

# AVALIAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO DA REMOAGEM DE CONCENTRADO DE MINÉRIO DE FERRO COM O AUMENTO DO TEOR DE SÍLICA\*

*Elias Fonseca de Castro<sup>1</sup>  
José Francisco Cabello Russo<sup>1</sup>  
Henrique Dias Gatti Turrer<sup>1</sup>  
Carlos Magno Nascimento<sup>1</sup>  
Leandro Almeida Santos<sup>1</sup>  
Jonathan Felipe de Lima Silva<sup>2</sup>*

## Resumo

O circuito de remoagem do projeto Minas-Rio é atualmente o maior do mundo utilizando moinhos verticais. O circuito possui 16 Vertimill VTM-1500 da Metso e 8 baterias de ciclones. O minério processado é um itabirito que é concentrado através de flotação reversa. O circuito de remoagem tem como objetivo reduzir a granulometria do concentrado final objetivando transportá-lo através de um mineroduto com 529km de extensão. O presente trabalho apresenta uma avaliação do consumo energético da remoagem de concentrado de minério de ferro, em bancada, com o aumento do teor de sílica. Os resultados deste trabalho mostraram que o teor de sílica na alimentação da remoagem possui efeito significativo no consumo energético.

**Palavras-chave:** minério de ferro; pellet feed; moagem; Vertimill.

## EVALUATION OF THE REGRINDING ENERGY CONSUMPTION OF THE IRON ORE CONCENTRATE WITH THE INCREASE OF THE SILICA CONTENT

## Abstract

The regrinding circuit of the Minas-Rio Project is currently the largest in the world using vertical mills. The circuit has 16 Metso Vertimill VTM-1500 and 8 cyclone batteries. The ore processed is an itabirite that is concentrated through reverse flotation. The objective of the regrinding circuit is to decrease the particle size distribution of the final concentrate in order to transport it through the 529km pipeline. This study presents the evaluation of the regrinding energy consumption of the iron ore concentrate, in bench scale, with the increase of the silica content. The results showed silica content has a significant effect in the energy consumption.

**Keywords:** iron ore; pellet feed; grinding; Vertimill.

<sup>1</sup> Gerência de Desenvolvimento de Processos da unidade de negócio Minério de Ferro Brasil da Anglo American – Rodovia MG10, Km180, Córrego Pereira, Conceição do Mato Dentro, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Gerência de Processos da unidade de negócio Minério de Ferro Brasil da Anglo American – Rodovia MG10, Km180, Córrego Pereira, Conceição do Mato Dentro, MG, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

O Minas-Rio, do grupo Anglo American, é um complexo industrial concebido para produzir 24,5 milhões de toneladas por ano de pellet feed (base seca). No Minas-Rio o minério é lavrado e beneficiado em Conceição do Mato Dentro-MG e bombeado até São João da Barra-RJ, através do maior mineroduto do mundo, contendo 529Km de extensão. Em São João da Barra o pellet feed é filtrado, estocado e embarcado através do Porto do Açú.

Em sistemas onde o transporte se dá através de mineroduto a remoagem é de extrema importância, uma vez que a granulometria é um dos parâmetros mais relevantes para o bombeamento. O circuito de remoagem do Minas-Rio é o maior do mundo a utilizar moinhos verticais. Os moinhos foram fornecidos pela Metso e são do modelo VTM-1500. A potência de cada Vertimill é de 1119kW. São 16 moinhos instalados, totalizando 17,9MW de potência. A remoagem do Minas-Rio está dividida em 2 prédios, conforme mostrado na figura 1.

O objetivo deste trabalho foi avaliar em laboratório o desempenho do circuito de remoagem de concentrado de minério de ferro em laboratório com o aumento do teor de sílica.



**Figura 1.** Vista do circuito de remoagem industrial do Minas-Rio.

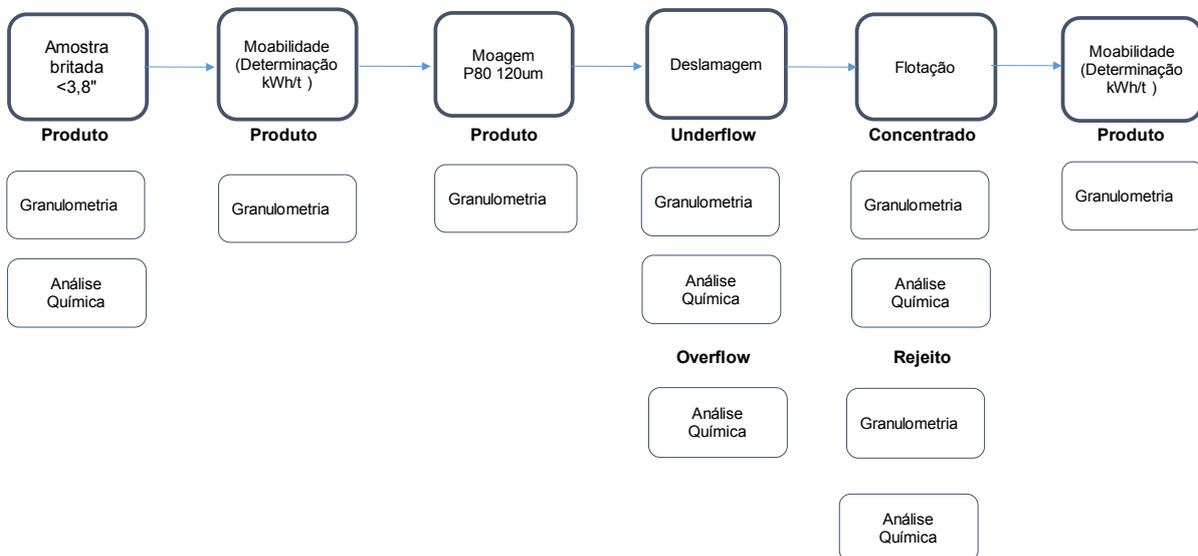
## 2 DESENVOLVIMENTO

Foram selecionadas amostras representativas das litologias existentes na mina, conforme mostrado na figura 2. Essas amostras foram blendadas, objetivando ficarem com as mesmas características do Run of Mine (ROM) previsto para alimentar a usina de concentração.



**Figura 2.** Litologias amostradas para formação do blend estudado.

Após formar o blend, representando a alimentação da usina, a amostra foi submetida aos seguintes ensaios: moabilidade (moagem e remoagem), deslamagem e flotação, conforme mostrado na figura 3.



**Figura 3.** Fluxograma adotado no estudo.

Os ensaios de moabilidade, simulando a moagem e a remoagem, foram realizados em moinho tubular de bolas, seguindo os parâmetros mostrados nas figuras 4 e 5, respectivamente.

### ENSAIO DE MOAGEM

Diâmetro Interno	m	0,457	Massa sólidos (seco)	kg	14,87
Comp. Interno	m	0,381	Massa de bolas	kg	72,65
Porosidade	%	40,0	Volume de água	L	5,226
J - Ench. Bolas	%	25,0	Vel. do teste	rpm	50,39
U - Ench. Material	%	100,0			
Dens. real sólidos	t/m <sup>3</sup>	3,80	Distribuição de Bolas		
Dens. apar. sólidos	t/m <sup>3</sup>	2,38	n	(mm)	(%) (kg)
Dens. real bolas	t/m <sup>3</sup>	7,75	1	50,8	42,1 30,6
Conc. sólidos	%	74,0	2	38,1	42,4 30,8
Vel. crítica adotada	%	76,1	3	25,4	15,5 11,3
Vol. Interno	m <sup>3</sup>	0,06	Total		100,0 72,65
Velocidade crítica	rpm	66,2			
Potência Mecânica	kW	0,355			

**Figura 4.** Condições operacionais do ensaio de moagem.

### ENSAIO DE REMOAGEM

Diâmetro Interno	m	0,203	Massa sólidos (seco)	kg	2,89
Comp. Interno	m	0,203	Massa de bolas	kg	12,67
Porosidade	%	40,0	Volume de água	L	1,239
J - Ench. Bolas	%	42,0	Vel. do teste	rpm	74,26
U - Ench. Material	%	100,0			
Dens. real sólidos	t/m <sup>3</sup>	4,90	Distribuição de Bolas		
Dens. apar. sólidos	t/m <sup>3</sup>	2,62	n	(mm)	(%) (kg)
Dens. real bolas	t/m <sup>3</sup>	7,65	1	25,00	0,0 0,0
Conc. sólidos	%	70,0	2	19,00	0,0 0,0
Vel. crítica adotada	%	76,1	3	16,00	35,5 4,5
Vol. Interno	m <sup>3</sup>	0,007	4	12,70	47,2 6,0
Velocidade crítica	rpm	97,6	5	8,00	12,6 1,6
Potência Mecânica	kW	0,036	6	6,35	4,7 0,6
			Total		100,0 12,7

**Figura 5.** Condições operacionais do ensaio de remoagem.

Rowland (1986) apresentou uma equação (equação 1) que permitiu calcular a potência para moinhos de pequeno porte (até 0,76m de diâmetro), que é a seguinte:

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

Onde:

kWb – QuiloWatts por tonelada de bolas no eixo pinhão

D – Diâmetro do moinho, em metros, interno ao revestimento

Vp – Fração do volume do moinho ocupado pelas bolas

Cs – Fração da velocidade crítica

De posse dessa potência e com o tempo de moagem, pode-se obter a energia consumida para uma determinada tarefa de moagem, que é dada pelas granulometrias e/ou superfícies específicas da alimentação e do produto.

DONDA (2003) propôs, desenvolveu e validou um método de previsão de consumo de energia em moinhos industriais, que basicamente faz a aplicação das equações de Bond-Rowland para o cálculo do consumo de energia, aplicando diferentes níveis de energia na moagem, em moinho de laboratório, utilizando diferentes tempos de moagem. O tempo de moagem é convertido em consumo específico de energia através da equação de Rowland. A aplicação dessa equação é que permite a simplificação dos procedimentos, uma vez que não são necessárias medições do consumo de energia. O método é simples, padronizável e utiliza pequenas quantidades de material e é facilmente reproduzível.

Após definir o tempo de moagem necessário para obter um produto com P80 igual a 120 $\mu$ m, foram realizadas 7 moagens nas mesmas condições, conforme mostrado na figura 4. Os produtos dessas 7 moagens formaram um composto que foram utilizados nos testes seguintes (deslamagem, flotação e remoagem).

Os ensaios de deslamagem em balde foram realizados em duas etapas, simulando o circuito industrial, conforme procedimento interno do Centro de Tecnologia Mineral da Anglo American.

Os ensaios de flotação em bancada foram realizados em cuba de 4,5L. A concentração de sólidos em peso foi ajustada para 60 e 40% no condicionamento e na flotação, respectivamente. A amina (7500 da Clariant) e amido (Gritz da Kowalski) foram preparados a uma concentração de 1%. O amido foi adicionado a 500 g/t e solubilizado com hidróxido de sódio em uma proporção de 5 para 1. A dosagem de amina variou em função do teor de sílica desejado. O pH da flotação foi ajustado para 10,5. Os tempos de condicionamento do amido e da amina foram, respectivamente, 5 e 1 minuto. A agitação foi controlada a 1.200 e 1.500 rpm, respectivamente, no condicionamento e na flotação. O material flotado foi coletado durante 6 minutos, após o início da aeração, que foi ajustada em 2LPM.

Foram produzidos concentrados com teores de sílica variando entre, aproximadamente, 1 e 15% nos testes de flotação. Esses concentrados alimentaram os ensaios de moabilidade (remoagem) que foram realizados nas mesmas condições, conforme mostrado na figura 5.

Foram estudados teores de sílica acima de 5% na alimentação da remoagem em função de um projeto que se encontra em estudo. Esse projeto contempla a instalação de colunas de flotação após a remoagem, permitindo produzir um “pré-concentrado” com alta sílica na flotação convencional (TK Cell) existente à montante do circuito de remoagem. Com isto, a limpeza final do concentrado ocorrerá após a remoagem, em um circuito preparado para concentrar finos e ultrafinos.

A determinação da granulometria foi realizada através de peneiramento suspenso a úmido em peneiras de 600, 425, 300, 212, 150, 106, 75, 53, 44 e 38  $\mu$ m, onde a fração passante classificada em cyclosizer CL-502 da CDC. As composições químicas foram determinadas pelo método analítico de fluorescência de raios-x, por meio do aparelho Axios Fast da Panalytical, em pastilhas fundidas.

PALANIANDY et al. (2015) utilizaram as equações 2 e 3 para estimar o consumo energético para a geração de material abaixo de 75 micrômetros (moagem secundária e terciária) e 25 micrômetros (remoagem).

$$SSE_{75} = \frac{SE}{(P_{75} - F_{75})/100} \quad (\text{eq. 2})$$

$$SSE_{25} = \frac{SE}{(P_{25} - F_{25})/100} \quad (\text{eq. 3})$$

Nesse trabalho esta equação foi modificada (eq.4), devido industrialmente a malha de controle das granulometrias da alimentação e do produto da remoagem ser 44 $\mu$ m.

$$SSE_{44} = \frac{SE}{(P_{44} - F_{44})/100} \quad (\text{eq. 4})$$

Onde:

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

SE - Energia Específica (kWh/t)

$F_{44}$  - fração passante em 44 $\mu$ m da alimentação (%)

$P_{44}$  - fração passante em 44 $\mu$ m do produto (%)

Neste trabalho utilizou-se também o Índice de Trabalho Operacional (OWi) para comparar o desempenho dos testes de moagem em bancada. A equação 5 foi usada para esses cálculos (Bond, 1952).

$$OWi = \frac{E}{10 \left[ \left( \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) - \left( \frac{1}{\sqrt{P_{80}}} \right) \right]} \quad (\text{eq.5})$$

Onde:

OWi - Índice de Trabalho Operacional (kWh/t)

E - Energia Específica (kWh/t)

$F_{80}$ -Malha que contém 80% passante na alimentação ( $\mu$ m)

$P_{80}$ -Malha que contém 80% passante no produto ( $\mu$ m)

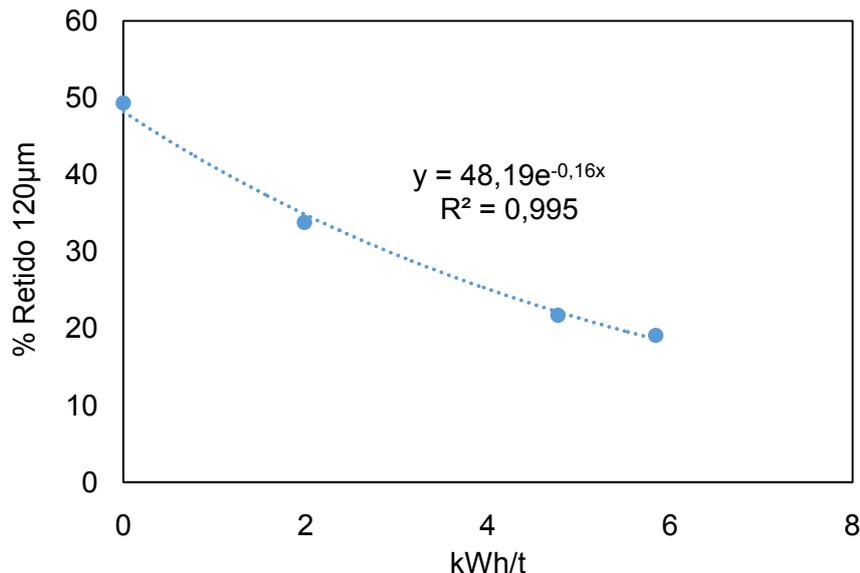
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 1 são apresentadas as composições químicas das litologias e do blend formado, representando o ROM previsto para alimentar a usina de concentração

**Tabela 1.** Litologias estudadas

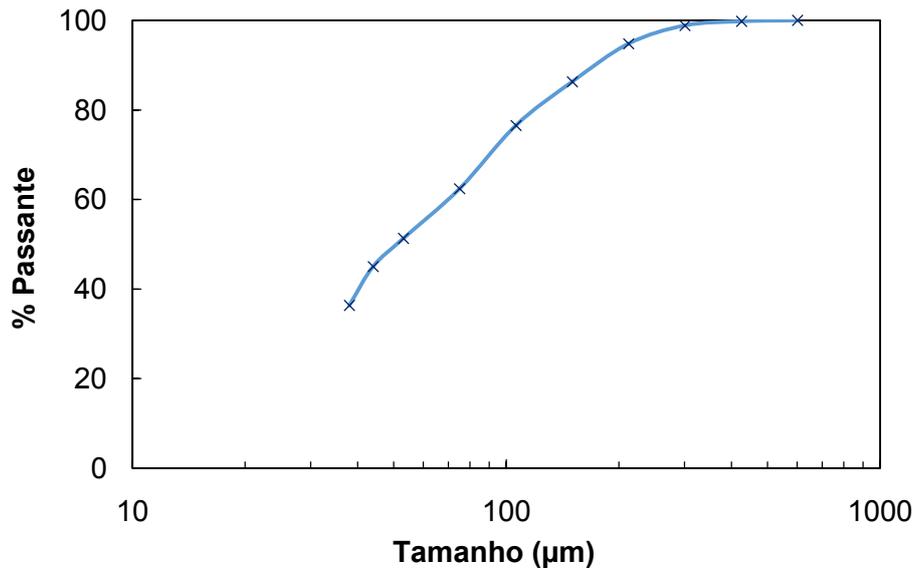
Litologias	Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	Mn
ISF	37,14	45,89	0,422	0,01	0,011
IFX	50,66	19,46	5,268	0,054	0,14
IF- 43% Fe	43,80	35,44	1,25	0,005	0,008
IF- 45% Fe	45,15	33,78	1,36	0,005	0,012
IT	37,16	45,52	0,434	0,024	0,018
<b>Blend Estudado</b>	<b>42,53</b>	<b>36,72</b>	<b>1,11</b>	<b>0,023</b>	<b>0,018</b>

O ensaio de moabilidade em bancada mostrou ser necessário 5,43kWh/t para atingir um P80 igual a 120µm, implicando em um tempo de moagem de 13,7 minutos, conforme mostrado na figura 6.



**Figura 6.** Resultado do ensaio de moabilidade, simulando a moagem.

Após realizar as 7 moagens nas mesmas condições e com o mesmo tempo de moagem (13,7 minutos), os produtos formaram um composto que foi utilizado nos testes seguintes. A figura 7 mostra a análise granulométrica desse composto. Observa-se que o P80 alcançado foi de 120,3µm, evidenciando a precisão do método utilizado.



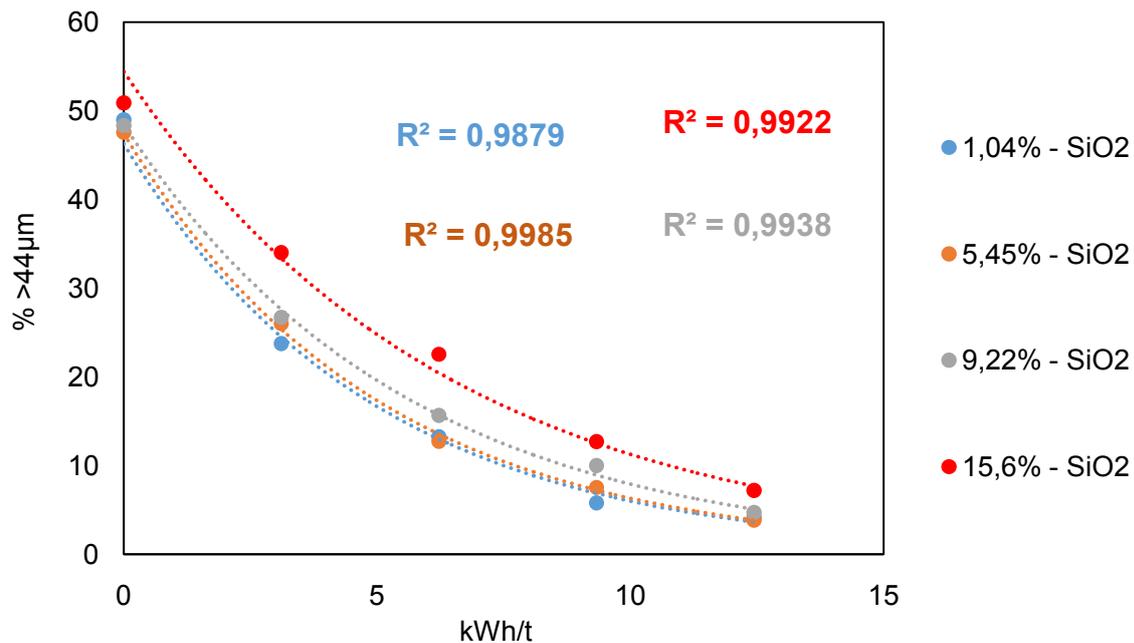
**Figura 7.** Granulometria do produto da moagem.

A tabela 2 apresenta as condições e os respectivos resultados obtidos nos testes de flotação em bancada.

**Tabela 2.** Resultados dos ensaios de flotação em bancada

Teste	Fluxos	Fe (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	P (%)	Rec. Peso (%)	Rec Metal. (%)
1	Alimentação	42,04	0,715	38,71	0,016		
	<b>Concentrado</b>	69,04	0,320	<b>1,04</b>	0,020	53,98	88,65
	Rejeito	10,37	1,000	82,85	0,011		
2	Alimentação	42,04	0,715	38,71	0,016		
	<b>Concentrado</b>	64,97	0,347	<b>5,45</b>	0,024	59,22	91,52
	Rejeito	8,74	0,999	85,59	0,008		
3	Alimentação	42,04	0,715	38,71	0,016		
	<b>Concentrado</b>	62,34	0,382	<b>9,22</b>	0,025	61,17	90,71
	Rejeito	10,06	0,899	84,37	0,008		
4	Alimentação	42,04	0,715	38,71	0,016		
	<b>Concentrado</b>	58,57	0,329	<b>15,60</b>	0,018	68,75	95,79
	Rejeito	5,67	1,301	89,39	0,009		

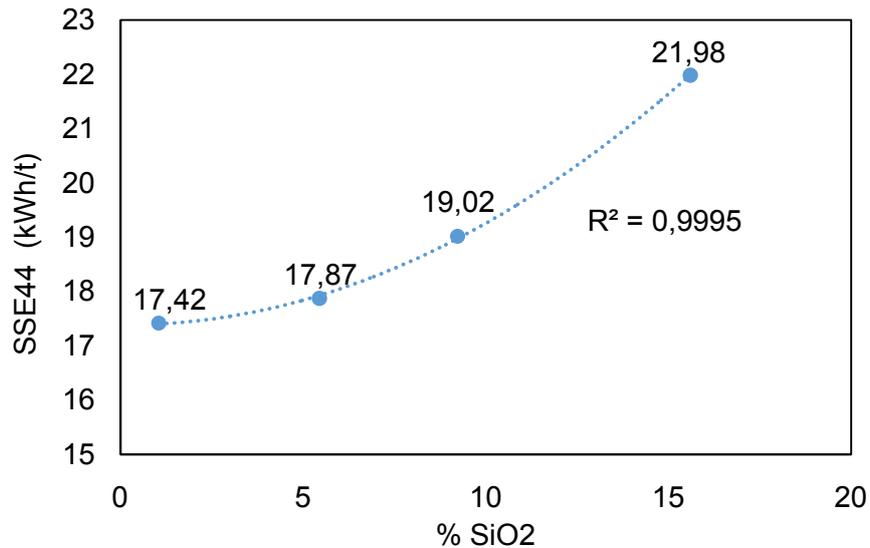
Os concentrados desses ensaios de flotação foram submetidos a ensaios de moabilidade, simulando a remoagem. Na figura 8 é apresentado o consumo específico de energia em função do percentual retido em 44µm para os quatro teores de SiO<sub>2</sub> estudados.



**Figura 8.** Efeito do teor de sílica no consumo específico de energia em remoagem de laboratório.

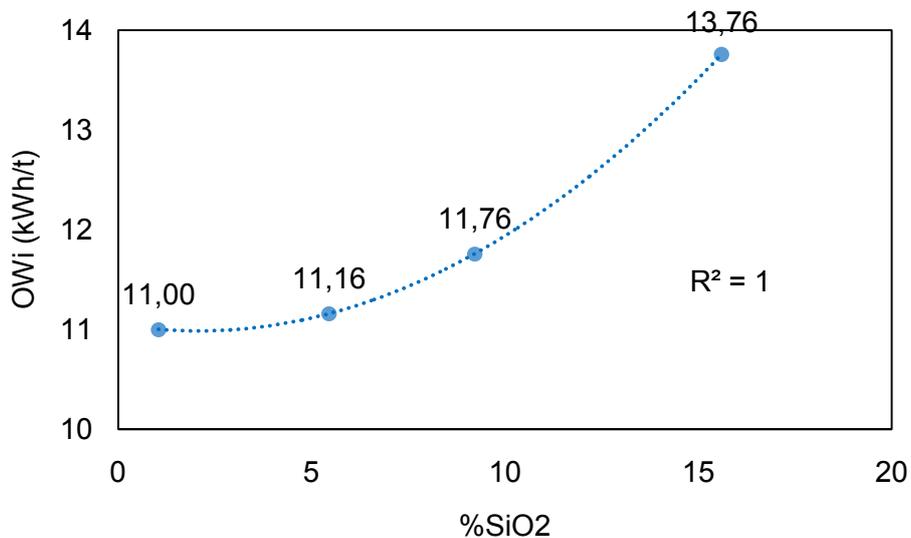
A análise de variância dos resultados resumidos na figura 8 mostrou que a sílica no concentrado exibe um efeito significativo no desempenho da remoagem, principalmente, quando seu valor ultrapassa 5%. Esses resultados permitiram definir limites de taxas e teores da alimentação, em função da energia disponível na remoagem industrial. Esses testes de laboratório ainda mostraram a baixa eficiência para geração de material abaixo de 10µm. O modelo estatístico gerado com os resultados apresentou um elevado coeficiente de correlação ajustado, de 92,9%, e baixo nível de significância para o teor de sílica da alimentação. Isso evidencia que, para o minério testado, somente o tempo de moagem teve efeito na geração de ultrafinos. Isso ratificou que, para se obter aumentos substanciais nessa variável, uma elevada demanda energética seria requerida. Por exemplo, um aumento de 10 para 15% no percentual abaixo de 10µm demandaria um aumento no consumo energético de 73% na moagem em laboratório.

Os resultados obtidos nos ensaios de remoagem foram utilizados para calcular a SSE<sub>44</sub>, conforme mostrado na figura 9. Observa-se uma forte correlação entre o teor de sílica e a energia específica requerida para geração de material abaixo de 44µm.



**Figura 9.** Energia específica requerida para geração de material abaixo de 44µm em função do teor de sílica em moinho de bancada.

Por fim, foram calculados os índices de trabalho operacional em função dos teores de SiO<sub>2</sub>, utilizando os resultados obtidos nos ensaios de remoagem. Observa-se novamente uma elevadíssima correlação entre o teor de sílica e o consumo energético, evidenciado pelo índice de trabalho operacional.



**Figura 10.** Índice de trabalho operacional em função do teor de sílica.

### 3 CONCLUSÃO

Os resultados desse estudo mostraram que teores de sílica acima de 5% e o aumento da fração passante em 10 $\mu$ m demandam um aumento do consumo energético significativo na remoagem do minério do Minas-Rio.

### 4 REFERÊNCIAS

- 1 Bond, F. C. (1952) The Third Theory of Comminution, AIME Trans., Vol. 193, pp. 484.
- 2 DONDA, J.D. (2003) Uma metodologia para prever o consumo específico de energia na remoagem de concentrados de minério de ferro. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade de Minas Gerais, 115 p. (Tese, Doutorado, Engenharia Metalúrgica e de Minas)
- 3 PALANIANDY, S.; POWELL, M.; HILDEN, M.; ALLEN, J.; KERMANSHAHI, K.; OATS, B.; LOLLBACK, M. (2015) VertiMill® – Preparing the feed within floatable regime at lower specific energy. Minerals Engineering, v.73, p.44-52.
- 4 ROWLAND, C. A. (1986) 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.