

**CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA, GEOQUÍMICA E POTENCIAL DE
VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO DE OURO (MINAS GERAIS,
BRASIL)****Mariana Lemos^{1,2}, Teresa Valente¹, Paula Marinho Reis^{1,3}, Rita Fonseca⁴, João Paulo
Pantaleão², Fernanda Guabiroba², José Gregorio Filho², Marcus Magalhães², Itamar
Delbem⁵**

¹Institute of Earth Sciences, Pole of University of Minho id8548@alunos.uminho.pt;
teresav@dct.uminho.pt, pmarinho@dct.uminho.pt

²Anglogold Ashanti, Mining & Technical, COO International, JGFilho@AngloGoldAshanti.com.br,
JPPantaleao@AngloGoldAshanti.com.br, FMGuabiroba@AngloGoldAshanti.com,
MFMagalhaes@AngloGoldAshanti.com.br

³GEOBIOTEC, Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro

⁴ Institute of Earth Sciences, Pole of University of Évora, rfonseca@uevora.pt

⁵Microscopy Center, Universidade Federal de Minas Gerais, ssgerais@microscopia.ufmg.br

RESUMO

Por mais de dois séculos, os minérios de ouro sulfetados foram tratados em plantas metalúrgicas localizadas em Minas Gerais, Brasil. Os resíduos foram acumulados ao longo dos anos em barragens de rejeitos ou em pilhas. Esses materiais representam rejeitos de circuitos metalúrgicos desativados, bem como rejeitos de plantas ainda em produção. Neste estudo, efetuou-se uma caracterização geoquímica, mineralógica e textural deste resíduos com o objetivo de avaliar o seu potencial de reutilização. A caracterização indica a presença de material de granulometria fina que hospeda quantidades substanciais de sulfetos, sulfatos e óxidos. As amostras mostram altos teores de Au hospedadas em diferentes minerais. Além do Au, as amostras contém S, Fe e As. Ensaio metalúrgicos para reutilização do Au mostram potencial de recuperação da ordem de 70%, além de potencial reuso em outras áreas como agregados para construção civil e recuperação de outros metais. Este trabalho destaca a importância da caracterização no âmbito da economia circular e o valor do resíduo na cadeia de produção do setor mineral.

PALAVRAS-CHAVE: geoquímica e mineralogia ambiental; rejeitos; economia circular

ABSTRACT

For more than two centuries, sulphide gold ores have been treated at metallurgical plants located in Minas Gerais, Brazil. Waste has accumulated over the years in tailings dams or in piles. These materials represent tailings from deactivated circuits, as well as tailings from plants still in production. In this study, a geochemical, mineralogical and textural characterization of this waste was carried out in order to evaluate its reuse potential. The characterization indicates the presence of fine-grained material that hosts substantial amounts of sulfides, sulfates and oxides. The samples show high grades of Au hosted in different minerals. In addition to Au samples contain S, Fe and As. Metallurgical tests for reuse of Au show recovery potential of around 70%, in addition to potential reuse in other areas such as aggregates for civil construction and recovery of other metals. This work highlights the importance of characterization within the scope of the circular economy and the value of waste in the production chain of the mineral sector.

KEYWORDS: environmental geochemistry and mineralogy; waste; circular economy

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um país que tem forte relação com a mineração, atualmente representando entre 3 a 5% do PIB. Essa proximidade é notada desde o final do século XVII, no início do primeiro ciclo do ouro. Em meados do século XVIII, o Brasil chegou a produzir aproximadamente a metade do ouro mundial, atraindo a imigração de cerca de 400.000 portugueses, principalmente na região de Minas Gerais e Goiás (Fig 1).



Figura 1 – Localização das principais barragens de Au no Brasil (fonte: FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente) – Destaque para pontos em preto para as áreas em estudo

Atualmente este setor movimenta outros através do suprimento da matérias-primas, de que são exemplo as indústrias da construção civil, automobilística, aeroespacial entre outras. Muito embora a sua importância seja relevante e estratégica para a economia, a geração de resíduos é significativa. As principais infra-estruturas de deposição destes resíduos são as barragens e depósitos (pilhas) de rejeitados. No entanto, estas estruturas de ouro podem constituir depósitos minerais com teores e características físicas distintas do minério explorado. Com a evolução e mudanças de mercado e tecnologia, estes resíduos podem assim proporcionar uma alternativa à exploração primária. Ou seja, o potencial económico do enorme volume de resíduos gerados pela mineração e processamento de minérios e os elevados impactos ambientais e riscos para a saúde humana (caso de numerosos desastres ambientais, ocorridos no Brasil nos últimos anos) são duas valências que justificam o interesse e a oportunidade do presente trabalho.

O trabalho foi realizado em barragens de rejeitados ativas e não ativas, bem como depósitos de minas exauridas na região das cidades de Santa Barbara e Nova Lima.

As áreas de estudos estão no Quadrilátero Ferrífero (QF), uma província metalogenética que hospeda grandes depósitos de ouro e ferro, além de gemas e minerais industriais (Porto 2008). O QF representa uma das unidades geotectônicas mais importantes com rochas e evolução geológica das idades Arqueana e Proterozóica (Almeida 1967). Três domínios tectonoestratigráficos principais compõem a província QF: terrenos granito-gnáissicos, uma sequência do tipo cinturão de pedras verdes (Supergrupo Rio das Velhas - SGRV) e uma sequência supracrustal de rochas sedimentares químicas e clásticas (Supergrupo Minas). O Greenstone Belt do Rio das Velhas, em grande parte localizado no Estado de Minas Gerais (Fig. 1a), é o distrito de ouro mais importante do Brasil, com uma estimativa de 4,5% (936 t) das reservas mundiais de minério (Goldfarb et al. 2001 ; Lobato et al. 2001b). De baixo para

cima, compreende rochas vulcânicas máficas toleíticas e komatiitos, formações ferríferas bandadas do tipo Algoma, xistos e filitos metavulcanoclásticos e sequências clásticas terrestres, todas metamorfoseadas em fácies xisto verde a anfibolito (Fig. 2; Almeida 1976). Os corpos mineralizados, hospedados em rochas arqueanas, são estruturalmente associados e controlados por alteração hidrotermal.

A barragem e pilhas de rejeitados de Santa Bárbara está localizada na parte norte do QF, em Santa Bárbara, Minas Gerais, a 110 km de Belo Horizonte. Resíduos de minas subterrâneas de usinas metalúrgicas de ouro foram depositados nesta estrutura desde 1986. As fontes de rejeitados destas estruturas possuem diferentes proveniências: a) a pilha de rejeitados derivada da planta de heap leach alimentada pelo minério explorado em lavras a céu aberto e oxidado (Fig 2c) e b) as barragens de rejeitados representadas por resíduos de uma planta de flotação e lixiviação, provenientes de minérios fresco da lavra subterrânea (Fig 2b).

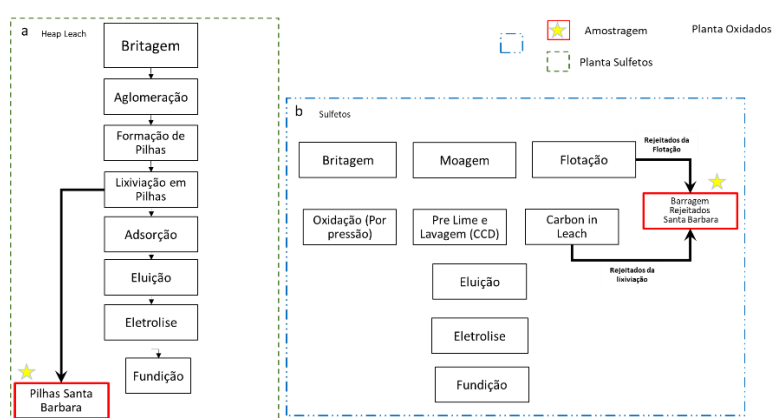


Figura 2 a) Localização áreas em estudo de Santa Barbara, b) localização das amostras coletadas no primeiro ano da barragem de rejeitados e c) plano de coleta das amostras das pilhas de rejeitados

As minas da região de Nova Lima não ativas e ativas, bem como depósito de rejeitados explorados desde o século antepassado. De 1834 a data atual, foram depositados resíduos de minas da região e estimam-se 107 toneladas de Au nestes depósitos (AGA 2018). As principais estruturas são:

1. Depósitos de rejeitados Isolamento;
2. Barragem não ativa da Mina de Bicalho;
3. Depósitos da Planta de Mina Velha;
4. Barragens ativas e não ativas da planta metalúrgica de Queiroz;

As barragens e depósitos de rejeitados desta região localizam-se na parte norte do QF, entre as cidades Nova Lima e Raposos, a 25 km de sua capital, Belo Horizonte. Nos depósitos de Mina Velha, Isolamento e Bicalho foram depositados inúmeros tipos de rejeitados de plantas antigas de ouro da região. Estimam-se que rejeitados de plantas do século passado estejam dispostos e podem representar processos de extração do Au antes da utilização de cianeto. Portanto, descrever o processo de extração com exatidão torna-se difícil (AGA 2019).

A planta de Queiroz trata minérios de ouro sulfetados há mais de trinta anos. Os materiais tratados na fábrica foram subdivididos em dois circuitos distintos. O circuito de Raposos (Fig

3a), planta que tratava minério de sulfeto não refratário (pirita, pirrotita e arsenopirita subordinada) oriundo principalmente das minas de Raposos. O circuito atingiu 90% de recuperação de Au e foi dividido em moagem, concentração de gravidade, lixiviação convencional e CIP (carbono em lixiviação), eluição e eletrorrecuperação. Esta parte da planta foi desativada em 1998 com a desativação da mina subterrânea de Raposos (Moura 2005 , AGA 2016).

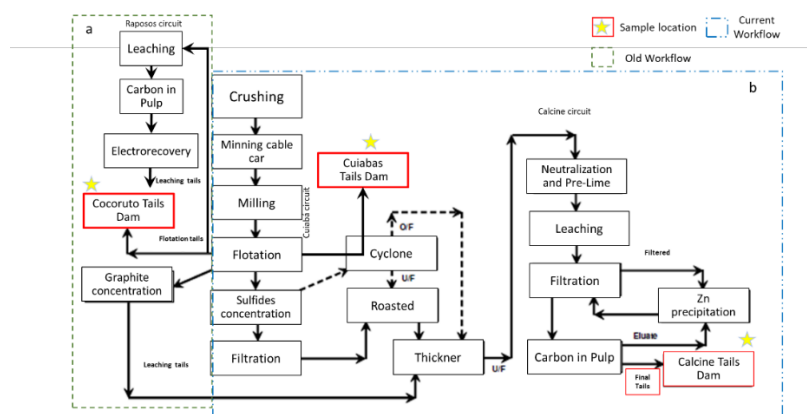


Figura 3a) Fluxograma de extração de Au desativado e b) atual

O presente estudo, portanto, vem ao encontro do conceito e objetivos da economia circular aplicada aos rejeitos do beneficiamento de ouro em Minas Gerais, Brasil. Os principais objetivos são (i) apresentar uma caracterização física, geoquímica e mineralógica integrada dos rejeitos sólidos; (ii) compreender a distribuição química e de teores e a extração metalúrgica de elementos de interesse na barragem de rejeitos. De modo geral, o estudo demonstra o potencial de recuperação de metais em um processo conceitualmente linear e visa contribuir para repensar os usos de rejeitos na mineração de ouro no Brasil e estender esse modelo para rejeitos ao redor do mundo, buscando uma visão de mineração sustentável.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A etapa de amostragem ocorreu durante o final do inverno e início da primavera (final de agosto até o final de setembro de 2021).

Um total de 123 amostras de sedimento foram coletadas com trado, perfurando até dois metros para análise química em profundidade. A distância entre as amostras variou de 13 a 20 metros dependendo da área de amostragem.

Em laboratório, a análise química foi realizada por espectroscopia de absorção atômica (AAS usando AAS280 FS Varian) para a determinação de Cu, As, Sb, S, Fe. O ensaio fire assay foi o procedimento utilizado para obter dados analíticos de ouro dos rejeitos.

Além dos dados geoquímicos, foram preparadas seções polidas para caracterização mineralógica. O estudo mineralógico foi realizado por meio de microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura (SEM- Field Electron and Ion Company -FEI) na UFMG, Belo Horizonte. As amostras foram analisadas em microscópio eletrônico FEI, Quanta 600 FEG, modo alto vácuo, acoplado ao software analisador automatizado (MLA – modo GXMAP e SPL-DZ) e ao sistema de microanálise EDS Espirit Bruker (20Kve).

Para avaliar o potencial de recuperação de metais como Au foram realizados diferentes cenários a depender da mineralogia do depósito (Fig 3).

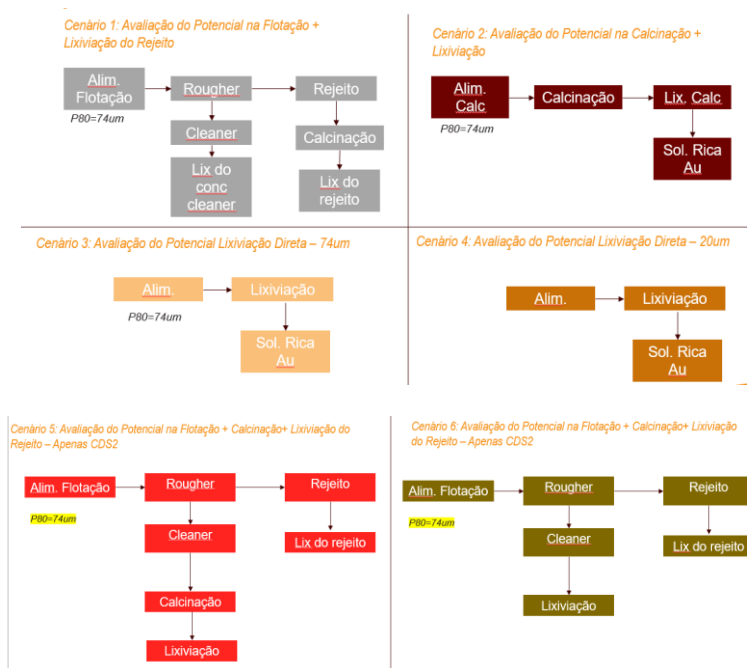


Figura 3. Fluxograma de trabalho para obtenção da recuperação de Au em laboratório escala de bancada para as amostras em estudo

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Geoquímica

Nos gráficos PCA para banco de dados levantado, sumarizam as diferenças químicas entre os resíduos em estudos (Fig 4). O Sb, Ti e K é o principal diferenciador das amostras sólidas de CDS2 (barragem Santa Barbara) e pilha CDS1 e demais amostras de rejeitados. O Fe, Cu, Zn, Pb e Au são assinaturas químicas destaques em calcinados, enquanto As é para pilha de isolamento. Cocoruto diferencia-se pela zona do Ca e C, juntamente com algumas amostras de Bicalho. A zona do P também marca diferenças nítidas entre os rejeitos de calcinado e Mina Velha. Portanto, tais diferenças químicas demonstram claramente a distinção de cada estrutura. Tal detalhamento é essencial para as demais etapas do trabalho como os estudo de reaproveitando e impactos/destinação destes resíduos.

3.2. Mineralogia

Na tabela 1, são expostos resultados das alimentações dos ensaios das estruturas em estudo.

Em geral, os minerais gangas são semelhantes entre as estruturas já estudadas (com exceção da barragem de calcinados). Porém, com diferenças expressivas entre carbonatos da estrutura de isolamento, composta por siderita e maior presença de minerais do grupo do feldspato para amostras de Crixás e Mina Velha. O principal silicato é o quartzo, encontra-se com inclusões de Au, principalmente para barragem de Cocoruto, Crixás e Mina Velha. As diferenças entre os tipos de sulfetos e associações com Au marcam a principal diferença mineralógica entre as estruturas. Enquanto a bertierita/ arsenopirita é a principal fonte de S da Barragem de Santa Barbara (CDS2), pirrotita/pirita/arsenopirita são abundantes nas estruturas de Cocoruto, Isolamento e Bicalho. Nestes sulfetos também foram descritos a presença de Au anexo e incluso.

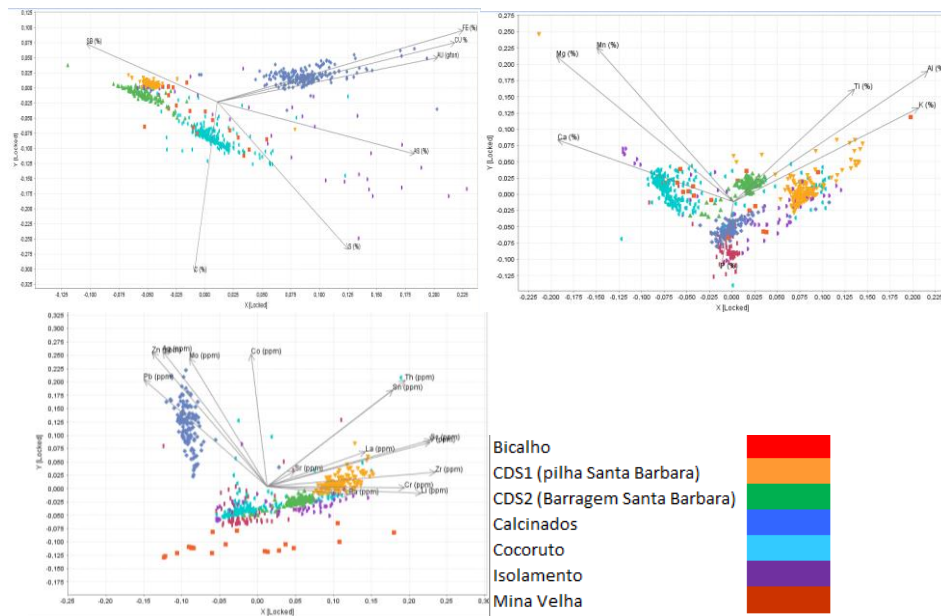


Figura 4. Gráficos PCA para todos os depósitos de resíduos em estudo . 1. Elementos de interesse, 2. Elementos maiores 3. Elementos Menores.

Para barragem de Santa Barbara também são observados óxidos e jarositas contendo alto teor de Sb. Tal fato também mostra que estes minerais são distintos dos demais depósitos. A presença de alto conteúdo de óxidos e jarositas nos rejeitados de Calcinados e Santa Barbara (CDS2) são devido as etapas de transformação em ustulador e autoclave para extração do Au nas plantas metalúrgicas. Os demais depósitos apresentam minerais mais comum entre si por se receberem resíduos da etapa de flotação que é uma etapa com baixo grau de transformação mineral.

3.3. Potencial de Valorização – Extração de Au

Para os ensaios acima, foram levantadas amostras compostas de cada estrutura e baseadas na distribuição dos teores de Au vertical e horizontal. Os resultados mostraram potencial de recuperação acima 70% para todos os depósitos a depender do cenário, com exceção da pilha de Santa Barbara e barragem calcinados (tab. 2).

Cocoruto, Bicalho e Isolamento apresentaram melhores resultados quando submetidas ao cenário 2 (Calcinação+lixiviação). Apesar de Calcinados apresentar melhores teores de Au no modelamento e estimativa, mostra-se totalmente desafiador extrair o Au nos pelos cenários estudados. Pilha de CDS1 apresentou baixa extração com os cenários estudados. As amostras de Mina Velha recuperaram mais de 90% do Au no cenário 3 (lixiviação com 74um). A barragem de CDS2 apresentou melhor performance no cenário 5 (flotação+Calcinação+lixiviação).

Cocoruto, Bicalho e Isolamento apresentaram melhores resultados quando submetidas ao cenário 2 (Calcinação+lixiviação). Apesar de Calcinados apresentar melhores teores de Au no modelamento e estimativa, mostra-se totalmente desafiador extrair o Au nos pelos cenários estudados. Pilha de CDS1 apresentou baixa extração com os cenários estudados. As amostras de Mina Velha recuperaram mais de 90% do Au no cenário 3 (lixiviação com 74um). A barragem de CDS2 apresentou melhor performance no cenário 5 (flotação+Calcinação+lixiviação).

XXIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa
Armação dos Búzios-RJ, 25 a 28 de Setembro de 2022

Tabela 1. Resumo estatístico da Mineralogia das Estruturas em Estudo

Minerais	Formula Química	Calcinados (Wt%)	Cocoruto (Wt%)	CDS2	Bicalho	Isolamento	CDS1	Mina
				(Barragem Santa Barbara) (Wt%)	(Wt%)	(Wt%)	Pilha (Wt%)	Velha (Wt%)
Quartzo	SiO ₂	15.6	55.8	35.6	31.57	36.65	34.18	37.83
Grupo Feldspato								
Albita	NaAlSi ₃ O ₈	1.5	0.37	1.11	5.33	2.81	0.07	7.56
Anorthita	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	0.053	0.01	0.053	-	0.01	0.07	0.03
K feldspato	KAlSi ₃ O ₈		0.39	1.27	0.12	1.22	1.18	0.73
Silicatos								
Biotita	KMg _{2,5} Fe _{2,0,5} AlSi ₃ O ₁₀ (OH) _{1,75} F _{0,25}	1	0.16	1.26	0.11	0.52	1.74	2.55
Smectita	(Si,Al)(Mg,Fe)O(OH)NaH ₂ O.	1.8	0.13	-	-	-	-	1.28
Muscovite	KA ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) _{1,9} F _{0,1}	11	5.56	29	6.53	20.58	38.46	27.57
Clorita	(Mg,Fe) ₃ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ (Mg,Fe) ₃ (OH) ₆	3.3	6.12	5.01	2.44	5.83	3.34	1.28
Oxidos								
óxido/hidróxido de Fe	Fe ₂ O ₃ /FeOOH	56.8	8.86	0.378	-	8.95	17.09	9.06
Fe antimoniato	FeSb(As)O			0.806	-	-	0.07	-
Rutilo/Anatásio	TiO ₂	0.599	0.49	0.599	0.19	0.56	0.29	0.60
Carbonatos								
Ankerita	Ca(Fe,Mg,Mn)(CO ₃)O ₂	1	11.2	9	16.84	0.85	0.02	1.49
Siderita	FeCO ₃	-	7.25	7.2	2.92	8.94	0.17	0.01
Dolomita								
Calcita	CaCO ₃	0.2	2.25	5.4	0.02	-	0.05	0.23
Sulfatos								
Jarosita (Sb)	KFe(SO ₄) ₂ (OH) ₆ & (H ₃ O)Fe(SO ₄) ₂ (OH) ₆	-	-	1.00	-	-	-	-
Gypsum	CaSO ₄ 2H ₂ O	7	0.03	2.00	-	-	-	-
Sulfetos								
Pirite	Fe ²⁺ S ₂	0.002	0.5	0.08	5.31	0.22	0.03	0.06
Pirrotita	Fe ^{2+0,95} S	0.004	0.79	0.041	2.06	4.7	-	0.148
Arsenopirita	Fe ³⁺ AsS	0.056	0.24	0.056	2.52	1.71	-	0.022
Berthierita	FeSb ₂ S ₄			0.141			-	-
Chalcopirita	CaMg(CO ₃) ₂			0.028	0.01	0.21	-	-
Gesdorffita	NiAsS	0.01	-		0.02	-	-	-
Covellita	CuS	0.1	0.07			0.01	-	-
Esfalerita	ZnS	-	0.01	0.009			-	-
Minerais de Au								
Au Nativo	Au>80%, Ag, Cu, Hg	526	364	158	45	60	20	2
Electrum	Au=80%, Ag=20%	42	10	6	8	5	5	1

* Numero de partículas de Au

Tabela 2 Resumo dos Resultados dos ensaios metalúrgicos de reaproveitamento

Estrutura	Localização	Cenário	Teor Au (g/t)	Recuperação Au	Outros potenciais de aproveitamento
Bicalho	Nova Lima	2	1.05	78	As, Sr, Areia, filler, gesso
Isolamento	Nova Lima	2	1.16	78	As, Areia, filler, gesso
Cocoruto	Nova Lima	2	0.87	80	As, Areia, filler, rock meal, fertilizantes
Calcinados	Nova Lima	3	2.40	32	As, Fe, Areia, filler, rock meal, fertilizantes
Mina Velha	Nova Lima	3	0.60	92	As

CDS1	Santa Barbara	4	0.43	49	As, Areia, filler
CDS2	Santa Barbara	5	0.75	71	As, Sb, Areia, filler, rock meal, fertilizantes

Na tabela 2, também são expostos um resumo preliminar da valorização de outros potenciais para as amostras estudadas. Todos estes dados são preliminares e baseados na mineralogia.

4. CONCLUSÕES

Os resultados mostraram características distintas entre cada estrutura e a importância deste entendimento tanto no âmbito ambiental e gestão de resíduos, bem como no potencial de reutilização e reaproveitamento. Apesar de preliminar, vários resíduos mostraram bom potencial para reaproveitamento em diversos setores e sugere-se que tal estudo continue nos próximos anos.

Em geral, todos os resíduos apresentaram potencial de reuso e boa recuperação para Au. É possível verificar semelhanças nos resultados de Bicalho, Cocoruto e Isolamento. Para os resultados da barragem de CDS2, recuperações acima de 70% foram alcançadas, porém prevista etapa de calcinação. Apesar de conter alto teor de Au, calcinados é o maior desafio tecnológico em relação a reuso. O mesmo é observado para a pilha de CDS1.

A caracterização dos sólidos de rejeitos revelou os teores e modos de ocorrência de elementos considerados em risco de fornecimento, como Au, Sb e As. Jarosita e antimoniato de Fe são fases hospedeiras relevantes.

Mesmo considerando que esses metais ocorrem em formas complexas e a recuperação de elementos como Sb, As e Au apresentaram baixos índices nos ensaios metalúrgicos preliminares, os resultados demonstram potencial de reaproveitamento ou refinamento do processo para melhor aproveitamento do recurso. Devem ser desenvolvidos esforços adicionais para um cálculo preciso de toda a barragem, o que permitirá uma avaliação mais precisa do potencial de recuperação em áreas enriquecidas e validar as aspirações no contexto da economia circular.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela FCT através do projeto com referência UIDB/04683/2020 e o projeto Nano-MINENV número 029259 e pela AngloGold Ashanti Brasil. Agradecemos aos nossos colegas do ICT, centro de microscopia da Universidade Federal de Minas Gerais (CM-UFMG) e da AngloGold Ashanti que forneceram insights e conhecimentos que auxiliaram muito a pesquisa. Os autores também são profundamente gratos aos revisores anônimos por seus valiosos comentários e sugestões.

6. REFERÊNCIAS

- Almeida FFM (1976) Estruturas do Pré-Cambriano Inferior Brasileiro. In: 29º Congresso Brasileiro de Geologia, 1976. Ouro Preto, Resumos SBG: 201-202.
- AngloGold Ashanti (2016) AngloGold Ashanti recommendations. Internal LGU report. Unpublished.
- AngloGold Ashanti (2019) AngloGold Ashanti recommendations. Internal LGU report. Unpublished.

- Goldfarb, R. (2001) Orogenic gold and geologic time: a global synthesis. *Ore Geology Reviews* 18, :1-75
- Lemos, MG, Magalhães MF, Souza TFQ, Pereira MS, Vieira MMS (2019) Geometallurgical analysis for increasing gold recovery – Santa Barbara, MG. In *n Proceedings World Gold 2019*: pp 210–218.
- Lobato LM, Ribeiro-Rodrigues LC, Vieira FWR (2001b) Brazil's premier gold province. Part II: geology and genesis of gold deposits in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. *Mineralium Deposita* 36:249–277
- . Moura W. Especificação de cianeto para redução do consumo no circuito de lixiviação de calcinado da usina do Queiróz. Dissertação de Mestrado. Dcpmlamento de Engenharia Metalúrgica c de Minas- UFMG- 138p. 2005.
- Porto C.G. (2008). A mineralização aurífera do depósito Córrego do Sítio e sua relação com o enxame de diques metamáficos no corpo CACHORRO BRAVO - Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais. MSc Thesis, Brazil, Universidade Federal de Minas Gerais .