

Mestrado Profissional

Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais

PRODUÇÃO TÉCNICA ITV DS

**CARACTERIZAÇÃO DO REJEITO DA MINERAÇÃO DE COBRE DA
MINA DO SOSSEGO-PA PARA AVALIAÇÃO DE POSSÍVEIS
IMPACTOS PARA A VEGETAÇÃO LOCAL**

JULIANO CUNHA NASCIMENTO

Belém – PA

2019

JULIANO CUNHA NASCIMENTO

**CARACTERIZAÇÃO DO REJEITO DA MINERAÇÃO DE COBRE DA
MINA DO SOSSEGO-PA PARA AVALIAÇÃO DE POSSÍVEIS
IMPACTOS PARA A VEGETAÇÃO LOCAL**

Relatório técnico apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais, na área de Ciências Ambientais, do Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável (ITV DS).

Orientador: Markus Gastauer, Ph.D.
Co-orientador: Silvio J. Ramos, Ph.D.

Belém – PA

2019

Título: Caracterização do rejeito da mineração de cobre da mina do Sossego-Pa para avaliação de possíveis impactos para a vegetação local.	
PROD. TEC. ITV DS N005/2019	Revisão
Classificação: () Confidencial () Restrita () Uso Interno (x) Pública	

Informações Confidenciais - Informações estratégicas para o Instituto e sua Mantenedora. Seu manuseio é restrito a usuários previamente autorizados pelo Gestor da Informação.

Informações Restritas - Informação cujo conhecimento, manuseio e controle de acesso devem estar limitados a um grupo restrito de empregados que necessitam utilizá-la para exercer suas atividades profissionais.

Informações de Uso Interno - São informações destinadas à utilização interna por empregados e prestadores de serviço

Informações Públicas - Informações que podem ser distribuídas ao público externo, o que, usualmente, é feito através dos canais corporativos apropriados.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

N244 Nascimento, Juliano Cunha.

Caracterização do rejeito da mineração de cobre da mina do Sossego-Pa para avaliação de possíveis impactos para a vegetação local / Juliano Cunha
Nascimento – Belém, 2019.
30 p.: il.

1. Mineração - Exploração - Carajás, Serra dos (PA). 2. Exploração - Impacto ambiental - Carajás, Serra dos (PA). 3. Mineração - Rejeitos - Carajás, Serra dos (PA). 4. Mina do Sossego - Carajás, Serra dos (PA).
I. GASTAUER, Markus. II. RAMOS, Silvio J.

CDD.23. ed. 622.4098115

JULIANO CUNHA NASCIMENTO

**CARACTERIZAÇÃO DO REJEITO DA MINERAÇÃO DE COBRE DA MINA DO
SOSSEGO-PA PARA AVALIAÇÃO DE POSSÍVEIS IMPACTOS PARA A
VEGETAÇÃO LOCAL**

Relatório técnico apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais, na área de Ciências Ambientais, do Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável (ITV DS).

Data da aprovação:

Banca examinadora:

Markus Gastauer, Ph.D.
Orientador – Instituto Tecnológico Vale (ITV)

Silvio J. Ramos, Ph.D.
Co-orientador – Instituto Tecnológico Vale (ITV)

Dr. Rafael Guedes
Membro interno – Instituto Tecnológico Vale (ITV)

Dr. Antonio Rodrigues Fernandes
Membro externo – Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Dedico este trabalho a minha esposa, filha e
minha família, razões pelas quais sigo buscando
sempre o melhor de mim.

AGRADECIMENTOS

A Deus, a Ele sempre meu primeiro agradecimento, por sempre estar comigo e me mostrar o caminho, meu maior Amigo e Companheiro fiel.

As mulheres da minha vida, minha esposa, filha, mãe, irmã e sobrinhas, pela delicadeza das palavras, pela firmeza do amor, pelos abraços, beijos e afagos que fazem me sentir mais vivo.

Aos homens, meu pai, irmãos, sobrinhos, cunhado e padrasto, pelos ensinamentos, pelos exemplos, pelas brincadeiras e momentos de descontração. Vocês ajudaram a moldar o que sou.

Ao meu ex-gerente Carlos Mauricio, um grande gestor e amigo, por ter me apresentado a esta oportunidade e por acreditar no meu profissionalismo. Da mesma forma ao meu atual gerente Túlio Arantes, pelo incentivo e apoio para continuidade desse trabalho.

Ao meu orientador Markus, pelos ensinamentos, paciência, compreensão e apoio ao longo desses dois anos, que me possibilitaram chegar a conclusão desse trabalho.

Ao meu co-orientador Silvio, pelo suporte, colaboração, materiais e pelas palavras, principalmente aquelas do seminário I, que me ajudaram de forma significativa a chegar a esse momento.

A Vale, por propiciar oportunidades como esta. Também a equipe dos laboratórios do Sossego, Salobo e Carajás.

Agradeço também a todos os demais, não citados aqui, parentes, amigos e colegas, que tiveram sua parcela de contribuição na concretização deste momento, vocês sabem o quanto foram importantes.

Ninguém é bom demais. Ninguém é bom sozinho.

RESUMO

A mineração promove desenvolvimento socioeconômico em diversos países. No caso do Brasil, esta atividade se torna grande protagonista, em função do potencial do solo nacional, caracterizado por seu diferencial e riqueza, sendo considerada um dos setores básicos da economia brasileira, entre as substâncias exploradas destacam-se o minério de ferro, o cobre, o ouro, o alumínio. Entretanto, a exploração inadequada de minérios pode representar possíveis fontes de contaminação ambiental, principalmente em depósitos sulfetados, onde a atividade pode expor à atmosfera os sulfetos confinados que, ao entrarem em contato com a água e ar, sofrem oxidação catalisada por bactérias. Assim, é importante conhecer e minimizar os impactos que esta atividade e seus produtos provocam, proporcionando um meio ambiente adequado para as futuras gerações. O presente estudo avaliou os teores totais de 50 elementos químicos em amostras provenientes da produção de concentrado de cobre oriundo da mina do Sossego região de Carajás, sudeste do Estado do Pará, sendo estas: 1) material utilizado para alimentar a flotação (ROM - *Run of mine*); 2) produto final do concentrado de Cu; e 3) rejeito da barragem. As coletadas foram realizadas no período de 2017 e 2018. As amostras foram analisadas por difração de raios X (DRX) e espectrometria de massa por plasma acoplado indutivamente (ICP-MS). O rejeito foi submetido também a análise química e granulométrica. Os resultados observados nesse estudo apontam que as amostras de alimentação da flotação e o rejeito são semelhantes na composição mineral e química. O concentrado de Cu apresentou como principal matriz mineral a calcopirita, relacionados a elevados valores de Cu. A comparação das concentrações de As, Ba, Cd, Cr, Hg, Pb, e Sb com de valores de referência de qualidade de solo (VRQ), valores de prevenção (VP) e valores de intervenção industrial (VII) indicam baixo risco ambiental. Este estudo também apontou que o rejeito da mina de Cobre do Sossego apresenta atributos favoráveis para o crescimento de plantas, tais como alta disponibilidade de P, K, S, B, Mn e Cu.

Palavras-chave: Concentração de cobre. Rejeitos. Elementos-traço.

ABSTRACT

Mining promotes socioeconomic development in several countries. In the case of Brazil, this activity becomes a major player, due to the potential of the national soil, characterized by its differential and wealth, being considered one of the basic sectors of the Brazilian economy. Among the substances explored, iron ore, copper, gold, aluminum. However, inadequate exploitation of ores may represent possible sources of environmental contamination, especially in sulfide deposits, where the activity may expose to the atmosphere confined sulphides which, upon contact with water and air, undergo bacterial oxidation. Thus, it is important to know and minimize the impacts that this activity and its products cause, providing an adequate environment for future generations. The present study evaluated the total contents of 50 chemical elements in samples from the copper concentrate production from the Sossego mine region of Carajás, southeast of the State of Pará. These are: 1) material used to feed flotation (ROM - Run of mine); 2) final product of the Cu concentrate; and 3) tailings from the dam. The samples were collected in the period 2017 and 2018. The samples were analyzed by X-ray diffraction (XRD) and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The tailings were also submitted to chemical and granulometric analysis. The results observed in this study indicate that the flotation feed samples and the tailings are similar in mineral and chemical composition. The concentrate of Cu presented as the main mineral matrix to chalcopyrite, related to high Cu values. The comparison of the concentrations of As, Ba, Cd, Cr, Hg, Pb, and Sb with reference soil quality values (VRQ), prevention values (PV), and industrial intervention values indicate low environmental risk. This study also pointed out that the reuse of the Sossego Copper mine presents favorable attributes for plant growth, such as high availability of P, K, S, B, Mn and Cu.

Keywords: Copper concentration. Tailings. Trace elements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da mina do Sossego.....	12
Figura 2 - Praia de rejeitos da mina do Sossego.....	13
Figura 3 - Pontos de amostragem do rejeito.....	17
Figura 4 - Fluxograma de processo da usina do Sossego.....	18
Figura 5 - Barragem e disposição do rejeito do cobre da mina do Sossego.....	19
Figura 6 - Difratoograma de raios-X da alimentação da flotação (A), do concentrado de Cu (B) e do rejeito da barragem (C). Clc-Clinocloro; Phl-Flogopita; Ms-Muscovita; Tlc-Talco; Act-Actinolita; Kln-Caulinita; Spl-Espinela; Ab-Albita; Cal-Calcita; Mc-Microclina; Qtz-Quartzo; Ccp-Calcopirita.....	22

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Geoposicionamento das amostras de rejeito	17
Tabela 2 - Análise química por ICPMS dos materiais da mina de Cu do Sossego	23
Tabela 3 - Valores médios obtidos na barragem de rejeitos da mina do Sossego-PA e valores de referência de qualidade (VRQ), prevenção (VP) e de intervenção industrial (VII) da CETESB, CONAMA e FERNANDES.....	26
Tabela 4 – Atributos químicos e físicos do rejeito de Cu da Barragem do Sossego, teores disponíveis.....	27

SUMÁRIO

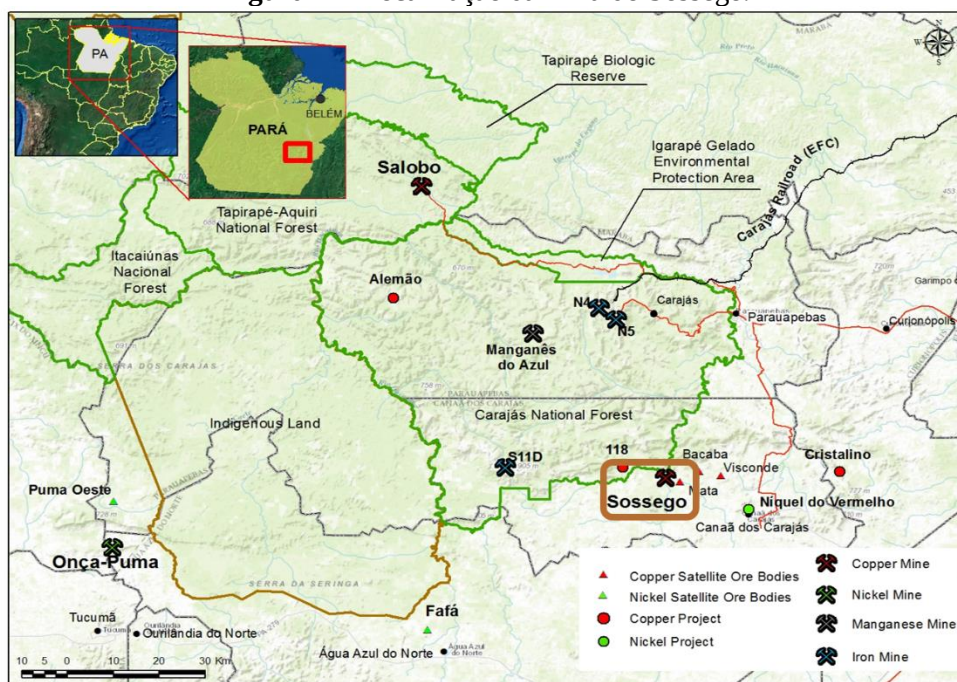
1	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS	12
2	OBJETIVOS	16
2.1	OBJETIVOS GERAIS	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	MATERIAIS E MÉTODOS	17
3.1	MATERIAIS DE ESTUDO	17
3.2	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA.....	20
3.3	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	20
3.4	ANÁLISE QUÍMICA PARA FINS DE FERTILIDADE	21
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	22
4.1	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA.....	22
4.2	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	23
4.3	CLASSIFICAÇÃO DE RISCOS AMBIENTAIS ORIGINADOS DOS REJEITOS	25
4.4	ANÁLISE DE FERTILIDADE.....	26
5	CONCLUSÕES.....	28
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS

A mineração é uma atividade base para o desenvolvimento humano desde os primórdios, pois possui a capacidade de viabilizar matérias-primas para diversas áreas (agricultura, medicina, construção civil, engenharias, etc.). No Brasil, a produção mineral é concentrada, principalmente, nos estados de Minas Gerais e Pará (86,9%). No ano de 2016, as substâncias da classe dos metálicos responderam cerca de 77% do valor total da produção comercializada (DNPM, 2017). Dentre essas substâncias, destacam-se: alumínio, cobre, estanho, ferro, manganês, nióbio, níquel e ouro.

A mina do Sossego, localizada no município de Canaã dos Carajás, sudeste do Pará (Figura 1), foi a primeira unidade de extração de cobre da empresa Vale S. A., com operações iniciadas em 2004 e com capacidade de produção de 110 mil toneladas de cobre contido em concentrado por ano (VALE, 2015). Esta mina apresenta como principal mineral a calcopirita (CuFeS_2), um mineral sulfetado de cobre e ferro (SILVA, 2005).

Figura 1 - Localização da mina do Sossego.



Fonte: Arquivo Vale (2012).

O processo de concentração de cobre sulfetado, presente nas cavas da mina do Sossego, consiste numa série de processos físicos e químicos para a separação dos minerais que resultarão num concentrado com teor significativo de cobre e de minerais sem interesse econômico (rejeito). O método de extração e beneficiamento passa pela fragmentação, moagem, classificação e concentração. Nessas fases são gerados grandes volumes de rejeitos, que são depositados em uma barragem construída para sua retenção (Figura 2) e de onde é retirada a

água utilizada no processo (SOARES, 2010). Adicionalmente, nas minas de cobre, existem grandes pilhas de rochas estéreis dispostas a céu aberto com milhares de toneladas de rocha triturada. Estas pilhas formadas na própria mina com minério bruto apresentando teor de cobre inferior a 0,3 %, torna inviável seu processamento (VASCONCELOS, 2012). A acumulação dos rejeitos gera uma degradação ambiental naquele local e o primeiro efeito é a poluição visual, de fácil constatação, principalmente em atividades extrativistas a céu aberto (SILVA, 2007).

Figura 2 - Praia de rejeitos da mina do Sossego.



Fonte: Arquivo Vale (2018).

Devido a sua capacidade modificadora do ambiente, as atividades de mineração devem ser geridas de forma responsável e sustentável. Para isso, vários setores e profissionais atuam antes, durante e após as atividades de extração e beneficiamento dos minérios. Uma das etapas deste processo de gestão é acompanhar as transformações e rota dos elementos presentes em cada uma das fases do processo produtivo. Isso é necessário para subsidiar a tomada de decisão sobre quais ações devem ser tomadas para se maximizar os benefícios, reduzir os impactos ambientais e, se necessário, recuperar áreas que foram degradadas.

O processo de vegetação da barragem de rejeitos, apesar de não ser uma condicionante no plano de fechamento da mina do Sossego, pode ser considerada mais uma alternativa de reaproveitamento, pelas empresas mineradoras, em seus planos de resgate de áreas degradadas. Portanto, é de grande importância o conhecimento das características químicas, físicas e mineralógicas dos materiais que irão ser utilizados como substrato para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Bem como devem ser identificadas previamente as características benéficas e, ou, aquelas adversas para essas plantas (DIAS, 1998; SILVA *et al.*, 2004).

As plantas precisam de elementos essenciais para completar seu ciclo de vida. Segundo Malavota (1980), para que um dado elemento seja considerado essencial, ele precisa cumprir alguns critérios: a) participar de algum composto ou reação sem o qual a planta não sobrevive; b) em sua ausência a planta não completa seu ciclo de vida; c) o elemento não pode ser substituído por outro; d) o efeito de ação deve ser direto na planta, não exercendo apenas o papel de neutralizar efeitos desfavoráveis. De acordo com Furlani (2004) são considerados hoje como elementos essenciais às plantas: carbono (C), oxigênio (O), hidrogênio (H), nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdênio (Mo), níquel (Ni) e zinco (Zn).

Contribuindo também para as necessidades do solo e das plantas, a matéria orgânica (MO) tem o poder de influenciar positivamente as características físicas (densidade, porosidade), químicas (liberação e fixação de nutrientes, regulação do pH, etc.) e biológica (fonte de alimento e substrato para o desenvolvimento de micro-organismos, etc.) do solo. Assim, importante a sua utilização na composição de substratos adequados ao crescimento vegetal.

Vale destacar que espécies nativas tem exigências nutricionais diferentes, adaptadas as condições e fornecimento de nutrientes disponíveis nos solos da região da canga da Flona de Carajás. Logo, nem sempre a presença de elementos químicos, incluindo metais pesados, em teores elevados podem caracterizar riscos ao desenvolvimento de espécies, e ainda, algumas espécies podem apresentar comportamento fitorremediador quando inseridas em solos com teores além daqueles informados na classificação agrônômica mostrada por Furtini *et al.* (2001).

O termo metal pesado designa elementos com densidade superior a 5 kg dm³, mas esse termo vem sendo gradualmente substituído por outros termos como elementos-traço, tóxicos ou potencialmente tóxicos, uma vez que outros elementos como o As e Sb, que não são contemplados por esta definição, também são preocupantes (MANDAL, SUZUKI, 2002; LI *et al.*, 2018). Alguns estudos com elementos-traço apontam a preocupação ambiental para a concentração dos elementos As, Ba, Cd, Cu, Hg, Pb e Zn (RODRIGUES *et al.*, 2010; BIRANI *et al.*, 2015; FERNANDES *et al.*, 2018; SOUZA *et al.*, 2019).

Por fim, considerando os impactos ambientais e a onerosa barragem de rejeito da mina do Sossego, juntamente com as constantes atualizações e revisões de normas ambientais faz-se necessário buscar constantemente uma mineração cada vez mais sustentável, com adequada gestão de resíduos minerais. Estudos de reaproveitamento de resíduos são cada vez mais

importantes para criar parâmetros de acompanhamento e analisar a viabilidade da utilização de materiais descartados em diversas aplicações que beneficiem não somente o meio ambiente, mas também as pessoas, comunidades locais, os negócios e as gerações futuras.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

Objetivo deste estudo foi verificar as rotas de diferentes elementos químicos durante o processo da flotação de minério de cobre, da mina de Sossego - PA, e avaliar a possibilidade de utilização do rejeito deste processo como substrato para processo de vegetação da barragem.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Verificar a variação da concentração de metais e elementos-traço nos materiais da mina do Sossego, devido ao processo de cominuição e flotação.

Avaliar se o processo de beneficiamento do Cu altera as fases minerais dos materiais antes e após a flotação e no rejeito da barragem.

Comparar os teores de elementos-traço no rejeito de Cu da barragem da mina do Sossego com valores orientadores de qualidade dos solos.

Avaliar a composição química do rejeito da mineração de Cu para fins de fertilidade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras foram coletadas em vários pontos da praia de rejeitos de uma mina de Cobre (Cu), pertencente a VALE, e caracterizadas quanto a sua composição mineralógica, química e seus atributos químicos para fins de fertilidade.

3.1 MATERIAIS DE ESTUDO

Neste trabalho foram utilizadas amostras da mina de Cu do Sossego, localizada no município de Canaã dos Carajás, região sudeste do estado do Pará - Brasil. Os materiais foram coletados nas seguintes etapas: 03 amostras de ROM do amostrador da alimentação da usina, 03 amostras de concentrados de Cu (produtos) coletadas no galpão da filtragem e 05 amostras do rejeito, a profundidade entre 0 a 30 cm, depositados na barragem da usina, apresentados na Figura 3 e Tabela 1.

Figura 3 - Pontos de amostragem do rejeito.



Fonte: Google Maps

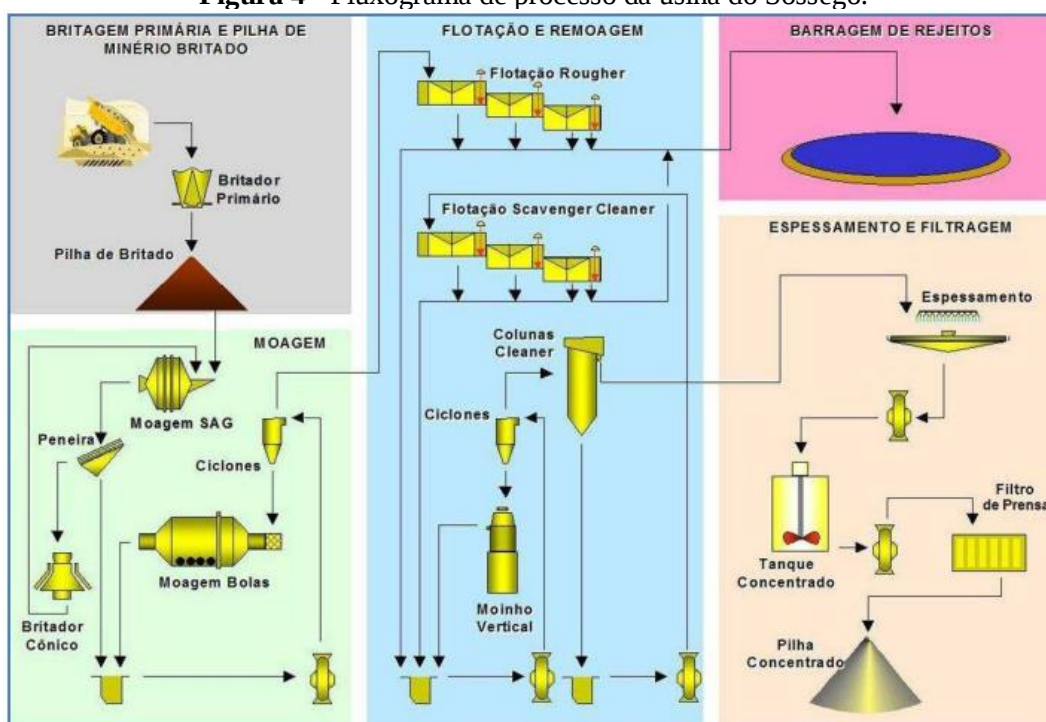
Tabela 1 - Geoposicionamento das amostras de rejeito

	S	W
P1	6°27'11.7"	50°04'49.4"
P2	6°27'09.3"	50°04'46.7"
P3	6°27'09.1"	50°04'47.2"
P4	6°27'10.0"	50°04'47.3"
P5	6°27'10.7"	50°04'48.1"

Fonte: Próprio autor

A mina de Cu do Sossego compreende um complexo mineiro para lavra, beneficiamento de minério de Cu, transporte do concentrado de Cu produzido e a estocagem do rejeito em barragem. No processo de beneficiamento e produção de concentrado de Cu, encontra-se: 1) um circuito de cominuição (um moinho SAG, dois britadores *Pebbles* e dois moinhos de bolas), o qual é responsável por assegurar a granulometria e porcentagem de sólidos adequados no material que alimenta; 2) o processo de flotação (estágios de *rougher*, *scavenger* e *cleaner*); 3) a remoagem (moinhos verticais), 4) espessamento; e 5) filtragem do concentrado, como mostrado na Figura 4 (BERGERMAN, 2009) .

Figura 4 - Fluxograma de processo da usina do Sossego.



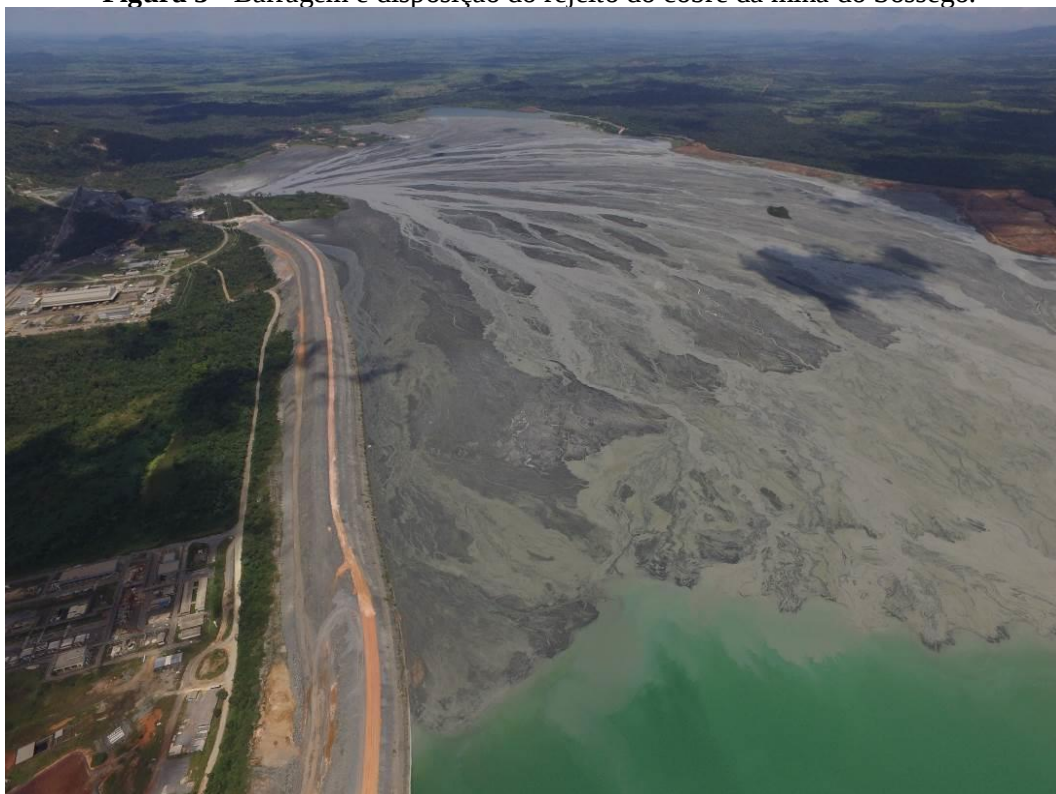
Fonte: Bergerman (2009)

O minério que alimenta a planta de moagem contém aproximadamente 1% de Cu, desta quantidade mais de 90% do Cu é recuperado durante a operação de processamento de minério, sob forma de concentrado de flotação, contendo em média 30% de Cu (SILVA, 2005; BERGERMAN, 2009). No processo de flotação, uma grande parte do ROM, com baixo teor de cobre e sem interesse na exploração comercial imediata, são considerados rejeitos e vão para a barragem, conforme dados do laboratório situado na própria mina do Sossego.

A barragem de rejeitos (Figura 5) tem capacidade atual de 154 MM m³ e destes 103 MM m³ já são ocupados pelo rejeito gerado no processo de beneficiamento, conforme dados disponibilizados pela empresa Vale, da área de geologia do Sossego. O levantamento realizado

em outubro de 2017 junto ao laboratório deste site mostra que de janeiro até outubro de 2017, já foram lançados 3 MM m³ de rejeitos.

Figura 5 - Barragem e disposição do rejeito do cobre da mina do Sossego.



Fonte: Arquivo Vale (2018).

Em 2005, a Vale realizou ensaios para classificação dos rejeitos da usina de beneficiamento de minério da mina do Sossego. As amostragens e as análises foram realizadas pela empresa Cetrel S.A., compreendendo amostras do rejeito de beneficiamento de cobre, referentes a dois pontos de coleta, no qual um situado na saída da tubulação de rejeitos e o outro localizado na praia de rejeitos da barragem.

Foram analisados os seguintes parâmetros: arsênio, bário, cádmio, chumbo, cromo total, fluoreto, mercúrio, prata, selênio, alumínio, cianeto, cloreto, cobre, ferro, manganês, nitrato, sódio, sulfato, surfactantes, zinco e 2,4,5-TP (pesticidas).

Para as amostras de rejeito da saída da tubulação, dos parâmetros analisados, nenhum se apresentou em desacordo com os padrões de solubilização e de lixiviação da NBR 10004/2004. De acordo com os laudos da Cetrel (2005), o rejeito da saída da tubulação foi classificado como Resíduo Classe II B - Resíduo Inerte.

Para as amostras do rejeito da praia apenas os parâmetros alumínio e ferro apresentaram-se em desacordo com os padrões de solubilização da NBR 10004/2004. Dos parâmetros analisados, nenhum se apresentou em desacordo com os padrões de lixiviação. De acordo com os laudos da Cetrel (2005), o rejeito da praia foi classificado como Resíduo Classe II A - Resíduo Não Inerte.

3.2 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

Para a realização das análises mineralógicas as amostras coletadas foram secas ao ar, pulverizadas e passadas em peneira de nylon de 150-mesh. Todas as amostras coletadas foram submetidas à difração de raios X, pelo método do pó (KLUG; ALEXANDER, 1974) para a determinação das fases minerais.

3.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

Para a realização das análises químicas as amostras coletadas foram secas ao ar, pulverizadas e passadas em peneira de nylon de 150-mesh. Em seguida, fez-se a extração em água régia (HNO₃:HCl 1:3), na proporção de 0,5 g de cada amostra para 5 ml de água régia. As amostras permaneceram em repouso por 16 h, visando a pré-digestão.

Posteriormente, iniciou-se a digestão no bloco digestor com a elevação gradual da temperatura a 180 °C. As amostras foram digeridas até a redução de volume para, aproximadamente, 1 mL de ácido. Este processo foi repetido enquanto observou-se o clareamento do extrato. Em seguida, as amostras foram retiradas do bloco, resfriadas em temperatura ambiente e o extrato digerido teve seu volume completado para 10 mL com água bidestilada. Finalmente, o extrato foi filtrado com membrana celulósica com 0,45 µm de diâmetro e transferido para frasco tipo Falcon de 55 mL.

Após a etapa de digestão, os extratos foram submetidos à análise multielementar para determinação dos teores de prata (Ag), arsênio (As), ouro (Au), bismuto (Bi), cádmio (Cd), cobalto (Co), cobre (Cu), ferro (Fe), germânio (Ge), índio (In), molibdênio (Mo), níquel (Ni), chumbo (Pb), rênio (Re), enxofre (S), antimônio (Sb), selênio (Se), telúrio (Te), tálio (Tl) e zinco (Zn). Já os elementos que possuem teores no rejeito semelhantes aos da matéria-prima, mas maiores que no concentrado são: Alumínio (Al), bário (Ba), cálcio (Ca), cério (Ce), césio (Cs), gálio (Ga), potássio (K), lantânio (La), magnésio (Mg), manganês (Mn), sódio (Na), fósforo (P), rubídio (Rb), escândio (Sc), estanho (Sn), estrôncio (Sr), titânio (Ti), vanádio (V),

ítrio (Y) e zircônio (Zr). Exceções as duas tendências acima apresentadas são observadas para berílio (Be), cromo (Cr), nióbio (Nb), tântalo (Ta), tório (Th), urânio (U) e tungstênio (W), em espectrometria de massa por plasma acoplado indutivamente (ICP-MS).

3.4 ANÁLISE QUÍMICA PARA FINS DE FERTILIDADE

Os atributos químicos e granulométricos do rejeito da mina de Cu foram determinados conforme Embrapa (2017). O pH do solo foi determinado por meio de potenciometria. A matéria orgânica (MO) foi estimada pelo método de Walkley-Black. O fósforo (P), potássio (K) e micronutrientes disponíveis foram extraídos pelo Mehlich-1. O teor de P foi determinado por colorimetria, o K por fotometria de chama e os micronutrientes por ICP-MS. O Ca, Mg e o Al trocáveis foram extraídos por KCl e a determinados por ICP-MS.

Os teores semi-totais mais preocupantes do ponto de vista ambiental (As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Pb, Sb e Zn) foram comparados com os valores orientadores de qualidade do solo estipulados pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB (2016), pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA (2009) e por Fernandes *et al.* (2018). É importante ressaltar que os valores orientadores do CONAMA (2009) correspondem aos mesmos valores das concentrações de prevenção e de intervenção industrial descritas em CETESB (2016), à exceção do Ba e do Zn, cabendo a cada Estado estipular seus próprios valores de referência com base nos seus respectivos backgrounds pedogeoquímicos. Neste sentido, a CETESB (2016) possui um background estabelecido para o Estado de São Paulo, e pode ser utilizada para comparação no estado do Pará conforme IN 11 de 2011 da Secretaria do Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Pará - SEMAS (2011). Entretanto, Fernandes *et al.* (2018), apresentou um trabalho de grande importância para o estado, com a elaboração da lista de valores de referência de qualidade do solo para o estado do Pará. Assim, também utilizamos tais valores para comparação com os teores obtidos para o rejeito.

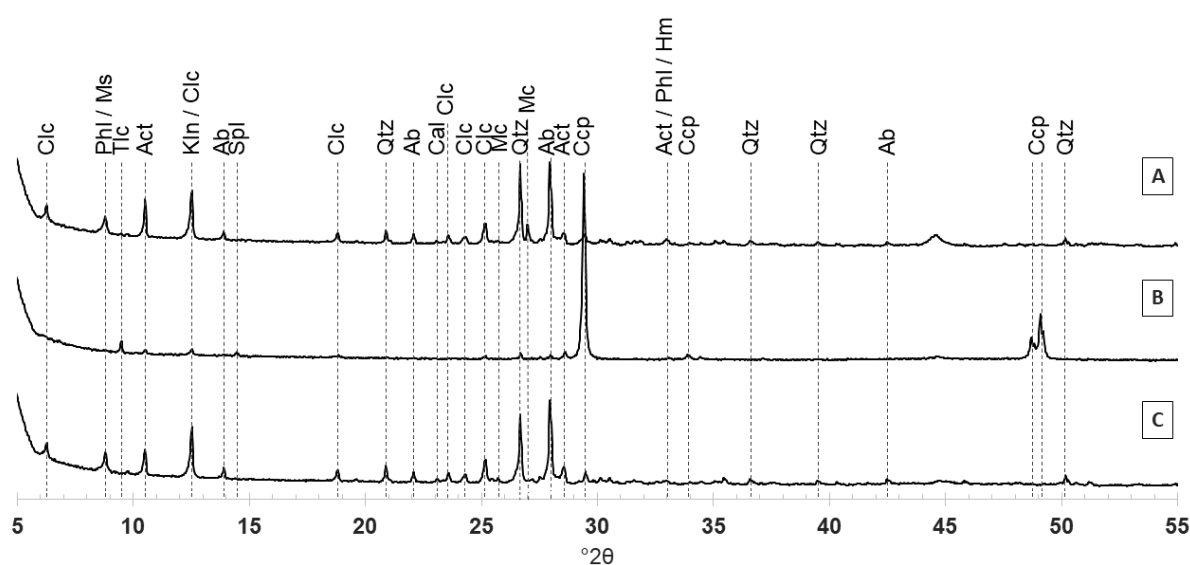
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados das caracterizações mineralógica e química, seus principais minerais, teores dos elementos analisados, as alterações resultantes do processo de flotação, a avaliação de alguns elementos-traço do rejeito, comparando-os com valores ambientais, além da análise de fertilidade, apresentando os principais atributos químicos e físicos do rejeito de Cu da Barragem do Sossego.

4.1 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

A composição mineralógica das amostras da alimentação do sistema de flotação, do concentrado de Cu e do rejeito do processamento de Cu do Sossego estão apresentadas na Figura 6. A amostra de alimentação da flotação e o rejeito apresentaram como principais minerais: o quartzo, albita, caulinita e actinolita. Também verificado por Monteiro *et al.* (2008) e Shimizu *et al.* (2012), que estudaram minérios da mina Sossego. Observa-se alta similaridade das fases minerais entre o rejeito e sua respectiva matéria-prima. Esse resultado é devido ao processamento físico-químico da usina do Sossego que não promove a dissolução-reprecipitação de novas fases minerais. Observa-se ainda que o concentrado de Cu apresenta a calcopirita (CuFeS_2) como fase cristalina predominante, resultado esperado para o material avaliado.

Figura 6 - Difratoograma de raios-X da alimentação da flotação (A), do concentrado de Cu (B) e do rejeito da barragem (C). Clc-Clinocloro; Phl-Flogopita; Ms-Muscovita; Tlc-Talco; Act-Actinolita; Kln-Caulinita; Spl-Espinela; Ab-Albita; Cal-Calcita; Mc-Microclina; Qtz-Quartzo; Ccp-Calcopirita.



Fonte: Próprio autor

4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

Através dos resultados das análises é possível observar que os teores dos elementos analisados no rejeito são semelhantes aos da matéria-prima de alimentação da flotação e divergem significativamente em relação ao concentrado (Tabela 2).

Tabela 2 - Análise química por ICPMS dos materiais da mina de Cu do Sossego

Elemento	Alimentação	Concentrado	Rejeito
Ag [mg kg ⁻¹]	0,14 ±0,09b	7,84 ±1,05a	0,55 ±0,83b
Al [g kg ⁻¹]	15,6 ±2,1a	3 ±0,2b	16,1 ±2,8a
As [mg kg ⁻¹]	0,64 ±0,39b	8,7 ±4,22a	3,19 ±3,96b
Au [mg kg ⁻¹]	0,16 ±0,24b	3,81 ±0,52a	0,59 ±1,03b
Ba [mg kg ⁻¹]	48,57 ±5,35a	10 ±0b	47,5 ±8,86a
Be [mg kg ⁻¹]	0,46 ±0,08a	0,55 ±0,51a	0,57 ±0,13a
Bi [mg kg ⁻¹]	0,03 ±0,02b	0,98 ±0,26a	0,09 ±0,1b
Ca [g kg ⁻¹]	19 ±5,2a	3,7 ±1b	20,2 ±5,8a
Cd [mg kg ⁻¹]	0,02 ±0,01b	0,9 ±0,18a	0,09 ±0,1b
Ce [mg kg ⁻¹]	119,6 ±28,55a	20,06 ±6,71b	110,29 ±29,99a
Co [mg kg ⁻¹]	30,64 ±10,66c	219,75 ±33,63a	69,01 ±57,16b
Cr [mg kg ⁻¹]	44,64 ±15,46ab	30,63 ±10,66b	54,75 ±18,24a
Cs [mg kg ⁻¹]	0,35 ±0,07a	0,09 ±0,02b	0,37 ±0,09a
Cu [mg kg ⁻¹]	3996 ±3678,86c	>10000 ±0a	369 ±230b
Fe [g kg ⁻¹]	70,5 ±13,8b	258,9 ±7,9 ^a	80,6 ±26,3b
Ga [mg kg ⁻¹]	11,19 ±1,27a	2,41 ±0,69b	10,92 ±1,69a
Ge [mg kg ⁻¹]	0,25 ±0,05b	0,73 ±0,62 ^a	0,27 ±0,08b
Hf [mg kg ⁻¹]	0,18 ±0,03	0,11 ±0,07	0,3 ±0,32
Hg [mg kg ⁻¹]	0,02 ±0,01	0,07 ±0,14	0,03 ±0,03
In [mg kg ⁻¹]	0,06 ±0,04b	2,25 ±0,37a	0,17 ±0,23b
K [g kg ⁻¹]	3,6 ±0,9a	0,8 ±0,2b	3,8 ±1a
La [mg kg ⁻¹]	71,43 ±17,6a	11,31 ±3,66b	64,29 ±17,51a
Li [mg kg ⁻¹]	7,54 ±1,14a	2,08 ±1,23b	7,9 ±1,55a
Mg [g kg ⁻¹]	12 ±2,4a	2,7 ±0,6b	12,8 ±3a
Mn [mg kg ⁻¹]	203,07 ±34,64a	11,13 ±7,79b	204,75 ±34,94a
Mo [mg kg ⁻¹]	4,92 ±2,53b	98,35 ±50a	24,15 ±31,91b

continuação

Na [g kg ⁻¹]	1,1 ±0,2a	0,3 ±0,1b	1,1 ±0,2a
Nb [mg kg ⁻¹]	0,18 ±0,03b	0,25 ±0,09a	0,27 ±0,1a
Ni [mg kg ⁻¹]	199,68 ±40,74b	444,63 ±54,66a	253,94 ±70,61b
P [mg kg ⁻¹]	3291,43 ±886,18a	582,5 ±224,87b	3647,5 ±1037,36a
Pb [mg kg ⁻¹]	5,66 ±1,26b	70,49 ±8,75a	7,36 ±5,49b
Rb [mg kg ⁻¹]	28,91 ±6,52a	6,26 ±1,42b	32,46 ±8,52a
Re [mg kg ⁻¹]	0 ±0b	0,03 ±0,02a	0 ±0b
S [g kg ⁻¹]	4,6 ±4,3b	66,1 ±16,5a	15,2 ±21,8b
Sb [mg kg ⁻¹]	0,05 ±0b	0,07 ±0,02a	0,05 ±0b
Sc [mg kg ⁻¹]	9,06 ±1,79a	2,9 ±1,42b	9,45 ±2,25a
Se [mg kg ⁻¹]	0,68 ±0,45b	21,66 ±10,62a	2 ±2,78b
Sn [mg kg ⁻¹]	2,34 ±0,35a	5,31 ±1,28b	2,78 ±0,66a
Sr [mg kg ⁻¹]	20,09 ±3,03a	6,33 ±1,35b	21,54 ±4,48a
Ta [mg kg ⁻¹]	0,01 ±0b	0,25 ±0,38a	0,02 ±0,01a
Te [mg kg ⁻¹]	0,19 ±0,14b	7,52 ±2,04a	0,49 ±0,62b
Th [mg kg ⁻¹]	10,64 ±3,47a	6,01 ±3,71b	8,46 ±2,46b
Ti [g kg ⁻¹]	1,3 ±0,2a	0,3 ±0,1b	1,3 ±0,2a
Tl [mg kg ⁻¹]	0,05 ±0,01b	0,18 ±0,12a	0,06 ±0,01b
U [mg kg ⁻¹]	9,29 ±4,23a	6,03 ±4b	6,91 ±2,4b
V [mg kg ⁻¹]	169,29 ±42,08a	19,38 ±2,39b	143,75 ±21,75a
W [mg kg ⁻¹]	0,31 ±0,07b	0,14 ±0,08c	0,44 ±0,15a
Y [mg kg ⁻¹]	12,56 ±2,97a	3,85 ±1,13b	12,47 ±3,27a
Zn [mg kg ⁻¹]	15,36 ±2,17b	97 ±42,72a	25,5 ±11,82b
Zr [mg kg ⁻¹]	5,39 ±1,47a	3,2 ±1,42b	5,76 ±2,08a

Fonte: Próprio autor

Nota: Letras minúsculas iguais nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A análise química do concentrado de cobre destaca como principais elementos: o Fe (259 g kg⁻¹), o S (66 g kg⁻¹) e o Cu (>10000 mg kg⁻¹). Observa-se que os teores dos elementos analisados estão em concordância com a composição mineralógica apresentada anteriormente. Também evidenciam que os estágios de flotação (*rougher*, *scavenger* e *cleaner*) utilizados na mina do Sossego foram eficientes em promover a recuperação de Cu, partindo de um teor de ~1 % (massa total) na alimentação e possibilitando a obtenção de um concentrado com teores de Cu de ~30 %.

Comparando o teor de Cu na amostra antes e depois do processo de flotação, pela simples divisão do material que sai no rejeito pelo material que entra na flotação, observa-se que é lançado juntamente com o rejeito é de 9,2 % de Cu. Logo, o rendimento do processo de concentração de cobre é de 90,8 %.

É possível observar que, além da concentração de Cu, há o enriquecimento de outros metais como Ag, Au, Co, Mo, Ni, Pb, Zn, pois esta etapa é a base do processo de beneficiamento mineral de vários metais, que são concentrados através da flotação de sulfetos (SILVA, 2011). Estes metais, possivelmente, estão relacionados a principal fase mineral (Calcopirita) concentrada no processo de beneficiamento, pois este mineral pode conter esses elementos associados (ALLOWAY, 2013).

A flotação de minerais sulfetados está restritamente correlacionada às ações dos chamados coletores sulfidrílicos, nos quais o enxofre possui papel fundamental nos mecanismos de adsorção do coletor (teoria eletroquímica que baseia-se na simples formação de compostos insolúveis do metal pertencente ao sulfeto com o coletor). Outra característica está ligada às intensas oxidações que podem sofrer os minerais sulfetados. (JOSÉ, 2015)

A digestão das amostras de alimentação da flotação e do rejeito tornou disponível, predominantemente, os elementos Fe (~8 %), Ca (~2 %), Al (1,6 %), Mg (1,2 %), P (3.291 mg kg⁻¹), Mn (203 mg kg⁻¹) e Ni (~200 mg kg⁻¹). Estes baixos teores de elementos disponíveis, possivelmente está relacionada com a sua composição mineralógica química, pois é constituído principalmente por minerais silicatados, identificados pelas fases encontradas no DRX.

4.3 CLASSIFICAÇÃO DE RISCOS AMBIENTAIS ORIGINADOS DOS REJEITOS

A

Tabela 3 apresenta os valores médios totais obtidos para os elementos As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Pb, Sb, Zn analisados no rejeito da barragem da mina do Sossego, assim como os valores de referência de qualidade de solo (VRQ) estabelecido por Fernandes *et al.* (2018) e valores de referência de qualidade de solo (VRQ), de prevenção (VP) e de intervenção industrial (VII) estabelecidos pelo CONAMA (2009) e pela CETESB (2016).

Tabela 3 - Valores médios obtidos na barragem de rejeitos da mina do Sossego-PA e valores de referência de qualidade (VRQ), prevenção (VP) e de intervenção industrial (VII) da CETESB, CONAMA e FERNANDES.

Área / Valor	Elemento (mg kg ⁻¹)									
	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Pb	Sb	Zn
Rejeito de Cu	3,1	47,5	0,09	29	39	369	0,03	7,3	0,05	25,5
VRQ ¹	3,5	75	0,5	13	40	35	0,05	17	0,05	60
VP ¹	15	120	1,3	25	75	60	0,5	72	2	86
VII ¹	150	7300	160	90	400	10000	7	4400	25	10000
VRQ ²	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
VP ²	15	150	1,3	25	75	60	-	72	2	300
VII ²	150	750	20	90	400	600	-	900	25	2000
VRQ ³	2,6	33,4	0,9	-	35,5	18,2	0,45	7,5	-	21

Fonte: Próprio autor

1. Valores orientadores de qualidade do solo estabelecidos pela CETESB (2016);
2. Valores orientadores de qualidade do solo estabelecidos pelo CONAMA (2009); E = a ser definido por estado (CONAMA, 2009).
3. Valores de referência de qualidade – VRQ para solos do estado do Pará, profundidade de 0–0,2 m, estabelecidos por Fernandes *et al.* (2018).

Verifica-se que todos os elementos (exceto Co e Cu) apresentaram valores abaixo do VRQ, VP e VII estabelecidos pela CETESB (2016) e CONAMA (2009) e abaixo ou próximo do VRQ estabelecido por Fernandes (2018). Vale ressaltar que os valores observados para o Co e Cu foram consideravelmente menores que os valores de intervenção industrial estabelecidos pela CETESB (2016), e menores que estabelecidos pelo CONAMA (2009). Esses resultados indicam que o rejeito estocado na barragem da mina de Cu do Sossego, nos pontos amostrados, apresenta níveis de concentração dos elementos As, Ba, Cd, Cr, Hg, Pb, Sb e Zn bem menores que os valores considerados padrões estabelecidos pela CETESB e CONAMA para solos, indicando que não é um perigo para o meio ambiente e se adequam as referências de VII, ou seja, a área ainda é classificada como não poluída ou que existem riscos potenciais à saúde humana.

4.4 ANÁLISE DE FERTILIDADE

A Tabela 4 apresenta a média para os atributos químicos e físicos do rejeito da barragem da mina de Cu do Sossego para avaliação como possível fertilizante.

Observa-se que o substrato da barragem apresenta pH alcalino, baixo teor de MO, baixa disponibilidade de Ca, Mg, Zn, baixa capacidade de troca de cátions e é um material que apresenta mais de 80% de areia em sua constituição física. Esses atributos podem dificultar o crescimento vegetal e possivelmente interferir futuramente na recuperação ambiental da área. O pH básico do rejeito da barragem é devido ao processo de flotação, em que a adsorção do coletor na superfície da partícula é mais eficiente com o pH da água na faixa entre 9,5 e 10,5

com o uso de CaO para regular o pH no processo (WILLS, 1997). Além disso, o valor de pH encontrado pode reduzir a disponibilidade de micronutrientes para as plantas, uma vez que esses tendem a serem precipitados em pH alcalino. Contudo, deve-se ressaltar o mesmo princípio que o efeito negativo do pH sobre a disponibilidade de micronutrientes pode ser benéfico quando se condissera a redução da disponibilidade de elementos potencialmente tóxicos (GUILHERME *et al.*, 2005).

Por outro lado, o substrato da barragem apresenta alta disponibilidade de P, K, S, B, Fe, Mn e Cu e baixo teor de Al trocável, e esses fatores são favoráveis ao crescimento de plantas. Desta maneira, para o estabelecimento futuro da vegetação nessa área, faz necessário adicionar, principalmente, fontes dos nutrientes como o Ca e Mg, não podendo ser a partir do uso do calcário, uma vez que o pH do material é básico. Além disso, buscar estratégias para aumentar o teor de MO no substrato poderá ser uma forma eficiente para melhorar sua fertilidade. Isso pode ser através da adição e mistura com um topsoil de mata. Nesse sentido, alguns estudos apontam os benefícios de se utilizar o topsoil para recuperar áreas (HALL *et al.*, 2010; FERREIRA, VIEIRA 2017; RIBEIRO *et al.*, 2018).

Tabela 4 – Atributos químicos e físicos do rejeito de Cu da Barragem do Sossego, teores disponíveis

Parâmetro	Valor
pH em água	8,35±0,07
MO %	2,6±0,28
P mg dm ⁻³	187,4±122
K mg dm ⁻³	593,7±90,3
S mg dm ⁻³	105±7,3
Ca cmol _c dm ⁻³	2,2±0,42
Mg cmol _c dm ⁻³	0,15±0,07
Al ⁺³ cmol _c dm ⁻³	<0,1
CTC cmol _c dm ⁻³	4,1±0,28
B mg dm ⁻³	0,7±0,29
Zn mg dm ⁻³	0,8±0,01
Fe mg dm ⁻³	564,8±135
Mn mg dm ⁻³	59,9±17,9
Cu mg dm ⁻³	36,35±9,2
Silte %	13,15±0,77
Argila %	3,85±0,49
Areia %	83±1,27

Fonte: Próprio autor

5 CONCLUSÕES

A caracterização mineralógica das amostras de alimentação da flotação, o concentrado de cobre e o rejeito mostrou que a calcopirita foi a fase mineralógica predominante no concentrado de cobre, enquanto que nos demais foi identificado minerais silicatados estáveis.

A análise química corroborou com os resultados de DRX, apresentando elevados teores de Fe, S e Cu para o concentrado.

As baixas concentrações totais no rejeito, principalmente de As, Ba, Cd, Cr, Hg, Pb, e Sb, indicam que existe um baixo risco potencial desses elementos serem preocupantes ambientais na barragem da mina de Cu do Sossego-PA. Os valores observados para o Co e Cu foram, respectivamente, 3 e 27 vezes menores que os valores de intervenção industrial estabelecidos pela CETESB, e 3 e 1,2 vezes menores que estabelecidos pelo CONAMA.

O rejeito da mina de Cu do Sossego apresenta atributos favoráveis para o crescimento de plantas, tais como alta disponibilidade de P, K, S, B, Mn e Cu, apesar de apresentar baixo teor de matéria orgânica. A incorporação de MO no rejeito do Cobre, que pode ser através do uso de topsolo da própria mina, por misturas inversamente proporcionais de rejeito e topsolo, rico em matéria orgânica, pode se tornar suficiente para a correção do rejeito do cobre, tornando-o adequado ao crescimento vegetal.

Importante a realização de novas coletas em pontos mais afastados e em diferentes profundidades da barragem de rejeitos, de forma a melhorar a acurácia e representatividade dos atributos dos rejeitos depositados ao longo de toda a estrutura. Entretanto, os dados aqui apresentados, no contexto das complexas questões ambientais, podem se tornar ferramentas úteis no desenvolvimento de novas pesquisas de extensão da vida útil da unidade de processamento, assim como da barragem de rejeito e parâmetros comparativos com análises posteriores para determinar o acúmulo de elementos-traço nesses sedimentos.

REFERÊNCIAS

- BERGERMAN, M. G. **Modelagem e simulação do circuito de moagem do Sossego**. Orientação: Homero Delboni. 2009. 199 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2009.
- BIRANI, S. M. *et al.* Available contents of potentially toxic elements in soils from the Eastern Amazon. **Geochemistry**, v. 75, n. 1, p. 143-151, 2015. DOI [10.1016/j.chemer.2015.01.001](https://doi.org/10.1016/j.chemer.2015.01.001)
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). Decisão de Diretoria no 256/2016/E de 22 de novembro de 2016. Dispõe sobre a aprovação do “Valores orientadores para Solo e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo” - 2016 e outras providências. **Diário Oficial Estado de São Paulo**, Caderno Executivo I (Poder Executivo, Seção I), v. 126, n. 219, p. 55-56, 2016. Disponível em: <https://www.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/11/2014/12/DD-256-2016-E-Valores-Orientadores-Dioxinas-e-Furanos-2016-Intranet.pdf>
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução no 420 de 28 de dezembro de 2009**. 2009. 12 p.
- SILVA, F. M. da. **Modelagem do Circuito de Moagem da Usina do Sossego (CVRD) através de Redes Neurais Artificiais**. Orientador: Antônio de Pádua Braga. 2005. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2005. Disponível em: <https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/443M.PDF>
- DIAS, L. E. Caracterização de substratos para fins de recuperação de áreas degradadas. In: Dias, L. E.; Mello, J. W. V. de. (Eds.). **Recuperação de áreas degradadas**. Viçosa, MG: UFV, Departamento de Solos; Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas. 1998. p. 27-44.
- BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). **Anuário mineral brasileiro: principais substâncias metálicas**. Brasília: DNPM, 2017. Disponível em: http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb_metalicos2017. Acesso em: 18 jan. 2019.
- MALAVOLTA, E. *et al.* **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 251 p.
- FERNANDES, A. R. *et al.* Quality reference values and background concentrations of potentially toxic elements in soils from the Eastern Amazon, Brazil. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 190, p. 453-463, 2018.
- FERREIRA, M. C.; VIEIRA, D. L. M. Topsoil for restoration: Resprouting of root fragments and germination of pioneers trigger tropical dry forest regeneration. **Ecological Engineering**, v. 103, p. 1-12, 2017.

FURLANI, A. M. C. **Nutrição mineral**. Fisiologia vegetal. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2004.

FURTINI NETO, A. E. *et al.* **Fertilidade do solo**. Lavras: Ufla/Faepe, 2001. 252 p.

GUILHERME, L. R. G.; MARQUES, J. J. G. de S. E. M.; PIERANGELI, M. A. P.; *et al.* Elementos-traço em solos e sistemas aquáticos. In: TORRADO-VIDAL, P.; ALLEONI, L. R. F.; COOPER, M.; SILVA, A. P. (Eds.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. p. 345–390.

HALL, S. L.; BARTON, C. D.; BASKIN, C. C. Topsoil seed bank of an Oak–Hickory forest in eastern Kentucky as a restoration tool on surface mines. **Restoration Ecology**, v. 18, n. 6, p. 834-842, 2010.

JOSÉ, F. S. **Estudo da flotação coletiva de sulfetos de zinco-chumbo**. Orientador: Carlos Alberto Pereira. 2015. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Ouro Preto. 2015.

KLUG, H. P.; ALEXANDER, L. E. **X-ray diffraction procedures: for polycrystalline and amorphous materials**. X-Ray Diffraction Procedures: For Polycrystalline and Amorphous Materials. New York, John Wiley, 1974. 716p

LI, J. *et al.* Antimony contamination, consequences and removal techniques: A review. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 156, p. 125-134, 2018.

MANDAL, B. K.; SUZUKI, K. T. Arsenic round the world: a review. **Talanta**, v. 58, n. 1, p. 201-235, 2002.

MONTEIRO, L. V. S. *et al.* Mineral chemistry of ore and hydrothermal alteration at the Sossego iron oxide–copper–gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil. **Ore Geology Reviews**, v. 34, n. 3, p. 317-336, 2008.

SOARES, L. Barragem de rejeitos. In: LUZ, A.U.; SAMPAIO J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. p. 831-896.

RIBEIRO, R. A.; GIANNINI, T. C.; GASTAUER, M.; AWADE, M.; SIQUEIRA, J. O. Topsoil application during the rehabilitation of a manganese tailing dam increases plant taxonomic, phylogenetic and functional diversity. **Journal of environmental management**, v. 227, p. 386-394, 2018.

RODRIGUES, S. M. *et al.* Evaluation of an approach for the characterization of reactive and available pools of twenty potentially toxic elements in soils: Part I–The role of key soil properties in the variation of contaminants’ reactivity. **Chemosphere**, v. 81, n. 11, p. 1549-1559, 2010.

PARÁ. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE. **Instrução Normativa no. 11. Investigação Ambiental e Análise de Risco**. Belém: IOEPA, 12 de Setembro de 2011. CADERNO, v. 3, p. 16.

SHIMIZU, V. K. *et al.* Copper ore type definition from Sossego Mine using X-ray diffraction and cluster analysis technique. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 65, n. 4, p. 561-566, 2012.

SILVA, A. G. G. **Cadeia Produtiva do Cobre**. Orientadora: Rísia Gonçalves da Siva. 124 f. Monografia (Especialização em Engenharia de Recursos Minerais) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2011.

SILVA, J. P. S. Impactos ambientais causados por mineração. **Revista espaço da Sophia**, 2007, v. 8, p. 1-13.

SILVA, S. R. *et al.* Caracterização de rejeito de mineração de ouro para avaliação de solubilização de metais pesados e arsênio e revegetação local. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 1, 2004.

SOUZA, E. S. *et al.* Organic residues and biochar to immobilize potentially toxic elements in soil from a gold mine in the Amazon. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 169, p. 425-434, 2019.

VALE. A Vale no Pará: relatório regional = Vale in Pará: regional report. [S. l.]: Vale, 2016. Disponível em: http://www.vale.com/brasil/PT/initiatives/environmental-social/iniciativas-sociais-para/Documents/Relatorio_Vale_Para_2016.pdf. Acesso em: 18 out. 2017.

VASCONCELOS, Y. Microbes that mine. **Pesquisa FAPESP**. n. 200, maio 2012. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/en/2012/10/19/microbes-that-mine/>.

WILLS, B. A. **Mineral Processing Technology**. 6. ed. Burlington: Butterworth-Heinemann, 1997. 486 p.

CETREL. **Laudos técnicos para classificação dos rejeitos da usina de beneficiamento de minério da mina do Sossego**. [S. l.: s. n.], 2005. (Documento interno Vale).

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e atual. Brasília, DF: EMBRAPA, 2017. 573 p.