



O IMPACTO DA PRÉ-CONCENTRAÇÃO GRAVIMÉTRICA DE UM MINÉRIO DE COBRE SULFETADO NO CONSUMO ENERGÉTICO E NO DESGASTE NA ETAPA DE MOAGEM: UMA ANÁLISE A PARTIR DE ENSAIOS EM JIGUE PILOTO

FRANCO, G.S.A.¹, PEDROSA, F.J.B.², BERGERMAN, M.G.³

¹Universidade de São Paulo (USP), Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais. e-mail: gabriel.souza.franco@usp.br

² Universidade de São Paulo (USP), Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais. e-mail: franciscojrpedrosa@usp.br

³Universidade de São Paulo (USP), Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais. e-mail: mbergerman@usp.br

RESUMO

A cominuição é a operação mais dispendiosa em uma usina de tratamento de minérios e no empreendimento mineiro como um todo. Isso se deve essencialmente ao elevado consumo energético, de bolas e revestimentos na etapa de moagem. Este cenário tende a se acentuar em função da diminuição dos teores do minérios, pois isso implica na necessidade de uma cominuição cada vez mais fina e o processamento de vazões mássicas cada vez mais elevadas. Para contornar esta situação, a maioria dos estudos são direcionados ao aumento da eficiência da cominuição, focando no desenvolvimento e otimização de processos. Uma alternativa aliada a esses esforços é a pré-concentração, técnica que consiste em separar um produto previamente britado em um pré-concentrado e um rejeito. Este estudo avalia o potencial da pré-concentração gravimétrica de um minério de cobre sulfetado, a partir de resultados obtidos em ensaios conduzidos em um jigue piloto, simulando duas rotas: pré-concentrada e convencional. A rota pré-concentrada é capaz de promover: um descarte de 52% da massa que alimenta o circuito de moagem-flotação, uma recuperação metalúrgica de 87%, e uma redução do consumo energético, de corpos moedores e de revestimentos de 5,4; 11,6 e 12,2%, respectivamente no circuito de moagem.

PALAVRAS-CHAVE: Pré-concentração, Jigue, Abrasividade, Consumo energético, Cobre.

ABSTRACT

Comminution is the most expensive operation in a mineral processing and in the mining as a whole. This is mainly due to the high energy consumption and steel in the grinding stage. This scenario tends to be accentuated by the reduction of ore contents, as this implies the need for an increasingly thin comminution and the processing of increasingly higher mass flows. To circumvent this situation, most studies are aimed at increasing the efficiency of comminution, focusing on the development and optimization of processes. An alternative to these efforts is pre-concentration, a technique that consists of separating a previously crushed product into a pre-concentrate and a tail. This study evaluates the potential of the gravimetric pre-concentration of a sulphided copper ore from results obtained in tests conducted in a pilot jig, simulating two routes: pre-concentrated and conventional. The pre-concentrated route is capable of promoting: a 52% discard of the mass that feeds the mill-flotation circuit, a metallurgical recovery of 87%, and a reduction in energy consumption, grinding bodies and coatings of 5.4; 11.6 and 12.2% respectively in the grinding circuit.

KEYWORDS: Pre-concentration, Jig, Abrasiveness, Energy consumption, Copper.

1. INTRODUÇÃO

A cominuição é a etapa mais dispendiosa de uma usina de tratamento de minérios e do empreendimento mineiro como um todo, devido ao elevado consumo energético e ao desgaste de corpos moedores e de revestimentos, sobretudo na etapa de moagem (ABOUZEID e FUERSTENAU, 2009; NAPIER-MUNN et al., 2015). Este cenário tende a se acentuar com a redução dos teores dos minérios, pois isso implica na necessidade de se processar vazões mássicas cada vez mais elevadas e uma cominuição cada vez mais fina. Embora a maior parte dos esforços se concentrem em aumentar a eficiência da cominuição, limitando-se ao desenvolvimento e otimização de processos, nos últimos anos, alguns estudos têm demonstrado a pré-concentração como uma alternativa capaz de gerar ganhos potenciais em etapas de cominuição, especialmente na moagem (CRESSWELL, 2001; GRIGG e DELEMONTX, 2014; BERGERMAN et al., 2018).

A pré-concentração consiste em uma etapa de concentração mineral logo nos estágios iniciais de uma rota de tratamento de minérios. Em geral esta operação recebe o produto da britagem e o separa em subprodutos: um pré-concentrado e um rejeito. O primeiro é encaminhado para um circuito de moagem seguido pela flotação. Já o segundo, constituído por nenhuma ou uma pequena quantidade de metal de interesse (BERGERMAN et al., 2018), é descartado a seco, podendo, por exemplo, ser disposto em pilhas de bota-foras. Nesse contexto, os resultados de uma etapa de pré-concentração, podem ser categorizados da seguinte maneira:

- Em projetos *greenfield*:
 - Redução da massa processada nas operações subsequentes (moagem, flotação, disposição de rejeitos em barragens), o que implica na redução de custos de capital e de operação e mitigação do impacto ambiental do projeto;
 - Possibilidade de viabilizar projetos localizados em regiões com restrita disponibilidade de água, via pré-concentração a seco. Alguns prospectos não se desenvolvem no empreendimento mineiro devido à indisponibilidade de água para as operações de tratamento de minérios. Com a pré-concentração a seco é possível descartar uma parcela significativa da ganga e encaminhar o pré-concentrado até uma região, cuja disponibilidade de água, permita o processamento a úmido;
 - Possibilidade de processar pequenos corpos minerais em uma região relativamente próxima a uma usina central de tratamento de minérios, constituída por um circuito de moagem, flotação e barragem. Uma etapa de pré-concentração associada a um circuito de britagem móvel “*on pit*” permitiria a lavra de pequenos depósitos, sem a necessidade de investimentos adicionais em circuito de moagem, flotação e disposição de rejeitos em barragens.
- Em empreendimentos *brownfield*:
 - Aumento do teor do elemento de interesse contido no minério processado. Isso impacta diretamente nos custos de disposição de rejeitos a úmido nas barragens (CRESSWELL, 2001; GRIGG e DELEMONTX, 2014; BERGERMAN et al., 2018);

- Aumento da vida útil da mina – em função da possibilidade de redução do teor de corte na mina, o que possibilita a lavra dos minérios marginais e consequentemente o aumento das reservas lavráveis (JOSÉ NETO, 2019);
- Redução de custos de operação, em função da redução do consumo energético e do desgaste na etapa de moagem (CRESSWELL, 2001; GRIGG e DELEMONTE, 2014; BERGERMAN et al., 2018). Há também potencial de redução de custos de operação na etapa de flotação, uma vez que verifica-se em alguns casos um aumento de seu desempenho (SANCHES et al., 2018).

A redução do consumo energético e da abrasividade do pré-concentrado em relação ao minério tal qual, depende da característica mineralógica do mineral de interesse e do de ganga. Bergerman et al. (2018) verificou que um produto pré-concentrado de um minério de cobre sulfetado apresenta um consumo energético e uma abrasividade inferior a amostra tal qual. Tal particularidade é atribuída pelo autor ao fato da ganga ser constituída essencialmente por silicatos, cujo WI e a abrasividade são superiores aos dos sulfetos, que constituem o pré-concentrado. Destaca-se, no entanto, que nem todos os minérios apresentam ganhos no consumo energético e na abrasividade após uma etapa de pré-concentração. Neto (2019) observou que em um minério de zinco silicatado, constituído por uma ganga carbonática, não há variação do WI e da abrasividade entre o pré-concentrado e a amostra tal qual. Existem casos ainda, como na pré-concentração de minério de nióbio, em que o WI não se altera significativamente, enquanto a abrasividade apresenta significativa redução, tal como demonstrado por Bergerman et al. (2018). O autor justifica esta particularidade pelo fato do pré-concentrado ser constituído essencialmente por magnetita, cuja tenacidade é elevada se comparada a ganga deste minério (silicatos, carbonatos, feldspato e argilominerais). Tendo em vista o histórico dos estudos anteriores (BERGERMAN et al., 2014, 2018), que constatarem a redução do consumo energético e da abrasividade após uma etapa de pré-concentração de minério sulfetados, o presente estudo tem como objetivo avaliar o impacto da pré-concentração gravimétrica de um minério de cobre sulfetado no consumo energético e no desgaste de corpos moedores e de revestimentos de um circuito de moagem, a partir dos produtos de uma campanha de ensaios em jigue piloto.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Uma amostra de aproximadamente 5 toneladas de minério de cobre sulfetado, proveniente do produto da britagem de um empreendimento mineiro na região do sudoeste do Pará, foi submetida a ensaios em um jigue piloto, tendo em vista a pré-concentração em granulometria grossa. O procedimento consistiu na realização de ensaios individuais em faixas granulométricas restritas, com o objetivo de avaliar o desempenho do jigue em diferentes faixas granulométricas. O material passante na abertura da peneira de 4 mm não foi submetido ao ensaio, devido a ineficiência da faixa granulométrica relativamente fina em métodos gravimétricos (NETO, 2019). A Figura 2 ilustra o fluxograma da realização dos ensaios.

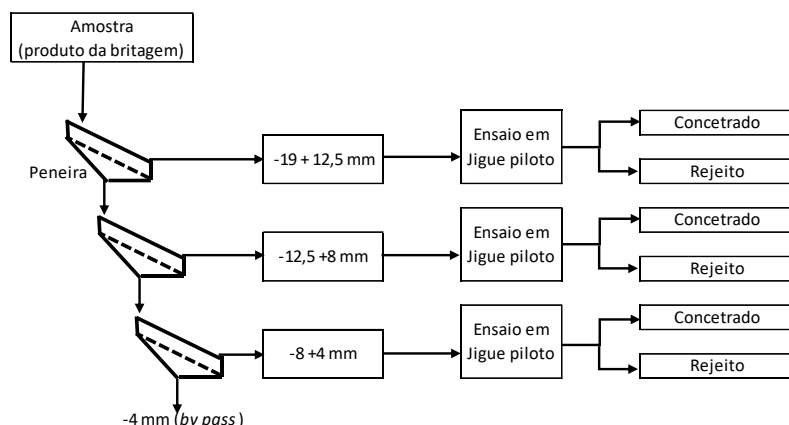


Figura 1 – Fluxograma da realização dos ensaios em jigue piloto

Os fluxos de alimentação, concentrado e rejeito dos ensaios de jigagem, bem como o material passante em 4 mm foram amostrados, homogeneizados e quarteados. Para a amostra de cada fluxo separou-se uma alíquota para análise química, que foi realizada por absorção atômica, mediante a digestão prévia do material. Uma outra alíquota foi submetida a ensaios de caracterização física quanto ao consumo energético e a abrasividade na etapa de moagem. O consumo energético foi avaliado a partir da realização do ensaio de moabilidade de Bond - WI de Bond (Bond, 1952), utilizando-se uma malha de fechamento do circuito de 150 μ m. A abrasividade do minério foi avaliada através dos ensaios de AI de Bond (BERGSTROM, 1985) e LCPC. Maiores detalhes sobre este último podem ser consultados em Peres et al. (2018). Tanto os ensaios de abrasividade, quanto os de moabilidade de Bond, foram conduzidos em uma única faixa granulométrica dos ensaios de jigagem: -19 +12 mm, que permite a realização dos ensaios padrão de WI e Ai de Bond. Assumiu-se a premissa que o comportamento do minério frente ao consumo energético e a abrasividade é similar nas demais faixas granulométricas.

A partir do resultado metalúrgico global obtido nos ensaios de jigagem, foram simuladas duas rotas de tratamento de minério: pré-concentrada e convencional (Figura 2). Os dois cenários foram comparados quanto ao consumo energético e o desgaste de corpos moedores e de revestimentos na etapa de moagem, tendo em vista que esta operação é a que mais consome energia em uma usina de Tratamento de Minérios e no empreendimento mineiro como um todo, conforme mencionado anteriormente. O consumo de potência foi calculado pelo método de Bond (1952), assumindo-se granulometrias de alimentação (F_{80}) e do produto (P_{80}) do circuito de 12,134 e 0,116mm, respectivamente. Estes valores são típicos para circuitos de moagem de minério de cobre sulfetado, tal como ilustrado por Olegario Jr. et al. (2017) e Sampaio et al. (2001). A simulação dos dois cenários compreendeu a aplicação da Equação de Bond (Equação 1), fixando-se a vazão mássica e as granulometrias da alimentação e do produto e utilizando-se os diferentes WIs obtidos na alimentação e no concentrado do jigue, que representam as rotas convencional e pré-concentrada, respectivamente. Como o dimensionamento não é o propósito deste estudo, o consumo da potência não foi corrigido pelos fatores de Rowland Junior (1986).

$$W = \frac{P}{Q} = \frac{10 \text{ WI}}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10 \text{ WI}}{\sqrt{F_{80}}} \quad (1)$$

Onde W é o consumo energético específico (kWh/t), P é consumo de potência (kW), Q é a vazão mássica (t/h), WI: work index de Bond (kWh/t), P_{80} é a abertura da peneira na qual passam 80% da massa do produto (μm) e F_{80} é a abertura da peneira na qual passam 80% da massa da alimentação (μm). Para o cálculo do desgaste das bolas e do revestimentos ($g_{\text{aço}}/t_{\text{minério}}$), foram utilizados as Equações 2 e 3, respectivamente.

$$\text{Desgate}_{\text{bolas}} = 15,5 \cdot (\text{AI} - 0,015)^{0,33} \cdot P \cdot \frac{1}{Q} \quad (2)$$

$$\text{Desgate}_{\text{revestimentos}} = 11,6 \cdot (\text{AI} - 0,015)^{0,3} \cdot P \cdot \frac{1}{Q} \quad (3)$$

Onde AI é o índice de abrasividade de Bond (g), P é o consumo de potência (kW) e Q é a vazão mássica (t/h).

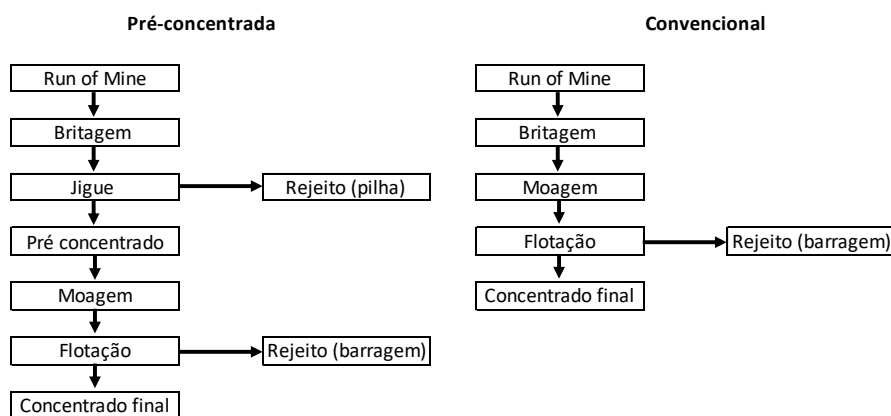


Figura 2 - Rotas de Tratamento de Minério de cobre sulfetado pré-concentrada e convencional

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Balanço metalúrgico dos ensaios de jigagem

Os resultados metalúrgicos dos ensaios realizados no Jigüe piloto, por faixa granulométrica, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados metalúrgicos dos ensaios de jigagem por faixa granulométrica

	Faixa granulométrica (mm)	Massa (kg)	Massa (%)	Teor de Cu (%)	Distribuição de Cu (%)
Concentrado	-19 +12	244,1	4,7	4,58	12,2
	-12,5 + 8	278,3	5,4	4,45	13,5
	-8 +4	229,9	4,4	4,84	12,1
Rejeito	-19 +12	863,1	16,7	0,43	4,0
	-12,5 + 8	876,6	16,9	0,35	3,3
	-8 +4	987,2	19,1	0,52	5,6
By pass	-4	1694,6	32,8	2,67	49,3
Alim. calculada	-	5173,8	100,0	1,78	100,0
Alim. analisada	-	-	-	1,74	-

Os resultados dos ensaios de jigagem por faixa granulométrica evidenciam um teor de cobre relativamente similar no concentrado (em média 4,6%) e no rejeito (0,43%) para as três granulometrias ensaiadas (-19 +12,5; -12,5 +8 e -8 +4mm). Em contrapartida, o teor de cobre no *by pass* corresponde a 60% do teor de cobre no concentrado. Na Tabela 2, são ilustrados os resultados metalúrgicos global dos ensaios de jigagem.

Tabela 2 – Resultados metalúrgicos global dos ensaios de jigagem com o minério de cobre sulfetado

	Massa (kg)	Teor de Cu (%)	Recuperação em massa (%)	Recuperação metalúrgica (%)
Concentrado	2446,9	3,27	47,3	87,0
Rejeito	2726,86	0,44	52,7	13,0
Alimentação	5173,8	1,78	100,0	100,0

Os resultados apresentados demonstram que a pré-concentração gravimétrica do minério de cobre sulfetado via jig, promove o descarte de 52,7% da massa que alimenta a usina, com recuperações de cobre de 87%, para o concentrado e 13%, para o rejeito. Esta perda de cobre para o rejeito está em linha com os ensaios de jigagem de laboratório realizados anteriormente, que apresentaram em média 10% de perda do elemento de interesse para o rejeito (BERGERMAN et al., 2018; NETO, 2019). O pré-concentrado apresenta um teor relativamente significativo, para uma etapa de pré-concentração, mas em contrapartida, o rejeito possui um teor de cobre não tão baixo, ainda é passível de concentração.

3.2. Caracterização física - consumo energético e abrasividade

Na Tabela 3 são ilustrados os resultados dos ensaios de caracterização física, quanto ao consumo energético e a abrasividade. Há uma redução do WI do concentrado em comparação ao da alimentação, de aproximadamente 5,4%. Em contrapartida, em se tratando de abrasividade, verificou-se expressivas reduções do AI e do LCPC do concentrado em comparação aos da alimentação, de 20 e 21%, respectivamente, o que está de acordo com os resultados obtidos por Bergerman et al. (2018).

Tabela 3 - resultados dos ensaios de WI, AI e LCPC da alimentação e dos produtos da pré-concentração

	WI (kWh/t)	AI (g)	LCPC
Alimentação	14,8	0,41	999
Concentrado	14,0	0,33	782
Rejeito	16,1	0,43	1115

3.3. Rota pré-concentrada versus convencional

Para as duas rotas avaliadas, estabeleceu-se que o circuito de moagem seria alimentado com uma mesma vazão mássica de 150 t/h. Para que a rota pré-concentrada atinja esse número, é necessário que a vazão mássica do circuito de britagem e a produção *Run of Mine* seja aproximadamente o dobro (317,1t/h), uma vez que 52% da massa é descartada na operação de pré-concentração via jig, antes de alimentar o circuito de moagem. Na Figura 4 são apresentados os resultados do consumo de potência do circuito de moagem para as duas rotas avaliadas. Os resultados demonstram que o circuito de moagem da rota pré-concentrada apresenta um consumo de potência 5,4% menor do que o da convencional.

Embora esse valor não seja tão expressivo, essa diferença já representa um ganho na redução de custos operacionais.

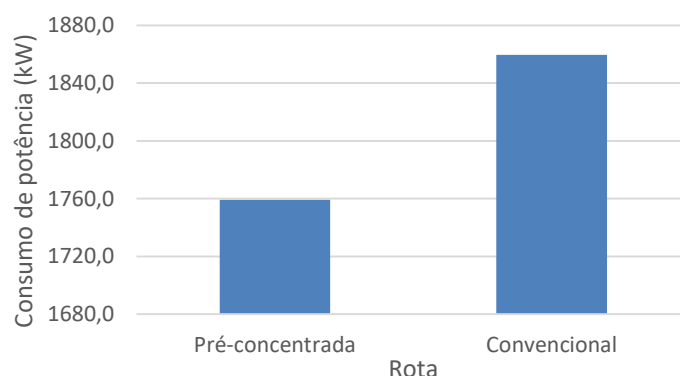


Figura 3 - Comparativo entre o consumo de potência do circuito de moagem para as duas rotas simuladas

A Figura 5 ilustra o desgaste dos corpos moedores e dos revestimentos do circuito de moagem das duas rotas avaliadas. Os resultados evidenciam que a pré-concentração promove uma redução no consumo de revestimentos e corpos moedores, de 11,6 e 12,2%, respectivamente. Este número representa uma expressiva redução nos custos operacionais, quanto a reposição dessas peças de desgaste.

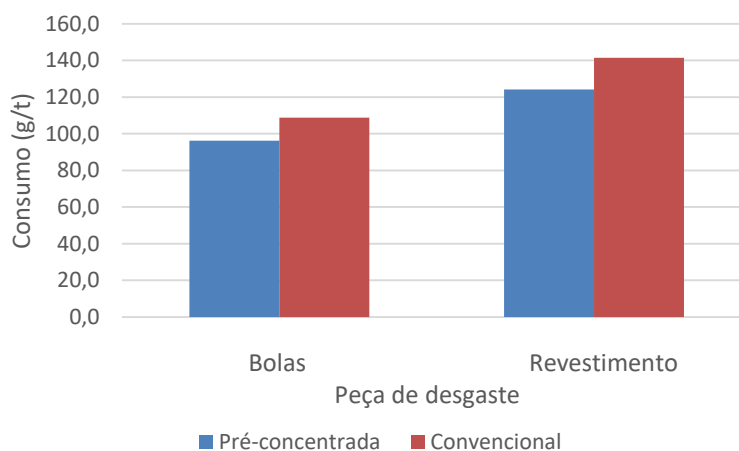


Figura 4 - comparação entre as rotas pré-concentrada e convencional quanto ao desgaste de corpos moedores e de revestimentos

4. CONCLUSÕES

O presente estudo apresentou os resultados de uma campanha de ensaios de pré-concentração gravimétrica de um minério de cobre sulfetado conduzidos em um jigge piloto. Os resultados metalúrgicos global indicaram que a pré-concentração do minério em questão é capaz de promover um descarte de 52% da massa que alimenta o circuito de moagem-flotação com um teor de cobre de 0,43%, com uma granulometria grossa, logo nos estágios iniciais do tratamento de minério. Isso eleva o teor de cobre de 1,78 para 3,27% no circuito de moagem-flotação subsequente, possibilitando que um menor quantidade de rejeitos seja disposta a úmido na barragem, o que é particularmente positivo em relação aos custos de

capital e de operação. A pré-concentração não elimina a necessidade da disposição de rejeitos a úmido, mas possibilita que menores volumes sejam produzidos de modo a se obter um maior controle, já que barragens de menor porte podem ser construídas, como até mesmo se considerar a operação de filtragem destes rejeitos. Adicionalmente, a etapa de pré-concentração possibilita uma redução do consumo energético, de corpos moedores e de revestimentos de 5,4; 11,6 e 12,2%, respectivamente, no circuito de moagem.

6. REFERÊNCIAS

ABOUZEID A. M., FUERSTENAU D. W. Grinding of mineral mixtures in high-pressure grinding rolls. *International Journal of Mineral Processing*, v. 93, p. 59-65, 2009.

BERGERMAN, M. G.; JOSE NETO, D. ; MANO, E.; CHAVES, A. P. . IMPACTS ON ENERGY CONSUMPTION AND WEAR IN GRINDING CIRCUITS WITH A PRECONCENTRATION STAGE. In: XXXIX International Mineral Processing Congress, 2018, Moscow. *Proceedings of the XXXIX IMPC*, 2018.

BERGERMAN, M.G., JOSÉ NETO, D., TOMASELLI, B.Y., MACIEL, B.F., DEL ROVERI, C., Navarro, F.C. Redução do consumo de energia de circuitos de moagem com a utilização de pré-concentração de minerais sulfetados. *Holos*, 3, p. 176–183, 2014.

CRESWELL, G. M. Pre-concentration of base metal ores by dense medium separation. In: SAIMM Copper, Cobalt, Nickel and Zinc Recovery conference. *Proceedings of the Johannesburg: SAIMM*, 2001. p. 1-10.

GRIGG, N. J., DELEMONTE, G. J. The pre-concentration of precious and base metal deposits using the inline pressure jig (IPJ); higher feed grades and more metal. 2015. <http://www.ceecthefuture.org/wp-content/uploads/2015/06/IMPC-2014-Pre-concentration-Paper-Revision-CEEC-150825.pdf>.

NAPIER-MUNN T. J. Is progress in energy-efficient comminution doomed? *Minerals Engineering*, v. 73, p. 1-6, 2015

NETO, D. J. Análise técnica de alternativas de pré-concentração para o minério de zinco silicatado de Vazante/MG. 2019. 109 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019b.

OLEGARIO Jr., F. C.; FONSECA, A. R.; OLIVEIRA, D. E.; SOUZA, D. C. AUMENTO DA EFICIENCIA ENERGETICA DA REMOAGEM DE CONCENTRADOS DA USINA DO SALOBO. In: XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2017, Belém. *Anais de XXVII ENTMMME*, 2017.

PERES, L. M.; MASSOLA, C. P.; BERGERMAN, M. G. ABRASIVENESS EVALUATION OF PRE-CONCENTRATION OF COPPER SULFIDE ORE PRODUCTS THROUGH LCPC TEST. *TECNOLOGIA EM METALURGIA, MATERIAIS E MINERAÇÃO*, v. 15, p. 91-95, 2018.

ROWLAND JUNIOR, C. A. Ball mill scale-up: diameter factors. In: SYMPOSIUM HONORING NATHANIEL ARBITER ON HIS 75TH. BIRTHDAY, 1986, New Orleans. *Advances in mineral processing: a half-century of progress in application of theory to practice*. Littleton: SME, 1986. p. 605-617.

SAMPAIO, J. A.; CARVALHO, E. A.; ANDRADE, D. G. Cobre Caraíba. In: SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B.; LINS, F. F. *Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001. p. 250-261.

SANCHES, G. J.; BERGERMAN, M. G.; DIMAS, J. N.; HORTA, D. G. PRÉ-CONCENTRAÇÃO DE UM MINÉRIO DE ZINCO E SUA INFLUÊNCIA NA FLOTAÇÃO. In: 4ª Edição ABM Week, 2018, São Paulo. *Anais de 4ª Edição ABM Week*, 2018.