



COMPARAÇÃO DAS ETAPAS DE FLOTAÇÃO E LIXIVIAÇÃO DE UM MINÉRIO SILICATADO DE ZINCO ENTRE CIRCUITO COM E SEM PRÉ-CONCENTRAÇÃO

SANCHES, J.G.¹, NETO, D.J.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: julia.sanches@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: dimasnetosri@gmail.com

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 inserção da pré-concentração em um circuito visa descartar previamente materiais com pouco ou nada do mineral desejado antes mesmo da entrada do material como ROM. A prática gera ganhos nos circuitos como ganho de teor de entrada da alimentação, recusa de material considerado rejeito ainda grosso e queda no consumo energético caso o rejeito tenha maior WI que o concentrado. Com isso, analisou-se as vantagens e desvantagens da inserção desse método com uma amostra constituída de willemita. Para fazer a comparação, realizou-se ensaios em dois circuitos: um com pré-concentração realizada por jigue com material grosso (-12,7 +1,18 mm) e um de forma tal qual. O ensaio de pré-concentração descartou cerca de 47% de massa possuindo teor de zinco de 3,6% e 72% de MgO que é o principal contaminante do circuito. A flotação aumentou a recuperação de 93,4% para 96,5% da trajetória sem jigagem para a com jigagem e aumentou também a porcentagem mássica do material a continuar no processo de 40,6% para 63,9%, consumindo 18% menos do coletor amida por metal contido. A realização da autoclave mostrou um melhor descarte de magnésio e a lixiviação ácida teve vantagens físicas, como a diminuição na espumação.

PALAVRAS-CHAVE: Jigue, flotação, lixiviação, zinco, pré-concentração.

ABSTRACT

The insertion of the preconcentration in a circuit aims at pre-discarding materials with low or no mineral of interest even before the input of the material as concentrator feed. The practice generates gains in the circuits as increase in the input content of the feed, refusal of material considered reject still coarse and decrease in the energy consumption if the waste has higher WI than the concentrate. Thus, the advantages and disadvantages of the insertion of this method in a silicate zinc ore treatment circuit constituted by willemita were analyzed. In order to make the comparison, tests were carried out in two circuits: one with preconcentration performed by jigging with thick material (-12.7 +1.18 mm) and one as such. The preconcentration test discarded about 47% mass having zinc content of 3.6% and 72% MgO which is the main contaminant in the circuit. The flotation increased the recovery from 93.4% to 96.5% of the trajectory without jigging for the jigagem and also increased the concentrate mass from 40.6% to 63.9%, consuming 18% less of the metal amide collector contained. Autoclave assays showed better MgO disposal and acid leaching had physical advantages, such as decreased foaming.

KEYWORDS: Jig, flotation, leaching, zinc, preconcentration

1. INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos e a exploração mineral em expansão, há uma comprovada diminuição do teor dos minérios além da crescente complexidade mineralógica que tem por consequência alta diluição dos minerais e um grau de liberação menor. Como alternativa à crescente complexidade dos circuitos de cominuição e uma tentativa de frear o crescimento de seus custos, tem-se a pré-concentração. Trata-se de ensaios que visam a eliminação de parte do material a ser descartado, porém ainda grosso e antes de entrar na usina de cominuição. São eliminadas as parcelas de ganga liberadas ou quase liberadas que contenham nenhuma ou baixas quantidades do metal de objetivo. Estas técnicas podem aumentar a produção e a queda dos custos e proporcionar a viabilidade de circuitos que sem ela seriam inviáveis. As consequências se estendem às posterioridades do circuito como, por exemplo, queda de consumo energético, nos casos em que a ganga apresenta WI maior que o concentrado e queda do desgaste por abrasão em revestimento de moinhos, por exemplo, se o rejeito possuir AI maior que o concentrado.

Segundo MARTINS (2012), a planta metalúrgica de Zinco de Três Marias – MG passou a ter dificuldades com a espumação da lixiviação ácida a partir de meados de 2007 devido à mudança do minério da mina de Vazante – MG. O aumento na quantidade de carbonatos e magnésio no minério fez com que alternativas fossem buscadas na planta de beneficiamento, como a flotação de carbonatos e pré-concentração por meio denso e ore sorter.

Apesar dos crescentes estudos da pré-concentração, esta técnica não é recente e já conta com técnicas consolidadas de separação de partículas grossas. Os métodos que podem ser citados como largamente usados são: separação por meio denso, ore sorting, jigagem e separação magnética.

Com isto, o presente trabalho visa avaliar os impactos de ensaios de pré-concentração por meio de jigagem em um minério silicatado de zinco e suas consequências nas etapas posteriores de processo que são a flotação e a lixiviação.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Foi coletada uma amostra do circuito de britagem da Nexa Resources de minério silicatado de zinco com uma granulometria passante em $\frac{1}{2}$ polegada e utilizou-se 73 Kg para o projeto. Parte passou por análise granuloquímica para averiguar se havia diferenças significativas de teores entre as malhas, parte foi usada em circuito comum como amostra tal qual e parte foi preparada para passar pela etapa de jigagem com a retirada dos finos abaixo de 1,18 mm.

O circuito é representado na Figura 1 e mostra o circuito que os ensaios seguiram para serem realizados tanto da amostra pré-concentrada quanto da tal qual que é a parcela que não passou pela jigagem.

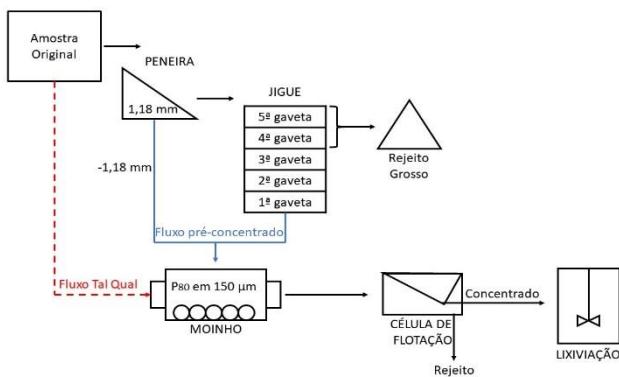


Figura 1. Fluxograma do processo utilizado nos ensaios.

Fonte: Elaboração Própria

O jigue é um equipamento que não admite frações finas, portanto foi feito um peneiramento em malha 1,18 mm e este by-pass foi posteriormente acrescentado ao concentrado da pré-concentração. O equipamento utilizado na jigagem foi um jigue de estratificação semi-piloto (All Mineral Minijig) fabricado pela All jig que pode ser observado na Figura 2.



Figura 2. Jigue utilizado nos testes com identificação das gavetas.

Fonte: SANCHES, J. G. et al, 2018.

Após as análises químicas utilizou-se as gavetas de 1 a 3 como concentrado juntamente com o fino retirado antes da pré-concentração. O material foi britado, homogeneizado e separado em alíquotas de 857 g, ideais para a moagem e a flotação, igualmente a amostra tal qual.

As moagens foram realizadas a úmido com 60% de sólidos e com 88% passante em 150 μm. Após a moagem foi realizada a flotação em bancada com uma célula Denver modelo 533000. A rotação da célula foi mantida em 1.600 RPM e a vazão de ar foi aberta em sua totalidade. Utilizou-se sulfeto de sódio como regulador de pH e sulfetizante, AGLP como dispersante, amina (heteramina) como coletor de Zn₂SiO₄ e MIBICOL como espumante.

Porém, como o material pré-concentrado não possui o mesmo teor do mineral de interesse que o material tal qual, deve-se regular a quantidade de reagentes. Fez-se testes com três alterações da quantidade do coletor Amina como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Dosagens de Amina utilizadas do ensaio de otimização do Coletor.

Ensaio	Dosagem de coletor amina (g/t)		
	Rougher	Scavenger I	Scavenger II
All (padrão)	70	31	31
All (intermediária)	92	41	41
All (Alta)	114	51	51

Fonte: SANCHES, J. G. et al, 2018.

A Tabela 2 traz as condições utilizadas nos sete ensaios de flotação de cada tipo de amostra, os tempos de condicionamento e as diferenças entre os ensaios das amostras pré-concentradas e das amostras Tal Qual. A flotação da willemita foi realizada com uma etapa rougher e duas scavengers.

Tabela 2. Parâmetros utilizados na Flotação.

Etapa	Procedimento	Condicionamento (min)
<i>Rougher</i>	Ajuste de pH para 10,5 com Sulfeto de Sódio	
	Dosagem de 320 g/t de AGLP	3
	Dosagem de Amina. 70 g/t na tal qual e 92 g/t na Pré-concentrada	
	Dosagem de MIBICOL 24 g/t	2
Flotação por 2 min		
<i>Scavenger 1</i>	Ajuste de pH para 10,5 com Sulfeto de Sódio	
	Dosagem de 80 g/t de AGLP	3
	Dosagem de Amina. 31 g/t na tal qual e 41 g/t na Pré-concentrada	
	Dosagem de MIBICOL 17 g/t	2
Flotação por 2 min		
<i>Scavenger 2</i>	Ajuste de pH para 10,5 com Sulfeto de Sódio	
	Dosagem de Amina. 31 g/t na tal qual e 41 g/t na Pré-concentrada	
	Dosagem de MIBICOL 17 g/t	2
	Flotação por 2 min	

Fonte: SANCHES, J. G. et al, 2018.

Os produtos foram secos, pesados, homogeneizados e separados em novas alíquotas a serem enviadas para a lixiviação. Os ensaios de lixiviação foram realizados no Laboratório da Nexa Resources na unidade de Três Marias – MG com o objetivo de acompanhar os parâmetros considerados importantes pela empresa como comparativo entre as amostras.

Devido ao transporte de São Paulo até Minas Gerais e o intervalo de cerca de um mês entre os ensaios de flotação e de lixiviação, o processo não pôde ser realizado da forma mais fiel possível ao roteiro da empresa. O produto da flotação deveria seguir úmido até a autoclave no processo usado em Três Marias, porém secou-se o material após a flotação e foi repolpado na realização da sequência dos ensaios.

A etapa de autoclave, anteriormente à lixiviação ácida, ocorre para que haja a lixiviação do magnésio presente na amostra. O equipamento mostrado na Figura 3 trabalha em altas temperaturas e pressão e, para que ocorra a lixiviação seletiva, o pH se mantém entre 4,5 e 5,5 a fim de solubilizar o magnésio de $MgCO_3$ sólido para $MgSO_4$ líquido.



Figura 3 Autoclave utilizada na Unidade de Três Marias – MG da Nexa Resources

Fonte: Arquivo Pessoal

A solução proveniente do ensaio de autoclave é então filtrada e a torta úmida é enviada para o ensaio de lixiviação ácida, ou seja, a etapa de recuperação do zinco. A solução de ataque utilizada para fazer o repolpamento entre estas duas lixiviações é uma solução exaurida de zinco proveniente das eletrólises com o acréscimo de ácido sulfúrico.

A segunda lixiviação solubiliza o zinco contido sob a forma de sulfato de zinco e deve ser iniciada de forma branda para controle das fortes reações do ácido com os carbonatos restantes e controle na formação de sílica gel. A polpa formada por produto de autoclave com solução de ataque possui duas horas de residência, para que a recuperação do zinco metálico aconteça, com controle de temperatura entre 75 e 80°C. Nesta etapa foram analisadas as propriedades visuais na lixiviação e, posteriormente, foram feitas algumas análises químicas com estes materiais.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os números da análise granuloquímica mostraram que não há diferenças significativas entre as faixas, deixando evidente que a granulometria da amostra não causa viés nos resultados posteriores. Na tabela 4 estão presentes os resultados do ensaio de pré-concentração de jigagem.

Tabela 4. Análise química da jigagem.

Produto	Massa (kg)	Massa (%)	Teores					Distribuição (%)				
			Zn (%)	Pb (%)	Fe (%)	CaO (%)	MgO (%)	Zn	Pb	Fe	CaO	MgO
1 ^a gaveta	12,00	27,47	46,02	0,31	5,52	3,66	2,41	65,20	32,70	49,72	5,55	5,30
2 ^a gaveta	8,88	20,33	17,41	0,27	2,98	19,09	12,56	18,25	21,00	19,85	21,40	20,44
3 ^a gaveta	8,18	18,73	3,78	0,23	1,80	26,77	19,45	3,65	16,48	11,05	27,64	29,16
4 ^a gaveta	7,96	18,22	3,81	0,21	1,44	27,00	19,05	3,58	14,64	8,60	27,13	27,79
5 ^a gaveta	2,64	6,04	2,39	0,20	0,91	28,63	16,96	0,74	4,62	1,80	9,54	8,21
Total jigue calculado*	39,66	90,80	19,53	0,26	3,06	18,23	12,50	91,42	89,44	91,01	91,25	90,89
Total jigue analisado**			19,17	0,29	2,77	17,50	12,28					
Cabeça jigue***			19,07	2,79	0,30	17,48	12,29					
Pre-concentrado (G1+G2)	20,88	47,80	33,85	0,29	4,44	10,22	6,73	83,45	53,70	69,57	26,94	25,74
Rejeito (G3+G4+G5)	18,78	42,99	3,60	0,22	1,52	27,13	18,93	7,98	35,74	21,45	64,31	65,16
By pass (1,18mm)	4,02	9,20	18,07	0,30	2,98	17,24	12,36	8,58	10,56	8,99	8,75	9,11
Pré-concentrado + By-pass	24,90		31,30	0,29	4,21	11,36	7,64	92,02	64,26	78,55	35,69	34,84
Total calculado*	43,68	100,00	19,39	0,26	3,05	18,14	12,49	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Cabeça***			19,73	0,27	2,90	16,34	11,90					

* Calculado a partir da média ponderada de cada gaveta

** Extraído da química por faixa (Total calculado sem -1,18)

*** Cabeça (Total calculado extraído da química por faixa)

Fonte: SANCHES, J. G. et al, 2018.

O produto considerado como concentrado nesta etapa foi formado pelas gavetas 1 e 2 somadas com o fino peneirado em etapa anterior. O descarte mássico no rejeito da pré-concentração foi de aproximadamente 47% possuindo um teor de zinco de 3,6% e de magnésio, principal contaminante da amostra para etapas posteriores, de 72%. A recuperação observada na jigagem do zinco foi de 91% da alimentação do equipamento e de 83% quando considerado todo o material deste circuito. Com o acréscimo do by-pass, a recuperação passou a ser de 92% com teor de zinco de 31,29%, sendo que o alimentado na pré-concentração era de cerca de 19%.

Passando para a etapa posterior de flotação, necessita-se do aumento de coletor quando se considera o aumento do teor do mineral de interesse.

A dosagem intermediária foi a mais ideal entre as três realizadas. Isto porque a dosagem padrão faz com que mais de 40% do zinco vá para o rejeito afundado e na dosagem

mais alta (AIII), há uma contaminação de magnésio no concentrado, ou seja, 77% em massa de MgO segue no flotado. Com isto, a condição AII, intermediária, é a que mais se aproxima do ideal de recuperação.

Assim, foram realizados os 7 ensaios de flotação com a amostra tal qual e os 7 ensaios com a amostra pré-concentrada e os resultados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Resultados ensaios de flotação

Produto	Massa (g)	Massa (%)	FLOTAÇÃO TAL QUAL MÉDIA (n = 7 ensaios)					Recuperação (%)				
			Zn	Pb	Fe	CaO	MgO	Zn	Pb	Fe	CaO	MgO
Concentrado acum. (rg + sc 1 + sc 2)	349,57	40,75	43,60	0,28	2,68	3,76	3,21	93,18	43,78	37,46	8,64	10,26
Rejeito	508,27	59,25	2,19	0,24	3,08	27,38	19,33	6,82	56,22	62,54	91,36	89,74
Alim. Calculada	857,85	100,00	19,07	0,26	2,92	17,75	12,76	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Alim. Analisada*			19,29	0,26	2,93	17,48	12,61					
FLOTAÇÃO PRÉ-CONCENTRADA MÉDIA (n = 7 ensaios)												
Concentrado acum. (rg + sc 1 + sc 2)	562,36	65,54	44,43	0,29	3,49	4,01	3,68	97,40	66,16	54,94	21,74	28,78
Rejeito	295,65	34,46	2,26	0,28	5,45	27,50	17,34	2,60	33,79	45,04	78,43	71,18
Alim. Calculada	858,01	100,00	29,90	0,29	4,17	12,08	8,39	100,0	100,0	100,0	100,2	100,0
Alim. Analisada**			30,36	0,30	4,18	11,36	8,10					

* Cabeça (Total calculado extraído da química por faixa)

** Pré-concentrado + by pass

Fonte: Elaboração própria

Quando comparamos a flotação dos caminhos distintos, observa-se que a amostra pré-concentrada teve uma recuperação global de zinco maior, passando de 93,4% da tal qual para 96,5%. Os teores dos carbonatos presentes no concentrado, ou seja, as gangas, foram por volta de 3 a 4% tanto para MgO quanto para CaO. A porcentagem em massa do concentrado aumentou de 40,6% na amostra tal qual para 63,9% na amostra que passou pelo processo de jigagem. Com este último dado podemos observar que pode haver um aumento na produção sem alterar os equipamentos e dimensionamentos do circuito de beneficiamento até a etapa de flotação.

Contudo, para que a flotação da amostra do circuito com pré-concentração fosse eficiente, aumentou-se a dosagem de amina que é o coletor da flotação do silicatado de zinco. Para que houvesse análise deste aumento de reagente, fez-se um comparativo da dosagem de amina por tonelada de zinco contido no final da flotação. Os números encontrados foram compilados e estão presentes na Figura 4 em forma de gráfico comparativo entre as etapas e os circuitos.

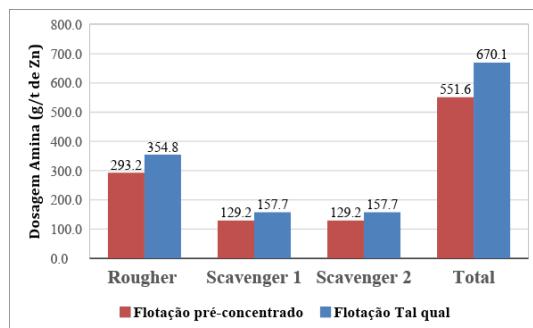


Figura 4 Consumo de amina por tonelada de zinco contido nas flotações

Fonte: SANCHES, J. G. et al, 2018.

Esse gráfico deixa claro que, quando observamos a eficiência do ensaio, a dosagem de amina diminui do circuito comum para o circuito com pré-concentração. Isto está ligado ao fato de uma maior recuperação global do zinco para tal circuito.

Os ensaios de autoclave e de lixiviação ácida geraram diferenças físicas e químicas entre os dois circuitos. Os resultados do ensaio de autoclave estão presentes na Tabela 7.

Tabela 7. Resultados ensaios de lixiviação ácida

AMOSTRA	Autoclave	Zn (%)	CaO (%)	MgO (%)	SiO ₂ (%)	Fe (%)	Pb (%)
Tal Qual	Entrada	43,15	5,53	2,35	22,38	2,30	0,44
	Saída	44,90	4,51	1,67	18,82	1,86	0,39
Pré-concentrada	Entrada	44,58	4,57	1,91	23,40	3,12	0,46
	Saída	46,47	3,59	0,75	19,69	2,47	0,39

Fonte: Relatório interno de ensaios Nexa Resources unidade Três Marias

As análises químicas presentes na Tabela 7 mostraram que há uma otimização na diminuição do MgO com a amostra pré-concentrada quando comparada com a Tal Qual.

As diferenças físicas podem ser observadas na Figura 5 que contém à esquerda a amostra tal qual passando pelo ensaio de lixiviação ácida e à direita a amostra pré-concentrada.



Figura 5 Consumo de amina por tonelada de zinco contido nas flotações

Fonte: Arquivo pessoal.

Observa-se a diferença de cor e de espumação entre as amostras. A espumação pode ser explicada pelos resultados químicos presentes na Tabela 8.

Tabela 8. Resultados ensaios de lixiviação ácida

AMOSTRA	Filtrado autoclave (g/l)	Filtrado Primário (g/l)	Rendimento Autoclave (% Zn)	Rendimento Lixiviação (% Zn)
Tal Qual	1,39	155,8	49,20	99,24
Pré-concentrada	2,5	202,0	53,26	99,22

Fonte: Relatório interno de ensaios Nexa Resources unidade Três Marias

Para a etapa de autoclave a amostra que passou pela etapa de jigagem teve boa sedimentação e filtragem nos processos. Entretanto, para os resultados de lixiviação ácida não ocorreram diferenças significativas nas análises químicas, apenas as diferenças físicas observadas na Figura 5.

4. CONCLUSÕES

Observando os resultados do ensaio de jigagem e das etapas posteriores do circuito, este método de pré-concentração se mostrou eficaz para o minério de zinco silicatado. Já na primeira etapa do circuito, no jigue, foi descartada aproximadamente 47% da massa alimentada no equipamento com apenas 3,6% de zinco e nos 53% restantes foram recuperados 91% do mineral de interesse.

A flotação da rota com pré-concentração teve aumento na recuperação global do zinco de 93,4% para 96,5% e queda na quantidade do reagente coletor por tonelada de zinco

contido em quase 18%. O ensaio de autoclave teve maior redução de magnésio na amostra pré-concentrada, gerando diferenças físicas na etapa posterior de lixiviação ácida.

Os resultados indicam uma vantagem na realização da pré-concentração nas duas etapas analisadas. Isso pode causar diminuição na quantidade de rejeitos da flotação tendo a mesma recuperação. Já na lixiviação, o circuito pré-concentrado gera menos espuma, podendo diminuir a quantidade de solução de ataque utilizada que é consumida pela espumação excessiva. Item obrigatório.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Nexa Resources pela doação das amostras, realização das análises químicas, dos ensaios de lixiviação e pela bolsa de estudos do terceiro autor no Projeto Inova Talentos com agradecimentos também ao CNPq. Ao IPT - USP pela realização dos ensaios de jigagem e ao LTM da EPUSP pela realização dos ensaios de britagem, moagem e flotação e a Pró-reitoria de Graduação da USP pela bolsa de IC do autor principal. Por fim, agradecemos ao Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da USP pelo apoio financeiro para que os autores participassem do evento.

6. REFERÊNCIAS

- BERGERMAN, M., 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, 2014.
- BAMBER, A S. Integrated mining, pre-concentration and waste disposal systems for the increased sustainability of hard rock metal mining. 2008. 331p. Tese (Doutorado) - The Faculty of Graduate Studies (Mining Engineering), University of British Columbia, Vancouver, 2008.
- CRESWELL, G. M. Pre-concentration of base metal ores by dense medium separation. In: SAIMM cooper, cobalt, nickel and zinc recovery conference, Proceedings of the Johannesburg: SAIMM, 2001.
- GRIGG, N. J.; DELEMONTTEX, 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.cecthefuture.org/wp-content/uploads/2015/06/IMPC-2014-Pre-concentration-Paper-Revision-CEEC-150825.pdf>.
- GRIGG, N. Implementing Eco-Efficient Comminution Strategies, In: 8TH INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING SEMINAR. Proceedings of the Santiago: 8th IMPS, 2011.
- MURPHY, B; VAN ZYL, J; DOMINGO, G. Underground Preconcentration by Ore Sorting and Coarse Gravity Separation. In: NARROW VEIN MINING CONFERENCE. Proceedings of the Perth: NVMC, 2012.
- 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.