

Pré-concentração de minério de ouro para caracterização das formas de ocorrência e associações minerais

Fabrizio Rodrigues Costa¹ Guilherme Pinho Nery¹ Carina Ulsen^{1*} 

Resumo

A caracterização tecnológica e mineralógica de minérios auríferos encontra vários obstáculos em função dos baixos teores, ocorrência em grãos micrométricos, possível efeito pepita e ocorrência anômala. Com o intuito de aumentar a concentração em teor e massa das fases de interesse e minerais portadores de ouro, operações de pré-concentração tem sido aplicada em estudos de caracterização das formas de ocorrência e associações do ouro por análise de imagens de microscopia eletrônica de varredura. A utilização da separação mineral mediante líquido denso e sistemas de hidroseparação, como a mesa Mozley e a elutriação permite a concentração de minerais de elevado peso específico em uma operação mais ágil e com elevada recuperação dos minerais de interesse e com maior facilidade de padronização e controle operacional. Neste estudo, a pré-concentração densitária foi avaliada para três amostras de minérios de ouro de diferentes teores por elutriação, líquido denso e mesa Mozley. A elutriação foi o procedimento que apresentou melhor desempenho em relação a recuperação e enriquecimento de ouro nas cinco faixas granulométricas estudadas.

Palavras-chave: Pré-concentração; Separações densitárias; Elutriação; Minério de ouro; Caracterização tecnológica.

Pre-concentration of gold ore for characterization of forms of occurrence and mineral associations

Abstract

The technological and mineralogical characterization of gold ores faces several obstacles due to the low contents, occurrence in micrometric grains, possible nugget effect and anomalous occurrence. In order to increase the concentration in content and mass of the phases of interest and gold-bearing minerals, pre-concentration operations have been applied in studies to characterize the forms of occurrence and associations of gold by analyzing scanning electron microscopy images. The use of mineral separation using heavy liquids and hydroseparation systems, such as the Mozley table and elutriation, allows the concentration of high specific weight minerals in a more agile operation, with high recovery of the minerals of interest and with greater ease of standardization and control operational. In this study, the densitary pre-concentration was evaluated for three samples of gold ores of different grades by elutriation, heavy liquid and Mozley table. Elutriation was the procedure that presented the best performance in relation to gold recovery and enrichment in the five granulometric ranges studied.

Keywords: Pre-concentration; Density separations; Elutriation; Gold ore; Technological characterization.

1 Introdução

Na indústria mineral, uma rota de concentração e processamento de minério de ouro mais eficiente está diretamente relacionada às características físicas, químicas e mineralógicas do minério que está sendo processado [1,2]. Os principais métodos de concentração mineral estão baseados em propriedades diferenciadoras como os densitários através

da densidade, métodos magnéticos pela susceptibilidade magnética e flotação pela físico-química de superfícies.

Nesse contexto, a caracterização tecnológica pode atuar no reconhecimento dessas características, que compreende no estudo das propriedades das matérias primas minerais, fundamentais para o aproveitamento sustentável dos recursos

¹Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, SP, Brasil.

*Autor correspondente: carina.ulsan@usp.br



2176-1523 © 2023. Costa et al. Publicado pela ABM. Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

e possibilitando maior previsibilidade aos processos de beneficiamento bem como maximizar a recuperação do minério a ser processado [3-6].

Entre os procedimentos de caracterização tecnológica de minérios, as separações minerais têm como objetivo a separação de espécies minerais baseadas em uma ou mais propriedades físicas que as diferenciem, permitindo isolar os minerais de ganga do mineral útil [7]. Uma opção para a realização dessas separações, em escala de laboratório, é o emprego de líquidos densos (LD) que consiste em um método de separação densitária na qual se baseia na diferença de densidade entre um meio fluido e os minerais a serem separados [8-11]. São gerados dois produtos, um material que flutua devido a sua densidade ser menor que a do líquido empregado e outro que afunda por possuir maior densidade que o meio.

Outro método de separação mineral amplamente utilizado são os sistemas de hidroseparação, como a mesa Mozley (*Mozley Mineral Separator*) que pode ser utilizada para separações gravíticas de fases de densidades mais elevadas do que a do líquido densos. Sua operação é realizada em meio aquoso e a separação ocorre por meio de movimentos oscilatórios [12] e ajustes de parâmetros do equipamento, como inclinação e vazão de água de alimentação. Outro fator determinante na operação é a característica do material que pode influenciar nas velocidades de fluxo de partículas e a distribuição de tamanho das partículas. A quantidade de partículas ultrafinas, por exemplo, poderá influenciar na viscosidade da polpa tornando a operação menos eficiente.

Nenhuma das alternativas citadas (LD e mesa Mozley) atinge o enriquecimento de ouro e redução de massa suficiente para estudos de caracterização das formas de ocorrência e associações mineralógicas. Uma alternativa possível é a combinação das duas técnicas, sendo o produto afundado da separação em líquido densos (produto mais denso do que o líquido utilizado) direcionado para separação em mesa Mozley. A conjugação das duas técnicas pode levar à redução de massa gerando um concentrado de alto teor da amostra [13,14]. A desvantagens desse procedimento, tem-se o elevado custo operacional, alta morosidade e falta de critérios assertivos para determinar o tempo ou condições de operação da mesa Mozley, tornando-se muito dependente da experiência do operador e da análise visual dos produtos. Além disso, ao manuseio dos líquidos densos exige os devidos cuidados já que normalmente são líquidos orgânicos de alta toxicidade.

Como alternativa a esses dois métodos, os elutriadores são sistemas de separação seletiva de partículas mediante a aplicação de uma corrente de fluido ascendente, contracorrente à alimentação de sólidos. São sistemas indicados para separações de minerais de diferentes pesos específicos, tratando-se de um método pouco abordado e disseminado na industrial mineral. Um outro sistema semelhante, denominado “*hydroseparator*” foi desenvolvido e aplicado para concentrações de platinóides [15,16] com uma elevada recuperação de platina no produto pesado.

A elutriação pode ser realizada via úmida, com água ou outro líquido de maior densidade ou via seca como os elutriadores por gás para separação de amostras em diferentes frações de tamanho através de sedimentação livre ou através de correntes ascendentes de fluido (geralmente água). A Figura 1 apresenta desenho esquemático do elutriador.

O elutriador é constituído por um tubo cilíndrico longo, usualmente vidro no qual o fluxo de fluido de direção contrária à gravidade carrega as partículas cuja velocidade de sedimentação seja inferior à velocidade de ascensão do fluido [18-20]. A principal variável da operação é a velocidade ascendente do fluido que pode ser controlada por meio da vazão e da alimentação dos sólidos. Quando a operação é realizada em faixas granulométricas estreitas, o tamanho de partículas passa a ter menos influência que sua massa específica, sendo que também é possível otimizar a separação de modo que nas frações mais grossas é necessário utilizar maiores vazões para poder mantê-las em suspensão e promover a separação das mais leves. Por outro lado, para frações granulométricas menores as vazões devem ser reduzidas para evitar o carregamento de partículas pesadas pelo fluxo ascendente.

O objetivo deste estudo é caracterizar três amostras de minério de ouro de diferentes composições e teores, e avaliar a eficiência na pré-concentração utilizando a elutriação em comparação ao método conjugado de líquido denso e mesa Mozley na pré-concentração de ouro para estudos posteriores de mineralogia quantitativa por análise de imagens automatizada (MEV-AI).

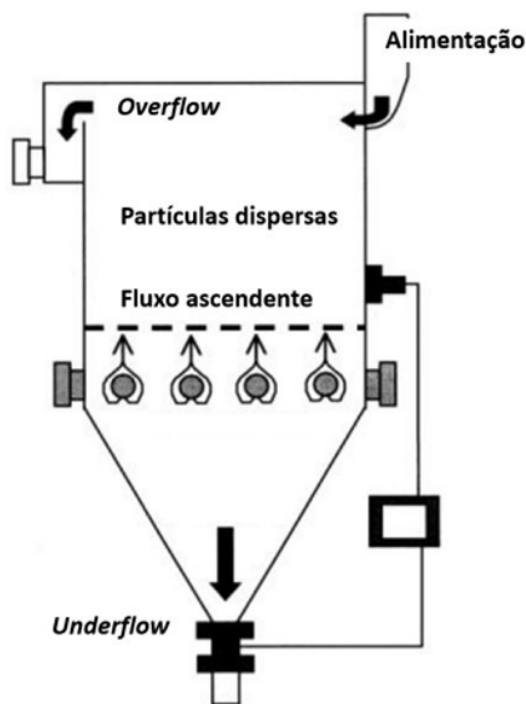


Figura 1. Desenho esquemático de um elutriador. Adaptado de Kohmuench et al. [17].

2 Materiais e métodos

Os estudos foram realizados em três amostras de minério de ouro de diferentes teores provenientes da região de Pontes e Lacerda, estado do Mato Grosso. As amostras foram denominadas de Am-01, Am-02 e Am-03 e aplicadas aos diferentes métodos de pré-concentração, sem a utilização de réplicas.

Essas amostras, com cerca de 10 kg cada, foram cominuídas abaixo de 1 mm em moinhos de rolos e submetidas à análise granulométrica por peneiramento a úmido em peneiras com aberturas de 0,59; 0,30; 0,15; 0,074 e 0,037 mm. As massas utilizadas nos ensaios de elutriação, líquido denso e fluorescência e difração de raios X e o fluxograma das atividades desenvolvidas para as três mostras estão indicadas na Figura 2.

Para o ensaio de líquido denso, foi utilizado tetrabromoetano (TBE) com massa específica de 2,95 g/cm³ em centrífuga da marca Novatecnica NT 820. As condições operacionais foram efetuadas em duas operações sequenciais de 5 minutos cada, a uma rotação de 900 RPM; o produto afundado foi submetido a uma nova separação em mesa vibratória Mozley (*Mozley Mineral Separador C-900*).

Contraparte da amostra inicial, após britagem e peneiramento, foi submetida aos ensaios de elutriação com equipamento de diâmetro 4,5 cm e vazão ascendente de água compreendido 100-300 L/h e definição visual do operador na vazão de separação.

O teor de ouro nos produtos analisados foi determinado pelo método *fire assay*; os elementos maiores foram determinados por espectrometria de fluorescência de raios X com determinação sem padrões para elementos de F ao

U em equipamento Axios Advanced, marca PANalytical; perda ao fogo foi efetuada em temperatura de 1050 °C por 1h30min. A identificação mineralógica por difração de raios X (DRX) foi obtida por comparação do difratograma da amostra com o banco de dados do ICDD - *International Centre for Diffraction Data 2003* e a estimativa das proporções das fases minerais foi estabelecida pela conjugação dos resultados de DRX (intensidade de referência - método RIR) e de análises químicas.

3 Resultados e discussão

3.1 Composição química, mineralógica e análise granulométrica

A Tabela 1 apresenta a composição química global das três amostras analisadas. Os resultados mostram que a amostra Am-01 possui um conteúdo elevado de SiO₂ (95,1%), baixos valores de Al₂O₃ (1,39%), K₂O (0,44%), MgO (<0,10%) e perda ao fogo de 0,50% indicando pouca presença de carbonatos. Em relação ao teor de ouro, trata-se de uma amostra de alto teor (4,13 g/t).

Na amostra Am-02, os grãos de ouro estão associados principalmente a veios de quartzo, segundo descrição visual; a composição química mostra teores significativos de Al₂O₃ (9,34%), K₂O (2,92%) e perda ao fogo (1,56%) e teor de ouro de 0,96 g/t. A amostra Am-03 corresponde a sericita xisto (Al₂O₃:15,6%; K₂O: 5,01%) e perda ao fogo de 3,14% com teor de ouro (1,01 g/t).

Entre os minerais identificados por DRX (Tabela 2, Figura 3), o quartzo e muscovita foram recorrentes nas três

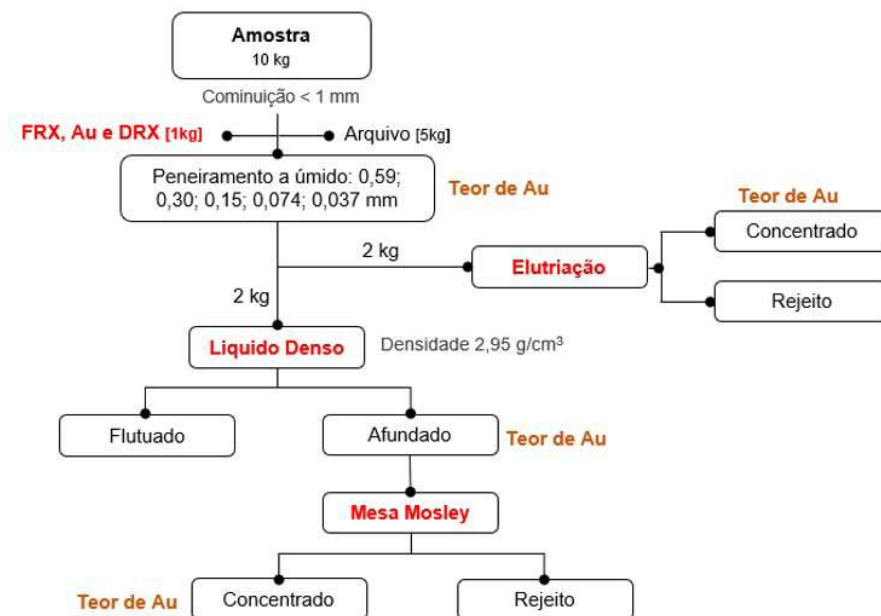


Figura 2. Fluxograma das atividades desenvolvidas.

Tabela 1. Composição química das amostras; Au (g/t), óxidos e PF (%).

Amostras	Au	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	SO ₃	MgO	TiO ₂	PF
Am-01	4,13	95,1	2,88	1,39	0,44	0,58	<0,10	0,20	0,50
Am-02	0,96	81,2	4,02	9,34	2,92	<0,10	0,25	0,70	1,56
Am-03	1,01	70,8	4,19	15,6	5,01	0,87	0,59	0,56	3,14

Obs: PF – perda ao fogo a 1.050 °C por 1h30min.

Tabela 2. Assembleia mineralógica das amostras Am-01, Am-02 e Am-03.

Mineral			Proporção relativa (%)		
			Am-01	Am-02	Am-03
Quartzo		SiO ₂	84%	60%	35%
Mica	moscovita	(K,Na)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si _{3,1} Al _{0,9})O ₁₀ (OH) ₂	12%	33%	58%
Argilomineral	caulinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	1%	1%	2%
Óxidos de Fe	goethita	FeO(OH)	2%	4%	3%
	hematita	Fe ₂ O ₃	1%	1%	2%
Mineral de Ti	titanita	CaTiSiO ₄	Traços	2%	Traços
Sulfeto	pirita	FeS ₂	-	-	2%

Obs: Proporção relativa de ocorrência dos minerais na amostra; totaliza 1 para cada amostra.

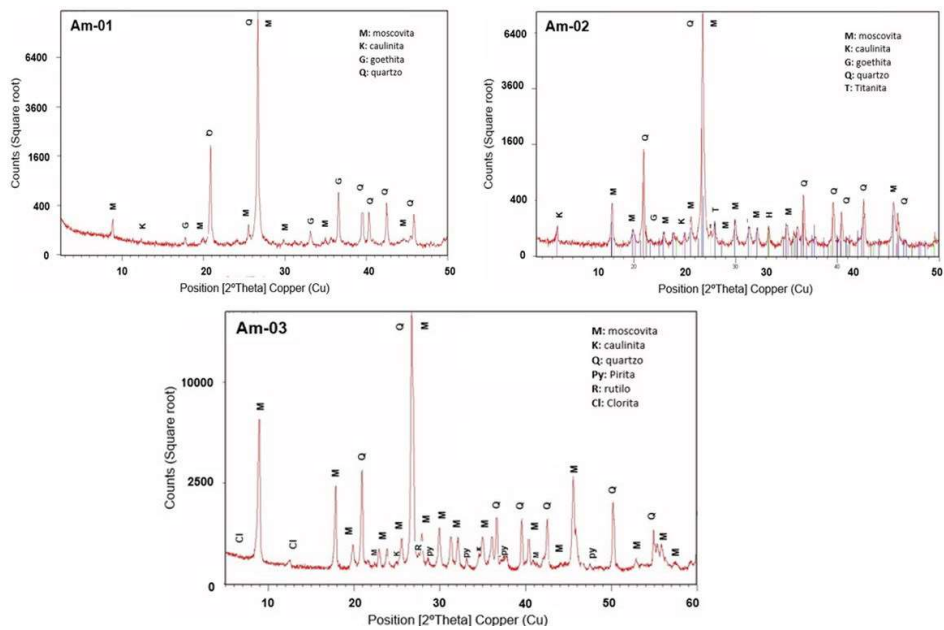


Figura 3. Composição das amostras determinado por DRX (Am-01, Am-02 e Am-03).

amostras em diferentes proporções. Constituintes em menores proporções tais como caulinita, goethita, hematita e titanita ocorrem em proporções variadas nas amostras. Destaque para a amostra Am-03 onde é possível observar no difratograma a presença de pirita, clorita, rutilo e grande recorrência de muscovita, constatado pelos teores de Al₂O₃, K₂O e SO₃.

A distribuição granulométrica e a análise granuloquímica das amostras são apresentadas na Figura 4 e Tabela 3. Apesar das três amostras terem sido processadas de forma análoga (britagem em circuito fechado com peneira de

1,0 mm), a amostra Am-02 apresenta uma distribuição granulométrica bem mais fina que as outras amostras, com D₅₀ de aproximadamente 0,070 mm, bem abaixo da amostra Am-01 com D₅₀ de 0,3 mm e da Am-03 com D₅₀ de 0,22 mm.

A análise granulométrica indica que 31,6% e 21,9% em massa da amostra (Am-01 e 02, respectivamente) estão acima de 0,59 mm e o passante em 0,037 mm corresponde a 7,3% e 32,5% da massa das amostras. Na amostra Am-03, 20,6% em massa da amostra está acima de 0,59 mm e 10,1% abaixo de 0,037 mm.

Tabela 3. Análise granulométrica das amostras (Am-01, Am-02 e Am-03).

Amostra Am-01						
Fração (mm)	Massa (%)		Teor		Distrib. na amostra (%)	
	retido	acumulado	Au (g/t)	S (%)	Au	S
-1,0+0,59	31,6	31,6	1,48	0,37	11,4	35,4
-0,59+0,30	21,0	52,6	4,48	0,44	22,8	28,4
-0,3+0,150	15,8	68,4	4,69	0,38	17,9	18,3
-0,150+0,074	14,0	82,4	5,62	0,19	19,0	8,0
-0,074+0,037	10,4	92,7	4,48	0,16	11,2	5,2
-0,037	7,3	100,0	10,1	0,21	17,7	4,7
Total Calc.	100,0		4,13	0,33	100,0	100,0

Amostra Am-02						
Fração (mm)	Massa (%)		Teor		Distrib. na amostra (%)	
	retido	acumulado	Au (g/t)	S (%)	Au	S
-1,0+0,59	21,9	21,9	0,57	0,01	13,0	9,9
-0,59+0,30	12,5	34,4	0,39	0,09	5,11	57,2
-0,3+0,150	6,8	41,3	1,66	0,01	11,8	4,70
-0,150+0,074	10,0	51,2	1,27	0,01	13,2	4,71
-0,074+0,037	16,3	67,5	0,91	0,01	15,4	7,80
-0,037	32,5	100,0	1,22	0,01	41,4	15,7
Total Calc.	100,0		0,96	0,02	100,0	100,0

Amostra Am-03						
Fração (mm)	Massa (%)		Teor		Distrib. na amostra (%)	
	retido	acumulado	Au (g/t)	S (%)	Au	S
-1,0+0,59	20,6	20,6	1,84	1,26	37,6	49,3
-0,59+0,30	13,7	34,4	1,06	1,07	14,3	27,8
-0,3+0,150	21,2	55,5	1,23	0,29	25,6	11,8
-0,150+0,074	25,1	80,6	0,34	0,11	8,30	5,21
-0,074+0,037	9,3	89,9	0,20	0,10	1,81	1,70
-0,037	10,1	100,0	1,24	0,22	12,4	4,21
Total Calc.	100,0		1,01	0,53	100,0	100,0

A amostra Am-01 apresenta teor de ouro de 1,48 g/t na fração 1,0-0,59 mm, aumentando para valores entre 4,48 e 5,62 g/t nas frações intermediárias e com expressivo aumento para 10,1 ppm na fração granulométrica abaixo de 0,037 mm. Tendência similar é observado nas amostras Am-02, com teor de ouro de 0,57 ppm na fração 1,0+0,59 mm e variações significativas ao longo das frações com destaque de 41,4% do ouro contido nas frações abaixo de 0,037mm. A amostra Am-03 apresenta uma grande variação de teor de ouro ao longo das frações com 37,6% de ouro contido na fração mais grossa (1,0+0,59 mm).

Os teores de enxofre apresentam grande variação nas amostras 01 e 03 com tendência de aumento de teor nas frações até 0,30 mm. Na amostra 02, os baixos teores de enxofre, conforme constatado na análise química, mostra um baixo conteúdo de sulfeto.

3.2 Comparativo entre os métodos de separação mineral

Os resultados comparativos das distribuições de ouro nos produtos pesados das três amostras, obtidos por separações em líquido denso, mesa Mozley e elutriação são apresentadas nas Figuras 5.

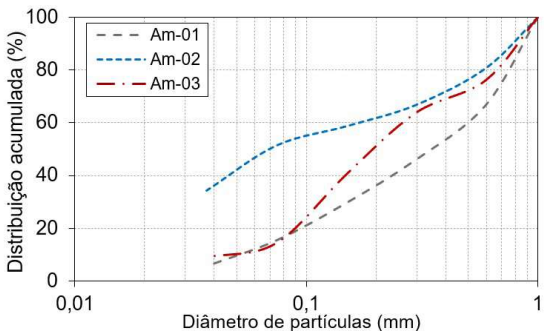


Figura 4. Distribuição granulométrica por peneiramento.

Os resultados da elutriação em comparação com a pré-concentração utilizando líquido denso e mesa Mozley nas três amostras estudadas indicam uma concentração de ouro associado ao concentrado (produto pesado) nas frações maiores que 0,15 mm nas amostras Am-01 e Am-03. Na amostra Am-02 ocorreu significativo declínio na fração mais grossa devido à baixa distribuição de ouro conforme observado na Tabela 3.

Comparando as três amostras, a elutriação teve uma tendência de distribuição de ouro acima de 80% ao longo

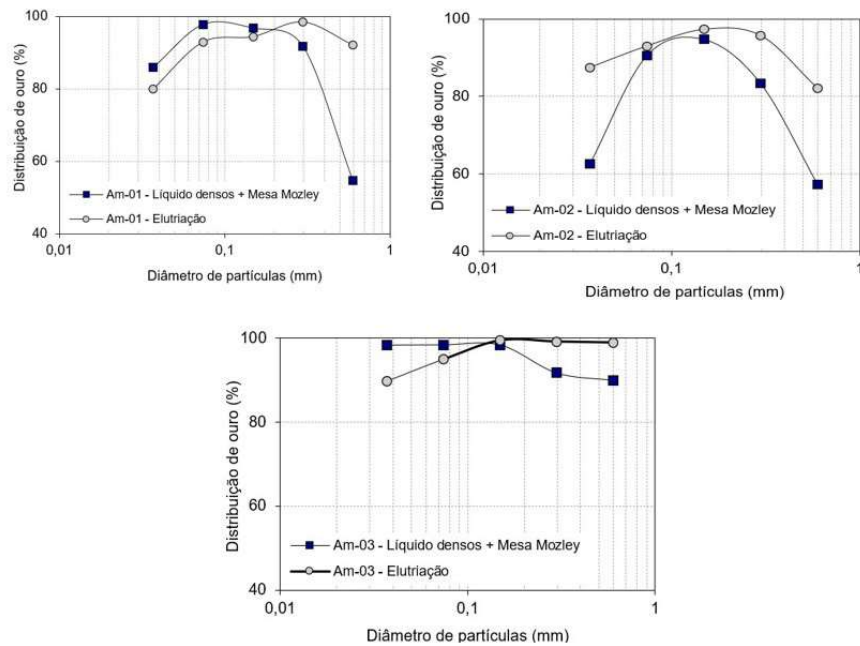


Figura 5. Distribuição de ouro nos produtos pesados (afundado em líquido denso e pesado da mesa Mosley) e pesado da elutrição.

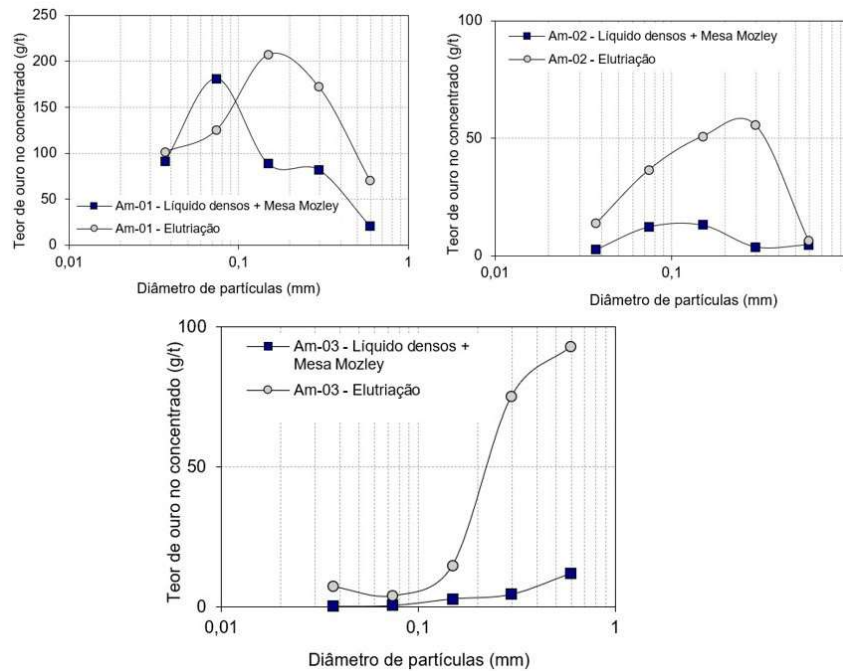


Figura 6. Teor de ouro nos produtos pesados (afundado em líquido denso e pesado da mesa Mosley) e pesado da elutrição.

das frações (-0,59+0,037 mm). Já na separação por líquido denso e mesa Mozley, apesar da maior distribuição de ouro nas frações menores que 0,074 mm das amostras Am-01 e 03, as amostras apresentaram um elevado decréscimo na distribuição de ouro nas frações mais grossas, evidenciado principalmente nas amostras Am-01 e 02. As variações

observadas nas duas rotas são ocasionadas principalmente das diferentes condições operacionais e escoamento laminar.

Os teores de ouro no concentrado (produto pesado), mostrados na Figura 6, apresentaram uma tendência de elevação da fração mais fina até a fração 0,149 mm, com decréscimo significativo nas frações mais grossa nos dois

procedimentos adotados, evidenciado principalmente nas amostras Am-01 e 02. Na amostra Am-03 ocorreu o incremento no teor de ouro ao longo das frações, atingindo 93 ppm de ouro nas frações mais grossas quando adotado pela elutriação. Esse aumento expressivo no teor do concentrado se deu pelo fato da amostra Am-03 apresentar aproximadamente 38% de ouro contido na fração mais grossa (1.0-0,59 mm).

4 Conclusões

Os elutriadores são equipamentos de baixo custo, de fácil manuseio e controle operacional. Foi o procedimento que apresentou melhor desempenho em relação a distribuição de ouro no concentrado e ao ganho de teor, acima de 80% de recuperação nas 5 frações analisadas nas três amostras. Ao contrário, o método de líquido denso e mesa Mozley, mostrou uma recuperação inferior principalmente nas frações mais grossas devido a densidades mais elevadas ou influência do desempenho hidrodinâmico do equipamento nas partículas.

Nas frações mais finas, tipicamente menores que 0,1 mm, a separação das partículas leves submetidas ao líquido denso, não é recomendada em decorrência do tempo de residência e velocidade de sedimentação, comprometendo assim a sua separabilidade com o produto fluído ou intermediário, por exemplo. Em especial, a amostra Am-02 apresentou elevado conteúdo de finos (~34%), o que representou uma recuperação mássica de aproximadamente 62%.

O elutriador perde eficiência nas partículas mais grossas (>0,30 mm), mesmo que pouco acentuado quando comparado ao líquido denso e mesa Mozley, devido possivelmente um fluxo ascendente maior do fluído e baixa liberação dos minerais. Os limites dessa eficiência, no entanto, podem variar em função do equipamento utilizado ou através das variáveis operacionais para elas utilizadas.

Portanto, a avaliação da eficiência da elutriação em comparação ao método conjugado de líquido denso e mesa Mozley na pré-concentração de ouro para estudos de caracterização tecnológica sobretudo nas etapas de análise de imagem, teve um melhor desempenho, o que permite aumentar a quantidade dos grãos de ouro analisados garantindo assim melhor robustez nas informações.

Referências

- 1 Chrysosoulis SL, Cabri LJ. Significance of gold mineralogical balances in mineral processing. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section C. 1990;99:C1-C10.
- 2 Marsden J, House I. The chemistry of gold extraction. Chichester: Ellis Horwood Ltd.; 1992.
- 3 Sant'Agostino LM, Kahn H. Metodologia para caracterização tecnológica de matérias primas minerais. São Paulo: Universidade de São Paulo; 1997.
- 4 Neumann R, Schneider CL, Alcover A No. Caracterização tecnológica de minérios. In: Luz AB, Sampaio JA, Almeida SLM, editores. Tratamento de minérios. Brasília: Centro de Tecnologia Mineral, Ministério da Ciência e Tecnologia; 2004. p. 55-111.
- 5 Sampaio CH, Tavares LMM. Beneficiamento gravimétrico: uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade. Porto Alegre: UFRGS Editora; 2005. 605 p.
- 6 Costa FR, Nery GP, Antoniassi JL, Ulsen C. Effective density concentration in refractory gold pre for characterization purposes. REM - International Engineering Journal. 2020;73(4):579-586.
- 7 Jordens A, Cheng YP, Waters KE. A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. Minerals Engineering. 2013;41:97-114. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2012.10.017>.
- 8 Souza ML. Separação por meio denso. Montevideo: Universidade de la Republica; Porto Alegre: UFRGS; 2013. Transparência.
- 9 Browning JS. Heavy liquids and procedure for laboratory separation of minerals. Washington: USBM; 1961. (Bureau of Mines. Information Circular; no. 8007).
- 10 Jones MP. Applied mineralogy: a quantitative approach. United States: Graham & Trotman; 1987. 259 p.
- 11 Falconer A. Gravity separation: old technique/new methods. Physical Separation in Science and Engineering. 2003;12(1):31-48. <http://dx.doi.org/10.1080/1478647031000104293>.
- 12 Campos AR, Luz AB. Separação em meio denso. In: Luz AB, Sampaio JA, Almeida SLM, editores. Tratamento de minérios. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq/MCT; 1998.
- 13 Gu Y. Automated scanning electron microscope based mineral liberation analysis: an introduction to JKMRC/FEI Mineral Liberation Analyser. Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering. 2003;2(1):33-41.
- 14 Goodall WR, Scales PJ, Butcher AR. The use of QEMSCAN and diagnostic leaching in the characterisation of visible gold in complex ores. Minerals Engineering. 2005;18(8):877-886.

- 15 Rudashevsky NS, Garuti G, Andersen JCØ, Kretser YL, Rudashevsky VN, Zaccarini F. Separation of accessory minerals from rocks and ores by hydroseparation (HS) technology: method and application to CHR-2 chromitite, Niquelândia intrusion, Brazil. Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy Section B. 2002;111(1):87-94.
- 16 Cabri LJ, Laflamme JHG. Mineralogy and distribution of platinum-group elements in mill products from Sudbury. In: Proceedings 2nd International Congress on Applied Mineralogy in the Mineral Industries; 1984; Los Angeles. Pittsburgh: TMS-AIME; 1984. p. 911-922.
- 17 Kohmuench JN, Mankosa MJ, Luttrell GH, Adel GT. A process engineering evaluation of the crossflow separator. In: SME Annual Meeting; 2001; Denver, CO. Littleton: Society of Mining, Metallurgy and Exploration; 2001. (Preprint No. 01-80).
- 18 Gaudin AM. Principles of mineral dressing. New York: McGraw-Hill; 1971. p. 64-69.
- 19 Taggart AF. Handbook of ore dressing. New York: John Wiley & Sons; 1971. p. 1187-1192.
- 20 Weiss NL. Mineral processing handbook. New York: Society of Mining Engineers; 1985.

Recebido em: 15 Maio 2022

Aceito em: 11 Dez. 2022