



## RELAÇÕES ENTRE A QUALIDADE DO *RUN OF MINE* E O CONSUMO DE ÁGUA NO PROCESSAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO

**Junio Moreira Rodrigues**

Faculdade Ietec. Ipê Mirim 685, Jardim dos Ipês, Itabira – Minas Gerais, Brasil.

Celular: (+55 31) 986930821, Mail: [juniomr1@yahoo.com.br](mailto:juniomr1@yahoo.com.br)

Aline Pereira Leite Nunes. Faculdade Ietec

[alineplnunes@yahoo.com.br](mailto:alineplnunes@yahoo.com.br)

### RESUMO

Este trabalho descreve as relações entre teores e granulometria do *run of mine* (ROM) e o consumo de água em uma usina de beneficiamento de minério de ferro. Tem-se a comparação entre valores de consumo de água total em cenários de restrição hídrica com redução de 30% do valor de outorga. Aplicou-se a função *Stepwise* do Minitab, que demonstrou significância na aplicação da regressão linear múltipla. Os impactos por falta de água para operação da usina de beneficiamento de minério de ferro ocorrem em cerca de 30% do período avaliado. Observou-se forte correlação entre consumo total de água e os teores de Fe e SiO<sub>2</sub>. Cerca de 85% do ROM está na granulometria menor que 1 mm, sendo que o ferro e a sílica acumulam-se com maior frequência na fração -1 + 0,15 mm. Os resultados demonstraram que as frações granulométricas abaixo de 1 mm apresentaram maior impacto no consumo de água.

Palavras-chave: Consumo de água, Beneficiamento de minério de ferro, Teores, Granulometria, Estimativa por equações.

### ABSTRACT

This work describes the relationship between run of mine (ROM) content and granulometry and water consumption in an iron ore processing plant. There is a comparison between the values obtained of new water and the consumption in scenarios of restriction with a reduction of 30% of the value of grant. The Stepwise function of Minitab was applied, which showed significance in the application of multiple linear regression. Impacts due to lack of water for operation of the iron ore processing plant occur in about 30% of the period evaluated. It was observed a strong correlation between total water consumption and Fe and SiO<sub>2</sub> contents. About 85% of the ROM is in the particle size less than 1 mm, with iron and silica accumulating more frequently in the fraction -1 + 0.15 mm. The results showed that the granulometric fractions below 1 mm had a greater impact on water consumption.

Keywords: Water consumption, Iron ore beneficiation, Feeds, Granulometry, Estimation by equations.

## 1. INTRODUÇÃO

As atividades de mineração podem ser consideradas fator importante no crescimento da economia do Brasil desde o período colonial, impulsionando o processo de expansão e consolidação do território nacional [1]. Em termos mundiais, o cenário vivido pela mineração nas duas últimas décadas foi de expansão da oferta a qualquer custo, causando aumentos extraordinários nas produções e uma reconfiguração do mercado.

As atividades de produção mineral são hidrodependentes e hidroativas: os valores médios para água de surgência nas operações de lavra a céu aberto são de 9.000 m<sup>3</sup>/h, chegando a 20.000 m<sup>3</sup>/h na lavra subterrânea; nos minerodutos, os volumes de água consumida são da ordem de 2.500 m<sup>3</sup>/h; os efluentes aquosos provenientes da produção de aço bruto chegam a 2,47 m<sup>3</sup>/h [2].

O Plano Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais, elaborado pelo Instituto Mineiro das Águas [3], informa que a vazão de água total captada para suprimento das atividades de mineração no estado é da ordem de 100.000 m<sup>3</sup>/h, sendo que 98% deste volume são provenientes de captação em cursos de água superficiais.

Tal volume representa 11% da demanda total estimada em Minas Gerais, maior estado minerador do Brasil. Embora estes números sejam referentes apenas ao estado de Minas Gerais, os dados são suficientes para comprovar a elevada dependência de água no setor.

O aumento da dependência de água pela mineração está diretamente relacionado à necessidade de aproveitamento de minérios cada vez mais complexos e de menores teores, contribuindo para o aumento do estresse hídrico [4]. De forma geral, quanto menores são os teores dos minérios maiores serão as demandas por água no beneficiamento, em consequência dos maiores volumes a serem processados e do maior número de operações de concentração para que as especificações químicas e físicas dos produtos sejam alcançadas [5].

Consequentemente, a recirculação de água nos processos de beneficiamento se torna fundamental e necessária [6] [7] [8].

Nesta perspectiva, e sabendo-se que um dos parâmetros de maior interferência no consumo de água e nas taxas de recirculação no beneficiamento são as características químicas e físicas dos minérios que alimentam as usinas, este trabalho se propõe a avaliar as relações entre a qualidade do ROM (teores e granulometria) e o consumo de água no processo, com o objetivo de verificar a possibilidade de previsão das demandas futuras em cenários de queda de teores e de restrição hídrica, contribuindo, assim, para uma mineração mais sustentável frente à gestão dos recursos hídricos por ela utilizadas.

O objetivo desse estudo foi caracterizar as relações entre a qualidade do ROM e o consumo de água no processamento de minério de ferro. Foi analisado o consumo de água em função da variação dos teores de ferro (Fe), sílica (SiO<sub>2</sub>), alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), fosforo (P), manganês (Mn), umidade e das granulometrias do ROM. Também foi feita a análise do consumo de água no beneficiamento, considerando-se cenários de restrição de outorga para captação de água do meio ambiente, isto é, captação de água nova.

## 2. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizados os dados de uma mina de grande porte, localizada na porção Nordeste do Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais. Esta mina lavra um “minério rico” com teor de 59,9% Fe e produz cerca de 24 MTPA (milhões de toneladas produzidas por ano), com ROM de 30 MTPA. Considerando toda a mina, constata-se que o maior volume é utilizado na usina de beneficiamento, integrando o processo produtivo por várias operações unitárias, desde cominuição até as operações de separação sólido-líquido.

Foram coletados dados diários na produção e de consumo de água, com valores médios diários de captação de água nova de aproximadamente 30.991m<sup>3</sup>/dia, consumo

médio total de 533.414 m<sup>3</sup>/dia, valor médio de água no produto de aproximadamente 7.747 m<sup>3</sup>/dia e uma produção média de 77.466 t/dia de produto final. Também foram medidos os teores do ROM em percentuais em média encontrados e alimentados nos processos na usina, cujos valores foram aproximadamente 49% de ferro (Fe) e 25% de sílica (SiO<sub>2</sub>). As principais variáveis que integraram o banco de dados utilizado foram:

volume de água total (m<sup>3</sup>/h e m<sup>3</sup>/dia);  
volume de água recirculado (m<sup>3</sup>/h e m<sup>3</sup>/dia);  
água nova adicionada (m<sup>3</sup>/h e m<sup>3</sup>/dia);  
teores de Fe (% em massa), tanto na alimentação (teores globais no ROM), como por fração granulométrica;  
teores de contaminantes - SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, P, Mn (% em massa), tanto na alimentação (teores globais no ROM), como por fração granulométrica;  
distribuição granulométrica da alimentação (% em massa do ROM);  
rendimento operacional (RO – horas efetivamente trabalhadas);  
produção (t/h e t/dia);  
taxa de alimentação (t/h e t/dia).

Os modelos para consumo de água foram gerados a partir de regressões em análises estatísticas destes dados, e considerando-se os valores obtidos para R<sup>2</sup> (R quadrado), R<sup>2</sup> aj. (R quadrado ajustado) e R<sup>2</sup> pred. (R quadrado predito). Tais parâmetros foram utilizados para identificação das correlações mais fortes. Foram desenvolvidas análises estatísticas utilizando-se equações e gráficos de análise de dados do *software Excel* e ferramentas de análise estatística do *software Minitab*, para constatação de hipóteses.

Para a análise por regressão linear múltipla, foram identificados, previamente, os melhores subconjuntos que explicariam as correlações, onde foram utilizadas técnicas

de seleção de variáveis nas funções do *Minitab* denominadas *Best Subsets* e *Stepwise*. Estas ferramentas realizam a regressão e indicam os melhores subconjuntos de forma automática, identificando os modelos de regressão com melhor ajuste aos preditores especificados, e seleciona o menor subconjunto que atende aos critérios estatísticos, através da seleção das melhores variáveis e remoção as variáveis de menor influência no modelo.

A comparação dos resultados das análises de regressão linear múltipla das variáveis permitiu a identificação das melhores equações matemáticas para estimativa do consumo de água em função de teores e granulometria do ROM. Assim, a partir destes modelos, foi possível simular cenários de empobrecimento do minério, que ocorre tanto no declínio dos teores de Fe quanto no aumento de seus contaminantes (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, P, Mn).

Foram realizadas simulações comparativas utilizando-se o modelo para o balanço hídrico desenvolvido pela empresa. Considerando-se o balanço hídrico para a água nova, o valor outorgado para o empreendimento se restringe a 2.000m<sup>3</sup>/h, com previsões de redução deste valor. Assim, os cenários de redução da qualidade do minério foram analisados também levando-se em consideração restrições hídricas.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O gráfico da figura 1 apresenta a distribuição granulométrica média do ROM da mina de minério de ferro. Pode-se observar que, aproximadamente, 85% do ROM tem granulometria menor que 1 mm. Porém, cerca de 58% é menor que 0,15mm. Assim, o percentual médio da fração -1+0,15mm é de aproximadamente 27%.

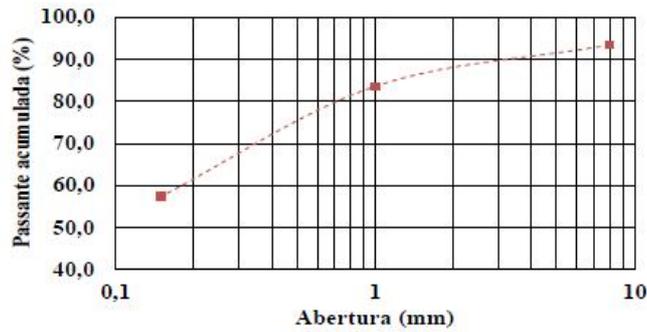


Figura 1 – Distribuição granulométrica média do ROM.

A distribuição média acumulada dos teores do ROM no período analisado é apresentada no gráfico da figura 2. Alguns elementos têm acumulação preferencial em certas frações. A sílica (SiO<sub>2</sub>), por exemplo, acumula-se, preferencialmente, na fração -1+0,15mm. O Fe tem comportamento similar, no entanto,

observa-se que este elemento se concentra também até frações mais grosseiras. A alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) se distribui de maneira muito semelhante ao Fe, enquanto os demais elementos se distribuem em ampla faixa granulométrica.

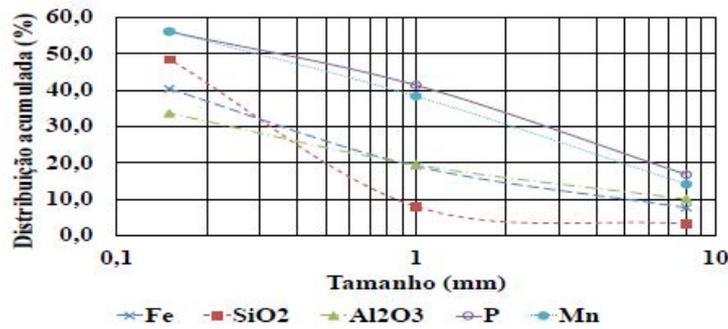


Figura 2 – Distribuição acumulada de teores médios do ROM.

Além dos estudos de distribuição granulométrica, realizou-se também a avaliação da correlação entre os teores dos elementos mineralógicos e químicos constituintes do ROM. Pelos gráficos da figura 3, observa-se que existe forte correlação entre os teores de Fe e SiO<sub>2</sub>. As demais

correlações entre teores, ilustradas nos gráficos das figuras 4 a 6, apresentaram menores ajustes, sendo que a alumina apresenta alguma correlação, o que indica a associação deste elemento a fases portadoras de ferro, como as goethitas terrosas e hematitas alteradas.

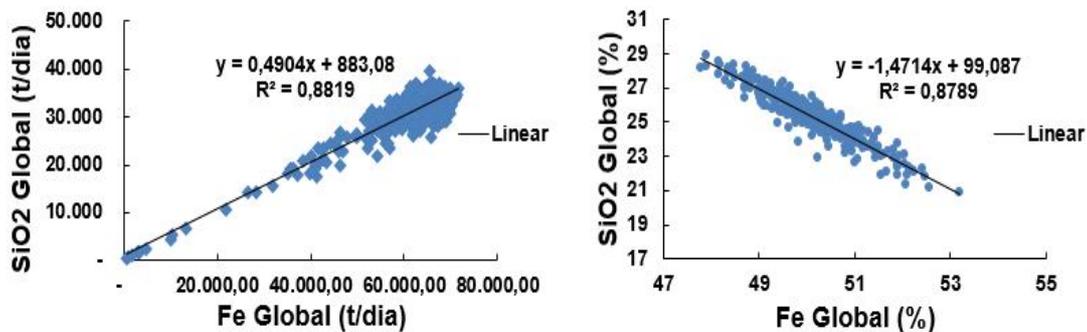


Figura 3 – Correlações entre sílica e ferro do ROM.

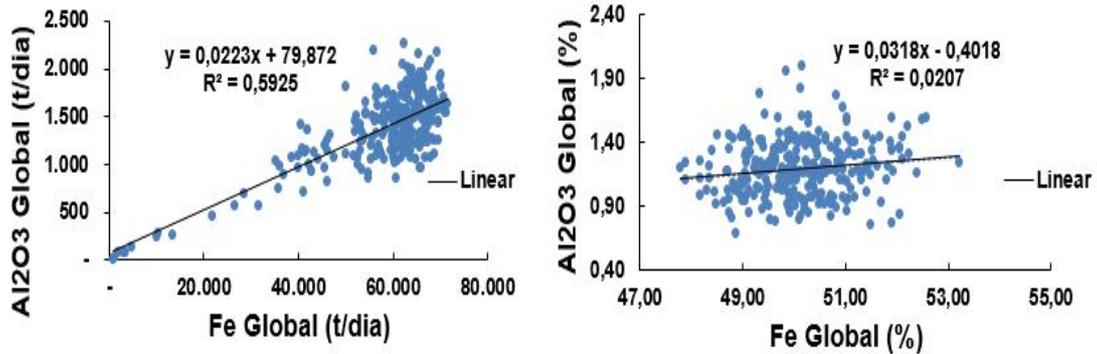


Figura 4 – Correlações entre alumina e ferro do ROM.

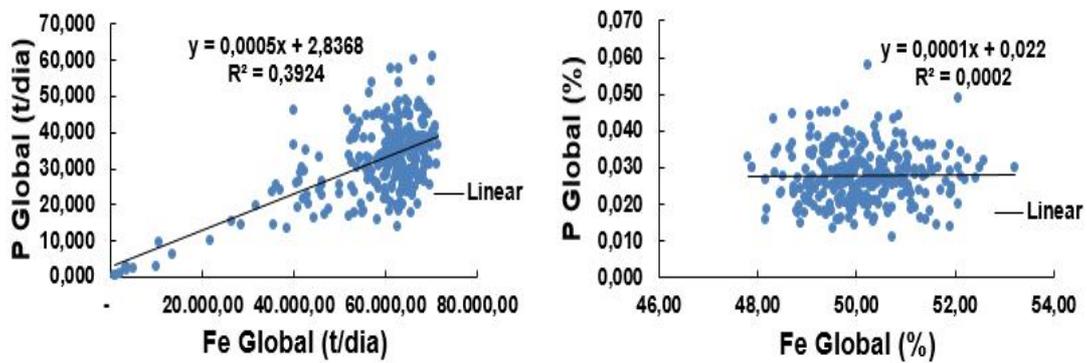


Figura 5 – Correlações entre fósforo e ferro do ROM.

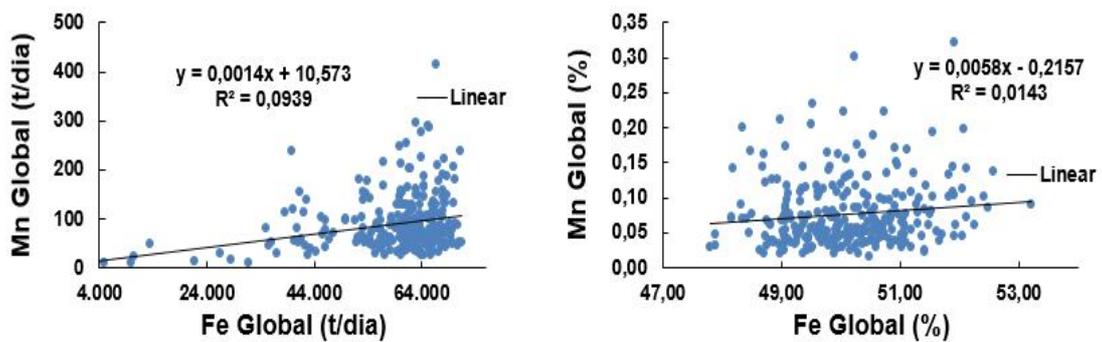


Figura 6 – Correlações entre manganês e ferro do ROM.

O resultado da dispersão de água total consumida em função da quantidade de Fe global, conforme figura 7, demonstra um bom ajuste pelo método dos mínimos

quadrados. Para a dispersão de água total consumida em função do percentual do teor de Fe global, não demonstrou bom ajuste.

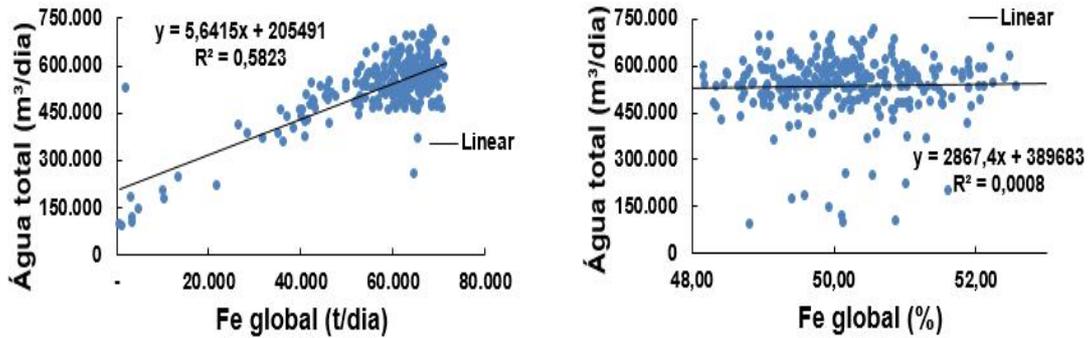


Figura 7 – Correlações entre consumo de água total e ferro do ROM.

O resultado da dispersão de água total consumida em função da quantidade de sílica (SiO<sub>2</sub>) global contida também demonstra um bom ajuste pelo método dos mínimos

quadrados (figura 8). Para a dispersão de água total consumida em função do percentual do teor de SiO<sub>2</sub> global, também não demonstrou bom ajuste.

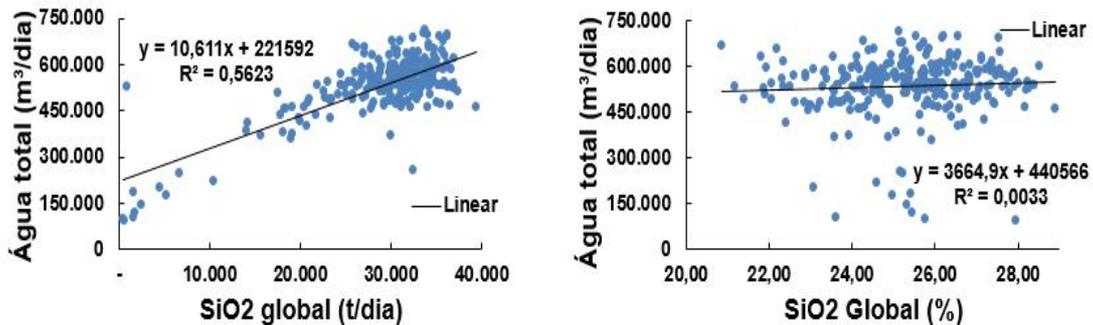


Figura 8 – Correlações entre consumo de água total e sílica do ROM.

### PREVISÃO DE CONSUMO DE ÁGUA EM CENÁRIOS DE REDUÇÃO DE QUALIDADE DO ROM

A análise das relações entre os consumos de água total e os parâmetros de qualidade do ROM iniciou-se com a avaliação da dispersão entre os teores, quantidades e granulometrias para comprovar a tendência linear ou não linear, conforme apresentado anteriormente e, em seguida, procedeu-se à análise de múltiplas variáveis, ou seja, a regressão linear múltipla. Assim, a previsão de consumos de água se baseou nas equações obtidas a partir da regressão linear múltipla.

Para Zimmer [9], a regressão linear é uma ferramenta estatística relacionada à matriz X (composta por variáveis de processo x) e à matriz Y (composta por variáveis de produto y), permitindo analisar dados com forte

correlação, elevados níveis de ruído e desequilíbrio entre o número de variáveis e observações.

A regressão gera um conjunto de parâmetros que fornecem informações sobre a estrutura e o comportamento de X e Y, o que corrobora para sua ampla aplicação em procedimentos de seleção de variáveis. A regressão linear múltipla pode ser representada pela Equação 1.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_i x_i \quad (1)$$

Em que:  
 Y é a variável resposta ou variável dependente;  
 $\beta_0, \dots, \beta_i$  são os coeficientes da regressão;  
 $x_1, \dots, x_i$  são as variáveis independentes.

Para análise da variável dependente “consumo de água total”, foram correlacionados a produção (t/dia e t/h) e as

quantidades dos elementos de interesse e de ganga no ROM (% e t/dia, respectivamente) em diferentes frações granulométricas (% e t/dia). Foram totalizadas 72 variáveis independentes, que estão na rotina operacional da usina de beneficiamento.

A presença de um grande número de variáveis de produto e processo tem incentivado engenheiros e pesquisadores a buscarem modelos compostos por um número reduzido de variáveis com vistas à redução dos custos de coleta de dados, ao aumento da precisão das informações geradas e à maior possibilidade de aplicações práticas [10] [11] [12].

Para identificar as melhores correlações e variáveis, foram analisadas técnicas que

predizem as correlações fortes e fracas, como forma de antecipar e direcionar a pesquisa. Ferrer *et al.* [13] ressaltam que poucas ferramentas de análise estatística possuem a versatilidade da regressão linear múltipla; porém, tais ferramentas têm oferecido suporte em aplicações de diferentes naturezas, como discriminação e classificação de observações, modelagem e análise de processo e identificação de desvios.

As análises de regressão do consumo de água total em função da qualidade do ROM têm seus resultados resumidos apresentados na tabela 1. Os resultados referentes às quantidades (t/dia) para Fe, SiO<sub>2</sub>, P, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Mn nas frações +8mm, -8+1mm, -1+0,15mm, e -0,15mm em relação ao consumo de água total estão descritos.

Tabela 1 – Análise de variância consumo de água total de quantidade nas frações

Análise de Variância					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	9	1,83495E+12	2,03883E+11	64,64	0,000
SiO <sub>2</sub> +8mm	1	7518204987	7518204987	2,38	0,124
P +8mm	1	18017188612	18017188612	5,71	0,018
Fe -8+1mm	1	75423532687	75423532687	23,91	0,000
SiO <sub>2</sub> -8+1mm	1	23218101639	23218101639	7,36	0,007
Fe -1+0,15mm	1	8061827700	8061827700	2,56	0,111
SiO <sub>2</sub> -1+0,15mm	1	15751084256	15751084256	4,99	0,026
P -1+ 0,15mm	1	9200330482	9200330482	2,92	0,089
Fe -0,15mm	1	54440164510	54440164510	7,26	0,000
P -0,15mm	1	10443984508	10443984508	3,31	0,070
Erro	265	8,35827E+11	3154062617		
Total	274	2,67078E+12			

As quantidades (t/dia) nas frações granulométricas SiO<sub>2</sub> +8mm, P +8mm, Fe -8+1mm, SiO<sub>2</sub> -8+1mm, Fe -1+0,15mm, SiO<sub>2</sub> -1+0,15mm, P -1+0,15mm, Fe -0,15mm e P -0,15mm demonstraram significância no modelo, e pela função *Stepwise* as demais foram retiradas.

A análise dos valores de R<sup>2</sup> encontrados para as quantidades (t/dia) identificadas com R<sup>2</sup> para esta regressão linear múltipla demonstrou moderada força de associação e explicam o consumo de água total, com base no resultado da tabela 2. Os coeficientes da regressão e sua equação foram determinados e descritos conforme a tabela 3 e Equação 2.

Tabela 2 – Referência de valores de R<sup>2</sup> de água total

R2	R2(aj)	R2(pred)
68,70%	67,64%	66,04%

Tabela 3 – Coeficientes da regressão de água total de quantidades nas frações

Coeficientes					
Termo	Coef	EP de Coef	Valor T	Valor-P	VIF
Constante	211508	15300	13,82	0,000	
SiO <sub>2</sub> +8mm	25,6	16,6	1,54	0,124	2,85
P +8mm	7656	3203	2,39	0,018	3,34
Fe -8+1mm	19,71	4,03	4,89	0,000	4,60
SiO <sub>2</sub> -8+1mm	-54,1	19,90	-2,71	0,007	4,67
Fe -1+0,15mm	3,84	2,40	1,60	0,111	4,72
SiO <sub>2</sub> -1+0,15mm	7,62	3,41	2,23	0,026	8,42
P -1+ 0,15mm	-6672	3906	-1,71	0,089	6,32
Fe -0,15mm	3,924	0,945	4,15	0,000	5,31
P -0,15mm	-3038	1669	-1,82	0,070	6,82

A equação de regressão está descrita na Equação 2 e descreve coeficientes da regressão de consumo de água total (m<sup>3</sup>/dia) por quantidade na fração (t/dia).

$$\check{T} = 211.508 + 25,6 \gamma_2 + 7.656 \Omega_2 + 19,71 a_3 - 54,1 \gamma_3 + 3,84 a_4 + 7,62 \gamma_4 - 6.672 \Omega_4 + 3,924 a_5 - 3.038 \Omega_5 \quad (2)$$

Em que:

- $\check{T}$  = Água total (m<sup>3</sup>/dia)
- $\gamma_2$  = SiO<sub>2</sub> +8mm
- $\Omega_2$  = P +8mm
- $a_3$  = Fe -8 +1mm
- $\gamma_3$  = SiO<sub>2</sub> -8 +1mm
- $a_4$  = Fe -1 +0,15mm

- $\gamma_4$  = SiO<sub>2</sub> -1 +0,15mm
- $\Omega_4$  = P -1+0,15mm
- $a_5$  = Fe -0,15mm
- $\Omega_5$  = P -0,15mm

Por meio das estimativas geradas com base nas equações para valores em quantidades (t/dia), em que foram atribuídos valores médios realizados no período da coleta de dados de 275 dias, na equação gerada da tabela 4, sobre o comportamento da usina de beneficiamento de minérios, foi observada uma diferença entre os resultados gerados a partir da regressão sobre os valores médios consumidos de água.

Tabela 4 – Estimativa do consumo de água da equação de água total sobre valores médios realizados das quantidades das frações

Estimativas do consumo de água pela equação			
Variáveis	Coeficientes	Valores Médios	Resultados
Constante	211.508	-	211.508
SiO <sub>2</sub> +8mm	25,60	624,59	15.989,39
P +8mm	7.656,00	3,61	27.610,05
Fe -8+1mm	19,71	4.469,01	88.084,18
SiO <sub>2</sub> -8+1mm	- 54	931,41	- 50.389,19
Fe -1+0,15mm	3,84	8.273,84	31.771,55
SiO <sub>2</sub> -1+0,15mm	7,62	7.934,20	60.458,63
P -1+0,15mm	- 6.672,00	3,14	- 20.937,97
Fe -0,15mm	3,92	23.154,81	90.859,48
P -0,15mm	- 3.038,00	9,28	- 28.191,29
Resultado da equação			426.762,82
Média realizada			533.414,15
Diferença (média - resultado da equação)			106.651,33

A estimativa de consumo de água total realizada destacada na tabela 4 descreve maior consumo sobre os valores médios realizados, sendo de 106.651,33m<sup>3</sup>/dia, e

representa uma diferença de 20% sobre o valor médio da equação de 533.414,15m<sup>3</sup>/dia. Assim, comparativamente, no período da coleta de

dados, a usina teve consumo de água total maior que os valores estimados na equação para as frações granulométricas.

Nesta estimativa, foram considerados os valores da referência da tabela anterior de estimativa de valores médios, fixando uma das variáveis preditoras e variando uma por vez em percentuais de 10%, 20%, 25%,

30% e 35%, com objetivo de prever cenários futuros de alterações dos teores nas frações. O resultado da estimativa traz resultados das variações. A estimativa de consumo de água diminuindo as quantidades nas frações e fixando as demais, apresenta as variações no consumo de água total, demonstradas no gráfico da figura 9.

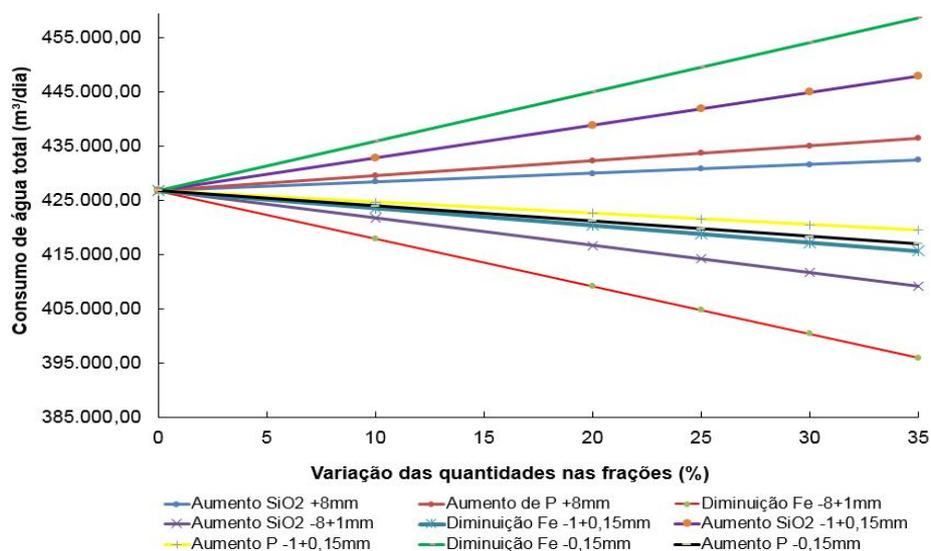


Figura 9 – Estimativa do consumo na equação água total sobre valores médios realizados, diminuindo nas frações granulométricas (t/dia).

A estimativa que apresentou aumento no consumo de água total nas frações demonstradas no gráfico da figura 9 e que destacam aumento no consumo está descrita abaixo, sendo essas frações classificadas por ordem de maior para menor consumo:

Fe -0,15mm se destacando entre as frações por apresentar o maior aumento no consumo de água, sendo 31.800,82m<sup>3</sup>/dia. Isso pode ser explicado por maiores teores de contaminantes nesta fração que seguem para a flotação, acarretando no maior consumo de água;

SiO<sub>2</sub> -1+0,15mm apresentando segundo maior aumento no consumo de água, sendo 21.160,52m<sup>3</sup>/dia;

P +8mm apresentando terceiro maior aumento no consumo de água, sendo 9.663,52m<sup>3</sup>/dia; e SiO<sub>2</sub> +8mm apresentar quarto maior aumento no consumo de água, sendo 5.596,29m<sup>3</sup>/dia.

A fração mais fina de Fe -0,15mm, com base na estimativa demonstrada no gráfico da figura 9, apresentou maior impacto de aumento no consumo de água total, embora sua quantidade foi diminuída na estimativa. Deste modo, comparativamente, os elementos nas frações selecionadas pelo *Stepwise* e estimadas para o consumo de água destacam que as frações mais finas (Fe -0,15mm) têm maior influência no aumento do consumo de água, já os elementos selecionados de frações mais grosseiras, embora tenha aumentado o consumo, demonstram serem menores, como a SiO<sub>2</sub> +8mm e o P +8mm.

### CONSUMO DE ÁGUA NOVA

A usina de beneficiamento de minério de ferro, diariamente, realiza captação de água no rio como forma de suprir as perdas ocorridas nos processos por diferentes fatores. Sob o período avaliado, em média, foram captados 30.990m<sup>3</sup>/dia que

correspondem, em média, a 5,8% do volume total de água 533.414,15m<sup>3</sup>/dia aplicada nos processos da usina diariamente. Para este período, foi simulado no sistema adotado pela empresa detentora do empreendimento para prever comportamentos futuros de consumo de água em relação aos tipos de minério que alimentariam a usina de beneficiamento.

Foram simulados estes dados utilizando valores realizados de consumo de água e comparados para análise da existência de

aproximação destes valores. Estes resultados são apresentados no gráfico da figura 10. Pode-se observar que nos 100 primeiros dias do período da coleta o consumo real de água foi menor que os valores simulados. Já os 175 dias restantes apresentaram captação maior de água que o simulado, porém não ultrapassando o limite de outorga 48.000m<sup>3</sup>/dia. Os picos de queda repentina do consumo de água registrado representaram paradas da usina para manutenção preventiva.

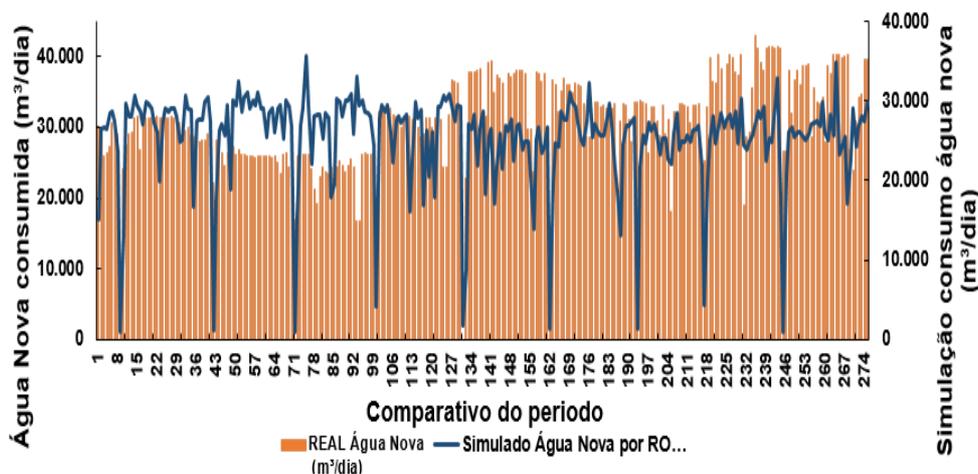


Figura 10 - Comparação de valores captados (realizados) e simulados de água nova.

A figura 10 ilustra as diferenças dos resultados comparativos entre a diferença de água nova de valores captados em relação aos valores simulados. Esta usina de beneficiamento tem licença de captação baseada na outorga de 2.000m<sup>3</sup>/h ou 48.000m<sup>3</sup>/dia de água nova. Deste modo, em 22,9% do período avaliado foi observado que a quantidade de água captada executada foi menor comparando a simulada em média de 3.843,42m<sup>3</sup>/dia.

### RESTRIÇÃO HÍDRICA

A operação de uma usina de beneficiamento de minério de ferro em período de restrição

hídrica submete-se à lei imposta de preservação das águas para períodos de estiagem, segundo a qual a indústria deve reduzir 30% do consumo de água da outorga. Deste modo, foi incluída nesta pesquisa para prever impactos neste cenário, e o gráfico da figura 11 demonstra os resultados aplicados sobre o valor consumido de água nova que foi captado no rio no período da pesquisa. Em 82 dias do período de 275 dias analisados, resultando em 29,81%, faltaria água para repor na usina de beneficiamento de minério de ferro para produção. Os outros 193 dias estariam com operação normal.

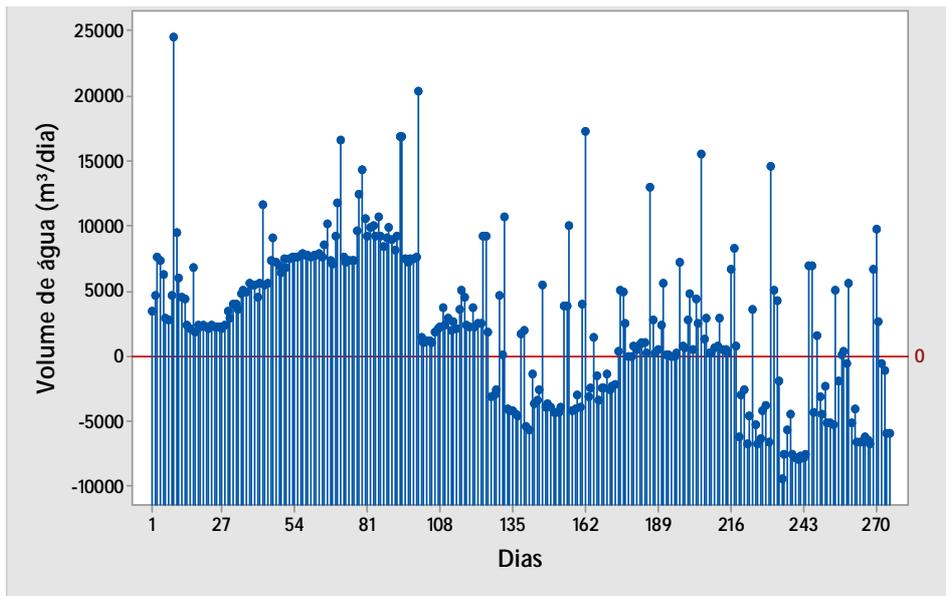


Figura 11 - Resultados simulados aplicando 30% restrição hídrica.

Comparativamente, em 77,1% do tempo foi captada mais água do que o valor simulado e foi observado que a quantidade de água captada executada a maior comparando a simulada em média foi de 8259,85m<sup>3</sup>/dia. Neste período em que os valores realizados de captação foram maiores aos que foram simulados, ocorreu uma frequência de 49,05% do período nos primeiros 15 dias dos meses e 50,95% do período ocorreu nos últimos 15 dias do mês.

Ao comparar a captação de água nova para reposição na usina de beneficiamento e aplicando a redução na captação de 30% sobre o valor outorgado, simulando um período de restrição hídrica e redução da outorga, o consumo de água nova teve variações que demonstraram que em 82 dias faltaria água para operação da usina. O gráfico da figura 11 apresenta estes resultados da comparação do que seria a redução de captação de água nova em período de longa estiagem e foi aplicada a restrição para reduzir 30% do valor da outorga de captação de água do rio, deste modo, faltaria água para operação da usina na reposição.

#### 4. CONCLUSÕES

As dispersões demonstraram alta força de associação entre teores globais de ferro (Fe) e de sílica (SiO<sub>2</sub>) no ROM, certamente devido à mineralogia característica do minério. Os resultados das dispersões de água total consumida em função da quantidade de Fe e SiO<sub>2</sub> global demonstraram moderada força de associação. Para a dispersão de água total consumida em função do teor, para os demais elementos, houve pequena ou leve força de associação.

A hipótese de redução da qualidade do ROM através de suas quantidades globais de ferro (Fe) foi testada sob forma de previsões para o consumo de água total (m<sup>3</sup>/dia), reduzindo-se o elemento ferro (Fe) e aumentando os demais elementos. No que diz respeito à quantidade de sílica (SiO<sub>2</sub>) global, ocorre o aumento no consumo de água total em aproximadamente 30.000m<sup>3</sup>/dia. Para a diminuição do ferro (Fe) global, destaca-se a forte redução no consumo de água total de aproximadamente 85.000m<sup>3</sup>/dia, como esperado.

O Fe -0,15mm se destacou entre as frações por apresentar o maior aumento no consumo de água. Isso pode ser explicado por maiores teores de contaminantes nesta fração que seguem para a flotação, acarretando no maior consumo de água. A sílica (SiO<sub>2</sub>) - 1+0,15mm apresentou segundo maior aumento no consumo de água, sendo 21.160,52m<sup>3</sup>/dia.

Em relação ao período de restrição hídrica, em que torna-se obrigatória a redução de 30% do consumo de água da outorga durante a revisão de possíveis impactos, observou-se que em 82 dias do período analisado (275 dias) faltaria água para repor a usina de beneficiamento de minério de ferro para produção.

O sistema, desenvolvido pela empresa para simulação, construído com robusto banco de dados, torna possível a previsão de quais os produtos serão produzidos na usina, assim como a antecipação dos ajustes e das regulagens de *setup* rápidos. As faixas distribuídas por granulometria que são utilizadas com base no ROM ofertado pela frente de lavra permitem a simulação de seu balanço hídrico para consumo de água nova.

## 5. REFERÊNCIAS

- [1] A.A. Chinaglia, A indústria da mineração e o crescimento do Brasil. Brasília: IBRAM, 2007. Disponível em: <http://www.ibram.org.br>. Acesso em: 21 set. 2016.
- [2] V.S.T. Ciminelli, Água na indústria mineral, impactos da seca, perspectivas. São Paulo: Academia Brasileira de Ciências, 2014.
- [3] IGAM. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Plano Estadual de Recursos Hídricos – PERH. Belo Horizonte: IGAM, 2011. (Resumo executivo volume I).
- [4] IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. A gestão dos recursos hídricos e a mineração. Brasília: IBRAM, 2012.
- [5] G.M. Rocha, R.T. Lopes Júnior, A.C.M. Paula, R.A.A. Reis, Aumento da recirculação de água através de alteração do circuito de produção do pellet feed da itm oeste na mineração Usiminas. Em anais do *XVII Prêmio de Excelência da Indústria Mineral-metalúrgica Brasileira*, (2015), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.
- [6] E.D. Gálvez, P. Robles, R. Cruz, L.A. Cisternas. Optimization of dewatering systems for mineral processing. *Minerals Engineering*, (2014), 63, 110-117.
- [7] A.J. Gunson, M. M. Veiga, B. Klein, S. Dunbar Reducing mine water requirements. *J. Clean Prod.* (2012), 21, 71- 82.
- [8] A.S. Andrade Júnior, E.F.F. Silva, E.A. Bastos, F.B. Melo, C.M. Leal. Uso e qualidade da água subterrânea para irrigação no semi-árido piauiense. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, (2006), 10, 873-880.
- [9] J. Zimmer. Seleção de variáveis preditivas com base em índices de importância das variáveis e regressão PLS. 2012. 64 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- [10] J. P. Gauchi, P. Chagnon. Comparison of selection methods of explanatory variables in PLS regression with application to manufacturing process data. *Chemometrics Intelligent Laboratory Systems*, (2001), 58, 171-193.
- [11] J. A. F. Pierna *et al.* A backward variable selection method for PLS regression (BVSPLS). *Analytica Chimica Acta*, (2009), 642, 89-93.
- [12] C. M. Andersen, R. Bro. Variable selection in regression: a tutorial. *Journal of Chemometrics*, (2010), 24, 728-737.
- [13] A. Ferrer *et al.* A versatile tool for industrial process improvement and optimization. *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, (2008), 24, 551-567.