

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES DO MINÉRIO DE FERRO NO BOMBEAMENTO DE POLPAS DE REJEITOS MINERAIS EM SISTEMAS COM BOMBAS VOLUMÉTRICAS VIA SIMULAÇÃO E PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Rodrigo Junio Pereira de Barcelos ⁽¹⁾ (rodrigo_jpbarcelos@hotmail.com)

Eder Quental de Araújo ⁽²⁾ (eder.quental@gmail.com)

Guillermo Vilalta Alonso ⁽³⁾ (gvilalta@hotmail.com)

⁽¹⁾ Universidade Federal de São João del Rei (UFSJ); Graduando em Engenharia Mecânica

⁽²⁾ GERDAU S.A, Ouro Branco/MG – Brasil; Departamento de Sistemas de Energia e Utilidades.

⁽³⁾ Universidade Federal de São João del Rei (UFSJ); Departamento de Ciências Térmicas e de Fluidos, DCTEF

RESUMO: A mineração é uma das atividades industriais mais importantes no Brasil, sendo responsável por 4% de seu Produto Interno Bruto (PIB). As atividades de extração e beneficiamento do minério de ferro para comercialização, no entanto, geram grande quantidade de rejeitos e por isso as mineradoras buscam cada vez mais soluções efetivas para o gerenciamento desse material, que sejam viáveis econômica e ambientalmente. Dentre essas soluções se destacam o bombeamento desses resíduos do processo para as barragens de rejeito sob a forma de polpa. Este artigo propõe a análise de um sistema de bombeamento que utiliza uma bomba volumétrica e considera diferentes concentrações e características granulométricas para a polpa mineral, com auxílio da simulação e do planejamento de experimentos. Os resultados mostraram que, em geral, granulometrias e concentrações menores apresentam menores perdas, maior capacidade de entrega de vazão e altura manométrica e menor consumo de potência. Todavia a decisão do sistema mais adequado deve partir do compromisso entre tonelada de rejeito transportado e consumo de energia.

PALAVRAS-CHAVE: mineração, rejeitos, bombeamento, polpa.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE IRON ORE CHARACTERISTICS IN THE SLURRY TAILINGS PUMPING IN SYSTEMS USING VOLUMETRIC PUMPS APPLYING SIMULATIONS AND THE DESIGN OF EXPERIMENTS

ABSTRACT: Mining is one of the most important industrial activities in Brazil, responsible for 4% of its Gross Domestic Product (GDP). However, the iron ore quarrying and beneficiation processes for trading, bring a massive quantity of tailings. Due to it, mining companies are searching for both economically and environmentally suitable improvements to managing such materials. Among these solutions, one can highlight the pumping of these tailings to tailings dam. This paper purposes an analysis of a pre-defined slurry pumping system, using a volumetric pump, varying the concentration and tailings particles sizes in the slurry, resorting of the design of experiment and simulation. The results show that, basically, both lower mass fractions and lower particle sizes develop minor friction losses, deliver higher flow rates and heads and reduce the power consumption. However, the decision about the best properties configuration should come from a compromise between the tons of tailings conveyed and energy consumption.

KEYWORDS: mining, tailings, pumping, slurry.

1. INTRODUÇÃO

Produtos que utilizam o aço como matéria prima são praticamente onipresentes, tanto nos setores industriais como domésticos. O caminho que esse aço percorre até chegar ao seu destino final apresenta diversas variações, porém, a origem está, na maioria dos casos, na mineração. A mineração é uma das atividades industriais mais relevantes no mundo inteiro, principalmente em países como China, Austrália e Brasil. Este último tem 4% do seu Produto Interno Bruto (PIB) vinculado a mineração (<http://goo.gl/9JoOWC>). Minas Gerais (MG) é um dos estados brasileiros mais importantes nesse aspecto. Na região centro-sul desse estado está localizado o “Quadrilátero Ferrífero” que é o maior produtor nacional de minério de ferro, sendo responsável por 60% de toda produção no país. A área do quadrilátero ferrífero é algo em torno de 7000 m², abrangendo as cidades de Ouro Preto, Itabira e Congonhas, dentre outras (<https://goo.gl/wYO6KM>).

A WEG (2015), afirma em seu catálogo que mais de 90% da energia elétrica total consumida nas atividades de mineração é destinado a geração de força motriz, o que inclui motores elétricos para acionar bombas, correias transportadoras, moinhos, entre outros.

Em meio as bombas utilizadas nos processos de mineração, estão aquelas que se encarregam fundamentalmente do transporte de resíduos advindos das etapas de beneficiamento para as barragens de rejeitos. Essas barragens tem a finalidade de armazenar e reter partículas finas de resíduos, normalmente com o objetivo secundário de reter a água para ser reaproveitada na mina, nos moinhos e peneiras vibratórias (EPA, 1994). Os rejeitos ou resíduos da mineração (*tailings*) são sobras do processo, uma vez que o concentrado mineral é separado (<http://goo.gl/ts76tw>). Segundo Lozano (2006), esses particulados minerais sólidos são produzidos em larga escala na mineração e os mais importantes em termos de quantidade são os gerados na planta de beneficiamento. Portes (2013), afirma que esses resíduos trazem consequências prejudiciais ao meio ambiente e devido a sua produção massiva, as empresas mineradoras estão extremamente preocupadas e procurando por alternativas para minimizar os impactos ambientais e reduzir os custos agregados à deposição e armazenamento desses materiais. Ainda, para Portes (2013), as mineradoras brasileiras tem demonstrado uma preferência para a deposição de rejeitos em barragens localizadas na superfície da mina, numa espécie de reservatório de rejeitos. Nessas empresas, uma vez que o concentrado mineral é separado do minério através do processo de beneficiamento, os resíduos são transportados através de instalações de bombeamento para a barragem de rejeitos (*tailings dam*).

Para transportá-los de uma maneira ambientalmente favorável e com custo benefício satisfatório, é necessário dimensionar as tubulações e selecionar as bombas da instalação de forma apropriada e garantir uma mistura de água e resíduos minerais (polpa de minério) com características reológicas adequadas, para ser bombeada de forma eficaz.

A proposta desse trabalho é trazer uma análise do processo de bombeamento de polpa das plantas de beneficiamento do minério de ferro para as barragens de rejeito. A polpa é constituída de água e partículas minerais residuais, sendo sua caracterização, que leva em conta as propriedades que influenciam o comportamento do escoamento, descritas nas seções seguintes. O foco principal dessa análise é mensurar a influência das propriedades da polpa no comportamento do escoamento através do sistema de bombeamento definido, avaliando as perdas, velocidades médias e críticas, consumo, eficiência, ponto de operação, vazão entregue e altura manométrica, contribuindo para a identificação de sistemas otimizados e eficientes no bombeamento de resíduos, uma demanda atual e importante das mineradoras, que buscam a redução dos custos agregados ao transporte e deposição de rejeitos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme descrito anteriormente, as mineradoras buscam respostas cada vez mais sustentáveis e efetivas financeiramente para realizar a deposição dos rejeitos do processo de beneficiamento do minério. Essas respostas passam obrigatoriamente pela análise das características da polpa, das bombas e dos sistemas de tubulação empregados.

Utilizando-se do planejamento fatorial de experimentos (PdE), de um software de simulação para escoamento de fluidos e empregando-se uma bomba com vazão (Q) e altura manométrica (H) estabelecida pelos autores, de capacidade suficiente para permitir a operação nas condições estipuladas, pretende-se quantificar a influência das propriedades reológicas no transporte da polpa e discutir os resultados obtidos através das simulações executadas para a instalação de bombeamento analisada. A Figura 1 mostra a disposição dos componentes da instalação e suas características.

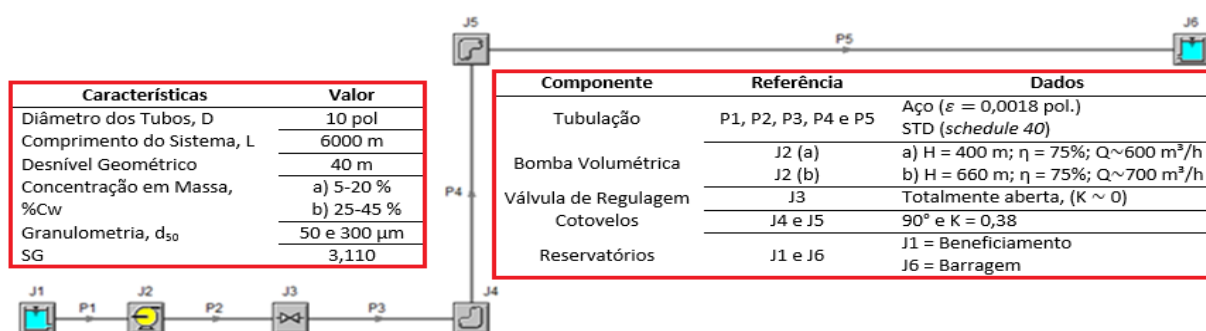


FIGURA 1. Layout do sistema de bombeamento analisado e suas principais características.

2.2. Simulação numérica

Tendo o problema definido, a metodologia e as ferramentas empregadas para obtenção dos resultados podem ser descritas. A simulação foi uma dessas ferramentas, usando-se o software Applied Flow Technology (AFT). O AFT é um programa de simulação numérica de

sistemas fluidodinâmicos usado para calcular a queda de pressão e a distribuição do escoamento de diversos tipos de fluido, entre eles, as polpas.

De acordo com Scotton e Pedroso (2013), muitos dos problemas ligados à mecânica dos fluidos e aos fenômenos do transporte são complexos e não apresentam soluções analíticas, sendo necessário lançar-se mão de ferramentas computacionais que auxiliam na obtenção das soluções via métodos numéricos. Os programas computacionais de dinâmica dos fluidos, tais como o AFT, possuem uma diversidade de modelos matemáticos que buscam descrever e prever o comportamento físico presente nos escoamentos reais (Segala, 2010).

A simulação é uma modelagem aproximada de um fenômeno real, não sendo portanto um experimento de laboratório. Em sistemas complexos de bombeamento de polpas, a utilização apenas da simulação para embasar a tomada de decisão, torna-se arriscada.

2.3. Planejamento fatorial de experimentos (PdE)

Em experimentos que envolvem muitas variáveis, mesmo com a simulação, a análise do modo em como as variáveis interagem e a interpretação dos resultados pode se tornar mais complexa ou até mesmo repetitiva. Para resolver essa questão e reduzir o número total de simulações a serem realizadas, emprega-se a técnica do PdE. Ele surge como uma alternativa para melhorar e simplificar a estruturação, bem como o número de experimentos realizados. Segundo BUTTON, *apud* Galdaméz (2002), “o planejamento fatorial é indicado para a fase inicial do procedimento experimental quando há necessidade de se definir os fatores mais importantes e estudar os efeitos sobre a variável resposta escolhida”. No presente trabalho, utiliza-se o Planejamento Fatorial 2^k . Esse tipo de planejamento configura-se como aquele em que as variáveis analisadas são estudadas em apenas dois níveis, sendo eles o nível máximo (+) e nível mínimo (-). Havendo k fatores, ou seja, k variáveis, um planejamento 2^k irá requerer a realização de 2^k simulações. Para Silva (2007), nesse tipo de abordagem, estuda-se simultaneamente o efeito de todas as combinações possíveis dos fatores e seus respectivos níveis.

Na análise aqui proposta, os níveis podem ser traduzidos como a faixa de valores de granulometria e concentração de polpa analisadas, descritos na Fig. 1. Ou seja, se, por exemplo, a concentração em massa analisada está entre 25% e 45%, o nível máximo (+) é 45% e o nível mínimo (-) é 25%. Através do planejamento fatorial de experimentos 2^k pode-se então evitar simulações para as concentrações de 30%, 35% e 40%, o que significa reduzir o número de simulações e mesmo assim obter resultados confiáveis. É importante ressaltar que, para tipo de análise ser mais efetivo, é indicado que se escolham níveis (+) e (-) não muito distantes um do outro. A descrição dos níveis e variáveis consideradas no estudo são descritas na Tabela 1. As saídas (S_n) correspondem a um grupo de valores fornecidos pelo AFT, dada as condições de entrada, necessários para uma completa análise do escoamento da polpa.

TABELA 1. Planejamento fatorial utilizado nas simulações via AFT.

Comprimento da tubulação L [m]	Diâmetro dos tubos D [pol]	Granulometria d_{50} [μm]	Concentração em massa [%Cw]		Saída (Sn) [-]	
			(a)	(b)	(a)	(b)
6000	10	- (50)	- (5)	- (25)	S ₁ (Caso 1)	S ₅ (Caso 5)
6000	10	- (50)	+ (20)	+ (45)	S ₂ (Caso 2)	S ₆ (Caso 6)
6000	10	+ (300)	- (5)	- (25)	S ₃ (Caso 3)	S ₇ (Caso 7)
6000	10	+ (300)	+ (20)	+ (45)	S ₄ (Caso 4)	S ₈ (Caso 8)

2.4. Caracterização da polpa

A polpa mineral avaliada é a mistura entre a água e os resíduos particulados oriundos do processo de beneficiamento do minério de ferro, que deve ser bombeada para a barragem de rejeitos. A caracterização da polpa depende do entendimento de suas principais propriedades, que para Garcia (2014) são as massas específicas das fases constituintes e da polpa propriamente dita, a concentração dos sólidos, tamanho e forma das partículas e a viscosidade dinâmica. As propriedades citadas, bem como aquelas mostradas na Fig.1 são inseridas no *software* e as simulações são executadas de acordo com o PdE proposto.

Duas bombas foram admitidas neste trabalho, sendo a bomba J2_a indicada para a faixa de concentração %Cw entre 5% e 20% e a J2_b para %Cw de 25% a 45%. Isso ocorre pelo fato de que a bomba J2_a não apresenta capacidade de vazão (Q) e altura manométrica (H) suficientes para atender todos os oito casos analisados, conforme explicitado na Tab. 1. A bomba J2_b, porém, devido a seu tamanho e capacidade maiores, possibilita a convergência (que é a determinação do Ponto de Operação através do *software*) para todos os casos, no entanto sua utilização nos quatro casos da faixa de concentração (a), que são mais baixas, aumentaria demasiadamente os custos de operação pelo fato dela estar superdimensionada nessa situação.

As capacidades das bombas J2_a e J2_b são selecionadas para a operação quando o fluido é a água pura. Porém, a operação com uma polpa, apresenta características completamente diferentes. Além do *design* diferente para a bomba, a presença de sólidos também interfere no comportamento do escoamento. Devido à presença de sólidos na mistura, ocorre o aumento das perdas por atrito na tubulação. Essas perdas são proporcionais ao aumento da concentração de sólidos, o que conseqüentemente aumenta a massa específica da polpa (WARMAN, 2000). O outro efeito é que, devido ao escorregamento que ocorre entre o fluido de transporte e as partículas sólidas presentes na polpa, a eficiência da bomba e a altura manométrica alcançada à mesmas vazões serão sempre menores para o transporte de polpa quando comparadas ao transporte de água pura (WHEIR, 2002). Como consequência desse fato, ao se calcular a razão entre a altura manométrica obtida pela operação da bomba com polpa (H_P) e a obtida na operação com a água (H_A), obter-se-á uma razão H_R de valor menor que a unidade. O mesmo é válido, de forma análoga (η_A , η_P e η_R), para a eficiência. No presente trabalho considera-se $\eta_P = H_P$. Não é possível

determinar H_R e η_R matematicamente, sendo necessário a utilização do “Ábaco de Cave” para determiná-los e a partir disso obter H_P e η_P . Para qualquer polpa, H_R e η_R são afetados pela granulometria, gravidade específica (SG) e concentração dos sólidos (WARMAN, 2000). A quantificação dessa redução de performance é um ponto chave na metodologia utilizada na obtenção dos resultados, que é ilustrada, de forma geral, na Figura 2.

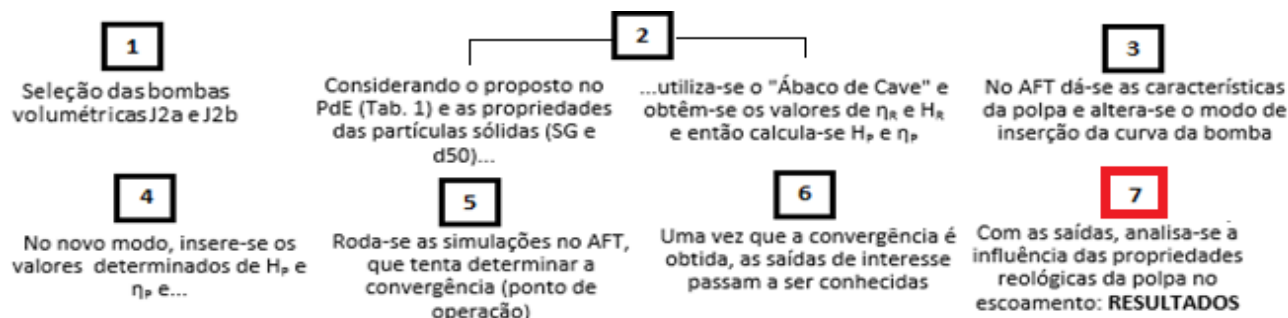


FIGURA 2. Metodologia aplicada na análise do sistema de bombeamento da polpa.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As simulações utilizando as bombas J2_a e J2_b retornaram os resultados mostrados nas tabelas a seguir. As Tabelas 2.a e 2.b mostram respectivamente as entradas e os resultados para a bomba J2_a e as Tabelas 3.a e 3.b, de forma análoga, para a bomba J2_b.

TABELA 2.a. Características de entrada do sistema e dados da bomba J2_a.

Bomba Volumétrica J2a → $H_A = 400$ m $\eta_A = 75\%$ $Q_A \sim 600$ m ³ /h (Q de referência)										
E_n [-]	L [m]	D [pol.]	d_{50} [μm]	[%Cw]	SG [-]	μ [Pa.s]	H_R [-]	η_R [-]	H_P [m]	η_P [%]
E ₁	6000	10	- (50)	- (5)	3,110	0,0104	0,991	0,991	396,4	74,33
E ₂	6000	10	- (50)	+ (20)	3,110	0,0124	0,970	0,970	388,0	72,75
E ₃	6000	10	+ (300)	- (5)	3,110	0,0104	0,978	0,978	391,2	73,35
E ₄	6000	10	+ (300)	+ (20)	3,110	0,0124	0,905	0,905	362,0	67,88

TABELA 2.b. Resultados mais relevantes para análise do escoamento na operação com a bomba J2_a.

S_n [-]	Q [m ³ /h]	N_{Total} [kW]	Perda [m/100m]	V_{med} [m/s]	$V_{crit.}$ [m/s]	f [-]	Re [-]	Cav. [S/N]
S ₁	824,2	1235,0	6,205	4,500	0,7508	0,01478	$1,137 \times 10^5$	N
S ₂	747,9	1253,0	6,783	4,083	0,7508	0,01755	$9,674 \times 10^4$	N
S ₃	811,3	1216,0	6,127	4,430	3,394	0,01506	$1,119 \times 10^5$	N
S ₄	631,3	1058	6,303	3,447	3,388	0,02289	$8,166 \times 10^4$	N

TABELA 3.a. Características de entrada do sistema e dados da bomba J2_b.

Bomba Volumétrica J2b → $H_A = 660$ m $\eta_A = 75\%$ $Q_A \sim 700$ m ³ /h (Q de referência)										
E_n [-]	L [m]	D [pol.]	d_{50} [μm]	[%Cw]	SG [-]	μ [Pa.s]	H_R [-]	η_R [-]	H_P [m]	η_P [%]
E ₅	6000	10	- (50)	- (25)	3,110	0,0134	0,960	0,960	633,60	72,0
E ₆	6000	10	- (50)	+ (45)	3,110	0,0203	0,929	0,929	613,14	69,68
E ₇	6000	10	+ (300)	- (25)	3,110	0,0134	0,878	0,878	579,48	65,85
E ₈	6000	10	+ (300)	+ (45)	3,110	0,0203	0,780	0,780	514,80	58,50

TABELA 3.b. Resultados mais relevantes para análise do escoamento na operação com a bomba J2_b.

S _n [-]	Q [m³/h]	N _{Total} [kW]	Perda [m/100m]	V _{med} [m/s]	V _{crit.} [m/s]	f [-]	Re [-]	Cav. [S/N]
S ₅	1085	3123,0	11,94	5,924	0,7508	0,01411	1,352x10 ⁵	N
S _{5*}	707,2	1234,0	6,984	3,861	0,7508	0,01942	8,811x10 ⁴	N
S ₆	1051	3616,0	13,80	5,738	0,7508	0,01453	1,033x10 ⁵	N
S ₇	995,5	2865,0	10,89	5,436	3,398	0,01528	1,240x10 ⁵	N
S ₈	687,9	2367,0	11,51	3,756	3,390	0,02828	6,765x10 ⁴	N

O aumento da faixa de concentração e da granulometria, torna mais difícil o bombeamento da polpa. Isso significa que é mais difícil alcançar a vazão (Q) e a altura manométrica (H) suficientes para manter as partículas em suspensão e garantir o transporte dos resíduos através do sistema descrito. Tal fato leva a uma redução do valor de [N]; essa redução, todavia, não significa uma melhora na performance da bomba, mas uma queda na capacidade de trabalho. Também ocorre queda na vazão [Q] apresentada pelos demais casos em relação aos casos 1 e 5 (estes últimos são os casos menos críticos, *ver Tab. 1*) pois o maior número de partículas sólidas no escoamento impõe maior dissipação de energia, uma vez que as partículas estão inaptas a contribuir para a altura manométrica entregue pela bomba e dissipam a energia cinética que recebem através do choque com outras partículas, escorregamento e choque com as paredes dos tubos. Ainda, as partículas maiores demandam maior energia para serem mantidas em suspensão e como não contribuem para a carga entregue pela bomba, fazem a dissipação energética ser ainda maior. Esses fatos são ilustrado na Figura 3 e Figura 4.

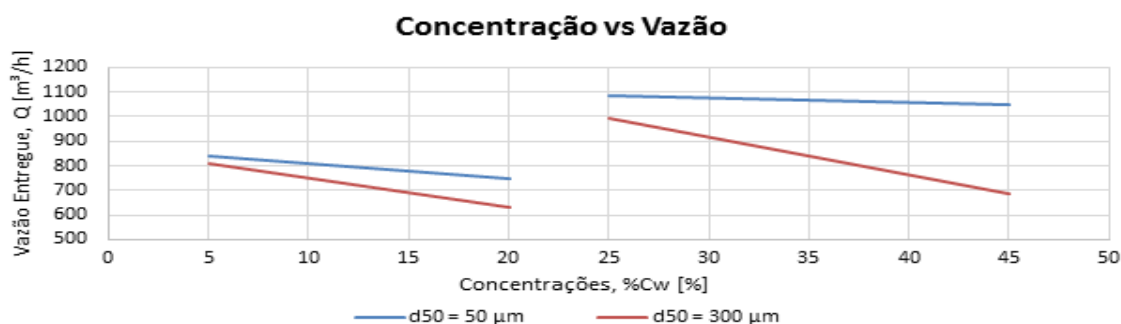


FIGURA 3. Influência da granulometria e das concentrações na queda da Vazão.

A Fig. 3 mostra que a tendência para ambas as faixas de concentração é de que, com o aumento da %Cw, haja um aumento na dissipação de energia e consequente diminuição na vazão e velocidade do escoamento. Isso diminui a taxa de rejeitos transportados do beneficiamento para as barragens. Esse efeito também é notado quando se varia apenas a granulometria, sendo mais pronunciado nas faixas de concentração maiores, ou seja, a maior queda na vazão ocorre nas faixas de concentração maiores, ou seja, a maior queda na vazão ocorre nas faixas de concentração maiores, ou seja, a maior queda na vazão ocorre nas faixas de concentração maiores. Isso leva a conclusão de que, para que se obtenha menor desperdício energético, deve-se operar com granulometrias menores e em menores concentrações. Entretanto geralmente essa variável não é passível de modificação em um processo real, uma vez que é uma consequência das etapas de beneficiamento.

Na avaliação da potência, a inclinação da reta para $d_{50} = 50 \mu\text{m}$ é menor que em $d_{50} = 300 \mu\text{m}$, sobretudo em faixas de %Cw mais baixas, como pode ser visto nas Figuras 4.a e 4.b.

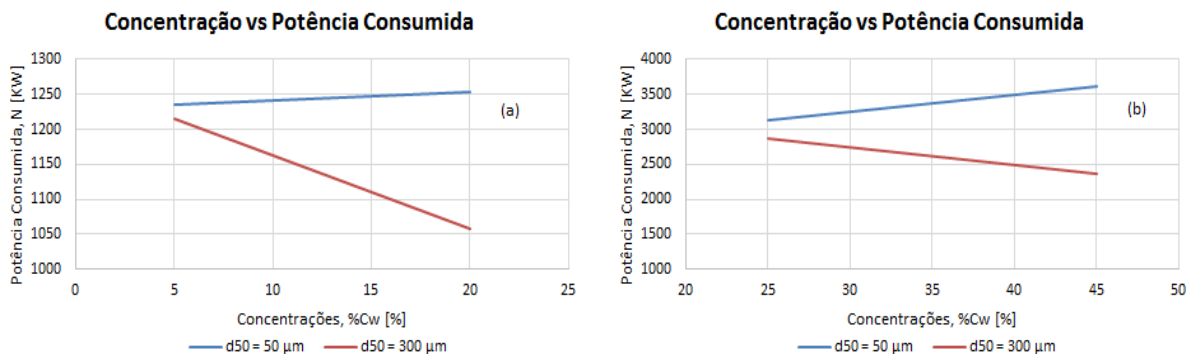


FIGURA 4. Influência da variação das concentrações e granulometrias na potência consumida.

Tal fato leva a crer, baseado nas tendências das curvas, que o aumento da potência consumida quando se opera com d_{50} menor, é bem pequeno para um aumento de concentração da ordem de 15%, mas permite que maior quantidade de minério, em massa, seja transportada. Além disso, pela tendência de mudança de inclinação observada, deve existir uma granulometria $50\mu\text{m} < d_{50} < 300\mu\text{m}$ em que o aumento da %Cw traz um custo praticamente irrelevante, devido ao baixo aumento no consumo de potência. Por isso, na escolha dos parâmetros de operação do sistema, deve se estabelecer um compromisso entre os fatores mais relevantes na operação da planta, dentre eles o consumo de potência e a tonelada de minério transportada.

Outro fator relevante para a operação da planta é o tamanho da bomba. Como pode ser visto na Fig. 3, a bomba J2_b empregada em %Cw de 25 a 45% tem capacidade de vazão superior a bomba J2_a. Porém, observando as Tab. 2.b e 3.b, os consumos de potência da bomba J2_b são maiores. Outro ponto importante é que a bomba J2_a, apesar de menor, consegue operar normalmente para o caso 5, todavia com um consumo de potência menor do que a bomba J2_b. A Figura 5 mostra uma comparação das performances para o caso 5 com a bomba J2_b e com a bomba J2_a (caso 5*). Nota-se que enquanto a vazão entregue é 1,5 vezes maior com a bomba J2_b, o aumento no consumo da potência é de 2,5 vezes.

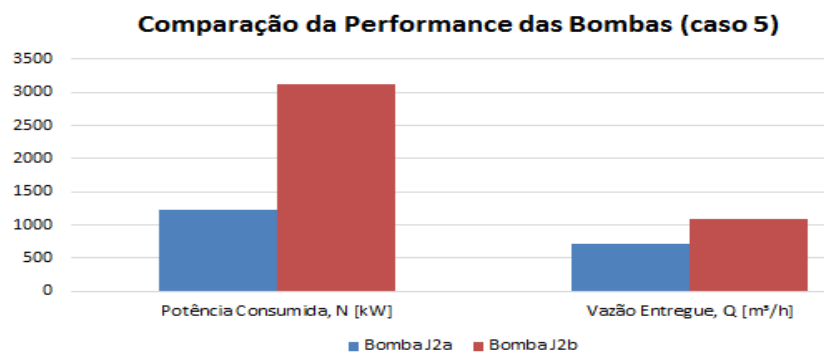


FIGURA 5: Performance das bombas para $d_{50} = 50 \mu\text{m}$ e %Cw = 25%

Assim, se a condição de operação da planta se adequar àquelas do caso 5, deve-se optar pela bomba J2_a, pois além de menor consumo, o menor tamanho torna a manutenção mais barata, reduz o desgaste dada a $V_{méd}$ menor e ainda, impõe menores perdas/100 m de tubulação.

4. CONCLUSÃO

Conclui-se que a avaliação da performance de sistemas de bombeamento de polpas com bombas volumétricas é uma tarefa complexa devido ao fato de muitas variáveis estarem envolvidas e de que a cada combinação destas, produzem-se saídas distintas.

Apesar da mineração ser uma atividade recorrente no mundo, no Brasil é restrito a quantidade de informações relativas aos sistemas de bombeamento de polpa, tornando-se mais árdua a tarefa de obtenção de dados e curvas de performance de bombas, o que levou os autores a sugerir as bombas J2_a e J2_b para realização das análises mostradas. A literatura disponível trata sobretudo de bombas centrífugas, sendo a operação com bombas volumétricas, pouco explorada.

O PdE reduziu o número de simulações e permitiu observar tendências de comportamento do sistema de bombeamento em função das suas granulometrias e concentrações. Em termos de desempenho, as maiores perdas ocorrem quando há maior número de partículas em suspensão, ou seja, casos 2 e 6. Eles apresentam 10% e 26% mais perdas em relação aos casos em que o número de partículas são os menores (casos 3 e 7). Observou-se também que as menores granulometrias diminuem a tendência de deposição e, apesar da velocidade crítica não depender da concentração, as concentrações menores possibilitam vazões maiores, fazendo a velocidade de escoamento ficar ainda mais distante da velocidade de deposição.

Em termos de vazão e altura manométrica, o melhor desempenho ocorre quando da operação com concentração e granulometria mais baixas, ou seja, casos 1 e 5. Avaliando a altura manométrica têm-se H 10% e 23% maior, respectivamente, em comparação aos casos de maior concentração e maior granulometria. Para os casos 1 e 5, têm-se 824,2 m³/h e 1085 m³/h de vazão, enquanto que para os casos 4 e 8 (mais críticos), alcança-se 75% e 63% desses valores.

Porém, a menor concentração torna a quantidade efetiva de massa de resíduo mineral entregue menor, o que pode não atender o processo. Sendo assim é fundamental que durante o dimensionamento sejam utilizadas metodologias como a demonstrada nesse trabalho, visando obter sempre o melhor desempenho energético para a vazão de projeto estabelecida para determinada planta de mineração. Adicionalmente, uma vez que se defina as demandas de retirada de resíduos da planta de beneficiamento e a bomba for selecionada, no caso de ocorrer modificação do ponto de operação, é necessário reavaliar o tamanho da bomba e, para tal, as demandas do processo devem ser bem esclarecidas, pois, como mostrado nos casos 5 e 5*, é possível operar o sistema com uma bomba de custo operacional e tamanho reduzido, para uma polpa com concentração e tamanho de partículas equivalentes.

Finalmente, pode-se concluir que, num projeto de bombeamento real para a indústria de mineração, a redução no consumo energético ou de potência é importante, porém, nunca uma planta será dimensionada para operar o sistema no ponto de melhor consumo energético e sim dimensionada para atender a demanda necessária do processo com o melhor consumo possível.

5. REFERÊNCIAS

GALDAMEZ, E. V. C. Aplicação da técnicas de planejamento da análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção – Universidade de São Paulo, 121 p., 2002.

GARCIA, L. P. Obtenção de parâmetros reológicos para polpas minerais contendo partículas grossas a partir de ensaios de bombeamento. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade Santa Cecília, 105 p., 2014.

GRUPO WEG. Catálogo de soluções para a mineração. Jaraguá do Sul, 2015. Acesso em: 08 set. 2015. Disponível em: <<http://goo.gl/oQKK38>>

LOZANO, F. A. E. Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica. Dissertação de Mestrado em Engenharia Geotécnica – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 128 p., 2006.

NORTHERN DYNASTY MINES INC. Tailings and Tailings Management. Acesso em: 15 set. 2015. Disponível em: <<http://goo.gl/ts76tw>>

PORTES, A. M. C. Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta. Dissertação de Mestrado em Geotécnica e Transportes – Universidade Federal de Minas Gerais, 154 p., 2013.

SCOTTON, J. W.; PEDROSO, C. A. Simulação numérica de escoamentos em dutos com redução brusca de seção. Perspectiva, Erechim. v.37, n.139, p.99-109, Setembro, 2013.

SEGALA, W. Simulação numérica do escoamento monofásico no primeiro estágio de uma bomba centrífuga de duplo estágio. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 104 p., 2010.

SILVA, C. R. Utilização da ferramenta estatística DoE – design of experiments (desenho do experimento) na validação de processos críticos da indústria farmacêutica. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção – Universidade Federal Fluminense, 98 p., 2007.

TABORDA, Joana. Brazil GDP Annual Growth Rate, from 1991-2015. 28/08/2015. Acesso em: 10 set. 2015. Disponível em: <<http://goo.gl/9JoOWC>>

U.S ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Technical Report: Design and evaluation of tailings dams. Washington DC, 1994.

WARMAN INTERNATIONAL LTD. Warman Slurry Pumping Handbook. Australia, 2000. [17]

WHEIR. Slurry Pumping Manual: a technical application guide for users of centrifugal slurry pumps and slurry pumping systems. Warman International LTD, 2002. [13]

WIKIPEDIA. Quadrilátero Ferrífero. Acesso em: 1 set. 2015. Disponível em: <goo.gl/wYO6KM>

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo das informações contidas neste artigo.