

# AVALIAÇÃO DA FLOTAÇÃO EM CIRCUITOS DE CONCENTRAÇÃO MINERAL DE ZINCO E CHUMBO ALIMENTADOS COM PRODUTOS DE PRÉ- CONCENTRAÇÃO\*

*Alberto Leite de Freitas Neto<sup>1</sup>  
Dimas José Neto<sup>2</sup>  
Daniela Gomes Horta<sup>3</sup>  
Maurício Guimarães Bergerman<sup>4</sup>*

## Resumo

O uso de operações mais complexas de concentração na indústria mineral tem crescido em função da queda dos teores e maior complexidade dos minérios disponíveis. Uma alternativa para enfrentar a alta dos custos do beneficiamento mineral é a pré-concentração, usando-se separação magnética, gravimétrica e com sensores de alta tecnologia (ore sorting). Com isso, descarta-se, antes da alimentação da usina de beneficiamento, quantidade significativa de massa com pouca ou nenhuma quantidade do mineral de interesse, reduzindo assim a massa a ser processada nas operações seguintes e a demanda por disposição de rejeitos finos em barragens. Poucos estudos avaliaram, no entanto, a influência nas operações de cominuição e flotação da exclusão da ganga por operações de pré-concentração. O presente projeto de pesquisa avaliou o impacto da pré-concentração na flotação do minério de chumbo e zinco da Mina de Vazante, da NexaResources. Os resultados dos ensaios de separação em líquido denso indicaram que existe um grande potencial de descarte de um rejeito grosseiro com baixa perda de metal na etapa de pré-concentração, com a obtenção de um concentrado com apenas 40% da massa e 81% do zinco da amostra. A flotação após a pré-concentração apresenta resultados mais satisfatórios em termos de teor de zinco (aumento de 3,5%) e recuperação metalúrgica (aumento de 0,8%), além de um menor teor de contaminantes, com destaque para o magnésio, que é um limitante para o processo metalúrgico.

**Palavras-chave:** Pré-concentração, zinco, flotação.

## FLOTATION ASSESSMENT IN ZINC AND LEAD CONCENTRATION CIRCUITS FED WITH PRE-CONCENTRATION PRODUCT

### Abstract

The use of more complex ore concentration operations has grown in the mining industry in the wake of lower grades and increasing complexity of available ores. An alternative to coping with rising costs at ore dressing plants is pre-concentration through magnetic and gravimetric segregation and the use of high-tech sensors (ore sorting). This approach allows disposing a significant amount of mass with little or no mineral of interest prior to feeding into the processing plant. The outcome is a reduced mass to be processed in downstream operations and lower disposal of fine tailings into dams. However, few studies have evaluated the effect of removing the gangue through pre-concentration on the comminution and flotation operations. This research project assessed the impact of pre-concentration on the flotation of lead and zinc ore at Nexa Resources' Vazante Mine. The results of separation tests in dense liquid indicated a great potential for the disposal of coarse tailings with little loss of metal in the pre-concentration stage, resulting in a concentrate with 40%

mass recovery and a zinc content corresponding to 81% of the sample's zinc content. Carrying out the flotation process after the pre-concentration step delivered more satisfactory results in terms of zinc content (3.5% increase) and metallurgical recovery (0.8% increase), not to mention a lower contaminant content, especially magnesium, which is a limiting factor in the metallurgical process.

**Keywords:** Pre-concentration; zinc; flotation.

- <sup>1</sup> *Eng. De Minas, estudante de graduação, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP e Brasil.*
- <sup>2</sup> *Eng. De Minas, estudante de mestrado, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP e Brasil.*
- <sup>3</sup> *Química, Doutora, Professor, Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Alfenas, São Paulo, MG e Brasil.*
- <sup>4</sup> *Eng. De Minas, Doutor, Professor, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP e Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

O uso de operações de concentração de minerais na indústria mineral tem crescido e ficado mais desafiador, em função da queda dos teores e maior complexidade dos minérios disponíveis. Uma alternativa para enfrentar a alta dos custos com a instalação e operação de usinas de beneficiamento mineral é a utilização de etapas de pré-concentração. Para tal fim, podem ser utilizadas diversas tecnologias de beneficiamento mineral, como a separação magnética, densitária e as separações utilizando-se sensores de alta tecnologia (*ore sorting*). Tais operações são conduzidas em um fluxo mais grosseiro, normalmente após britagem secundária ou terciária [1].

Com o uso destas tecnologias, descarta-se, antes da alimentação da usina de beneficiamento, uma fração com pouca ou nenhuma quantidade do mineral de interesse, reduzindo assim a massa a ser processada nas operações seguintes. Isso permite a redução de custos de capital e operacionais, além de minimizar o impacto ambiental dos projetos. Existe ainda uma contribuição com o aumento da produção de metal contido de uma usina sem necessidade de se recorrer a extensão da capacidade de moagem ou flotação ou ainda com o aumento da vida útil da mina, devido à redução do teor de corte. Ressalta-se a possibilidade de se dispor o rejeito grosseiro gerado na pré-concentração em pilhas, dispensando o uso de barragens [1].

Klein et al. [2] preveem uma economia aproximada de 20% no consumo total de energia de projetos que utilizem etapas de pré-concentração. Esta tecnologia já vem sendo amplamente aplicada nas minas de sulfetos como cobre, níquel, chumbo e zinco na África, América do Norte e Austrália. Namina Tati Níquel Phoenix Mine [3], localizada em Botswana, por exemplo, houve a instalação de uma etapa de britagem e pré-concentração com ciclones de meio denso (DMS) com capacidade para 1.600 t/h, processando material entre 25 mm e 1 mm. Esta instalação permitiu o descarte de 60% do minério proveniente da mina. Devido à mudança nas características de alimentação do circuito de moagem, com utilização da pré-concentração, e um ganho adicional foi obtido com o aumento da capacidade do circuito de moagem em 40%, para 650 t/h. Para subsidiar a instalação desta operação industrial, foram realizados ensaios de separação em meio denso em escala laboratorial e foi operada uma planta piloto com capacidade para 200 t/h nas instalações da Mintek, na África do Sul. Dados da operação industrial de Tati indicam que atualmente o minério com teor acima de 0,56% de níquel é alimentado diretamente no circuito de moagem e flotação. O material que alimenta a planta de DMS apresenta um teor de 0,31 a 0,37%. Após o peneiramento e segregação da fração abaixo de 1 mm, este teor cai para 0,27 a 0,32% de níquel. O concentrado da planta de DMS apresenta um teor entre 0,41 a 0,50% de níquel e o rejeito entre 0,07 e 0,09% de níquel [4].

Fourie et al. [5] apresentaram o resultado da avaliação do uso do DMS na mina RoshPinahZinc Corporation na Namíbia. Foi avaliada a pré-concentração de minério proveniente de uma mina subterrânea, britado e classificado entre 32 e 16 mm, com um teor de zinco de aproximadamente 3%. O concentrado atingiu 9% de zinco. Para uma densidade de 2,85 t/m<sup>3</sup>, foram obtidas recuperações metalúrgicas da ordem de 90%, com uma recuperação em massa de 30%. O uso da tecnologia de pré-concentração com *ore sorters* com sensores de raios x também está sendo avaliada.

O plano da empresa é instalar a pré-concentração em subsolo, evitando assim o transporte do material já descartado na superfície.

Cresswell[6]mencionao grande potencial de aplicação desta tecnologia e ilustra uma série de resultados positivos em minas da África, México e China. O autor reportourecuperações metalúrgicas da ordem de 90 a 95% dos metais de interesse com o descarte de 15 a 30% da massa que alimentaria a usina.

No Brasil, a tecnologia de pré-concentração ainda é pouco utilizada. A mina de Vanádio da Largo Resources, em Maracás/BA, utiliza um estágio de pré-concentração com separadores magnéticos. A Mina de Nióbio da CMOC (antiga Anglo American), em Catalão/GO, está implantando tal circuito, também com o uso de separação magnética. Diversas outras minerações têm avaliado o uso da opção de pré-concentração. Avaliações em escala laboratorial para diferentes minérios sulfetados de cobre, níquel, zinco e chumbo ilustram ganhos significativos em termos do aumento de teor com altas recuperações metalúrgicas.É reportada a possibilidade de descarte de aproximadamente 50% da massa como rejeito que retém menos que 10% do metal total dos minérios que constituem a alimentação do ensaio [7-9].

Além dos ganhos citados acima com o uso da pré-concentração, outros ganhos são esperados, como a redução do consumo de energia edesgaste dos circuitos de moagem,bem comomelhorias na etapa de flotação. Estudos realizados por Bergerman et al. [10]; Uehara et al. [11], Peres et al. [12] eMorreira et al. [13] em amostras de minérios sulfetados indicam a redução do *work index* (WI) e índice de abrasividade (medido pelo AI de Bond) no produto da pré-concentração.

Com a introdução de operações de pré-concentração anterior à flotação espera-se um aumento do desempenho da última acompanhado pela redução de custo operacional. O aumento do desempenho da flotação pode ser relacionado à redução do teor de ganga e à diminuição de variações de teor da alimentação [4,14]. De acordo com Denysschen e Wagner [4], minérios com diferentes teores apresentam diferentes composições mineralógicas que requerem diferentes condições de flotação para obtenção das especificações de teor e recuperação metalúrgica. Segundo Grigg e Delemontex[14], a pré-concentração pode beneficiar a flotação devido à redução da quantidade de minerais de ganga que podem ser prejudiciais à mesma.A redução de custo pode estar associada a: redução de dosagem de reagentes, que podem ocorrer em alguns casos e simplificação do circuito com possível redução de número de equipamentos que operam nas etapas de limpeza *cleaner* e *scavenger*.

No entanto, poucos trabalhos disponíveis na literatura avaliaram o impacto da pré-concentração na flotação comparando o desempenho desta técnica quando alimentada com minério proveniente do ROM e com produto de pré-concentração [4,15]. Denysschenand Wagner [4] reportam que a introdução de uma etapa de pré-concentração em uma planta industrial de beneficiamento de níquel em Botswana aumentou em 45 % a capacidade das operações de moagem e flotação.

Onal et al. [15] avaliaram o efeito da pré-concentração de minério oxidado de zinco e chumbo no desempenho da flotação. O teor de chumbo no concentrado foi o mesmo

para a flotação como única técnica de concentração e para a flotação antecedida de pré-concentração (65,4-65,8%). A recuperação metalúrgica de chumbo aumentou de 77% para 86,5% quando a pré-concentração foi adicionada à estratégia de concentração. Kumar et al. [16] avaliaram a possibilidade de concentração do rejeito da planta de beneficiamento de cromo de Tata Steel que contem 17% de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Os resultados indicaram a possibilidade de se aumentar o teor do rejeito para 22 a 23% de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  utilizando o equipamento Floatexdensityseparator com 83% de recuperação em massa. Os autores sugerem a possibilidade do uso de flotação para a concentração final do minério e adequação do teor de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  às especificações de mercado. No entanto, ensaios de flotação não foram realizados.

Ramalli Neto et al. [17] ilustram os impactos do uso da pré-concentração em uma operação de flotação de cobre sulfetado. Os resultados indicaram que a amostra pré-concentrada produziu menor massa de rejeitos e um teor de concentrado final mais elevado.

O presente projeto de pesquisa avaliou o impacto da pré-concentração na flotação do minério de chumbo e zinco da Mina de Vazante, da NexaResources.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Materiais e métodos

Os ensaios foram realizados com uma amostra de minério de chumbo (principalmente galena) e zinco (principalmente willemita) proveniente alimentação da Usina W, da mina de Vazante, da empresa NexaResources, recebidos com uma granulometria abaixo de 12,7 mm. Inicialmente foi retirada uma alíquota para realização de análise química na amostra tal qual, por faixa granulométrica e realização de um ensaio de separação em líquido denso com a amostra tal qual recebida, para avaliar o potencial de pré-concentração por métodos densitários. A separação foi feita nas densidades de corte de 2,75, 2,85 e 2,95  $\text{g}/\text{cm}^3$  com o material entre 12,7 e 1,18 mm.

O restante da amostra recebida foi dividido em duas alíquotas com as quais foram realizados testes de flotação com e sem pré-concentração previa. Visando simular a operação de pré-concentração com uma das amostras, foram realizados ensaios de concentração utilizando um jigge da Allmineral modelo Alljig<sup>®</sup>, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. O equipamento foi configurado com sua válvula de ar e pressão abertas respectivamente em 50% e 60 % das suas capacidades. A rotação do motor foi estipulada em 74 rpm durante a operação que teve duração de 30 minutos. Foi processada no jigge a fração +1,18 mm. Na sequência, o concentrado da jigagem foi recomposto com o material -1,18 mm e preparado para os ensaios de flotação.

Em seguidas, foram determinados os tempos de moagens para as amostras com e sem pré-concentração. O moinho utilizado possui 8” de diâmetro interno e 10” de comprimento. A velocidade de trabalho foi de 66 rpm (70% da velocidade crítica), a porcentagem de sólidos de 60%, e a carga de bolas utilizada é descrita na Tabela 1.

**Tabela 1.** Carga de bolas utilizada na moagem

Diâmetro (mm)	Quantidade
40	16
30	31
25	33
20	47
Total = 127 bolas	

Os ensaios de flotação, divididos em uma etapa de flotação do chumbo e prata e outra etapa de flotação do zinco, foram realizados em uma célula mecânica de flotação convencional da Denver, com uma cuba com capacidade de 2 L. Foi utilizada a rotação de 1700 rpm, a cuba foi alimentada com 857g do minério com um P<sub>88</sub> de 100# Tyler e 30% de sólidos. Foram realizados três ensaios para cada amostra, com e sem a pré-concentração, totalizando seis ensaios de flotação.

As principais condições e reagentes utilizados foram:

**- flotação bulk de Pb/Ag:**

- condicionamento por 3 minutos com o regulador de pH e ativador sulfeto de sódio (Tianjin), que foi adicionado até se chegar a um pH de 9,5, com uma dosagem aproximada de 200 g/t, dispersante silicato de sódio (Diatom) [650 g/t] em pH de 9,5;
- condicionamento por 4 minutos com o coletor PAX (Flomin) [160 g/t] e o espumante MIBICOL (Solvey) [20 g/t];
- flotação *rougher* por 2 minutos;
- condicionamento por 4 minutos com PAX (Flomin) [46 g/t] e MIBICOL [12 g/t]
- flotação *scavenger* 01 por 2 minutos;
- condicionamento por 4 minutos com PAX (Flomin) [46 g/t] e MIBICOL [12 g/t].
- flotação *scavenger* 02 por 2 minutos.

**- flotação de Zn:**

- condicionamento por 3 minutos com o regulador de pH e ativador sulfeto de sódio (Tianjin) [1.034 g/t], dispersante AGLP 250 (Ag Indústria) [320 g/t] em pH de 10,5;
- condicionamento por 2 minutos com o coletor amina (F100 Tomamine, Air Products) [70 g/t] e o espumante MIBICOL (Solvey) [26 g/t];
- flotação *rougher* por 2 minutos;
- condicionamento por 3 minutos com sulfeto de sódio (fornecedor Tianjin) [222 g/t] e AGLP [77 g/t]
- condicionamento por 2 minutos com amina (F100 Tomamine, Air Products) [31 g/t] e MIBICOL (Solvey) [12 g/t]
- flotação *scavenger* 01 por 2 minutos;
- condicionamento por 3 minutos com sulfeto de sódio (Tianjin) [185 g/t].
- condicionamento por 2 minutos com amina (F100 Tomamine, Air Products) [31 g/t] e MIBICOL (Solvey) [12 g/t]
- flotação *scavenger* 02 por 2 minutos;

Destaca-se que o pH foi ajustado apenas nas etapas *rougher*. Todos os produtos obtidos na separação em líquido denso e na flotação foram analisados no laboratório

da NexaResources de Vazante, para determinação de zinco, chumbo, prata e magnésio pelo método de absorção atômica.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Tabelas 2 e 3 apresentam os resultados da análise química da amostra de alimentação dos ensaios de concentração e da química por faixa. Na Tabela 4 são apresentados os resultados da separação em líquido denso.

**Tabela 2.** Análise química da amostra utilizada nos ensaios

Amostra	Zn (%)	Pb (%)	Ag (ppm)	MgO (%)
Usicon W	18,24	0,59	26,95	12,38

**Tabela 3.** Análise química por faixa granulométrica

Fração (mm)	Massa (%)		Teores (%)				Distribuição no ensaio (%)			
	Retido	Passante Acumulado	Zn	Fe	Pb	MgO	Zn	Fe	Pb	MgO
+9,5	16,00	84,00	6,31	6,14	0,22	8,38	6,42	15,41	7,67	20,87
-9,5+6,35	27,30	56,70	17,26	5,88	0,49	6,12	29,96	25,18	29,16	26,01
-6,35+4,75	11,69	45,01	19,66	5,5	0,54	5,81	14,61	10,08	13,75	10,57
-4,75+2,35	19,99	25,02	18,77	6,78	0,53	6,03	23,86	21,26	23,09	18,77
-2,35+1,7	5,81	19,21	17,35	6,78	0,47	6,27	6,41	6,18	5,95	5,67
-1,7+1,18	3,86	15,35	16,8	7,58	0,42	6,16	4,12	4,59	3,53	3,70
-1,18+0,85	2,83	12,52	16,05	7,16	0,43	4,25	2,89	3,18	2,65	1,87
-0,85	12,52	0,00	14,72	7,2	0,52	6,43	11,72	14,14	14,19	12,53
<b>Total calculado*</b>	<b>100,0</b>		<b>15,73</b>	<b>6,38</b>	<b>0,46</b>	<b>6,42</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>
<b>Total analisado**</b>			<b>18,24</b>	<b>6,23</b>	<b>0,59</b>	<b>12,38</b>				

\* Teor calculado a partir da média ponderada da química por faixa granulométrica.

\*\* Teor análise química da amostra cabeça.

**Tabela 4.** Resultados da separação em líquido denso

Fração (mm)	Produto	Massa (%)	Teores (%)			Distribuição ensaio (%)		
			Zn	Pb	MgO	Zn	Pb	MgO
Total + 1,18	d>2,94	42,31	30,33	0,53	3,22	81,12	59,14	21,61
	2,85<d<2,94	28,18	2,07	0,22	9,86	3,69	16,00	44,11
	2,75<d<2,85	13,72	0,72	0,12	8,77	0,63	4,35	19,10
	d<2,75	0,44	1,55	0,08	6,94	0,04	0,09	0,48
	Total calculado*	84,65	15,98	0,36	6,35	85,48	79,59	85,31
	Total analisado**		15,86	0,45	6,50			
-1,18		15,35	14,97	0,50	6,03	14,52	20,41	14,69
Cabeça	Total calculado*		15,82	0,38	6,30	100,00	100,00	100,00
	Total analisado***	100,00	18,24	0,59	12,38			

\* Teor calculado a partir da média ponderada de cada faixa de densidade

\*\* Teor calculado a partir da média ponderada da química por faixa granulométrica.

\*\*\* Teor análise química da amostra cabeça.

Os dados apresentados na Tabela 4 indicam que existe potencial de pré-concentração da amostra estudada por métodos gravimétricos, principalmente no que diz respeito ao zinco, pois a fração afundada em  $2,94 \text{ g/cm}^3$  concentrou aproximadamente 40% da massa com 81% de zinco e 60% de chumbo. Embora Jose Neto et al. [8,9] tenham observado melhores resultados de aumento de teor e recuperação metalúrgica dos elementos de interesse em outras amostras similares, o descarte de rejeito grosseiro que representa aproximadamente 60% da massa com apenas 19% de zinco, ainda pode ser considerado muito relevante.

As Tabelas 5 e 6 ilustram os resultados obtidos nos ensaios de flotação.

**Tabela 5.** Ensaio de flotação com a amostra que não passou pela etapa de pré-concentração

Descrição	Massa (%)	Teores				Recuperação			
		Zn (%)	Pb (%)	Ag (ppm)	MgO (%)	Zn (%)	Pb (%)	Ag (pm)	MgO (%)
Concentrado rougher do Pb/Ag	9,3	15,64	5,05	181	11,53	8,1	66,1	66,0	9,1
Concentrado scavenger 01 do Pb/Ag	2,6	14,69	0,88	44	12,53	2,1	3,2	4,5	2,8
Concentrado scavenger 02 do Pb/Ag	2,7	14,05	0,42	23	12,73	2,1	1,6	2,4	2,9
Rejeito Pb	85,5	18,56	0,24	8	11,74	87,8	29,1	27,1	85,3
<b>Calculado alim. flotação chumbo</b>	<b>100,0</b>	<b>18,07</b>	<b>0,71</b>	<b>26</b>	<b>11,76</b>	100,0	100,0	100,0	100,0
Concentrado rougher do Zn	38,2	37,99	0,20	13	6,93	84,2	35,4	69,0	22,9
Concentrado scavenger 01 do Zn	8,6	20,86	0,22	9	10,29	10,4	8,8	10,2	7,7
Concentrado scavenger 02 do Zn	3,9	3,89	0,23	6	13,30	0,9	4,1	3,2	4,4
Rejeito Zn (final)	49,2	1,59	0,22	3	15,26	4,5	51,6	17,6	65,0
<b>Calculado alim. flotação zinco</b>	<b>100,0</b>	<b>17,27</b>	<b>0,21</b>	<b>7</b>	<b>11,57</b>	100,0	100,0	100,0	100,0
<b>Calculado alim. ensaio</b>		<b>17,70</b>	<b>0,48</b>	<b>17</b>	<b>11,68</b>				

**Tabela 6.** Ensaio de flotação com a amostra que passou pela etapa de pré-concentração

Descrição	Massa (%)	Teores				Recuperação			
		Zn (%)	Pb (%)	Ag (ppm)	MgO (%)	Zn (%)	Pb (%)	Ag (pm)	MgO (%)
Concentrado rougher do Pb/Ag	4,6	15,91	5,07	179	10,02	4,0	49,0	49,0	5,1
Concentrado scavenger 01 do Pb/Ag	2,5	14,14	0,81	50	8,64	1,9	4,3	7,5	2,4
Concentrado scavenger 02 do Pb/Ag	2,4	14,09	0,44	26	11,05	1,8	2,2	3,8	2,9
Rejeito Pb	90,5	18,68	0,23	7	8,99	92,3	44,5	39,7	89,7
<b>Calculado alim. flotação chumbo</b>	<b>100,0</b>	<b>18,33</b>	<b>0,47</b>	<b>16,69</b>	<b>9,07</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>
Concentrado rougher do Zn	39,4	42,62	0,19	14	3,13	84,4	35,6	82,5	13,3
Concentrado scavenger 01 do Zn	10,0	22,15	0,21	9	7,93	11,1	10,0	12,8	8,5
Concentrado scavenger 02 do Zn	3,9	3,94	0,21	3	12,10	0,8	4,0	1,5	5,1
Rejeito Zn (final)	46,7	1,56	0,22	0	14,53	3,7	50,4	3,2	73,1
<b>Calculado alim. flotação zinco</b>	<b>100,0</b>	<b>19,90</b>	<b>0,21</b>	<b>6,84</b>	<b>9,28</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>
<b>Calculado alim. ensaio</b>		<b>19,07</b>	<b>0,35</b>	<b>12,06</b>	<b>9,17</b>				

Os dados das Tabelas 5 e 6 ilustram que a etapa de pré-concentração no jigge apresentou resultados inferiores aos da separação em líquido denso. Analisando-se os teores da alimentação da flotação, pode-se observar que o aumento do teor de

zinco foi pequeno, de 17,70% para 19,07%. O teor de magnésio diminuiu de 11,68% para 9,17%. A redução da performance da concentração é esperada sempre que se realiza um aumento de escala. A otimização da etapa de concentração gravimétrica no jig, que não foi possível neste trabalho, pode contribuir para o aprimoramento do resultado.

Quanto aos resultados da flotação, a etapa de concentração do chumbo apresentou desempenho inferior quando aplicada ao produto pré-concentrado em comparação a amostra que não passou pela pré-concentração. O teor de alimentação de chumbo da amostra pré-concentrada (0,35%) é significativamente menor do que na amostra que não passou pela etapa de pré-concentração (0,48%), o que pode explicar os resultados metalúrgicos inferiores.

Por outro lado, a flotação do zinco foi mais eficiente na amostra que passou pela pré-concentração em comparação a amostra sem pré-concentração. O concentrado *rougher* da etapa com pré-concentração apresentou um teor de 42,62% de zinco, enquanto o mesmo fluxo da amostra sem a pré-concentração apresentou um teor de 37,99%. As recuperações metalúrgicas foram semelhantes, de aproximadamente 84% (Tabelas 4 e 5). Considerando-se a soma dos concentrados *rougher* e *scavenger*, o teor de zinco da amostra que passou pela pré-concentração foi de 35,96% e a recuperação metalúrgica de 96,3%. Para a amostra que não passou pela pré-concentração, o teor de zinco foi de 32,48% e a recuperação de 95,5%.

A remoção de magnésio, que constitui principal contaminante deste concentrado, foi muito aprimorada com a pré-concentração. O concentrado *rougher* e *scavenger* (soma) da amostra que passou pela pré-concentração apresentou um teor de magnésio de 4,96% enquanto que o teor da amostra que não passou pela pré-concentração foi de 7,99%. Operacionalmente, tal resultado permitiria a busca por uma maior recuperação de zinco em uma operação com pré-concentração, já que o teor de contaminantes está menor.

Ressalta-se que as condições de flotações foram as mesmas em ambos ensaios (presença e ausência de pré-concentração). Acredita-se que os resultados podem ser aprimorados com a otimização da estratégia flotação para sua adequação a amostra pré-concentrada, que tem maior teor de Zn.

### 3 CONCLUSÃO

O minério de chumbo e zinco da mina de Vazante apresentou um excelente potencial para o uso de uma etapa de pré-concentração por técnica gravimétrica. Os resultados das separações em líquido denso recuperaram aproximadamente 40% da massa com 81% do zinco da amostra e 60% do chumbo. Isto permitiria o descarte de aproximadamente 60% da massa que atualmente alimenta a usina com apenas 19% do zinco da amostra. Embora ajiagem em escala piloto tenha gerado um concentrado com menores teores em comparação ao concentrado de separação em líquido denso, houve aumento significativo no teor de zinco acompanhado de redução do teor de magnésio. A etapa de flotação do zinco se mostrou muito positiva, com aumento na recuperação e teor do concentrado final, aliado a diminuição do teor do principal contaminante deste produto, o magnésio.



## Agradecimentos

Os autores agradecem a NexaResources pela doação das amostras, realização das análises químicas e bolsa de estudos em parceria com o CNPq (Projeto Inova Talentos), para o segundo autor deste trabalho. Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo pelo apoio com a realização dos ensaios de jigagem e ao Laboratório de Tratamento de Minérios da EPUSP pelo apoio para a realização dos ensaios de britagem, moagem e flotação. Agradecemos também ao CNPq pelo apoio por meio do edital Universal, processo 449932/2014/1 e bolsa produtividade, processo CT2016 – 308767/2016-0 e a Pró-reitoria de Graduação da USP pela bolsa de iniciação científica do autor principal do presente estudo.

## REFERÊNCIAS

- 1 Peres LM, Massola CP, Bergerman MG. Abrasiveness evaluation of pre-concentration of copper sulfide ore products through Ipc test. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*. 2018;15(2):91-95.
- 2 Klein B. Energy efficiency technologies for the mining industry. In: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. CIM Conference, 2010; Vancouver, Canada. Westmount: CIM; 2010.
- 3 Morgan P. The impact of a crushing plant upgrade and dms pre-concentration on the processing capability of the Tati nickel concentrator. In: Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Base metals conference, 2009; Kasane, Botswana. Joanesburgo: SAIMM; 2009. p. 231-244.
- 4 Denysschen DF, Wagner BN. Pre-concentration of low grade lateritic sulphide nickel ore. In: Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Base metals conference, 2009; Kasane, Botswana. Joanesburgo: SAIMM; 2009. P. 291-306.
- 5 Fourie H, Rooyen PHV, Rupprecht S, Lund T, Vegter NM. Exploitation of a massive low grade zinc-lead resource at Rosh Pinah Zinc Corporation, In: Southern African Institute of Mining and Metallurgy. The fourth southern african conference on base metals, 2007; Swakopmund, Namibia Joanesburgo: SAIMM; 2007. p. 109-118.
- 6 Cresswell GM. Pre-concentration of base metal ores by dense medium separation. In: Southern African Institute of Mining and Metallurgy. SAIMM copper, cobalt, nickel and zinc recovery conference. Joanesburgo: SAIMM; 2001.
- 7 Bergerman MG, Barbosa FAM, Tomaselli, BY, Roveri, CD, Navarro FC. Pré-concentração de minerais sulfetados de zinco, chumbo e cobre utilizando-se beneficiamento gravimétrico. In: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 67 congresso internacional da ABM, 2012; Rio de Janeiro, Brasil. São Paulo: ABM; 2012. p. 1082-1092.
- 8 Jose Neto D, Bergerman MG, Souza AD, Martins ELC, Metsavaht V, Bechir JLC, Lopes LMC, Lopes MM, Freitas Neto CJ, Melo JMC, Oliveira CAM, Resende LM. Pre-concentration of silicate zinc ore using density and magnetic concentrations. In: Instituto Brasileiro de Mineração. 24<sup>th</sup> World Mining Congress, 2016; Rio de Janeiro, Brasil. Brasília: IBRAM; 2016. p. 228-236.
- 9 Jose Neto D, Bergerman MG, Young A, Peter C. Pre-concentration alternative for the reduction of the carbonatic gangue of a Brazilian silicate zinc ore. In: Minerals Engineering International. Physical Concentration'17, 2017; Falmouth, Inglaterra. Falmouth: MEI; 2017.
- 10 Bergerman MG, Jose Neto D, Tomaselli BY, Maciel BF, Roveri CD, Navarro FC. Redução do consumo de energia de circuitos de moagem com a utilização de pré-concentração de minerais sulfetados. In: Universidade Federal de Goiás. XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa & VIII Meeting of the Southern

- Hemisphere on Mineral Technology, 2013; Goiania, Brasil. Pires do Rio: Gráfica e Editora Pires do Rio LTDA-ME; 2013. v. 2. p. 499-506.
- 11 Uehara BH, Bergerman MG, Moreira BHM, Jose Neto D. Avaliação do desgaste em circuitos de moagem alimentados com produtos de pré-concentração de minérios de vanádio e cobre. In: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 18º simpósio de mineração, 2017; São Paulo, Brasil. São Paulo: Editora Blucher; 2017. p. 350.
  - 12 Peres LM, Bergerman MG, Massola CP. Influência da pré-concentração no índice de abrasividade de minérios de cobre e de zinco. In: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 18º simpósio de mineração, 2017; São Paulo, Brasil. São Paulo: Editora Blucher; 2017. p. 105-114.
  - 13 Moreira BHM, Uehara BH, Jose Neto D, Bergerman MG. Avaliação do consumo de energia em circuitos de moagem alimentados com produtos de pré-concentração de minérios de baixo teor. In: Instituto Federal do Pará. XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2017; Belém, Brasil. Belém: IFPA; 2017. p. 1662-1669.
  - 14 Grigg NJ, Delemontex GJ. The pre-concentration of precious and base metal deposits using the inline pressure jig (IPJ); higher feed grades and more metal. In: Gecamin. International Mineral Processing Conference 2014, 2014; Santiago, Chile. Santiago: Gecamin; 2014.
  - 15 Önal G, Bulut G, Gül A, Angal O, Perek KT, Arslan F. Flotation of Aladağ oxide lead-zinc ores. Minerals Engineering. 2005;18(2 spec. iss.): 279–282.
  - 16 Kumar CR, Tripathy S, Rao DS. Characterisation and pre-concentration of chromite values from plant tailings using floatex density separator. Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, 2009;8(5): 367–378.
  - 17 Ramalli Neto F, Leite Neto A, Jose Neto D, Bergerman MG, Horta DG. Avaliação da cinética de flotação em circuitos de concentração mineral alimentados com produtos de pré-concentração de minérios de cobre sulfetado. In: Instituto Federal do Pará. XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2017; Belém, Brasil. Belém: IFPA; 2017. p. 1054-1062.