

MILTON CÂNDIDO TORRES DA SILVA

**AVALIAÇÃO DE UM ENSAIO DE JARRO COM MENOR CONSUMO
DE MASSA PARA O DIMENSIONAMENTO DE MOINHOS
VERTICais.**

São Paulo
2018

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS E DE PETRÓLEO DA
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Milton Cândido Torres da Silva

**AVALIAÇÃO DE UM ENSAIO DE JARRO COM MENOR CONSUMO
DE MASSA PARA O DIMENSIONAMENTO DE MOINHOS
VERTICIAIS.**

Trabalho de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo como parte
dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro
de Minas

Orientador: Maurício Guimarães Bergerman

São Paulo
2018

TF-20/18
SIBSa
SIPNU 2927840

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

H2018a



Escola Politécnica - EPMI



31700002506

Catalogação-na-publicação

da Silva, Milton Cândido Torres

AVALIAÇÃO DE UM ENSAIO DE JARRO COM MENOR CONSUMO DE MASSA PARA O DIMENSIONAMENTO DE MOINHOS VERTICais / M. C. T. da Silva – São Paulo, 2018.

35 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

1. Ensaio 2. Moinho Vertical 3. Jarro 4. Moagem I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo II.t.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais e irmãos por todo o suporte ao
longo de todos esses anos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, ao meu pai e irmãos por todo o apoio e dedicação ao longo da minha vida.

Aos técnicos de laboratório do Laboratório de Tratamento de Minérios da Escola Politécnica pelo auxílio na realização dos testes e ensaios deste trabalho.

Ao professor Maurício, por ser meu orientador neste trabalho, e à Mineração Caraíba S/A pela amostra usada nos ensaios de moagem.

RESUMO

Ensaios de remoagem para o dimensionamento de moinhos tem como alimentação o produto gerado em etapas de concentração, que em muitos casos podem apresentar baixas recuperações em massa, o que dificulta a obtenção de material em estágios iniciais de projeto, quando pouco minério está disponível. A fim de contornar este problema, o presente projeto busca desenvolver um ensaio similar ao atualmente utilizado pelo principal fabricante de moinhos verticais - Metso, com menor consumo de massa. No presente estudo foram feitos ensaios de moagem com minério de cobre da Mineração Caraíba S.A., tanto no jarro de 152,4 mm de diâmetro por 203,2 mm de comprimento (jarro 6"X8"), como no jarro padrão de 203,2 mm de diâmetro por 254 mm de comprimento (jarro 8"X10"), ambos com revestimento liso sob diferentes períodos de moagem e tamanhos de carga (12,5 mm e 19 mm de diâmetro), no equipamento moinho de torque. Os resultados mostraram que os ensaios no jarro de menor tamanho, com menor consumo de massa, apresentam resultados semelhantes ao do jarro padrão.

PALAVRAS-CHAVE: moinho vertical, moagem, ensaio de moagem, jarro, moinho.

ABSTRACT

Grinding tests to design mills have as feeding the product generated in concentration steps, which in many cases can present low mass recoveries, which makes it difficult to obtain material in the initial stages of a project, when a small amount of ore is available. In order to overcome this problem, the present project aims to develop a similar tests to that currently used by the main manufacturer of vertical mills - Metso, with lower mass consumption. In the present study, grinding tests were carried out using copper ore from the Caraíba Mining S/A, both in the jar with 152.4 mm in diameter by 203.2 mm in length (jar 6 "X8"), and in the standard jar with 203.2 mm in diameter by 254 mm in length (8 "X10" jar), both with smooth coating under different milling times and grinding bodies sizes (12.5 mm and 19 mm diameter), using the "moinho de torque" equipment. The results showed that the tests in the smaller jar, with lower mass consumption, present similar results to the standard jar.

KEYWORDS: vertical mill, grinding, grinding essay, jar, mill.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Teores dos minérios de cobre de 25 minas pelo mundo ao longo dos anos, que juntas produziram 5 milhões de toneladas em 2009, aproximadamente 32% da produção mundial nesse ano.....	11
Figura 2 - Gráfico da representação da relação entre o preço do carvão (em dólares) para a geração de energia por tonelada através anos.....	14
Figura 3 - Distribuição granulométrica relativa em função do mecanismo de fratura da partícula	16
Figura 4 - Gráfico da aproximação da resistência da partícula em função de seu tamanho.....	17
Figura 5 - Energia específica empregada no processo de moagem em função do tamanho do produto (P_{80}) e do tipo de moinho empregado.	18
Figura 6 - Ilustração de um VertiMill®.....	19
Figura 7 - Pilha de homogeneização da amostra, proveta (esquerda) e moinho de torque (direita)	23
Figura 8 - Gráficos dos resultados dos ensaios com o jarro padrão, para os tamanhos de bola de 12,5 mm (acima) e 19,0 mm (abaixo).	25
Figura 9 - Gráficos dos resultados dos ensaios com o jarro menor, para os tamanhos de bola de 12,5 mm (acima) e 19,0 mm (abaixo).	26
Figura 10 - Imagem do gráfico comparativo entre os ensaios com jarro do tamanho padrão e com o jarro menor, ambos com a carga de 19,0 mm de diâmetro.....	27
Figura 11 - Imagem do gráfico comparativo entre os ensaios com jarro do tamanho padrão e com o jarro menor, ambos com a carga de 12,5 mm de diâmetro.....	27
Figura 12 - Registros do moinho de torque	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Energia requerida e eficiências atuais para etapas de extração e processamento de minerais metálicos.....	13
Tabela 2 - Gasto de energia elétrica para a cominuição de um dado bem mineral.	14
Tabela 3 - Condições dos ensaios de Jarro	22
Tabela 4 - Valores do P80 e Área superficial específica dos produtos dos ensaios, além da energia específica consumida por estes através da Equações 1 e 3.....	24
Tabela 5 - Resultados do cálculo da energia específica consumida nos ensaios de moagem pela Equação 3.	28

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1 O QUADRO ENERGÉTICO DA MINERAÇÃO	11
2.2 CONCEITOS BÁSICOS DA COMINUIÇÃO	14
2.2.1 MECANISMOS DE FRATURA E FATORES DE INFLUÊNCIA NA MOAGEM	15
2.2.2 REMOAGEM, MOAGEM FINA, ULTRAFINA E EQUIPAMENTOS	17
2.3 MÉTODOS USADOS PARA DETERMINAR O CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA DA MOAGEM	20
3. MATERIAIS E MÉTODOS	21
4. RESULTADOS	23
5. CONCLUSÃO.....	29
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30
APÊNDICES	32

1. INTRODUÇÃO

A extração de recursos minerais ao longo dos anos tem levado à utilização de jazidas com teores menores e cada vez mais finamente disseminados para suprir a demanda crescente por estes bens.

Em razão da exploração de depósitos com teores menores, mais energia deve ser gasta nos processos de beneficiamento mineral e, por conseguinte mais tem sido investido em soluções tecnológicas e novos equipamentos para processar maior quantidade de material com maior eficiência energética; um desses equipamentos são os moinhos verticais, cujo o processo de dimensionamento é o tema deste trabalho.

O objetivo é, por meio da realização de ensaios de jarro no moinho de torque, avaliar se ensaios com jarros de menor dimensão (152,4 mm de diâmetro por 203,2 mm de comprimento) geram resultados equivalentes aos ensaios padrão com um jarro maior (203,2 mm de diâmetro por 254 mm de comprimento) para a dimensionamento de moinhos verticais (VertiMill® da Metso).

A justificativa é que ensaios com menor massa geram vantagens ao exigirem menores quantias de amostras o que facilita seu manuseio, obtenção e realização de ensaios, uma vez que moinhos verticais costumam realizar o trabalho de remoagem de pré-concentrados ou concentrados em usinas de beneficiamento mineral, e portanto a obtenção de amostras em um novo projeto nessas condições é laboriosa, já que para a obtenção de 10 quilogramas para ensaios aproximadamente 100 quilogramas devem passar por flotação dependendo da recuperação mássica do processo, o que torna a validação de um ensaio de menor massa proveitosa para o desenvolvimento de projetos envolvendo estes equipamentos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta revisão bibliográfica são apresentados um breve quadro energético da mineração, conceitos básicos de cominuição e definições de remoagem, moagem fina e ultrafina conforme levantado nas referências pesquisadas.

Teores menores da substância útil não significam apenas que mais volumes de minério terão que ser processados, como que também nestes, o mineral de minério pode estar disposto de uma forma que o minério terá que passar por um processo de cominuição mais fino para se chegar ao grau de liberação da substância adequado (RULE; NEVILLE, 2012 apud BERGERMAN, 2013).

A complicaçāo do quadro atual de maior exigência de cominuição para a obtenção materiais cada vez mais finos destinados para o beneficiamento é que moagem e remoagem consomem vastas quantidades de energia e exibem rendimentos baixos, que segundo a U.S. Department of Energy¹ gira em torno de 61,087 MJ/ton e 1% de rendimento, como visto na Tabela 1.

¹ International Energy Agency. *Key world energy statistics*. 2016. https://www.iea.org/bookshop/723-World_Energy_Statistics_2016 (acesso em 17 de janeiro de 2017).

Tabela 2 - Gasto de energia elétrica para a cominuição de um dado bem mineral.

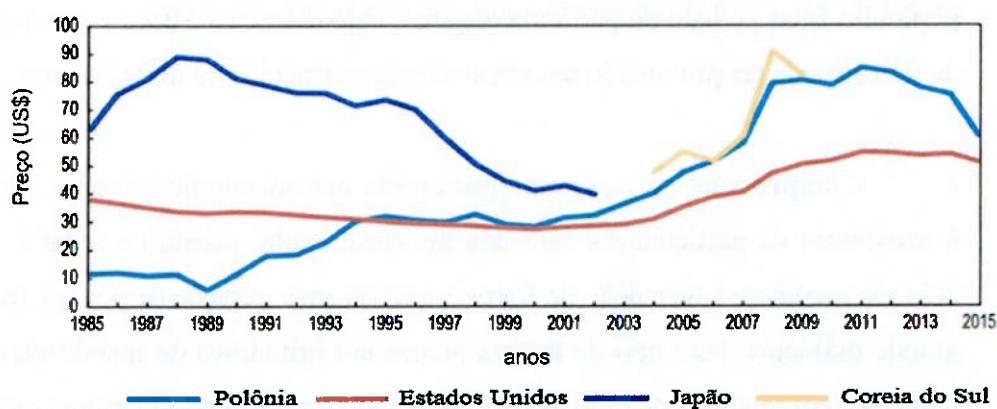
Posição	Commodity	Energia (10 ⁹ kWh)
1	Minério de Cobre	3,6
2	Minério de Ferro	3,3
3	Minério de Fosfato	1,3
4	Argila	0,5
5	Minério de Titânio	0,3

Fonte: Fuerstenau e Han (2003).

Uma vez que a matriz energética mundial tem origem majoritária em combustíveis fósseis, tendo apenas 14,1% em fontes renováveis, há então um acréscimo de emissões de gases de efeito estufa na atmosfera (IEA, 2016).

Em adição ao efeito estufa, há também um interesse em reduzir custos em energia, uma vez que os preços do petróleo e carvão, principais *commodities* destinadas à produção de energia, sofrem com instabilidade de preços e tendência de aumentos, como visto nas variações das curvas do gráfico da Figura 2.

Figura 2 - Gráfico da representação da relação entre o preço do carvão (em dólares) para a geração de energia por tonelada através anos.



Fonte: IEA (2016).

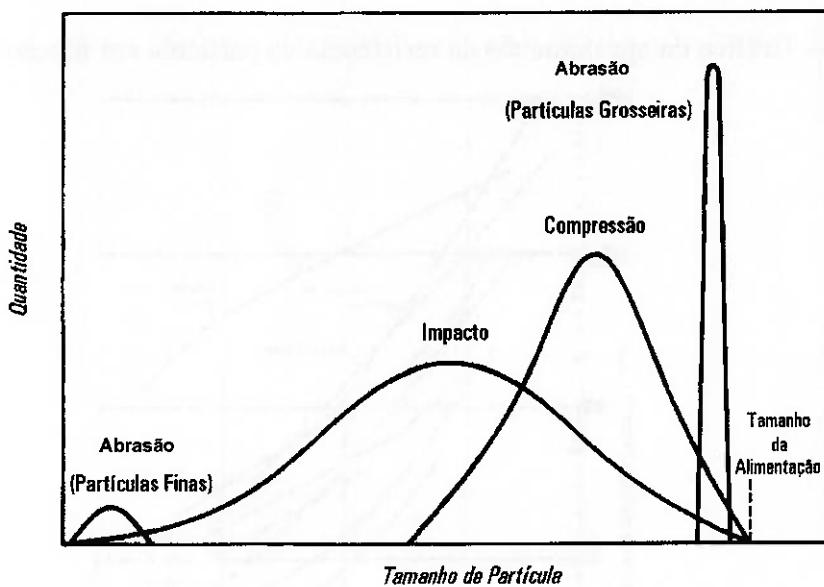
2.2 CONCEITOS BÁSICOS DA COMINUIÇÃO

Sendo a energia um insumo intensamente consumido pelo processo de cominuição de minérios é importante avaliar a forma com que a parte efetiva é usada para a quebra dos materiais através

onde uma força, muito superior à resistência da partícula é aplicada de maneira rápida, resultando em uma distribuição granulométrica de partículas finas.

A Figura 3 mostra esquematicamente os tipos de mecanismos de fratura de partículas, descritos anteriormente, juntamente com a distribuição granulométrica relativa dos produtos da quebra.

Figura 3 - Distribuição granulométrica relativa em função do mecanismo de fratura da partícula



Fonte: Kelly, E.; Spottiswood, D. (1982)

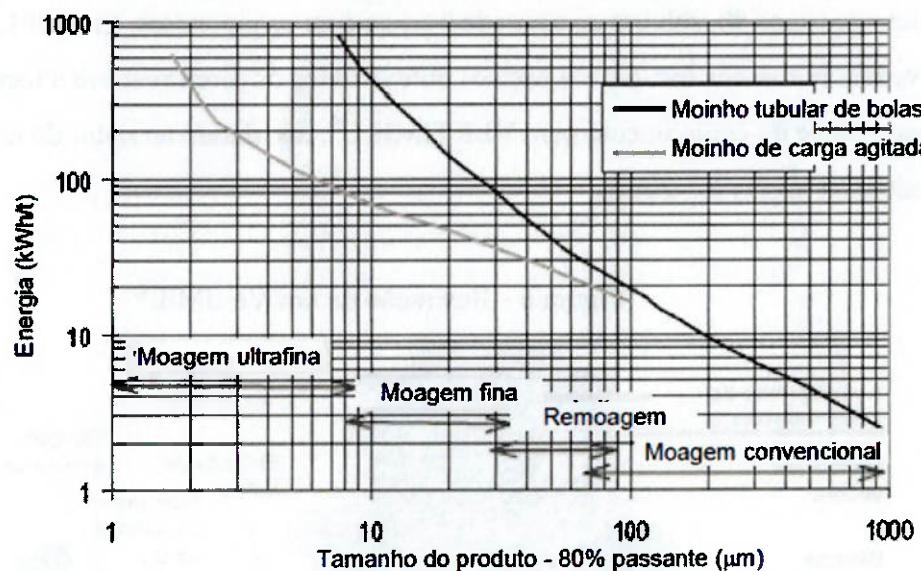
Outra definição é que os mecanismos de fratura da partícula são a Abrasão, Atrito e Impacto, onde abrasão é um fenômeno de superfície, que resulta do movimento paralelo de duas partículas em relação ao plano de contato, dando origem a pequenos pedaços de cada partícula, gerados a partir do desprendimento de material da superfície, deixando então as partículas originais próximas do tamanho anterior ao fenômeno (NAPIER-MUNN, et al, 1999 apud BERGERMAN, 2013).

Continuando, o mecanismo de quebra por atrito é similar aos que causam abrasão, com a diferença de que neste caso há entre as duas partículas uma outra menor, que se quebra preferencialmente em relação as maiores; Por fim, é definido como mecanismo de cominuição

algo com P_{80} na faixa de $75\mu\text{m}$, Remoagem seria então outro estágio que se caracterizaria por gerar partículas com tamanho entre $75\mu\text{m}$ e $30\mu\text{m}$. Além destes dois estágios então há um outro que é a Moagem Fina com produto entre $30\mu\text{m}$ e $10\mu\text{m}$, produtos abaixo disto entram na classificação de Moagem Ultrafina.

Na Figura 5 é apresentado um gráfico que mostra as margens de tamanho de partículas utilizadas na definição empregada e a estimativa da energia específica consumida para gerar tal produto.

Figura 5 - Energia específica empregada no processo de moagem em função do tamanho do produto (P_{80}) e do tipo de moinho empregado.



Fonte: Jankovic (2003) apud Bergeman (2013).

O gráfico ilustra que para moagens mais finas que a convencional, o emprego de moinhos de carga agitada resulta em menor consumo energético específico. Portanto, conforme o quadro energético anteriormente apresentado, estes modelos de moinhos se apresentariam então como uma alternativa para minimizar as dificuldades que envolvem elevado consumo energia e baixa eficiência energética para moagens que tenham como objetivo a geração de produtos mais finos, permitindo a liberação de minerais de minério em minérios de baixo teor.

De acordo com Jankovic (2002) os moinhos de carga agitada mais empregados no processamento de minerais são VERTIMILL®, STIRRED MEDIA DETRITOR (SMD®) e o ISAMILL®.

2.3 MÉTODOS USADOS PARA DETERMINAR O CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA DA MOAGEM

O estudo dos processos de cominuição sempre esteve atrelado ao consumo energético, uma vez que a redução do tamanho de partículas corresponde a uma grande parcela dos custos com energia de uma usina de beneficiamento.

Parte da metodologia de dimensionamento dos equipamentos depende da estimativa de quanta potência este requer para realizar um trabalho. Com os moinhos verticais não é diferente, e o procedimento empregado pela Metso, que é a principal fabricante deste equipamento, envolve ensaios de moagem com o jarro padrão, cujas as dimensões já foram citadas anteriormente.

Estes ensaios são realizados com diferentes durações, até atingir a granulometria desejada para que assim seja plotada a curva de uma medida granulométrica do produto (normalmente o P80) pela energia consumida no ensaio, e então a energia necessária para atingir a granulometria do produto desejada é multiplicada pelo fator VTM, igual a 0,65 (WILLS, B.A., FINCH, J.A.; 2016).

Neste trabalho, para o cálculo da energia consumida no ensaio de moagem foi utilizada a Equação (1), definida por Rowland Júnior em 1986, para moinhos de bolas com diâmetro menor que 2,44m, cujas as variáveis são o diâmetro interno do jarro, o grau de enchimento, tamanho da carga e a porcentagem da velocidade crítica, velocidade esta que se ultrapassada leva o meio de moagem a centrifugar-se e é definida pela Equação (2) (DE PAULA, L. F. et al. 2014).

A Equação (3) foi usada também para o cálculo da energia consumida pelo equipamento empregando o torquímetro do moinho de torque.

$$kWb = 6,3 * D^{0,3} * \operatorname{sen} \left(51 - 22 * \left(\frac{2,44-D}{2,44} \right) \right) * (3,2 - 3 * Vp) * Cs * \left(1 - \frac{0,1}{2^{(9-10Cs)}} \right) \quad (1)$$

$$V_{crítica} = \frac{60}{2 * \pi} * \sqrt{\frac{g}{50 * (D - d)}} \quad (2)$$

Tabela 3 - Condições dos ensaios de Jarro

Condição e Característica	Jarro: 6x8", revestimento liso de aço inox	Jarro: 6x8", revestimento liso de aço inox	Jarro: 8x10", revestimento liso de aço inox	Jarro: 8x10", revestimento liso de aço inox
Volume do jarro (m3):	0,0037	0,0037	0,0082	0,0082
Massa dos corpos moedores (g):	7.212,5	7.212,5	16.096,2	16.096,2
Tamanho dos corpos moedores (mm)	12,7	19,0	12,7	19,0
Massa específica (g/cm ³)	2,81	2,81	2,81	2,81
Densidade aparente (g/cm ³)	1,57	1,57	1,57	1,57
Massa de sólidos (g):	971,6	971,6	2168,3	2168,3
Massa de água (g):	416,4	416,4	929,3	929,3
Sólidos (%):	70	70	70	70
Fração do moinho com sólidos - f_c (%)	17	17	8	8
Fração da carga preenchida por sólidos - U (%)	100	100	100	100
Velocidade de rotação (rpm)	86,1	88,2	73,7	75,0
Velocidade teste - % da velocidade crítica (%)	76,0	76,0	76,0	76,0
Velocidade crítica (rpm)	113,2	116,0	96,9	93,9

Figura 7 - Pilha de homogeneização da amostra, proveta (esquerda) e moinho de torque (direita)



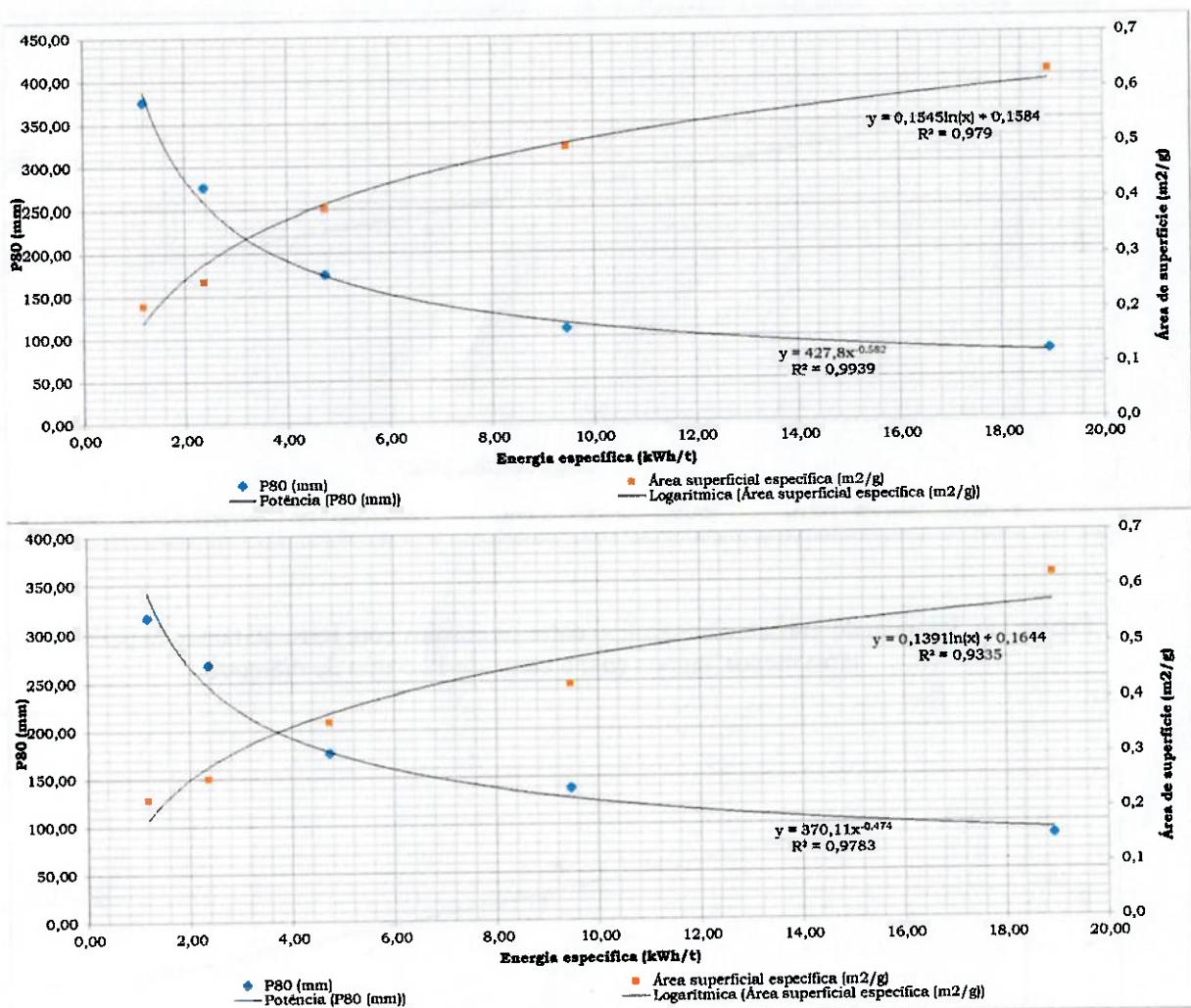
Fonte: autoria própria.

Tabela 4 - Valores do P80 e Área superficial específica dos produtos dos ensaios, além da energia específica consumida por estes através da Equações 1 e 3.

		Tempo (minutos)					
		5 min	10 min	20 min	40 min	80 min	
JARRO 6x8	12,5 mm	P80 (mm) - Jarro 6X8 - 12,5 mm	375,45	275,79	174,09	108,62	79,72
		Área superficial específica (m ² /g)	0,22	0,26	0,39	0,5	0,63
		Energia específica - Rowland (kWh/t)	1,18	2,37	4,73	9,46	18,93
JARRO 8x10	19,0 mm	P80 (mm) - Jarro 6X8 - 19,0 mm	316,6	267,57	175,57	137,68	85,51
		Área superficial específica (m ² /g)	0,22	0,26	0,37	0,43	0,62
		Energia específica - Rowland (kWh/t)	1,18	2,37	4,73	9,46	18,93
JARRO 8x10	12,5 mm	P80 (mm) - Jarro 8X10 - 12,5 mm	344,44	246,6	130,78	94,21	81,13
		Área superficial específica (m ² /g)	0,22	0,29	0,46	0,57	0,64
		Energia específica - Rowland (kWh/t)	1,31	2,61	5,23	10,45	20,91
JARRO 8x10	19,0 mm	P80 (mm) - Jarro 8X10 - 19,0 mm	333,11	240,09	173,7	118,18	95,82
		Área superficial específica (m ² /g)	0,22	0,29	0,4	0,52	0,6
		Energia específica - Rowland (kWh/t)	1,31	2,61	5,23	10,45	20,91

Nas Figuras 8 e 9 temos os dados da Tabela 4 plotados em um gráfico, onde a Energia Específica (kWh) define o eixo das abscissas, ao passo que são ordenadas tanto o P80 quanto a Área Superficial Específica média das partículas resultantes dos ensaios, os gráficos das figuras possuem também linhas de tendência como forma de avaliar a proximidade dos resultados.

Figura 9 - Gráficos dos resultados dos ensaios com o jarro menor, para os tamanhos de bola de 12,5 mm (acima) e 19,0 mm (abaixo).



Os valores da Tabela 4 e Figuras 8 e 9 mostram que há semelhanças entre as distribuições granulométricas dos produtos dos ensaios que possuem o mesmo tempo de moagem mesmo estes sendo feitos então jarros diferentes, e para curtos tempos de moagem (de 5 a 10 minutos), as cargas de 19 mm de diâmetro obtiveram relativa maior relação de redução se comparadas as cargas de 12,5 mm, porém esse fenômeno se inverte para tempos maiores de moagem, onde as cargas com 12,5 mm conseguem melhores relações de redução.

Com os gráficos da distribuição granulométrica, área superficial específica e os valores de energia específica consumida foi possível montar os gráficos das Figuras 10 e 11, onde as dispersões mostram que os resultados convergem para uma tendência, apesar de serem resultados obtidos em ensaios com diferentes tamanhos de jarros e com a mesma carga.

Figura 12 - Registros do moinho de torque

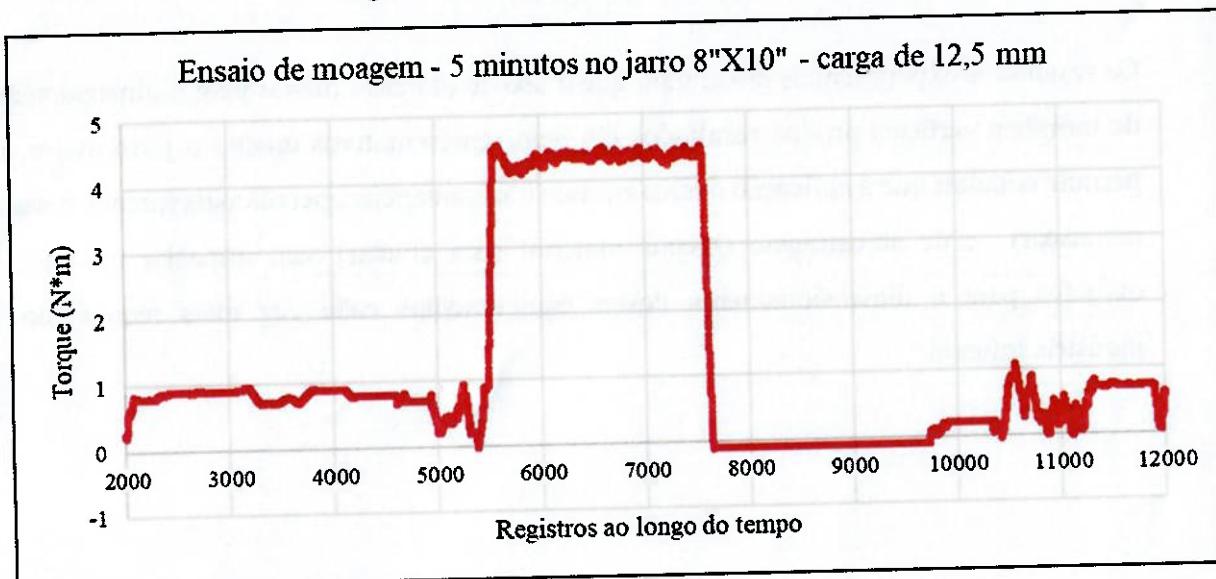


Tabela 5 - Resultados do cálculo da energia específica consumida nos ensaios de moagem pela Equação 3.

		Tempo (minutos)					
		5 min	10 min	20 min	40 min	80 min	
JARRO 6x8	12,5 mm	Energia específica - Rowland (kWh/t)	1,18	2,37	4,73	9,46	18,93
		Energia específica - Torque (kWh/t)	0,61	1,22	2,71	4,99	-
	19,0 mm	Energia específica - Rowland (kWh/t)	1,18	2,37	4,73	9,46	18,93
		Energia específica - Torque (kWh/t)	0,62	1,34	2,51	3,99	-
JARRO 8x10	12,5 mm	Energia específica - Rowland (kWh/t)	1,31	2,61	5,23	10,45	20,91
		Energia específica - Torque (kWh/t)	0,94	2,59	5,35	10,24	-
	19,0 mm	Energia específica - Rowland (kWh/t)	1,31	2,61	5,23	10,45	20,91
		Energia específica - Torque (kWh/t)	1,04	2,34	5,4	10,55	-

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERGERMAN, M. G. **Dimensionamento e simulação de moinhos verticais.** [Tese de Doutorado]. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo; 2013.

CALVO, G.; MUDD, G.; VALERO, A. Decreasing Ore Grades in Global Metallic Mining: A Theoretical Issue or a Global Reality?. **Resources**, v. 5, n. 36, set. 2016; DOI:10.3390/resources5040036

DE PAULA, L. F. et al. Diretrizes para a construção de um moinho de bolas para a moagem de sólidos em laboratórios. **Química Nova**, São Paulo, v.37, n. 4, 2014.

FUERSTENAU, M.; HAN, K. **Principles of Mineral Processing.** LittleTon: SME, 2003.

JANKOVIC, A. **Variables affecting the fine grinding of minerals using stirred mills.** Universidade de Queensland , Brisbane, Austrália; 2002

MAZZINGHY, D. **Modelagem e Simulação de circuito de moagem através da determinação dos parâmetros de quebra e da energia específica de fragmentação.** [Dissertação de Mestrado]. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte; 2009.

MAZZINGHY, D.; ALVES, V.; SCHNEIDER, C.; GALÉRY, R. PREVISÃO DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DE PRODUTO DE MOINHO VERTIMILL. **HOLOS**, v. 4, n. 30, nov. 2013

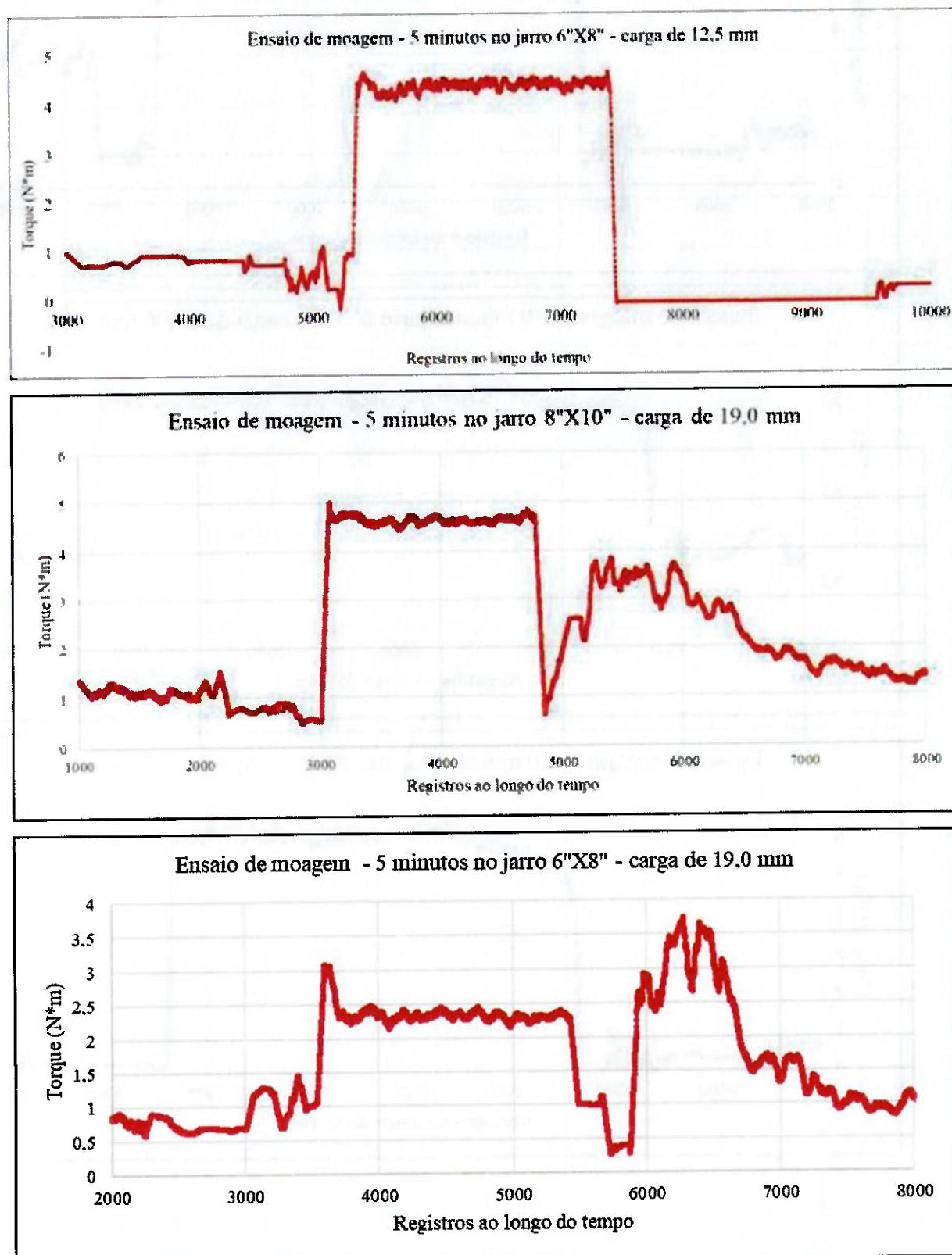
METSO. **METSO CORPORATION.** 2017. Disponível em: <<http://www.metso.com/industries/mining/>>. Acesso em: 08/08/2017

Internacional Energy Agency. **Key world energy statistics.** 2016. Disponível em: https://www.iea.org/bookshop/723-World_Energy_Statistics_2016. Acesso em: 17 de janeiro de 2017

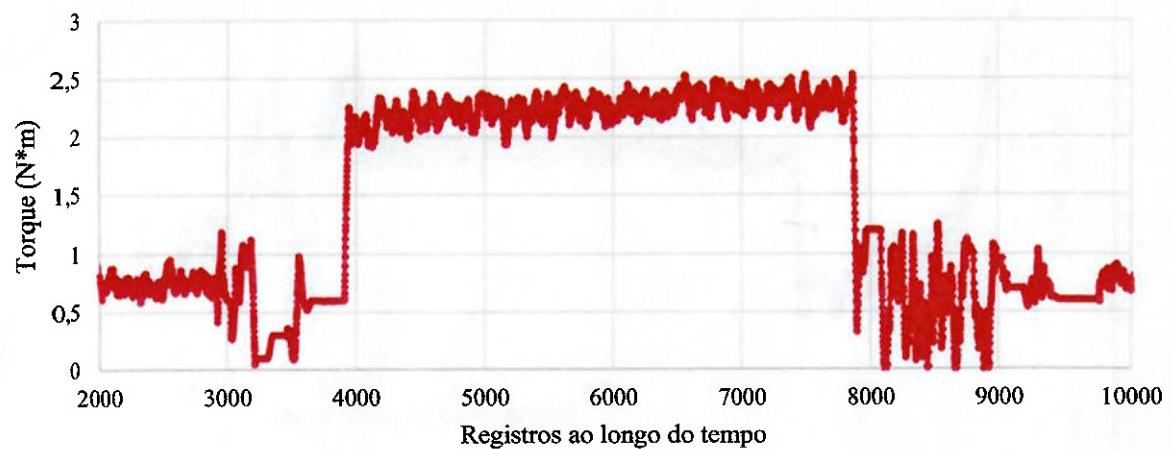
ROCIO, M. A., DA SILVA M. M., CARVALHO P. S. L., Cardoso J. G. **Perspectivas atuais da indústria de cobre no Brasil.** BNDES Setorial 36. 2012, p. 397-428.

APÊNDICES

APÊNDICE A - REGISTROS DO TORQUÍMETRO (ENSAIOS DE MOAGEM)



Ensaio de moagem - 10 minutos no jarro 6X8 - carga de 12,5 mm



Ensaio de moagem - 20 minutos no jarro 6X10 - carga de 12,5 mm

