

# **Recuperação de áreas degradadas de garimpo por flotação e concentração gravítica**

**Roberta dos Santos Peixoto**

Bolsista de Iniciação Científica, Engenharia Química, UFRJ.

**Paulo Renato Perdigão Paiva**

Orientador, Engenheiro Metalúrgico M.Sc.

## **Resumo**

À restauração de áreas de mineração anteriormente degradadas pelo garimpo, há de se destacar o reprocessamento dos rejeitos gerados, seja pelo elevado grau de toxicidade do mercúrio, sucessivamente biomagnificada quando este é lançado ao meio ambiente, seja pela recuperação de metais preciosos ainda contidos, ou por ambos.

Para o tratamento e disposição de rejeitos de garimpo contendo mercúrio, enfoques distintos podem ser considerados: como a limpeza do rejeito, ou seja, a remoção e a recuperação do mercúrio do material; ou a imobilização/confinamento do metal na forma de um complexo insolúvel.

Neste trabalho, são sugeridas como rotas principais de pesquisa para o tratamento do rejeito de garimpo, a recuperação do mercúrio e do ouro residual. O estudo consistiu das seguintes etapas: seleção e composição de amostras representativas contendo ouro e mercúrio, análise granulométrica da amostra, concentração gravítica e flotação.

Os melhores resultados obtidos apresentaram recuperação de ouro e mercúrio da ordem de 83,61% e 41,14%, respectivamente, utilizando MIBC como espumante,  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$  como ativador, amilxantato de potássio e AP 3473 (CYTEC) como coletores, flotação em pH 6,5 e fizeram uso do concentrador Knelson.

## **1. Introdução**

A utilização de mercúrio (Hg) nos garimpos de ouro (Au) justifica a necessidade de estudos voltados para o desenvolvimento de técnicas que visem ao seu uso adequado nos processos de concentração do ouro e a descontaminação de áreas poluídas por este metal. Diversos métodos têm sido desenvolvidos para remoção de mercúrio de efluentes industriais e de rejeitos do processo de amalgamação. Em geral, esses tratamentos envolvem processos físico-químicos como separação gravítica, precipitação química, coagulação, adsorção, troca iônica e extração por solvente, eletrooxidação e flotação (Cipriani et al, 1997; Tánnus et al, 2001).

O Hg também é muito utilizado no processo de recuperação do ouro, isso se deve ao fato desses dois metais terem grande afinidade e amalgamarem, formando compostos intermetálicos tais como:  $\text{AuHg}_2$ ,  $\text{Au}_2\text{Hg}$  e  $\text{Au}_3\text{Hg}$  (Melamed & Villas Bôas, 2002). Por este motivo haverá também interesse na recuperação do ouro, visto que é um produto com valor de mercado considerável (Trindade & Filho, 2002).

O presente trabalho visa o desenvolvimento de estudos de caracterização tecnológica e rotas de processamento para a recuperação de Hg e Au provenientes de atividades garimpeiras.

## 2. Metodologia

### 2.1. Amostragem e preparação do material coletado

Inicialmente, as amostras de rejeito, cerca de 128 Kg, foram preparadas de acordo com o fluxograma da Figura 1. Os trabalhos de preparação dessa amostra foram iniciados com a secagem à temperatura ambiente, homogeneização e quarteamento da mesma. A homogeneização foi realizada utilizando-se um tambor rotativo e em seguida, a amostra foi distribuída em uma pilha longitudinal, de seção triangular. Dividiu-se a pilha em partes iguais, em seu sentido transversal, e o quarteamento foi realizado formando-se duas pilhas menores. Em seguida, foram retiradas alíquotas das duas novas pilhas, alternadamente, formando-se uma quarta pilha de cerca de 64 kg. Esta última foi quarteada em subamostras da seguinte forma: quatro subamostras de 1 kg, vinte subamostras de 2 kg e uma subamostra de 20 kg.

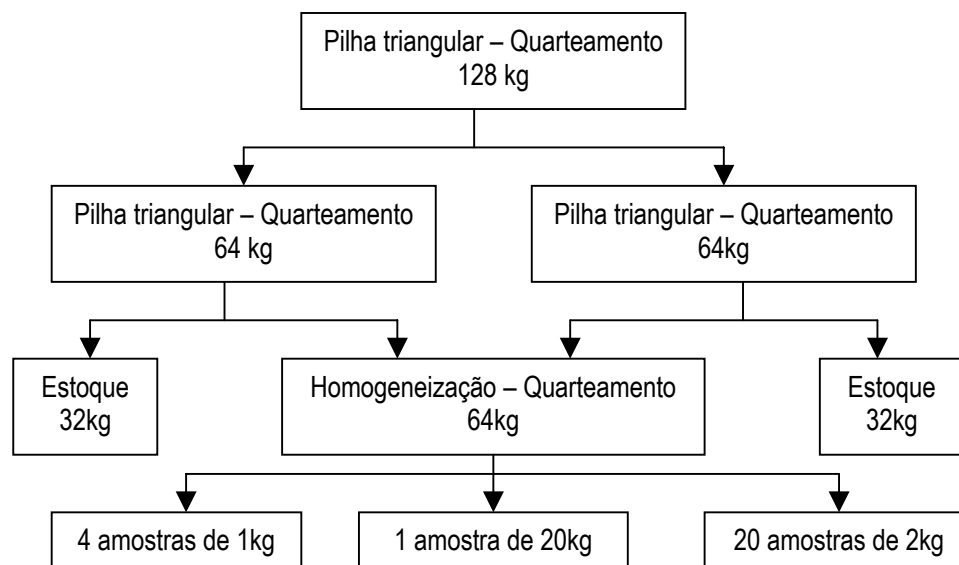


Figura 1. Fluxograma do quarteamento das amostras.

### 2.2. Análise granuloquímica

O minério analisado é composto por quartzo, flossilicatos (principalmente muscovita e biotita), óxidos e/ou hidróxidos de ferro, em geral contendo As. Como fases secundárias destacam-se ilmenita e os sulfetos piritita e arsenopiritita. Muitos outros minerais foram identificados como traços, como zircão, monazita, xenotímio, zirkelita e galena, e outras até complicadas de serem identificadas, unicamente através de análise elementar por EDS ao MEV.

A Tabela 1 apresenta a análise granulométrica, de 2 mm a 20 µm, da amostra, e a química das frações, para elementos maiores, está na Tabela 2.

Tabela 1. Análise granulométrica, série Tyler acrescida das peneira de 44 e 20  $\mu\text{m}$ , da amostra (% massa).

Peneira ( $\mu\text{m}$ )	Retido	Retido acumulado	Passante acumulado
1651	6,14	6,14	93,86
1168	11,46	17,60	82,40
833	10,25	27,85	72,15
589	9,31	37,16	62,84
417	6,14	43,31	56,69
295	6,55	49,86	50,14
210	4,91	54,77	45,23
149	3,62	58,39	41,61
105	4,10	62,49	37,51
74	3,51	66,00	34,00
53	2,05	68,06	31,94
44	2,16	70,22	29,78
37	1,53	71,74	28,26
20	5,27	77,01	22,99
-20	22,99	100,00	--

Tabela 2. Composição química, fluorescência de raios X, das frações, para elementos maiores.

Peneira ( $\mu\text{m}$ )	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
1651	32,16	0,47	12,20	43,50	0,014	0,40	0,08	1,91	0,10	0,39
1168	36,03	0,44	11,70	40,63	n.d.	0,40	0,07	1,88	0,09	0,42
833	36,98	0,43	11,00	38,76	n.d.	0,30	0,07	1,82	n.d.	0,39
589	37,69	0,42	10,70	36,88	0,004	0,30	0,08	1,77	0,11	0,38
417	38,78	0,44	10,30	35,13	0,004	0,30	0,09	1,72	n.d.	0,44
295	39,67	0,50	10,50	33,18	n.d.	0,30	0,09	1,71	n.d.	0,48
210	40,39	0,77	10,10	31,53	0,007	0,30	0,11	1,70	0,09	0,40
149	42,76	1,42	10,00	31,39	0,014	0,30	0,12	1,69	0,10	0,40
105	40,59	2,75	10,60	31,36	0,028	0,30	0,13	1,74	0,07	0,38
74	38,29	4,22	11,40	30,68	0,022	0,40	0,16	1,81	0,08	0,40
53	44,55	3,48	9,76	29,10	n.d.	0,30	0,15	1,53	n.d.	0,38
44	43,42	2,15	10,30	25,48	n.d.	0,40	0,19	1,60	0,12	0,40
37	51,14	1,01	11,70	17,60	n.d.	0,30	0,18	2,07	0,12	0,37
20	52,39	1,02	11,80	17,35	n.d.	0,30	0,18	2,07	0,08	0,37
-20	39,08	0,83	22,40	22,18	0,014	0,50	0,12	4,15	0,21	0,37
Cabeça Composta	39,30	0,95	13,59	31,54	--	0,40	0,11	2,34	--	0,40

A Tabela 3 apresenta análises para alguns elementos menores que puderam ser quantificados, as análises de Au e Hg, e a distribuição destes elementos por fração. De acordo com os resultados apresentados na Tabela 3, constatou-se que a fração < 20  $\mu\text{m}$  (22,99% em peso da amostra original) apresenta um teor médio de 4,62 ppm de mercúrio e 2,9 ppm de ouro, o que corresponde a 61,91% do Hg e 51,89% do Au contido na amostra original. Com exceção dos finos, a distribuição do ouro é relativamente regular e acompanha a distribuição granulométrica, variando o teor de 0,48 a 1,3 ppm.

Tabela 3. Composição química das frações, por fluorescência de raios X, para elementos menores e a distribuição de Au e Hg pelas frações.

Peneira (µm)	SO <sub>3</sub>	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO	ZrO <sub>2</sub>	Au (ppm)	Hg (ppm)	Distrib. Au (%)	Distrib. Hg (%)
1651	0,10	1,11	0,054	0,01	0,021	0,69	0,4648	3,3	1,7
1168	0,10	1,08	0,048	0,01	0,021	0,52	0,5317	4,6	3,5
833	0,13	1,00	0,052	0,01	0,019	0,55	0,5838	4,4	3,5
589	0,15	1,04	0,049	0,01	0,018	0,67	0,7564	4,9	4,1
417	0,20	1,08	0,053	0,01	0,018	0,95	0,8387	4,5	3,0
295	0,26	1,14	0,030	0,01	0,018	1,2	0,9836	6,1	3,8
210	0,21	1,03	0,035	0,01	0,018	0,88	1,00	3,4	2,9
149	0,14	0,89	0,039	0,01	0,018	0,68	1,20	1,9	2,5
105	0,12	0,79	0,024	0,01	0,020	1,2	1,12	3,8	2,7
74	0,11	0,73	0,027	0,01	0,023	1,3	1,27	3,6	2,6
53	0,11	0,71	0,031	0,01	0,027	1,3	1,08	2,1	1,3
44	0,12	0,64	0,023	0,01	0,025	1,2	1,25	2,0	1,6
37	0,07	0,43	0,015	0,01	0,054	1,3	1,07	1,5	1,0
20	0,07	0,41	0,017	0,01	0,052	0,48	1,32	2,0	4,1
-20	0,39	0,60	0,037	0,02	0,046	2,9	4,62	51,9	61,9
Cabeça Composta	0,20	0,87	0,040	0,01	0,028	1,28	1,72	100	100

### 2.3. Caracterização da amostra

O objetivo principal desta parte trabalho foi quantificar ouro, e documentar a sua forma de ocorrência e associação. Neste sentido, foi empreendido um extenso trabalho de procurar o elemento ao MEV, particularmente nas secções polidas com produtos afundados, que incluiu programação automática do MEV para verificar presença de ouro por EDS para todos os pontos com níveis de cinza muito claros em imagens de elétrons retro-espalhados (ou seja, com número atômico elevado). Esta rotina não encontrou nenhuma partícula de ouro, apesar de ter verificado centenas de pontos.

Na análise manual, com operador, apenas uma inclusão de ouro foi identificada, com teor elevado de prata e incluída em monazita, fração + 37 µm afundado, como se observa no espectro de EDS e na imagem, Figura 2. Esta inclusão, no corte observado, tem dimensão da ordem de 300 x 500 nm.

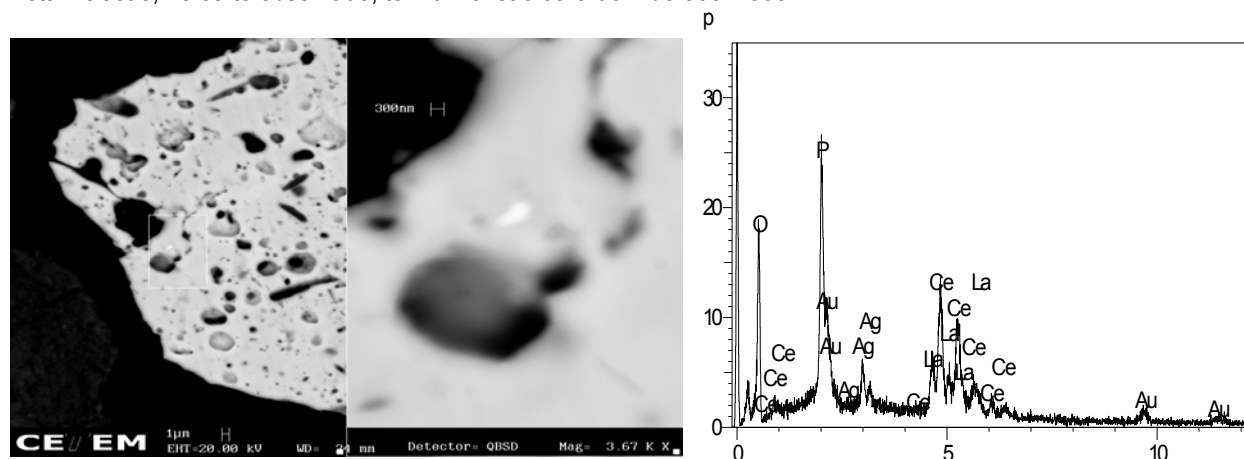


Figura 2. Finíssima inclusão de ouro (mais claro, com detalhe do lado direito) em monazita muito porosa.

#### 2.4. Ensaio em concentrador centrífugo Knelson

Fundamenta-se no princípio da força centrífuga. Consegue multiplicar até 60 vezes os efeitos da força gravitacional. O equipamento é constituído por um cone invertido com anéis circulares internos de diferentes alturas com paredes furadas que gira a alta velocidade. A força centrífuga faz com que as partículas formem uma camada de concentração nas paredes interiores do cone. As partículas de maior densidade ficam aprisionadas no leito do concentrador enquanto que as leves são levadas pelo fluxo. Ao injetar água sob pressão através de pequenos furos gera-se uma camada fluidizada, permitindo que as partículas de maior peso específico desloquem as de menor peso (rejeito). Após um tempo de operação, tem-se um concentrado de altíssimo teor que contém partículas micrométricas de alta densidade.

Nessa etapa, as subamostras de 1 kg foram submetidas ao processo de cominuição em moinho de disco, até atingirem um  $P_{80}$  a 74  $\mu\text{m}$  (200 malhas). Um tanque Denver com agitação foi usado para armazenar e alimentar a polpa, com 25% de sólidos, obtida a partir da agitação de 1,0 kg da amostra. A água de fluidização foi injetada no Knelson a uma pressão de alimentação de 2 L/min. No final da operação o concentrado que fica entre os anéis do cone concentrador foi coletado, secado e enviado para análises químicas. O rejeito obtido foi reprocessado por flotação.

#### 2.5. Ensaio de flotação

Flotação é o processo de separação de minerais que é conduzido em meio aquoso e na presença de bolhas de ar. Para que seja possível separar as espécies minerais presentes na suspensão aquosa, o processo faz uso de diferenças entre as energias livres (G) das interfaces envolvidas: sólido/líquido, líquido/gás e sólido/gás. A interface ar / água (bolhas de ar) é utilizada para efetuar a separação. Essas bolhas, ao abandonarem a fase aquosa, transportam as partículas hidrofóbicas para uma espessa camada de espuma que se forma no topo das células de flotação. O caráter hidrofóbico/hidrofílico dos minerais pode ser reforçado através da utilização dos reagentes de flotação, que são os coletores, depressores, ativadores, reguladores e espumantes (Filho, 2005).

Pelo fato da análise granulométrica ser homogênea nas frações  $> 20 \mu\text{m}$  e como a fração  $< 20 \mu\text{m}$  apresenta um teor médio de 4,62 ppm de mercúrio e 2,9 ppm de ouro, o que corresponde a 61,91% do Hg e 51,89% do Au contido na amostra original, decidiu-se não realizar nenhum tipo de corte na amostra original, ou seja, os testes de flotação foram realizados com toda a amostra original.

Para realizar os testes de flotação, as subamostras de 1 kg também foram submetidas ao processo de cominuição em moinho de disco, até atingirem um  $P_{80}$  a 74  $\mu\text{m}$  (200 malhas).

Os ensaios de flotação foram realizados em célula de bancada, marca Denver, utilizando-se uma cuba de 2 litros e amostras de 1000 g. O controle de pH foi efetuado através de um medidor digital da marca M.S. MISTURA. A velocidade de rotação foi de 1000 rpm. A adição de modificadores ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ) procedeu à dos coletores (amil xantato de potássio, AP 7249, AP 3473(CYTEC), NaMBT), e teve um tempo de condicionamento de 6 minutos. O tempo de condicionamento adicional do coletor foi de 5 minutos, logo após foi adicionado o espumante (Mibcol) com tempo de condicionamento de 1 minuto. O tempo de flotação foi estabelecido em 4 minutos.

Todos os reagentes utilizados nos ensaios de flotação em bancada foram de grau analítico e o preparo dos reagentes foi realizado com água destilada, bem como água de torneira na execução dos ensaios de flotação. Os ensaios foram realizados em triplicatas, tendo como objetivo avaliar a eficiência dos reagentes utilizados.

### 3. Resultados e discussões

A Tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios de flotação de mercúrio e ouro, visando a avaliação da eficiência dos reagentes utilizados.

De acordo com os resultados, pode ser observado que a recuperação de ouro (Au) e mercúrio (Hg) foi abaixo do esperado para o ensaio 2, uma vez que, apresentou uma recuperação de 30,64% Au e 24,54% Hg.

Também foram realizados ensaios variando os sistemas de reagentes, como se observa no ensaio 5, onde a recuperação de Au foi de 71,01% e a recuperação de Hg foi de 35,57%.

Tabela 4. Resultados obtidos nos ensaios de flotação

Ensaio	Reagentes Utilizados	Rec. Au (%)	Rec. Hg (%)
1*	AP 7249 - 10g/t / AP 3473 - 40g/t / Mibcol - 20g/t	82,60	38,73
2	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>4</sub> - 300g/t / Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> - 200g/t / Xantato-200g/t / Mibcol - 30g/t	30,60	24,54
3*	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>4</sub> - 300g/t / AP 3473 - 40g/t / Xantato - 200g/t / Mibcol - 20g/t	83,61	41,14
4	AP 7249 - 10g/t / AP 3473 - 40g/t / Mibcol - 20g/t	54,06	27,18
5	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>4</sub> - 300g/t / AP 3473 - 40g/t / Xantato - 200g/t / Mibcol - 20g/t	71,01	35,57
6*	NaMBT - 25g/t / AP 3473 - 25g/t / Mibcol - 20g/t	69,48	11,94
7*	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>4</sub> - 300g/t / Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> - 200g/t / Xantato-200g/t / Mibcol - 300g/t	71,52	15,47
8*	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>4</sub> - 300g/t / Hostafлот M92- 50g/t / Mibcol - 20g/t	70,30	13,39

\*ensaios com utilização do concentrador knelson

Dentre os ensaios de flotação realizados, os melhores resultados estão expostos na Figura 4.

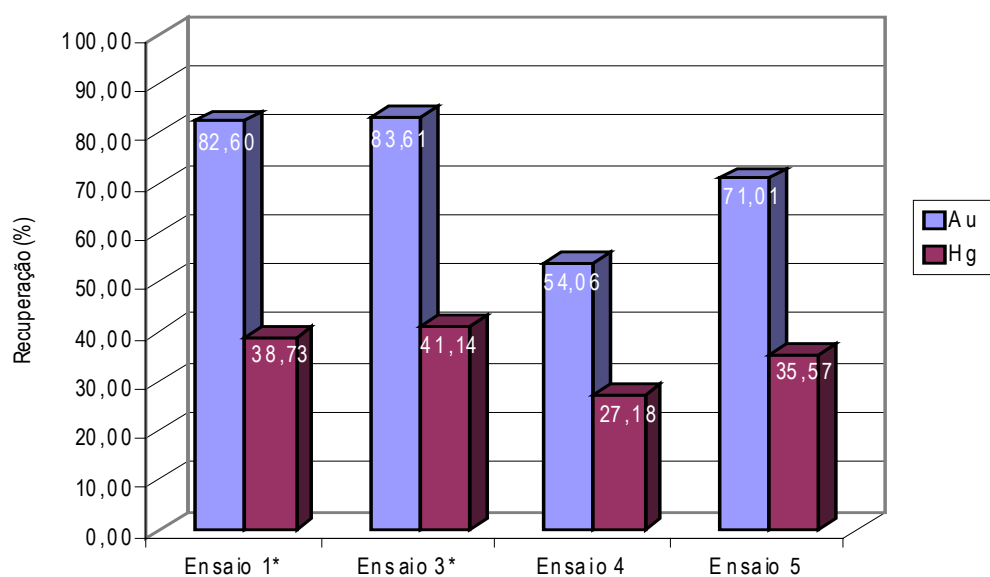


Figura 3. Gráfico da recuperação metalúrgica dos melhores ensaios de flotação.

De acordo com a Tabela 4, ainda pode-se observar que quando utilizamos o concentrador Knelson, sendo que os ensaios de flotação foram realizados com o rejeito do concentrador, a recuperação de Au e Hg melhoram significativamente chegando a 83,61% e 41,14% no ensaio 3, respectivamente.

A Figura 3 mostra a grande influência na utilização do concentrador Knelson para a recuperação, principalmente em relação ao ouro (82,60% e 83,60%).

#### **4. Conclusões**

O minério analisado é composto por quartzo, filossilicatos (principalmente muscovita e biotita), e óxidos e/ou hidróxidos de ferro, em geral contendo As. Como fases secundárias destacam-se ilmenita e os sulfetos pirita e arsenopirita. Muitos outros minerais foram identificados como traços, como zircão, monazita, xenotímio, zirkelita e galena, e outras até complicadas de serem identificadas, unicamente através de análise elementar por EDS ao MEV.

A análise granuloquímica indica que o ouro se concentra nos finos (abaixo de 20  $\mu\text{m}$ ), 52% do elemento em 23% da massa da amostra, com teor de 2,9 g/t. Com exceção dos finos, a distribuição do ouro é relativamente regular e acompanha a distribuição granulométrica, variando o teor de 0,48 a 1,3 ppm.

O mercúrio é ainda mais concentrado nos finos do que o ouro, contendo praticamente 62% do elemento nos mesmos 23% da massa, com teor de 4,62 ppm. Nas outras frações apresenta comportamento similar ao ouro, e o teor varia de 0,46 a 1,32 ppm.

Apenas uma partícula contendo ouro foi identificada por MEV neste minério. Trata-se de uma inclusão extremamente fina, de aproximadamente 300x500 nm no corte, em monazita. O espectro de EDS que confirma sua composição indica um elevado teor de prata. Considerando-se a distribuição do ouro por tamanho de partícula, e as dimensões desta inclusão, é lógico que se infira que o ouro é muito fino neste minério.

A etapa de concentração centrífuga Knelson é essencial ao processo de recuperação de Au e Hg. Mas, vale ressaltar que apenas a concentração centrífuga não é eficiente na recuperação de Hg, para que ocorra uma recuperação significativa do Hg o rejeito gerado no Knelson tem que ser submetido ao processo de flotação.

Os melhores resultados obtidos apresentaram recuperação de ouro e mercúrio da ordem de 83,61% e 41,14%, respectivamente, utilizando MIBC como espumante, como ativador  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ , amilxantato de potássio e AP 3473 (CYTEC) como coletores e flotação em pH 6,5.

A partir do procedimento de classificação utilizado, cerca de 41,14% do mercúrio pode ser concentrado em 30,67% da massa da amostra original. O material restante (69,33% em peso da amostra original), apresenta um teor de mercúrio relativamente baixo (< 1,50 ppm), que poderá retornar ao meio ambiente.

#### **5. Agradecimentos**

A autora agradece ao orientador Paulo Renato, ao CETEM pela estrutura laboratorial, à Marisa Bezerra de Mello Monte (COPM/SDPM), Reiner Neumann (COAM/SCT), aos técnicos Erick de Almeida Japor, Francky Roger

Araujo da Silva e ao CNPq pelo apoio financeiro.

## 6. Referências Bibliográficas

- CIPRIANI, M.; MIRANDA, J.G.; MÁRTIRES, R.A.C.; GIACONI, W.J. **Atividades garimpeiras no Brasil: aspectos técnicos, econômicos e sociais**. 1997, p.31-34.
- FILHO, L.S.L. **Flotação- Treinamento técnico especializado**. Belo Horizonte, MG, Brasil. 2005, p.1-19.
- MELAMED, R.; VILLAS BÔAS, R.C. **Mecanismos de interação Físico – química e mobilidade do Mercúrio em solos, sedimentos e rejeitos de garimpo de ouro**. 2002, p.13-14.
- TÁNNUS, M.B.; PIMENTEL, P.F.; CASTRO E SILVA, M.E.M.; MOREIRA, C.V.R.; OLIVEIRA, E.C. **Projeto Paracatu - Jornada Internacional sobre el impacto del mercurio utilizado por la minería aurífera artesanal en Iberoamérica**, Lima, Peru, 2001. Disponível em: <[www.gama-peru.org/jornada-hg/bartassonfaleiro.pdf](http://www.gama-peru.org/jornada-hg/bartassonfaleiro.pdf)> Acesso em: Jan. 2006.
- TRINDADE, R.B.E.; FILHO, O.B. **Extração de ouro- Princípios, tecnologia e meio ambiente**. 2002, 322p.