



Universidade Federal de Itajubá
Instituto de Ciências Puras e Aplicadas



Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos
PROFÁGUA

Marcela Roberta Almeida Ferreira

Avaliação ambiental para o aproveitamento de rejeito de minério de ferro: estratégia para redução de disposição de rejeitos em barragens de contenção e redução dos riscos aos recursos hídricos



Itabira- Minas Gerais

2020

**Avaliação ambiental para o aproveitamento de rejeito de minério de ferro:
estratégia para redução de disposição de rejeitos em barragens de contenção e
redução dos riscos aos recursos hídricos**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Curso de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFÁGUA), na Universidade Federal de Itajubá. Área de concentração: Regulação e governança de recursos hídricos. Linha de pesquisa: Segurança hídrica e usos múltiplos da água.

Aprovada em 23 de julho de 2020.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Fernanda Maria Belotti

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas - UNIFEI

Banca Examinadora:

Prof^a. Dr^a. Fernanda Maria Belotti

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas - UNIFEI

Prof. Dr. Eduardo de Aguiar do Couto

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas - UNIFEI

Prof. Dr. Erinaldo Hilário Cavalcante

Universidade Federal de Sergipe

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me iluminar e agraciar sempre, abrindo portas e me mostrando em qual direção seguir.

À minha família, especificamente aos meus pais Roberto e Denise e aos meus irmãos Milena e Rafael, por tanto me encorajar, me apoiar e acreditarem nos meus sonhos. Aos meus pais por toda educação, conselhos e pelas renúncias que foram necessárias para que eu chegasse até aqui.

Aos meus familiares pelo cuidado, amparo.

À minha orientadora Prof^ª. Dr^ª. Fernanda Maria Belotti pelos anos de trabalho em conjunto, por ser um exemplo de pessoa e profissional, por ter me guiado e inspirado durante toda minha jornada acadêmica, por ter acreditado e confiado no meu trabalho e por todo suporte e dedicação para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos amigos que fiz ao longo do curso, pelos ensinamentos, carinho e companheirismo.

A todos os professores que fizeram parte da minha formação.

À empresa Vale S/A pelo apoio financeiro à esta pesquisa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig) pelo apoio financeiro para o desenvolvimento do projeto e pela bolsa de estudo concedida à autora.

O presente trabalho foi realizado com apoio da coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, agradeço também ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA, Projeto CAPES/ANA AUXPE N^o. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

RESUMO

FERREIRA, Marcela Roberta Almeida. *Avaliação ambiental para o aproveitamento de rejeito de minério de ferro: estratégia para redução de disposição de rejeitos em barragens de contenção e redução dos riscos aos recursos hídricos*. 2020. 65 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira, Minas Gerais, 2020.

Em decorrência de rompimentos recentes de barragens de rejeito no Brasil, houve uma intensificação da necessidade de proposição de alternativas à utilização destas estruturas, visando especialmente aumentar a segurança hídrica, preservar os recursos naturais e vidas humanas. Neste contexto, este trabalho tem por objetivo avaliar a viabilidade ambiental de aproveitamento de rejeito de flotação de minério de ferro como material constituinte de pavimentos rodoviários; como uma estratégia para redução dos riscos aos recursos hídricos. Amostras de rejeito, coletadas de forma contínua na saída do duto de flotação da Mina Cauê – Itabira/MG, foram submetidas a ensaios de lixiviação e de solubilização segundo os procedimentos normativos vigentes. Corpos de prova confeccionados simulando a composição de pavimentos rodoviários, avaliando 6 (seis) possibilidades de acordo com diferentes composições e camadas distintas da estrutura dos pavimentos, foram submetidos aos mesmos ensaios. Os resultados indicaram que o rejeito é classificado como resíduo de classe IIA – Não perigoso - Não inerte, considerando que os elementos manganês e fenóis apresentaram teores solubilizados acima do permitido pela legislação. Os resultados dos ensaios das amostras de pavimento indicaram que os corpos de prova confeccionadas com Solo/Rejeito/Cal e Solo/Rejeito/Cimento foram os mais eficientes na retenção dos elementos manganês e fenóis, sendo, portanto, os mais viáveis para o aproveitamento do rejeito do ponto de vista ambiental. Entretanto, como o teor de alumínio ultrapassou os limites da norma, em função da elevação do pH nestas amostras, recomenda-se a redução do teor de cal e de cimento, buscando manter o pH abaixo de 9,0. Para assegurar a imobilização dos elementos contaminantes recomenda-se a realização de estudos de adsorção e de incorporação de polímeros (materiais adsorvedores) nos pavimentos.

Palavras-chave: Mineração. Rejeito de flotação de minério de ferro. Aproveitamento.

ABSTRACT

FERREIRA, Marcela Roberta Almeida. *Environmental evaluate for use of iron ore tailings: strategy for reducing tailings disposal in containment dams and reducing risks to water resources*. 2020. 65 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira, Itabira, Minas Gerais, 2020.

Results to recent ruptures of iron ore tailings dams in Brazil, there was an intensification of the need to propose alternatives for the use of these structures using especially to increase water security, to preserve natural and human resources. In this context, the present study has the objective to evaluate the environmental use of iron ore flotation tailings as a material consisting of road pavements; as a strategy to reduce risks to water resources. Iron ore tailings samples, collected continuously at the output of the flotation duct of the Cauê-Itabira/MG mine, were subjected to leaching tests and solubilization tests according to current regulatory procedures. Specimens made by simulating the composition of road pavements, evaluating 6 (six) possibilities according to different compositions and different layers on the pavement structure, were subjected to the same tests. The results indicated the iron ore tailings are classified as class IIA waste Not dangerous-Not inert, considering that the manganese and phenols elements had solubilized percentage above that allowed by legislation. The results to the tests on the pavement samples indicated the specimens made with Soil/Iron ore tailings/Lime and Soil/Iron ore tailings/Cement were the most efficient in retaining the manganese and phenols elements, being, therefore, the most viable for the use of the waste from the environmental point of view. However, as the aluminum content has exceeded the limits of the norm, due to the pH increase in these samples, it is recommended to reduce the lime and cement content, trying to keep the pH below 9.0. To ensure immobilization of the contaminating elements, it is recommended to do studies on adsorption and incorporation of polymers (adsorbent materials) on the pavements.

Keywords: Mining. Tailings of Iron Ore Flotation. Reuse.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Método de alteamento a montante de barragem de contenção de rejeito	14
Figura 2 - Método de alteamento a jusante de barragem de contenção de rejeito	14
Figura 3 - Método de alteamento por linha de centro de barragem de contenção de rejeito	14
Figura 4 - Classificação de categoria de Risco e dano potencial associado.....	16
Figura 5 - Barragens de mineração no território brasileiro de acordo com a classe.....	17
Figura 6 - Panorama das barragens de mineração de Itabira-MG distribuídas entre as microbacias de acordo com o limite município	18
Figura 7 - Mapa das unidades litoestratigráficas que compõem o Quadrilátero Ferrífero, com destaque para a cidade de Itabira/MG	21
Figura 8 - Descrição litológica do município de Itabira-MG, com destaque para o Complexo Minerador de Itabira.....	23
Figura 9 - Fluxograma típico do beneficiamento de minério de ferro	25
Figura 10 - Mecanismo de flotação	26
Figura 11 - Camadas da estrutura dos corpos de prova dos pavimentos	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Mineralogia de diferentes tipos de minério de ferro	24
Tabela 2 – Composição química dos minerais que compõem o rejeito de minério de ferro da Mina Cauê-MG.....	28
Tabela 3 - Especificações dos corpos de prova analisados	38
Tabela 4 - Resultados dos ensaios de lixiviação das amostras de rejeito.....	41
Tabela 5 - Resultados dos ensaios de solubilização das amostras de rejeito para os parâmetros Al, As, Ba, Cd, Pb, Cn^- e Cl^-	42
Tabela 6 - Resultados dos ensaios de solubilização das amostras de rejeito para os parâmetros C_6H_5OH , Fe, F-, Mn, Hg, Cu e Cr.....	43
Tabela 7 - Resultados dos ensaios de solubilização das amostras de rejeito para os parâmetros N- NO_3 , Ag, Se, Na, SO_4^{2-} , surfactantes e Zn.....	45
Tabela 8 - Resultados dos ensaios de lixiviação de corpos de prova de pavimentos	46
Tabela 9 - Resultados dos ensaios de solubilização de corpos de prova de pavimento, solo e mistura asfáltica para os parâmetros Al, As, Ba, Cd, Pb, Cn^- e Cl^-	48
Tabela 10 - Resultados dos ensaios de solubilização de corpos de prova de pavimento, solo e mistura asfáltica para os parâmetros C_6H_5OH , Fe, F-, Mn, Hg, Cu e Cr.....	50
Tabela 11 - Resultados dos ensaios de solubilização de corpos de prova de pavimento, solo e mistura asfáltica para os parâmetros N- NO_3 , Ag, Se, Na, SO_4^{2-} , surfactantes e Zn	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
ANM	Agência Nacional de Mineração
CBQU	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EPA SW	<i>Environmental Protection Agency Methods for Evaluating Solid Waste</i>
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
ISH	Índice de Segurança Hídrica
MG	Minas Gerais
ONU	Organização das Nações Unidas
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PNSH	Plano Nacional de Segurança Hídrica
SM	<i>Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo Geral	12
2.2 Objetivos Específicos	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 Barragens de rejeito e a segurança hídrica	13
3.2 Minério de ferro em Itabira/MG: extração, beneficiamento e geração de rejeitos	21
3.3 Potencial poluidor de rejeitos de flotação de minério de ferro	27
3.4 Aproveitamento de rejeitos e pavimentação asfáltica	32
4 METODOLOGIA	36
4.1 Amostragem de rejeito de flotação de minério de ferro	36
4.2 Realização de ensaios de lixiviação e de solubilização em amostras de rejeito ...	36
4.3 Realização de ensaios de lixiviação e de solubilização em corpos de prova confeccionados simulando a composição real de pavimentos rodoviários	37
4.4 Interpretação dos dados e elaboração do produto	40
5 RESULTADOS	41
5.1 – Ensaios de lixiviação e solubilização em amostras de rejeitos de flotação de minério de ferro.....	41
5.2 – Ensaios de lixiviação e solubilização em corpos de prova confeccionados simulando a composição real dos pavimentos	46
CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

Inerente ao processo de beneficiamento de minério de ferro, são gerados grandes volumes de resíduos, denominados rejeitos¹. O volume e a composição do rejeito varia de acordo com o processo de beneficiamento utilizado e a concentração ou teor do mineral de interesse na rocha. Como resultado do aumento da demanda por ferro e do aprimoramento das tecnologias de beneficiamento, o que tem viabilizado a lavra de rochas com baixo teor desse elemento, a geração de rejeitos tem sido crescente. De acordo com dados do último Plano Nacional de Resíduos Sólidos (2016), no ano de 2005 foram gerados, no Brasil, 95.641 (em 1000 toneladas) de rejeito de minério de ferro. No Estado de Minas Gerais, somente em 2015, as vinte maiores mineradoras do Estado geraram cerca de 112 milhões de toneladas de rejeito (HEIDER, 2020).

Atualmente, no Brasil, a principal forma de disposição de rejeitos ocorre em estruturas denominadas barragens. Tais estruturas, dado seu grande porte, quando mal operadas, apresentam risco de rompimento, aumentando a vulnerabilidade de mananciais para abastecimento humano e usos múltiplos da água. Desta forma, o rompimento dessas estruturas e os consequentes danos potenciais aos trechos a jusante colocam em risco a segurança hídrica de corpos d'água. Exemplos recentes de rompimento de barragens de rejeito que demonstram os impactos, em especial aos recursos hídricos, que esse tipo de evento pode causar, foram os da barragem de Fundão, localizada no município de Mariana-MG, no dia 5 de novembro de 2015 e da Barragem I da mina do Córrego do Feijão, localizada no município de Brumadinho-MG, no dia 25 de janeiro de 2019. As consequências sobre os recursos hídricos foram diversas, principalmente relacionadas à alteração da qualidade da água nos locais afetados, impactando os usos múltiplos da água, dentre outros impactos.

Nesse contexto, as empresas mineradoras têm buscado alternativas mais sustentáveis que vão além da disposição em barragens, visando principalmente o aproveitamento do rejeito, como forma de reduzir o volume depositado em barragens e consequentemente redução do risco de rompimento destas estruturas. Desta forma, considerando o volume de rejeito gerado no Brasil e suas características, o setor de construção civil, a partir de diversos estudos, tem sido apontado como uma alternativa

¹ São resíduos produzidos na etapa de beneficiamento, por meio de processos que têm a finalidade de padronizar o tamanho dos fragmentos, remover minerais associados sem valor econômico e aumentar a qualidade, pureza ou teor do produto final (BRASIL, 2010a).

viável para utilização do rejeito de minério de ferro. Uma possibilidade de aproveitamento do rejeito no setor de construção civil é a aplicação deste em pavimentos rodoviários.

No Brasil, o principal sistema logístico de transporte são as rodovias, sendo as obras de pavimentação responsáveis pela extração de grande quantidade de matéria prima, como areia, pedra britada, dentre outras. A exploração de jazidas naturais para exploração dessa matéria prima gera significativos impactos ambientais, sendo que o aproveitamento de rejeito em pavimentos pode reduzir ou substituir o uso de agregados naturais. Desta forma, a possibilidade de utilização de um resíduo cuja disposição final é problemática (rejeitos do beneficiamento de minério de ferro), em um setor que gera significativos impactos ambientais, pode ser uma estratégia interessante do ponto de vista ambiental e econômico.

Contudo, para o aproveitamento do rejeito produzido na mineração de ferro em pavimentação asfáltica, deve-se avaliar a presença de elementos potencialmente contaminantes no rejeito, de forma que os novos produtos não gerem risco à saúde pública ou à integridade do meio ambiente e dos recursos hídricos. Neste sentido, para garantir um aproveitamento adequado dos rejeitos é importante realizar uma caracterização qualitativa deste material, visando identificar os riscos de contaminação ambiental advindos do seu emprego como insumo para outros setores produtivos. A análise do potencial de contaminação dos rejeitos constitui-se em etapa essencial para definição de alternativas de aproveitamento destes materiais.

Neste contexto, o aproveitamento do rejeito em pavimentação asfáltica surge como uma estratégia para redução dos riscos, e preservação aos recursos hídricos, por meio da redução do volume de rejeito depositado em barragens e a conseqüente redução dos riscos de rompimento destas estruturas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade ambiental de aproveitamento de rejeito de flotação de minério de ferro como material constituinte de pavimentos rodoviários de acordo com a norma ABNT NBR 10004:2004 – Resíduos Sólidos – Classificação.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Classificar os rejeitos de flotação de minério de ferro frente à norma ABNT NBR 10004:2004 – Resíduos Sólidos – Classificação;
- b) Avaliar a interação entre o rejeito e os componentes constituintes dos pavimentos e sua influência na lixiviação e solubilização de elementos contaminantes;
- c) Apresentar recomendações para o emprego do rejeito em pavimentos rodoviários de forma a minimizar os riscos de contaminação ambiental.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Barragens de rejeito e a segurança hídrica

De acordo com o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, a geração de rejeitos da mineração entre 1996 e 2005, foi de aproximadamente 2.179 milhões de toneladas, sendo a mineração de ferro a que mais contribuiu para esse valor com uma porcentagem de 35,08% (BRASIL, 2011). Ainda de acordo com esse mesmo Plano, em um cenário futuro a geração de rejeitos na mineração tende a aumentar no período de 2010 a 2030 para aproximadamente 11.409 milhões de toneladas, sendo que o ferro deverá continuar como a principal substância minerada geradora de rejeitos.

Verifica-se, portanto, a necessidade de destinação adequada dos rejeitos gerados na mineração de ferro, como encargo atual e futuro do setor de mineração (BRASIL, 2011). Atualmente no Brasil o método mais comum de disposição desses rejeitos ocorre em estruturas denominadas barragens², que podem ser construídas de solo natural ou com os próprios rejeitos, sendo classificados, neste caso, como barragens de contenção alteadas com rejeitos e as de solo natural como barragens convencionais (IBRAM, 2016).

As barragens de contenção de rejeitos são estruturas construídas por meio de alteamentos sucessivos, de modo que um dique de partida é construído inicialmente e a barragem passa por alteamentos ao longo de sua vida útil, através do método a montante, a jusante ou linha de centro (IBRAM, 2016).

De acordo com a Resolução nº 13 de 2019 da Agência Nacional de Mineração (ANM) o método de alteamento a montante (figura 1) consiste em uma metodologia construtiva de barragens em que os maciços de alteamento se apoiam sobre o próprio rejeito ou sedimento previamente lançado e depositado, estando também enquadrados nessa categoria os maciços formados sobre rejeitos de reservatórios já implantados (ANM, 2019). Ainda de acordo com esta Resolução a construção de barragens de mineração utilizando o método a montante está proibida em todo território nacional.

² De acordo com a portaria nº 70.389/2017 da Agência Nacional de Mineração as barragens de mineração podem ser definidas como: “barragens, barramentos, diques, cavas com barramentos construídos, associados às atividades desenvolvidas com base em direito minerário, construídos em cota superior à da topografia original do terreno, utilizados em caráter temporário ou definitivo para fins de contenção, acumulação, decantação ou descarga de rejeitos de mineração ou de sedimentos provenientes de atividades de mineração com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas” (ANM, 2017).

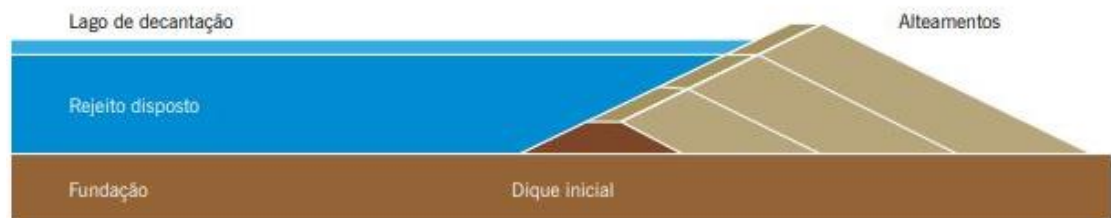
Figura 1 - Método de alteamento a montante de barragem de contenção de rejeito



Fonte: Adaptado de IBRAM (2016)

O método a jusante consiste no alteamento para jusante a partir do dique inicial, onde os maciços de alteamento são construídos com material de empréstimo ou com o próprio rejeito (figura 2) (ANM, 2019).

Figura 2 - Método de alteamento a jusante de barragem de contenção de rejeito



Fonte: Adaptado de IBRAM (2016)

No método de linha de centro os alteamentos se dão de tal forma que o eixo da barragem se mantém alinhado com o eixo do dique de partida, em razão da disposição do material construtivo parte a jusante e parte a montante em relação à crista da etapa anterior (figura 3) (ANM, 2019).

Figura 3 - Método de alteamento por linha de centro de barragem de contenção de rejeito



Fonte: Adaptado de IBRAM (2016)

A escolha do método para construção de uma barragem de contenção de rejeitos depende de fatores como o tipo de processo industrial, características geotécnicas e nível de produção de rejeitos, necessidade de reservar água, necessidade de controle de água percolada, sismicidade, topografia, hidrologia, hidrogeologia e custos envolvidos (IBRAM, 2016).

Desta forma, a construção das barragens de rejeito ocorre durante a fase de operação do empreendimento, ao contrário das barragens convencionais, que são construídas previamente à fase de operação (ANA, 2018). As barragens convencionais são construídas com materiais provenientes de uma mesma jazida, com características semelhantes de densidade e umidade, o que garante a homogeneidade de comportamento do maciço e evita contrastes comportamentais acentuados que possam induzir campos de condutividade hidráulica, de deformação ou de tensão; por outro lado, nas barragens de rejeito não há essa homogeneidade devido às diferentes épocas de alteamento e materiais utilizados provenientes de diferentes frentes de lavra (ARAÚJO, 2006).

Dentre os principais usos das barragens destacam-se: abastecimento de água, irrigação, controle de cheias, dessedentação animal, aquicultura, navegação interior, recreação, paisagismo, disposição de rejeitos de mineração e acumulação de resíduos industriais líquidos e geração hidrelétrica. As barragens são, portanto, importantes elementos de infraestrutura para o país, de modo que, garantir a segurança dessas estruturas assume grande interesse e chama a atenção do poder público e da sociedade (ANA, 2017).

Neste contexto, no ano de 2010 foi promulgada a Lei nº 12.334 de 2010 que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) destinadas à acumulação de água, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais. Para enquadramento nesta lei a barragem deve apresentar pelo menos uma das seguintes características: altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15 metros; capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000m³ (três milhões de metros cúbicos); reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis; categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas (BRASIL, 2010b).

Ainda de acordo com a Lei nº 12.334 de 2010 as barragens devem ser classificadas pelos agentes fiscalizadores, de acordo com a categoria de risco, o dano potencial associado e por seu volume (BRASIL, 2010b). Os critérios gerais para classificação foram estabelecidos pela Resolução nº 143 de 2012 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH).

A portaria da ANM nº 70.389 de 2017 define que as barragens de mineração devem ser classificadas de acordo com o quadro de classificação quanto ao Risco e ao Dano Potencial Associado, nas classes A, B, C, D e E (figura 4). O Risco está associado a aspectos da própria barragem que possam influenciar na possibilidade de ocorrência de acidente e o Dano Potencial com a área afetada por um eventual rompimento (CNRH, 2012).

Figura 4 - Classificação de categoria de Risco e dano potencial associado

CATEGORIA DE RISCO	DANO POTENCIAL ASSOCIADO		
	ALTO	MÉDIO	BAIXO
ALTO	A	B	C
MÉDIO	B	C	D
BAIXO	B	C	E

Fonte: ANM, 2017

No Brasil cerca de 88% das barragens de mineração são enquadradas nas classes B (51%) e C (37%) e as demais são enquadradas nas classes E (9%), D (2%) e A (1%). Na figura 5 é apresentada a distribuição das barragens de mineração inseridas na PNSB de acordo com as classes.

Figura 5 - Barragens de mineração no território brasileiro de acordo com a classe



Fonte: ANM, 2019

De acordo com dados da Agência Nacional de Mineração (ANM) do ano de 2019 foram registradas, no Brasil, 769 barragens de mineração³, sendo que 425 estão enquadradas na Política Nacional de Barragens e 344 não estão enquadradas (ANM, 2019).

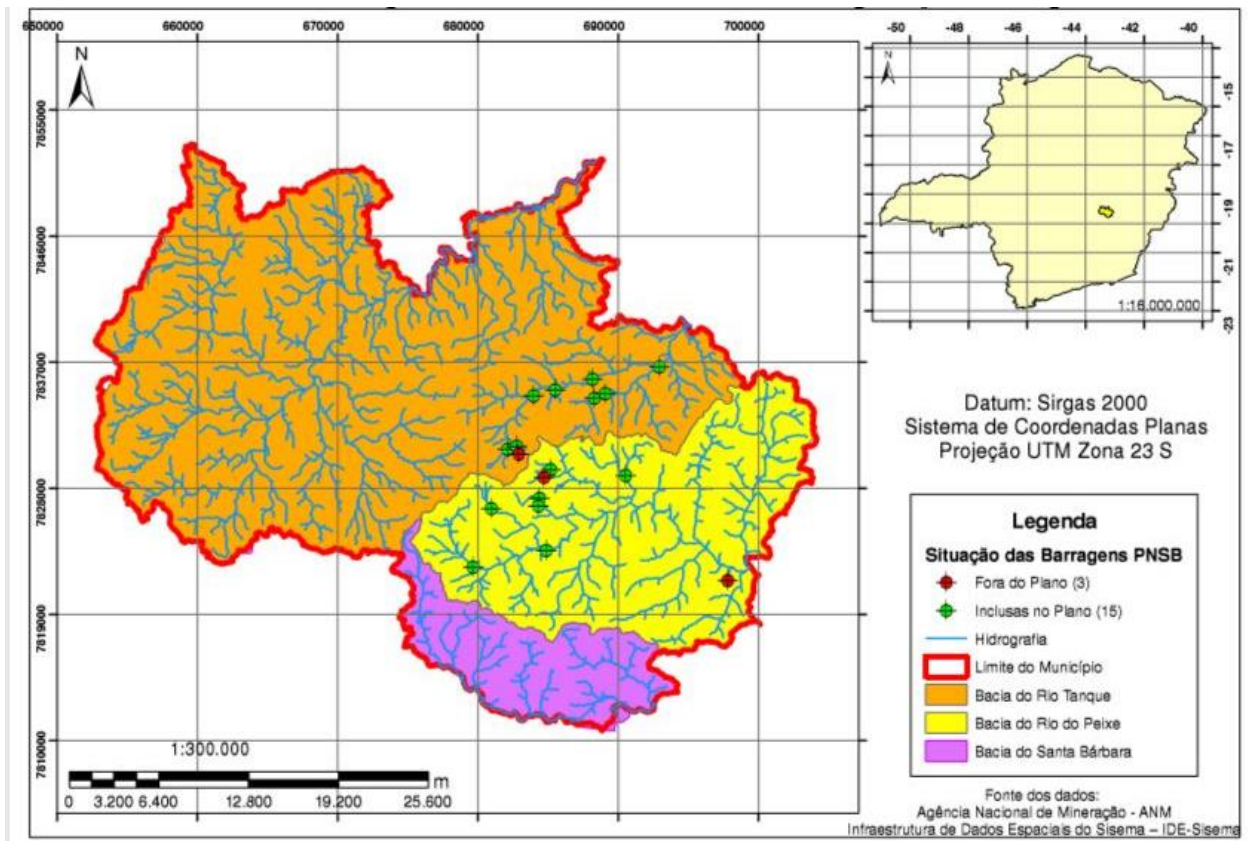
O Estado de Minas Gerais concentra o maior número de barragens de rejeito de mineração do país, sendo que de acordo com informações mais recentes da Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), no ano de 2017 foram registradas no Estado 435 barragens para este fim (FEAM, 2018). Este fato se deve ao número de empreendimentos minerários, concentrados especialmente no Quadrilátero Ferrífero, maior região mineral do país.

Na cidade de Itabira-MG, onde a mineração de ferro teve início no Brasil, existem 18 (dezoito) barragens de mineração, sendo 3 (três) não inseridas no PNSB e 15 (quinze) inseridas. Do total de barragens inseridas na PNSB cerca de 87% (13 barragens) são

³ “Barragens, barramentos, diques, reservatórios, localizados no interior da área concedida ou área de servidão, utilizados para fins de contenção, acumulação ou decantação de rejeito de mineração, descarga de sedimentos provenientes de atividades em mineração, com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas” (ANM, 2017).

enquadradas na classe B e 13% (2 barragens) na classe E. O território do município, que está inserido no Quadrilátero Ferrífero, pertence à bacia hidrográfica do rio Doce, sendo subdividido entre as microbacias do rio Tanque, do rio do Peixe e do rio Santa Bárbara. Na figura 6 é demonstrado o panorama das barragens de mineração em Itabira-MG divididas entre as microbacias de acordo com o limite do município.

Figura 6 - Panorama das barragens de mineração de Itabira-MG distribuídas entre as microbacias de acordo com o limite municipal



No Estado de Minas Gerais a Deliberação Normativa COPAM nº 87 de 2005 determinou que serão considerados para classificação de uma barragem os seguintes parâmetros: altura do maciço; volume do reservatório; ocupação humana a jusante; interesse ambiental na área a jusante e instalações na área a jusante. Dessa forma, as barragens foram divididas em três categorias: baixo potencial de dano ambiental (Classe I); médio potencial de dano ambiental (Classe II); alto potencial de dano ambiental (Classe III), considerando o somatório dos valores atribuídos a cada parâmetro de classificação (MINAS GERAIS, 2005).

Segundo dados da FEAM do total de barragens de rejeito de mineração do Estado (435 barragens) cerca de 38% (166 barragens) são de Classe II, 37% (162 barragens) Classe III e 25% (107) Classe I (FEAM, 2018).

Para classificação de barragens, conforme descrito, a Legislação considera os fatores que influenciam na possibilidade de ocorrência de um acidente de rompimento. Ainda, de acordo com Robertson (2011) citado por Guedes e Shneider (2017) a cada 30 anos as barragens e as cavas de mineração, em âmbito mundial, aumentaram dez vezes em volume e dobraram em altura, sendo que a probabilidade de um acidente de rompimento ocorrer é proporcional à altura, enquanto a consequência do impacto é proporcional ao volume do reservatório de rejeitos. Estima-se, portanto, que o risco de rompimento de barragens de rejeito tende a aumentar 20 vezes a cada 30 anos, considerando as projeções do setor mineral para o aumento da demanda mundial por minérios (GUEDES; SHNEIDER, 2017).

O rompimento de uma barragem de rejeito pode provocar inúmeros danos ambientais, econômicos e humanos, conforme evidenciado em eventos recentes ocorridos no Brasil; sendo: o rompimento da barragem de Fundão, localizada no município de Mariana-MG, no dia 5 de novembro de 2015 e da Barragem I da mina do Córrego do Feijão, localizada no município de Brumadinho-MG, no dia 25 de janeiro de 2019.

Com o rompimento da barragem de Fundão foram liberados cerca de 34 milhões de m³ de rejeitos de mineração, água e materiais utilizados em sua construção, que percorreram mais de 650 km até a foz do rio Doce, em Linhares, no litoral do Espírito Santo (ANA, 2015). O rompimento da barragem I da mina do Córrego do Feijão liberou um volume estimado de 11 milhões de m³ de rejeito que atingiram o rio Paraopeba, manancial que abastece cerca de 3 milhões de pessoas residentes na Região Metropolitana de Belo Horizonte (ANA, 2019).

Dentre as principais consequências do rompimento das barragens de rejeito destaca-se a degradação da qualidade e interrupção no abastecimento de água, prejuízos à agricultura, indústria, produção de energia elétrica, pesca e turismo, dentre outras atividades, destruição de áreas de preservação permanente, assoreamento e alterações morfológicas dos corpos hídricos atingidos, mortandade de peixes e de outros organismos aquáticos e perturbações do equilíbrio de ecossistemas aquáticos (ANA, 2015).

Neste contexto, em função dos danos potenciais nos trechos a jusante, decorrentes de um eventual rompimento, os riscos de rompimento de barragens de rejeito influenciam na segurança hídrica do país. De acordo com o conceito da Organização das Nações Unidas (ONU), a segurança hídrica existe quando há disponibilidade de água em quantidade e qualidade suficiente para o atendimento das necessidades humanas, à prática das atividades econômicas e à conservação dos ecossistemas aquáticos (ANA, 2019). Para os autores Tucci e Chagas (2017) a segurança hídrica deve ser entendida como a gestão de risco da escassez da água e das inundações para a sociedade, meio ambiente e economia, sendo que a gestão de risco envolve a gestão dos cenários de projetos e de emergência.

Ainda segundo o conceito de Segurança Hídrica da ONU, devem ser consideradas quatro dimensões (Humana, Econômica, Ecosistêmica e de Resiliência) como balizadoras do planejamento da oferta e do uso da água em um país de modo que haja garantia de acesso a água adequada às necessidades básicas e bem-estar da população, preservação dos ecossistemas e da água em benefício da natureza e das pessoas, resiliência a eventos extremos e garantia de suprimento de água para atividades produtivas e usos múltiplos (ANA, 2019).

Considerando tais dimensões de forma agregada, foi apresentado no Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH) o índice de segurança hídrica (ISH) para o país visando representar a diversidade de todo território (ANA, 2019). Desta forma, quanto maior for a exposição e a vulnerabilidade à determinado evento que afete as dimensões do conceito de segurança hídrica menor será o ISH. O risco ambiental decorrente do rompimento de barragens de rejeito foi considerado como indicador na dimensão ecosistêmica, sendo que para composição do índice foi considerada a avaliação da condição de segurança da barragem (ANA, 2019).

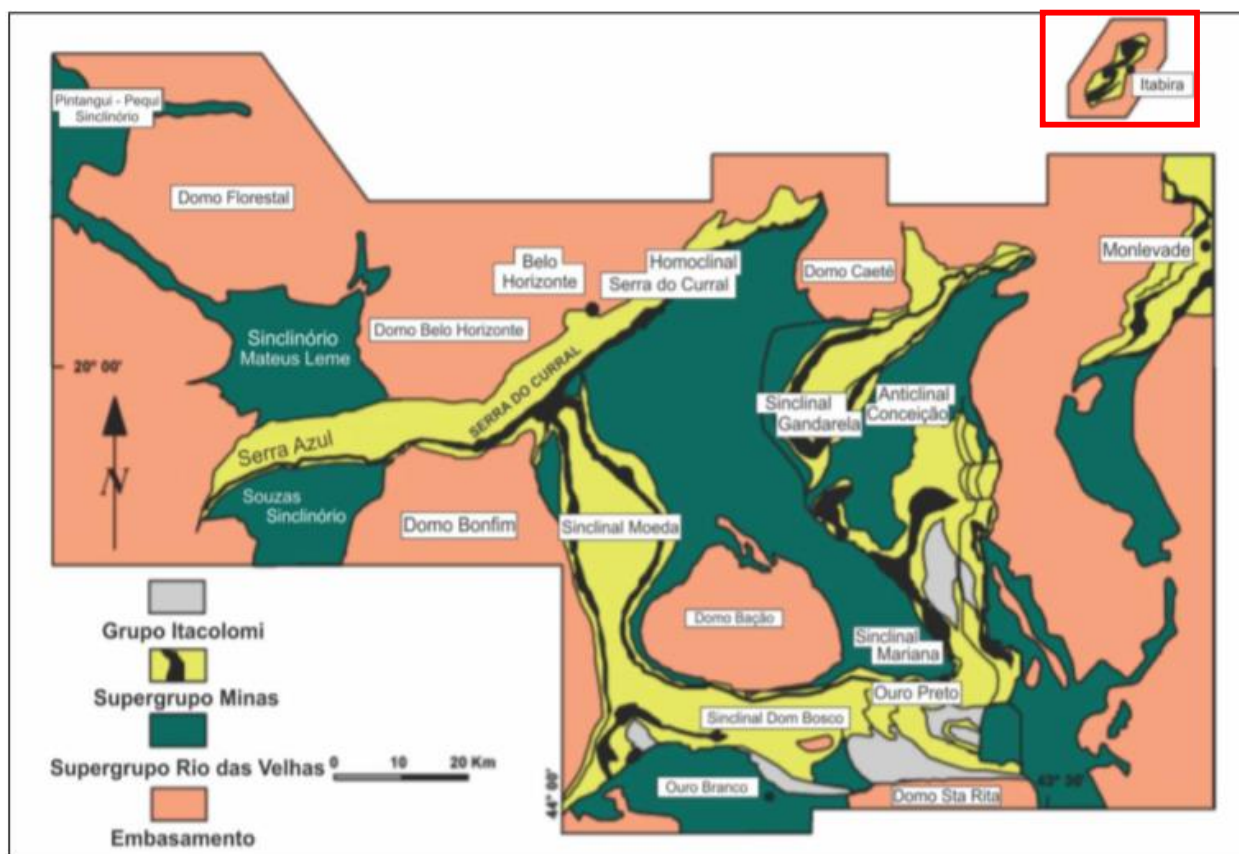
De acordo com Ribeiro (2017), dentre outras questões, eventos de rompimento de barragens de rejeito, a exemplo do ocorrido em Brumadinho e em Mariana, indicam que a gestão dos recursos hídricos precisa de ajustes para minimizar efeitos de eventos extremos e evitar o comprometimento do desenvolvimento do país.

3.2 Minério de ferro em Itabira/MG: extração, beneficiamento e geração de rejeitos

O município de Itabira-MG está localizado em uma estrutura geológica denominada Quadrilátero Ferrífero, apresentando vantagens geográficas e econômicas em relação à prospecção de minério de ferro, uma vez que seus depósitos são de boa qualidade e de fácil extração (ANDRADE, 2012).

O Quadrilátero Ferrífero possui forma semelhante a um quadrado, estendendo-se por uma área de aproximadamente 7.000 km² desde as cidades de Ouro Preto a sudeste, e Belo Horizonte, a noroeste (ANDRADE, 2012). É composto pelas unidades litoestratigráficas denominadas de embasamento cristalino, Supergrupo Rio das Velhas, Supergrupo Minas e Grupo Itacolomi (Figura 7).

Figura 7 - Mapa das unidades litoestratigráficas que compõem o Quadrilátero Ferrífero, com destaque para a cidade de Itabira/MG



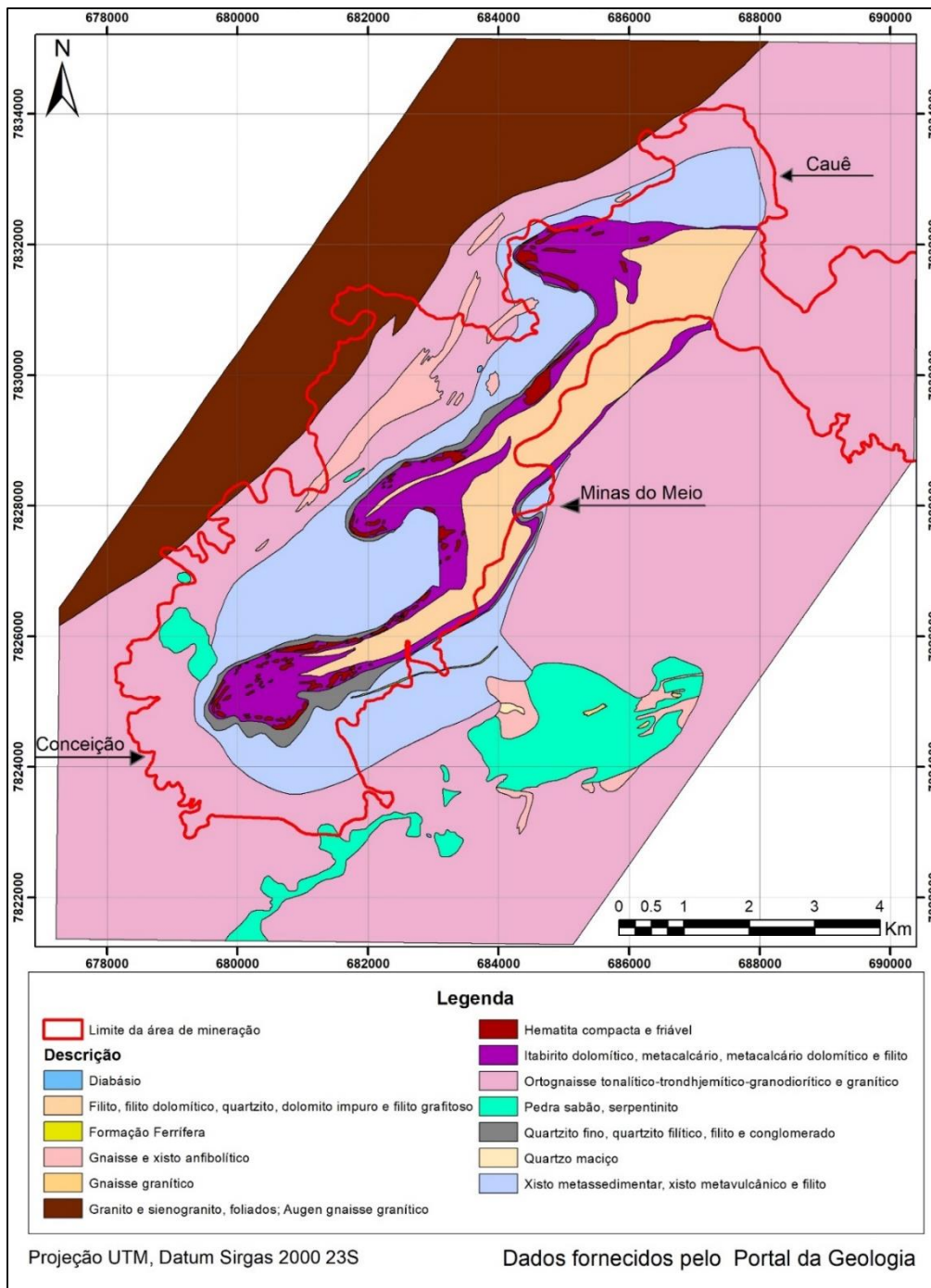
Fonte: AMORIM & ALKMIM (2011) *apud* RODRIGUES (2015) (adaptado)

O Supergrupo Minas, por sua vez, encontra-se subdividido em unidades inferiores denominadas Grupo Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará (ROSIÈRE; CHEMALE JUNIOR, 2000). O Complexo Minerador de Itabira, formado pelas Minas do Meio, Cauê

e Conceição da empresa mineradora Vale S/A, situa-se na porção nordeste do Quadrilátero, sendo parte integrante do Grupo Itabira.

Segundo o autor Door II (1969) citado por Rodrigues (2015), o Grupo Itabira é composto pela Formação Cauê, onde predominam rochas do tipo itabirito e Formação Gandarela, que apresenta rochas carbonáticas (dolomitos, mármore dolomíticas e mármore calcíticas), filitos e Formações Ferríferas Bandadas (FFB's), não havendo uma separação nítida entre essas duas formações. Ademais, a Formação Cauê é composta por lentes e camadas de hematita compacta que contém grandes volumes de minérios hematíticos friáveis e compactos de alto teor (ROSIÈRE; CHEMALE JUNIOR, 2000). A figura 8 apresenta a descrição litológica do município de Itabira-MG, com destaque para o contorno aproximado do Complexo Minerador de Itabira.

Figura 8 - Descrição litológica do município de Itabira-MG, com destaque para o Complexo Minerador de Itabira



As rochas do tipo itabirito são definidas pela variação de bandas, constituídas por óxidos de ferro e minerais transparentes, com teor primário variando entre 20% e 55% de ferro (Fe) total (CHEMALE JUNIOR; TAKEHARA, 2013). De acordo com esses mesmos autores, em termos composicionais, o itabirito pode ser dividido em comum, dolomítico e anfíbolítico com base na composição dos minerais transparentes (Tabela 1).

Tabela 1 - Mineralogia de diferentes tipos de minério de ferro

Tipos de minérios	Componentes principais		Acessórios
Itabirito Comum	Bandas Claras	Quartzo	Hematita, clorita, sericita, dolomita, pirofilita, óxido de manganês
	Bandas Escuras	Óxidos de ferro	Sericita, quartzo, pirofilita
Itabirito Dolomítico	Bandas Claras	Dolomita	Quartzo, óxido de ferro, pirofilita, talco, óxido de manganês
	Bandas Escuras	Óxidos de ferro	Quartzo, dolomita, óxido de ferro
Itabirito Anfibolítico	Bandas Claras	Tremolita/actinolita hornblenda, grunerita	Quartzo, dolomita, óxido de ferro
	Bandas Escuras	Óxido de ferro	Quartzo, dolomita, anfibólitos
Alto teor	Hematita		Magnetita, quartzo, pirofilita

Fonte: RORIÈRE et al. (1991) *apud* CHEMALE JÚNIOR; TAKEHARA (2013) (adaptado)

O itabirito, em consequência de sua origem sedimentar química e teor de ferro, é classificado como Formação Ferrífera Bandada (FFB) (ALKMIM, 2014). Nas minas de Itabira/MG esse tipo de formação apresenta uma mineralogia complexa, sendo que a mistura de materiais ígneos, FFB's e diferentes teores de Óxido de Manganês (MnO), produziu óxidos complexos e hidróxidos contendo Ferro (Fe), Alumínio (Al), Manganês (Mn), Titânio (Ti), Cálcio (Ca), Sódio (Na), Potássio (K), Bário (Ba), Lítio (Li), Berílio (Be), Flúor (F), alguns fosfatos (monazita) e silicatos minerais (feldspato e micas) (RODRIGUES, 2015).

As formações ferríferas bandadas compreendem as maiores reservas de ferro do mundo (CARVALHO et al., 2014). Por esse motivo, rochas do tipo itabirito são exploradas para a obtenção do mineral-minério⁴ detentor de ferro. Associadas ao seu processo de exploração, destacam-se pelo volume de resíduos gerados, as etapas de extração ou lavra e beneficiamento do minério de ferro.

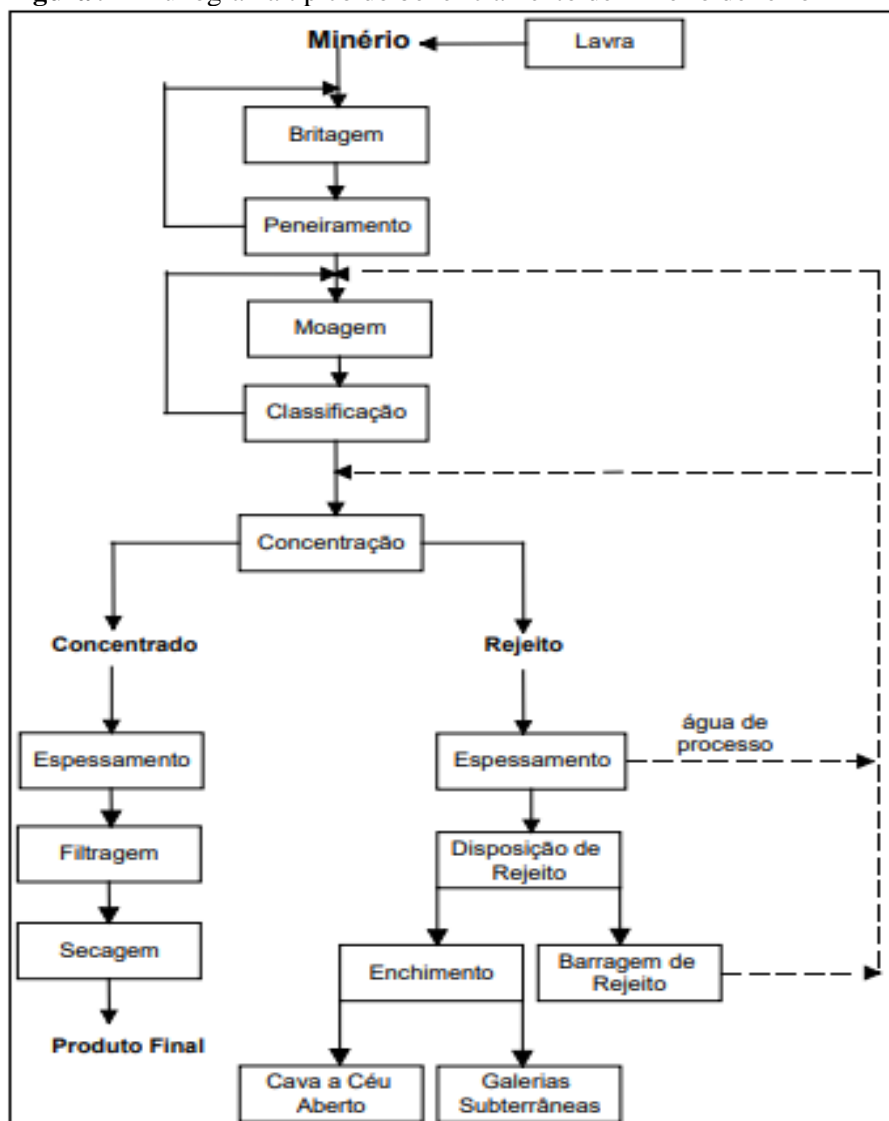
A lavra é a primeira etapa para a extração do minério de ferro, nesse processo ocorre a escavação para a retirada do solo de recobrimento e o desmonte da rocha (CAMPANHA, 2015). Os resíduos gerados nessa etapa, conforme o Plano Nacional de

⁴ Minério é toda rocha constituída de um mineral-minério, ou seja, que apresenta valor econômico, os demais minerais são denominados ganga (LUZ; LINS, 2010).

Resíduos Sólidos, são denominados estéreis e não apresentam valor econômico, sendo dispostos em pilhas (BRASIL, 2011).

Posteriormente, o minério de ferro é encaminhado para uma série de etapas denominadas de beneficiamento, que visam prepará-lo granulometricamente, concentrá-lo ou purificá-lo por métodos físicos e químicos sem alteração da constituição química dos minerais; sendo que os produtos derivados dessas etapas são o concentrado e o rejeito (LUZ; LINS, 2010). A figura 9, representa um fluxograma típico de beneficiamento de minério de ferro com recirculação de água.

Figura 9 - Fluxograma típico do beneficiamento de minério de ferro

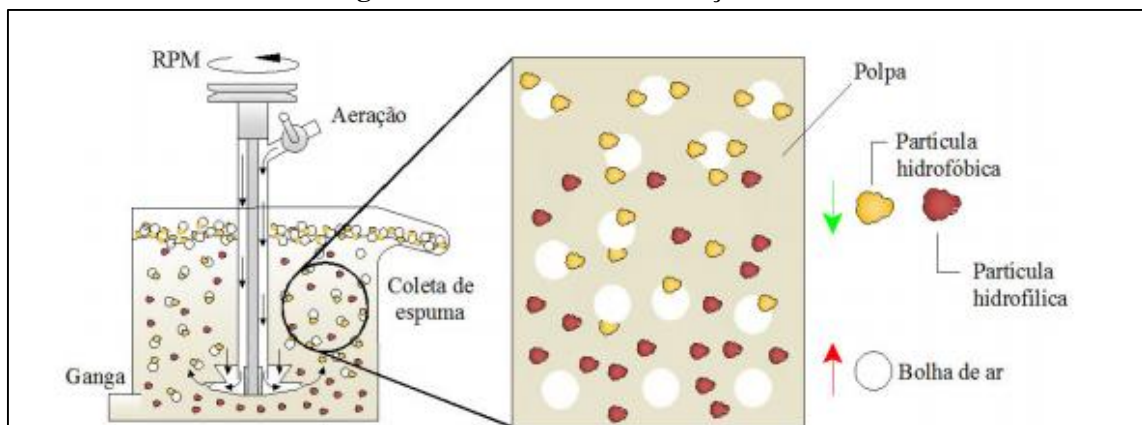


Fonte: LUZ; LINS (2010)

Atualmente, a flotação é o principal processo de concentração utilizado para o beneficiamento de minérios com baixo teor e granulometria fina (CAMPANHA, 2015).

O processo de flotação é fundamentado na interação da superfície dos minerais com os reagentes presentes do sistema (FERREIRA, 2011). Basicamente, esse processo pode ser explicado devido aos diferentes graus de hidrofobicidade, atração pela água, da superfície das espécies minerais (QUEIROZ, 2017). A fase líquida do sistema é constituída por água, substância polar, e o ar, fase gasosa, é constituído por moléculas apolares, assim, uma substância cuja superfície seja essencialmente apolar terá maior afinidade com as bolhas de ar do que com a água (PERES & ARAÚJO, 2006 *apud* QUEIROZ, 2017). De acordo com Nascimento (2010) o ar transporta as partículas hidrofóbicas (apolares) para a superfície da suspensão onde essas são removidas. A figura 10 ilustra o mecanismo de flotação.

Figura 10 - Mecanismo de flotação



Fonte: VERAS (2010) *apud* QUEIROZ (2017)

Para que o processo de flotação ocorra de maneira eficiente é necessário a adição de alguns reagentes com o propósito de modificar a superfície dos minerais (GUEDES, 2012). No caso dos minérios itabiríticos, formados predominantemente por hematita e quartzo, dois minerais naturalmente hidrofílicos, utiliza-se a flotação catiônica reversa de silicatos, como o quartzo, para a separação desses minerais (QUEIROZ, 2017). Nesse processo, para induzir o caráter hidrofóbico nas partículas de quartzo, permitindo sua flotação, são utilizadas eteraminas parcialmente neutralizadas com ácido acético. Para reforçar o caráter hidrofílico de partículas da hematita, é adicionado amido como agente depressor (PERES & ARAÚJO, 2006; CHAVES et al., 2010 *apud* QUEIROZ, 2017).

Os principais reagentes adicionados na etapa de flotação são:

a) Depressores: são capazes de inibir a ação do coletor e tornar a superfície das partículas de hematita hidrofílicas, os agentes depressores mais utilizados são o amido e seus produtos derivados (FERREIRA, 2011). Segundo os autores Monte e Peres (2010)

citados por Guedes (2012) o amido é uma reserva energética vegetal formada basicamente pela condensação de moléculas de glicose ($C_6H_{12}O_6$) geradas por processo fotossintético. Os amidos são insolúveis em água fria e para que seja possível sua utilização como reagente de flotação é necessária sua gelatinização por hidróxido de sódio (NaOH) (GUEDES, 2012).

b) Coletores: são responsáveis por alterar a superfície dos minerais, mudando o caráter da superfície de hidrofílico para hidrofóbico; os principais agentes coletores utilizados na flotação de minérios de ferro são as aminas (FERREIRA, 2011). De acordo com Gomes (2009) as aminas são substâncias químicas derivadas da amônia (NH_3) por substituição dos seus hidrogênios por cadeias hidrocarbônicas.

c) Espumantes: são responsáveis por aprimorar as condições de coleta das partículas do mineral que se encontra na superfície (hidrofobizado) (FERREIRA, 2011). No caso da flotação catiônica reversa de minérios de ferro, os coletores utilizados, as éter aminas, agem também como espumantes (GUEDES, 2012).

Portanto, a composição química do rejeito de minério de ferro está relacionada com o processo industrial e os reagentes utilizados no beneficiamento, bem como ao tipo de minério (ARAÚJO, 2006; DUTRA et al., 2019). Este é consequência da geologia local, sendo que, o principal componente do rejeito são os próprios minerais presentes na rocha extraída e beneficiada.

3.3 Potencial poluidor de rejeitos de flotação de minério de ferro

Os minerais presentes no rejeito de minério de ferro, bem como os reagentes utilizados no processo de flotação catiônica, quando utilizados como componente de pavimentos, estão sujeitos a intempéries ou ao contato com outros elementos químicos, que podem provocar a liberação de constituintes com potencial de contaminação.

Segundo Costa e outros (2004), existem diversos íons ou compostos de natureza orgânica ou inorgânica que podem contaminar⁵ e posteriormente poluir⁶ o solo e as águas

⁵ O termo contaminação é utilizado para designar o aumento na concentração de algum elemento, em relação às concentrações naturais (Alloway, 1995 *apud* Costa et al., 2004).

⁶ O termo poluição refere-se ao aumento da concentração de algum elemento, em quantidades que afetam os componentes bióticos do ecossistema, comprometendo seu funcionamento e sustentabilidade (Alloway, 1995 *apud* Costa et al., 2004).

superficiais e subterrâneas. Nesse contexto, qualquer elemento que represente fonte potencial, mesmo que pequena, de contaminação e riscos ambientais deve ser avaliado.

Segundo Ferreira (2018) o rejeito de flotação de minério de ferro da Mina Cauê, localizada no complexo minerador da cidade de Itabira/MG, é composto por silicatos (quartzo, caulinita, talco, pirofilita e muscovita), óxido de ferro (hematita) e hidróxido de alumínio (gibbsita). Os resultados são corroborados por Wolff (2009), que estudando os rejeitos das Minas Cauê e Conceição (Itabira/MG) conclui que o rejeito é composto basicamente pelos minerais hematita, goethita, caulinita, quartzo, talco, muscovita e gibbsita.

De acordo com os autores Gomes (2009), Amaral (2014) e Lima (2014) a composição química dos minerais, encontrados na caracterização mineralógica do rejeito de minério de ferro da Mina Cauê, é descrita conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Composição química dos minerais que compõem o rejeito de minério de ferro da Mina Cauê-MG

Mineral	Fórmula Química	Composição
Quartzo	SiO ₂	46,7% de Si; 53,3% de O.
Caulinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	39,5% de alumina (Al ₂ O ₃); 46,5% de sílica (SiO ₂); 14,0% de água (H ₂ O).
Talco	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	31,89% de óxido de magnésio (MgO); 63,36% de sílica (SiO ₂); 4,75% de água (H ₂ O).
Pirofilita	Al ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	28% de alumina (Al ₂ O ₃); 67 % de sílica (SiO ₂); 5% de água (H ₂ O).
Muscovita	KAl ₂ AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂	11,82 % de óxido de potássio (K ₂ O); 38,38 % de óxido de alumínio (Al ₂ O ₃); 45,23 % dióxido de silício (SiO ₂); 4,29 % de água (H ₂ O).
Hematita	Fe ₂ O ₃	69,94% de ferro (Fe); 30,06% de oxigênio (O).
Gibbsita	Al(OH) ₃	62,8% a 65,3% de óxido de alumínio (Al ₂ O ₃); 31,8 a 34,12% de água (H ₂ O).

Fonte: GOMES (2009); AMARAL (2014); LIMA (2014)

Ainda segundo Ferreira (2018), a partir da análise mineralógica semiquantitativa por MEV/EDS, constatou-se que o rejeito de flotação de minério de ferro da mina Cauê é composto predominantemente pelos elementos silício (Si), oxigênio (O), ferro (Fe), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e sódio (Na). Além destes elementos, foi detectado por meio da caracterização química das amostras de rejeito a presença de manganês (Mn). Comparando os resultados do MEV/EDS com a análise mineralógica por Difração de Raios-X conclui-se no estudo que os elementos Si, O, Fe, Mg e K são provenientes dos minerais que compõem o rejeito de beneficiamento do itabirito e os

elementos Ca, Na e o Mn são considerados impurezas, provenientes de intrusões de outras rochas (FERREIRA, 2018).

O silício (Si), que compõe os minerais caulinita, quartzo, talco e muscovita, o magnésio (Mg) que compõe o mineral talco e o potássio (K) que compõe o mineral muscovita são essenciais aos seres humanos, não sendo considerados elementos tóxicos.

O ferro, que compõe os minerais hematita e goethita, apresenta baixa toxicidade para plantas e mamíferos, sendo considerado um micronutriente essencial para os seres vivos (GUILHERME et al., 2005). Apesar de não ser considerado um constituinte essencialmente tóxico, confere cor e sabor às águas, além de problemas aos sistemas de distribuição, como desenvolvimento de depósitos em canalizações e de ferro-bactérias, provocando a contaminação biológica da água na própria rede de distribuição (CETESB, 2017).

Ao contrário do ferro, o alumínio que compõe os minerais caulinita, muscovita e gibbsita não é considerado essencial aos seres vivos, apresentando toxicidade moderada para plantas e baixa para os mamíferos (GUILHERME et al., 2005). Esse elemento, na forma dissolvida no solo, é extremamente tóxico para as plantas (CETESB, 2017). Na água, o aumento da concentração de alumínio está associado com o período de chuvas e, portanto, com a alta turbidez. Outro aspecto da química do alumínio é a sua dissolução no solo para neutralizar a entrada de ácidos com as chuvas ácidas, sendo que nesta forma, ele é extremamente tóxico à vegetação e pode ser escoado para os corpos d'água (CETESB, 2017).

O manganês é um elemento essencial a muitos organismos, incluindo os seres humanos, ocorrendo naturalmente nas águas superficiais e subterrâneas; entretanto, em concentrações elevadas desenvolve coloração negra na água, podendo se apresentar nos estados de oxidação Mn^{+2} (mais solúvel) e Mn^{+4} (menos solúvel) (CETESB, 2017). Em concentrações acima dos limites ideais o manganês pode trazer sintomas de toxicidade aos seres vivos (PEREIRA et al., 2013).

Os elementos com potencial de contaminação do meio ambiente como o ferro e o alumínio estão agregados a outros, formando o mineral; e sua liberação depende da

estabilidade⁷ desse, de modo que alguns minerais liberarão os elementos que o constituem mais rapidamente que outros (TOLEDO; OLIVEIRA; MELFI, 2009). Ainda, segundo os autores Grotzinger e Jordan (2013), quanto maior a estabilidade do mineral, menor a sua solubilidade, o que indica dificuldade de lixiviação de elementos solúveis no solo; o quartzo, por exemplo, é um mineral estável em condições de intemperismo; desta forma, sua solubilidade na água é pequena, o que dificulta a lixiviação de seus elementos no solo.

Ademais podem ser encontrados elementos-traço⁸ nas rochas e conseqüentemente no rejeito produzido pela mineração. Dentre os diversos elementos-traço existentes, alguns são considerados essenciais do ponto de vista biológico, mas mesmo esses, sob determinadas condições específicas, podem provocar contaminação ou poluição do solo e água (GUILHERME et al., 2005). A toxicidade de elementos-traço é controlada por suas propriedades físicas e químicas, de forma que seu estado de oxidação determina a sua mobilidade, biodisponibilidade e toxicidade (COSTA et al., 2004).

No estudo de Ferreira (2018) foram detectados no rejeito de flotação de minério de ferro da Mina Cauê os elementos-traço cobre (Cu), cromo (Cr), Zinco (Zn) e Bário (Ba), não sendo detectada a presença de arsênio (As), cádmio (Cd), chumbo (Pb), cianeto (CN⁻), cloreto (Cl⁻), fluoreto (F⁻), mercúrio (Hg), nitrato (NO₃⁻), prata (Ag) e selênio (Se) e sulfato (SO₄²⁻). Os elementos cobre, cromo, zinco e bário provavelmente ocorrem como impurezas no minério de ferro, relacionadas à presença de pequenos veios e/ou contato com outras rochas (FERREIRA, 2018).

Alguns dos elementos detectados no rejeito em determinadas concentrações são considerados essenciais; contudo, em excesso, podem ser tóxicos aos seres humanos e às plantas (CPRM, 2016). Desta forma, a poluição do solo e de sistemas aquáticos por estes elementos afeta a qualidade do meio ambiente e constitui risco à saúde humana.

O cobre, o cromo e o zinco são micronutrientes essenciais aos seres humanos (CETESB, 2017). Por outro lado, o bário não é considerado essencial, sendo prejudicial à saúde; é bastante solúvel e ativo quimicamente, o que permite seu alcance em longas distâncias a partir do ponto de emissão (Costa et al. 2004).

⁷ A estabilidade dos minerais é medida pela sua tendência em resistir à alterações químicas (GROTZINGER; JORDAN, 2013).

⁸ O termo elemento-traço é utilizado para definir metais catiônicos encontrados em baixas concentrações em solos e plantas, sendo preferido em detrimento da expressão metal pesado, a qual não apresenta uma definição única (GUILHERME et al., 2005).

Além dos minerais, o emprego no processo de flotação, de coletores, depressores, espumantes, podem representar uma fonte de poluição por fenóis e surfactantes.

Os fenóis são compostos tóxicos ao ser humano, organismos aquáticos e microorganismos, apresentando por esse motivo limites bastante restritivos para a sua concentração na água (CETESB, 2017). Os derivados fenólicos são compostos que não ocorrem naturalmente nos corpos d'água, sendo incluídos na lista de poluentes prioritários de acordo com a Agência de Proteção Ambiental Americana (US Environmental Protection Agency – EPA), um dos principais órgãos de controle ambiental do mundo (CUNHA; AGUIAR, 2014).

Os surfactantes ou agentes tensoativos podem ser encontrados no rejeito devido ao seu uso como coletores (aminas) no processo de flotação do minério de ferro. Os surfactantes também são considerados tóxicos, em especial para os ecossistemas aquáticos (CETESB, 2017). A solubilidade das aminas utilizadas no processo de flotação está relacionada ao tamanho, tipo de grupo funcional, número e saturação de cadeias carbônicas, sofrendo uma grande variação em uma pequena faixa de temperatura (NEDER; LEAL FILHO, 2006).

A presença desses compostos nos corpos hídricos provoca dentre outros danos aumento da solubilidade de espécies orgânicas, eutrofização, diminuição da penetração de luz solar e da solubilidade de oxigênio, o que conseqüentemente, causa a morte de microorganismos, peixes e plantas aquáticas (FELIPE; DIAS, 2017). Podem exercer efeitos tóxicos sobre os ecossistemas aquáticos dependendo da taxa de biodegradação, do comportamento dos derivados da biodegradação, em combinação com a toxicidade aquática e com a bioacumulação (DALTIM, 2011).

Além destes compostos, a presença do elemento sódio é relacionada ao emprego do hidróxido de sódio (NaOH) como agente gelatinizador no processo de flotação do minério de ferro. Com relação ao sódio, o risco de lixiviação é alto, uma vez que o elemento não faz parte da estrutura de um mineral, mas sim de reagente químico utilizado no processo de flotação do minério de ferro. O sódio presente no rejeito pode afetar a capacidade de infiltração do solo e conferir gosto aos recursos hídricos (CETESB, 2017).

Além disso, o hidróxido de sódio utilizado para a gelatinização dos depressores é altamente instável, absorvendo umidade e dissociando-se completamente na água;

liberando hidroxila (OH) no meio, o que pode provocar a elevação do pH da água da chuva quando em contato com o rejeito, por exemplo (CETESB, 2017).

Diante do exposto, ressalta-se que os resíduos são classificados em função de seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, sendo sua periculosidade definida em função de suas propriedades físico químicas (OLIVEIRA; HOLANDA, 2004). Segundo esses autores a utilização de resíduos está, portanto, sujeita às legislações ambientais e normas técnicas, que estabelecem requisitos e critérios para que o aproveitamento seja feito de forma sustentável.

Assim, para avaliar o potencial de aproveitamento do rejeito devem ser realizados estudos dos riscos de contaminação advindos do emprego deste resíduo em outros setores produtivos; considerando os aspectos que influenciam em sua composição, bem como o uso final do rejeito (HEIDER, 2020).

3.4 Aproveitamento de rejeitos e pavimentação asfáltica

O aproveitamento de rejeito de minério de ferro vem sendo estudado para diversos usos, especialmente na indústria da construção civil, que tem grande potencial para absorver resíduos de outras indústrias. Heider (2020) destaca os principais usos e os aspectos críticos do aproveitamento do rejeito de mineração, citando seu uso para produção de agregados para construção, pavimentação, blocos e peças de concreto, argamassa, pigmentos, areia industrial, pozolana para estradas, pozolana para cimento, cerâmica, rochas artificiais, dentre outros.

Os estudos são concentrados especialmente na avaliação de viabilidade do uso, por meio da caracterização do rejeito. As características químicas do rejeito, por exemplo, são próximas às requeridas para fabricação de produtos de cerâmica, para a fabricação de pavimento e substituição dos agregados para concreto (ANDRADE; MARQUES; PEIXOTO, 2016).

Silva (2014) estudou o potencial de uso do rejeito de concentração de minério de ferro como parte do traço de blocos intertravados de concreto, em substituição à areia de sílica e para obtenção da cerâmica. Neste estudo, o autor constatou que o rejeito é viável na substituição de agregados finos e grossos dos blocos, no que diz respeito à resistência mecânica, e para cerâmicas a resistência à flexão dos corpos de prova foi superior à das cerâmicas sem adição de resíduos. Constatou-se também, por meio de testes de lixiviação,

que a adição de rejeito aos blocos de concreto não apresentou risco ao meio ambiente quando submetidos a intempéries.

Os autores Xingdong e outros (2019) avaliaram a possibilidade de utilização de rejeito em substituição aos agregados para fabricação de concreto para construção de barragens, concluindo que o uso neste caso pode trazer benefícios ambientais e econômicos significativos.

Aguiar e outros (2015) avaliaram a viabilidade técnica de utilização do rejeito gerado na exploração de minério de ferro como matéria prima para confecção de argamassa, concluindo que seu uso é tecnicamente viável. Os resultados deste estudo foram bastante satisfatórios, uma vez que o aumento de rejeito incorporado favoreceu a resistência à compressão final do produto.

Campanha (2011) realizou um estudo de caracterização química, mineralógica e geotécnica de rejeitos provenientes do beneficiamento de ferro para uso em pavimentação. Este estudo concluiu que o rejeito apresenta potencial para uso, especialmente quando melhorado com cimento.

Os autores Bastos e outros (2016) avaliaram a viabilidade de uso do rejeito de minério de ferro como material alternativo para infraestrutura rodoviária; por meio da caracterização química, mineralógica, ambiental e física do rejeito. Neste estudo, o cimento foi o estabilizador mais eficiente entre os ligantes estudados (cimento, cal ou escória de fabricação de aço como aglutinante) e os resultados indicaram que os rejeitos de minério de ferro, quimicamente estabilizados, são uma solução viável para uso como camadas para pavimentação de estradas.

O pavimento de uma rodovia pode ser definido como a superestrutura construída por um sistema de camadas de espessuras finitas, sobre a infraestrutura ou terreno de fundação, denominada subleito (DNIT, 2006). Os pavimentos podem ser classificados em flexíveis, semi-rígidos e rígidos, sendo: a) pavimentos flexíveis são aqueles em que todas as camadas sofrem deformação elástica⁹ significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas; b) pavimentos semi-rígidos aqueles caracterizados por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias; c) pavimentos rígidos são aqueles que

⁹ Deformação em que não ocorre mudança dimensional permanente, isto é, com o fim do carregamento, o material volta ao estado inicial (YOUNG; FREEDMAN, 2008).

possuem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorvem praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado (DNIT, 2006).

As camadas que compõem a estrutura dos pavimentos podem ser divididas em subleito, sub-base, base e revestimento. O subleito é o terreno de fundação do pavimento ou do revestimento; a sub-base é a camada corretiva do subleito, ou complementar a base; a base é a camada que resiste e distribui os esforços verticais advindos dos veículos e sobre a qual se constrói o revestimento; o revestimento é a camada que se destina a melhorar as condições de rolamento da pista e a resistir aos esforços horizontais que nele atuam, sendo, tanto quanto possível, impermeável (CAMPANHA, 2011). Ainda, quando necessário, há a construção de uma camada de reforço entre o subleito e a sub-base (BERNUCCI, 2008).

Os materiais que compõem as camadas da estrutura do pavimento devem ser avaliados de acordo com as suas propriedades visando o dimensionamento adequado do pavimento para que este resista à ruptura, permeabilidade e deformabilidade; sendo que os principais materiais empregados são: agregados, solo e aditivos como cimento e cal (BERNUCCI, 2008).

O agregado é um material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produção de argamassas e de concreto (ABNT, 2011). De acordo com Woods (1960) citado por Bernucci (2008) os agregados podem ser uma mistura de pedregulho, areia, pedra britada, escória ou outros materiais minerais usada em combinação com um ligante.

Os solos utilizados em pavimentos devem apresentar propriedades que lhes permitam resistir aos esforços e deformações impostas pelo tráfego. Nos casos em que as propriedades naturais do solo não se enquadrem nas especificações necessárias, é preciso realizar a sua estabilização, que pode ser granulométrica ou utilizando os aditivos cimento ou cal (CAMPANHA, 2011).

Na estabilização granulométrica é incorporado ao solo um material, ou a mistura de materiais, que apresente uma granulometria apropriada e índices geotécnicos específicos (DNIT, 2006). A estabilização com cimento pode ser classificada, a depender do teor de cimento adicionado, em solo-cimento (teor de cimento entre 6% e 10%) e solo melhorado com cimento (teor de cimento entre 2% e 4%) (DNIT, 2006). O mecanismo

de reação da mistura de solo e cimento se dá por meio de reações químicas geradas a partir da hidratação do cimento (mistura do cimento com água) (CAMPANHA, 2011). A mistura de solo-cimento é utilizada com o objetivo de enrijecimento do solo, e a mistura de solo melhorado com cimento tem por objetivo a melhoria parcial das propriedades do solo, principalmente a trabalhabilidade conjugada com certo aumento da capacidade suporte (BERNUCCI, 2008).

Assim como a estabilização com cimento, a estabilização química de solo com cal tem por objetivo o enrijecimento, para trabalhabilidade e redução da expansão, sendo que em geral utiliza-se cal em teordes de 4% a 10% em massa (BERNUCCI, 2008).

Segundo Bernucci (2008) os pavimentos devem ser construídos a fim de resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança. Desta forma, o dimensionamento destas estruturas deverá ser efetuado de forma a atender a essas funções, através das camadas componentes, e construídas de materiais adequados para suportar os esforços e as adversidades climáticas (CAMPANHA, 2011).

Nesse sentido, os estudos relativos ao aproveitamento do rejeito de minério de ferro indicam que o rejeito apresenta potencial para aplicação em pavimentação asfáltica, desde que sejam avaliadas as suas propriedades geotécnicas e químicas a fim de assegurar a viabilidade técnica e ambiental do seu aproveitamento.

4 METODOLOGIA

Os procedimentos metodológicos foram divididos em quatro etapas: i) amostragem de rejeitos de flotação de minério de ferro; ii) realização de ensaios de lixiviação e de solubilização em amostras de rejeito; iii) realização de ensaios de lixiviação e de solubilização em corpos de prova confeccionados simulando a composição real de pavimentos rodoviários; iv) interpretação dos dados e elaboração do produto; conforme descrito a seguir.

4.1 Amostragem de rejeito de flotação de minério de ferro

As amostras de rejeito utilizadas neste estudo são provenientes do processo de flotação de minério de ferro realizado na Mina Cauê operada pela empresa Vale S/A, localizada no complexo minerador do município de Itabira/MG. Foram coletadas, de forma contínua, 18 (dezoito) amostras de rejeito no duto de saída da flotação. As amostras foram devidamente acondicionadas em recipientes inertes e esterilizados, refrigeradas e encaminhadas à laboratório técnico especializado em classificação de resíduos; seguindo procedimentos da ABNT NBR 10007:2004 e Cetesb (2017).

4.2 Realização de ensaios de lixiviação e de solubilização em amostras de rejeito

Para avaliar o comportamento dos rejeitos em relação aos riscos de contaminação ambiental foram realizados ensaios de lixiviação segundo ABNT NBR 10005:2004 e de solubilização segundo ABNT NBR 10006:2004 em laboratório técnico especializado em classificação de resíduos. Os ensaios visam atender às especificações da norma ABNT NBR 10004:2004 para classificação de resíduos sólidos, por meio da avaliação da mobilidade e da solubilidade de elementos químicos potencialmente contaminantes presentes nas amostras.

De acordo com a referida norma os resíduos podem ser divididos em classe I, perigosos, ou classe II, não perigosos (ABNT, 2004a). Aqueles classificados como não perigosos podem ser subdivididos em classe IIA, não inertes, ou classe IIB, inertes. A classificação dos resíduos nas classes citadas é realizada a partir das normas: i) ABNT NBR 10005:2004 - Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, que classifica os resíduos em classe I ou II; e ii) ABNT NBR 10006:2004 - Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, que classifica os resíduos em classe IIA ou IIB.

Os resíduos perigosos são aqueles que em função de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, apresentam riscos à saúde pública ou ao meio ambiente, quando dispostos ou manuseados de maneira inadequada (ABNT, 2004a). Os resíduos não perigosos não inertes (classe IIA), segundo a referida norma, são aqueles que apresentam seus constituintes solubilizados em concentrações superiores às listadas; e os inertes (classe IIB) não apresentam seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, exceto: cor, turbidez, dureza e sabor (ABNT, 2004a).

Para a classificação do rejeito foram analisados os teores totais dos seguintes parâmetros: i) parâmetros inorgânicos: alumínio, arsênio, bário, cádmio, chumbo, cromo, cianeto, cloretos, cobre, ferro, fluoreto, manganês, mercúrio, nitrogênio nitrato, selênio, sódio, sulfatos, surfactantes, prata, selênio, ii) parâmetro orgânico: fenóis. Tais parâmetros estão especificados nas normas ABNT NBR 10005:2004 - Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos e ABNT NBR 10006:2004 - Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, considerando o tipo de resíduo a ser analisado. A avaliação dos teores de surfactantes, fenóis e sódio é justificada pela presença desses elementos nos reagentes utilizados no processo de flotação.

A análise dos extratos de lixiviação e de solubilização foi realizada de acordo com os seguintes métodos: SM¹⁰-3120B (alumínio, arsênio, bário, cádmio, chumbo, cobre, cromo, ferro, manganês, prata, selênio, sódio e zinco); SM⁶-3112B (mercúrio); SM⁶-4500-CN (cianeto); SM⁶-4500-Cl (cloretos); SM⁶-5530D (fenóis); SM⁶-4500 F (fluoreto); EPA SW¹¹-846 (nitrato); SM⁶ 4500SO₄²⁻-E (sulfato) e SM⁶ 5540 C (surfactantes).

4.3 Realização de ensaios de lixiviação e de solubilização em corpos de prova confeccionados simulando a composição real de pavimentos rodoviários

Para avaliar o comportamento de pavimentos com diferentes composições e teores variáveis de rejeito, em relação aos riscos de contaminação ambiental, foram realizados ensaios de lixiviação segundo ABNT NBR 10005:2004 - Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos e ABNT NBR 10006:2004 - Procedimento para

¹⁰ SM: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

¹¹ EPA SW: Environmental Protection Agency Methods for Evaluating Solid Waste.

obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos em corpos de prova confeccionados simulando a composição de pavimentos rodoviários. Tais ensaios foram realizados seguindo os mesmos procedimentos empregados nos ensaios em amostras de rejeito.

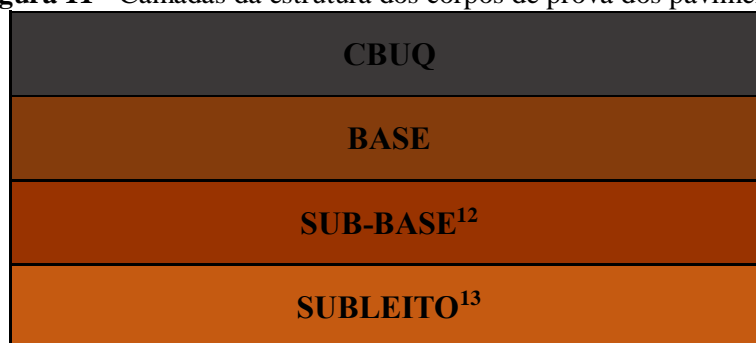
Os corpos de prova simulando a composição real dos pavimentos foram confeccionados avaliando 6 (seis) possibilidades de acordo com diferentes composições e camadas distintas da estrutura dos pavimentos. Para cada camada com adição de rejeito foram confeccionados 03 corpos de prova, totalizando 18 amostras, conforme tabela 2. Foram também confeccionados 03 corpos de prova com 100% de solo e 03 corpos de prova com 100% de mistura asfáltica (tabela 3), para avaliar o comportamento individual desses materiais nos ensaios de lixiviação e de solubilização.

Tabela 3 - Especificações dos corpos de prova analisados

Camada da Estrutura	Amostra	Composição	Porcentagem
Subleito	1	Solo/Rejeito	50% de rejeito 50% de solo
	2		
	3		
Sub-base	4	Solo/Rejeito	50% de rejeito 50% de solo
	5		
	6		
Sub-base	7	Solo/Rejeito/Cal	49% de rejeito 49% de solo 2% de cal
	8		
	9		
Sub-base	10	Solo/Rejeito/Cimento	74% de rejeito 25% de solo 1% de cimento
	11		
	12		
CBQU - Concreto Betuminoso Usinado a Quente	13	Mistura Asfáltica/Rejeito	5,6% de rejeito 94,4% de mistura asfáltica
	14		
	15		
BGS - Base	16	Rejeito/Agregado	10% rejeito 90% agregado
	17		
	18		
Subleito	19	Solo	100% de solo
	20		
	21		
CBQU - Concreto Betuminoso Usinado a Quente	22	Mistura Asfáltica	100% de mistura asfáltica
	23		
	24		

As camadas da estrutura dos corpos de prova dos pavimentos estão representadas na figura 11.

Figura 11 - Camadas da estrutura dos corpos de prova dos pavimentos



Para a confecção dos corpos de prova foram utilizados cal, cimento, agregado e mistura asfáltica, que são materiais comumente empregados em pavimentos asfálticos. A dosagem dos materiais e a confecção dos corpos de prova foi definida e executada considerando as especificações técnicas necessárias aos pavimentos.

O cimento utilizado foi o CP IV-32 da marca Cauê, classificado como cimento Portland pozolânico. De acordo com a ABNT NBR 5736:1991 este tipo de cimento é composto por clínquer sulfato de cálcio (85% a 45%), material pozolânico (15% a 50%) e material carbonático (0% a 5%). O clínquer sulfato de cálcio é um produto constituído em sua maior parte de silicatos de cálcio (Ca_2SiO_4) acrescido de sulfato de cálcio (CaSO_4) (ABNT, 1991); enquanto os materiais pozolânicos são materiais silicosos ou silicoaluminosos (ABNT, 1991).

Quanto a cal, utilizou-se a hidrata CH-III da marca Tradical. De acordo com a ABNT NBR 7175:2003 a cal hidratada é obtida a partir da hidratação da cal virgem, sendo constituída essencialmente por um mistura de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e hidróxido de magnésio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), ou ainda, de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio (MgO).

A mistura asfáltica utilizada possui composição constituída de 90% a 95% de hidrocarbonetos e de 5% a 10% de heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais – vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio) unidos por ligações covalentes (BERNUCCI, 2008).

¹² Para compactação da sub-base foi utilizada energia de compactação Proctor Intermediária de acordo com as especificações da Norma DNIT 163/2013-ME.

¹³ Para compactação do subleito foi utilizada energia de compactação Proctor Normal de acordo com as especificações da Norma DNIT 163/2013-ME.

Por fim, foi utilizado um solo laterítico para a construção dos corpos de prova. Segundo Bernucci (1995) estes solos apresentam excelentes propriedades geotécnicas para aplicação viária e grande disponibilidade no Brasil. De modo geral, os solos lateríticos possuem composição mineralógica formada por quartzo, óxidos e hidróxidos de Ferro (Fe), Alumínio (Al) e Manganês (Mn), e caulinita como argilomineral predominante (BATISTA; LEITE, 2010).

Os corpos de prova foram confeccionados e testados no laboratório de Pavimentação da Unifei – Itabira, como parte integrante de projeto de cooperação entre a universidade e a empresa mineradora Vale S/A.

4.4 Interpretação dos dados e elaboração do produto

A análise e interpretação de todos os resultados gerados foi realizada buscando avaliar a conformidade da utilização de rejeitos de flotação de minério de ferro em pavimentos rodoviários de acordo com a norma ABNT NBR 10004:2004 – Resíduos Sólidos – Classificação.

A partir da análise dos resultados foram propostas: i) recomendações para o emprego do rejeito de flotação de minério de ferro em pavimentos rodoviários de forma a minimizar os riscos de contaminação ambiental e ii) sugerida uma sequência metodológica a ser empregada por empresas de mineração para avaliar a viabilidade ambiental de aproveitamento de rejeitos de beneficiamento de minérios.

5 RESULTADOS

5.1 – Ensaios de lixiviação e solubilização em amostras de rejeitos de flotação de minério de ferro

Os resultados dos ensaios de lixiviação das amostras de rejeito de flotação de minério de ferro são apresentados na tabela 4.

Tabela 4 - Resultados dos ensaios de lixiviação das amostras de rejeito

Amostra	Parâmetros								
	As	Ba	Cd	Pb	Cr	F ⁻	Hg	Ag	Se
	Limite estabelecido pela ABNT NBR 10004:2004 (mg/L)								
	1	70	0,5	1	5	150	0,1	5	1
1	<0,005	<0,1	0,0046	<0,005	<0,01	<0,10	<0,0002	<0,01	<0,01
2	<0,005	0,18	0,0046	<0,005	0,021	<0,10	<0,0002	<0,01	<0,01
3	<0,005	0,10	0,0043	<0,005	<0,01	<0,10	<0,0002	<0,01	<0,01
4	<0,005	0,11	0,0043	<0,005	<0,01	<0,10	<0,0002	<0,01	<0,01
5	<0,005	0,23	0,0036	<0,005	<0,01	<0,10	<0,0002	<0,01	<0,01
6	<0,005	0,23	0,0039	<0,005	<0,01	<0,10	<0,0002	<0,01	<0,01
7	<0,005	0,27	0,0040	<0,005	<0,01	<0,10	<0,0002	<0,01	<0,01
8	<0,005	<0,1	0,0039	<0,005	<0,01	<0,10	<0,0002	<0,01	<0,01
9	<0,005	0,19	0,0050	<0,005	<0,01	<0,10	<0,0002	<0,01	<0,01
10	<0,005	<0,1	0,0048	<0,005	<0,01	<0,10	<0,0002	<0,01	<0,01
11	<0,005	<0,1	0,0041	<0,005	<0,01	<0,10	<0,0002	<0,01	<0,01
12	<0,005	0,11	0,0046	<0,005	<0,01	<0,10	<0,0002	<0,01	<0,01
13	<0,005	0,14	<0,0005	<0,005	<0,01	<0,10	<0,0002	<0,01	<0,01
14	<0,005	0,22	0,0047	<0,005	<0,01	<0,10	<0,0002	<0,01	<0,01
15	<0,005	0,32	0,0051	<0,005	<0,01	<0,10	<0,0002	<0,01	<0,01
16	<0,005	0,32	<0,0005	<0,005	<0,01	<0,10	<0,0002	<0,01	<0,01
17	<0,005	0,31	0,0046	<0,005	<0,01	<0,10	<0,0002	<0,01	<0,01
18	<0,005	0,51	0,0064	<0,005	0,021	<0,10	<0,0002	<0,01	<0,01

Os resultados demonstram que todos os parâmetros analisados – arsênio (As), bário (Ba), cádmio (Cd), chumbo (Pb), cromo (Cr), fluoreto (F⁻), mercúrio (Hg), prata (Ag) e selênio (Se) estão dentro do limite preconizado pela NBR.

Os teores de arsênio, chumbo, fluoreto, mercúrio, prata e selênio, nas 18 (dezoito) amostras analisadas, estiveram abaixo do preconizado pela norma, encontrando-se abaixo do limite de detecção do método empregado para cada parâmetro (0,005 mg/L arsênio e o chumbo; 0,10 mg/L fluoreto; 0,0002 mg/L mercúrio; 0,01 mg/L prata e selênio).

Para os teores de bário, cádmio e cromo todos os resultados encontram-se abaixo do limite estabelecido pela NBR. Para o bário, os teores variaram de <0,1 mg/L (abaixo do limite de quantificação do método) a 0,51 mg/L, sendo que o limite estabelecido é de 70 mg/L. Para o cádmio, os teores variaram de <0,0005 mg/L (abaixo do limite de

quantificação do método) a 0,0064 mg/L, sendo que o limite estabelecido é de 0,5 mg/L. Para o cromo, os teores variaram de <0,01 mg/L (abaixo do limite de quantificação do método) a 0,021 mg/L, sendo que o limite estabelecido é de 5 mg/L.

Os resultados dos ensaios de lixiviação indicam, portanto, que em relação ao rejeito de flotação de minério de ferro não há risco de lixiviação de contaminantes para a água e o solo. Desta forma, de acordo com a ABNT NBR 10004:2004 o rejeito de minério de ferro é classificado como sendo um resíduo de classe II – Não perigoso.

As Tabelas 5, 6 e 7 apresentam os resultados dos ensaios de solubilização das amostras de rejeito de minério de ferro. A Tabela 5 apresenta os resultados dos ensaios para os parâmetros alumínio (Al), arsênio (As), bário (Ba), cádmio (Cd), chumbo (Pb), cianeto (Cn⁻) e cloreto (Cl⁻).

Tabela 5 - Resultados dos ensaios de solubilização das amostras de rejeito para os parâmetros Al, As, Ba, Cd, Pb, Cn⁻ e Cl⁻

Amostra	pH da amostra	Parâmetros						
		Al	As	Ba	Cd	Pb	Cn ⁻	Cl ⁻
		Limite estabelecido pela ABNT NBR 10004:2004 (mg/L)						
		0,2	0,01	0,7	0,005	0,01	0,07	250
1	8,23	<0,1	<0,005	<0,1	<0,0005	<0,005	<0,02	<0,1
2	8,60	<0,1	<0,005	0,13	<0,0005	<0,005	<0,02	<0,1
3	8,03	<0,1	<0,005	<0,1	<0,0005	<0,005	<0,02	<0,1
4	8,16	<0,1	<0,005	0,13	<0,0005	<0,005	<0,02	<0,1
5	8,32	<0,1	<0,005	0,18	<0,0005	<0,005	<0,02	<0,1
6	8,13	<0,1	<0,005	<0,1	<0,0005	<0,005	<0,02	<0,1
7	8,16	<0,1	<0,005	0,18	<0,0005	<0,005	<0,02	<0,1
8	8,09	<0,1	<0,005	<0,1	<0,0005	<0,005	<0,02	<0,1
9	8,14	<0,1	<0,005	0,14	<0,0005	<0,005	<0,02	<0,1
10	8,20	<0,1	<0,005	<0,1	<0,0005	<0,005	<0,02	<0,1
11	8,00	<0,1	<0,005	<0,1	<0,0005	<0,005	<0,02	<0,1
12	8,16	<0,1	<0,005	<0,1	<0,0005	<0,005	<0,02	<0,1
13	8,03	<0,1	<0,005	0,21	<0,0005	<0,005	<0,02	<0,1
14	8,20	<0,1	<0,005	0,10	<0,0005	<0,005	<0,02	<0,1
15	8,14	<0,1	<0,005	0,22	<0,0005	<0,005	<0,02	<0,1
16	8,16	<0,1	<0,005	0,23	<0,0005	<0,005	<0,02	<0,1
17	8,34	<0,1	<0,005	<0,1	<0,0005	<0,005	<0,02	<0,1
18	8,46	<0,1	<0,005	<0,1	<0,0005	<0,005	<0,02	<0,1

Os resultados dos ensaios de solubilização das amostras de rejeito de flotação de minério de ferro demonstram que os parâmetros Al, As, Ba, Cd, Pb, Cn⁻ e Cl⁻ encontram-se dentro do limite preconizado pela NBR.

Para os parâmetros alumínio, arsênio, cádmio, chumbo, cianeto e cloreto os resultados, nas 18 (dezoito) amostras analisadas, encontram-se abaixo do limite de

detecção do método empregado para cada parâmetro (0,1 mg/L alumínio; 0,005 mg/L arsênio; 0,0005 mg/L chumbo; 0,02 mg/L cianeto; 0,1 mg/L cloreto).

Os teores de bário variaram de <0,1 mg/L (abaixo do limite de detecção do método empregado) a 0,23 mg/L; estando abaixo do limite de 0,7 mg/L, estabelecido pela NBR.

A Tabela 6 apresenta os resultados dos ensaios de solubilização para os parâmetros fenóis totais (C₆H₅OH), ferro (Fe), fluoreto (F⁻), manganês (Mn), mercúrio (Hg), cobre (Cu) e cromo (Cr).

Tabela 6 - Resultados dos ensaios de solubilização das amostras de rejeito para os parâmetros C₆H₅OH, Fe, F⁻, Mn, Hg, Cu e Cr

Amostra	pH da amostra	Parâmetros						
		C ₆ H ₅ OH	Fe	F ⁻	Mn	Hg	Cu	Cr
		Limite estabelecido pela ABNT NBR 10004:2004 (mg/L)						
		0,01	0,3	1,5	0,1	0,001	2	0,05
1	8,23	0,07	0,14	0,22	2,45	<0,0002	<0,005	<0,01
2	8,60	0,06	<0,1	<0,10	4,12	<0,0002	<0,005	<0,01
3	8,03	0,07	<0,1	<0,10	1,05	<0,0002	<0,005	<0,01
4	8,16	0,13	<0,1	<0,10	4,27	<0,0002	<0,005	<0,01
5	8,32	0,09	<0,1	<0,10	5,72	<0,0002	<0,005	<0,01
6	8,13	0,11	<0,1	0,21	1,75	<0,0002	<0,005	<0,01
7	8,16	0,08	<0,1	0,15	9,10	<0,0002	<0,005	<0,01
8	8,09	0,05	<0,1	<0,10	0,52	<0,0002	<0,005	<0,01
9	8,14	0,11	<0,1	<0,10	6,31	<0,0002	<0,005	<0,01
10	8,20	0,07	<0,1	<0,10	0,39	<0,0002	<0,005	<0,01
11	8,00	0,06	<0,1	<0,10	1,0	<0,0002	<0,005	<0,01
12	8,16	<0,003	<0,1	<0,10	2,32	<0,0002	<0,005	<0,01
13	8,03	0,11	<0,1	<0,10	5,39	<0,0002	<0,005	<0,01
14	8,20	0,33	<0,1	<0,10	1,09	<0,0002	<0,005	<0,01
15	8,14	0,09	<0,1	<0,10	1,39	<0,0002	<0,005	<0,01
16	8,16	0,06	<0,1	0,25	1,52	<0,0002	<0,005	<0,01
17	8,34	0,11	<0,1	<0,10	1,0	<0,0002	<0,005	<0,01
18	8,46	0,19	<0,1	0,50	0,72	<0,0002	<0,005	<0,01

Os resultados dos ensaios de solubilização das amostras de rejeito de flotação de minério de ferro para os parâmetros Fe, F⁻, Hg, Cu e Cr encontram-se dentro do limite estabelecido pela NBR.

Os teores de ferro, mercúrio, cobre e cromo, nas 18 (dezoito) amostras analisadas, estiveram abaixo do limite preconizado pela NBR, encontrando-se abaixo do limite de detecção do método empregado para cada parâmetro (0,1 mg/L ferro; 0,0002 mg/L mercúrio; 0,005 mg/L cobre e 0,01 mg/L cromo); exceto para o elemento ferro na amostra 1, com teor de 0,14 mg/L.

Os teores de fluoreto variaram de <0,10 mg/L (abaixo do limite de detecção do método empregado) a 0,50 mg/L; estando abaixo do limite de 1,5 mg/L, preconizado pela NBR.

O parâmetro fenóis totais (C₆H₅OH) apresentou resultados acima do limite máximo estabelecido pela NBR em 17 (dezesete) das 18 (dezoito) amostras analisadas; enquanto para o parâmetro manganês todos os resultados estiveram acima do limite máximo permitido.

Os teores de fenóis totais variaram de <0,003 (abaixo do limite de detecção do método utilizado) a 0,33 mg/L, valor acima do limite máximo estabelecido pela NBR de 0,01 mg/L. A presença dos fenóis totais está associada aos insumos aplicados no processo de flotação do minério.

Os teores de manganês variaram nas amostras analisadas de teor mínimo de 0,39 mg/L a teor máximo de 9,10 mg/L; sendo que o limite máximo de acordo com a NBR é de 0,1 mg/L. O manganês é proveniente dos minerais existentes no minério beneficiado.

A Tabela 7 apresenta os resultados dos ensaios para os parâmetros nitrogênio nitrato (N-NO₃), prata (Ag), selênio (Se), sódio (Na), sulfato (SO₄²⁻), surfactantes e zinco (Zn).

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de solubilização das amostras de rejeito para os parâmetros N-NO₃, Ag, Se, Na, SO₄²⁻, surfactantes e Zn

Amostra	pH da amostra	Parâmetros						
		N-NO ₃	Ag	Se	Na	SO ₄ ²⁻	Surfactantes	Zn
		Limite estabelecido pela ABNT NBR 10004:2004 (mg/L)						
		10	0,05	0,01	200	250	0,5	5
1	8,23	3,70	<0,01	<0,01	7,07	<3,0	0,18	0,10
2	8,60	1,60	<0,01	<0,01	7,43	<3,0	<0,10	0,07
3	8,03	<0,23	<0,01	<0,01	7,09	<3,0	<0,10	0,05
4	8,16	<0,23	<0,01	<0,01	8,68	<3,0	<0,10	0,07
5	8,32	<0,23	<0,01	<0,01	8,59	<3,0	<0,10	0,04
6	8,13	2,90	<0,01	<0,01	7,47	<3,0	<0,10	0,05
7	8,16	<0,23	<0,01	<0,01	7,90	<3,0	<0,10	0,05
8	8,09	<0,23	<0,01	<0,01	7,23	<3,0	0,25	0,06
9	8,14	<0,23	<0,01	<0,01	9,95	841 ¹⁴	<0,10	0,05
10	8,20	<0,23	<0,01	<0,01	7,62	<3,0	0,31	0,05
11	8,00	<0,23	<0,01	<0,01	8,38	<3,0	0,25	0,06
12	8,16	<0,23	<0,01	<0,01	8,96	<3,0	0,21	0,05
13	8,03	1,20	<0,01	<0,01	10,92	<3,0	<0,10	0,06
14	8,20	0,23	<0,01	<0,01	9,10	<3,0	0,16	0,05
15	8,14	1,00	<0,01	<0,01	4,61	<3,0	<0,10	0,06
16	8,16	<0,23	<0,01	<0,01	4,89	<3,0	<0,10	0,04
17	8,34	<0,23	<0,01	<0,01	4,95	<3,0	<0,10	0,06
18	8,46	<0,23	<0,01	<0,01	29,73	39,8	0,25	0,05

Os teores dos elementos prata e selênio encontram-se abaixo do limite de detecção do método empregado; valor inferior ao limite máximo estabelecido pela NBR.

Os teores de nitrogênio nitrato variaram de <0,23 mg/L (abaixo do limite de detecção do método empregado) a 3,70 mg/L; valor inferior ao limite máximo estabelecido pela NBR de 10 mg/L. Da mesma forma, os teores de sódio também encontram-se abaixo do limite máximo estabelecido pela NBR de 200 mg/L, variando de 4,61 mg/L a 29,73 mg/L.

Os teores de surfactantes e zinco apresentaram todos os valores dentro do limite preconizado pela NBR. Nos surfactantes os teores variaram de <0,10 mg/L (abaixo do limite de detecção do método utilizado) a 0,31 mg/L, sendo o limite estabelecido de 0,5 mg/L; e para o zinco os teores variaram de 0,04 mg/L a 0,10 mg/L, sendo o limite estabelecido de 5 mg/L.

Os resultados dos ensaios de solubilização das amostras analisadas indicam a conformidade para classificação de resíduos, de acordo com a ABNT NBR 10004:2004, para os parâmetros alumínio, arsênio, bário, cádmio, chumbo, cianeto, cloreto, ferro,

¹⁴ Este valor foi desconsiderado na interpretação dos dados, uma vez que é altamente discrepante dos demais resultados, indicando um possível erro de análise.

fluoreto, mercúrio, cobre, cromo, nitrogênio nitrato, prata, selênio, sódio, sulfato, surfactantes e zinco.

Os teores de fenóis totais e de manganês estiveram acima da norma em todas as amostras analisadas, exceto para fenóis totais na amostra 12. Desta forma, de acordo com a ABNT NBR 10004:2004 o rejeito de minério de ferro é classificado como resíduo de classe IIA – Não perigoso - Não inerte.

Portanto, o rejeito de flotação de minério de ferro não apresenta características perigosas como corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade ou inflamabilidade; apresentando, entretanto, propriedades de solubilidade em água para os parâmetros fenóis e manganês.

5.2 – Ensaios de lixiviação e solubilização em corpos de prova confeccionados simulando a composição real dos pavimentos

Os resultados dos ensaios de lixiviação dos corpos de prova de pavimentos são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados dos ensaios de lixiviação de corpos de prova de pavimentos

Especificações do pavimento	Amostras	Parâmetros								
		As	Ba	Cd	Pb	Cr	F ⁻	Hg	Ag	Se
		Limite aceitável – ABNT NBR 10004:2004								
		1	70	0,5	1	5	150	0,1	5	1
Solo (50%)/Rejeito (50%) Subleito	1	<0,005	0,51	<0,0005	<0,005	<0,01	<0,10	<0,0002	<0,01	<0,01
	2	<0,005	0,48	<0,0005	<0,005	<0,01	<0,10	<0,0002	<0,01	<0,01
	3	<0,005	0,66	<0,0005	<0,005	<0,01	<0,10	<0,0002	<0,01	<0,01
Solo (50%)/Rejeito (50%) Sub-base	4	<0,005	0,79	<0,0005	<0,005	<0,01	<0,10	<0,0002	<0,01	<0,01
	5	<0,005	0,58	<0,0005	<0,005	<0,01	<0,10	<0,0002	<0,01	<0,01
	6	<0,005	0,51	<0,0005	<0,005	<0,01	<0,10	<0,0002	<0,01	<0,01
Solo (49%)/Rejeito (49%)/Cal (2%) Sub-base	7	<0,005	0,74	<0,0005	<0,005	0,059	1,13	<0,0002	0,028	<0,01
	8	<0,005	0,58	<0,0005	<0,005	0,056	1,05	<0,0002	0,028	<0,01
	9	<0,005	0,38	<0,0005	<0,005	0,055	1,01	<0,0002	0,028	<0,01
Solo (25%)/Rejeito (74%)/Cimento (1%) Sub-base	10	<0,005	0,44	<0,0005	<0,005	0,038	0,79	<0,0002	0,013	<0,01
	11	<0,005	0,58	<0,0005	<0,005	0,036	0,69	<0,0002	0,013	<0,01
	12	<0,005	0,53	<0,0005	<0,005	0,040	0,82	<0,0002	0,014	<0,01
Mistura Asfáltica (94,4%)/Rejeito (5,6%) CBUQ	13	<0,005	0,34	0,0007	0,012	<0,01	0,42	<0,0002	<0,01	<0,01
	14	<0,005	0,29	0,0007	0,007	<0,01	0,33	<0,0002	<0,01	<0,01
	15	<0,005	0,31	0,0016	0,012	<0,01	0,13	<0,0002	<0,01	<0,01
Rejeito (10%)/Agregado (90%) BGS - Base	16	<0,005	0,77	0,0019	0,048	0,017	1,07	<0,0002	<0,01	<0,01
	17	<0,005	0,61	0,0030	0,055	0,011	0,99	<0,0002	<0,01	<0,01
	18	<0,005	0,60	0,0020	0,041	0,011	1,11	<0,0002	<0,01	<0,01

Os resultados demonstram que em todas as seis possibilidades de camadas de pavimentos, em todas as amostras e para todos os parâmetros analisados – arsênio (As), bário (Ba), cádmio (Cd), chumbo (Pb), cromo (Cr), fluoreto (F⁻), mercúrio (Hg), prata (Ag) e selênio (Se) os valores estão dentro do limite preconizado pela NBR.

Os teores de arsênio, mercúrio e selênio, nas 18 (dezoito) amostras analisadas, estiveram abaixo do preconizado pela norma, encontrando-se abaixo do limite de detecção do método empregado para cada parâmetro (0,005 mg/L arsênio; 0,0002 mg/L mercúrio; 0,01 mg/L selênio).

Para os teores de bário, cádmio, chumbo, cromo, fluoreto e prata todos os resultados encontram-se abaixo do limite estabelecido pela NBR.

Para o bário, os teores variaram de 0,29 mg/L a 0,79 mg/L, sendo que o limite estabelecido é de 70 mg/L. Para o cádmio, os teores variaram de <0,0005 mg/L (abaixo do limite de quantificação do método) a 0,0030 mg/L, sendo que o limite estabelecido é de 0,5 mg/L. Para o chumbo, os teores variaram de <0,005 mg/L (abaixo do limite de quantificação do método) a 0,055 mg/L, sendo que o limite estabelecido é de 1 mg/L. Para o cromo, os teores variaram de <0,01 mg/L (abaixo do limite de quantificação do método) a 0,059 mg/L, sendo que o limite estabelecido é de 5 mg/L. Para o fluoreto, os teores variaram de <0,10 mg/L (abaixo do limite de quantificação do método) a 1,13 mg/L, sendo que o limite estabelecido é de 150 mg/L. Para a prata, os teores variaram de <0,01 mg/L (abaixo do limite de quantificação do método) a 0,028 mg/L, sendo que o limite estabelecido é de 5 mg/L.

Os resultados dos ensaios de lixiviação indicam, portanto, que em nenhuma das possibilidades de pavimento analisadas há risco de lixiviação de contaminantes para a água e o solo. Desta forma, de acordo com a ABNT NBR 10004:2004 todas as possibilidades de pavimento analisadas são classificadas como classe II – Não perigoso.

As Tabelas 9, 10 e 11 apresentam os resultados dos ensaios de solubilização dos corpos de prova das camadas de pavimentos, bem como resultados para corpos de prova confeccionados com 100% de solo e corpos de prova com 100% de mistura asfáltica.

A Tabela 9 apresenta os resultados dos ensaios para os parâmetros alumínio (Al), arsênio (As), bário (Ba), cádmio (Cd), chumbo (Pb), cianeto (Cn⁻) e cloreto (Cl⁻).

Tabela 9 - Resultados dos ensaios de solubilização de corpos de prova de pavimento, solo e mistura asfáltica para os parâmetros Al, As, Ba, Cd, Pb, Cn⁻ e Cl⁻

Especificações do pavimento	*	pH da Amostra	pH Final do extrato solubilizado	Parâmetros						
				Al	As	Ba	Cd	Pb	Cn ⁻	Cl ⁻
				Limite estabelecido pela ABNT NBR 10004:2004 (mg/L)						
				0,2	0,01	0,7	0,005	0,01	0,07	250
Solo (50%)/Rejeito (50%) Subleito	1	6,10	7,05	<0,1	<0,005	<0,1	<0,0005	<0,005	<0,02	1,5
	2	7,62	4,60	<0,1	<0,005	<0,1	<0,0005	<0,005	<0,02	1,0
	3	8,95	8,74	<0,1	<0,005	<0,1	<0,0005	<0,005	<0,02	2,4
Solo (50%)/Rejeito (50%) Sub-base	4	8,88	4,55	<0,1	<0,005	<0,1	<0,0005	<0,005	<0,02	1,5
	5	8,14	6,46	<0,1	<0,005	<0,1	<0,0005	<0,005	<0,02	1,9
	6	6,94	6,18	<0,1	<0,005	<0,1	<0,0005	<0,005	<0,02	1,9
Solo (49%)/Rejeito (49%)/Cal (2%) Sub-base	7	9,06	7,31	5,86	<0,005	<0,1	<0,0005	<0,005	<0,02	0,5
	8	10,76	5,61	4,10	<0,005	<0,1	<0,0005	<0,005	<0,02	0,5
	9	10,96	8,66	14,97	<0,005	<0,1	<0,0005	<0,005	<0,02	1,0
Solo (25%)/Rejeito (74%)/Cimento (1%) Sub-base	10	10,54	9,27	2,38	<0,005	<0,1	<0,0005	<0,005	<0,02	1,0
	11	10,36	6,19	2,51	<0,005	<0,1	<0,0005	<0,005	<0,02	0,5
	12	10,31	10,84	2,93	<0,005	<0,1	<0,0005	<0,005	<0,02	0,5
Mistura Asfáltica (94,4%)/Rejeito (5,6%) CBUQ	13	9,63	5,76	<0,1	<0,005	<0,1	<0,0005	<0,005	<0,02	<0,1
	14	9,36	5,54	<0,1	<0,005	<0,1	<0,0005	<0,005	<0,02	<0,1
	15	9,37	5,93	<0,1	<0,005	<0,1	0,0008	<0,005	<0,02	<0,1
Rejeito (10%)/Agregado (90%) BGS - Base	16	9,50	7,40	0,15	<0,005	<0,1	<0,0005	<0,005	<0,02	1,0
	17	9,27	8,59	<0,1	<0,005	<0,1	<0,0005	<0,005	<0,02	1,0
	18	8,89	8,36	0,15	<0,005	<0,1	<0,0005	<0,005	<0,02	1,5
Solo (100%) Subleito	19	9,13	8,68	<0,1	<0,005	<0,1	<0,0005	<0,005	<0,02	1,5
	20	8,83	8,68	<0,1	<0,005	<0,1	<0,0005	<0,005	<0,02	2,4
	21	8,30	9,45	<0,1	<0,005	<0,1	<0,0005	<0,005	<0,02	1,5
Mistura Asfáltica (100%) CBUQ	22	8,34	6,69	<0,1	<0,005	<0,1	<0,0005	<0,005	<0,02	<0,1
	23	8,65	4,35	0,34	<0,005	<0,1	<0,0005	<0,005	<0,02	<0,1
	24	8,93	6,08	<0,1	<0,005	<0,1	<0,0005	<0,005	<0,02	<0,1

*Amostra

Os valores dos parâmetros arsênio, bário, cádmio, chumbo, cianeto e cloreto estiveram dentro do limite estabelecido pela norma em todos os corpos de prova com adição de rejeito; bem como nos corpos de prova confeccionados com 100% de solo e 100% de mistura asfáltica.

Os teores de alumínio estão acima do limite estabelecido pela NBR (0,2 mg/L) em todas as amostras da sub-base confeccionadas com a mistura de solo (49%)/rejeito (49%)/cal (2%) – amostras 7, 8 e 9; e solo (25%)/rejeito (74%)/cimento (1%) – amostras 10, 11 e 12. O teor de alumínio também está acima do limite estabelecido pela NBR na amostra 20 da CBUQ confeccionada com 100% de mistura asfáltica.

Embora o alumínio não tenha sido encontrado acima do limite estabelecido pela NBR no extrato solubilizado tanto do solo como do rejeito, este elemento pode ser encontrado naturalmente em ambos os casos. No rejeito o alumínio pode ser encontrado

na estrutura de diversos minerais, como a Gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), a Caulinita ($\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$), a Pirofilita ($\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), a Muscovita ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$) dentre outros. No solo laterítico utilizado para confecção dos corpos de prova o alumínio é encontrado na caulinita, mineral predominante, e em hidróxidos de alumínio, como a gibbsita.

A solubilização do alumínio nas amostras de pavimento confeccionadas com Solo/Rejeito/Cal e Solo/Rejeito/Cimento pode ser explicada pela correlação entre a solubilidade deste elemento em função do pH da amostra, uma vez que o pH é um dos fatores que interfere na solubilidade de compostos químicos. Observa-se que o pH tanto das amostras de solo, tabela 9 (pág. 48), quanto das amostras de rejeito, tabela 5 (pág. 42), está variando entre 8 e 9; enquanto que nas amostras de Solo/Rejeito/Cal e de Solo/Rejeito/Cimento o pH está acima de 9, sendo que em cinco das seis amostras o pH está acima de 10.

Neste contexto, é possível constatar, a partir dos resultados obtidos, que a solubilização do alumínio presente no rejeito e no solo ocorre em pH mais básico, acima de 9. Assim, o aumento do pH nas amostras de Solo/Rejeito/Cal e Solo/Rejeito/Cimento, ocasionado pela adição de cal e cimento, é o responsável pela solubilização do alumínio, não verificada nas amostras de rejeito e de solo. Na água, o alumínio pode ocorrer em diferentes formas sendo influenciado pelo pH, temperatura e presença de fluoretos, sulfatos, matéria orgânica e outros ligantes (CETESB, 2017). De acordo com os autores Possa e Santos (2003) o hidróxido de alumínio ($\text{Al}(\text{OH})_3$) (forma mais estável do alumínio nas condições normais) precipita da solução em valores de pH maiores que cinco, mas se solubiliza novamente em pH acima de 9, uma vez que, a solubilidade do alumínio em equilíbrio com a fase sólida depende do pH do meio.

A Tabela 10 apresenta os resultados dos ensaios de solubilização para os parâmetros fenóis totais ($\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$), ferro (Fe), fluoreto (F^-), manganês (Mn), mercúrio (Hg), cobre (Cu) e cromo (Cr).

Tabela 10 - Resultados dos ensaios de solubilização de corpos de prova de pavimento, solo e mistura asfáltica para os parâmetros C₆H₅OH, Fe, F⁻, Mn, Hg, Cu e Cr

Especificações do pavimento	*	pH da amostra	pH final do extrato solubilizado	Parâmetros						
				C ₆ H ₅ OH	Fe	F ⁻	Mn	Hg	Cu	Cr
				Limite estabelecido pela ABNT NBR 10004:2004 (mg/L)						
				0,01	0,3	1,5	0,1	0,001	2	0,05
Solo (50%)/Rejeito (50%) Subleito	1	6,10	7,05	0,10	<0,1	<0,10	0,39	<0,0002	<0,005	<0,01
	2	7,62	4,60	<0,003	<0,1	<0,10	0,39	<0,0002	<0,005	<0,01
	3	8,95	8,74	<0,003	<0,1	0,79	0,95	<0,0002	<0,005	<0,01
Solo (50%)/Rejeito (50%) Sub-base	4	8,88	4,55	<0,003	<0,1	<0,10	0,93	<0,0002	<0,005	<0,01
	5	8,14	6,46	<0,003	<0,1	<0,10	0,85	<0,0002	<0,005	<0,01
	6	6,94	6,18	<0,003	<0,1	0,18	0,47	<0,0002	<0,005	<0,01
Solo (49%)/Rejeito (49%)/Cal (2%) Sub-base	7	9,06	7,31	<0,003	<0,1	0,70	<0,05	<0,0002	<0,005	0,014
	8	10,76	5,61	<0,003	<0,1	0,47	<0,05	<0,0002	0,006	0,010
	9	10,96	8,66	<0,003	<0,1	0,65	<0,05	<0,0002	0,007	<0,01
Solo (25%)/Rejeito (74%)/Cimento (1%) Sub-base	10	10,54	9,27	<0,003	<0,1	1,04	<0,05	<0,0002	0,010	0,028
	11	10,36	6,19	0,15	0,19	0,92	<0,05	<0,0002	0,009	0,036
	12	10,31	10,84	<0,003	<0,1	0,97	<0,05	<0,0002	0,010	0,037
Mistura Asfáltica (94,4%)/Rejeito (5,6%) CBUQ	13	9,63	5,76	0,05	<0,1	<0,10	<0,05	<0,0002	<0,005	<0,01
	14	9,36	5,54	0,07	<0,1	0,13	<0,05	<0,0002	<0,005	<0,01
	15	9,37	5,93	<0,003	<0,1	0,20	<0,05	<0,0002	<0,005	<0,01
Rejeito (10%)/Agregado (90%) BGS - Base	16	9,50	7,40	<0,003	0,10	0,30	<0,05	<0,0002	<0,005	<0,01
	17	9,27	8,59	<0,003	<0,1	0,33	<0,05	<0,0002	<0,005	<0,01
	18	8,89	8,36	<0,003	0,15	0,35	<0,05	<0,0002	<0,005	<0,01
Solo (100%) Subleito	19	9,13	8,68	0,06	<0,1	<0,10	0,10	<0,0002	<0,005	<0,01
	20	8,83	8,68	0,70	<0,1	0,11	0,08	<0,0002	<0,005	<0,01
	21	8,30	9,45	0,20	<0,1	<0,10	0,10	<0,0002	<0,005	<0,01
Mistura Asfáltica (100%) CBUQ	22	8,34	6,69	<0,003	<0,1	0,19	<0,05	<0,0002	<0,005	<0,01
	23	8,65	4,35	0,10	0,98	2,09	0,26	<0,0002	0,007	<0,01
	24	8,93	6,08	0,70	<0,1	0,33	<0,05	<0,0002	<0,005	<0,01

*Amostra

Os valores dos parâmetros mercúrio, cobre, cromo, ferro e fluoreto estiveram dentro do limite estabelecido pela norma em todos os corpos de prova com adição de rejeito.

Por outro lado, os teores de fenóis totais e manganês excederam o limite estabelecido pela NBR. Para os fenóis o limite foi excedido em 1 (uma) amostra do subleito confeccionada com solo (50%)/rejeito (50%), 1 (uma) amostra da sub-base confeccionada com solo (25%)/rejeito (74%)/cimento (1%) e 2 (duas) da CBQU confeccionada com mistura asfáltica (94,4%)/rejeito (5,6%). Para o manganês o limite foi excedido em todas as 3 (três) amostras do subleito confeccionadas com solo (50%)/rejeito (50%), todas as 3 (três) amostras da sub-base confeccionadas com solo (50%)/rejeito (50%).

Nos corpos de prova confeccionados com 100% de solo e 100% de mistura asfáltica os teores de fenóis totais e manganês também estiveram acima do limite estabelecido pela NBR. Para os fenóis totais este limite foi excedido em todas as amostras do subleito confeccionadas com 100% de solo e em 2 (duas) amostras da CBQU confeccionadas com 100% de mistura asfáltica. Para o manganês o limite foi excedido em 1 (uma) amostra confeccionada com 100% de mistura asfáltica.

Para os fenóis, a combinação de Solo/Rejeito no subleito e de Solo/Rejeito/Cimento na sub-base não foi eficiente para reter este poluente apenas em uma amostra. A combinação de mistura asfáltica e rejeito na CBQU, não se mostrou eficiente para reter os fenóis em duas, das três amostras. Cabe ressaltar que além do rejeito (conforme resultados apresentados na tabela 5, pág. 39), o solo utilizado no subleito e a mistura asfáltica também apresentaram fenóis acima do limite estabelecido pela NBR; para o solo em todas as amostras e para a mistura asfáltica, em duas das três amostras analisadas. Desta forma, tanto o rejeito, como o solo e a mistura asfáltica podem ser fonte de contaminação por fenóis.

Para o manganês, a combinação de solo e rejeito tanto no subleito (amostras 1, 2 e 3), quanto na sub-base (amostras 4, 5 e 6), excedeu, em todas as amostras, o limite estabelecido pela NBR. Entretanto, a adição de cal e cimento nos corpos de prova da sub-base – amostras 7, 8 e 9 com adição de 2% de cal e amostras 10, 11 e 12 com adição de 1% de cimento - mostrou-se eficiente para reduzir a solubilização do manganês, cujos valores estiveram abaixo de 0,05 mg/L (limite estabelecido pela NBR é 0,1 mg/L). Nas amostras de pavimento confeccionadas com Mistura Asfáltica/Rejeito (CBQU) e Rejeito/Agregado (BGS-Base) o teor de manganês também esteve abaixo de 0,05 mg/L. Tal fato pode ser explicado pelo reduzido teor de rejeito adicionado nas amostras (5,6% nas amostras da CBQU e 10% nas amostras da BGS-Base), quando comparado ao teor de rejeito (50%) das amostras em que o manganês excedeu o limite estabelecido pela NBR.

Outro fato que pode explicar a solubilização do manganês é a variação de pH, uma vez que, assim como o alumínio, a solubilidade do manganês possui correlação com o pH da amostra. Para o manganês presente no rejeito o pH mais ácido, abaixo de 9 é mais favorável para sua solubilização. De acordo com os autores Pereira e outros (2014) o manganês torna-se mais solúvel com a redução do pH, o que favorece o aumento de sua

biodisponibilidade. Observa-se que nas amostras de pavimento com adição de rejeito em que o pH está acima de 9 (amostras de solo/rejeito/cal, solo/rejeito/cimento, mistura asfáltica/rejeito e rejeito/agregado), não houve solubilização de manganês acima do limite estabelecido (tabela 10, pág. 50), enquanto nas amostras com adição de rejeito em que o pH está abaixo de 9 (amostras de solo/rejeito na sub-base e no subleito), o manganês solubilizado encontra-se acima do limite estabelecido.

Além do rejeito (conforme resultados apresentados na tabela 6, pág. 43), a mistura asfáltica apresentou, em uma amostra, manganês acima do limite estabelecido pela ABNT NBR 10004:2004, indicando que ambos podem ser fonte de contaminação por manganês.

A Tabela 11 apresenta os resultados dos ensaios para os parâmetros nitrogênio nitrato (N-NO₃), prata (Ag), selênio (Se), sódio (Na), sulfato (SO₄²⁻), surfactantes e zinco (Zn).

Tabela 11 - Resultados dos ensaios de solubilização de corpos de prova de pavimento, solo e mistura asfáltica para os parâmetros N-NO₃, Ag, Se, Na, SO₄²⁻, surfactantes e Zn

Especificações do pavimento	*	pH da amostra	pH final do extrato solubilizado	Parâmetros						
				N-NO ₃	Ag	Se	Na	SO ₄ ²⁻	Surfactantes	Zn
				Limite estabelecido pela ABNT NBR 10004:2004 (mg/L)						
				10	0,05	0,01	200	250	0,5	5
Solo (50%)/Rejeito (50%) Subleito	1	6,10	7,05	<0,25	<0,01	<0,01	1,72	5,6	<0,10	<0,01
	2	7,62	4,60	<0,25	<0,01	<0,01	1,94	7,3	<0,10	<0,01
	3	8,95	8,74	<0,25	<0,01	<0,01	1,53	<3,0	<0,10	0,02
Solo (50%)/Rejeito (50%) Sub-base	4	8,88	4,55	<0,25	<0,01	<0,01	1,47	4,9	<0,10	0,02
	5	8,14	6,46	<0,25	<0,01	<0,01	1,58	<3,0	<0,10	<0,01
	6	6,94	6,18	1,15	<0,01	<0,01	1,25	10,3	<0,10	<0,01
Solo (49%)/Rejeito (49%)/Cal (2%) Sub-base	7	9,06	7,31	0,50	<0,01	<0,01	<0,5	10,0	<0,10	<0,01
	8	10,76	5,61	0,43	<0,01	<0,01	<0,5	9,7	<0,10	<0,01
	9	10,96	8,66	<0,25	<0,01	<0,01	<0,5	10,0	<0,10	<0,01
Solo (25%)/Rejeito (74%)/Cimento (1%) Sub-base	10	10,54	9,27	<0,25	<0,01	<0,01	0,61	45,0	<0,10	<0,01
	11	10,36	6,19	0,34	<0,01	<0,01	<0,50	45,6	<0,10	<0,01
	12	10,31	10,84	<0,25	<0,01	<0,01	<0,50	6,5	<0,10	<0,01
Mistura Asfáltica (94,4%)/Rejeito (5,6%) CBUQ	13	9,63	5,76	<0,25	<0,01	<0,01	<0,5	10,3	0,70	<0,01
	14	9,36	5,54	0,32	<0,01	<0,01	0,59	8,1	<0,10	<0,01
	15	9,37	5,93	<0,25	<0,01	<0,01	0,54	6,3	<0,10	0,12
Rejeito (10%)/Agregado (90%) BGS - Base	16	9,50	7,40	0,84	<0,01	<0,01	1,58	5,9	0,65	<0,01
	17	9,27	8,59	1,99	<0,01	<0,01	1,74	<3,0	0,67	<0,01
	18	8,89	8,36	0,93	<0,01	<0,01	1,70	3,7	<0,10	<0,01
Solo (100%) Subleito	19	9,13	8,68	<0,25	<0,01	<0,01	0,70	10,1	<0,10	0,07
	20	8,83	8,68	<0,25	<0,01	<0,01	1,02	<3,0	<0,10	0,04
	21	8,30	9,45	<0,25	<0,01	<0,01	0,85	4,5	<0,10	0,08
Mistura Asfáltica (100%) CBUQ	22	8,34	6,69	0,27	<0,01	<0,01	0,60	10,4	0,57	0,02
	23	8,65	4,35	0,29	<0,01	<0,01	1,50	22,3	0,89	0,02
	24	8,93	6,08	0,38	<0,01	<0,01	0,58	15,7	0,79	0,06

*Amostra

Os valores dos parâmetros nitrogênio nitrato, prata, selênio, sódio, sulfato e zinco estiveram dentro do limite estabelecido pela norma em todos os corpos de prova com adição de rejeito; bem como nos corpos de prova confeccionados com 100% de solo e 100% de mistura asfáltica.

Os teores de surfactantes excederam o limite estabelecido pela NBR, nos corpos de prova com adição de rejeito, em 1 (uma) amostra da CBQU confeccionada com mistura asfáltica (94,4%)/rejeito (5,6%) e em 2 (duas) amostras da base confeccionadas com rejeito (10%)/agregado (90%). Os teores de surfactantes também excederam o limite estabelecido pela NBR em todas as amostras da CBQU confeccionadas com 100% de mistura asfáltica. Os dados sugerem que o surfactante solubilizado é proveniente dos componentes do pavimento - mistura asfáltica e agregado, e não do rejeito, uma vez que o mesmo não apresentou teores de surfactante acima da norma (tabela 7, pág. 45).

Nas amostras com mistura asfáltica a presença de alumínio, fenóis, ferro, fluoreto, manganês e surfactantes acima do limite estabelecido pela NBR reflete a composição química deste material, que pode apresentar estes elementos em sua constituição. De acordo com Bernucci (2008) a composição do asfalto pode variar de acordo com a fonte do petróleo, as modificações induzidas no processo de refino e durante o envelhecimento na usinagem e em serviço.

Os resultados dos ensaios de solubilização para todas as amostras de pavimentos confeccionadas com adição de rejeito indicam, portanto, conformidade com ABNT NBR 10004:2004 para classificação de resíduos sólidos para os parâmetros arsênio, bário, cádmio, chumbo, cianeto, cloretos, ferro, fluoreto, cobre, cromo, mercúrio, nitrogênio nitrato, prata, selênio, sódio, sulfato e zinco. Em contrapartida, o teor de alumínio, fenóis, e manganês em determinadas amostras esteve acima do estabelecido pela referida norma.

Analisando todos os dados de solubilização das amostras de rejeito e das amostras dos corpos de prova de pavimento, pode-se verificar que : i) os fenóis e o manganês foram os elementos presentes no rejeito que apresentaram limite acima do estabelecido pela ABNT NBR 10004:2004; ii) os pavimentos confeccionados com Solo/Rejeito/Cal (amostras 7, 8 e 9) e Rejeito/Agregado (amostras 16, 17 e 18) foram capazes de reter estes poluentes presentes no rejeito em todas as amostras analisadas e os pavimentos confeccionados com Solo/Rejeito/Cimento (amostras 10, 11 e 12) em duas das três amostras analisadas. Assim, tais camadas mostraram-se eficientes na retenção dos

elementos cujos teores são problemáticos no rejeito em relação aos riscos ambientais de aproveitamento deste resíduo.

Entretanto, nas camadas de Solo/Rejeito/Cal e de Solo/Rejeito/Cimento houve o aumento do teor de alumínio solubilizado em função da variação do pH. Para que o teor de alumínio se enquadre no limite estabelecido pela ABNT NBR 10004:2004 propõe-se reduzir o teor de cal nas amostras confeccionadas com Solo/Rejeito/Cal e o teor de cimento nas amostras Solo/Rejeito/Cimento visando a não elevação do pH, uma vez que, conforme mencionado, o alumínio tem sua solubilidade influenciada pelo pH do meio, tornando-se mais solúvel em pH elevado.

Ainda concentrando-se nos elementos que estiveram acima do limite estabelecido pela ABNT NBR 10004:2004 nas amostras de rejeito (fenóis e manganês) observa-se que os pavimentos confeccionados com Rejeito/Agregado, também foram capazes de reter estes poluentes em todas as amostras analisadas. Neste caso, entretanto, em duas das três amostras analisadas houve a solubilização de surfactantes, fazendo com que este composto exceda o limite estabelecido pela NBR. Além disso, o teor de rejeito utilizado é de 10%, o que representa uma desvantagem em relação ao grau de aproveitamento de rejeito das demais camadas - 49% na camada Solo/Rejeito/Cal e 74% na camada Solo/Rejeito/Cimento.

Isto posto, constata-se que as opções de pavimento confeccionadas com Solo/Rejeito/Cal e Solo/Rejeito/Cimento são mais viáveis, do ponto de vista ambiental, para o uso do rejeito em pavimentação asfáltica.

Os resultados indicam, portanto, a viabilidade ambiental do aproveitamento de rejeito de flotação de minério de ferro na composição de pavimentos rodoviários.

Como forma de melhorar o desempenho das camadas de pavimentos indica-se, observando os requisitos técnicos da composição de pavimentos: i) realização de estudos de adsorção, buscando definir a melhor concentração de cal e de cimento e o melhor pH das amostras para manter os teores de contaminantes dentro do estabelecido pela norma brasileira; ii) avaliação da possibilidade de incorporação de cal ou cimento na camada do subleito com Solo/Rejeito como forma de reduzir a solubilidade do manganês, atentando-se para que o teor de cal ou cimento adicionado não seja suficiente para solubilizar o alumínio presente nas amostras; iii) desenvolver testes com incorporação de polímeros

nas camadas de pavimentos para a adsorção de fenóis - parâmetro acima da norma em 1 (uma) das amostras do subleito com Solo/Rejeito e em 1 (uma) das amostras da sub-base com Solo/Rejeito/Cimento.

A remediação de poluentes fenólicos por adsorção¹⁵ utilizando materiais poliméricos é eficiente e possui um custo relativamente baixo, sendo uma alternativa viável devido à sua potencial seletividade, estabilidade química, fácil obtenção e regeneração (CUNHA; AGUIAR, 2014; LIN, JUANG, 2009). Existem outros métodos para remediação dos fenóis, entretanto o emprego de materiais poliméricos como adsorventes tem se apresentado uma alternativa mais atrativa pela relação entre eficiência e custo (CUNHA; AGUIAR, 2014).

¹⁵ A adsorção é a concentração de determinadas substâncias existentes em fluidos líquidos ou gasosos na superfície de um sólido, geralmente porosos (NASCIMENTO et al., 2014).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados dos ensaios de lixiviação e de solubilização do rejeito de flotação de minério de ferro indicaram que o rejeito, de acordo com a ABNT NBR 10004:2004, é classificado como sendo um resíduo de classe IIA – Não perigoso - Não inerte, uma vez que apresenta mobilização de manganês e fenóis.

Os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização das amostras de pavimento confeccionadas com Solo/Rejeito/Cal e Solo/Rejeito/Cimento indicaram que, do ponto de vista ambiental, estas opções são as mais viáveis para o aproveitamento do rejeito, uma vez que impediram a solubilização dos contaminantes acima citados.

O rejeito de flotação de minério de ferro possui viabilidade ambiental para uso na composição de pavimentos rodoviários, desde que as recomendações sugeridas, para imobilização dos elementos que estiveram acima do limite estabelecido, sejam atendidas e sejam realizados novos estudos para comprovação.

O aproveitamento de rejeito de flotação de minério de ferro apresenta-se como uma alternativa para as empresas mineradoras e a gestão de recursos hídricos, na busca de soluções para reduzir o risco de rompimento de barragens de rejeito e minimizar os impactos associados.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 5736: Cimento Portland Pozolânico**. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 7175: Cal Hidratada para Argamassas - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 9935: Agregados - Terminologia**. Rio de Janeiro, 2011.

AGUIAR, Maria Auxiliadora Mendes; FERREIRA, Kelly Cristina; SILVA, Angelo Quintiniano Nunes; PERES, Antônio Eduardo Clark. UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE MINÉRIO DE FERRO COMO MATÉRIA PRIMA PARA FABRICAÇÃO DE ARGAMASSA. **Holos**, [S.L.], v. 2, p. 77, 20 abr. 2016. Instituto Federal de Educacao, Ciencia e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.15628/holos.2016.3704>>. Acesso em: 06 ago. 2020.

ALKMIM, Ana Ramalho. **Investigação geoquímica e estratificada da Formação Ferrífera Cauê na porção centro-oriental do Quadrilátero Ferrífero, MG**. 2014. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/3610>>. Acesso em: 03 set. 2019.

AMARAL, Rafael Quevedo do. Talco e Pirofilita. In: BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral 2014**. Brasília: DNPM, 2014. p. 110-111. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2014>>. Acesso em: 19 maio 2020.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil. Encarte Especial sobre: **Bacia do Rio Doce - Rompimento da Barragem de Mariana – MG**. Informe 2015. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/encarteriodoce_22_03_2016v2.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2019.

_____. **Manual de políticas e práticas de segurança de barragens para entidades fiscalizadoras**. Brasília: ANA, 2017. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br>>. Acesso em: 30 jul. 2020.

_____. **Plano Nacional de Segurança Hídrica**. Brasília: ANA, 2019. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/pnsh/pnsh.pdf>>. Acesso em: 26 ago. 2019.

_____. **Relatório de segurança de barragens 2018**. Brasília: ANA, 2018. Disponível em: <http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2018/rsb2018_0312.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2020.

ANDRADE, Cecília Félix. **Relevo antropogênico associado à mineração de ferro no Quadrilátero Ferrífero: uma análise espaço - temporal do Complexo Itabira** (Município de Itabira - MG). 2012. 130 f. Tese (Pós-Graduação em Geografia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/MPBB-955NLA>> Acesso em: 03 set. 2019.

ANDRADE, Luana Caetano Rocha de; MARQUES, Eduardo Antonio Gomes; PEIXOTO, Ricardo André Fiorotti. Perspectivas para o reaproveitamento de rejeitos da mineração de ferro como materiais de construção. **Geografias**, Belo Horizonte, v. 12, n. 1, p. 32-44, jan. 2016.

ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Cadastro Nacional de Barragens de Mineração**. 2019. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens/pasta-cadastro-nacional-de-barragens-de-mineracao/cadastro-nacional-de-barragens-de-mineracao>>. Acesso em: 20 set. 2019.

_____. **Portaria n° 13 de 08 de agosto de 2019**. Brasília, 2019. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br>>. Acesso em: 29 jul. 2020.

_____. **Portaria n° 70.389 de 17 de maio de 2017**. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br>>. Acesso em: 24 set. 2019.

ARAÚJO, Cecília Bhering. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito da mineração de ferro**. 2006. 143 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

BASTOS, Lucas Augusto de Castro; SILVA, Gabriela Cordeiro; MENDES, Júlia Castro; PEIXOTO, Ricardo André Fiorotti. Using Iron Ore Tailings from Tailing Dams as Road Material. **Journal Of Materials In Civil Engineering: Journal of Materials in Civil Engineering**. Miami, p. 1-9. out. 2016. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001613>. Acesso em: 06 ago. 2020.

BATISTA, Priscila; LEITE, Adilson do Lago. Misturas de um solo laterítico com cimento e bentonita para uso em cortinas verticais. **Revista Escola de Minas**. Minas Gerais, Ouro Preto, v. 63, n. 2, p. 255-263, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672010000200008&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 03 maio 2020.

BERNUCCI, Liedi Bariani. **Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos lateríticos para rodovias de baixo volume de tráfego**. 1995. 275 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-07042017-101955/publico/LiediLegiBarianiBernucci_Tese.pdf> Acesso em: 01 maio 2020.

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti da; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; & SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Petrobras: Abeda, p. 9, 2006.

BRASIL. Lei n° 12.305, de 02 de agosto de 2010. BRASIL. Constituição (2010). Lei n° 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Política Nacional**

de Resíduos Sólidos. Brasília, DF. Disponível em:

<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 26 ago. 2019.

_____. Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. **Política Nacional de Segurança de Barragens.** Brasília, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm>. Acesso em: 04 set. 2019.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Resíduos Sólidos de Mineração. In: _____ **Plano Nacional de Resíduos Sólidos.** Brasília, 2011. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/253/_publicacao/253_publicacao02022012041757.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2019.

CAMPANHA, Ângela. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação.** 2011. 86 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015. Disponível em: <<http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/3752>>. Acesso em: 04 set. 2019.

CARVALHO, Pedro Sergio Landim de et al. Minério de Ferro. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 9, p.197-233, mar. 2014. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set3906.pdf>. Acesso em: 05 set. 2019.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (São Paulo). Apêndice E - Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem. In: _____. **Qualidade das Águas interiores no Estado de São Paulo.** São Paulo: Cetesb, 2017. p. 1-52. Disponível em: <<http://aguasinteriores.cetesb.sp.gov.br/publicacoes-e-relatorios/>>. Acesso em: 29 ago. 2019.

CHEMALE JUNIOR, Farid; TAKEHARA, Lucy. **Minério de Ferro: geologia e geometalurgia.** São Paulo: Blucher, 2013.

CNRH – CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. **Resolução nº 143 de 10 de julho de 2012.** Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume, em atendimento ao art. 7º da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Brasília, 2012. Disponível em: <<http://www.cnrh.gov.br/resolucoes/1922-resolucao-n-143-de-10-de-julho-de-2012/file>>. Acesso em: 24 set. 2019.

COSTA, Cláudia N. et al. Contaminantes e poluentes do solo e do ambiente. In: MEURER, Egon José. **Fundamentos de Química do Solo.** 2. ed. Porto Alegre: Genesis, 2004. cap. 8. p. 240-279.

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Geologia Médica.** 2016. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Geologia-Medica-41>>. Acesso em: 06 jun. 2018.

CUNHA, F. S.; AGUIAR, A. P.. Methods for the Removal of Phenolic Derivatives from Aqueous Effluents. **Revista Virtual de Química**, Rio de Janeiro, v. 6, n. 4, p. 844-865, 10 mar. 2014. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.5935/1984-6835.20140052>. Disponível em: <<http://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/462>>. Acesso em: 19 maio 2020.

DALTIN, Decio. **Tensoativos: química, propriedades e aplicações**. São Paulo: Blucher, 2011.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **NORMA DNIT 164: Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro: DNIT, 2013.

DUTRA, Rodrigo Amaral; RESENDE, Laís; MALHEIROS, Christiane. **Strategy and Innovations for the Reuse of Iron Ore Tailings**. Minexcellence Congress, Chile, 2019.

FEAM – FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Inventário de Barragens dos Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: FEAM, 2018. Disponível em: <<http://www.feam.br/monitoramento/gestao-de-barragens>>. Acesso em: 20 set. 2019.

FELIPE, Lorena de Oliveira; DIAS, Sandra de Cássia. Surfactantes sintéticos e biossurfactantes: vantagens e desvantagens. **Química Nova na Escola**, [s.l.], v. 39, n. 3, p.228-236, 2017. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/01048899.20160079>. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc39_3/03-QS-3416.pdf>. Acesso em: 19 maio 2020.

FERREIRA, Diego Henrique Oliveira. **Principais etapas do tratamento de minérios Itabiríticos do Quadrilátero Ferrífero**. 2011. 50 f. Monografia (Pós Graduação em Engenharia de Recursos Minerais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/BUOS-9C6GNJ>>. Acesso em: 04 set. 2019.

FERREIRA, Marcela Roberta Almeida. **Caracterização química e mineralógica de rejeito de flotação de minério de ferro com vistas ao seu aproveitamento em pavimentação asfáltica**. 2018. 66 f. Trabalho Final de Graduação – Universidade Federal de Itajubá, Itabira, 2018.

GOMES, Marcos Antônio. **Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito de minério de ferro**. 2009. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Mineral, Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2397>>. Acesso em: 19 maio 2020.

GROTZINGER, John; JORDAN, Tom. **Para entender a Terra**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

GUEDES, Gilse; SCHNEIDER, Cláudio. A busca das melhores opções tecnológicas para evitar acidentes. **Saneamento Ambiental**, São Paulo, v. 372, n. 186, p.37-41, jun.

2017. Semanal. Disponível em:
<<http://www.cetem.gov.br/images/periodicos/2017/saneamento-ambiental.pdf>>. Acesso em: 27 ago. 2019.

GUEDES, Thiago Santos. **Estudo sobre coletores na flotação catiônica reversa de minérios de ferro itabiríticos**. 2012. 80 f. Monografia (Especialização em Engenharia de Recursos Minerais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/BUOS-9C9FSA>>. Acesso em: 10 set. 2019.

GUILHERME, Luiz Roberto Guimarães et al. Elementos-traço em solos e sistemas aquáticos. In: **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. p. 345-390.

HEIDER, Mathias. Reaproveitamento de resíduos de minério de ferro. **In The Mine**, São Paulo, v. 84, 29 abr. 2020. Disponível em:
<<https://www.inthemine.com.br/site/reaproveitamento-de-residuos-de-minerio-de-ferro/>>. Acesso em: 20 maio 2020.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**. 1. ed. Brasília, 2016. p. 11 – 43. Disponível em:
<<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006222.pdf>>. Acesso em: 29 jul. 2020.

LIMA, Thiers Muniz. Mica (Muscovita). In: BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral 2014**. Brasília: DNPM, 2014. p. 110-111. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2014>>. Acesso em: 19 maio 2020.

LIN, Su-hsia; JUANG, Ruey-shin. Adsorption of phenol and its derivatives from water using synthetic resins and low-cost natural adsorbents: a review. : A review. **Journal Of Environmental Management**, [s.l.], v. 90, n. 3, p. 1336-1349, mar. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.09.003>. Disponível em:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479708002806?via%3Dihub>>. Acesso em: 18 maio 2020.

LUZ, Adão Benvindo da; LINS, Fernando A. Freitas. Introdução ao tratamento de minérios. In: _____ CETEM- Centro de Tecnologia. **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro, 2010. Cap. 1. p. 3-20. Disponível em:
<<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/712/3/CCL00220010.pdf>>. Acesso em: 11 set. 2019.

LV, Xingdong; SHEN, Weiguo; WANG, Lei; DONG, Yun; ZHANG, Jianfeng; XIE, Zhiqiang. A comparative study on the practical utilization of iron tailings as a complete replacement of normal aggregates in dam concrete with different gradation. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 211, p. 704-715, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.107>. Disponível em:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965261833511X?via%3Dihub>>. Acesso em: 08 ago. 2020.

MINAS GERAIS (Estado). **Deliberação Normativa COPAM nº 87, de 17 de junho de 2005**. Altera e complementa a Deliberação Normativa COPAM N.º 62, de 17/12/2002, que dispõe sobre critérios de classificação de barragens de contenção de rejeitos, de resíduos e de reservatório de água em empreendimentos industriais e de

mineração no Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2005. Disponível em: <<http://www.feam.br/monitoramento/gestao-de-barragens>>. Acesso em: 02 set. 2019

NASCIMENTO, Débora Rosa. **Flotação aniônica de minério de ferro**. 2010. 115 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br>>. Acesso em: 15 set. 2019.

NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira do; LIMA, Ari Clecius Alves de; VIDAL, Carla Bastos; MELO, Diego de Quadros; RAULINO, Giselle Santiago Cabral. **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. 1. ed. Fortaleza, 2014.

NEDER, Euler Elias; LEAL FILHO, Laurindo de Salles. O uso de aminas graxas e seus derivados na flotação de minérios brasileiros. **Holos**, [s.l.], v. 1, p. 53-75, 25 dez. 2007. Instituto Federal de Educacao, Ciencia e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN). Disponível em: <<http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/88>>. Acesso em: 08 abr. 2020.

OLIVEIRA, G. E. de; HOLANDA, J. N. F. de. Análise do impacto ambiental causado pela utilização de resíduo sólido do setor siderúrgico em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, [s.l.], v. 50, n. 315, p.185-189, set. 2004. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S036669132004000300003&script=sci_abstract&lng=pt>. Acesso em: 20 maio 2020.

PEREIRA, Ana Carolina Callegario et al. Escória de aciaria na redução da solubilidade e lixiviação de manganês em áreas contaminadas. **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 2, p. 269-275, Feb. 2014. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782014000200012&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 06 ago. 2020. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782014000200012>.

POSSA, M. M., dos SANTOS, M. D. C. **Tratamento de drenagem ácida de mina por processo de neutralização controlada**. Rio de Janeiro, 2003. Florianópolis, dezembro de 2003, v.1. p. 233-252. Disponível em: <<https://www.cetem.gov.br/images/congressos/2003/CAC00740003.pdf>>. Acesso em: 05 maio 2020.

QUEIROZ, Bianca Groner. **Avaliação do comportamento de solos estabilizados com cimento e adição de rejeito de flotação de minério de ferro**. 2017. 67 f. TCC (Graduação) Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Itajubá, Itabira, 2017.

RIBEIRO, Sidnei Lopes. Considerações iniciais sobre a segurança hídrica do Brasil. **Revista Brasileira de Estudos de Defesa**, [s.l.], v. 4, n. 1, p.155-180, 17 jan. 2017. Associação Brasileira de Estudos de Defesa - ABED. <http://dx.doi.org/10.26792/rbed.v4n1.2017.70306>. Disponível em: <<https://rbed.abedef.org>>. Acesso em: 26 ago. 2019.

RODRIGUES, Daniel Aparecido da Silva. **Assinatura geoquímica da hematita compacta do Quadrilátero Ferrífero – MG: uma contribuição para compreensão de sua gênese**. 2015. 130 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/6310>>. Acesso em: 06 set. 2019.

ROSIÈRE, Carlos A.; CHEMALE JUNIOR, Farid. Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do quadrilátero ferrífero: Uma visão geral e discussão. **Revista Geonomos**, [s.l.], v. 8, n. 2, p.27-43, 1 dez. 2000. Disponível em: <<http://www.igc.ufmg.br/portaldeperiodicos/index.php/geonomos/article/view/15>>. Acesso em: 04 set. 2019.

SILVEIRA, Marina Duque. **Utilização de resíduos de mineração na construção civil**. 2015. 39 f. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br>>. Acesso em: 10 ago. 2019.

SILVA, Fabiane Leocádia. **Aproveitamento e reciclagem de resíduos de concentração de minério de ferro na produção de *pavers* e cerâmica**. 2014. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – REDEMAT, Ouro Preto, 2014. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br>>. Acesso em: 06 ago. 2020.

TOLEDO, Maria Cristina M.; OLIVEIRA, Sônia Maria B. de; MELFI, Adolpho J.. Ciclo da Água. In: TEIXEIRA, Wilson et al. **Decifrando a Terra**. 2, ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2008. Cap 8, p. 140-166.

TUCCI, Carlos; CHAGAS, Maria. Segurança hídrica: conceitos e estratégia para Minas Gerais. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, [s.l.], v. 14, n. 1, p.1-16, dez. 2017. Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH. <http://dx.doi.org/10.21168/rega.v14e12>. Disponível em: <https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/198/802534ee73e9bcb48c662546a9f2f9e3_fbb8585ef27dacdc1075b1e435cb19e3.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2019.

WOLFF, Ana Paula. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da Vale**. 2009. 90 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009. Disponível em: < <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2345>>. Acesso em: 05 set. 2019.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A.; tradução Sônia Midori Yamamoto; revisão técnica Adir Moisés Luiz., **Física I**. 12, ed. São Paulo: Addison Wesley, 2008.