

EFEITO DAS DIMENSÕES DO MOINHO E DA DISTRIBUIÇÃO DA CARGA DE BOLAS SOBRE A ENERGIA ESPECÍFICA DE REMOAGEM EM ENSAIOS DE BANCADA¹

Wellington Ribeiro Moreira²
Marcello Rodrigues Cruz³
Leandro Carvalho Maciel⁴
Orivaldo Savassi⁵

Resumo

Os ensaios foram realizados em moinhos de bancada conforme metodologia desenvolvida por Donda de forma a avaliar o efeito da distribuição da carga de bolas e das dimensões do moinho sobre a energia específica de remoagem. Para as amostras testadas, concentrado de minério de ferro por flotação, os resultados comprovam que a distribuição da carga de bolas mais “fina” possui um efeito de redução significativo na energia específica de remoagem. Enquanto que a variação nas dimensões do moinho não demonstrou nenhum efeito significativo na energia específica de remoagem. O consumo específico de energia na remoagem foi determinado através da equação de Rowland para moinhos com diâmetro menor que 2,44m.

Palavras-chave: Remoagem; Consumo específico de energia; Moinhos de bancada; Distribuição de carga de bolas.

EFFECT OF MILL DIMENSIONS AND BALL CHARGE DISTRIBUTION UPON THE SPECIFIC ENERGY OF REGRINDING IN BENCH SCALE TESTS

Abstract

The assays had been carried through in agreement group of bench mills methodology developed for Donda to evaluate the effect of the ball charge distribution and the dimensions of the mill on the specific energy of regrinding. For the samples tested, concentrate of flotation iron ore, the results prove that the ball charge distribution more “fine” have a significant effect of reduction in the specific energy of regrinding. The variation in the dimensions of the mill did not demonstrate significant effect in the specific energy of regrinding. The specific energy consumption in the regrinding was determined through the equation of Rowland for mills with lesser diameter that 2,44m.

Key words: Regrinding; Specific energy consumption; Bench mills; Ball charge distribution.

¹ Contribuição técnica ao 39º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 10º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 22 a 26 de novembro de 2009, Ouro Preto, MG.

² Engenheiro de Minas – Desenvolvimento de Processos - ANGLO FERROUS BRAZIL – wellington.moreira@angloferrous.com.br ou wribeiomoreira@yahoo.com.br

³ Engenheiro de Minas - Desenvolvimento de Processos - ANGLO FERROUS BRAZIL – marcello.cruz@angloferrous.com.br ou engdeminas@yahoo.com.br

⁴ Engenheiro Metalurgista - Desenvolvimento de Processos - ANGLO FERROUS BRAZIL – leandro.maciell@angloferrous.com.br

⁵ Engenheiro Químico, MsC, PhD JK Mineral Research Center – SGS GEOSOL - orivaldo.savassi@sgsgeosol.com.br

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

O insumo energia elétrica na operação de usinas de beneficiamento de minérios é sem dúvida a principal fonte de custos. Além de fundamental para prosperidade do empreendimento, o consumo específico de energia dentro de uma instalação pode tornar ou não um empreendimento (projeto) viável.

Uma grande lacuna existente e, portanto geradora de muitos conflitos entre teóricos e práticos, está relacionada com a medida do consumo específico de energia para minérios finos, tipo concentrado de flotação de minério de ferro, onde usualmente todo material está abaixo de 150 μ m. O que todos relatam é a necessidade de correlacionar às medidas industriais com ensaios de bancada através de um dispositivo que mede a energia no eixo pinhão, ou seja, um tipo de torquímetro onde se consegue retirar a medida direta gasta em laboratório para moer determinada massa. Tal dispositivo ainda hoje não é usual, possivelmente devido à precisão exigida dos equipamentos e cuidados necessários na montagem e manutenção destes.

Por questões de metodologia simplificada e padronização já reconhecida e adotada por vários laboratórios de tratamento de minérios, definiu-se por adotar a metodologia desenvolvida pelo Engenheiro Joaquim Donda⁽¹⁾ apresentada em sua tese de doutorado. O trabalho exposto por Donda⁽¹⁾ foi desenvolvido em escala laboratorial com moinhos de bancada na qual foram definidos parâmetros de ensaios a úmido e padronização de todo o procedimento. Sua metodologia aplica-se na determinação das curvas de consumo específico de energia por percentagem retida na malha de referência da remoagem de amostras de minério de ferro em ensaios com moinhos de bancada. A correlação dos valores obtidos em escala bancada com os valores obtidos de consumo específico de energia em escala industrial foram demonstrados por Donda⁽¹⁾ em sua tese. Tal metodologia baseia-se na equação de Rowland⁽²⁾ para determinação do consumo específico de energia após o tempo estabelecido de cominuição e posterior definição das curvas de consumo específico de energia versus percentagem retida na malha de 44 μ m.

Neste trabalho buscou-se a partir da metodologia utilizada por Donda estudar qual seria o efeito das dimensões do moinho e da distribuição da carga de bolas na determinação da energia específica de remoagem em ensaios com moinho de bancada.

Foram selecionadas quatro amostras de concentrado de flotação de minério de ferro provenientes de testemunhos de furo de sonda da região da Serra do Espinhaço, doravante denominadas de T626, T627, T628 e T629.

Considera-se para todo o trabalho que a sigla MJD significa: distribuição de carga de bolas utilizada por Joaquim Donda⁽¹⁾ e MOD significa distribuição de carga de bolas modificada.

1.2 Revisão da Literatura

Rowland⁽²⁾ explica que bolas de pequeno diâmetro não acumulam energia necessária para fragmentar as frações grosseiras contidas na alimentação nova da moagem. Já as bolas de grande diâmetro não são adequadas para fragmentar as frações mais finas contidas na alimentação e na carga circulante. Um desequilíbrio entre a carga de bolas reduz a eficiência do moinho.

Novamente em seu artigo Rowland⁽²⁾ traz a seguinte afirmação: em moinhos de bolas a energia consumida pode ser afetada pelo tamanho (diâmetro) das bolas utilizadas e enfatiza que nos moinhos com diâmetro maior que 8 pés (2,45 m) este efeito do tamanho de bola a ser utilizado torna-se mensurável.

Bond⁽³⁾ deixa claro em seu artigo que é exigido um ajuste na carga de bolas quando for se determinar W_i para partículas finas.

Rowland⁽²⁾ apresenta a equação corrigida para moinhos com diâmetro menor que 2,44 m e ainda afirma que para moinhos menores do que 0,76 m a potência calculada por esta equação é igual á potência medida. A equação corrigida para adequar a questão do ângulo de repouso da carga de bolas e é a seguinte:

$$kWb = 6,3 \times D^{0,3} \times \text{sen} \left[51 - 22 \times \left(\frac{2,44 - D}{2,44} \right) \right] \times (3,2 - 3 \times V_p) \times C_s \times \left[1 - \frac{0,1}{2^{(9-10 \times C_s)}} \right] \quad (I)$$

Onde:

kWb é kilowatts por tonelada de bolas, no eixo pinhão;

D é o diâmetro do moinho em metros, interno ao revestimento;

V_p é a fração do volume do moinho ocupada pelas bolas;

C_s é a fração da velocidade crítica adotada.

Beraldo⁽⁴⁾ relata que os modernos estudos do processo de cominuição devem-se basear na cinética de fraturamento das partículas, relacionando-a com as variáveis operacionais através de modelagem matemática.

Neste mesmo trabalho, Beraldo⁽⁴⁾ explica os mecanismos de quebra em uma partícula individual. Tais mecanismos são: abrasão, compressão e impacto. A quebra por abrasão é definida quando a partícula é fraturada por atrito, ou seja, através das interações partículas com qualquer outro mecanismo físico no interior do moinho (bolas, revestimento, outras partículas etc). A quebra por compressão ocorre quando a partícula é comprimida entre dois ou mais corpos moedores e/ou partículas maiores. Enquanto que a quebra por impacto ocorre quando a força aplicada é lenta e intensa, sendo muito superior à resistência da partícula. Nos moinhos tubulares carregados com bolas, essa quebra ocorre na zona de queda da bola.

2 OBJETIVO

Avaliar o efeito das dimensões entre moinhos de bancada 10"X10" e 8"X8" e da distribuição da carga de bolas através da determinação das curvas de consumo específico de energia por percentagem retida, na malha de 44 μm , para a remoagem de concentrado de flotação de minério de ferro em ensaios de bancada.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Baseado em Donda⁽¹⁾ a metodologia consiste em aplicar diferentes níveis de energia em amostras de concentrado de flotação através de ensaios de bancada em moinhos tubulares de laboratório, mantendo fixos os tempos de moagem. Neste trabalho foram utilizados moinhos com dimensões de 10"X10" e 8"X8". Pela Equação I, apresentada no item 1.2, calcula-se o consumo específico de energia para cada tempo de moagem estabelecido. Na Figura 1, é apresentado o fluxograma de execução dos ensaios e do processamento de dados.

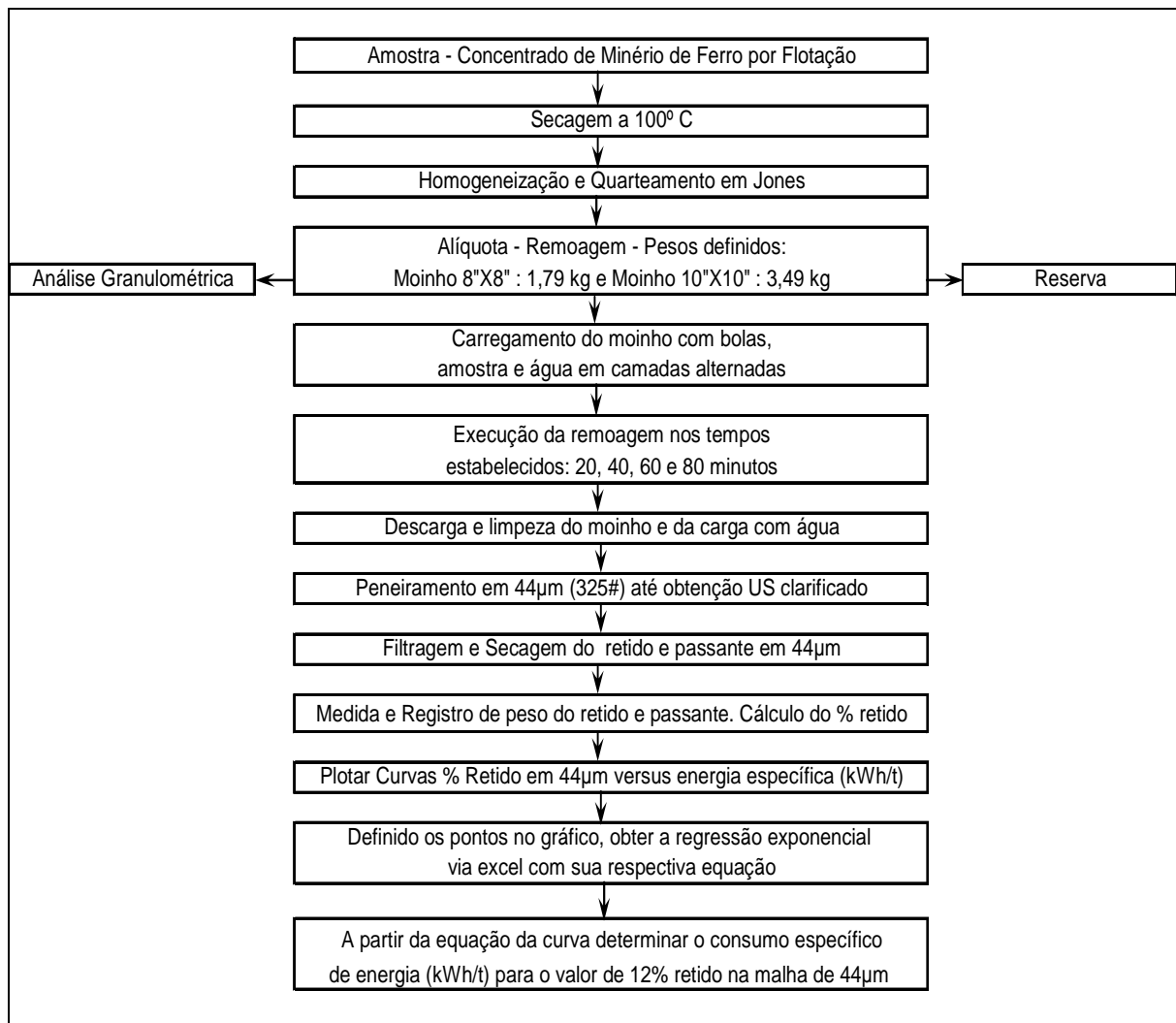


Figura 1 – Fluxograma para obtenção das curvas de consumo específico de energia versus % retida em 44 µm.

Dentre as condições operacionais, procurou-se, dentro do possível, fixar as principais variáveis operacionais correlacionadas ao ensaio de bancada conforme metodologia desenvolvida por Donda.⁽¹⁾ Estas variáveis operacionais são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Condições estabelecidas para os ensaios de remoagem em bancada

Parâmetro	Condições Teste			
	10"X10" MJD**	10"X10" MOD***	8"X8" MJD	8"X8" MOD
% enchimento (%)*	31,6	33,8	31,3	33,9
% sólidos em volume (%)	38,6	38,6	38,2	38,2
% velocidade crítica (%)	65	65	65	65
Massa de sólidos (g)	3490	3490	1790	1790
Peso carga de bolas (kg)	18,13	18,13	9,22	9,22
Volume interno moinho (litros)	12,870	12,870	6,590	6,590
Volume aparente da carga (litros)	4,190	4,490	2,10	2,280
Volume de polpa (litros)	1,820	1,820	0,940	0,940
Volume minério (litros)	0,702	0,702	0,360	0,360
Volume H ₂ O (litros)	1,119	1,119	0,583	0,583
Potência no eixo pinhão (kW)	0,0565	0,0549	0,0266	0,0257
Fator de Conversão do tempo de moagem (minutos) em energia (kWh/t)	0,2700	0,2621	0,2481	0,2395

* Medido experimentalmente para a carga de bolas utilizada em cada moinho (individual); ** MJD – distribuição de carga de bolas utilizada por J. Donda ⁽¹⁾ (Tabela 2); ***MOD – distribuição de carga de bolas modificada (Tabela 2).

Para se estudar o efeito das dimensões do moinho e da distribuição de carga de bolas no consumo específico de energia determinada pela equação de Rowland⁽²⁾ (Equação I), variou-se a distribuição da carga de bolas em moinhos de diferentes dimensões: 10x10" e 8x8", conforme Tabela 2.

Nota-se pela Tabela 2 que a distribuição de carga de bolas MOD, trata-se de uma distribuição mais "fina" quando comparada com a distribuição de carga de bolas MJD. Tal distribuição foi definida de modo a explorar melhor o mecanismo de quebra individual de partículas por abrasão (atrito).

Como as amostras analisadas são amostras oriundas de concentração de flotação, e encontram-se 100% abaixo de 150 µm, o mecanismo de quebra por abrasão deve prevalecer sobre os demais mecanismos citados no item 1.2.

A Tabela 2 apresenta em seu contexto como foi utilizada a distribuição da carga de bolas (diâmetro, massa e % em massa) em função do tipo de moinho, bem como a energia específica (kWh/t) calculada pela equação de Rowland⁽²⁾ em função do tempo estabelecido.

Tabela 2 – Variações da distribuição carga de bolas em função do tipo de moinho

	Diâmetro (mm)	Massa (kg)	% em massa	Energia (kWh/t)	Tempo (min)
Distribuição carga de bolas - MJD 8"X8"	30	2,67	29,0	5,0	20
	25	3,50	38,0	9,9	40
	20	1,94	21,0	14,9	60
	15	1,11	12,0	19,9	80
Distribuição carga de bolas - MOD 8"X8"	25	2,67	29,0	4,8	20
	20	4,15	45,0	9,6	40
	15	1,75	19,0	14,4	60
	12,5	0,65	7,0	19,2	80
Distribuição carga de bolas - MJD 10"X10"	30	5,26	29,0	5,4	20
	25	6,89	38,0	10,8	40
	20	3,81	21,0	16,2	60
	15	2,18	12,0	21,6	80
Distribuição carga de bolas - MOD 10"X10"	25	5,26	29,0	5,3	20
	20	8,16	45,0	10,5	40
	15	3,44	19,0	15,7	60
	12,5	1,27	7,0	21,0	80

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 apresenta as curvas de determinação do consumo específico de energia para a amostra T-627. Para elaboração destas curvas foram lançados os valores obtidos de % retido na malha de 44 μ m versus o consumo específico de energia (kWh/t) calculada através da equação de Rowland⁽²⁾ – Equação I. Para cada tamanho de moinho e distribuição da carga de bolas foram geradas as curvas de regressão (tipo exponencial – via Excel) de maneira a obter as equações que calculam o % retido na malha 44 μ m em função da energia específica consumida.

As equações (regressões) obtidas nos ensaios com moinhos 10"X10" e 8"X8" com a distribuição da carga de bolas de Donda⁽¹⁾ são semelhantes. Este comportamento é também notado quando utiliza-se a distribuição da carga de bolas modificada, mostrando que não há variação significativa no consumo específico de energia em função das variações nas dimensões para os moinhos estudados, porém observa-se que existe uma variação significativa no valor de energia específica quando é modificada a distribuição da carga de bolas. Esta variação fica evidente quando compara-se os valores dos coeficientes e expoentes das regressões obtidas entre as duas distribuições de carga de bolas utilizadas MJDXMOD.

Para as demais amostras testadas (T626, T628, T629) observa-se o mesmo comportamento, conforme apresentado nas Figuras 3, 4 e 5.

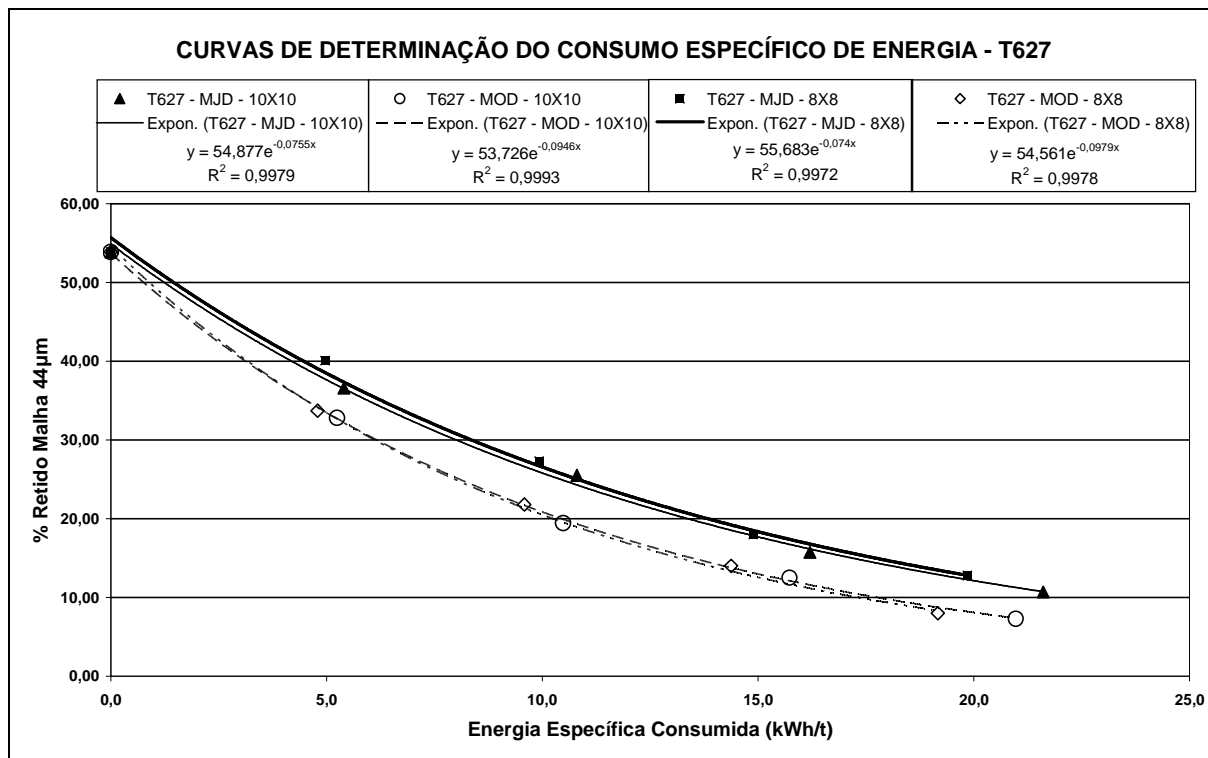


Figura 2– Curvas de determinação do consumo específico de energia - T627.

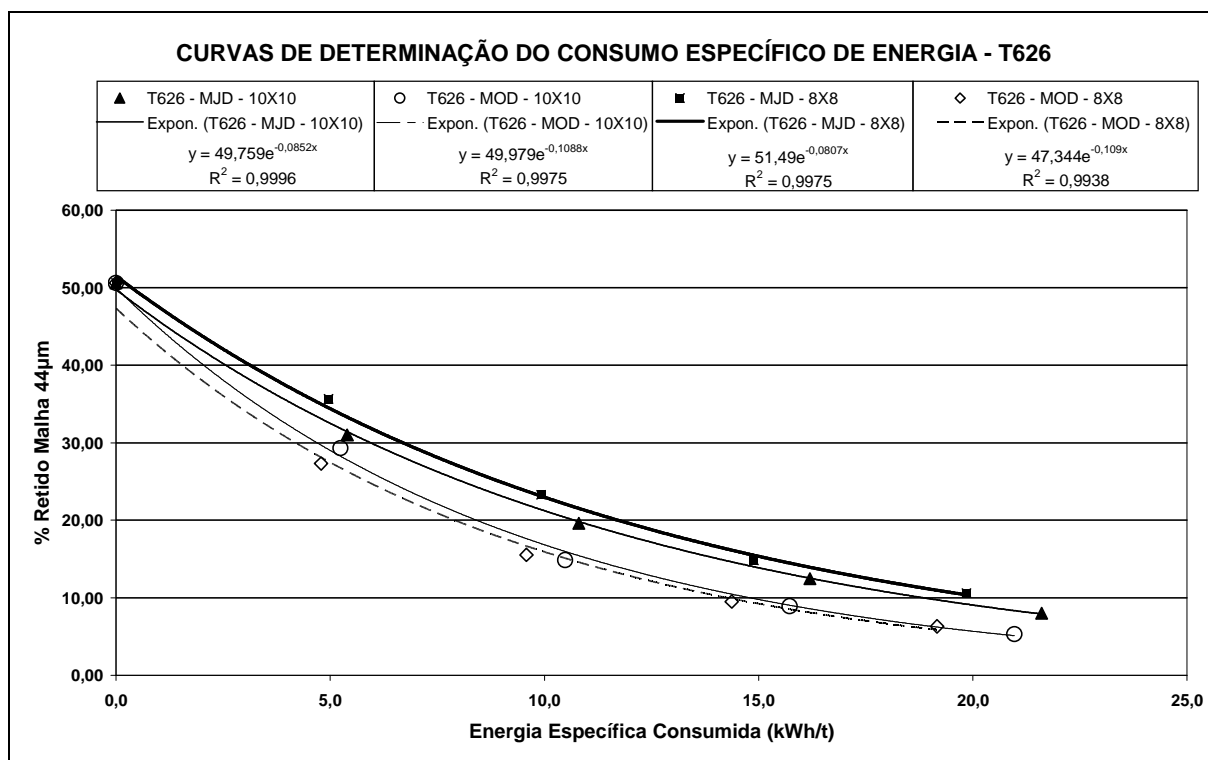


Figura 3 – Curvas de determinação do consumo específico de energia – T626.

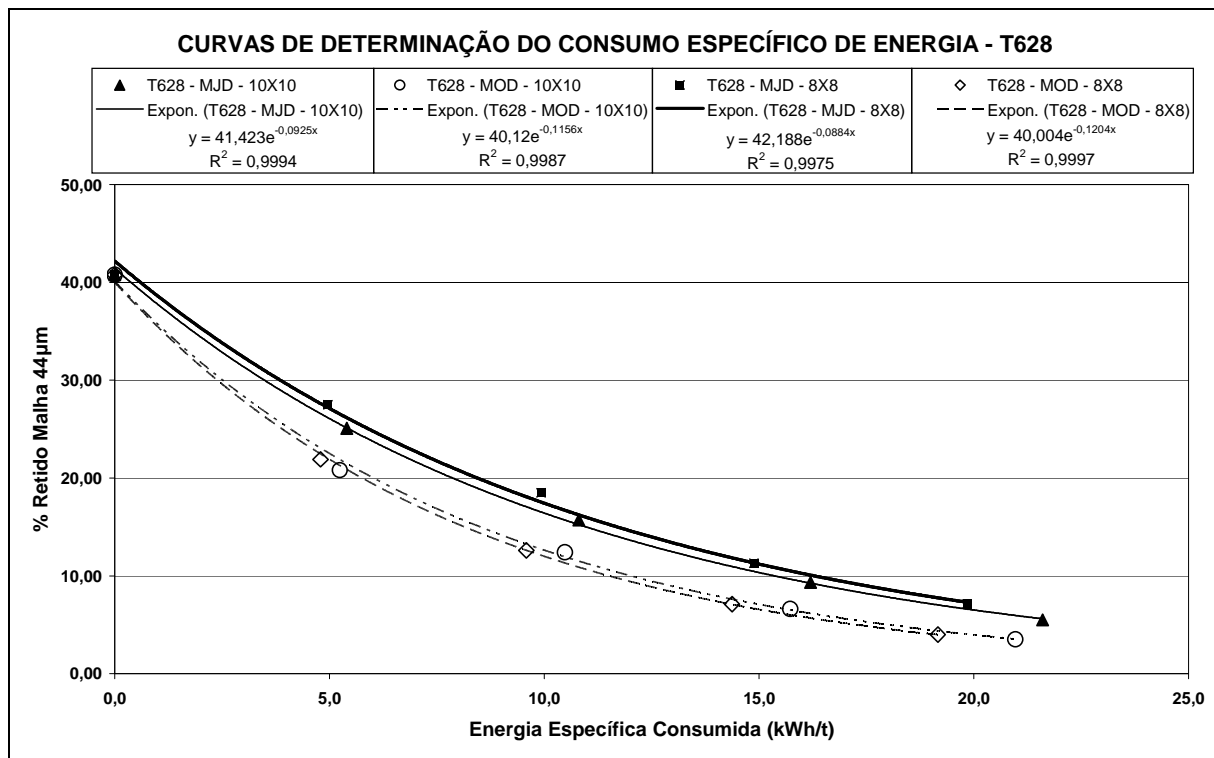


Figura 4 – Curvas de determinação do consumo específico de energia – T628.

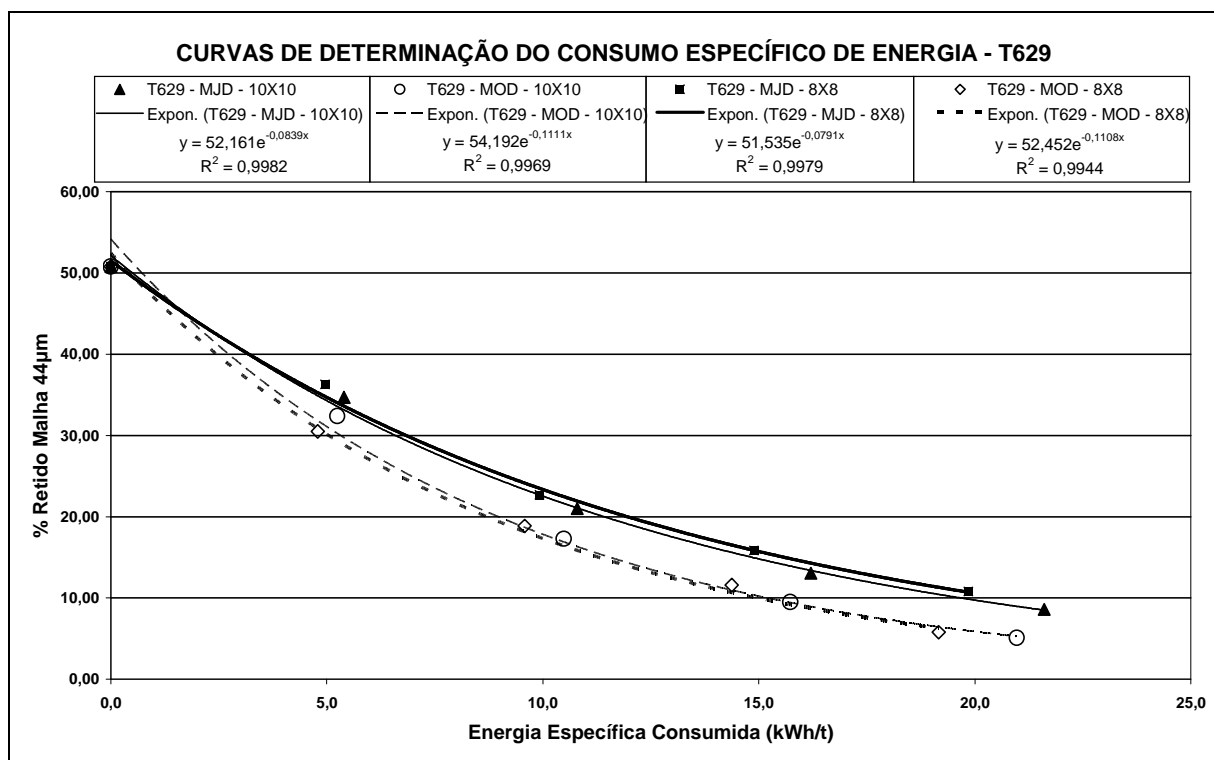


Figura 5 – Curvas de determinação do consumo específico de energia – T629.

Para comparação dos ensaios de remoagem em bancada foi definido o valor de 12% retido na malha de 44 μ m a fim de avaliar o efeito das dimensões do moinho e da distribuição da carga de bolas no consumo específico de energia, conforme Tabela 3. Para o cálculo da energia específica consumida para obter 12% da massa retida na malha de 44 μ m utilizou-se as equações apresentadas nas Figuras 2, 3, 4 e 5.

Tabela 3 – Consumo específico de energia obtido para 12% retido em 44 µm

ENERGIA NECESSÁRIA (kWh/t) – 12% Retido 44µm				
	10"X10"		8"X8"	
TESTE	kWh/t - MJD	kWh/t - MOD	kWh/t - MJD	kWh/t - MOD
T 626	16,69	13,11	18,05	12,59
T 627	20,13	15,85	20,74	15,47
T 628	13,39	10,44	14,22	10,00
T 629	17,51	13,57	18,42	13,31

Pelos resultados apresentados na Tabela 3 verifica-se que o efeito das dimensões do moinho não alterou significativamente o consumo específico de energia, mantida fixa a distribuição da carga de bolas, para o percentual retido analisado. Fato este observado nos quatro testes.

Ao avaliar o efeito da distribuição da carga de bolas para o percentual retido de 12%, pela Tabela 3, verifica-se que há redução significativa no consumo específico de energia quando utiliza-se a distribuição de carga de bolas modificada (MOD) em relação a distribuição da carga de bolas definida na metodologia (MOD) desenvolvida por Donda.⁽¹⁾ Este efeito é observado tanto para o moinho 8"X8" quanto para o moinho 10"X10".

Para as amostras testadas o consumo específico de energia determinado a partir de ensaios de bancada para remoagem mostra que a distribuição da carga de bolas é um parâmetro de processo que deve ser ajustado. Assim este parâmetro também deve ser investigado, analisado e ajustado para escalas industriais.

5 CONCLUSÕES

Para as amostras analisadas, concentrados de minério de ferro por flotação (abaixo de 0,15 mm), conclui-se que a distribuição da carga de bolas mais fina (modificada) exerce influência significativa na redução no consumo específico de energia em ensaios de bancada para os moinhos estudados, mantido fixos demais parâmetros operacionais analisados.

Para as amostras testadas os resultados de consumo específico de energia obtidos pela equação de Rowland⁽²⁾ não apresentam alterações significativas em relação as dimensões dos moinhos testados, mantendo fixos os demais parâmetros apresentados neste trabalho.

Por outro lado, a utilização de uma carga de bolas de distribuição mais "fina" aumenta a superfície de contato com as partículas, favorecendo o mecanismo de abrasão, o qual se mostra essencial na remoagem dos concentrados de flotação aqui investigados.

Agradecimentos

Ao Técnico em Mineração Júlio Silva que participou de todo o desenvolvimento do trabalho e principalmente pela criteriosa execução dos ensaios de remoagem.

Ao Técnico em Mineração Fabiano Gonzaga, pelo apoio na preparação das amostras de furos de sonda e testes de flotação para obtenção dos concentrados que foram utilizados nos ensaios de remoagem.

A Anglo Ferrous Brazil pelo incentivo no desenvolvimento de seus empregados.

A SGS-Geosol pela oportunidade para realização dos ensaios.

REFERÊNCIAS

- 1 DONDA, J. D. Um método para prever o consumo específico de energia na (re)moagem de concentrados de minérios de ferro em moinhos de bolas. Tese de doutorado. Belo Horizonte, CPGEM/UFMG, Abril 2003.
- 2 ROWLAND JR, 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, p. 605-617, 1986.
- 3 BOND, F.C. Crusching & Grinding Calculations. In: Selection Circuits to Prepare Beneficiation Feeds. Allis Chalmers Bulletin, May 1983.
- 4 BERALDO, J. L. Moagem em moinhos tubulares. São Paulo, Editora Edgar Blücher, 143 p., 1987.