

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO TIPO DE BRITAGEM NA LIBERAÇÃO MINERAL EM CIRCUITOS COM PRÉ-CONCENTRAÇÃO

ASAKAWA, A.H.¹, BERGERMAN, M.G.², CHAVES, A.P.³

¹Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. andre.asakawa@usp.br

²Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo. mbergerman@usp.br

³Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo. arthurchaves@terra.com.br

RESUMO

A pré-concentração é uma das alternativas frente à diminuição dos teores de minérios de interesse nas minas ocasionando em seu aumento de custo de produção. A fim de melhorar a liberação nesta etapa, a cominuição seletiva propõe explorar os diferentes mecanismos de quebra. Apesar do aumento de estudos sobre a pré-concentração, ainda são poucos os estudos sobre minérios do Brasil, com ênfase na cominuição seletiva. Assim, esse estudo comparou três diferentes equipamentos de britagem para a quebra de três diferentes tipos de minérios: britador de mandíbulas, de impacto e moagem de rolos de alta pressão e a resposta dos diferentes produtos frente à pré-concentração através do método gravítico. Os minérios de cobre e o polimetálico apresentaram bons resultados para a pré-concentração, com recuperações metalúrgicas maiores que 70% e um descarte de mais de 20% de massa. O minério de ferro apresentou um resultado de 97% de recuperação metalúrgica com 15% de descarte de massa. Em relação à cominuição seletiva, o britador de mandíbulas se mostrou a melhor opção com maior recuperação para o minério de cobre, enquanto que o minério polimetálico teve melhor resposta para o britador de impacto. Por fim, o minério de ferro não apresentou diferenças significativas.

PALAVRAS-CHAVE:Pré-concentração, Cominuição seletiva, Cominuição, Liberação mineral.

ABSTRACT

Pre-concentration is one of the alternatives in view of the decrease in the grades of ore in the mines, causing their cost to increase. In order to improve the liberation at this step, selective comminution explores the different breaking mechanisms. Despite the increase in studies on pre-concentration in Brazil and in the world, there are still few studies on Brazilian ores, mainly on selective comminution. Thus, this study compared three different crushing equipment: jaw crusher, impact crusher and high pressure grinding rolls and their response of different products to pre-concentration through the gravity method. Copper and polymetallic ores showed good results for pre-concentration, with metallurgical recoveries greater than 70% and a discard of more than 20% by mass. Iron ore has a bad result for pre-concentration, as the possibility of discard mass is very low. Regarding selective comminution, the jaw crusher proves to be the best option with greater recovery for the copper ore, while the polymetallic ore had a better response to the impact crusher. Finally, iron ore showed no significant differences.

KEYWORDS:Pre-concentration, Selective comminution, Comminution, Mineral liberation.

1. INTRODUÇÃO

A cominuição é uma etapa de extrema importância para empreendimentos mineiros. Nela, ocorre a redução do tamanho das partículas de forma controlada, sendo um dos objetivos a liberação mineral, etapa necessária para que ocorra a concentração mineral. Estima-se que 2% de toda energia elétrica gerada no planeta é utilizada na cominuição (NAPIER-MUNN, 2015) e este número não tende a diminuir, devido ao crescimento das operações de concentração mineral fruto da diminuição dos teores e maior complexidade dos minerais (NORGATE; HAQUE, 2010, 2013). Para minérios de cobre, estima-se que 40% do custo de produção do lingote (produto final) seja devido à cominuição.

Uma das alternativas em resposta à alta do consumo de energia elétrica nessa etapa é a pré-concentração. Essa operação pode ocorrer após a etapa de britagem e antes da moagem, com a utilização de técnicas como a separação magnética, peneiramento, separação densitária e sensores de alta tecnologia (ore sorting) com a finalidade de separar o concentrado do rejeito grosso (DIMAS; BERGERMAN; YOUNG; PETTER, 2019).

Descartando o rejeito antes da moagem, ele estará em granulometria mais grossa, podendo ser disposto em pilhas, junto com o estéril de mineração no bota-fora, e mesmo – dependendo da sua mineralogia, utilizado em obras civis rodoviárias ou de construção.

A pré-concentração está sendo utilizada em diversas minas, com destaque para os sulfetos de cobre, níquel, chumbo e zinco da África, da América do Norte e da Austrália. A mina Tati Níquel Phoenix Mine localizada em Botsuana relatou ganhos significativos como o aumento de 470 t/h para 650 t/h no circuito de moagem com a inserção da tecnologia de pré-concentração durante a etapa de britagem (MORGAN, 2009).

No Brasil, a pré-concentração ainda é pouco utilizada. Estudos preliminares foram realizados em escala laboratorial e tiveram resultados satisfatórios. O estudo de ore sorting no mineral de lítio apresentou uma recuperação mássica de 25% com no máximo de 20% de contaminantes (SORAES et. al., 2019). Costa et. al. (2017) também relatou a viabilidade de pré-concentração do minério marginal de vanádio a partir de uma concentração magnética com um enriquecimento de quase 1,5 vezes. Estudos em escala piloto de minério de cobre sulfetado com relação à pré-concentração também já foram realizados. Os resultados foram positivos com o enriquecimento do elemento cobre de quase duas vezes, recuperação metalúrgica de 87% e uma recuperação em massa de 47% (FRANCO; PEDROSA; BERGERMAN, 2019). O estudo da empresa Ero Copper (ERO COPPER, 2020) na mina de Vermelho, cidade de Juazeiro (BA) relatou um enriquecimento de minério de cobre de 4,5 com uma recuperação mássica de 20%. A perda de minério de cobre nessa amostra foi de 9,8%.

Estudos feitos com o minério de Boa Esperança (MT) pela Mineração Caraíba com minérios disseminado e brechado mostraram resultados interessantes, aumentando o teor de ambos os minérios alimentados à moagem, aumentando a reserva pelo enriquecimento de minérios até então considerados marginais e possibilitando o aumento da produção das operações a jusante da moagem.

A fim de melhorar a liberação grossa e assim melhorar os resultados da pré-concentração, diversos autores (HESSE; POPOV; LIEBERWIRTH, 2017 e OZCAN; BENZER, 2013) citam que a cominuição seletiva, usando diferentes equipamentos e mecanismos de

quebra, podem ajudar a gerar ganhos de liberação. Os estudos divergem quanto ao melhor tipo de mecanismo de quebra que deve ser utilizado.

Devido ao cenário recente e incipiente sobre a pré-concentração, o presente estudo procurou proporcionar uma análise de circuitos de pré-concentração através da cominuição seletiva para diferentes minérios lavrados no Brasil através do método gravítico com a finalidade de contribuir com a pesquisa dessa nova tecnologia.

Apesar dos resultados positivos citados para minérios do Brasil, ainda não existem estudos que ilustram o potencial de ganho de liberação com a cominuição seletiva. Este trabalho teve como objetivo avaliar o impacto que diferentes tipos de britagem (britador de mandíbulas, impacto, moagem de rolos de alta pressão) possuem na liberação mineral em específico para circuitos com pré-concentração por métodos gravíticos. Para esta comparação entre diferentes mecanismos de quebra foi utilizado um minério de cobre sulfetado, um minério polimetálico de zinco, cobre e chumbo e um minério de ferro.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo trabalhou com amostras de três diferentes minas no Brasil, um minério de cobre sulfetado, um minério polimetálico de cobre, chumbo e zinco e um minério de ferro típico do Quadrilátero Ferrífero. Os principais minerais presentes no minério de cobre sulfetado na amostra foram: calcopirita, bornita, calcocita, quartzo, pirita, pirrotita e millerita (BERGERMAN, 2012). O minério de cobre, chumbo e zinco possui como principais minerais: pirita, esfalerita, galena, dolomita, quartzo, calcita, calcopirita e pirrotita. O minério de ferro utilizado possui como mineral de minério a hematita (Fe_2O_3) e a ganga é representada principalmente pelo quartzo (SiO_2).

Todos os materiais passaram pela mesma rota de processamento. Inicialmente, uma amostra de 20 kg foi utilizada na alimentação do britador (mandíbulas, impacto e HPGR) com o objetivo de cominuir até obter um top size de 12,7 mm. No caso do britador de impacto, foram avaliadas 3 velocidades de rotação (5,8 m/s, 11,6 m/s e 17,4 m/s). No caso do HPGR, o material precisou ser previamente abaixo de 37,5 mm e foram avaliadas 3 pressões (2 N/mm², 3 N/mm² e 4 N/mm²). As britagens nos britadores de mandíbulas e impacto foram realizadas em circuito fechado direto e no HPGR em circuito aberto com apenas uma passagem pelo equipamento. No caso do britador de mandíbulas, a cada passagem pelo britador a abertura do equipamento, inicialmente a 1,5", sendo fechada até chegar a 0,5". A Figura 1 apresenta todo o processo a partir de um fluxograma.

A amostra passou por análise granulométrica por peneiramento a úmido com as peneiras quadradas com as seguintes aberturas: 12,7 mm; 9,5 mm; 6,35 mm; 4,77 mm; 3,35 mm; 2,16 mm; 1,68 mm; 1,18 mm com o objetivo de conhecer a curva de distribuição granulométrica e preparar amostras para o ensaio de afunda flutua.

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Tratamento de Minérios da Escola Politécnica da USP, com exceção do ensaio no HPGR que foi realizado na Metso Outotec, localizada em Sorocaba no interior do estado de São Paulo com o equipamento HRC 1000.

Os produtos do peneiramento das britagens foram agrupados em três grupos: - 12,7 mm + 6,35 mm; - 6,35 mm + 3,35 mm; - 3,35 mm + 1,18 mm. O ensaio de afunda flutua foi feito nesses três conjuntos com as seguintes massas: 2 kg em -12,7 mm + 6,35 mm, 0,8 kg em - 6,35 mm + 3,35 mm; e 0,5 kg em -3,35 mm + 1,18 mm. Cada conjunto foi para o ensaio de líquido denso com as seguintes densidades do líquido: 2,95 g/cm³ de tetrabromoetano, 2,85 g/cm³ de bromoetano e 2,75 g/cm³ de solução diluída de bromoetano com álcool etílico. Assim, em cada ensaio foram coletados através do método de separação catação quatro produtos: afundado de 2,95 g/cm³, afundado de 2,85 g/cm³, afundado de 2,75 g/cm³ e flutuado de 2,75 g/cm³.

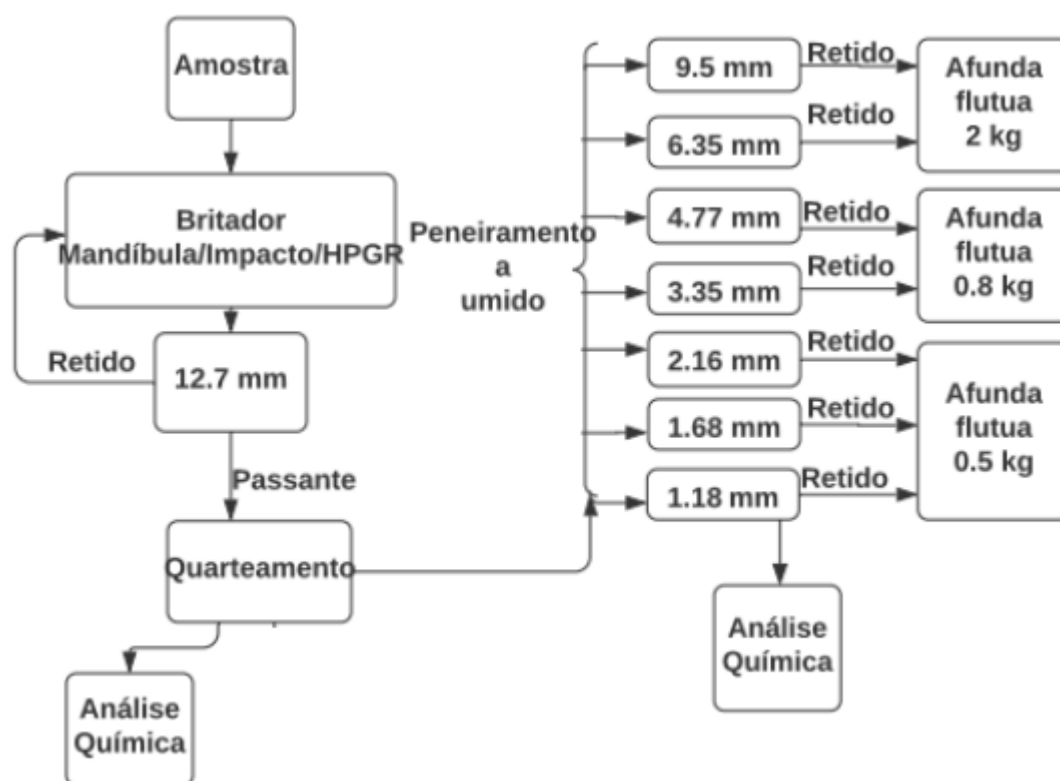


Figura 1. Fluxograma do processo de ensaio

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As distribuições granulométricas referentes ao minério de cobre sulfetado, minério polimetálico e minério de ferro do britador de mandíbulas, britador de impacto, do HPGR são apresentadas na Figura 2. Das curvas granulométricas obtidas, o HPGR ao ser comparado com o britador de mandíbulas e o britador de impacto mostrou gerar maior quantidade de finos e maior relação de redução.

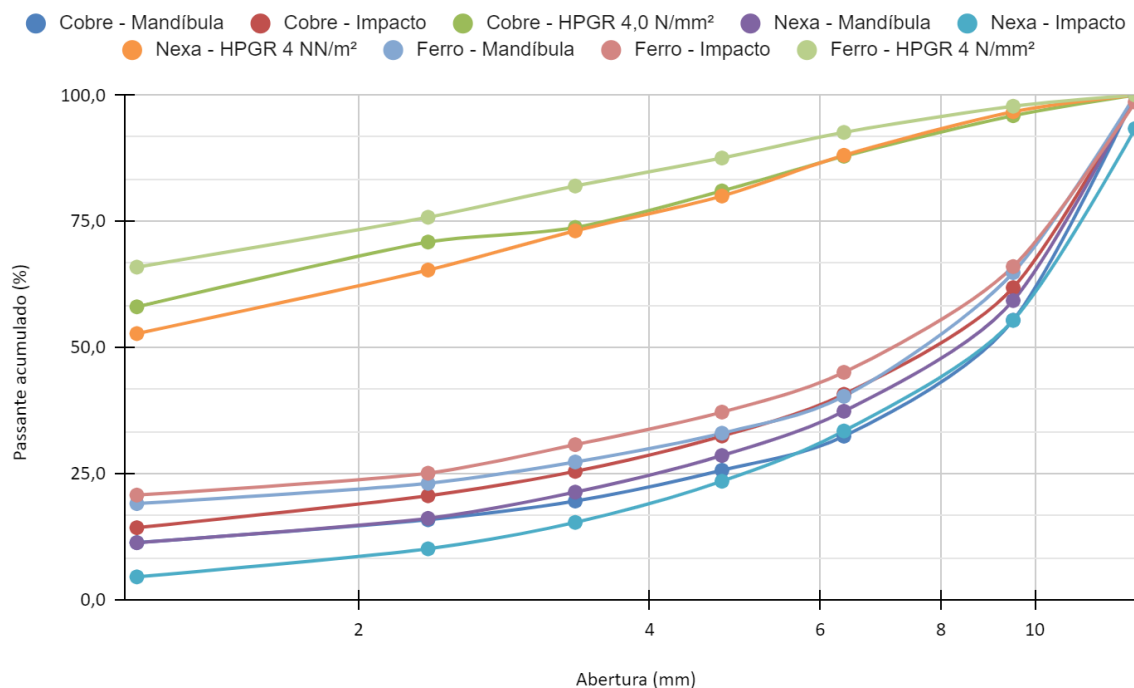


Figura 2. Curvas Granulométricas.

Os ensaios de afunda flutua nos produtos do HPGR, do britador de impacto e mandíbulas foram realizados apenas para a fração intermediária -6,35 mm + 3,35 mm. A razão desta escolha deve-se à pequena diferença entre os resultados da fração -12,7 mm + 6,35 mm e -3,35 mm + 1,18 mm para a recuperação mássica e metalúrgica. Além disso, ressalta-se o alto custo e risco dos ensaios em líquido denso, que utilizam reagentes caros e tóxicos. Assim, tal simplificação foi considerada importante e sem impactos significativos no estudo.

Os resultados do ensaio de afunda flutua e análise química referentes ao material de minério de cobre sulfetado, de minério polimetálico e de minério de ferro com os diferentes equipamentos de britagem são apresentados respectivamente nas Tabelas 1, 2 e 3.

Tabela 1. Ensaio de afunda flutua para o minério de cobre sulfetado.

Cominuição	Fração (mm)	Intervalo de densidade	Densidade de separação (g/cm³)	Massa (%)	Recuperação (%)
					Cu
Impacto	-6,35+3,35	d > 2,95	2,95	61.7	87.0
		2,85 < d < 2,95	2,85	8.3	93.3
		2,75 < d < 2,85	2,75	12.8	98.2
		d < 2,75	2,6	17.1	100.0
Mandíbula	-6,35+3,35	d > 2,95	2,95	55.1	89.9
		2,85 < d < 2,95	2,85	10.1	95.9
		2,75 < d < 2,85	2,75	13.1	98.9
		d < 2,75	2,6	21.6	100.0
HPGR	-6,35+3,35	d > 2,95	2,95	54.1	87.7
		2,85 < d < 2,95	2,85	18.2	95.7
		2,75 < d < 2,85	2,75	13.7	99.3
		d < 2,75	2,6	14.0	100.0

Tabela 2. Ensaio de afunda flutua para o minério polimetálico.

Cominuição	Fração (mm)	Intervalo de densidade	Densidade de separação (g/cm ³)	Massa (%)	Recuperação (%)
					Cu
Impacto	-6,35+3,35	d > 2,95	2,95	16.9	71.7
		2,85 < d < 2,95	2,85	12.6	75.3
		2,75 < d < 2,85	2,75	43.3	92.3
		d < 2,75	2,6	27.3	100.0
Mandíbula	-6,35+3,35	d > 2,95	2,95	12.5	66.4
		2,85 < d < 2,95	2,85	15.5	73.4
		2,75 < d < 2,85	2,75	42.2	89.7
		d < 2,75	2,6	29.8	100.0
HPGR	-6,35+3,35	d > 2,95	2,95	15.5	47.4
		2,85 < d < 2,95	2,85	15.5	61.2
		2,75 < d < 2,85	2,75	29.4	84.3
		d < 2,75	2,6	39.7	100.0

Tabela 3. Ensaio de afunda flutua para o material de Ferro.

Cominuição	Fração (mm)	Intervalo de densidade	Densidade de separação (g/cm ³)	Massa (%)	Recuperação (%)
					Fe
Impacto	-6,35+3,35	d > 2,95	2,95	84.7	96.0
		2,85 < d < 2,95	2,85	3.4	97.4
		2,75 < d < 2,85	2,75	5.7	99.1
		d < 2,75	2,6	6.2	100.0
Mandíbula	-6,35+3,35	d > 2,95	2,95	86.9	96.6
		2,85 < d < 2,95	2,85	3.3	97.9
		2,75 < d < 2,85	2,75	6.1	99.5
		d < 2,75	2,6	3.7	100.0
HPGR	-6,35+3,35	d > 2,95	2,95	88.7	96.5
		2,85 < d < 2,95	2,85	2.4	97.5
		2,75 < d < 2,85	2,75	6.9	99.7
		d < 2,75	2,6	2.0	100.0

A análise das Tabelas 1, 2 e 3 possibilita a interpretação que quanto à pré-concentração ela se mostra eficaz para o material de cobre sulfetado e para o minério polimetálico, pois tiveram alta recuperação metalúrgica com recuperação mássica reduzida. Assim, esses dois minérios tiveram uma boa liberação do minério de ganga. No caso do minério de ferro, seria possível um descarte aproximado de 15% da massa com menos de 5% do metal. Não é um ganho tão significativo quanto o observado nos demais minérios mas não deixa de ser uma possibilidade a ser avaliada futuramente em mais detalhes.

Quanto à cominuição seletiva, o material de cobre sulfetado teve um resultado ligeiramente melhor com o britador de mandíbulas em relação ao de impacto (diferença de cerca de 3% na recuperação metalúrgica). O minério polimetálico apresentou maior recuperação metalúrgica ao utilizar o britador de impacto, diferença de 5% com o destaque da baixa recuperação do metal ao utilizar o HPGR. Já o minério de ferro não teve diferenças quanto à utilização de distintos equipamentos com a recuperação metalúrgica em torno de 96%. Desse modo, diferentes minérios possuem características físicas distintas ocasionando melhor ou pior liberação mineral a partir de diferentes mecanismos de cominuição.

Uma ressalva deve ser feita. Industrialmente, ao invés de um britador de mandíbulas seria usado um britador cônico. Tendo em vista a não disponibilidade de um britador cônico

em escala laboratorial, o mesmo foi substituído por um britador de mandíbulas. Tal investigação pode ser detalhada em estudos futuros, já que apesar de ambos britadores operarem principalmente pelo mecanismo de compressão, no caso do britador cônico o tempo de residência do material na câmara é maior, com um maior número de eventos de quebra e participação mais intensas de mecanismos de abrasão.

4. CONCLUSÕES

A partir das diferentes amostras analisadas do minério de cobre sulfetado, minério polimetálico e minério de ferro foram possíveis a realização de ensaios com os mecanismos de quebra de cominuição: compressão, impacto e moagem de rolos a alta pressão com o intuito de analisar a resposta para a pré-concentração e de cominuição seletiva.

Os resultados obtidos mostram que o minério de cobre sulfetado quanto o do minério polimetálico tiveram uma ótima resposta quanto à pré-concentração, enquanto que para o minério de ferro o resultado foi inferior. O minério de cobre sulfetado teve uma recuperação mássica de 65% e recuperação metalúrgica de 95,9% do cobre para uma densidade de corte de 2,85 g/cm³. O minério polimetálico teve recuperação mássica de 70% e recuperação metalúrgica de cerca de 90% para o cobre caso a densidade de separação fosse de 2,75 g/cm³. O minério de ferro teve recuperação mássica de 84,7% e recuperação metalúrgica de 96% para o ferro caso a densidade de separação fosse de 2,95 g/cm³. As massas que seriam descartadas (35% para o minério de cobre sulfetado e 30% para o minério polimetálico e de 15% para o minério de ferro) poderiam representar uma economia nas indústrias, uma vez que essa massa não estaria presente nas próximas etapas de cominuição e concentração.

Sob outro ponto de vista, para a mesma instalação de moagem e flotação a produção pode ser aumentada com aproveitamento da escala de produção sobre os custos.

A comparação com diferentes mecanismos de cominuição demonstrou que o britador de mandíbulas se mostrou melhor opção para o material de cobre sulfetado enquanto que o britador de impacto obteve melhor resposta para o minério polimetálico quanto à liberação dos minerais de cobre enquanto que para o minério de ferro não foram obtidas diferenças significativas.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à FAPESP por financiar o projeto, processo 2020/10190-5. À mineração Caraíba, Nexa e a Vale por disponibilizarem o material. Ao CNPq pela bolsa de produtividade DT do orientador, processo 308767/2016-0. Metso pela utilização do HPGR. Ao LCT, Nexa, Caraíba e Vale pelas análises químicas. Ao Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais (LTM) e à sua equipe pela realização de ensaios de britagem e peneiramento.

REFERÊNCIAS

BERGERMAN, M, G. **Ensaios em escala laboratorial para a determinação de susceptibilidade do minério de Aripuanã para a separação por meio denso**. Votorantim Metais e Zinco S.A., 2012. (Relatório Interno).

COSTA, I. A.; ALMEIDA, C. P.; MARQUES C. V. P.; COSTA L. R. C. R.; de JESUS, E. B. Pré-concentração magnética do magnetita-piroxenito da Vanádio de Maracás S/A. 2014. **XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**. Universidade Federal da Bahia, 2014.

ERO COPPER. **Ero Copper announces excellent results from comprehensive ore sorting trial campaign**. Vancouver:British Columbia,2020. Disponível em :
<http://www.ero-copper.com/news/2020/ero-copper-announces-excellent-results-from-comprehensive-ore-sorting-trial-campaign/>

FRANCO, G. S. A.; PEDROSA, F. J. B.; BERGERMAN, M. G. O impacto da pré-concentração gravimétrica de um minério de cobre sulfetado. (UFMG, Ed.) In: **XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Belo Horizonte**. Anais... Belo Horizonte: 2019.

HESSE, M.; POPOV, O.; LIEBERWIRTH, H. Increasing efficiency by selective comminution. **Minerals Engineering**, v. 103–104, p. 112–126, 2017.

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

DIMAS, J. N. ; BERGERMAN, M. G. ; YOUNG, A. S. ; PETTER, C. O. **Pre-concentration potential evaluation for a silicate zinc ore by density and sensor-based sorting methods**. REM: REVISTA ESCOLA DE MINAS , v. 72, p. 335-343, 2019.

MORGAN, P. The impact of a crushing plant upgrade and dms pre-concentration on the processing capability of the Tati Nickel Concentrator.In: BASE METALS CONFERENCE, 2009, Kasane. **Proceedings...** Joanesburgo: SAIMM, 2009. P. 231-244.

NORGATE, T.; HAQUE, N. Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 3, 2010.

NORGATE, T.; HAQUE, N. The greenhouse gas impact of IPCC and ore-sorting technologies. **Minerals Engineering**, v. 42, 2013.

OZCAN, O.; BENZER, H. Comparison of different breakage mechanisms in terms of product particle size distribution and mineral liberation. **Minerals Engineering**, v. 49, 2013.

SORAES, J. F. C. et al. Aplicação do ore sorting no beneficiamento mineral de lítio. (UFMG, Ed.) In: **XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Belo Horizonte**. Anais... Belo Horizonte: 2019.