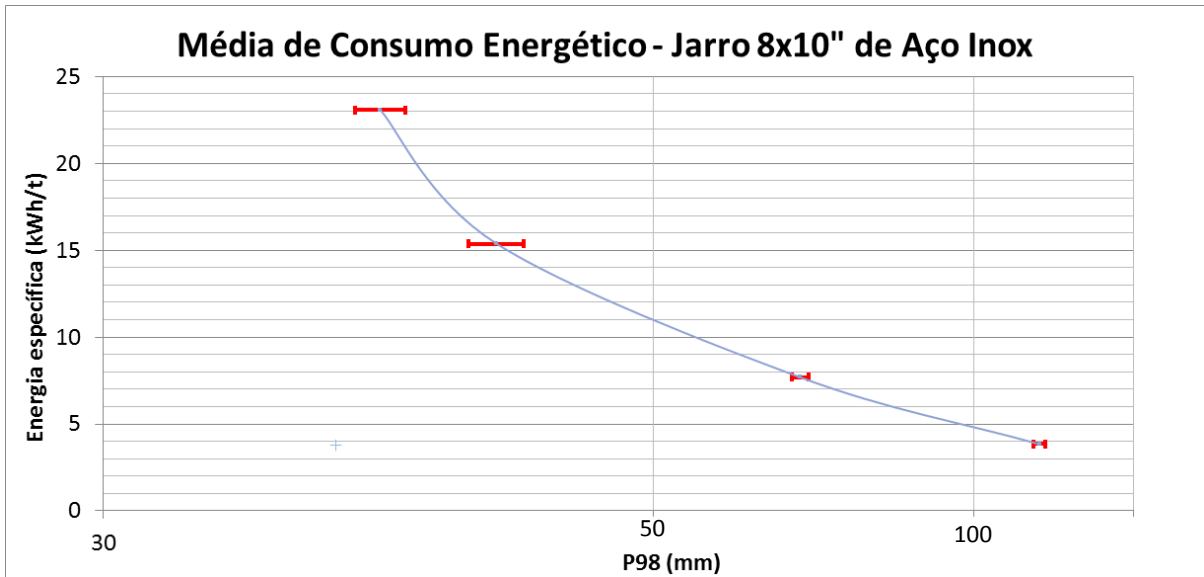


Figura 17 - Consumo energético médio para o Jarro 8x10" de Aço Inox.

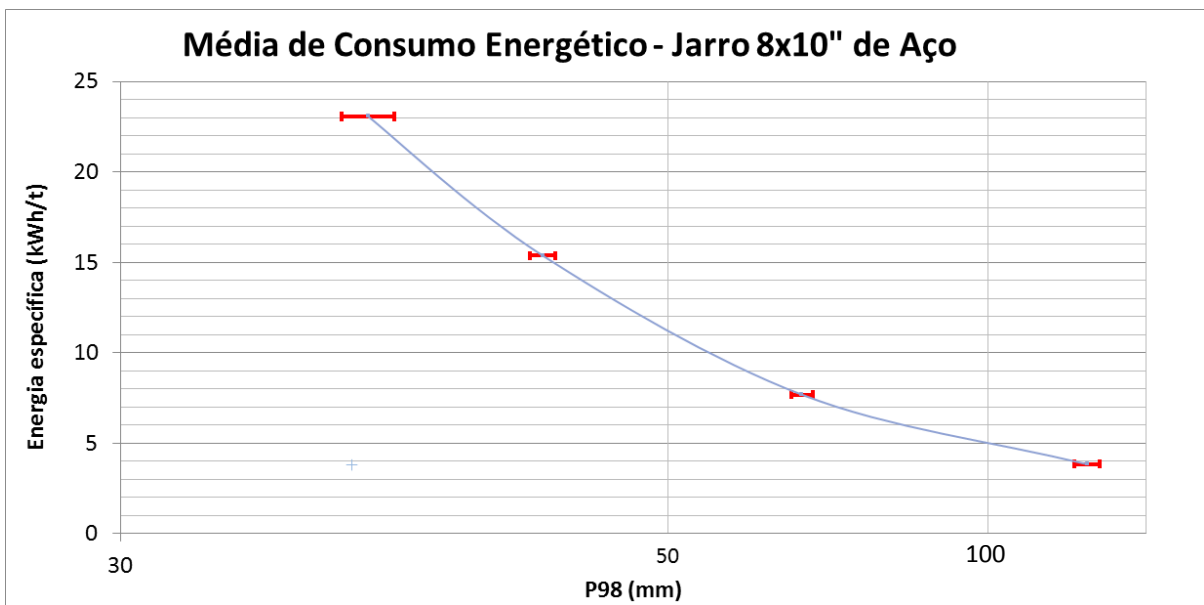


Figura 18 - Consumo energético médio para o Jarro 8x10" de Aço.

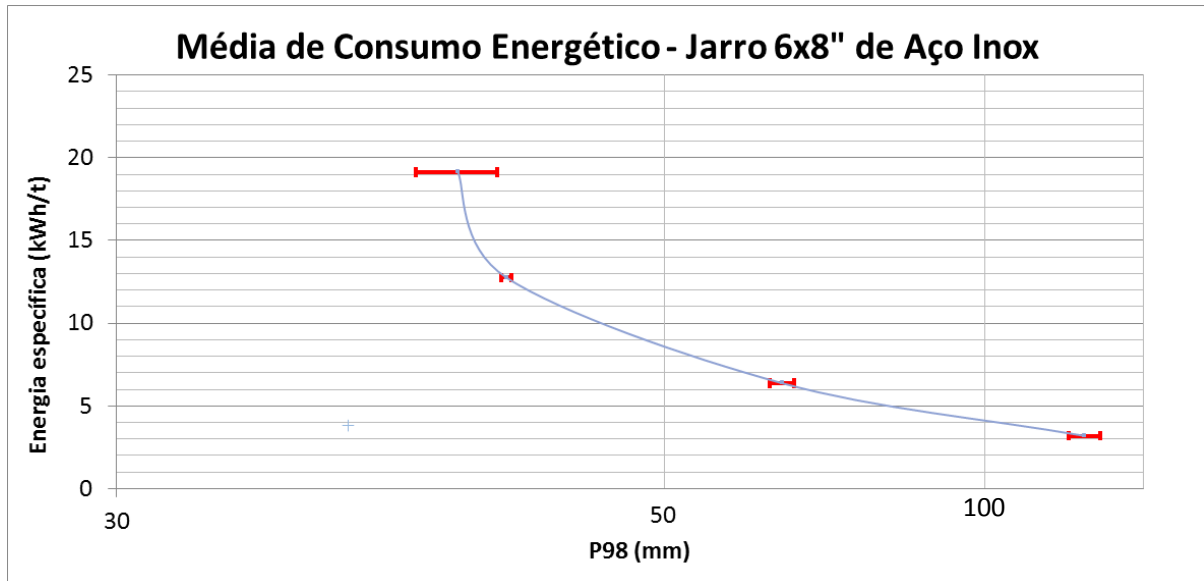


Figura 19 - Consumo energético médio para o Jarro 6x8" de Aço Inox.

Para a comparação dos resultados obtidos com os diferentes tipos de jarros se fez necessária a organização em um único gráfico das três curvas de consumo energético apresentadas anteriormente, na Figura 20 podemos observar o gráfico que compara os resultados energéticos obtidos experimentalmente para os diferentes jarros utilizados.

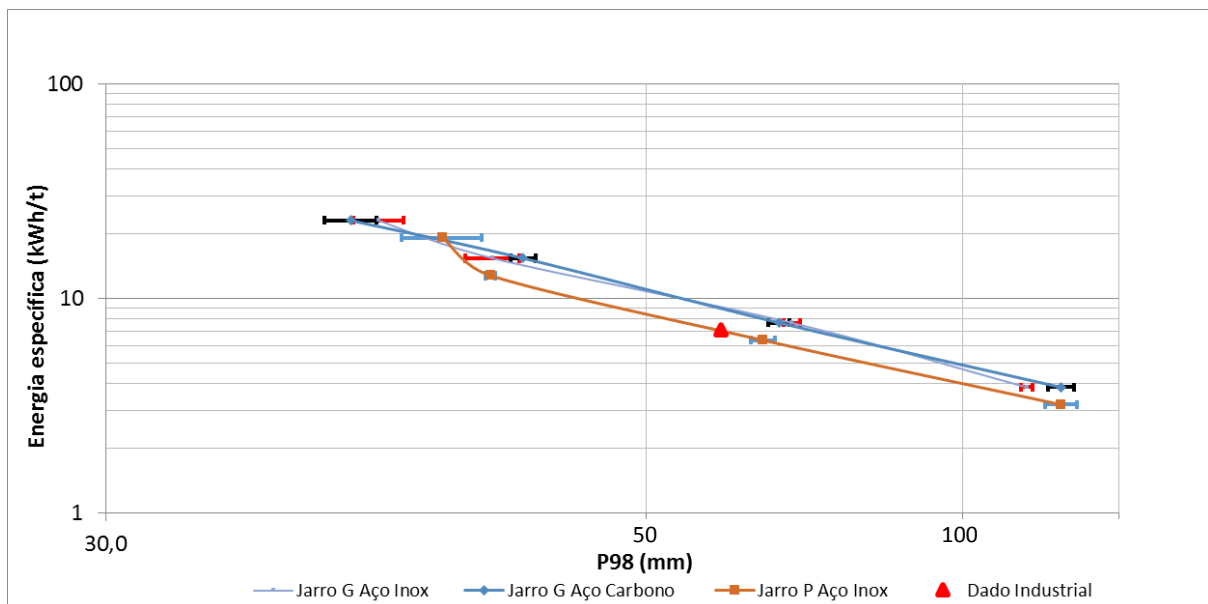


Figura 20 - Consumo energético médio para os diferentes Jarros utilizados.

O gráfico anterior nos revela a grande compatibilidade dos resultados obtidos com os Jarros de 8x10" de aço e de aço inox (suas curvas apresentam-se sobrepostas), demonstrando que ao alterarmos o material de fabricação destes (mantendo suas dimensões e revestimentos de caráter liso) não obteremos significativas influências sobre os resultados dos ensaios, os

dois materiais apresentam resultados compatíveis e portanto podem ser utilizados para a mesma finalidade quando de sua disposição aos ensaios.

Os ensaios com Jarro de 6x8” apresentaram algumas incompatibilidades em relação aos resultados dos jarros maiores, principalmente na faixa de potência consumida entre 5 e 15KWh/t onde verificou-se um consumo energético cerca de 10% menor com relação aos demais. Em potências inferiores e principalmente superiores verifica-se uma tendência de compatibilidade entre os resultados.

Apesar da consistência observada nos dados experimentais quanto a sua repetibilidade, um ensaio laboratorial tem que ter boa representatividade em relação ao observado industrialmente. Dados de operação da planta mineral do Sossego (Vale S.A.) foram coletados no mesmo dia das amostragens que compuseram o material mineral utilizado neste trabalho e dessa forma podem ser comparados aos resultados obtidos em laboratório.

No dia da amostragem a planta industrial apresentava um P_{98} de $66\mu\text{m}$ para uma potência específica de $7,1\text{KWh/t}$, os jarros $8\times 10''$ apresentaram nesta faixa energética um P_{98} aproximado de $74\mu\text{m}$ e o jarro $6\times 8''$ apresentou um P_{98} de $65\mu\text{m}$ (resultados estes obtidos pelo gráfico da Figura 20). A proximidade dos resultados obtidos pelos jarros $8\times 10''$ sendo estes da ordem de 10,8% superiores aos industriais confere a este ensaio a característica de nortear o dimensionamento de equipamentos industriais com boa representatividade.

Os resultados obtidos com o jarro $6\times 8''$ estão fortemente compatíveis aos resultados industriais, com uma incompatibilidade inferior a 2%, sendo estes mais próximos ao ambiente industrial que o próprio ensaio atualmente mais utilizado na prática de projetos (com jarros de $8\times 10''$), como demonstrado na Figura 20.

6.1 O consumo de corpos moedores

O consumo de corpos moedores representa um grande gasto para a indústria mineral, desta forma a quantificação deste consumo é importante tanto na avaliação de custos de processamento quanto na adequada reposição destes corpos, já que as menores variações nas cargas dos moinhos podem resultar em produtos fora da faixa de utilização nos processos subsequentes do beneficiamento mineral.

Neste trabalho foram realizadas estimativas do consumo dos corpos moedores utilizados pela comparação da massa inicial de 20 esferas e da massa final após todos os ensaios de 20 esferas (em ambos os casos as esferas foram escolhidas aleatoriamente), para tal uma massa fixa de corpos foi utilizada para todos os ensaios realizados, fazendo com que

cada esfera passasse pelo mesmo número de processos de moagem. Para a garantia de maior precisão neste tipo de trabalho o autor ressalta que deve ser empregada uma carga fixa para cada bateria de ensaios de maneira que cada esfera sofra a mesma aplicação na moagem. Os resultados obtidos na pesagem dos corpos moedores são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Variações de massa dos corpos moedores

Peso de Bolas 12,7mm			
Peso Inicial (g)		Peso Final (g)	
8,299	8,299	8,208	8,236
8,301	8,301	8,168	8,206
8,322	8,322	8,219	8,181
8,293	8,293	8,229	8,153
8,287	8,287	8,134	8,171
8,252	8,252	8,22	8,151
8,316	8,316	8,181	8,175
8,279	8,279	8,149	8,186
8,298	8,298	8,183	8,178
8,314	8,314	8,212	8,18
Média			
8,296		8,186	
Desvio Padrão			
0,019		0,027	

A massa inicial média de cada esfera era de $8,296 \pm 0,019$ g e a massa final média de $8,186 \pm 0,027$ g, considerando este desgaste sobre o total de corpos moedores utilizados nos procedimentos experimentais verificou-se ao final, uma perda de 210,35g ou cerca de 1,33% em relação à carga inicial. Somando-se o total de potência elétrica utilizada em todos os ensaios podemos estimar o desgaste dos corpos moedores por KWh consumido, dado este de extrema importância na indústria mineral por quantificar a necessidade de reposição dos corpos moedores.

A potência consumida obtida pela aplicação dos parâmetros de cada ensaio na Equação 2 resulta em um dado de potência específica utilizada em unidades de KWh por tonelada de minério moído e portanto deve ser multiplicada pela massa de minério utilizada no ensaio para que se possa obter o consumo de corpos moedores em gramas por KWh

consumido, ao final, divide-se a potência obtida pelo desgaste aferido nos corpos moedores, como demonstrado na Equação 3. Os ensaios realizados resultaram em uma potência consumida de 384,36KWh.

$$\frac{\text{Massa de bolas consumidas}}{\text{Potência Total}} = \frac{210,35}{384,36} = 0,63 \quad (3)$$

O consumo estimado de corpos moedores foi de 0,63g/KWh. Não foram disponibilizados dados acerca da planta indústria para comparações. O consumo observado serve de referência para posteriores ensaios similares, quanto a importância do controle constante da carga de bolas para manutenção dos parâmetros de moagem.

7. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos laboratorialmente indicam que os três tipos de ensaios realizados apresentam boa repetibilidade, sendo que a alteração do tipo de material do qual o jarro é fabricado não demonstrou inferir significativas influências sobre os resultados da moagem, já que os resultados obtidos com o Jarro 8x10” de Aço Inox foram compatíveis com os obtidos com o Jarro 8x10” de Aço.

Pela comparação entre dados experimentais e industriais observamos que todos os ensaios têm boa representatividade em relação ao observado industrialmente e que portanto podem ser utilizados como ferramentas de projeto industrial, são necessárias aproximações embasadas pela estatística e principalmente experiências anteriores de projeto para minimizar discrepâncias nesta extrapolação.

O ensaio com Jarro 6x8” proposto por Bergerman (2013) se mostrou válido para o material processado, seus resultados foram compatíveis com os industriais, ficando mais próximos destes que os ensaios mais utilizados atualmente. Por ter demonstrado uma diferença inferior a 2% em comparação aos dados industriais podemos afirmar que o ensaio realizado é fiel à realidade industrial.

Aliando-se ao fato de que sua realização é muito mais fácil (por demandar menor esforço físico do operador) e necessidade de 50% da quantidade de amostra utilizada nos outros ensaios, pode-se afirmar que este ensaio laboratorial pode ser utilizado como parâmetro de projeto para instalações de moagem vertical com significativas vantagens frente aos ensaios atualmente utilizados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios / Britagem, Peneiramento e Moagem**; Volume 3; Quarta edição, São Paulo. Signus Editora, 2009.
- BERGERMAN, Maurício Guimarães. **Dimensionamento e Simulação de Moinhos Verticais**-Tese de doutorado, USP- São Paulo, 2013.
- MAZZINGHY, Douglas Batista. **Metodologia para escalonamento e simulação de moinho vertical**- Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2012.
- JANKOVIC, A. **Variables affecting the fine grinding of minerals using stirred mills**. Minerals Engineering, v. 16, p. 337-345, 2003.
- HARTMAN, H. L.; MUTMANSKY, J. M. **Introductory Mining Engineering**. Segunda edição; New Jersey, EUA; Editora WILEY, 2002.
- HONÓRIO, O. **Estudo de Aumento de Capacidade da Planta de Britagem da Usina I de Germano**. Tese (Pós-Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2010.
- METSO MINERALS. **Manual-Capítulo 4- Moagem**. Sorocaba: Metso Minerals, 2013.
- ROWLAND Jr, C. A. **Ball Mill Scale-Up - Diameter Factors**. Somasundaram, P. **Advances in Mineral Processing**. New York, Society of Mining Engineers, Inc., American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, pp. 605-617, 1986.

APÊNDICE A

Tabela 3 - Análise granulométricas e valores de P₉₈ e P₉₉ para o ensaio 1 em Jarro 6x8”

Ensaio 1 Jarro 6x8"					
	Tempo (min)				
Malha (μm)	Alimentação	5	10	20	30
150		99,86761	99,984543	99,98778	99,79103
106		98,89752	99,859856	99,96741	99,6001
75		94,18404	98,53467	99,8554	99,29991
53		89,90995	95,829684	99,49492	98,50116
38		71,43607	80,613749	93,29654	96,63424
P99 (μm)		110,65	85,89	51,80	66,74
P98 (μm)	211,70	100,10	70,65	49,38	48,97
Potência consumida (kWh/t)	0	3,19	6,38	12,76	19,14

Tabela 4 - Análise granulométricas e valores de P₉₈ e P₉₉ para o ensaio 2 em Jarro 6x8”.

Ensaio 2 Jarro 6x8"					
	Tempo (min)				
Malha (μm)	Alimentação	5	10	20	30
150		99,81906	99,951468	99,98065	99,9593
106		98,34104	99,819894	99,9497	99,90334
75		92,28869	98,665919	99,78816	99,81686
53		87,88717	95,869418	99,45928	99,66831
38		68,21652	82,833817	93,61095	96,5732
P99 (μm)		125,62	83,97	51,82	49,76
P98 (μm)	211,70	104,25	69,76	49,26	44,91
Potência consumida (kWh/t)	0	3,19	6,38	12,76	19,14

Tabela 5 - Análise granulométricas e valores de P98 e P99 para o ensaio 3 em Jarro 6x8".

Ensaio 3 Jarro 6x8"					
		Tempo (min)			
Malha (μm)	Alimentação	5	10	20	30
150		99,8594	99,950618	99,95724	99,94885
106		98,70002	99,807841	99,90913	99,88968
75		93,23254	98,936147	99,78939	99,7924
53		87,09985	95,764986	99,48898	99,60184
38		68,44055	81,141575	94,16494	96,67533
P99 (μm)		117,38	77,27	51,62	49,92
P98 (μm)	211,70	102,03	68,51	48,80	44,79
Potência consumida (kWh/t)	0	3,19	6,38	12,76	19,14

Tabela 6 - Análise granulométricas e valores de P98 e P99 para o ensaio 1 em Jarro 8x10" Aço Carbono

Ensaio 1 Jarro 8x10" Aço Carbono					
		Tempo (min)			
Malha (μm)	Alimentação	5	10	20	30
150		99,45524	99,899929	99,91779	99,9875
106		98,30164	99,698764	99,82397	99,96922
75		94,46699	99,026856	99,39261	99,83362
53		83,70006	93,552538	98,21264	99,45084
38		72,4311	83,290105	94,7066	97,56965
P99 (μm)		132,64	74,89	67,68	49,41
P98 (μm)	211,70	103,56	70,87	52,09	41,43
Potência consumida (kWh/t)	0	3,84	7,69	15,37	23,06

Tabela 7 - Análise granulométricas e valores de P98 e P99 para o ensaio 2 em Jarro 8x10" Aço Carbono.

Ensaio 2 Jarro 8x10" Aço Carbono					
		Tempo (min)			
Malha (μm)	Alimentação	5	10	20	30
150		99,74783	99,933818	99,92439	99,90707
106		98,77781	99,794234	99,88562	99,76628
75		94,57742	98,8737	99,74798	99,59698
53		84,39928	94,757172	98,49561	99,31081
38		71,18599	86,481998	94,46421	97,84779
P99 (μm)		116,08	79,25	61,86	49,81
P98 (μm)	211,70	100,26	70,33	51,16	39,56
Potência consumida (kWh/t)	0	3,84	7,69	15,37	23,06

Tabela 8 - Análise granulométricas e valores de P98 e P99 para o ensaio 3 em Jarro 8x10" Aço Carbono.

Ensaio 3 Jarro 8x10" Aço Carbono					
		Tempo (min)			
Malha (μm)	Alimentação	5	10	20	30
150		99,60878	99,878614	99,93892	99,92375
106		98,49858	99,603199	99,90228	99,8563
75		94,16666	98,649448	99,76485	99,67252
53		83,5404	93,538976	98,72145	99,0987
38		71,62418	84,144276	94,51728	97,56884
P99 (μm)		125,87	86,39	58,87	52,03
P98 (μm)	211,70	102,43	72,20	50,43	42,23
Potência consumida (kWh/t)	0	3,84	7,69	15,37	23,06

Tabela 9 - Análise granulométricas e valores de P98 e P99 para o ensaio 1 em Jarro 8x10" Aço INOX.

Ensaio 1 Jarro 8x10" Aço INOX					
		Tempo (min)			
Malha (μm)	Alimentação	5	10	20	30
150		99,73756	99,880502	99,87349	99,96093
106		98,9005	99,624717	99,83166	99,89581
75		95,29462	98,556149	99,55926	99,53113
53		85,73699	94,59988	98,34316	99,07528
38		75,04695	85,753084	95,35698	97,73378
P99 (μm)		111,23	87,88	64,88	52,16
P98 (μm)	211,70	98,26	71,91	51,28	40,98
Potência consumida (kWh/t)	0	3,84	7,69	15,37	23,06

Tabela 10 - Análise granulométricas e valores de P98 e P99 para o ensaio 2 em Jarro 8x10" Aço INOX.

Ensaio 2 Jarro 8x10" Aço INOX					
		Tempo (min)			
Malha (μm)	Alimentação	5	10	20	30
150		99,79781	99,636971	99,90828	99,86766
106		99,18	99,422963	99,86242	99,81525
75		95,15187	98,561328	99,71107	99,52658
53		86,43961	94,750641	98,8076	98,73429
38		75,25611	86,006566	96,2577	97,58849
P99 (μm)		104,61	90,78	57,68	60,38
P98 (μm)	211,70	96,92	71,76	48,25	43,39
Potência consumida (kWh/t)	0	3,84	7,69	15,37	23,06

Tabela 11 - Análise granulométricas e valores de P98 e P99 para o ensaio 3 em Jarro 8x10" Aço INOX.

Ensaio 3 Jarro 8x10" Aço INOX					
		Tempo (min)			
Malha (μm)	Alimentação	5	10	20	30
150		99,67331	99,688156	99,89424	99,89377
106		98,99378	99,353632	99,83175	99,83163
75		95,14968	98,32738	99,68273	99,41472
53		85,99135	94,460509	98,92609	99,13411
38		74,57339	84,37943	95,9745	97,37828
P99 (μm)		106,40	95,32	55,15	51,85
P98 (μm)	211,70	97,99	73,14	48,29	43,31
Potência consumida (kWh/t)	0	3,84	7,69	15,37	23,06