

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E MATERIAIS – PPGE3M**

**CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL E REAPROVEITAMENTO COMO AGREGADO
GRAÚDO PARA CONCRETO DE UM ESTÉRIL DE MINERAÇÃO DE OURO**

FELIPE SANTIN KELLER

Porto Alegre – RS

2024

FELIPE SANTIN KELLER

**CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL E REAPROVEITAMENTO COMO AGREGADO
GRAÚDO PARA CONCRETO DE UM ESTÉRIL DE MINERAÇÃO DE OURO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa na modalidade acadêmica.

**Orientador: Prof. Dr. Ivo André Homrich Schneider
Coorientador: Prof. Dr. André Camargo de Azevedo**

Porto Alegre - RS

2024

Esse trabalho foi julgado adequado como dissertação de mestrado em Engenharia, área de concentração de Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Prof. Dr. Ivo André Homrich Schneider

Coorientador: Prof. Dr. André Camargo de Azevedo

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Jéssica Weiler

Prof. Dr. Enrique Munaretti

Prof. Dr. Rodrigo de Almeida Silva

Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni

Coordenador do PPGE3M

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todas as pessoas da comunidade acadêmica que algum dia possam ser ajudadas por esta pesquisa

O lixo de uns é o tesouro de outros, Bordalo II

AGRADECIMENTOS

Gostaria de primeiramente agradecer aos meus pais, Lisete Santin e Alfredo Ernesto Borne Keller por me darem tudo o que eu precisei durante toda a minha vida e estarem sempre disponíveis quando eu mais precisei.

A todos os professores que eu já tive, tanto do colégio quanto do cursinho pré – vestibular e durante a graduação e pós – graduação e colegas do Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental (LTM) por me ensinarem tudo o que eu aprendi e botei em prática neste trabalho.

Aos amigos que fiz durante o colégio, graduação e do time, que proporcionaram a distração necessária para eu não surtar.

Ao meu orientador Ivo André Homrich Schneider e co-orientador André Camargo de Azevedo por confiarem e acreditarem no meu potencial e me dar esta oportunidade única de mostrar o quão grandioso eu posso ser.

À Jaguar Mining por também me dar esta oportunidade de realização.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação Luiz Englert (FLE) por me proporcionarem a bolsa de mestrado e de projeto que obtive nesta pós – graduação.

RESUMO

A atividade de extração mineral gera uma grande quantidade de resíduos sólidos que, dependendo de suas características, podem causar problemas ambientais. Estima-se que apenas no estado de Minas Gerais tenham sido geradas mais de 606 Mt de resíduos sólidos da mineração. A utilização desse material para outros fins pode se converter em uma bonificação econômica e ainda trazer ganhos em gestão ambiental. Neste trabalho, estudou-se o potencial de uso do estéril gerado no desenvolvimento de uma mina subterrânea de ouro, situada no Estado de Minas Gerais, como agregado graúdo para concreto. O material foi caracterizado em relação às suas propriedades mineralógicas e petrográficas, composição elementar, periculosidade conforme NBR 10.004 (2004) e potencial de geração de acidez. Adicionalmente, amostras do material foram britadas e classificadas de forma a atender os quesitos granulométricos para Brita nº2. O agregado foi analisado em relação à distribuição granulométrica, massa específica, teor de material fino, teor de argila em torrões e materiais friáveis, teor de partículas leves, resistência à abrasão, teor de sais e cloretos, teor de sulfatos, índice de forma, sanidade e resistência ao esmagamento seguindo os requisitos das normas NBR 7211 (2022) e DNER EM 037/97. A análise petrográfica indicou que se trata de uma rocha metamórfica classificada como clorita-hornblenda-quartzo-feldspato hornfels, de caráter competente e coloração cinza. Quanto à periculosidade, usando os critérios da NBR 10.004, classifica-se como um Resíduo Não Perigoso - Não Inerte (Classe II-A). Resultados da análise elementar pelo método EPA 3050b indicam que o elemento arsênio ultrapassa o valor de investigação para solos industriais estabelecido na Resolução CONAMA 420 de 2009. Pela análise do pH em pasta, teste NAG e balanço ácido base, os materiais tendem a ser neutros ou levemente alcalinos, sem potencial de geração de drenagem ácida de mina. Os ensaios em células úmidas comprovaram esse comportamento, com valores de pH do lixiviado entre 6,0 a 8,0 ao longo das semanas. Os elementos tóxicos acima mencionados se apresentaram nos lixiviados das células úmidas em concentrações muito baixas, permitindo concluir que, embora presentes no corpo mineral, esses elementos possuem uma baixa mobilidade

geoquímica em condições de exposição natural. Esse comportamento foi confirmado pela metodologia EPA 1313. Os resultados das análises do uso do estéril como agregado graúdo demonstraram que o material atende todos os quesitos previstos para uso em concreto no Brasil, com exceção do índice de forma de 3,38, cujo limite máximo é de 3,00. Esse fator pode estar associado a origem da metamórfica da rocha e o modo de cominuição empregado neste trabalho. Conclui-se que cerca de 60% a 70% do estéril gerado no processo de mineração pode ser aproveitado como Brita nº2, e se este for o caso, considerando a geração de estéril anual da mina, um retorno econômico de mais de R\$ 2 milhões por ano poderá ser aproveitado. Uma fração considerável do restante pode ser readequado granulometricamente ou aproveitado como agregado fino. A sequência de procedimentos usados neste trabalho pode contribuir em ações de licenciamento, gestão e sustentabilidade ambiental dos empreendimentos mineiros.

ABSTRACT

Mineral extraction activity generates a large amount of solid waste which, depending on its characteristics, can cause environmental problems. It is estimated that only in the Minas Gerais state alone, more than 606 Mt of solid mine waste was generated. Using material for other purposes can become an economic bonus and also bring gains in environmental management. In this work, the potential for using waste rock generated in the development of an underground gold mine, located in the State of Minas Gerais, as coarse aggregate for concrete was studied. The material was characterized in relation to its mineralogical and petrographic properties, elemental composition, hazardousness according to NBR 10.004 (2004) and potential for generating acidity. Additionally, samples of the material were crushed and classified in order to meet the granulometric requirements for coarse aggregate. The aggregate was analyzed in relation to particle size distribution, specific mass, fine material content, clay content in lumps and friable materials, light particle content, abrasion resistance, salt and chloride content, sulfate content, shape index, health and resistance to crushing following the requirements of standards NBR 7211 (2022) and DNER EM 037/97. The petrographic analysis indicated that it is a metamorphic rock classified as chlorite-hornblend-quartz-feldspar hornfels, with a competent characteristic and gray color. As for dangerousness, using the NBR 10.004 criteria, it is classified as a Non-Hazardous Waste - Non-Inert (Class II-A). Results of the elemental analysis using the EPA 3050b method indicate that the element arsenic exceeds the investigation values for industrial soil established in CONAMA Resolution 420 of 2009. Based on paste pH analysis, NAG test and acid-base balance, the materials tend to be neutral or slightly alkaline, with no potential for generating acid mine drainage. Tests in wet cells confirmed this behavior, with leachate pH values between 6.0 and 8.0 over the weeks. The toxic elements mentioned above were present in the wet cell leachates in very low concentrations, allowing us to conclude that, although present in the mineral body, these elements have low geochemical mobility under natural exposure conditions. This behavior was confirmed by the EPA 1313 methodology. The analysis result of mine waste as coarse

aggregate demonstrated that the material meets all requirements for use in concrete in Brazil, with the exception of the shape index of 3.38, whose maximum limit is 3.00. This factor may be associated with the metamorphic origin of the rock and the mode of comminution used in this work. It is concluded that around 60% to 70% of the waste rock generated in the mining process can be used as coarse aggregate, and if this is the case, considering the mine's annual waste generation, an economic return of more than R\$2 million per year could be appreciated. with a considerable fraction of the remainder being granulometrically readjusted or used as fine aggregate. The sequence of procedures used in this work can contribute to licensing, management and environmental sustainability actions of mining enterprises.

Lista de figuras

Figura 1: Esboço de uma atividade de mineração. Fonte: GONTIJO, 2021.....	6
Figura 2: Despejo de DAM na reserva de Krugersdorp, África do Sul. Fonte: Liefferink, 2015.....	9
Figura 3: Diagrama Eh - pH para o sistema S-Fe-H ₂ O (MARTÍNEZ, 2018).....	10
Figura 4: Diagrama Eh - pH para o sistema CuFeS ₂ -H ₂ O (CÓRDOBA, 2008).....	12
Figura 5: Diagrama Eh - pH para o sistema FeAsS-H ₂ O , (COUTINHO, 2019).....	13
Figura 6: Imagens das bactérias <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> (a) e <i>Leptospirillum ferrooxidans</i> (b), (COLLING, 2014).....	15
Figura 7: Substâncias minerais mais vendidas no Brasil em 2023. Elaborado pelo autor. Dados em: https://dados.gov.br/dados/conjuntos-dados/anuario-mineral-brasileiro-amb	17
Figura 8: Contribuição das substâncias minerais mais vendidas no Brasil em 2023. Elaborado pelo autor. Dados em: https://dados.gov.br/dados/conjuntos-dados/anuario-mineral-brasileiro-amb	17
Figura 9: Pedreira de agregados. Fonte: https://www.metso.com	18
Figura 10: Extração de areia com bomba hidráulica. Fonte: https://sagresonline.com.br	19
Figura 11: Substâncias minerais mais produzidas no Brasil em 2023 (ROM). Elaborado pelo autor. Dados em: https://dados.gov.br/dados/conjuntos-dados/anuario-mineral-brasileiro-amb	20
Figura 12: Substâncias minerais mais produzidas no Brasil em 2023 (beneficiado). Elaborado pelo autor. Dados em: https://dados.gov.br/dados/conjuntos-dados/anuario-mineral-brasileiro-amb	21
Figura 13: Consumo de ouro por setor industrial. Elaborado pelo autor. Dados em: gold.org	30
Figura 14: Produção mundial anual de ouro. Elaborado pelo autor. dados em: gold.org	30
Figura 15: Países produtores de ouro em 2023. Fonte: gold.org	31
Figura 16: Diagrama de sistemas de economia circular. fonte:	

https://www.ellenmacarthurfoundation.org	35
Figura 17: Publicações na plataforma de periódicos Scopus contendo as palavras previamente mencionadas, ao longo do tempo.....	37
Figura 18: Países que mais publicaram sobre o tema.....	38
Figura 19: Publicações na plataforma de periódicos Scopus contendo as palavras previamente mencionadas, apenas no título, ao longo do tempo.....	39
Figura 20: Publicações por tipo de minério.....	40
Figura 21: Origem dos materiais estudados.....	40
Figura 22: Utilização dos Resíduos de Mineração.....	41
Figura 23: Seção ilustrativa da mina de Faina.....	44
Figura 24: Rocha estéril retirada no desenvolvimento da mina de Faina Subterrânea..	45
Figura 25: Amostra de esteril da mina de Faina.....	46
Figura 26: Fragmentos de rocha empregados na análise macroscópica da amostra....	54
Figura 27: Matriz com textura granoblástica fina, composta por quartzo-feldspato. Aumento de 5X, polarizadores perpendiculares.....	55
Figura 28: Textura decussada mostrando lamelas de biotita desorientadas em marrom-claro e minerais opacos isotrópicos em preto. Aumento de 5X, polarizadores perpendiculares.....	55
Figura 29: Difratoograma de Raios-X e fases cristalinas da amostra.....	57
Figura 30: pH e Eh do lixiviado das células úmidas em função do tempo.....	63
Figura 31: Acidez e alcalinidade do lixiviado das células úmidas em função do tempo.	63
Figura 32: Concentração de íons do lixiviado das células úmidas em função do tempo.	63
Figura 33: Concentração de íons do lixiviado das células úmidas em função do tempo (continuação).....	64
Figura 34: Concentração de íons do lixiviado das células úmidas em função do tempo (continuação) e limites permitidos pela resolução n° 430.....	65
Figura 35: Lixiviação metálica da amostra em função do pH.....	66
Figura 36: Lixiviação metálica da amostra em função do pH (continuação).....	67
Figura 37: Curvas Granulométricas do material britado e do material selecionado.....	69

Índice de Tabelas

Tabela 1: Usos do agregado graúdo com base no tamanho. Adaptado de LUZ e ALMEIDA, 2012.....	22
Tabela 2: Composição granulométrica para agregado graúdo segundo NBR 7211.....	27
Tabela 3: Composição granulométrica para agregado graúdo segundo EM 037.....	29
Tabela 4: Produção de ouro por estado. Alterado de Anuário Mineral Brasileiro 2022..	32
Tabela 5: Propriedades físicas e mecânicas dos agregados testados por Asamoah e Afrifa.....	42
Tabela 6: Propriedades físicas e mecânicas dos agregados testados por Hammond....	43
Tabela 7: Ensaios realizados.....	52
Tabela 8: Estimativa modal de minerais da amostra segundo a descrição petrográfica.	56
Tabela 9: Estimativa mineral da amostra segundo a descrição petrográfica.....	56
Tabela 10: Composição mineralógica quantitativa da amostra por Difração de Raios-X.	57
Tabela 11: Composição elementar da amostra por Fluorescência de Raios-X.....	58
Tabela 12: Composição Metálica da amostra segundo EPA 3050.....	58
Tabela 13: Composição química da amostra segundo ABNT NBR 10004.....	59
Tabela 14: Resultado do Ensaio de Lixiviação da amostra Conforme NBR 10005.....	60
Tabela 15: Ensaio de solubilização da amostra conforme NBR 10006.....	61
Tabela 16: Contabilização de Ácidos e Bases.....	62
Tabela 17: Distribuição Granulométrica da amostra após a britagem.....	68
Tabela 18: Distribuição Granulométrica do agregado selecionado.....	69
Tabela 19: Demais ensaios de caracterização como agregado graúdo para concreto..	70
Tabela 20: Comparação dos resultados com as exigências.....	72
Tabela 21: Aproveitamento do agregado como brita de graduação 2.....	74
Tabela 22: Aproveitamento da melhor distribuição possível.....	75
Tabela 23: Valores Mínimos e Máximos da Instrução Normativa nº 5.....	76

Lista de Abreviações e Siglas

ANM – Associação Nacional de Mineração

DAM – Drenagem Ácida de Minas

ROM – Run Of Mine

REM – Relação Estéril/Minério

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR – Norma Brasileira

DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura do Transporte

EM – Especificação de Material

ME – Método de Ensaio

APF – Abertura em Posição Fechada

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente

AP – Potencial de geração ácida

NP – Potencial de neutralização

NNP – Potencial Líquido de neutralização

NAG – Geração Líquida de acidez

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

ICP-OES – Espectometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado

ANEPAC – Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção

APP – Área de Proteção Permanente

MME – Ministério de Minas e Energia

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos.....	3
1.2. Delimitações do Escopo do Trabalho.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. Resíduos da Mineração.....	5
2.2. Drenagem Ácida de Minas.....	8
2.2.1. Processos Bioquímicos.....	9
2.2.2. Previsão de Drenagem Ácida de Minas.....	15
2.3. Agregados.....	16
2.3.1. Mineração de Agregados.....	18
2.3.2. Propriedades dos Agregados Graúdos.....	18
2.3.3. Classificação dos Agregados.....	26
2.4. Exploração do Ouro.....	29
2.5. Economia Circular.....	34
2.6. Reaproveitamento de Resíduos da Mineração.....	36
3. EXPERIMENTAL.....	44
3.1. Materiais.....	44
3.2. Métodos.....	45
3.2.1. Caracterização Petrográfica, Mineralógica e Química.....	46
3.2.2. Caracterização Ambiental.....	48
3.2.3. Caracterização de Agregado Graúdo para Concreto.....	51
3.2.4. Análise Econômica.....	52
3.2.5. Análise dos Resultados.....	52
4. RESULTADOS.....	53
4.1. Caracterização Petrográfica, Mineralógica e Química.....	53
4.2. Caracterização Ambiental.....	59
4.3. Caracterização de Agregado Graúdo para Concreto.....	68
5. DISCUSSÃO.....	71
6. CONCLUSÕES.....	77

	0
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	79
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80

1. INTRODUÇÃO

A mineração é a atividade de exploração e extração de recursos naturais do subsolo, fornecendo a matéria-prima necessária para o início de toda a cadeia produtiva, sendo essencial para o desenvolvimento da sociedade. Segundo informações sobre a economia mineral brasileira, em 2023, o setor mineral participou com 4% do PIB do Brasil, com um valor de R\$ 248,2 bilhões (IBRAM, 2024). Sem a mineração, não existiriam a grande maioria dos bens que utilizamos no nosso cotidiano, pois para produzi-los, precisa-se extrair rochas, metais, água e uma diversidade de outros bens minerais.

Quando se trata do consumo de bens minerais, no Brasil, a rocha britada e a areia estiveram entre os mais consumidos. Segundo a Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados Graúdos (ANEPAC), os valores são superiores a 266 milhões de toneladas de rocha britada e cascalho e a 374 milhões de toneladas de areia, apenas no ano de 2022. Estes bens minerais são amplamente usados na construção civil para a produção de concreto e pavimento.

Entre os metais, o minério de ferro é o bem mineral mais extraído no Brasil. O ouro é o segundo metal mais explorado, tendo sido retirados das minas brasileiras, em 2023, mais de 130 milhões de toneladas de minério, segundo a ANM. Este metal é utilizado para a manufatura de circuitos impressos, na indústria joalheira, como moeda de investimento e como reserva de valor (gold.org, 2023).

Na mineração muitas vezes o produto é o foco da atenção econômica, com os esforços em pesquisas e desenvolvimento buscando muito mais a otimização e eficiência de extração, sendo os resíduos sólidos gerados na atividade de mineração pouco estudados. Estima-se que apenas no estado de Minas Gerais tenham sido gerados mais de 606 milhões de toneladas de resíduos sólidos na mineração (FEAM, 2015), sendo eles o estéril, que é qualquer material não aproveitável economicamente mas que deve ser removido para poder extrair o minério (NBR 13029/2017), e o rejeito, que é o material descartado durante o processo de beneficiamento (NBR 13028/2017).

Ambos resíduos podem ser gerados em quantidades semelhantes ou até superiores ao produto produzido pela mina em um dado empreendimento, dependendo

de sua natureza (SILVA et al., 2012). Essa grande quantidade de geração de resíduos possui grandes impactos no meio ambiente (GUSMÃO et al., 2021), pois necessitam de grandes áreas para a sua disposição, e devem ser monitorados por longos períodos de tempo, mesmo após o término do empreendimento (MACHADO, 2007).

Alguns resíduos da mineração também devem receber atenção especial. Devido a natureza da mineralização do minério de ouro, é frequente a presença de sulfetos metálicos, os mais comuns sendo a pirita, a calcopirita e a arsenopirita (ROBERT et al., 2007., MARSDEN e HOUSE, 2006). Estes sulfetos, quando expostos ao oxigênio e a água, podem reagir e gerar um efluente ácido chamado Drenagem Ácida de Minas (DAM). Os poluentes da drenagem ácida de minas afetam a qualidade da água baixando o pH (TUTU et al, 2008), aumentando a acidez natural, aumentando a dureza total e crescendo quantidades indesejáveis de ferro, manganês, alumínio, sulfatos e, eventualmente, outros metais tóxicos (NÓBREGA et al., 2008, DE MELLO et al., 2014, CIMINELLI, 2007). Estas fontes permanecem ativas por décadas e até mesmo por séculos após a sua produção (KONTOPOULOS, 1998).

Por conta dos problemas ambientais causados pela drenagem ácida de minas, surgiram os métodos de remediação, contenção e previsão de DAM bem como estudos laboratoriais de previsão para saber se a rocha em questão tem o potencial de gerar acidez (KONTOPOULOS, 1998). A análise química e mineralógica também serve como um indicador de geração de drenagem ácida, visto que a amostra precisa conter sulfetos metálicos em sua composição. Porém, os ensaios com maior precisão levam em conta o balanço ácido-base e a análise de lixiviados (SOBEK et al., 1978, MILLER et al., 1997, EPA 9045D, 2004 ASTM D5744-1996).

Para a redução da geração de drenagem ácida de minas, uma solução pode ser procurar utilidades para o estéril e rejeito, não apenas descartando em barragens ou pilhas de bota-fora. Há estudos sobre o reaproveitamento de resíduos sólidos da mineração como agregados para construção civil (JU et al, 2017, CORROCHANO et al., 2009, SARATH e DAS, 2020, FRIBER et al., 2023, ASADIZADEH et al, 2023, PEYS et al, 2022). Nestes estudos, o foco maior está nos rejeitos do que no estéril e na mineração de carvão e ferro. Há uma carência de estudos relacionados ao reaproveitamento de estéril da mineração de ouro.

Portanto, no presente trabalho foi investigada a possibilidade de utilizar o estéril de uma mina de ouro subterrânea em desenvolvimento como agregado graúdo para a construção civil. Para tal, realizaram-se estudos de caracterização mineralógica e petrológica do material, análise de periculosidade, composição elementar e estudos laboratoriais de previsão de drenagem ácida de minas, e na sequência, foi realizada a britagem e a classificação granulométrica do material ensaios de caracterização do material como agregado graúdo para concreto.

1.1. Objetivos

O objetivo geral do presente trabalho foi investigar a possibilidade da utilização de um estéril oriundo do desenvolvimento de uma mina subterrânea de ouro como agregado graúdo para a construção civil.

Os objetivos específicos foram:

- Caracterizar petrograficamente, mineralogicamente e quimicamente a amostra;
- Realizar testes estáticos e cinéticos de previsão de geração de drenagem ácida no mesmo material;
- Adequar a granulometria do material, empregando procedimentos de britagem e classificação por peneiramento, para a faixa granulométrica correspondente a Brita n° 2;
- Caracterizar as propriedades do material conforme as normas brasileiras de agregado graúdo para concreto;
- Estimar valores de recuperação e avaliar os potenciais benefícios econômicos, tecnológicos e ambientais.

1.2. Delimitações do Escopo do Trabalho

Este trabalho se delimita à amostra fornecida pela mineradora Jaguar Mining. Neste material foi realizada a caracterização petrográfica, mineralógica e química, ambiental e como agregado graúdo de graduação 2 de um estéril de mineração de ouro. Não foram testadas outras graduações e nem o material como agregado miúdo.

Também não foram investigadas as características mecânicas do concreto feito a partir deste estéril.

A caracterização ambiental também é delimitada a apenas a caracterização do material como quanto a periculosidade do resíduo e ao potencial de geração de drenagem ácida de minas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será feita uma breve revisão da literatura em relação a mineração e seus resíduos, drenagem ácida de minas, agregados e mineração de agregados, mineração de ouro e economia circular.

2.1. Resíduos da Mineração

A mineração é a atividade econômica e industrial de pesquisa, exploração, extração e beneficiamento dos recursos minerais presentes no solo e subsolo. Estes recursos minerais não ocorrem de maneira pura e pronta para o uso e, portanto, passam pelo processo de beneficiamento após a sua extração. Todo o material presente nos depósitos minerais que não são o minério de interesse ou subprodutos acabam virando resíduo durante a extração e beneficiamento do material de interesse, sendo também o caso da mineração do ouro. A seguir são definidos alguns termos relacionados a mineração que serão importantes para este trabalho que estão exemplificados na figura 1.

- Minério (ANM): Mineral ou associação de minerais (rocha) que pode ser explorado economicamente.
- ROM (Mindat.org): do inglês *Run Of Mine*, minério bruto extraído da lavra antes da etapa de beneficiamento.
- Estéril (ABNT NBR 13029/2017): Todo e qualquer material não aproveitável economicamente, cuja remoção se torna necessária para a lavra do minério.
- Beneficiamento (NRM - 18): Tratamento visando preparar granulometricamente, concentrar ou purificar minérios por métodos físicos ou químicos sem alteração da constituição química dos minerais.
- Mineral de ganga (CETEM): Mineral ou conjuntos minerais não aproveitados de um minério.
- Concentrado (CETEM): Produto final produzido pelo processo de beneficiamento.
- Rejeito (ABNT NBR 13028/2017): Todo e qualquer material descartado durante o processo de beneficiamento de minérios.
- Recuperação metalúrgica: Quantidade do metal de interesse que a planta de

beneficiamento consegue efetivamente recuperar.

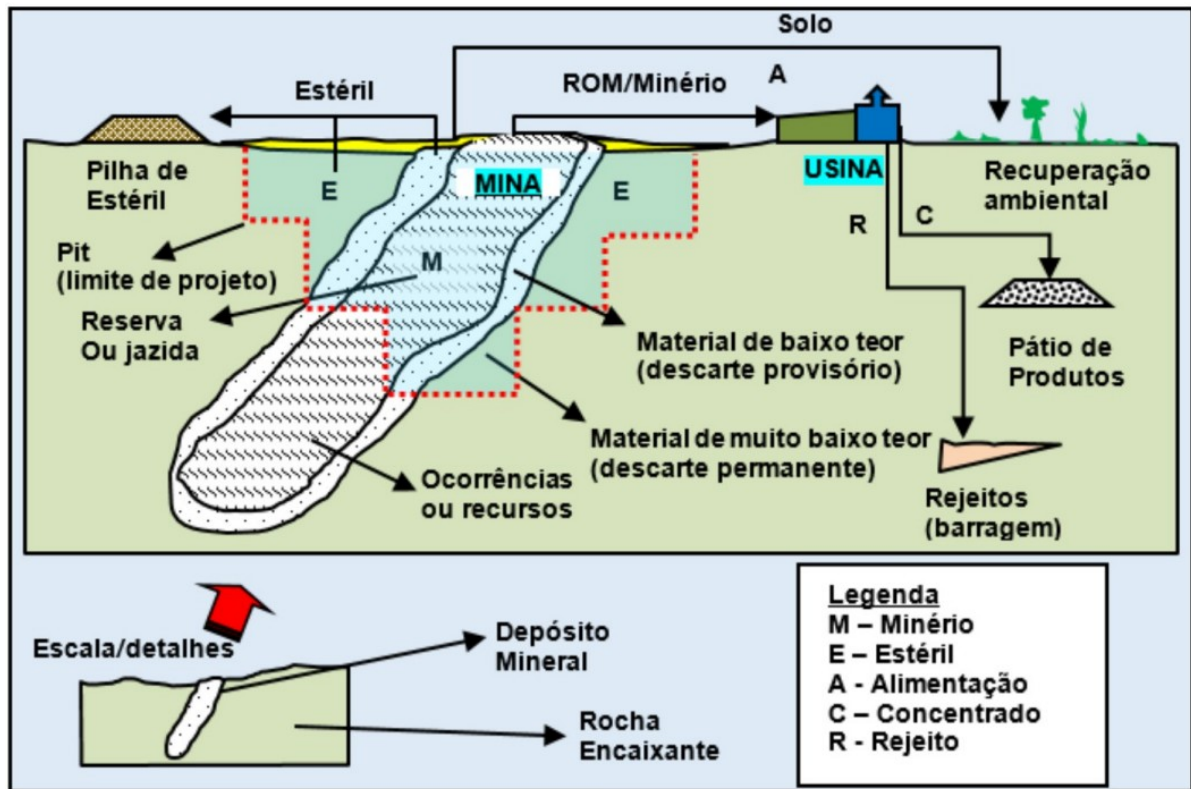


Figura 1: Esboço de uma atividade de mineração. Fonte: GONTIJO, 2021.

Como pode ser visto, não é apenas o minério que é extraído do subsolo. O estéril também é removido, e o minério passa por etapas de concentração para separá-lo dos minerais de ganga gerando os rejeitos, de forma que resíduos são gerados tanto na etapa de extração (estéril) quanto na etapa de beneficiamento (rejeito).

Portanto a atividade de mineração gera dois principais resíduos sólidos, o estéril e o rejeito. A grande maioria das plantas de beneficiamento operam a úmido, pois os processos de cominuição e de separação necessitam da água para serem mais eficazes e, por conta disto, os rejeitos são gerados em forma de polpa, não podendo serem diretamente empilhados. A sua deposição pode ser em forma de barragens ou etapas adicionais de separação da água do rejeito sendo aplicadas para a deposição em pilha (FRANÇA et al., 2018).

As pilhas de estéril e barragens de rejeitos também ficam expostas às

intempéries por muito mais tempo que a atividade de extração, já que o material é visto como resíduo, não possuindo nenhum uso atribuído e sendo apenas descartado. Portanto são passíveis de serem erodidas e quimicamente intemperizadas devido ao longo tempo de exposição.

No ano de 2020, o setor mineral brasileiro como um todo produziu 1,073 bilhão de toneladas de bens minerais (IBRAM, 2021) e, de acordo com os dados no Plano Nacional de Resíduos Sólidos, foram geradas 310 milhões de toneladas de resíduos sólidos pelas atividades de mineração (IBAMA). No estado de Minas Gerais, foram geradas 606 milhões de toneladas de resíduos sólidos (FEAM). Portanto, há uma discordância nos dados, possivelmente por não existir um controle sistemático em escala nacional sobre a quantidade de estéréis gerados (SILVA et al. 2012). O resíduo muitas vezes não vai para a sua área de destino final durante a produção da mina, mas sim é estocado em pilhas de estéril marginal, onde pode ser usado como minério caso o preço do produto suba e, portanto, não recebe tal classificação.

Esta geração de resíduos é ainda mais exacerbada na mineração do ouro por causa do baixíssimo teor de ouro no minério que, na ordem de uma parte por milhão, seu beneficiamento pode gerar mais de uma tonelada de rejeito por grama de ouro produzida. Em 2020, foi produzida na mina Paracatú, de propriedade da Kinross, 14,7 toneladas de ouro, a um teor de ROM de 0,41 g/t e recuperação metalúrgica de 79,5%, e geradas 37 milhões de toneladas de estéril (dados disponíveis no Relatório técnico da mina de Paracatú). Usando estes valores, pode-se calcular as gerações de pelo menos 45 milhões de toneladas de rejeito, que somado à geração de estéril, resultam em 82 milhões de toneladas de resíduos sólidos, sem contar aditivos de processos e água de lavagem, apenas no ano de 2020. Em outras palavras, para cada grama de ouro produzida, foram geradas 3,07 toneladas de rejeito e 2,55 toneladas de estéril, totalizando 5,34 toneladas de resíduos sólidos.

Como será visto a seguir, estes resíduos não podem ser descartados sem nenhum estudo prévio de classificação, periculosidade ou impacto ambiental. Portanto diversas análises de caracterização ambiental são úteis a fim de avaliar os possíveis impactos dos resíduos no meio ambiente. Por exemplo a Norma Brasileira ABNT NBR 10004/2004: Resíduos Sólidos – Classificação, que classifica os resíduos sólidos em

Resíduo Classe I – Perigoso e Resíduo Classe II – Não Perigoso, e no caso deste último, em inerte ou não-inerte. Para isto a norma exige os ensaios de caracterização química descritos na EPA SW 846, inflamabilidade, toxicidade, corrosividade, reatividade e patogenicidade, e também os ensaios de lixiviação e solubilização citados nas normas ABNT NBR 10005/2004, ABNT NBR 10006/2004.

Um grande problema da má disposição de resíduos sólidos da mineração é a drenagem ácida de minas, que pode acontecer tanto em depósitos de estéril quanto em barragens de rejeito. Quando acontece, a drenagem ácida pode acidificar a água de corpos hídricos e do subsolo e libera quantidades indesejáveis de metais tóxicos e sulfatos, podendo tornar a região imprópria para o uso e tóxica para muitos organismos (SOUZA, 2015).

2.2. Drenagem Ácida de Minas

A drenagem ácida de minas (DAM) é um efluente ácido rico em metais e íons sulfato, gerado quando minerais metálicos sulfetados, como a pirita (FeS_2), a calcopirita (FeCuS_2) e a arsenopirita (FeAsS) entram em contato com o ar e a água e sofrem oxidação (MEND, 1994). A lixiviação destes minerais pode acontecer em condições atmosféricas, e ocorre principalmente quando uma alta concentração destes minerais é exposta ao ar, na maioria das vezes por causa de uma grande movimentação de terra, como acontece na mineração. Um caso clássico da drenagem ácida de minas é o caso de Witwatersrand, África do Sul, mostrado na figura 2, onde o despejo da DAM alaranjada acaba mudando a cor do rio (TUTU et al., 2008).



Figura 2: Despejo de DAM na reserva de Krugersdorp, África do Sul. Fonte: Liefferink, 2015

2.2.1. Processos Bioquímicos

Como descrito anteriormente, a drenagem ácida de minas é gerada pela oxidação de sulfetos metálicos. A oxidação ocorre quando o mineral é exposto à atmosfera, e o oxigênio atmosférico, junto com a umidade do ar, água das chuvas ou corpos d'água fazem com que o meio fique propício para a geração de drenagem ácida de minas. Este é um processo lento, que pode ser catalisado pela ação de bactérias acidófilas quimiolitotróficas (KONTOPOULOS 1998).

Sulfetos são compostos químicos formados por enxofre e um grande número de metais, podendo ser mais de um metal por sulfeto e tem a característica de serem insolúveis e hidrofóbicos (MARTINS et al., 2010).

2.2.1.1. *Pirita*

A pirita está entre os sulfetos metálicos mais comuns, ocorre como cristais em formatos cúbicos e cor dourada, que pode ser facilmente confundida com o ouro,

recebendo o nome de ouro dos tolos. Possui a fórmula química de FeS_2 , tendo 46,6% do seu peso em ferro e 53,4% em enxofre. Na pirita o ferro se apresenta como o cátion ferroso, tendo o estado de oxidação +2, fazendo uma ligação iônica com o ânion S_2^{2-} , o qual os átomos fazem uma ligação covalente entre si (MARTÍNEZ, 2018).

Como pode ser visto no diagrama Eh-pH das fases Fe-S- H_2O (figura 3), a pirita é insolúvel em água em condições neutras, mas nas condições ácidas, com o pH baixo e alto potencial de oxirredução, a pirita se dissocia, liberando o íon ferroso (Fe^{2+}) e férrico (Fe^{3+}), dependendo do potencial.

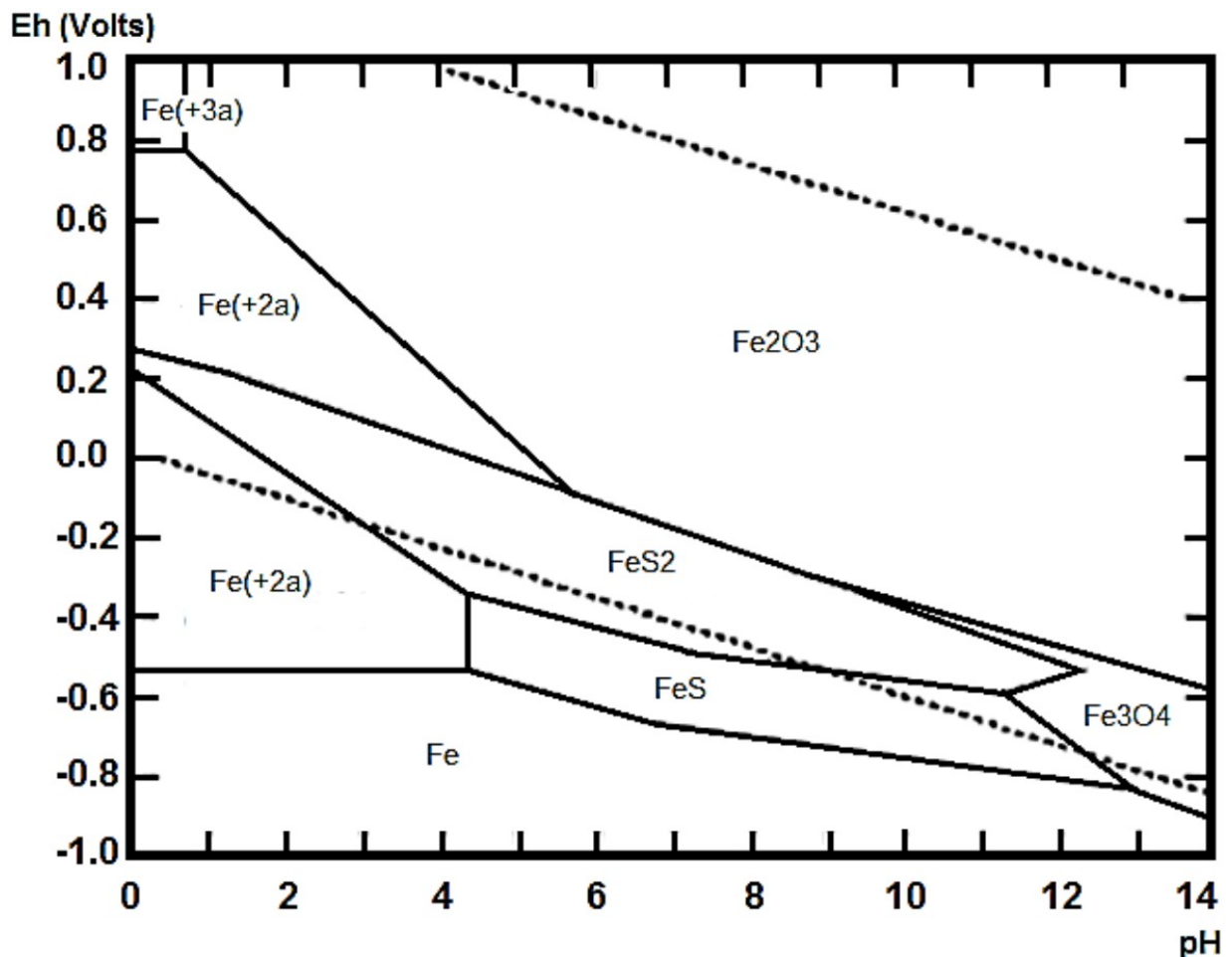
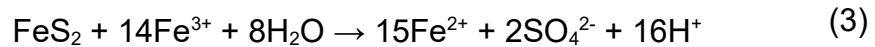
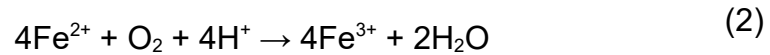
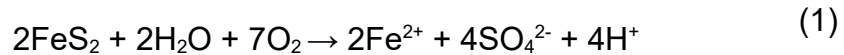


Figura 3: Diagrama Eh - pH para o sistema S-Fe- H_2O (MARTÍNEZ, 2018).

A pirita é o principal mineral gerador da drenagem ácida de minas e as suas reações de oxidação em condições atmosféricas estão descritas a seguir (MEND,

1994):



Na reação inicial de oxidação ocorre a formação de sulfato e a liberação do íon ferroso, junto com a geração de acidez. Dependendo das condições do meio, o íon ferroso gerado na solubilização da pirita pode ser novamente oxidado para o íon férrico, descrito na reação 2, o qual pode então ser reintroduzido na oxidação da pirita quando o meio tem as condições favoráveis, com o íon oxidando novamente a pirita, descrito na reação 3. Isso forma um sistema de autocatálise, em que um dos produtos da oxidação da pirita é utilizado como reagente de oxidação da própria pirita, aumentando a taxa de oxidação com o tempo. O ciclo permanece até que toda a pirita acessível aos agentes da reação tenha sido consumida (KONTOPOULOS, 1998 APUD WEILER, 2016).

2.2.1.2. Calcopirita

A calcopirita é outro sulfeto bastante comum. É o mineral de cobre mais frequente da natureza, e o minério de cobre mais abundante. Possui a composição CuFeS_2 , com 34,6% do peso em cobre, 30,4% em ferro e 35% em enxofre. Segundo Pearce, o cobre apresenta-se em estado de oxidação +1, enquanto o ferro está em sua forma de cátion férrico, e assim como a pirita, o íon S_2^{2+} possui o estado de oxidação divalente (PEARCE et al., 2006).

Analisando o diagrama de Eh - pH para o sistema Cu-Fe-S- H_2O (figura 4), verifica-se que para as condições ácidas oxidantes da drenagem ácida de mina, a calcopirita se dissocia em íons metálicos e sulfato, com o ferro podendo ser bivalente ou trivalente, dependendo do potencial de oxirredução do meio.

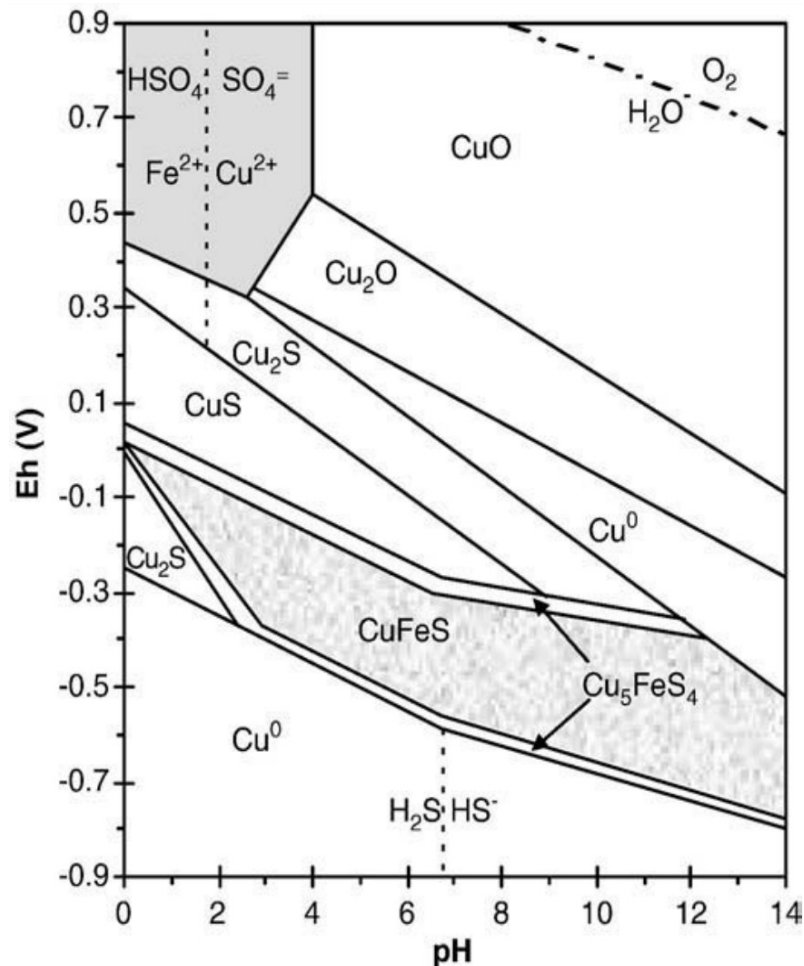
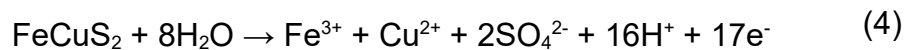
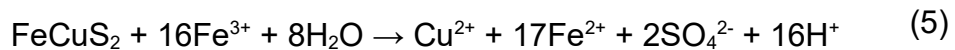


Figura 4: Diagrama Eh - pH para o sistema $\text{CuFeS}_2\text{-H}_2\text{O}$ (CÓRDOBA, 2008).

Segundo Majuste (2011), Diversos estudos sobre a solubilização da calcopirita sob condições atmosféricas apontam que a seguinte equação global ocorra:



A taxa de oxidação do mineral depende do potencial de oxirredução, com o íon cúprico sendo gerado em potencial eletroquímico oxidante. O ferro trivalente gerado na reação também poderá realizar a oxidação da calcopirita, segundo a reação:



E em condições favoráveis, a reação (2) também poderá acontecer, gerando outro sistema de autocatálise.

2.2.1.3. Arsenopirita

A arsenopirita é outro sulfeto metálico comum na crosta terrestre e comumente associado à drenagem ácida de minas. Possui a fórmula química FeAsS , com 34,30% da massa sendo ferro, 46,01% de arsênio e 19,69% de enxofre. O ferro está em sua forma catiônica bivalente, enquanto o arsênio e o enxofre formam um grupo dianiônico por meio de uma ligação covalente, estando os dois em suas formas monovalentes (COUTINHO, 2019).

A análise do diagrama de Pourbaix (figura 5) para as espécies inorgânicas de arsênio mostra que a dissolução da arsenopirita não ocorre em meio redutor, e depende pouco do pH, mas as fases de arsênio dissolvido em meio oxidante variam com o pH, com o complexo adquirindo mais hidrogênios e oxigênios a medida que o meio fica mais ácido e oxidante.

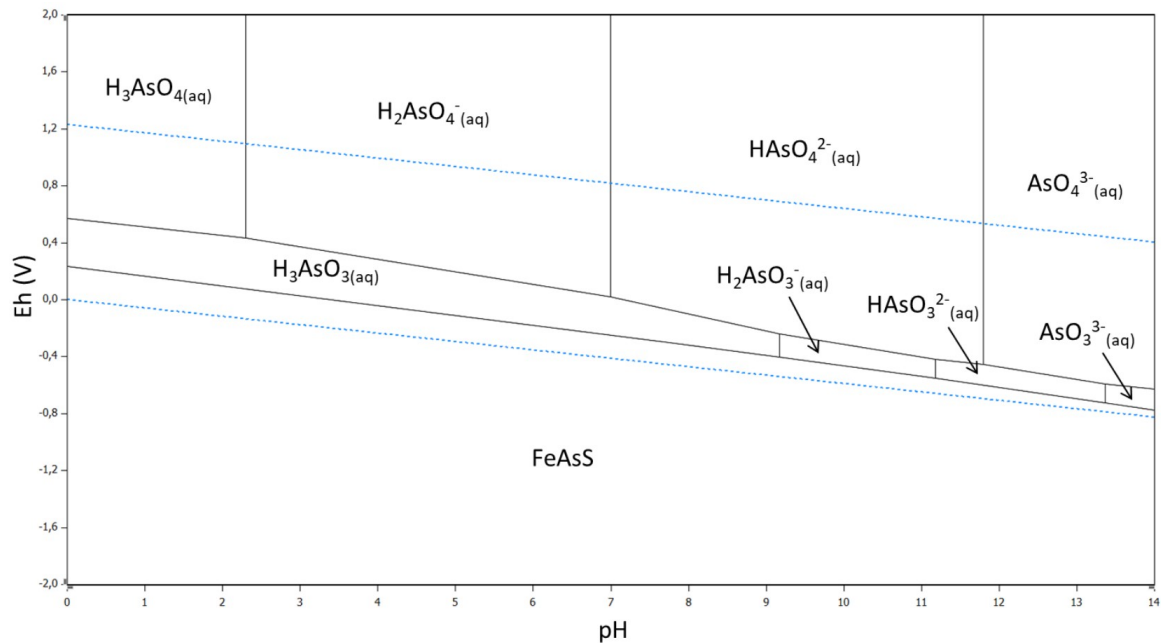
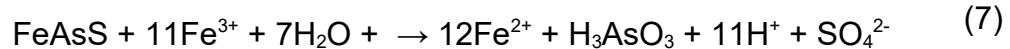
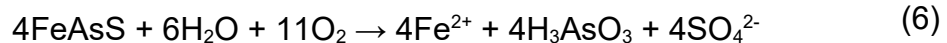


Figura 5: Diagrama Eh - pH para o sistema $\text{FeAsS-H}_2\text{O}$, (COUTINHO, 2019).

Por não ser um metal, o arsênio não é diretamente liberado em sua forma elementar, sendo liberado de maneira não estequiométrica, na forma de ácido arsênico. A arsenopirita também é oxidada pelo íon férrico a uma taxa maior do que pelo oxigênio, e ambas as reações estão descritas a seguir: (SILVA, 2016, WALKER et al.,

2006, MCKIBBEN et al., 2008):



Assim como a pirita e a calcopirita, a arsenopirita também pode ser oxidada pelo íon férrico, e se o meio estiver propício, ocorre a reação (2) de oxidação do íon ferroso para férrico, liberando ainda mais agente oxidante para o meio.

2.2.1.4. *Bactérias*

Como visto, o íon férrico é produto da oxidação dos sulfetos, mas também é o reagente oxidante dos sulfetos, o que faz com que a geração de drenagem ácida aumente exponencialmente com o tempo, e a produção do efluente só cessa quando há o esgotamento dos sulfetos metálicos.

Um dos fatores limitantes da oxidação dos sulfetos está na reação (2), que ocorre muito lentamente em pH ácido (MEND, 1994), mas esta reação pode ser acelerada na ordem de 10^6 vezes na presença de bactérias quimiolitotróficas acidófilas (KELLY e WOOD, 2000, EVANGELOU, 1995). Este termo se refere a seres procariontes unicelulares (bactéria) que vivem em meio ácido (acidófila) e metabolizam sais inorgânicos quimicamente (quimiolitotrófico) para a geração de energia.

Em seu trabalho sobre a biolixiviação da pirita, Colling em 2014 identificou as bactérias *Acidithiobacillus ferrooxidans* e *Leptospirillum ferrooxidans* aderidas à superfície da pirita associada ao carvão do estado de Santa Catarina, cujas imagens são mostradas na figura 6.

Existem três mecanismos de biolixiviação que ocorrem ao mesmo tempo, que são (HOLMES et al, 1999 APUD COLLING, 2014):

Mecanismo direto: a bactéria atua diretamente na superfície do mineral com ataques enzimáticos, onde as reações bioquímicas são oriundas da extração direta de elétrons do mineral;

Mecanismo de contato indireto: é possível verificar a presença de uma camada polimérica entre o contato da bactéria com o mineral. Através desta camada ocorrem as interações e reações químicas do mineral e da célula;

Mecanismo indireto: a bactéria está em suspensão no meio aquoso, e regenera o íon ferroso liberado na oxidação do mineral a íon férrico, catalisando a equação (2).

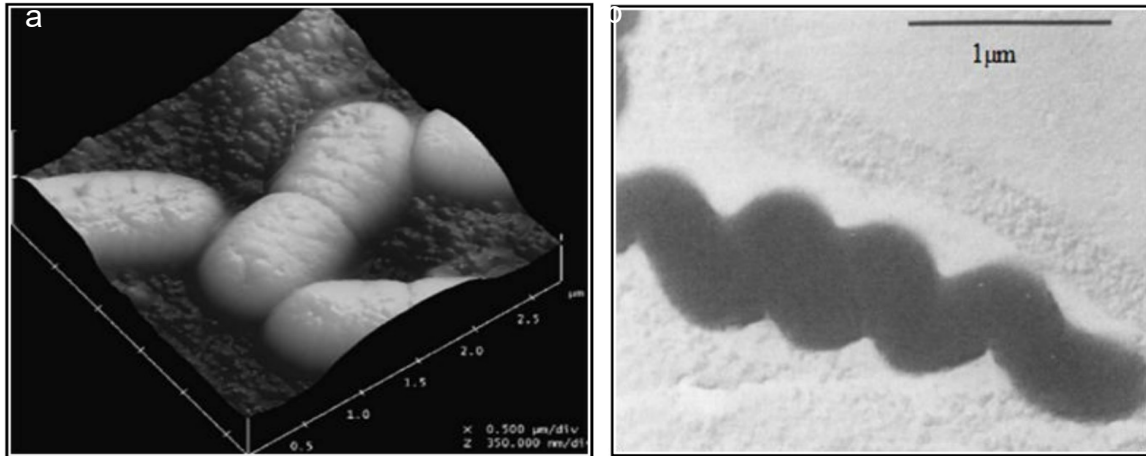


Figura 6: Imagens das bactérias *Acidithiobacillus ferrooxidans* (a) e *Leptospirillum ferrooxidans* (b), (COLLING, 2014).

2.2.2. Previsão de Drenagem Ácida de Minas

Como visto anteriormente, a drenagem ácida de minas pode gerar problemas ambientais devastadores e, por isso, é de extrema importância a prevenção da contaminação do meio ambiente pela DAM. Para tanto, diversas metodologias foram desenvolvidas com o objetivo de prever a ocorrência de DAM em áreas de disposição de resíduos e estabelecer antecipadamente uma estratégia de controle e minimização de impactos. Estas metodologias compreendem a realização da caracterização física, química e mineralógica do resíduo, complementada por procedimentos específicos para determinação do potencial de geração e neutralização de ácido (Sobek et al., (1978) e MILLER et al., 1997) e também ensaios de simulação de intemperismo e erosão no resíduo (ASTM D5744-96, BORMA e SOARES, 2002, CAPANEMA e CIMINELLI, 2003).

A drenagem ácida de minas é um efluente que carrega consigo uma grande quantidade de poluentes, que também devem ser analisados. A Resolução Nº 420 de 2009 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) dispõe sobre os critérios e

valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas, e estabelece limites para a concentração dos poluentes nos solos de áreas agrícolas, residenciais e industriais. A Resolução N° 430 de 2011 do CONAMA dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes e estabelece limites para a concentração de poluentes nos efluentes a serem lançados.

2.3. Agregados

Os agregados ou agregados para construção civil são materiais granulares, sem forma e volume definidos, de dimensões propriamente estabelecidas para uso em obras de engenharia civil (LA SERNA e REZENDE, 2009). Os agregados são divididos de acordo com o seu tamanho em agregados graúdos, consistindo de brita e cascalho, e agregados miúdos, consistindo de areia e pó de rocha. Os agregados são assim chamados pois são misturados com o cimento e agregam-se ao mesmo para a formação de concreto.

Como são utilizados na construção civil, os agregados são literalmente utilizados em qualquer obra de construção, seja na implementação de infraestrutura de transporte, seja em edificações, é empregado em rodovias, saneamento, moradias, instalações físicas e industriais e de comércio, aterros, na instalação dos diferentes tipos de edificações e muitas outras obras (LUZ E ALMEIDA, 2012). São as substâncias minerais mais consumidas. Segundo os dados publicados pela ANM, em 2023 no Brasil, os agregados estiveram entre as substâncias minerais mais comercializadas, sendo vendidos mais de 250 milhões de toneladas de brita e cascalho, o que corresponde a quase um terço das vendas de substâncias minerais, como mostrado nas figuras 7 e 8.

Substâncias Minerais Mais Vendidas no Brasil em 2023

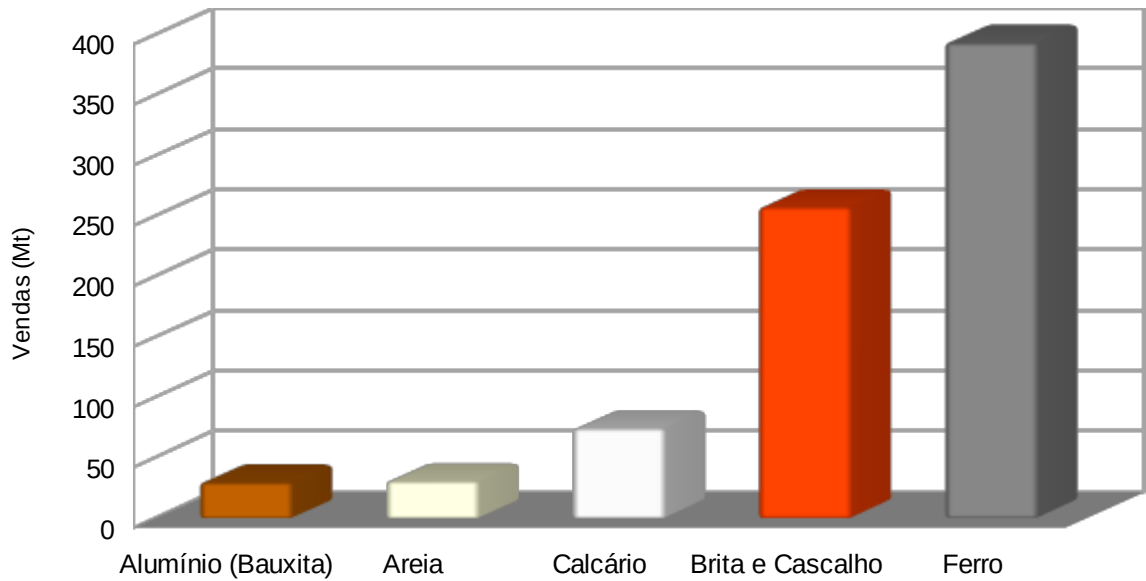


Figura 7: Substâncias minerais mais vendidas no Brasil em 2023. Elaborado pelo autor. Dados em: <https://dados.gov.br/dados/conjuntos-dados/anuario-mineral-brasileiro-amb>.

Contribuição das Substâncias Minerais mais Vendidas no Brasil em 2023

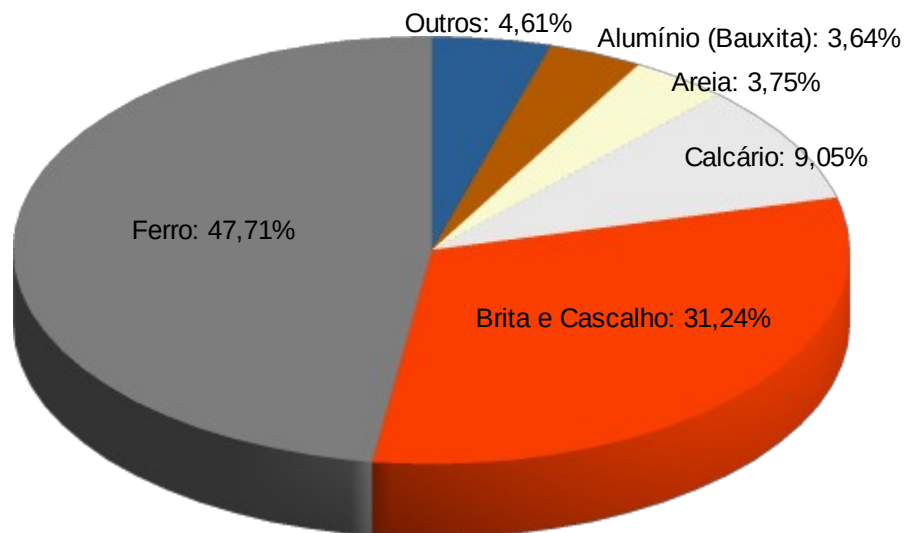


Figura 8: Contribuição das substâncias minerais mais vendidas no Brasil em 2023. Elaborado pelo autor. Dados em: <https://dados.gov.br/dados/conjuntos-dados/anuario-mineral-brasileiro-amb>.

2.3.1. Mineração de Agregados

Em termos de mineração, os agregados são substâncias minerais não metálicas produzidas a partir de materiais rochosos consolidados e sedimentares, e podem ser reduzidos de tamanho até atingir a granulometria ideal. São produzidos em pedreiras ou jazidas de rocha (graúdos e miúdos) e areeiras (miúdos).

Nas pedreiras de agregados, os agregados são explotados com a utilização de explosivos, para a fragmentação da rocha, e transportados para a usina de beneficiamento, onde o material será reduzido de tamanho com a utilização de britadores e classificados granulometricamente.

Nas areeiras não são utilizados explosivos pois o material encontra-se não consolidado. Em casos de extração em fossa seca, é utilizado o desmonte hidráulico para desagregar e transportar a areia. Na extração em corpos da água, pode ser feita a dragagem da areia ou serem utilizadas bombas de sucção para fazer a captação dos sedimentos no fundo. As etapas de beneficiamento de areia geralmente não possuem redução do tamanho em britadores, já que a areia se encontra em tamanho menor do que os britadores conseguem cominuir, portanto é feita apenas a classificação granulométrica. Exemplos de pedreiras e areeiras estão nas figuras 9 e 10.



Figura 9: Pedreira de agregados. Fonte: <https://www.metso.com>.



Figura 10: Extração de areia com bomba hidráulica. Fonte: <https://sagresonline.com.br>.

Os agregados fazem parte das substâncias minerais mais produzidas no Brasil, tanto em minério bruto (ROM) quanto beneficiado. Em 2023, segundo a ANM, foram produzidas um pouco mais de 300 milhões de toneladas de brita e cascalho e quase 100 milhões de toneladas de areia em termos de minério bruto, e mais de 200 milhões e meio toneladas de brita e cascalho e 30 milhões toneladas de areia quando beneficiados, como mostrado nas figuras 11 e 12.

Substâncias Minerais Mais Produzidas no Brasil em 2023 (ROM)

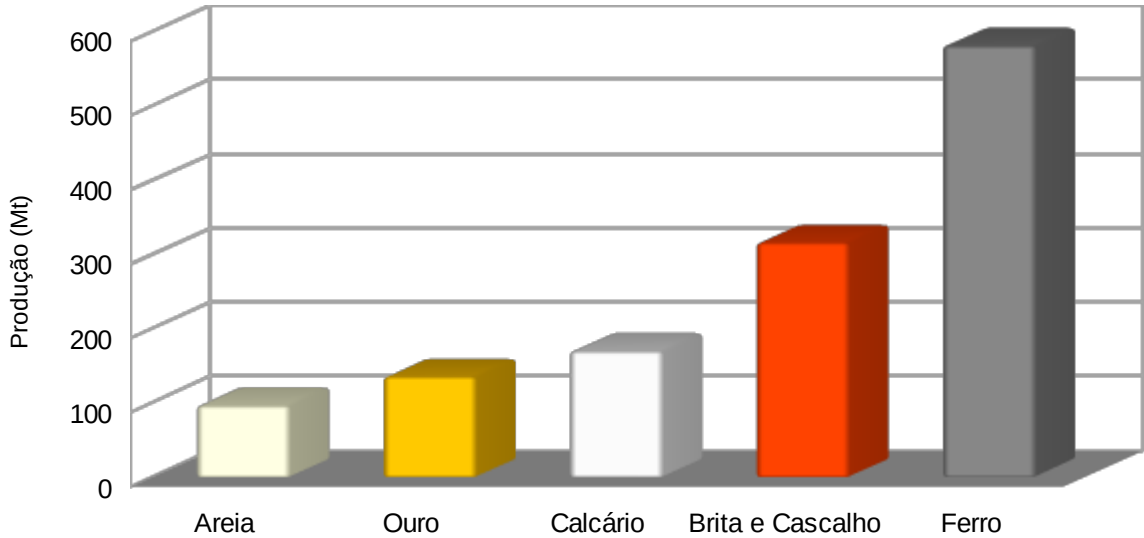


Figura 11: Substâncias minerais mais produzidas no Brasil em 2023 (ROM). Elaborado pelo autor. Dados em: <https://dados.gov.br/dados/conjuntos-dados/anuario-mineral-brasileiro-amb>.

Substâncias Minerais Mais Produzidas no Brasil em 2023 (Beneficiado)

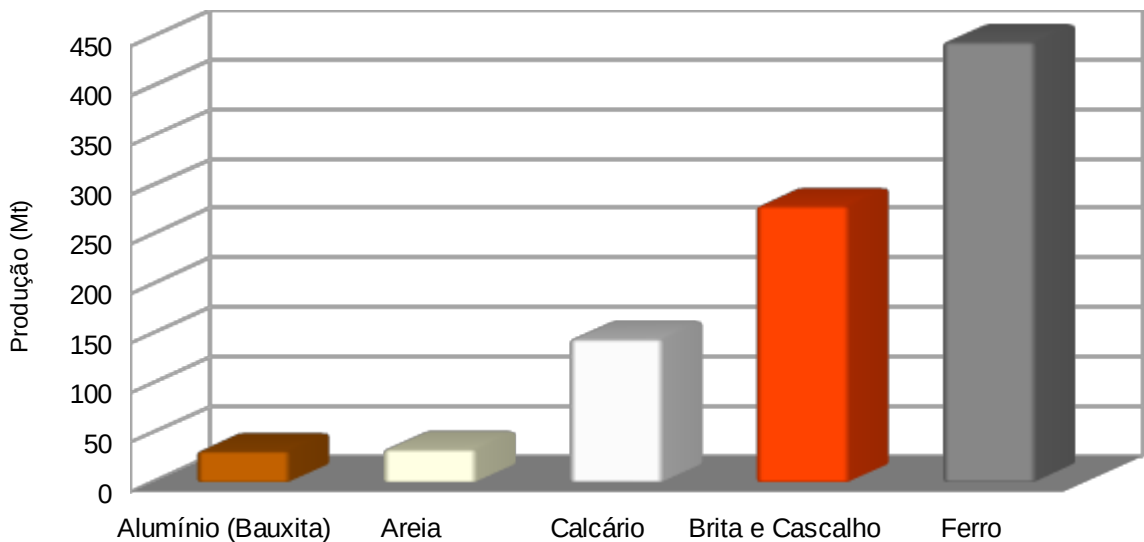


Figura 12: Substâncias minerais mais produzidas no Brasil em 2023 (beneficiado). Elaborado pelo autor. Dados em: <https://dados.gov.br/dados/conjuntos-dados/anuario-mineral-brasileiro-amb>.

Pode ser visto que tanto na produção de ROM e beneficiados, quatro das cinco substâncias minerais mais produzidas estão relacionadas a construção civil. O ouro é a quarta substância mais extraída em termos de ROM, mas pelo seu baixíssimo teor, como será explicado mais adiante, a sua produção beneficiada foi de “apenas” 82 toneladas (ANM). A produção e venda de areia está muito menor nos dados da ANM do que realmente é, possivelmente pelo fato de que muitas areeiras não possuem cadastro mineiro pois sua fácil extração permite o desenvolvimento de garimpos e extrações ilegais, sendo que em média 60% da areia consumida é extraída de forma ilegal (RAMADON, 2022). Dados da ANEPAC indicam que em 2022 a demanda pelo mercado consumidor foi de 374 milhões de toneladas de areia e 266 milhões de toneladas de brita.

2.3.2. Propriedades dos Agregados Graúdos

Como dito anteriormente, os agregados são classificados com base no seu tamanho, mas há vários outros parâmetros que serão vistos a seguir que impactam diretamente ou indiretamente na resistência do próprio agregado e do concreto resultante.

2.3.2.1. Petrografia e Composição Mineralógica

Um estudo petrográfico e mineralógico do agregado tem como objetivo identificar os principais minerais que constituem a rocha, com o objetivo de classificação e identificação dos potenciais minerais reativos, também fornecendo importantes informações sobre a composição mineralógica, tamanho e forma dos grãos, textura, porosidade, grau de fraturamento da rocha e grau de alteração dos minerais (LUZ e ALMEIDA, 2012).

2.3.2.2. Granulometria

A granulometria é o parâmetro que define para qual uso o agregado será utilizado. Segundo LUZ e ALMEIDA (2012), os principais usos dos agregados graúdos

com base no seu tamanho estão listados na tabela 1. Como pode ser visto, os agregados entre 4,8 mm e 25 mm são amplamente utilizados em concreto, entre outros usos, com a fração de maior tamanho sendo utilizada em concretos que exijam maior resistência. O ensaio para a determinação da granulometria do agregado é descrito na norma ABNT NBR 17054/2022 Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio.

Tabela 1: Usos do agregado graúdo com base no tamanho. Adaptado de LUZ e ALMEIDA, 2012.

Tamanho (mm)	Usos
4,8 a 9,5	Massa asfáltica.
4,8 a 12,5	Intensivamente na fabricação de concreto, com inúmeras aplicações, como na construção de pontes, edificações e grandes lajes.
12,5 a 25	Fabricação de concreto que exija maior resistência, principalmente em formas pesadas.
25 a 50	Lastro ferroviário.
50 a 76	Drenagem e fossas.
Brita Graduada	Base e sub-base, pisos, pátios, galpões e estradas.

2.3.2.3. Forma dos Grãos

A forma dos grãos do agregado graúdo pode impactar na resistência do concreto resultante e na absorção de água do agregado e depende da rocha de origem e do tipo de britador utilizado para a redução do tamanho (SILVA E MELO, 2020). Segundo eles, rochas de estruturas maciças como os basaltos compactos, produzem britas de formas cúbicas, enquanto rochas de estrutura xistosa e algumas rochas metamórficas tendem a produzir fragmentos de forma alongadas e lamelares.

Britadores de mandíbulas tendem a produzir partículas lamelares ou achatadas e mais alongadas, devido ao mecanismo de compressão (SILVA e MELO, 2020). São mais utilizados para a fragmentação da rocha vinda direto do desmonte, chamada de britagem primária, enquanto que para o ajuste do tamanho do agregado, na britagem secundária ou terciária, é mais comum a utilização de britadores cônicos, de martelo ou giratórios (CHAVES et al., 2021). Os britadores de eixo vertical ou inclinados tendem a produzir partículas cúbicas ou esféricas devido ao desgaste das arestas pelo atrito nas

paredes dos britadores (SILVA e MELO, 2020).

Em geral os grãos do agregado graúdo devem ser de forma cúbica, pois grãos muito achatados ou alongados podem causar problemas na resistência do concreto (SILVA et al., 2021). Os agregados de forma inadequada produzem maiores índices de vazios no concreto, ocasionados pelo acúmulo de bolhas. Esses vazios permitem uma elasticidade do concreto, funcionando como concentradores de tensões, permitindo que o concreto trabalhe quando sujeito a esforços. Isso o torna mais frágil, rompendo a baixa resistência. Além disto, agregados com forma inadequada também possuem uma maior área de contato superficial, resultando em uma maior absorção da água que deveria ser usada na hidratação do cimento, o que também ajuda a tornar o concreto mais frágil.

A forma dos grãos pode ser medida usando um paquímetro seguindo a norma ABNT NBR 7809/2019 Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio.

2.3.2.4. *Densidades*

A densidade é a relação entre a massa e o volume, mas os agregados possuem mais de uma densidade a ser calculada. Segundo a NBR 16917/2021, a densidade do agregado na condição seca é o quociente entre a massa do agregado quando os poros permeáveis do agregado não estão preenchidos com água e não há umidade superficial livre, e o volume de suas partículas, incluindo o volume dos poros permeáveis e impermeáveis, excluindo o vazio entre as partículas. A densidade do agregado na condição saturada superfície seca é o quociente entre a massa do agregado quando os poros permeáveis estão preenchidos com água sem que e não há umidade superficial livre, e o volume de suas partículas, incluindo o volume dos poros permeáveis e impermeáveis, excluindo o vazio entre as partículas. Também há a densidade aparente, que é o quociente entre a massa do agregado e o volume por ele ocupado, incluindo o volume dos poros e o vazio entre as partículas (SMITH e COLLIS, 2001, APUD LUZ E ALMEIDA, 2012).

2.3.2.5. *Materiais Nocivos*

São considerados finos os materiais menores que 0,074 mm presentes no agregado, podendo estar solto como pó ou em torrões de argila, e podem influenciar significativamente nas propriedades do concreto, dependendo da natureza do material. Se forem argilominerais expansivos, poderão causar rachaduras e rompimento do concreto bem como e aumentar a demanda de água. Se não forem expansivos, podem recobrir os grãos dos agregados, impedindo a cristalização do cimento na superfície do agregado. Se ocorrerem em torrões de argila aglomerada, podem reduzir a resistência mecânica do concreto (LUZ e OLIVEIRA, 2008, LUZ e ALMEIDA, 2012, TONNESEN et al., 2010). Os teores de material fino e de argila em torrões e materiais friáveis são obtidos seguindo as normas técnicas ABNT NBR 16973/2021 e ABNT NBR 7218/2010.

A matéria orgânica pode ocorrer nos agregados graúdos, mas é mais comum em agregados miúdos. São oriundos da decomposição natural de vegetais, formando húmus, lodo orgânico, turfa, etc. Quando presente em quantidades significativas (> 300 ppm), o seu uso em argamassa ou concreto poderá causar uma desfiguração sem, no entanto, afetar a durabilidade (LUZ e ALMEIDA, 2012). O teor de material orgânico pode ser medido seguindo a norma ABNT NBR 9936/2022.

Os principais sais minerais e compostos prejudiciais ao concreto são os sais de cloretos, sulfatos e sulfetos. Cloretos, que podem tanto estar presente no agregado como provir da água que será usada no processo, não são danosos ao concreto comum, mas quando se trata de concreto armado, os cloretos reagem com a armadura do concreto, provocando oxidação do aço (FRAZÃO, 2002).

Sais de sulfatos e sulfetos podem gerar acidez com efeito deletério ao processo de endurecimento do cimento, que ocorre inicialmente a pHs acima de 12,5 (YOUSUF et al. 2020), além de causar a corrosão nas armaduras de aço dos concretos armados (FRAZÃO, 2002). Os ensaios de determinação dos teores de sais solúveis são descritos pela norma ABNT NBR 9917/2022.

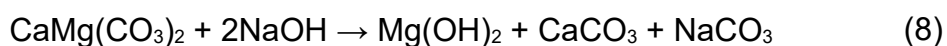
Outras reações químicas deletérias ao concreto são as reações álcali-agregado, que são reações químicas que ocorrem internamente na estrutura de um concreto, entre os hidróxidos alcalinos (provenientes do cimento, da água de amassamento, de aditivos químicos, de adições pozolânicas, entre outros.) e alguns tipos de minerais

presentes nos agregados. Como resultado da reação, são formados produtos que, na presença de umidade, são capazes de expandir, gerando fissurações, deslocamentos e podendo levar a um comprometimento das estruturas de concreto (NOGUEIRA, 2010). As reações álcali-agregado estão divididas em três classes conhecidas:

Reação álcali-sílica é a reação entre os álcalis da argamassa e os minerais de sílica quimicamente reativa: opala, calcedônia, cristobalita, tridimita, vidros naturais ou vulcânicos e vidros artificiais. Esta reação tende a formar um gel álcali-sílica hidrofílico expansivo nas interfaces entre o agregado e o concreto endurecido (NOGUEIRA, 2010, BONATO, 2015, ZAMBOTTO, 2014).

A reação álcali-silicato ocorre entre os álcalis do cimento e os silicatos existentes nos feldspatos, folhelhos argilosos, argilitos, siltitos, grauvaca, ardósias, filitos, quartzitos, xistos, granitos, gnaisses, granulitos e também em quartzo tensionado por processos tectônicos. Esta reação é de mesma natureza que a reação álcali-sílica, mas ocorre mais lentamente (BONATO, 2015, ZAMBOTTO, 2014, NOGUEIRA, 2010).

Já a reação álcali-carbonato ocorre de forma totalmente diferente das outras duas reações. Esta reação ocorre devido à expansão das rochas carbonáticas por conta da cristalização de brucita durante a reação química de desdolitização, descrita na reação (8) (ZAMBOTTO, 2014, NOGUEIRA, 2010, BONATO, 2015).



2.3.2.6. *Resistência e Durabilidade*

Um agregado, seja ele usado para concreto, lastro de ferrovia ou em pavimento de estrada ou de rua, estará sujeito a desgaste abrasivo e esmagador tanto no processo construtivo quanto em serviço e, portanto, a resistência à abrasão, descrita pela norma ABNT NBR 16974/2022, e ao esmagamento, descrito na norma DNER ME 197/1994, impactam diretamente na resistência do concreto resultante.

O agregado graúdo também deve ser resistente à ataques químicos, pois a perda de massa por solubilização pode causar perda na resistência do concreto. O método de ensaio DNER ME 089/1994 descreve como fazer a determinação da durabilidade do agregado.

2.3.3. Classificação dos Agregados

Diversas normas técnicas classificando agregados já foram emitidas por diferentes órgãos, possuindo diferentes especificações. Portanto foram analisadas duas normas de especificação de material, que serão listadas a seguir, e que avaliam alguns parâmetros anteriormente apresentados.

2.3.3.1. *NBR 7211/2022: Agregados para Concreto - Requisitos*

Esta Norma emitida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas especifica os requisitos para produção e recepção dos agregados miúdos e graúdos destinados à produção de concretos de cimento Portland, e é aplicada a agregados de origem natural lítica, já encontrados fragmentados ou resultantes da britagem de rochas, não se aplicando a agregados obtidos por processos industriais, como subprodutos, e a materiais reciclados, ou a mistura desses agregados, exceto agregados recuperados de concreto fresco por lavagem.

Segundo a norma, os agregados graúdos são os agregados cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm. Os agregados miúdos são os agregados cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm.

Para a classificação de agregados graúdos, a norma técnica também apresenta outros sete ensaios para avaliar a sua resistência, durabilidade e composição que serão listados a seguir. Um lote somente deve ser aceito quando cumprir todos os requisitos.

ABNT NBR 7809/2019 – Forma dos grãos: O índice de forma dos grãos do agregado não pode ser superior a 3.

ABNT NBR 16974/2022 – Resistência ao impacto e abrasão: A perda de massa por resistência ao impacto e à abrasão Los Angeles deve ser inferior a 50 %, em massa, do material.

ABNT NBR 7218/2010 – Materiais nocivos – Torrões de argila e materiais friáveis: A quantidade de torrões de argila e materiais friáveis não deve ser superior a 1,0% para concretos onde a aparência importa, 2,0% para concretos sujeitos a

desgaste superficial, e 3,0% para demais concretos.

ABNT NBR 9936/2022 – Materiais nocivos – Materiais leves: A quantidade de materiais leves não deve ser superior a 0,5% em massa para concretos onde a aparência importa, e 1,0% para demais concretos.

ABNT NBR 16973/2021 – Materiais nocivos – Material fino e pulverulento: A quantidade de material fino e pulverulento não deve ser superior a 1,0% em massa.

ABNT NBR 9917/2022 – Cloretos e sulfatos: A quantidade de cloretos no agregado deve ser inferior a 0,2% para concreto simples, 0,1% para concreto armado e 0,01% para concreto protendido. A quantidade de sulfatos de ser inferior a 0,1% em massa.

ABNT NBR 15577/2018 – Agregados – Reatividade álcali-agregado. Muitos dos limites desta norma dependem do uso do concreto.

ABNT NBR 17054/2022 - Granulometria: A norma exige que o material possua uma granulometria entre os limites descritos no intervalo granulométrico da tabela 2.

Tabela 2: Composição granulométrica para agregado graúdo segundo NBR 7211.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida e acumulada				
	Zona granulométrica d/D				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75 mm	-	-	-	-	0 - 5
63 mm	-	-	-	-	5 - 30
50 mm	-	-	-	0 - 5	75 - 100
37,5 mm	-	-	-	5 - 30	90 - 100
31,5 mm	-	-	0 - 5	75 - 100	95 - 100
25 mm	-	0 - 5	5 - 25	87 - 100	-
19 mm	-	2 - 15	65 - 95	95 - 100	-
12,5 mm	0 - 5	40 - 65	92 - 100	-	-
9,5 mm	2 - 15	80 - 100	95 - 100	-	-
6,3 mm	40 - 65	92 - 100	-	-	-
4,75 mm	80 - 100	95 - 100	-	-	-
2,36 mm	95 - 100	-	-	-	-

ABNT NBR 15577 – Agregados Reatividade álcali-agregado: Este conjunto de normas descreve ensaios e análise petrográfica para a previsão da reação álcali-agregado, com limites dependendo do uso do agregado.

2.3.3.2. *EM 037: Agregado Graúdo para Concreto de Cimento*

A especificação de material (EM) 037/97 feita pelo Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER), atualmente conhecido por Departamento Nacional de Infraestrutura do Transporte (DNIT), descreve os agregados graúdos como materiais granulares provenientes de rochas, comprovadamente inertes e de características semelhantes, cujos grãos passam na peneira da malha quadrada com abertura nominal de 152 mm e ficam retidos na peneira de 4,8 mm, tais como seixo rolado, cascalho e pedra britada. Esta especificação de material apresenta outros sete ensaios que devem ser feitos e satisfeitos, sendo quatro deles iguais aos da NBR 7211 apresentada anteriormente.

ABNT NBR 7218 Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Mesmos limites propostos NBR 7211.

DNER ME 266/1994 Agregados - Determinação do teor de materiais pulverulentos. Ensaio e resultados idênticos à ABNT NBR 16973.

ASTM C 123/2021 Teste padrão para partículas leves no agregado. Ensaio e resultados idênticos à ABNT NBR 9936.

DNER ME 035/1994 Agregados - Determinação da abrasão "Los Angeles". Ensaio e resultados idênticos à ABNT NBR 16974.

DNER ME 197/1994 Agregados – Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos. A resistência ao esmagamento deve ser de 65% para concretos sujeitos a desgaste superficial e de 55% para os demais concretos.

DNER ME 089/1994 Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou magnésio. O agregado não deve apresentar perda de massa superior a 12%.

DNER ME 083/1994 – Granulometria: A EM exige que o material possua uma granulometria entre os limites descritos no intervalo granulométrico a seguir.

Tabela 3: Composição granulométrica para agregado graúdo segundo EM 037.

	Graduação	0	1	2	3	4
Porcentagem retida acumulada, em peso, nas peneiras de abertura nominal, em mm	152	-	-	-	-	-
	76	-	-	-	-	0
	64	-	-	-	-	0 - 30
	50	-	-	-	0	75 - 100
	38	-	-	-	0 - 30	90 - 100
	32	-	-	0	75 - 100	95 - 100
	25	-	0	0 - 25	87 - 100	-
	19	-	0 - 10	75 - 100	95 - 100	-
	12,5	0	-	90 - 100	-	-
	9,5	0 - 10	80 - 100	95 - 100	-	-
	6,3	-	92 - 100	-	-	-
	4,8	80 - 100	95 - 100	-	-	-
2,4	95 - 100	-	-	-	-	

2.4. Exploração do Ouro

O ouro é um elemento químico com o símbolo Au e número atômico 79. É um metal brilhante, levemente amarelo-alaranjado, denso ($19,32 \text{ g/cm}^3$), macio, maleável e dúctil na sua forma pura. Quimicamente, o ouro é um metal de transição e um elemento do grupo 11 da tabela periódica, e de massa atômica 197 u. É um dos elementos químicos menos reativos e é sólido em condições padrão.

O ouro é um metal raro, que ocorre em baixas concentrações na crosta terrestre, na ordem de gramas de ouro por tonelada de rocha, e por isso é bastante valioso (US\$ 61,58/g em 25/08/2023). É bastante utilizado na joalheria pelo seu bonito brilho, na indústria eletroeletrônica por ser um ótimo condutor de eletricidade e inoxidável, como moeda de investimento e lastro monetário de bancos e nações. Na figura 13 são mostrados os principais usos do ouro e as quantidades consumidas no setor por ano.

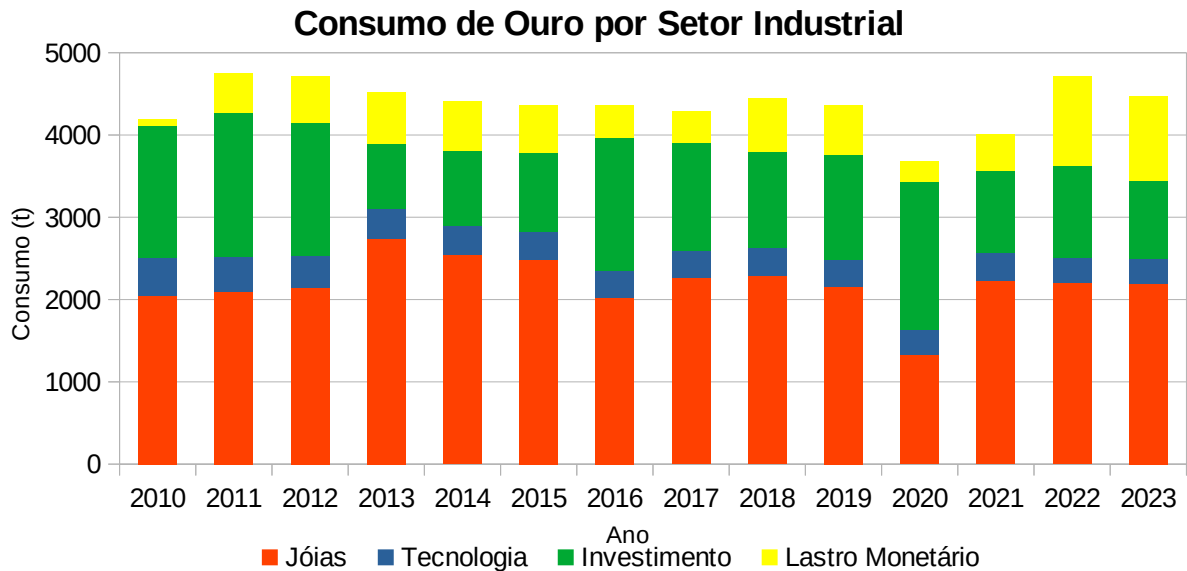


Figura 13: Consumo de ouro por setor industrial. Elaborado pelo autor. Dados em: gold.org.

Como grande parte da sua aplicação é feita em sua forma metálica elementar, o ouro pode ser facilmente reciclado (KASPER, 2017). Como mostrado na figura 14, uma grande fonte de ouro é a própria reciclagem do mesmo.

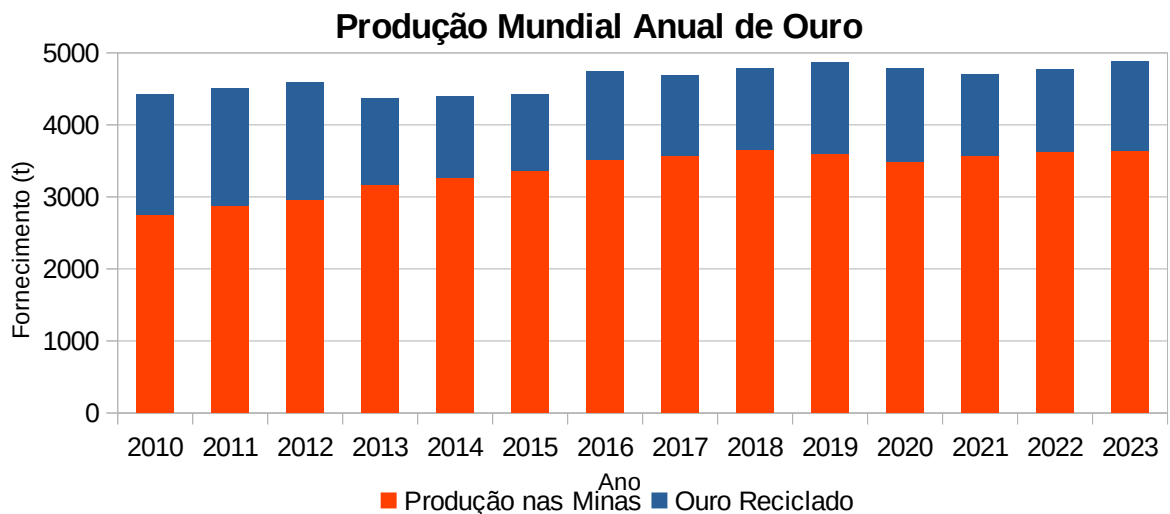


Figura 14: Produção mundial anual de ouro. Elaborado pelo autor. dados em: gold.org.

Os maiores produtores deste metal em 2023 foram a China (378,2 toneladas), a Rússia (321,8 toneladas) e a Austrália (293,8 toneladas). O Brasil foi o décimo quarto

país que mais produziu ouro, com 82,2 toneladas do metal em 2023. No mapa da figura 15 estão destacados todos os países produtores de ouro em 2022.

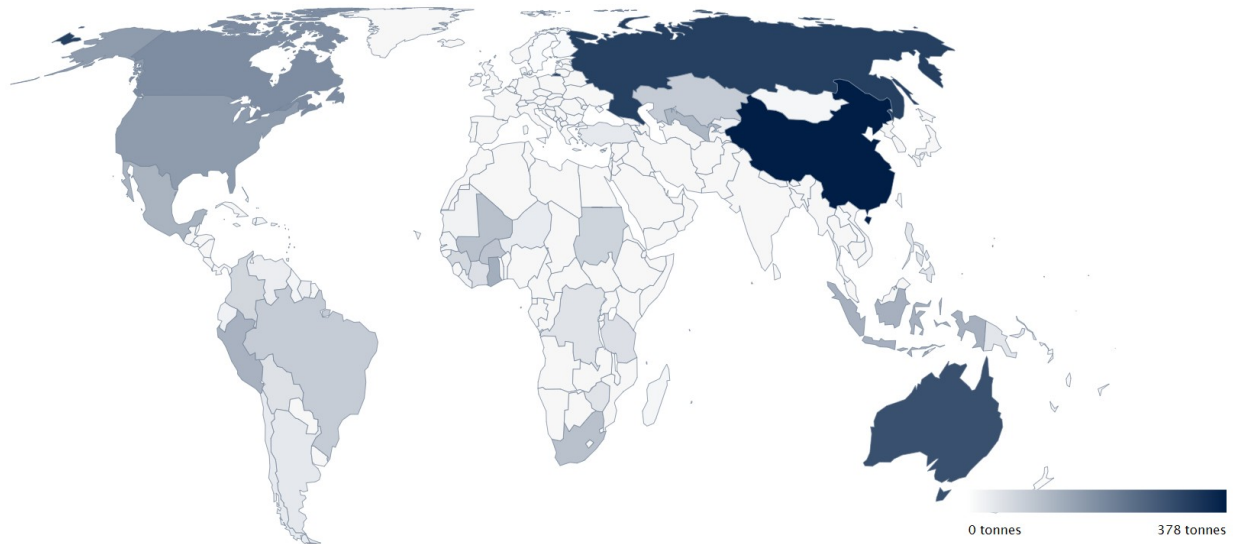


Figura 15: Países produtores de ouro em 2023. Fonte: gold.org

No Brasil, os estados que mais produziram ouro segundo a ANM em 2023 foram Minas Gerais, Mato Grosso e Pará, como é mostrado na tabela 4.

Quando ocorre em placers, que serão discutidos mais adiante, o ouro é facilmente extraído (ELS, 2005). Por conta da maioria dos placers onde ocorrem ouro, no Brasil, serem corpos de água doce, eles são considerados como Área de Proteção Permanente (APP) segundo a Lei N°12.651 de 2012 e não podem sofrer nenhuma supressão na vegetação e alteração da paisagem, portanto grandes empreendimentos de mineração não ocorrem neste tipo de depósito.

Mas isto não impede a exploração artesanal garimpeira, que muitas vezes é feita de forma ilegal nestas áreas (brasil.mapbiomas.org). Por conta desta ilegalidade, os dados de produção de ouro no Brasil estão subestimados, pois não existe o controle e monitoramento quando a extração é feita desta forma.

Tabela 4: Produção de ouro por estado. Alterado de Anuário Mineral Brasileiro 2022.

Estado	Ouro (kg)
Minas Gerais	32.847,55
Mato Grosso	15.822,92
Pará	12.833,75
Bahia	7.902,02
Maranhão	4.445,47
Goiás	3.772,77
Amapá	2.720,33
Rondônia	1.230,04
Paraná	306,32
Amazonas	184,15
Tocantins	100,75
Alagoas	26,61
Pernambuco	4,75
TOTAL	82.197,46

No universo o ouro e outros metais pesados são gerados em colisões de estrelas de nêutrons (PIAN, 2023), onde o ambiente severo gerado na colisão é capaz de fundir dois núcleos atômicos em um mais pesado. Por não ser formado na Terra, o ouro pode ter sido transportado por asteroides, colidindo-se com a Terra durante e após a sua formação.

Na crosta terrestre, o ouro pode ocorrer em diversos ambientes geológicos em baixas concentrações, podendo ocorrer em mineralizações distintas. Os minérios de ouro podem receber três classificações, os placers, os minérios liberados por moagem e os minérios refratários (AFENYA, 1991), que serão vistos a seguir.

Os placers são definidos por Els (2005) como depósitos minerais superficiais formados pela concentração mecânica de partículas minerais pelo intemperismo. O agente mecânico é na maioria das vezes aluvial, mas pode também ser marinho, eólico, lacustre ou glacial, e o mineral concentrado é algum mineral mais denso, como o ouro, cassiterita, óxidos de titânio e ferro, diamante, entre outros, que serão separados de minerais mais leves, como o quartzo ou argilominerais. Estes depósitos são fáceis de

serem explorados, uma vez que a rocha já está cominuída e o minério de interesse já foi concentrado naturalmente.

Os minérios liberados por moagem são os depósitos minerais em que o ouro presente neste depósito é liberado apenas pelo processo de moagem, como o nome indica, podendo ser facilmente recuperado no processo de cianetação. Estão entre estes depósitos os paleoplacers, os veios de ouro em quartzo e ouro em minérios oxidados (ZHOU et al. 2004).

Os paleoplacers são depósitos sedimentares onde o grande acúmulo de sedimentos leva a formação de rochas sedimentares, como conglomerados litificados contendo cascalhos e quartzo, podendo conter também os mesmos minerais mais densos que ocorrem nos placers, além de pirita.

Os veios de quartzo contendo ouro, como o nome implica, são cristalizações de óxido de silício podendo conter ouro em sua forma metálica. Como o óxido de silício é bastante inerte, ele não reage com o cianeto, então não há perdas de reagentes durante a cianetação. O ouro ocorre livre, e não dentro da estrutura cristalina do quartzo, diferente dos minérios refratários, o que facilita a extração do ouro no processo de cianetação.

Os minérios de ouro oxidados ocorrem pela alteração hidrotermal de minérios refratários, normalmente sulfetos metálicos, como será visto adiante, onde a oxidação destes sulfetos metálicos pela ação hidrotermal leva à quebra da estrutura da rocha, aumentando a permeabilidade, o que proporciona altas taxas de extração pela lixiviação com cianeto. O ouro ocorre liberado ou associado aos produtos da alteração dos sulfetos metálicos, sendo os mais comuns os óxidos de ferro.

Os minérios refratários são os minérios em que o ouro não é facilmente recuperável apenas pelo processo de cianetação, necessitando de tratamento e concentração prévia, como a flotação e oxidação de minerais presentes para a liberação do ouro. Consomem muito mais reagentes no processo pelo fato dos minerais de ganga interferirem na cianetação e reagirem com o cianeto. Nesta classificação estão os minérios ricos em prata, ouro em sulfetos e minérios carbonáceos (ZHOU et al., 2004).

Nos minérios de ouro ricos em prata, o ouro ocorre na forma de electrum, uma

liga metálica de ouro e prata que pode ocorrer naturalmente. A grande reatividade da prata no processo de cianetação consome o agente lixiviante do ouro, além de que a prata reage na presença de sulfetos, gerando uma camada de sulfeto de prata em volta do mineral, limitando o acesso da solução de cianeto ao ouro, o que torna o electrum um minério de ouro refratário.

Quando associados a sulfetos, o ouro ocorre dentro da matriz cristalina dos minerais, de forma disseminada e em grãos finíssimos. Os sulfetos metálicos que mais comumente portam ouro são a pirita, arsenopirita e calcopirita (BORBA, 2011, KOMNITSAS e POOLEY, 1989, ZHOU et al., 2004). A dificuldade de extrair o ouro está tanto na liberação do metal, que se torna difícil por possuir um tamanho microscópico como por estar envolto pelo sulfeto. Há um alto consumo de reagentes pelos minerais de ganga, que consomem não apenas o cianeto, mas também o oxigênio necessário para que a reação ocorra. Neste caso, são comuns pré-tratamentos oxidativos do minério, como a ustulação da pirita, que busca aumentar a porosidade dos constituintes minerais da ganga para expor o ouro ao cianeto.

Em algumas jazidas contendo ouro também pode haver a ocorrência de matéria orgânica, com carbono elementar e longas cadeias de hidrocarbonetos e ácidos orgânicos (AFENYA, 1991). A este tipo de minério de ouro com matéria carbonácea é dado o nome de minério carbonáceo. No processo de cianetação, o complexo de ouro formado pelo cianeto pode ser adsorvido pelo carvão presente.

2.5. Economia Circular

Economia circular é um novo modelo econômico que está sendo abordado por empresas para uma produção mais sustentável. Baseia-se em eliminar os descartes de resíduos, recircular produtos e materiais, reduzir a extração de recursos naturais e regenerar a natureza. Sustenta-se pela transição para energias e materiais renováveis e dissocia a atividade econômica do consumo de recursos finitos. Trata-se de um sistema resiliente e positivo para as empresas, para as pessoas e para o meio ambiente (Ellen MacArthur Foundation, 2011).

A economia circular tenta substituir o modelo de economia linear atualmente

utilizado, no qual ocorre a extração de recursos naturais que são modificados para a produção de bens com obsolescência programada que serão vendidos para consumo e então serem descartados assim que outro produto mais novo for lançado ou sua vida útil propositalmente reduzida for alcançada.

Para essa substituição, a economia circular tenta modificar várias etapas de todo o processo de produção de bens, visando estender a vida útil ao máximo não só do produto, com manutenção e reparos, mas também dos materiais que compõem o produto, com reutilização e refabricação programada em vez de obsolescência programada. Como último recurso, a substituição do descarte pela reciclagem, reduzindo assim a geração de resíduos e a necessidade de mais recursos naturais. Um diagrama de sistemas de economia circular é mostrado na figura 16.

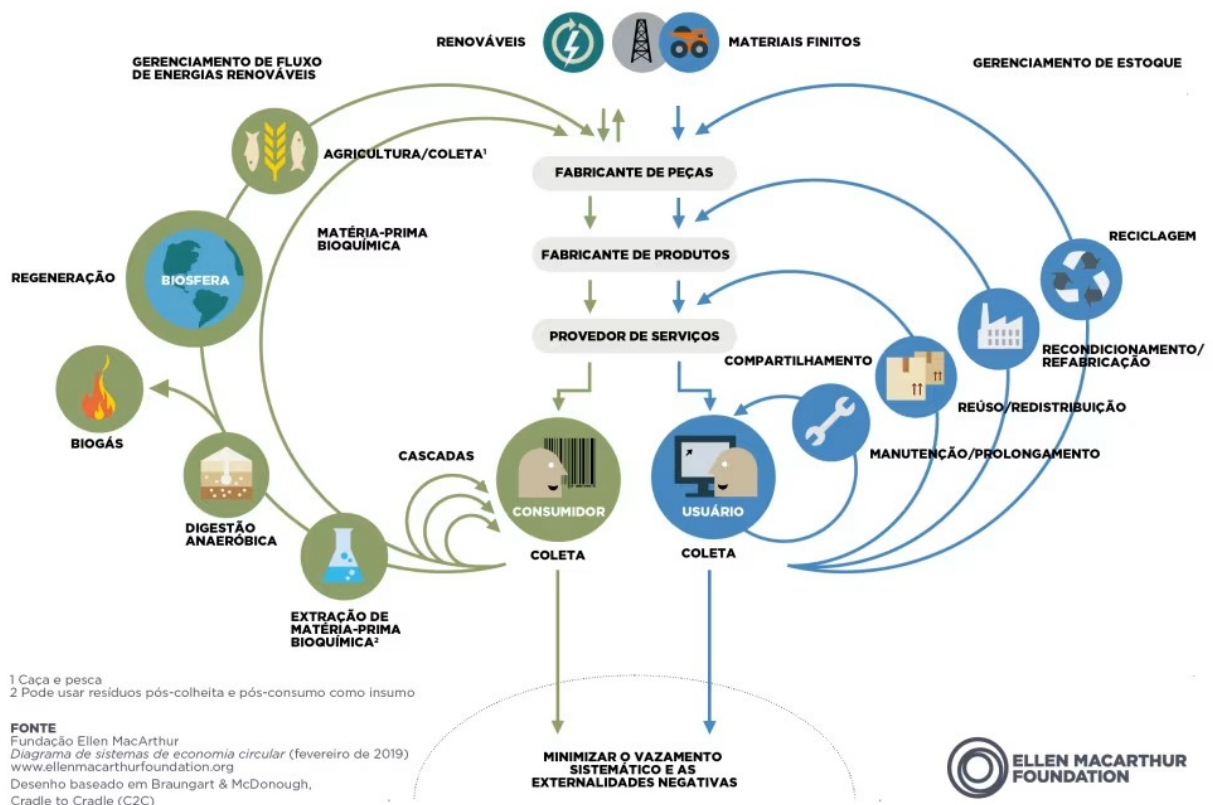


Figura 16: Diagrama de sistemas de economia circular. fonte: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org>

À primeira vista a mineração parece seguir em contramão ao modelo de

economia circular, já que este modelo visa reduzir a extração de bens naturais, e a mineração é a extração de bens naturais do subsolo, ainda mais que uma parte da mineração está voltada para a produção de estruturas permanentes e, portanto, uma parte da matéria-prima inicial sempre será necessária. Mas esta atividade econômica pode muito bem alavancar a transição energética brasileira com a extração de minerais estratégicos para uma malha energética mais limpa e renovável (MME, 2023).

A transição energética é a mudança gradual das matrizes energéticas não renováveis, como combustíveis fósseis à base de petróleo, para alternativas mais sustentáveis e renováveis que reduzam as emissões de gases de efeito estufa (MME, 2023). Para este objetivo, o governo federal organizou o Plano Nacional de Mineração 2050 (PNM50 de 2023), que busca grandes aumentos na exploração e aplicação de minerais estratégicos como nióbio, alumínio, cobre, lítio, terras raras, níquel, níquel, cobalto, grafita, vanádio, urânio e manganês para o desenvolvimento de uma matriz energética 100% renovável, substituindo a utilização de combustíveis fósseis como o petróleo e carvão mineral para a produção de energia.

E também como visto nos capítulos anteriores, a mineração gera uma quantidade imensa de resíduos, que podem ser reaproveitados como subprodutos caso o modelo de economia circular seja seguido.

2.6. Reaproveitamento de Resíduos da Mineração

Ao longo dos anos o assunto de reaproveitamento de resíduos da mineração vem sendo estudado, mas a exploração deste assunto só começou a se tornar prioridade na década de 2010.

Para investigar o crescimento do assunto de reaproveitamento dos resíduos da mineração como agregados foi feito um levantamento na plataforma de periódicos “scopus”, procurando por todas as publicações que possuíssem as palavras “mine” ou “mining”, “waste” ou “tailing”, e “aggregate”, tanto no título, quanto no resumo e nas palavras-chave. Um total de 1340 artigos contendo estas palavras foram publicados entre os anos de 1973 e 2023, e o gráfico a seguir mostra a evolução temporal deste tema.



Figura 17: Publicações na plataforma de periódicos Scopus contendo as palavras previamente mencionadas, ao longo do tempo.

O país com o maior número de publicações deste tema é a China, com 293 artigos publicados, quase o dobro do segundo colocado, Estados Unidos, com 149. A figura 18 mostra os 10 países com o maior número de publicações sobre o tema. Vale ressaltar a contribuição do Brasil, que possui 57 artigos publicados, sendo o sétimo país com mais publicações juntamente à Espanha.

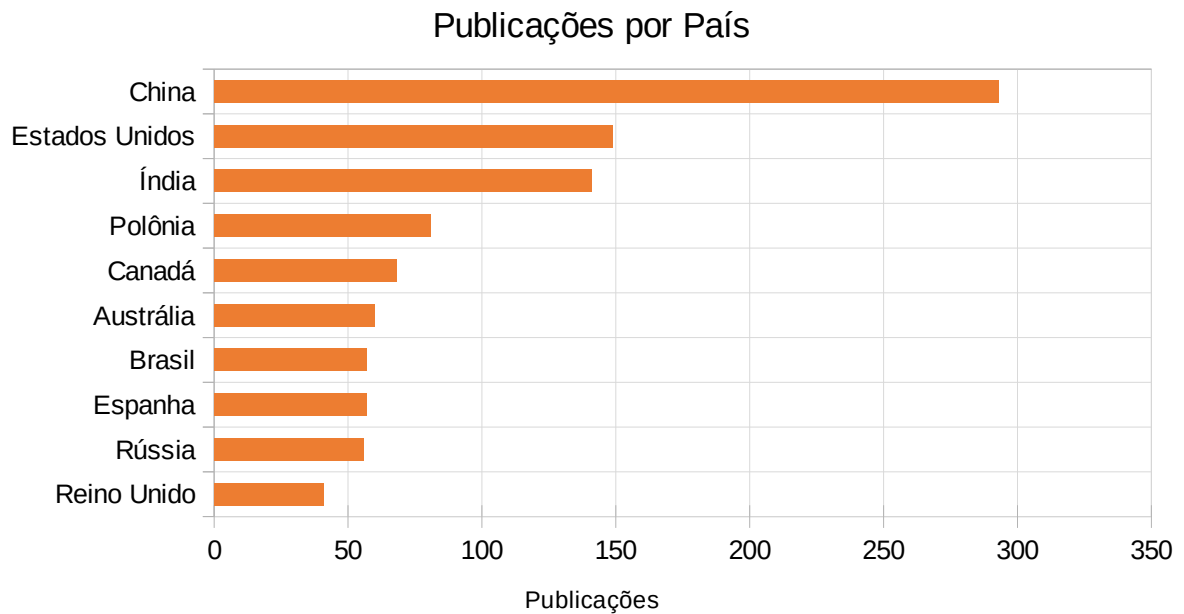


Figura 18: Países que mais publicaram sobre o tema.

Também foram procuradas todas as publicações na plataforma que possuíssem as mesmas palavras anteriormente citadas, mas apenas no título, e foi feita uma investigação destas publicações tentando buscar três informações: Qual é o minério que a mina produz (carvão, ferro, ouro, etc.), qual resíduo é utilizado no trabalho (estéril ou minério) e como o resíduo é aproveitado (agregado graúdo ou miúdo).

Foram encontrados um total de 56 trabalhos com as palavras anteriormente mencionadas no título, e a distribuição temporal destes trabalhos segue a mesma tendência da investigação anterior, com o assunto ganhando notoriedade após a virada do milênio, e ainda mais na década de 2010, como é mostrado na figura 19.



Figura 19: Publicações na plataforma de periódicos Scopus contendo as palavras previamente mencionadas, apenas no título, ao longo do tempo.

Em relação aos minérios produzidos pelas minas das publicações revisadas, as minas de carvão estão sendo as mais estudadas para a investigação da viabilidade de reaproveitamento do seu resíduo sólido, seja estéril ou rejeito, como agregado, seguido de minas de ferro e de ouro, como é mostrado no gráfico da figura 20.

Mais da metade de todas as publicações descreviam apenas sobre os rejeitos das minas, como é mostrada na figura 21, enquanto que apenas um terço dos trabalhos falavam exclusivamente do estéril, e ainda alguns estudaram o reaproveitamento de ambos estéril e rejeito.

A utilização do resíduo de mineração das publicações revisadas apresentaram um certo balanço entre o agregado graúdo e o agregado miúdo, mostrado na figura 22. Uma pequena fração dos trabalhos não utilizou o resíduo como agregado graúdo ou miúdo, mas sim como “agregado estabilizante”, e outro trabalho utilizou como agregado mas não informou qual o tipo de agregado. Um tema recorrente entre os trabalhos revisados foi a pelletização e calcinação de rejeitos da mineração para o reaproveitamento como agregado graúdo de baixa densidade (JU et al, 2017, CORROCHANO et al., 2009, SARATH e DAS, 2020, FRIBER et al., 2023,

ASADIZADEH et al, 2023, PEYS et al, 2022).

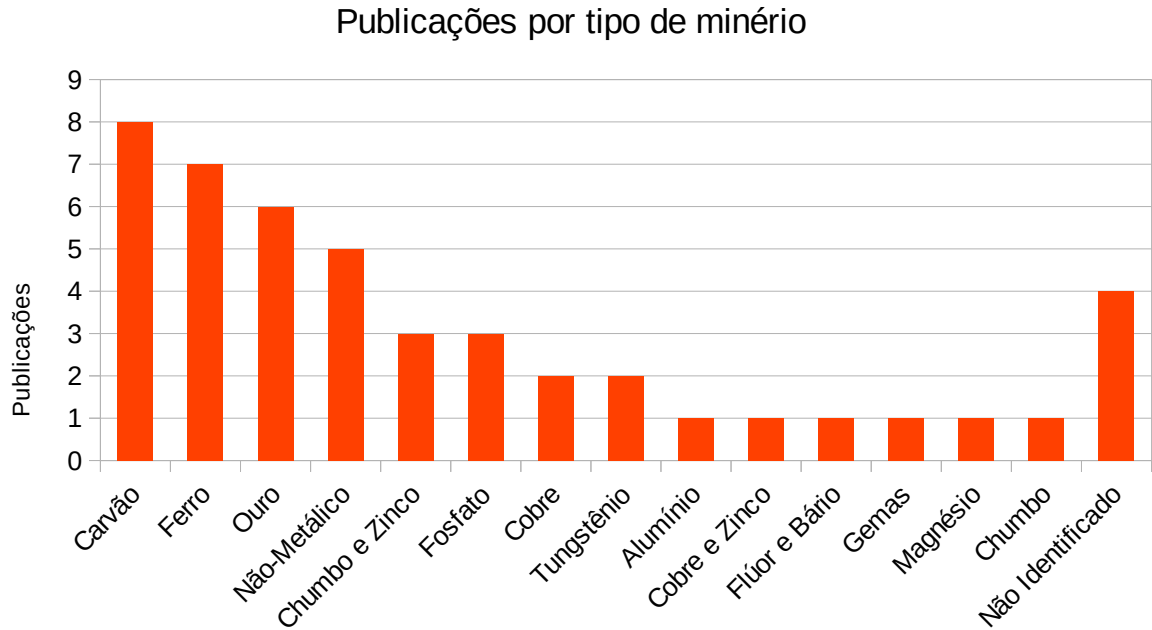


Figura 20: Publicações por tipo de minério.

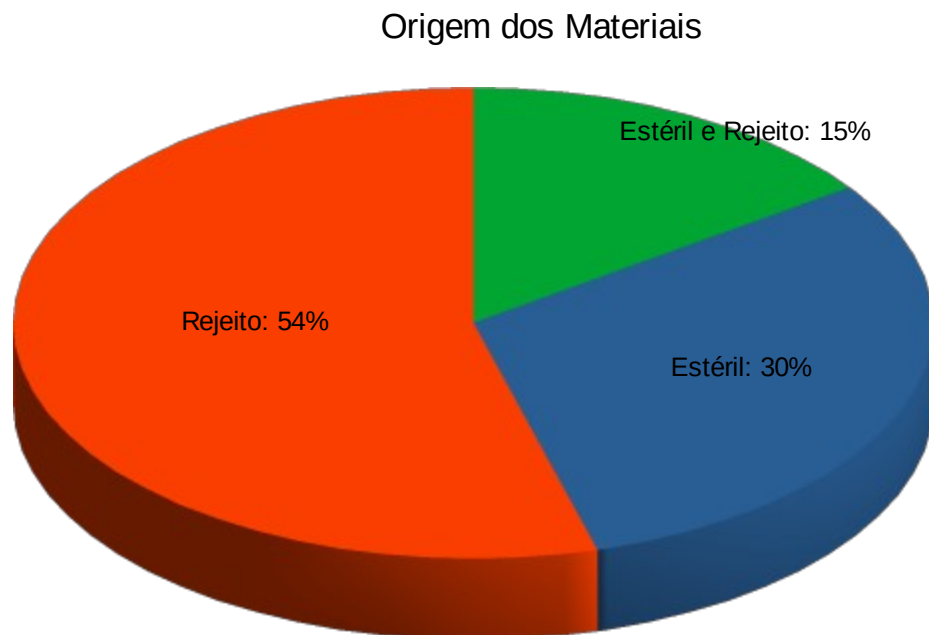


Figura 21: Origem dos materiais estudados.



Figura 22: Utilização dos Resíduos de Mineração

Dos 56 trabalhos, dois trabalhos eram revisões gerais sobre o tema e portanto foram excluídos da análise (MOHANTY et al. 2023 e GAYANA e CHANDAR, 2018). Outros dois se tratavam sobre mineração urbana, reaproveitando resíduos da construção e demolição (ZEGARDŁO, 2021 e LIU et al., 2020), portanto tinham os termos no título mas não se tratavam de fato sobre o resíduo da mineração e por isso também foram excluídos da análise. Também houve uma série de quatro trabalhos de mesmos autores, que abordavam o reaproveitamento do mesmo resíduo como agregado graúdo, mas em apenas um trabalho desta série era de fato estudado o reaproveitamento, tendo sido o único trabalho incluso na análise, com os outros três trabalhos se preocupando com classificações mineralógicas, químicas e lixiviação extrativa do material (CORROCHANO et al., 2009, 2011, 2011 (2) e 2013).

Destes trabalhos, apenas dois falavam sobre o reaproveitamento do estéril de mineração de ouro como agregado graúdo (ASAMOAH e AFRIFA, 2011 e HAMMOND, 1984).

Asamoah e Afrifa testaram as propriedades mecânicas de vigas de concreto reforçado fabricadas utilizando o estéril de uma mina subterrânea de ouro como o

agregado graúdo de graduação 2. As propriedades do material são mostradas na tabela 5.

Tabela 5: Propriedades físicas e mecânicas dos agregados testados por Asamoah e Afrifa.

Teste	Valor
Densidade (g/cm ³)	2,72
Índice de descamação (%)	28
Índice de alongamento (%)	25
Absorção de água (%)	1,80
Perda por esmagamento (%)	18,64
Perda por impacto (%)	9,80
Abrasão Los Angeles (%)	17,50

As vigas tiveram comportamento similar a vigas feitas com agregados convencionais de acordo com o Padrão Britânico 8110 (BS 8110-1 1997), com a resistência à flexão 15% maior do que o limite teórico, mas a resistência ao cisalhamento foi de 77% do limite teórico, e as rachaduras causadas pelo cisalhamento foram maiores do que as permitidas pelo BS 8110, indicando que as vigas poderão encontrar problemas de durabilidade com o tempo.

Hammond (1984) investigou a possibilidade de utilizar o rejeito e o estéril de diversas minas de ouro como agregado miúdo e graúdo para a pavimentação. O mineral mais abundante nestes resíduos foi o quartzo, ocorrendo em rochas e como areia, mas também foi identificado feldspato, hematita, ilmenita, magnetita, anfibólio, ankerita, sericita, mica e clorita, e também sulfetos como pirita e pirrotita, que Hammond comenta que podem ser prejudiciais para a estabilidade química por conta da geração de DAM. As propriedades físicas e mecânicas dos agregados estão listadas na tabela 6.

Tabela 6: Propriedades físicas e mecânicas dos agregados testados por Hammond

Teste	Dunkwa-on-Offin	Obuasi	Prestea	Tarkwa
Densidade (g/cm ³)	2,68	2,70	2,75	2,77
Índice de descamação (%)	-	28	18	22
Índice de alongamento (%)	-	39	21	25
Absorção de água (%)	0,47	0,25	0,36	0,40
Perda por esmagamento (%)	26	19	20	16
Perda por impacto (%)	26	16	23	18
Abrasão Los Angeles (%)	38	21	20	21,7

Segundo Hammond estes materiais podem ser usados em base, sub-base e cursos de superfície, mas o que mais impede o uso de resíduos da mineração para esta aplicação são os custos de transporte do material, pois as minas geralmente ocorrem em locais isolados.

3. EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão mostradas as origens dos materiais e os métodos de estudo abordados.

3.1. Materiais

As amostras utilizadas para fazer a caracterização ambiental e caracterização de material foram fornecidas pela empresa Jaguar Mining e fazem parte do estéril removido no desenvolvimento das galerias de uma futura mina de ouro subterrânea no estado de Minas Gerais. As coordenadas geográficas do empreendimento são: X 511805.33 e Y 7818136.42. Na figura 23 é mostrada uma seção ilustrativa de mina, com os corpos de minério em vermelho e as galerias de acesso em verde-claro.

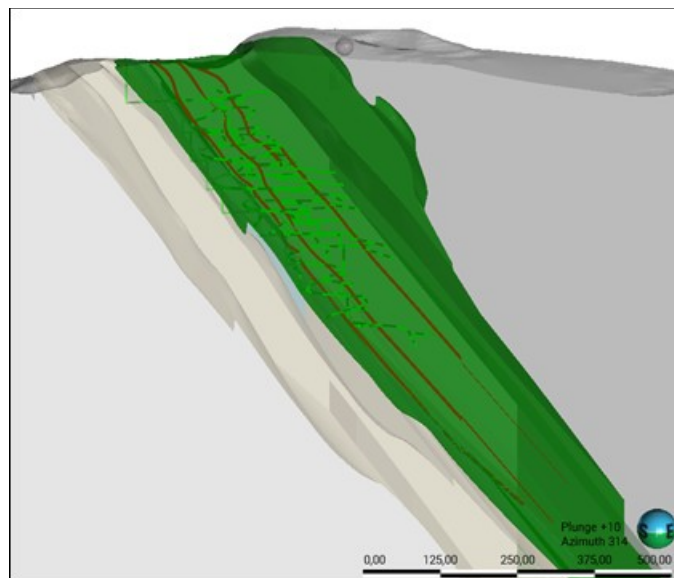


Figura 23: Seção ilustrativa da mina de Faina.

O desenvolvimento da mina de Faina está dentro do pacote lito estratigráfico denominado de rochas metamáficas, descritas como principalmente anfibolitos maciços ou foliados com ou sem feldspatos. Apresenta intercamações com meta-gabros, metabasaltos, xistos verdes e anfibolitos de quartzo.

A mina possui uma vida estimada de 10 anos e produzirá em média 290.000 mil

toneladas de ROM e 29.457 m³ de estéril por ano, totalizando aproximadamente 3 milhões de toneladas de minério de ouro e mais de 300.000 m³ de estéril.

As amostras empregadas nos estudos ambientais foram provenientes de furos de sondagem. Os furos que compuseram as amostras foram: FUH174, FUH177, FUH178, FUH181, FUH182, FUH186A, FUH187, FUH188, FUH190, FUH191, FUH193, FUH197, FUH202, FUH204, FUH205, FUH206, FUH208, FUH209, FUH210, FUH213, FUH214, FUH215 e FUH217. As amostras foram secas, devidamente cominuídas, quarteadas e submetidas a análises.

Para os estudos de produção de agregados foram recebidos seis sacos de aproximadamente 30 kg do material, mas um saco foi descartado por ter uma quantidade visivelmente maior de sulfetos. Assim, totalizou-se 150 kg de amostra. Na figura 24 está a foto do material.



Figura 24: Rocha estéril retirada no desenvolvimento da mina de Faina Subterrânea.

3.2. Métodos

Três conjuntos de testes foram realizados no material: caracterização petrográfica, mineralógica e química, caracterização ambiental e preparação e determinação das especificações de material como agregado graúdo para concreto.

Nos dois primeiros casos, cada método apresenta particularidades em relação a preparação das amostras para atender as normas. As etapas de britagem foram realizadas em um britador de mandíbulas e em um moinho de rolos. Quando necessário, o material foi pulverizado em um moinho de discos orbital para granulometria abaixo de 0,075 mm (200# Tyler).

Nos estudos com o material na forma de agregados, o material, na faixa de seixo/caulhau, foi britado em um britador de mandíbulas com a abertura em posição fechada (APF) de 25 mm. Foi necessária a rebitagem do material retido na peneira de 25 mm duas vezes. O material britado pode ser visto na figura 25. Na sequência a rocha foi quarteada seguindo o procedimento da NBR 10007 (ABNT, 2004d).



Figura 25: Amostra de esteril da mina de Faina.

Para atender as especificações de agregado graúdo para concreto, o material foi dividido nas seguintes frações granulométricas: 25 mm, 19 mm, 12,5 mm, 9,5 mm, 6,3 mm e 4,75 mm. Foram selecionadas quantidades suficientes de material em cada granulometria para formar uma brita de perfil granulométrico semelhante ao perfil da brita de graduação n° 2 (tabelas 2 e 3) e em seguida foram realizados os ensaios.

3.2.1. Caracterização Petrográfica, Mineralógica e Química

Os ensaios conduzidos nesta etapa foram:

Descrição Petrográfica

A descrição petrográfica foi feita nas escalas macroscópica e microscópica. Para a descrição macroscópica foram utilizados princípios básicos de observação a olho nu e lupas de aumento. Para a descrição microscópica, empregou-se a aparelhagem óptica específica. Para tal foi utilizado um microscópio petrográfico com lentes polarizadas paralelas e perpendiculares, platina móvel e aumento de 2,5X, 5X e 10X e um microscópio eletrônico de varredura para a identificação dos minerais opacos. A classificação da rocha baseou-se na Nomenclatura Sistemática para Rochas Metamórficas da União Internacional de Ciências Geológicas - IUGS (subcomissão de sistematização de rochas metamórficas - SSRM) levando-se em consideração os minerais presentes, a estrutura da rocha, a natureza do protólito e as condições genéticas de metamorfismo. Para fins de estimação das porcentagens dos minerais, a folha padrão para análise modal semiquantitativa por visada foi utilizada, e a granulometria dos minerais foi estabelecida conforme os padrões usuais de tamanho absoluto de grão. A amostra também foi classificada com base em sua composição, em relação ao seu tipo de metamorfismo e a origem do protólito (SCHMID et al, 2007, WINGE, 1996, BUCHER e GRAPES, 2011).

Composição Mineralógica por Difração de Raios-X

As amostras destinadas ao ensaio de difração de raios-X foram cominuídas em moinho orbital até um tamanho passante na malha de 75 μm . A análise foi realizada em um difratômetro de raios-X marca Siemens (BRUKER AXS), modelo D5000 equipado com tubo de ânodo fixo de Cu ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$), operando a 40 kV e 30 mA no feixe primário e monocromador curvado de grafite no feixe secundário. As amostras em pó foram analisadas no intervalo angular de 3 a 75° 2 θ em passo de 0,05°/1s utilizando-se fendas de divergência e anti-espalhamento de 1° e 0,6 mm no detector.

Composição Química por Fluorescência de Raios-X

As amostras destinadas ao ensaio de fluorescência de raios-X foram cominuídas em moinho orbital até um tamanho passante na malha de 75 μm . O ensaio foi realizado

fazendo uma amostragem semiquantitativa por varredura, identificando os elementos a partir do alumínio na tabela periódica, utilizando a técnica de espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES).

Análise Elementar

As amostras destinadas ao ensaio de composição elementar foram cominuídas em moinho orbital até um tamanho passante na malha de 75 µm. A abertura da amostra foi feita seguindo a digestão ácida de sedimentos, lodo e solos proposta pela Agência de Proteção do Meio Ambiente dos Estados Unidos, a EPA 3050 de 1996. A análise química foi realizada ICP-OES.

3.2.2. Caracterização Ambiental

A caracterização ambiental foi feita voltada para a identificação de resíduo e prevenção de drenagem ácida de minas. Empregou-se, em parte, a metodologia sugerida por Weiler et al. (2020) e Amaral Filho et al. (2017). Para isto, foram feitos ensaios de periculosidade, contabilização de ácidos e bases, geração líquida de acidez, medição do pH em pasta e ensaio de lixiviação em células úmidas. Também foi feita a lixiviação da amostra em função do pH, para saber se há lixiviação de metais em pH ácido ou básico.

Ensaio de Periculosidade

O ensaio de periculosidade foi feito seguindo a Norma Brasileira ABNT NBR 10004/2004 – Resíduos Sólidos – Classificação. Esta norma é utilizada para avaliar a periculosidade e classificar resíduos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e a saúde pública, e é fundamental para o correto gerenciamento, manejo e disposição de resíduos sólidos. A norma conta com uma análise química seguindo os métodos EPA SW 846, ensaios de corrosividade, reatividade, inflamabilidade, patogenicidade e toxicidade, ensaios de lixiviação conforme a NBR 10005 e ensaio de solubilização conforme a NBR 10006. Seguindo as diretrizes da NBR 10004 um resíduo

sólido pode receber as seguintes classificações:

- Resíduo Perigoso (Classe I)
- Resíduo Não-Perigoso (Classe II)
 - Não inerte (Classe II – A)
 - Inerte (Classe II – B)

Contabilização de Ácidos e Bases

As amostras destinadas ao ensaio de contabilização de ácidos e bases foram cominuídas em moinho orbital até um tamanho passante na malha de 75 μm e o ensaio foi feito seguindo a contabilização proposta por Sobek et al. em 1978. Para efeito de cálculo, considera-se que todo o enxofre presente no resíduo encontra-se na forma de pirita, sendo esta a única substância geradora de acidez. Calcula-se, a seguir o potencial de geração de acidez (AP), que é definido como a quantidade estequiométrica de carbonato de cálcio (CaCO_3) necessária para neutralização de todo o ácido produzido pela oxidação da pirita. Analogamente, a quantidade de substâncias neutralizadoras presentes no resíduo é contabilizada como massa equivalente de carbonato de cálcio e denominada potencial de neutralização (NP). A relação entre os valores é dada pela subtração do potencial de neutralização pelo potencial de acidez, é chamada de potencial líquido de neutralização (NNP) e é usada para a classificação do resíduo em potencialmente gerador ou não gerador de ácido segundo o critério:

- Não há potencial de geração de DAM: $\text{NNP} > 20 \text{ kg CaCO}_3/\text{t}$;
- Incerto: $-20 \text{ kg CaCO}_3/\text{ton} < \text{NNP} < 20 \text{ kg CaCO}_3/\text{t}$;
- Há potencial de geração de DAM: $\text{NNP} < -20 \text{ kg CaCO}_3/\text{t}$.

Geração Líquida de Acidez

As amostras destinadas ao ensaio de geração líquida de acidez foram cominuídas em moinho orbital até um tamanho passante na malha de 75 μm e o ensaio foi feito seguindo o teste proposto por Miller et al. (1997). O teste se baseia na adição de peróxido de hidrogênio à amostra, o que acelera a oxidação dos sulfetos presentes, e as reações de acidificação e neutralização ocorrem simultaneamente. O resultado

final é a geração líquida de acidez (NAG) expressa em quilogramas de ácido sulfúrico, e o pH da solução após a oxidação cessar (NAGpH). O ensaio classifica amostra conforme o critério abaixo:

- Não há potencial de geração de acidez: $\text{NAGpH} > 4,5$ e $\text{NAG (kg H}_2\text{SO}_4) = 0$;
- Baixo potencial de geração de acidez: $\text{NAGpH} < 4,5$ e $\text{NAG (kg H}_2\text{SO}_4) < 5$;
- Há potencial de geração de acidez: $\text{NAGpH} < 4,5$ e $\text{NAG (kg H}_2\text{SO}_4) > 5$;

pH em pasta

As amostras destinadas ao ensaio de pH foram cominuídas em moinho orbital até um tamanho passante na malha de 75 μm e o ensaio foi realizado misturando 5 gramas de amostra com 10 mL de água deionizada e medindo o pH.

Células Úmidas

O teste cinético de previsão de drenagem ácida de minas foi realizado seguindo o padrão proposto pela Associação Americana de Testes de Materiais (ASTM), o Método de Teste Padrão para Intemperismo Acelerado de Materiais Sólidos Utilizando uma Célula Úmida Modificada, em 1996, (ASTM D5744-96). O teste descreve um ensaio de previsão de geração de drenagem ácida de minas mais sofisticado, onde a amostra é exposta a agentes intemperizadores (água, ar seco e ar úmido) em células de intemperismo que tentam emular uma atmosfera durante vinte semanas, para promover a oxidação dos minerais presentes. O lixiviado, recolhido semanalmente das células, é utilizado para medir o pH, Eh, acidez, alcalinidade e a concentração de íons presentes. Esta análise do material em função do tempo permite uma melhor previsão do comportamento do resíduo que os ensaios anteriormente citados, pois o teste cinético das células úmidas tenta reproduzir as condições de campo às quais o resíduo está submetido. Os íons analisados foram alumínio, antimônio, arsênio, bário, berílio, bismuto, boro, cádmio, cálcio, chumbo, cobalto, cobre, cromo, enxofre, estanho, estrôncio, ferro, lítio, magnésio, manganês, molibdênio, níquel, potássio, prata, selênio, silício, sódio, sulfato, tálio, telúrio, titânio, urânio, vanádio, zinco e zircônio.

Lixiviação em Função do pH

As amostras destinadas ao ensaio de lixiviação em função do pH foram cominuídas em moinho orbital até um tamanho passante na malha de 75 µm. Este método é utilizado para avaliar o potencial de lixiviação de materiais sólidos em meio líquido sob diferentes condições de pH. Os resultados obtidos podem ser usados para avaliar opções de descarte, uso, eficácia de tratamento e remediação de determinado local. O ensaio seguiu a metodologia EPA 1313 (2010), que consiste em nove extrações paralelas, alterando-se o pH com auxílio de soluções diluídas de ácido nítrico (HNO₃) e hidróxido de potássio (KOH) em água de modo a produzir uma série de eluatos com valores de pH em uma faixa de 2 a 13. Adicionou-se 20 g de massa seca e 200 mL de extrator em tubos de agitação de 250 mL. As amostras foram colocadas sob agitação por 24 horas e, ao final do intervalo de contato, o pH e a condutividade foram medidos e as fases sólida/líquida separadas por filtração. O filtrado foi coletado e preservado (com HNO₃) para as análises químicas desejadas. Neste caso, foi realizada análise elementar para determinar a concentração de alumínio, antimônio, arsênio, bário, berílio, bismuto, boro, cádmio, cálcio, chumbo, cobalto, cobre, cromo, enxofre, estanho, estrôncio, ferro, lítio, magnésio, manganês, molibdênio, níquel, potássio, prata, selênio, silício, sódio, tálio, telúrio, titânio, urânio, vanádio, zinco e zircônio) via ICP.

3.2.3. Caracterização de Agregado Graúdo para Concreto

A caracterização para agregado graúdo de cimento foi feita seguindo as normas *ABNT NBR 7211/2022 – Agregados para Concreto – Requisitos* e *DNER EM 037/97 Agregado Graúdo para Concreto de Cimento*. Ambas ditam sete ensaios, bem como os resultados esperados, mas destes sete, cinco são equivalentes, reduzindo o número de ensaios para os nove mostrados na tabela 7.

A distribuição granulométrica foi feita logo após a britagem do material, e a partir desta distribuição foi selecionado um material de graduação dentro dos limites das normas para brita de graduação n°2, que foi utilizado no restante dos ensaios.

Tabela 7: Ensaios realizados.

Parâmetro	Ensaio Realizado
Distribuição Granulométrica	NBR 17054/2022
Teor de material fino	NBR 16973/2021
Teor de argila em torrões e materiais friáveis	NBR 7218/2010
Teor de partículas leves	NBR 9936/2022
Resistência a abrasão	ME 035/1998
Sais cloretos	NBR 9917/2022
Sais sulfatos	NBR 9917/2022
Índice de forma	NBR 7809/2019
Sanidade	ME 089/1994
Resistência ao esmagamento	ME 197/1997

Também foi feita a medida da densidade, aferindo a variação do volume de água na proveta submergindo uma massa conhecida do material em uma proveta. A densidade aparente foi medida lendo o volume que uma massa conhecida ocupa em um Béquer de 2L.

3.2.4. Análise Econômica

Foi feita uma análise econômica simplificada da utilização do estéril como agregado, considerando o reaproveitamento parcial e total do estéril como britas de diferentes graduações e agregado miúdo.

O material também foi testado como possível agromineral remineralizador, comparando os resultados da análise de composição química por FRX com os valores exigidos pela norma.

3.2.5. Análise dos Resultados

Os resultados foram organizados e analisados utilizando o programa Excel para a realização das tabelas e dos gráficos, e comparados com as respectivas normas.

4. RESULTADOS

Neste capítulo serão mostrados os resultados dos ensaios. Na sequência, os mesmos serão discutidos em termos ao atual estado da arte e enquadramento nos valores estabelecidos por leis e normas.

4.1. Caracterização Petrográfica, Mineralógica e Química

A rocha foi descrita como sendo de origem metamórfica com intercamadas originada de um arenito imaturo. Há uma alta quantidade de sílica, com matriz composta por argilominerais ricos em cálcio e magnésio, que sofreu metamorfismo de contato de baixo grau, visto pela textura da rocha e pela presença de actinolita e clorita.

Descrição Petrográfica

A rocha é descrita macroscopicamente como cinza a cinza-escuro, de textura inequigranular, com porfiroblastos de micas e anfibólios e matriz não-visível. Apresenta brilho reluzente, observada nos minerais máficos. A estrutura de lineação é incipiente e dada pelos minerais de hábito lamelar. Algumas das amostras apresentam manchas brancas de carbonatos, distribuídas irregularmente. Uma das amostras apresenta um mineral amarelo-latão a acastanhado que ocorre estirado na rocha, possivelmente um sulfeto, destacado na figura 26. Os porfiroblastos apresentam tamanhos inferiores a 1 mm.



Figura 26: Fragmentos de rocha empregados na análise macroscópica da amostra.

Na descrição microscópica, a amostra é dita como rocha inequigranular calcio-silicatada, com contatos irregulares que dividem a rocha em dois domínios: 1) zona granoblástica, com predominância de minerais quartzo-feldspáticos na matriz (figura 27) e 2) zona decussada (figura 28), com alternância de minerais máficos (biotita e hornblenda) e carbonatos, predominantemente calcita. A matriz compõe em torno de 35% a 40% da rocha em área de lâmina, onde ocorrem quartzo e feldspatos em textura granoblástica fina.

Em torno de 60% da área de lâmina restante é composto por hornblenda-verde, biotita, clorita, diopsídio e os minerais opacos pirita, calcopirita e arsenopirita. São observadas texturas em lâmina, como as já citadas granoblástica e decussada, além das texturas porfiroblásticas, em hornblenda-verde e clorita, e a textura fibro-radiada em calcita. A tabela 8 resume os minerais encontrados na análise petrográfica, junto a estimativa modal.

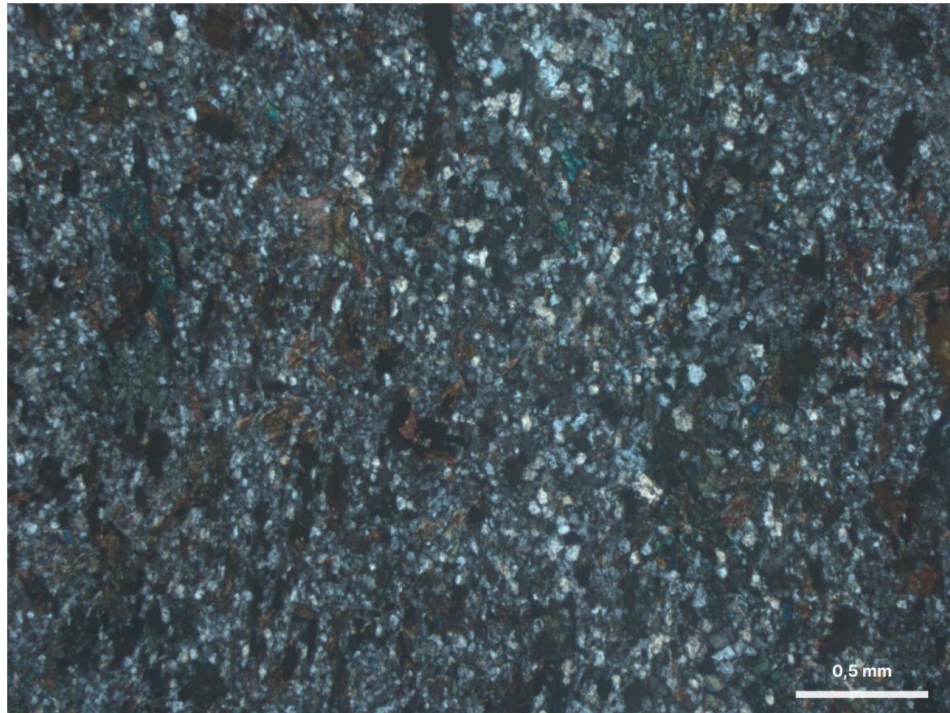


Figura 27: Matriz com textura granoblástica fina, composta por quartzo-feldspato. Aumento de 5X, polarizadores perpendiculares.

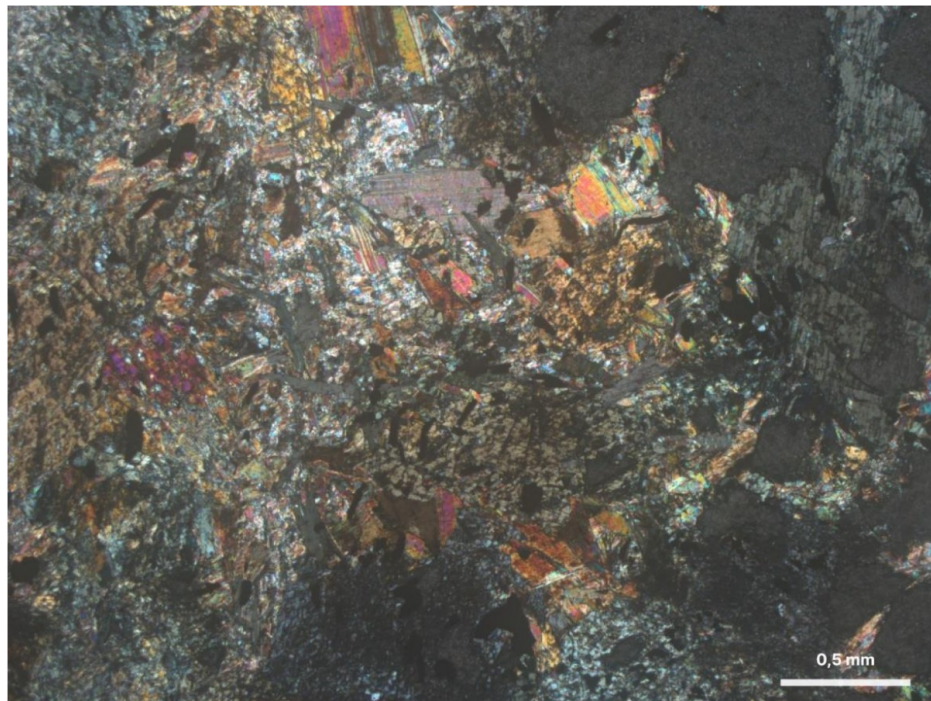


Figura 28: Textura decussada mostrando lamelas de biotita desorientadas em marrom-claro e minerais opacos isotrópicos em preto. Aumento de 5X, polarizadores perpendiculares.

Tabela 8: Estimativa modal de minerais da amostra segundo a descrição petrográfica.

Situação na Rocha	Mineralogia	Proporção Modal
Matriz (35%)	Quartzo e Feldspatos	100%
Porfiroblastos (65%)	Hornblenda-verde	40%
	Clorita	25%
	Calcita	15%
	Actinolita	10%
	Biotita	5%
	Minerais Opacos	3%
	Diopsídio	2%

Para a estimativa modal de rocha total é empregado o recálculo, incluindo minerais porfiroblastos e a matriz. A tabela 9 expõe a relação de minerais com sua proporção modal total na rocha:

Tabela 9: Estimativa mineral da amostra segundo a descrição petrográfica.

Mineral	Proporção Modal
Quartzo e Feldspato	35%
Hornblenda-verde	26%
Clorita	16,25%
Calcita	9,75%
Actinolita	6,5%
Biotita	3,25%
Minerais Opacos	2,95%
Diopsídio	1,3%

Em termos de composição, a rocha é classificada como cálcio-silicatada, mas em relação ao metamorfismo, a rocha é classificada como clorita-hornblenda-quartzo-feldspato hornfels, típica de casos em que os minerais não possuem orientação preferencial, apresentam textura fina e de cristais que podem ocorrer como poiquiloblásticos. Em relação a origem do protólito, o material é definido como sendo um meta-arenito vulcanogênico.

Composição Mineralógica por Difração de Raios-X

A análise mineralógica por Difração de Raios-X é apresentada na tabela 10 e na figura 29. Os minerais detectados foram anfibólio, quartzo, mica, plagioclásio e clorita, em ordem decrescente de concentração.

Tabela 10: Composição mineralógica quantitativa da amostra por Difração de Raios-X.

Mineral	Concentração (%)
Anfibólio	37,7
Quartzo	30,9
Mica	16,4
Plagioclásio	10,1
Clorita	4,9

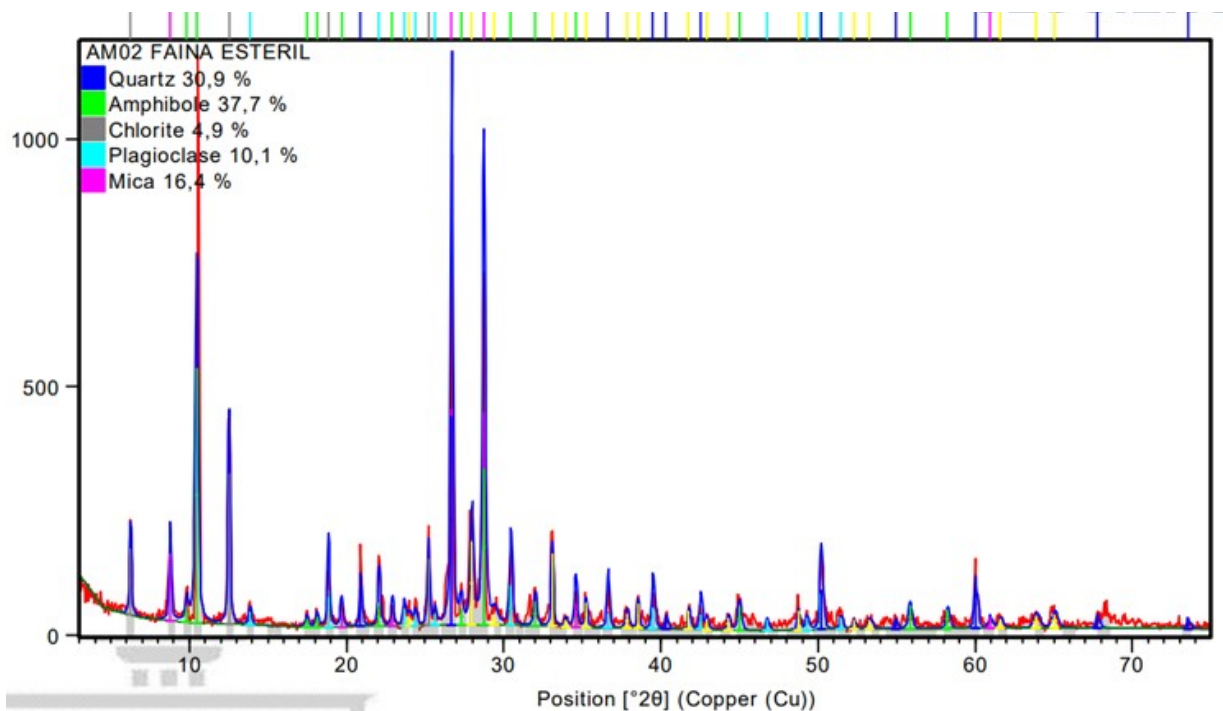


Figura 29: Difratoograma de Raios-X e fases cristalinas da amostra.

Composição Química por Fluorescência de Raios-X

Na tabela 11 estão os resultados da Fluorescência de Raios-X, mostrando os elementos medidos e a concentração. Como esta foi uma análise semiquantitativa e os

elementos são analisados a partir do alumínio na ordem de número atômico, os resultados de concentração apresentam baixa confiança.

Tabela 11: Composição elementar da amostra por Fluorescência de Raios-X.

Elemento	Massa (%)	Elemento	Massa (%)	Elemento	Massa (%)
Si	43	Mn	0,44	Zn	0,029
Ca	20	P	0,3	Zr	0,026
Fe	20	V	0,14	Sr	0,026
Al	9,8	Cr	0,098	Cu	0,021
Ti	2,4	As	0,068	Co	0,015
S	2,1	Cl	0,051	Rb	0,0047
K	1,8	Ni	0,038		

Análise Elementar

Na tabela 12 é mostrado o resultado da análise da composição metálica segundo EPA 3050 e os limites de investigação destes metais para solos industriais segundo a resolução CONAMA 420. Apenas o arsênio ficou acima do limite permitido.

Tabela 12: Composição Metálica da amostra segundo EPA 3050.

Metal	Resultado (mg/kg)	Limite (mg/kg)	Metal	Resultado (mg/kg)	Limite (mg/kg)	Metal	Resultado (mg/kg)	Limite (mg/kg)
Fe	61.260	-	Ni	119,9	130	Zr	5,6	-
Ca	37.520	-	Cr	115,9	400	Sb	1,7	25
Al	30.400	-	Cu	113,6	600	Te	< 50	-
Mg	21.860	-	Zn	111	2.000	Sn	< 5	-
S	6.462	-	Li	49,3	-	Ta	< 5	-
K	2.927	-	Co	49,1	90	Bi	< 5	-
Ti	2.300	-	Ba	43,1	750	B	< 5	-
Na	2.076	-	Sr	19,4	-	Mo	< 1	120
Mn	755,1	-	Pb	15,4	900	Se	< 1	-
As	335,7	150	Cd	12,1	20	U	< 1	150
Si	294,5	-	Ag	8,7	100	Be	< 0,4	-
V	155,7	1.000						

4.2. Caracterização Ambiental

Em geral os ensaios de caracterização ambiental mostraram que o estéril de Faina é um resíduo não perigoso sem potencial de geração ácida. O ensaio de lixiviação em função do pH demonstrou a lixiviação de alguns dos metais presentes.

Ensaio de Periculosidade

A análise da composição química do resíduo segundo a ABNT NBR 10004 pode ser vista na tabela 13. Os ensaios de corrosividade, reatividade, inflamabilidade, patogenicidade e toxicidade listados pela norma não indicaram nenhuma propriedade que conferisse periculosidade ao resíduo.

Tabela 13: Composição química da amostra segundo ABNT NBR 10004.

Parâmetros	Unidades	Resultados
pH (Mistura 1:1 em água)	-	9,7
Umidade	(%)	< 0,1
Matéria Orgânica	(%)	0,39
Cinzas	(%)	> 99,61
Extraíveis em Hexano (base seca)	(%)	0,3
Sulfeto (base seca)	(mg/kg)	Não Detectado
Cianeto (base seca)	(mg/kg)	Não Detectado
Cádmio (base seca)	(mg/kg)	Não Detectado
Cromo (base seca)	(mg/kg)	Não Detectado
Chumbo (base seca)	(mg/kg)	Não Detectado
Níquel (base seca)	(mg/kg)	8,1
Arsênio (base seca)	(mg/kg)	6,0
Alumínio (base seca)	(mg/kg)	7.931,5
Ferro (base seca)	(mg/kg)	2,8
Mercúrio (base seca)	(mg/kg)	Não Detectado
Manganês (base seca)	(mg/kg)	611,8

O resultado do ensaio de lixiviação conforme a NBR 10005, requerido pela NBR 10004, está mostrado na tabela 14. Nota-se que nenhum dos parâmetros excedeu o

limite máximo.

Tabela 14: Resultado do Ensaio de Lixiviação da amostra Conforme NBR 10005.

Parâmetros	Resultados (mg/L)	Limites Máximos (mg/L) (NBR 10004)
Arsênio	0,11	1,0
Bário	0,3	70,0
Cádmio	Não Detectado	0,5
Chumbo	Não Detectado	1,0
Cromo Total	Não Detectado	5,0
Mercúrio	Não Detectado	0,1
Fluoreto	Não Detectado	150,0
Prata	Não Detectado	5,0
Selênio	Não Detectado	1,0

A tabela 15 possui os resultados do ensaio de solubilização conforme a NBR 10006, também requerido pela NBR 10004. Nota-se que o manganês e o arsênio estiveram acima do limite máximo proposto pela NBR 10004.

Tabela 15: Ensaio de solubilização da amostra conforme NBR 10006.

Parâmetros	Resultados (mg/L)	Limites Máximos (mg/L) (NBR 10004)
Fenóis Totais	Não Detectado	0,001
Mercúrio	Não Detectado	0,001
Arsênio	0,29	0,01
Bário	Não Detectado	0,7
Cádmio	Não Detectado	0,005
Chumbo	Não Detectado	0,01
Cromo Total	Não Detectado	0,05
Alumínio	Não Detectado	0,2
Ferro	0,2	0,3
Manganês	1,0	0,1
Sódio	6,6	200,0
Zinco	Não Detectado	5,0
Cobre	Não Detectado	2,0
Prata	Não Detectado	0,05
Selênio	Não Detectado	0,01
Cianeto	Não Detectado	0,07
Fluoreto	Não Detectado	1,5
Nitrato	Não Detectado	10,0
Cloreto	Não Detectado	250,0
Sulfato	22,8	250,0
Surfactantes	Não Detectado	0,5

Assim, seguindo o protocolo de classificação de resíduos conforme a NBR 10004, a amostra foi identificada como Resíduo Não Perigoso Não Inerte – Classe II A, por conta da presença de arsênio e manganês solúveis acima do limite máximo permitido.

Contabilização de Ácidos e Bases

A contabilização de ácidos e bases está listada na tabela 16. O material

apresentou um certo potencial de geração de acidez, mas também apresentou um potencial de neutralização maior, o que confere o material como não potencial gerador de drenagem ácida.

Tabela 16: Contabilização de Ácidos e Bases.

Amostra	Análise de enxofre		ABA Tradicional				ABA Modificado			
	Enxofre Total	Enxofre Pirítico	AP	NP	NNP	Potencial de DAM	AP	NP	NNP	Potencial de DAM
	(%)	(%)	(kg CaCO ₃ /t)				(kg CaCO ₃ /t)			
Estéril	0,68	0,27	21,3	46,2	+25,0	Não há	8,4	41,2	+32,8	Não há

Geração Líquida de Acidez

Na geração líquida de acidez obteve-se um NAGpH de 6,8 e a geração líquida de acidez para o pH igual a 4,5 foi 0 kg H₂SO₄, o que classifica o estéril como não tendo um potencial de geração de DAM.

pH em pasta

O pH da amostra quando transformado em pasta foi de 9,3.

Células Úmidas

Durante as 20 semanas de lixiviação em células úmidas, o lixiviado não apresentou características de Drenagem Ácida de Minas. Abaixo estão os gráficos do pH e Eh do lixiviado em função do tempo (figura 30). Nota-se que na maioria das semanas o pH ficou entre 6 e 8, perto da neutralidade e dentro dos limites inferiores e superiores (5 e 9) estabelecidos pela resolução n°430 do CONAMA. O comportamento é oxidante, visto pelo potencial redox variar entre +150 e +300 mV. A análise dos gráficos de acidez e alcalinidade (figura 31) também demonstra um efluente perto da neutralidade, com a acidez não sendo superior a 10 mg_{CaCO3}/L. Os gráficos da concentração de íons em função do tempo são mostrados nas figuras 32, 33 e 34, bem como os limites de concentração estabelecidos pela resolução N° 430. Os íons que ficaram abaixo do limite de detecção em todas as semanas e, portanto, seus gráficos

foram omitidos são: arsênio (0,005 mg/L), bário (0,01 mg/L), berílio (0,004 mg/L), bismuto (0,05 mg/L), cádmio (0,001 mg/L), chumbo (0,01 mg/L), cobalto (0,005 mg/L), cobre (0,009 mg/L), cromo (0,01 mg/L), estanho (0,05 mg/L), estrôncio (0,001 mg/L), lítio (0,01 mg/L), molibdênio (0,01 mg/L), níquel (0,01 mg/L), prata (0,01 mg/L), Selênio (0,01 mg/L), tálio (0,05 mg/L), telúrio (0,5 mg/L), titânio (0,05 mg/L), urânio (0,01 mg/L), vanádio (0,01 mg/L) e zircônio (0,01 mg/L).

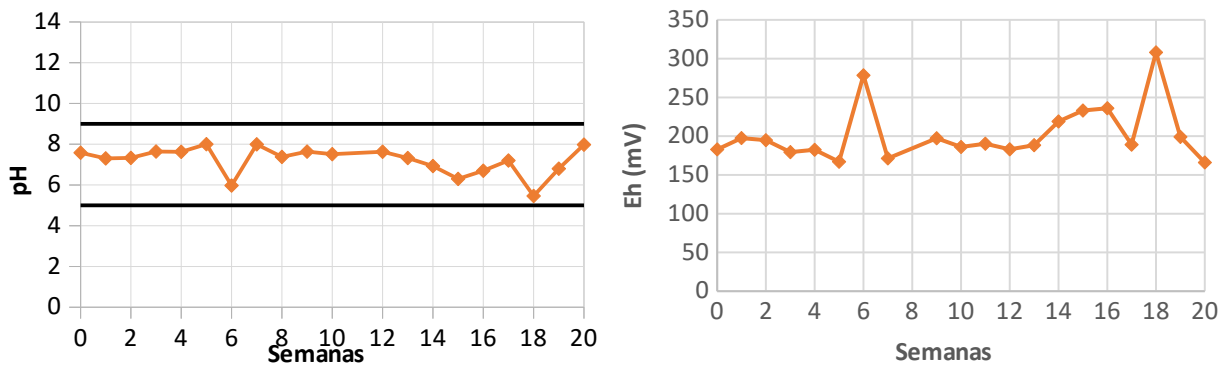


Figura 30: pH e Eh do lixiviado das células úmidas em função do tempo.

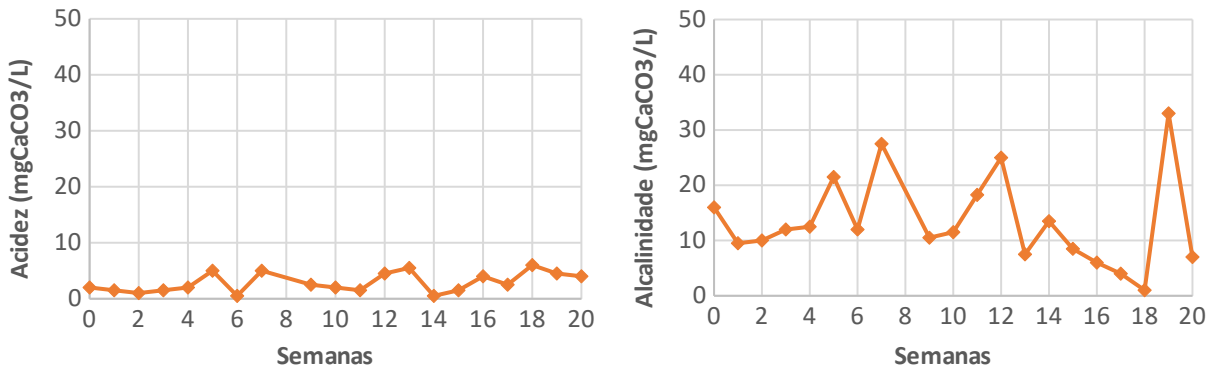


Figura 31: Acidez e alcalinidade do lixiviado das células úmidas em função do tempo.

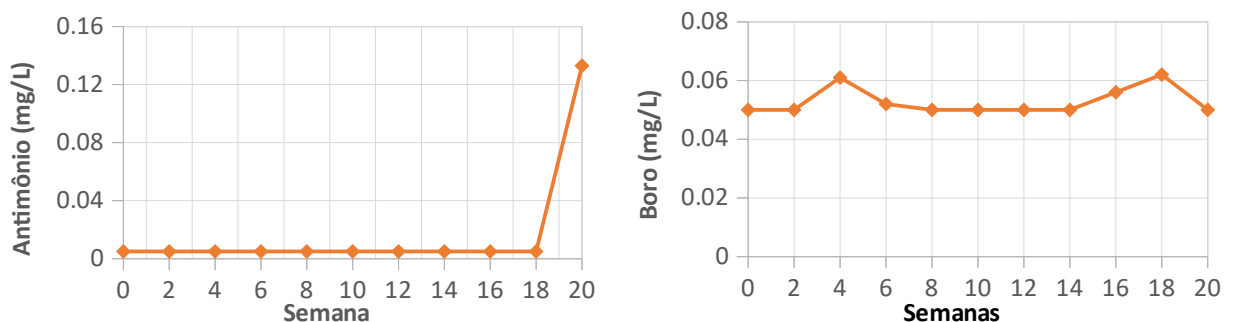


Figura 32: Concentração de íons do lixiviado das células úmidas em função do tempo.

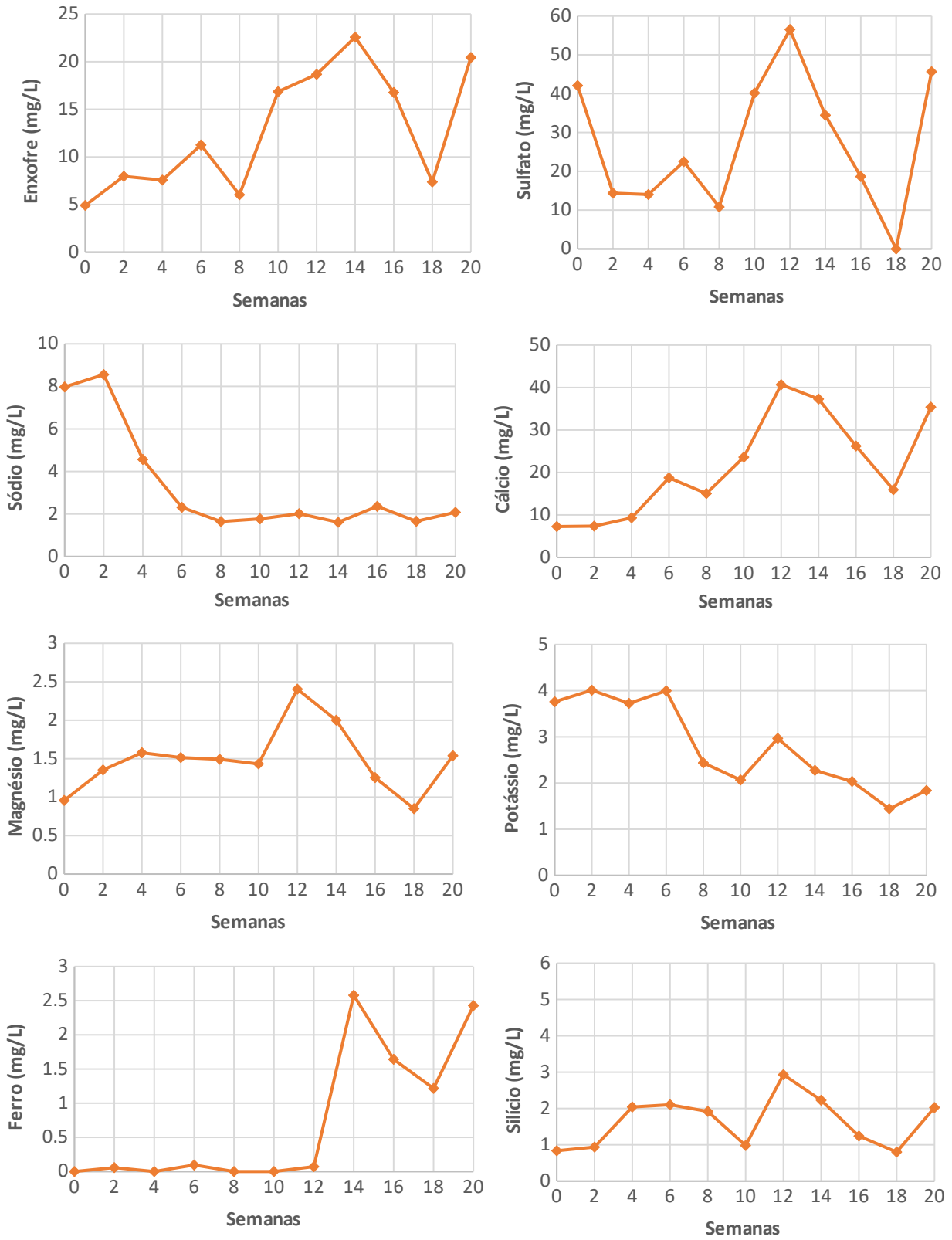


Figura 33: Concentração de íons do lixiviado das células úmidas em função do tempo (continuação).

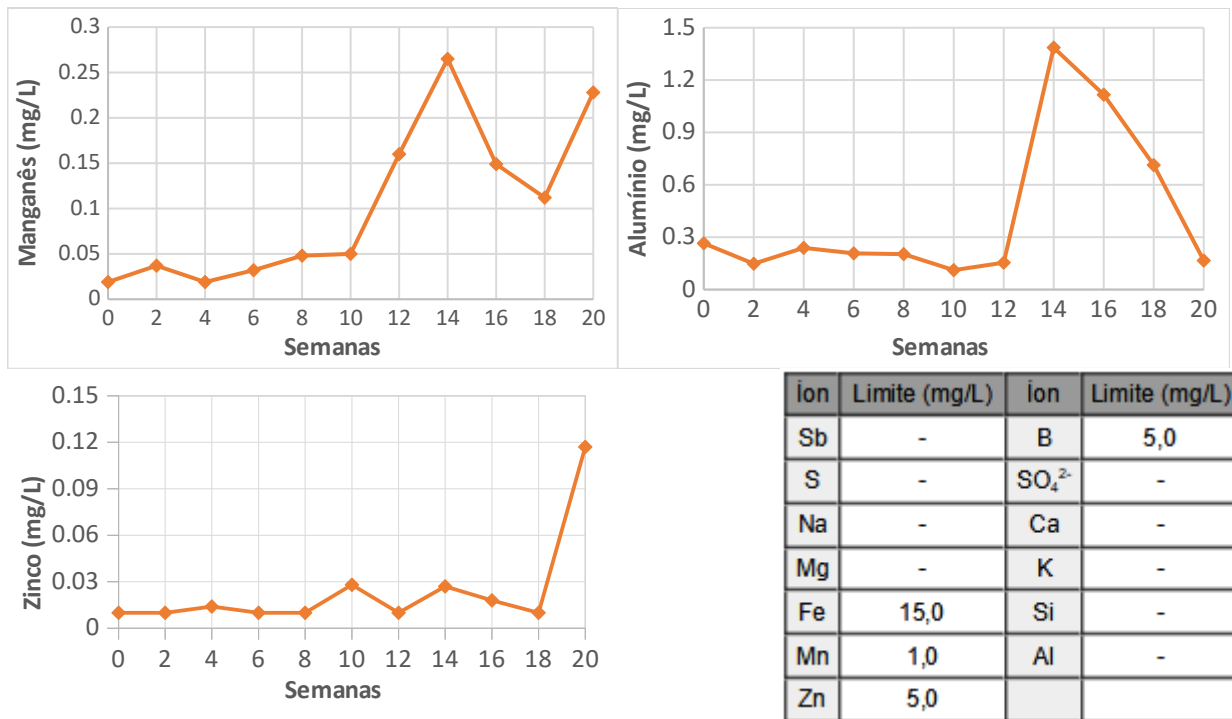


Figura 34: Concentração de íons do lixiviado das células úmidas em função do tempo (continuação) e limites permitidos pela resolução n° 430.

Lixiviação em Função do pH

Nas figuras 35 e 36 estão os gráficos da concentração de metais em função do pH conforme a EPA 1313. Os metais que ficaram abaixo do limite de detecção em todos os pHs e, portanto, seus gráficos foram omitidos foram: antimônio (0,005 mg/L), arsênio (0,005 mg/L), berílio (0,004 mg/L), bismuto (0,05 mg/L), boro (0,05 mg/L), cobalto (0,005 mg/L), estanho (0,05 mg/L), estrôncio (0,001 mg/L), lítio (0,001 mg/L), molibdênio (0,01 mg/L), prata (0,01 mg/L), selênio (0,01 mg/L), sulfato (10 mg/L) tálio (0,05 mg/L), telúrio (0,5 mg/L), titânio (0,05 mg/L), urânio (0,01 mg/L), vanádio (0,01 mg/L) e zircônio (0,01 mg/L).

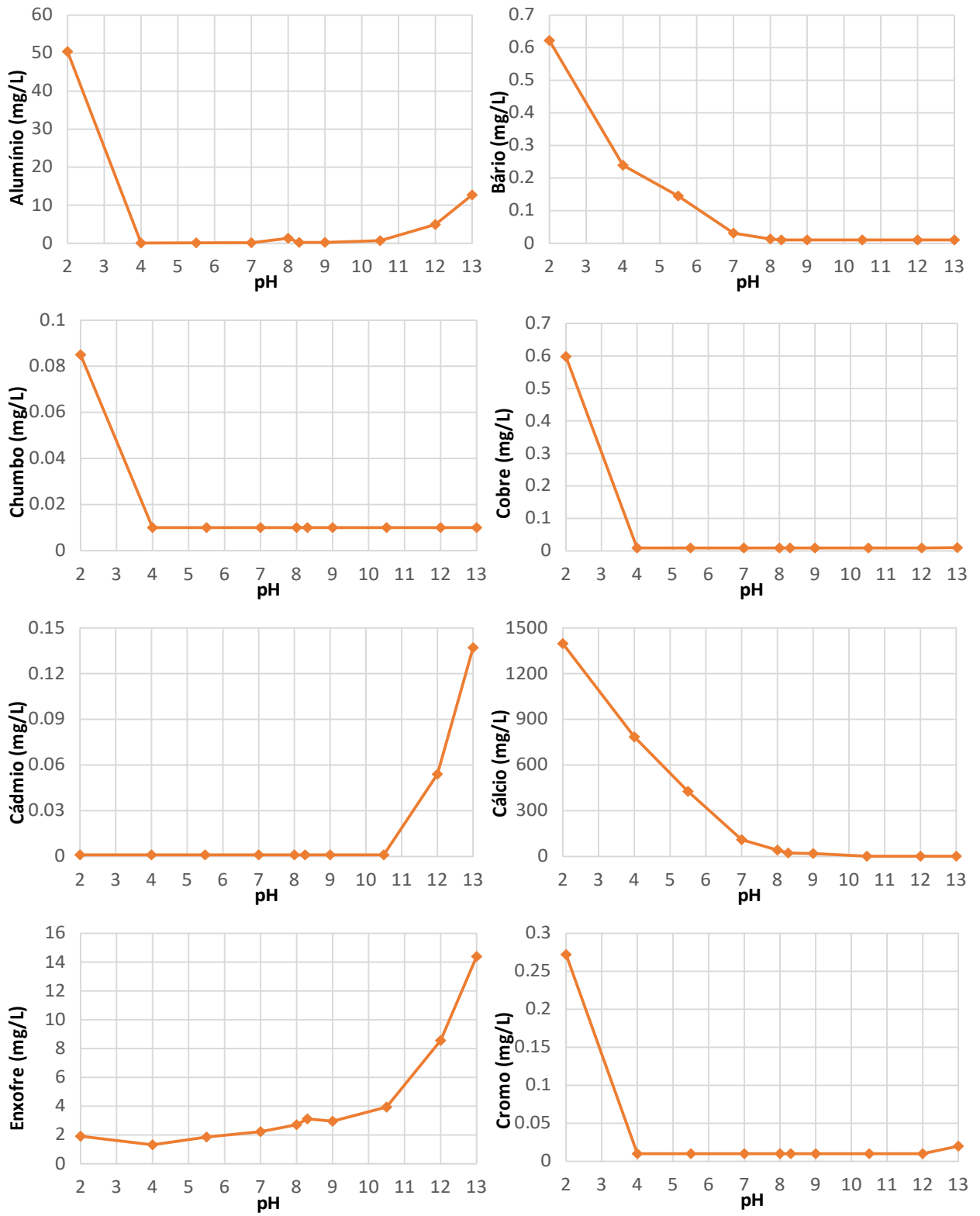


Figura 35: Lixiviação metálica da amostra em função do pH.

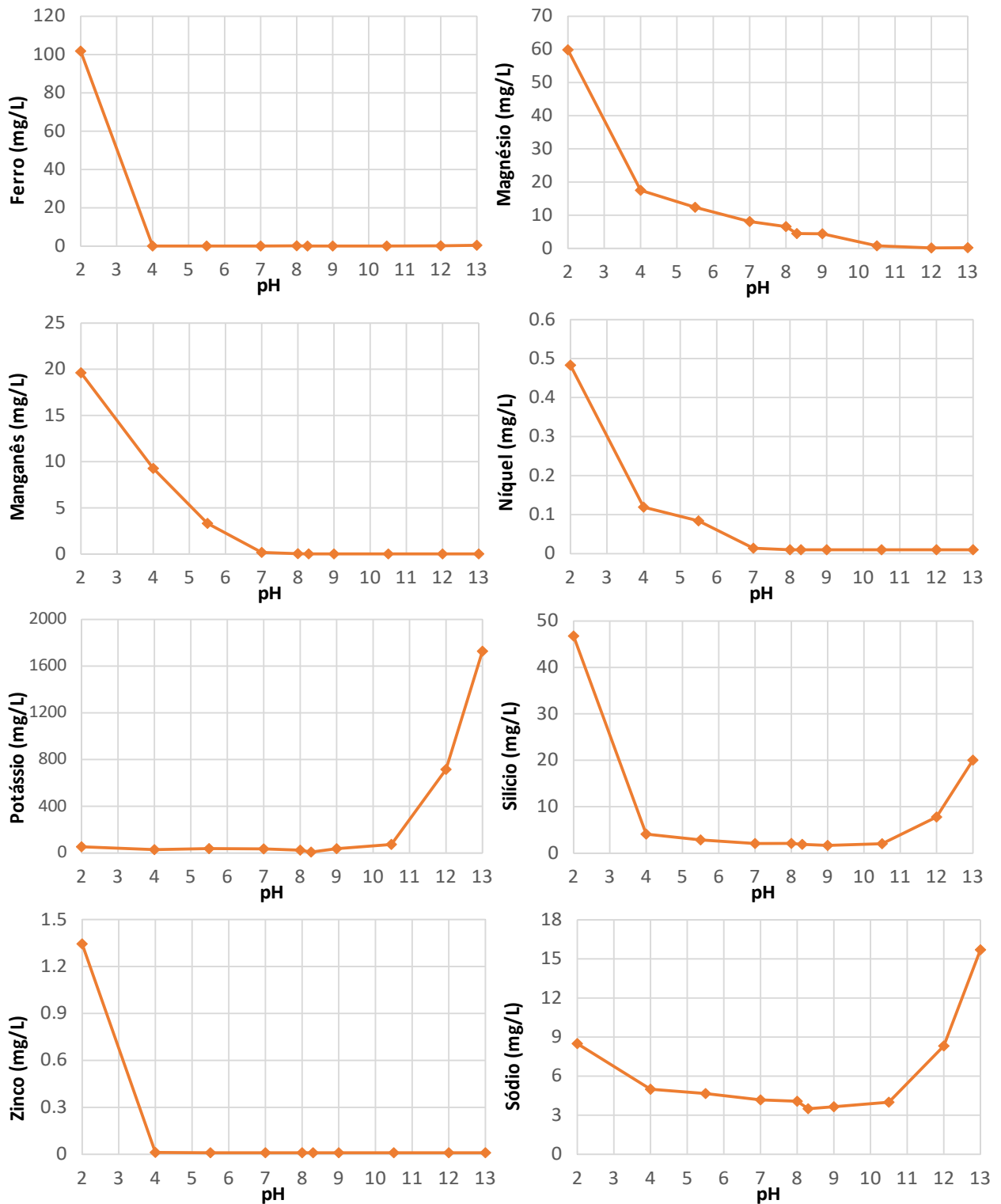


Figura 36: Lixiviação metálica da amostra em função do pH (continuação).

Com base nos ensaios realizados nas amostras cedidas pela empresa, o estéril

não apresenta potencial de lixiviação dos íons arsênio e o manganês, que foram os metais que demonstraram risco de solubilização.

4.3. Caracterização de Agregado Graúdo para Concreto

Os ensaios de caracterização como agregado graúdo em geral favoreceram o uso do estéril como brita para agregado graúdo para concreto, com apenas um índice impedindo o uso, que será discutido na próxima seção.

Distribuição Granulométrica

Nas tabelas 17 e 18 estão mostrados os resultados da distribuição granulométrica do estéril logo após a britagem e do agregado selecionado, respectivamente. O material foi composto até a granulometria de 4,8 mm, pois abaixo deste tamanho já é considerado como agregado miúdo. As curvas granulométricas de ambos os materiais são mostradas na figura 37.

Tabela 17: Distribuição Granulométrica da amostra após a britagem.

Abertura (mm)	Retido (%)	Retido Acumulado (%)	Módulo de finura
152	0	0	2,29
75	0	0	Dimensão Máxima Característica
63	0	0	31,5
50	0	0	Massa Total Inicial (g)
37,5	0	0	11842
31,5	0	0	Massa Total Final (g)
25	9,63	9,63	11840
19	45,05	54,67	
12,5	22,08	76,76	
9,5	6,50	83,26	
6,3	5,05	88,31	
4,8	2,74	91,05	
< 4,8	8,95	100	
TOTAL	100	-	

Tabela 18: Distribuição Granulométrica do agregado selecionado.

Abertura (mm)	Retido (%)	Retido Acumulado (%)	Módulo de finura
152	0	0	2,80
75	0	0	Dimensão Máxima Característica
63	0	0	31,5
50	0	0	Massa Total Inicial (g)
37,5	0	0	10000
31,5	0	0	Massa Total Final
25	5	5	10000
19	75	80	
12,5	15	95	
9,5	5	100	
6,3	0	100	
4,8	0	100	
< 4,8	0	100	
TOTAL	100	-	

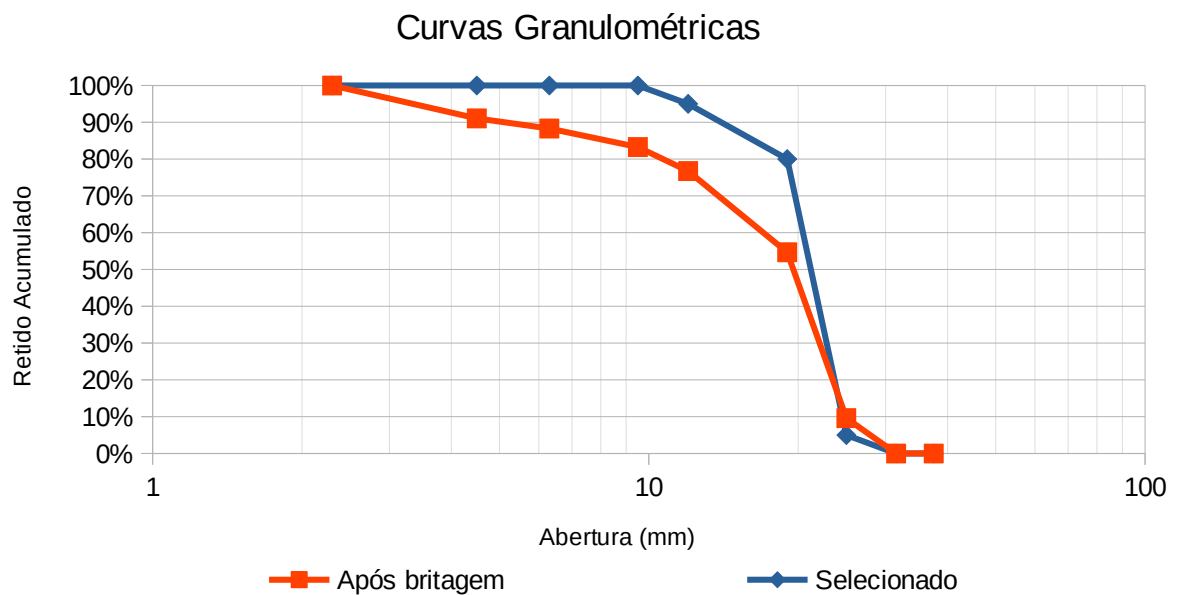


Figura 37: Curvas Granulométricas do material britado e do material selecionado.

Demais Ensaios

A tabela abaixo mostra o resultado dos demais ensaios de caracterização do estéril como agregado graúdo para concreto.

Tabela 19: Demais ensaios de caracterização como agregado graúdo para concreto.

Ensaio	Resultado
Teor de material fino	0,17%
Teor de argila em torrões e materiais friáveis	0,17%
Teor de partículas leves	0,00%
Resistência a abrasão	21,86%
Sais cloretos	0,01%
Sais sulfatos	0,001%
Índice de forma	3,38
Sanidade	1,19%
Resistência ao esmagamento	4,11 %
Densidade	2,9 g/cm ³
Densidade aparente	1,6 g/cm ³

5. DISCUSSÃO

As análises petrográficas, mineralógica por DRX e elementar por FRX mostram que a rocha é rica em anfibólio, feldspato e quartzo, minerais de média a alta dureza na escala de mohs (5 a 6, 6 a 6,5 e 7, respectivamente) (MOHS, 1812) e, portanto, torna a rocha resistente à abrasão, o que pode explicar a baixa perda de massa no ensaios de abrasão. Os dois ensaios de estimativa da composição mineralógica (DRX e descrição petrográfica) indicaram a presença dos mesmos minerais em proporções próximas. A análise por DRX conseguiu diferenciar o quartzo do feldspato (plagioclásio), algo que a descrição petrográfica não conseguiu. Ambas as análises também identificaram a presença de cloritas e micas (biotita). Os minerais opacos observados na descrição petrográfica são os sulfetos pirita, calcopirita e arsenopirita.

No ensaio de composição elementar apenas o arsênio ficou acima do limite de investigação para áreas industriais estabelecido pela Resolução CONAMA N° 420.

Dos ensaios que dizem respeito à geração de drenagem ácida de minas, nenhum ensaio acusou o estéril como potencialmente gerador de drenagem ácida de minas, mesmo a amostra contendo sulfetos. No ensaio de contabilização de ácidos e bases o potencial de neutralização foi maior do que o potencial de geração de acidez, o que resultou em um potencial de neutralização líquido de +25 kg CaCO₃/t no teste tradicional e +32,8 CaCO₃/t no teste modificado, conferindo o material como sem potencial de geração de DAM. O ensaio de geração líquida de acidez teve o mesmo resultado, com o NAGpH igual a 6,8, indicando que após as reações de oxidação o material não gera acidez, e com o NAG igual a zero o material é tido como sem potencial de geração de DAM. Nas células úmidas o pH esteve dentro do limite estabelecido pela resolução N° 430, e nenhum dos metais lixiviou acima dos limites estabelecidos por esta norma.

Nos ensaios feitos na NBR 10004, apenas o ensaio de solubilização com água apresentou arsênio, provavelmente por conta da arsenopirita presente, e manganês solúveis acima dos limites máximos estabelecidos pela norma, e o material não apresentou periculosidade.

O ensaio de lixiviação dos metais em função do pH é importante para saber se

há metais sendo lixiviados nos pHs mais elevados, já que o concreto, enquanto ainda não endurecido, tem um pH em torno de 12,5 (YOUSUF et al., 2020). Alumínio, cádmio, enxofre, potássio, silício e sódio foram os únicos metais que lixiviaram em pH alcalino, mas nenhum destes lixiviou concentrações acima do limite estabelecido na resolução N° 430. Arsênio e manganês, os metais que se solubilizaram a limites superiores aos permitidos pela NBR 10004 no ensaio de solubilização segundo a NBR 10006, não lixiviaram em pH elevado. Esta diferença de resultados pode ser explicada pelo meio de lixiviação e solubilização. Na EPA 1313 o material é lixiviado com diferentes pHs, enquanto que na NBR 10006 o material é solubilizado com água.

Nos ensaios de caracterização de agregado graúdo para concreto, o material apresentou pouquíssimo teor de material fino, torrões de argila, partículas leves e sais. Também apresentou-se como um material resistente, tendo baixa perda de massa nos ensaios de abrasão, sanidade e resistência ao esmagamento. Na tabela 20 é mostrado um comparativo dos resultados com as exigências de ambas as normas.

Tabela 20: Comparação dos resultados com as exigências.

Ensaio	Resultado	Limite NBR 7211	Limite EM 037
Teor de material fino	0,17%	1,00%	1,00%
Teor de argila em torrões e materiais friáveis	0,17%	1,00%	1,00%
Teor de partículas leves	0,00%	0,5%	0,5%
Resistência a abrasão	21,86%	50,00%	50,00%
Sais Cloretos	0,001%	0,01%	-
Sais Sulfatos	0,01%	0,1%	-
Índice de forma	3,38	3,00	-
Sanidade	1,19%	-	12%
Resistência ao esmagamento	4,11%	-	55%

Todos os valores estão dentro dos valores requeridos pela EM 037, portanto este material tem um alto potencial de ser utilizado como agregado graúdo para concreto conforme a especificação indica.

O único índice que ficou acima do limite estabelecido foi o índice de forma, que é

requerido apenas pela NBR 7211. Este índice de forma do agregado graúdo pode causar problemas na resistência do concreto (CHAVES et al., 2021, SILVA et al., 2021, SILVA e MELO, 2020).

Uma explicação para o índice de forma estar mais alto do que o limite pode ser o método de cominuição do agregado. Foi utilizado um britador de mandíbulas para a redução do tamanho dos grãos, o que tende a gerar grãos mais alongados se comparado a britadores de eixo vertical ou inclinados (CHAVES et al., 2021).

Outra explicação no índice de forma pode ser a origem da rocha. A rocha utilizada é uma rocha metamórfica com intercamadas, e estas intercamadas podem gerar planos de fraqueza na rocha onde o grão tende a se quebrar (SILVA e MELO, 2020).

Comparando com outros estudos, os materiais que Hammond testou em 1984 apresentaram maior ou similar perda por abrasão (entre 20% e 38%), e muito mais perda pelo esmagamento, já que a menor perda foi de 16%. O agregado que Asamoah e Afrifa testaram em 2011 apresentou uma maior resistência à abrasão, tendo perdido apenas 17,50% de massa, mas também apresentou uma menor resistência ao esmagamento, perdendo 18,64% da massa no ensaio. O material testado neste trabalho também aparenta ter uma maior densidade do que os materiais testados nos trabalhos de Hammond e Asamoah e Afrifa, mas isto também pode ser apenas a diferença no método de ensaio, pois em nenhum dos trabalhos foi dito como a densidade foi aferida, e também que a densidade medida neste trabalho foi a densidade na condição seca.

Em relação ao potencial de reação álcali-agregado, a análise petrográfica indicou a presença de quartzo microcristalino (figura 27), mineral potencialmente reativo (NBR 15577-3), mas mais testes que comprovem a ocorrência ou não ocorrência de reação álcali-agregado devem ser feitos.

Em relação à distribuição granulométrica, o agregado oriundo direto do britador não se enquadra ainda em nenhuma faixa granulométrica comercial. Mas o agregado pode ser selecionado para a graduação de brita 2 conforme a EM 037 e para a zona granulométrica 19/31,5 conforme a NBR 7211. Para utilizar a brita como agregado graúdo de graduação 2 com a faixa granulométrica selecionada, o fator limitante é a

quantidade de partículas retidas em 19 mm e, fazendo os cálculos em torno deste gargalo, seriam aproveitados em torno de 60% do agregado, como mostra na tabela 21.

Tabela 21: Aproveitamento do agregado como brita de graduação 2.

Abertura (mm)	Retido Selecionado (%)	Retido (%)	Utilização (%)	Retido Aproveitável (%)	Sobras (%)
31,5	0	0	0	0	0
25	5,00	9,63	31,20	3,00	6,62
19	75,00	45,05	100,00	45,05	0
12,5	15,00	22,08	40,80	9,01	13,07
9,5	5,00	6,50	46,18	3,00	3,50
6,3	0	5,05	0,00	0	5,05
4,8	0	2,74	0,00	0	2,74
< 4,8	0	8,95	0,00	0	8,95
TOTAL	100,00	100,00	-	60,07	39,93

Considerando que a mina de Faina gerará em torno de 29.457 m³ de estéril por ano, e que o m³ de brita de graduação 2 custa 100 reais por metro cúbico (preço de entrega por caminhão em Minas Gerais) (GASPAR, 2024), este material equivale a quase 1,8 milhão de reais por ano, quando considerado o aproveitamento de 60%.

A maioria das sobras são do material retido em 12,5 mm, sendo quase um terço de todas as sobras. Uma forma de reduzir estas sobras seria distribuir melhor o excedente da fração mássica do retido selecionado de 19 mm para as outras frações, demonstrado na tabela 22, o que aumentaria o aproveitamento para 72,90%, e ainda estaria na mesma faixa granulométrica de graduação 2 na EM 037. Nesta condição, o retorno econômico sobe para 2,1 milhões de reais por ano.

Tabela 22: Aproveitamento da melhor distribuição possível.

Abertura (mm)	Retido Selecionado (%)	Retido (%)	Utilização (%)	Retido Aproveitável (%)	Sobras (%)
31,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	13,20	9,63	100,00	9,63	0,00
19	61,80	45,05	100,00	45,05	0,00
12,5	25,00	22,08	82,53	18,22	3,86
9,5	0,00	6,50	0,00	0,00	6,50
6,3	0,00	5,05	0,00	0,00	5,05
4,8	0,00	2,74	0,00	0,00	2,74
< 4,8	0,00	8,95	0,00	0,00	8,95
TOTAL	100,00	100,00	-	72,90	27,10

Outra maneira de aproveitar este material mais fino pode ser compor com as outras frações mais finas, até 4,8 mm, novos agregados graúdos de graduação 0 e 1 segundo a EM 037 ou 4,75/12,5 e 9,5/25 segundo a NBR 7211.

O material abaixo de 4,8 mm também pode ser destinado à construção civil, como agregado miúdo, mas para isso, outra série de ensaios específicos para agregados miúdos deve ser feita. A própria NBR 7211 cita outros sete ensaios de caracterização para agregados miúdos, e a EM 038/97 do DNIT também lista outros oito ensaios de caracterização.

Se for considerado um aproveitamento total do material, sendo 18,15% de brita de graduação 1 (118,52 R\$/m³), 72,90% de brita de graduação 2 (100 R\$/m³) e 8,95% de agregado miúdo (190 R\$/m³ - AECWEB), tem-se um valor equivalente a mais de 3 milhões de reais por ano.

Outro destino para o material mais fino poderia ser a utilização deste material na agricultura como um remineralizador de solos, mas para isto deveria apresentar alguns valores mínimos e máximos descrito na Instrução Normativa n°5, de 10 de março de 2016, que estão apresentados na tabela 23.

Tabela 23: Valores Mínimos e Máximos da Instrução Normativa n° 5

Parâmetro	Concentração	Valor Mínimo (IN 5)	Valor Máximo (IN 5)
K ₂ O	1,8 %	1 %	-
K ₂ O + CaO + MgO	21,8 %*	9 %	-
As	335,7 mg/kg	-	15 mg/kg
Cd	12,1 mg/kg	-	10 mg/kg
Hg	0 mg/kg	-	0,1 mg/kg
Pb	15,4 mg/kg	-	200 mg/kg
SiO ₂	43 %	-	25 %
P ₂ O ₅	0,3 %	1 %	-
B	0 %	0,03 %	-
Cl	-	0,1 %	-
Co	0,00491 %	0,005 %	-
Cu	0,01136 %	0,05 %	-
Fe	6,12600 %	0,1 %	-
Mn	0,07551 %	0,1 %	-
Mo	0 %	0,005 %	-
Ni	0,01199 %	0,005 %	-
Se	0 %	0,03 %	-
Si	0,02945 %	0,05 %	-
Zn	0,01110 %	0,1 %	-

O material fino tem uma boa quantidade de macronutrientes, com o óxido de cálcio e a soma de bases acima do limite mínimo, com este último valor podendo ser ainda maior, pois a análise de Fluorescência de Raios-X não analisou a concentração de óxido de magnésio. Contudo, o material falha nas altas quantidades de metais tóxicos (arsênio e cádmio), na altíssima quantidade de material inerte (sílica livre), e nas baixíssimas concentrações de micronutrientes, sendo apenas ferro e níquel acima do limite mínimo estabelecido pela Instrução Normativa n° 5. A concentração de Cloro não é conhecida. Além destes parâmetros, a IN5 também exige uma comprovação de desempenho agrônômico feito por instituição oficial ou credenciada de pesquisa.

6. CONCLUSÕES

A atividade de exploração mineral é de extrema importância para o desenvolvimento da sociedade, mas a alta quantidade de resíduos por ela gerada pode causar sérios danos ambientais. Portanto, o aproveitamento deste resíduo como produto pode trazer benefícios tanto no ponto de vista ambiental quanto no ponto de vista econômico.

A caracterização química e mineralógica da amostra de estéril da mina de ouro de faina empregada neste estudo demonstrou que o material é majoritariamente composto por óxidos de silício (43%), cálcio (20%), ferro (20%) e alumínio (9.8%), presentes nos minerais anfibólio, quartzo, mica, plagioclásio e clorita, e contem pequenas quantidades de sulfetos. A análise metálica da amostra apresentou altas concentrações de alumínio, cálcio, ferro e magnésio, e os metais lixiviados em pH alcalino foram alumínio cádmio, enxofre, potássio, silício e sódio.

A caracterização ambiental da amostra de estéril da mina de ouro de Faina empregada neste estudo demonstrou que o material é um resíduo não perigoso (classe II-A), por não apresentar corrosividade, reatividade, inflamabilidade, patogenicidade e toxicidade, mas não é inerte, pois apresenta manganês e arsênio solúveis em água. O material não apresenta potencial de geração de drenagem ácida de minas como determinado pelos métodos de contabilizações de ácidos e bases, geração líquida de acidez, pH em pasta e ensaios cinéticos (ASTM D5744-96).

A caracterização da amostra de estéril da mina de ouro de Faina como agregado graúdo para concreto empregada neste estudo demonstrou que o material possui pouco teor de materiais nocivos, com apenas 0,17% de material fino e 0,17% de torrões de argila, 0,01% de sais de sulfato e 0,001% de sais de cloreto, não apresenta partículas leves, e possui uma boa resistência, tendo apenas 21,86% de massa perdida por abrasão, 4,11% de massa perdida pelo esmagamento e 1,19% de massa perdida por ataque químico, resultados estes que permitem o uso do material como agregado graúdo para concreto segundo a EM 037. Mas o material, quando britado em britador de mandíbulas, apresentou um índice de forma de 3,38, o que o impede de ser utilizado como agregado graúdo para concreto segundo a NBR 7211. Foi identificada a presença

de minerais passíveis de sofrer a reação álcali-agregado (quartzo microcristalino). O material também apresentou uma densidade na condição seca de $2,9 \text{ g/cm}^3$ e densidade aparente de $1,6 \text{ g/cm}^3$.

A amostra de estéril da mina de ouro de Faina tem um alto potencial de ser utilizado como agregado graúdo e, se for utilizado o método de britagem correto, o material apresentará um altíssimo potencial de ser utilizado como brita de graduação 2 segundo a EM 037 ou de graduação 19/31,5 segundo a NBR 7211, dependendo apenas de resultados de reação álcali-agregado.

Se o material for utilizado para esse fim, os retornos econômicos podem chegar a até R\$ 2,1 milhões por ano e, ao longo dos 10 anos de vida útil da mina, o valor total poderá chegar em até R\$ 21 milhões, e se todo o material for reaproveitado, o retorno econômico pode chegar em até R\$ 3 milhões por ano e 30 milhões ao longo dos 10 anos.

Considerando que todo o material iria para pilhas de bota-fora, o reaproveitamento do mesmo significa uma economia de 29.457 m^3 de estéril por ano, totalizando 294.570 m^3 nos 10 anos de mineração de Faina.

Há uma sobra de material nas granulometrias mais baixas, que poderá ser utilizado como brita de graduação 0 ou 1 segundo a EM 037, ou de graduação 4,75/12,5 ou 9,5/25 segundo a NBR 7211. O material mais fino abaixo de 4,75mm não pode ser utilizado como agromineral remineralizante, por causa da insuficiência de micronutrientes e alta presença de arsênio e cádmio.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Caracterização do estéril como brita de graduação 0 e 1 para concreto de cimento;
- Caracterização do material mais fino como agregado miúdo para concreto de cimento;
- Impacto da lixiviação metálica alcalina no concreto;
- Ensaios de reação álcali-agregado;
- Testes mecânicos para o concreto feito com este agregado

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 7211/2022 Agregado para concreto - Requisitos.** Disponível em: <https://abntcatalogo.com.br/>;
- ABNT NBR 16974/2022 Agregados - Ensaio de resistência ao impacto e à abrasão Los Angeles.** Disponível em: <https://abntcatalogo.com.br/>;
- ABNT NBR 9917/2022 Agregados para concreto – Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis..** Disponível em: <https://abntcatalogo.com.br/>;
- ABNT NBR 9936/2022 Agregados – Determinação do teor de partículas leves – Método de ensaio.** Disponível em: <https://abntcatalogo.com.br/>;
- ABNT NBR 7218/2010 Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis.** Disponível em: <https://abntcatalogo.com.br/>;
- ABNT NBR 16973/2021 Agregados – Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem.** Disponível em: <https://abntcatalogo.com.br/>;
- ABNT NBR 16917/2021 Agregado Graúdo: Determinação da densidade e da absorção de água.** Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/>;
- ABNT NBR 7809/2019 Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio.** Disponível em: <https://abntcatalogo.com.br/>;
- ABNT NBR 17054/2022 Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio.** Disponível em: <https://abntcatalogo.com.br/>;
- ABNT NBR 10006/2004 Procedimento para a obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.** Disponível em: <https://www.abntcolegao.com.br/colegao.aspx>;
- ABNT NBR 10005/2004 Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos.** Disponível em: <https://www.abntcolegao.com.br/colegao.aspx>;
- ABNT NBR 13028/2017 Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água - Requisitos.** Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/>;
- ABNT NBR 13029/2017 Mineração - Elaboração de projeto de disposição de estéril em pilha.** Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/>;
- AFENYA, P. M. **Treatment of carbonaceous refractory gold ores.** Lae, 1991.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687591900827>;

NRM 18/2001 - Beneficiamento. Disponível em: http://pdf.datalegis.inf.br/files/7uk3b87mvobe3ka67c0d99f8lg_1693614865.pdf;

ASADIZADEH, M. et al. **The effect of class F fly ash on the geopolymerization and compressive strength of lightweight aggregates made from alkali-activated mine tailings.** Golden, 2023. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061823019918?via%3Dihub>;

ASAMOAHA, M. A., AFRIFA, R. O. **Investigation on the flexural behaviour of reinforced concrete beams using phyllite aggregates from mining waste.** Kumasi, 2011. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306911003943>;

ASTM C 123/2012 - Standard test method for lightweight particles in aggregate.

Disponível em: https://www.astm.org/c0123_c0123m-14.html;

ASTM D5744-96 - Standard Test Method for Accelerated Weathering of Solid Materials Using a Modified Humidity Cell. Disponível em:

<https://www.astm.org/d5744-96.html>;

BONATO, L. C. **Reação Álcali-Agregado, principais causas e estudo de reatividade potencial.** Campo Mourão, 2015. Disponível em:

https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6288/3/CM_COECI_2014_2_07.pdf;

BORBA, M. L. **Os depósitos de Cu-Au-Mo do tipo pórfiro de Bajo de la Alumbrera e Água Rica, Argentina: Considerações genéticas sobre formação e fonte de minério.** Porto Alegre, 2011. Disponível em:

<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/32669/000786628.pdf?sequence=1&isAllowed=y>;

BORMA, L. S.; SOARES, P. S. M. **Drenagem ácida e gestão de resíduos sólidos de mineração.** Rio de Janeiro, 2002. Disponível em:

<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1232/1/extracao-ouro%20cap.10.pdf>;

BRANCO, P. M. **Dicionário de Mineralogia e Gemologia. 2ª edição.** São Paulo, 2014. Disponível em:

https://cursosextensao.usp.br/pluginfile.php/141621/mod_resource/content/1/Dicionario-Mineralogia-Gemologia-2ed-DEG.pdf;

BS 8110-1 1997: Structural use of concrete. Disponível em: <https://crcrecruits.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/04/bs8110-1-1997-structural-use-of-concrete-design-construction.pdf>;

BUCHER, K.; GRAPES, R. **Petrogenesis of Metamorphic Rocks.** Berlin, 2011. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-74169-5>;

CAPANEMA, L. X. L., CIMINELLI, V. S. T. **An Investigation of Acid Rock Drainage (ARD) Occurrence in a Gold Mine Located in a Southeastern Brazil Region.** Belo Horizonte, 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rem/a/CFpZRVxPGLZkpsRWzK6rdmr/?format=pdf&lang=en>;

CHAVES, J. W. R. et al.. **A Importância do processo de britagem na forma dos agregados utilizados em tratamentos superficiais.** Fortaleza, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/355720632_A_importancia_do_processo_de_britagem_na_forma_dos_agregados_utilizados_em_tratamentos_superficiais;

CIMINELLI, V. S. T. **Hidrometalurgia.** Belo Horizonte, 2007. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br:8080/bitstream/cetem/1288/1/TendênciasParte2.4.pdf>;

CONAMA - Resolução N° 430. Disponível em: https://www.suape.pe.gov.br/images/publicacoes/CONAMA_n.430.2011.pdf;

CONAMA - Resolução N° 420. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2017/09/resolucao-conama-420-2009-gerenciamento-de-ac.s.pdf>;

CÓRDOBA et al. **Leaching of chalcopyrite with ferric ion. Part I: General aspects.** Bucaramanga, 2008. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304386X08001308?fr=RR-2&ref=pdf_download&rr=7fdc7abf89fa5893;

CORROCHANO, B. G. **Heavy metal chemical fractionation and immobilization in lightweight aggregates produced from mining and industrial waste.** Toledo, 2011. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03326251>;

CORROCHANO, B. G. et al. **Sequential Extraction for Evaluating the Behaviour of Selected Chemical Elements in Light weight Aggregates Manufactured From Mining and Industrial Wastes.** Toledo, 2013. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/286147691_Sequential_Extraction_for_Evaluating_the_Behaviour_of_Selected_Chemical_Elements_in_Light_weight_Aggregates_Manufactured_From_Mining_and_Industrial_Wastes;

CORROCHANO, B. G. et al. **Microstructure and mineralogy of lightweight aggregates manufactured from mining and industrial wastes**. Toledo, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061811000997>;

CORROCHANO, B. G. et al. **Production of lightweight aggregates from mining and industrial wastes**. Toledo, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030147970900098X?via%3Dihub>;

COUTINHO, N. A. F. S. **Liberção de arsênio de diferentes amostras contendo arsenopirita através da oxidação por oxigênio em meio circumneutro a alcalino**. Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/30776>;

DA LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. **Introdução ao tratamento de minérios**. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/712/3/CCL00220010.pdf>;

DE MELLO, J. W. V.; DUARTE, H. A.; LADEIRA, A. C. Q. **Origem e Controle do Fenômeno Drenagem Ácida de Minas**. Poços de Caldas, 2014. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/cadernos/08/06-CTN4.pdf>;

DNER EM 038/97 - Agregado Miúdo Para Concreto de Cimento. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-material-em/dner_em_038_97.pdf;

DNER ME 083/1994 Agregados - Análise granulométrica. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dner_me_083_98.pdf;

DNER ME 035/1994 Agregados - Determinação da abrasão "Los Angeles". Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dner-me035-98.pdf>;

DNER ME 266/1994 Agregados - Determinação do teor de materiais pulverulentos. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dner-me266-97.pdf>;

DNER EM 037/1997 Agregado graúdo para concreto de cimento. Disponível em:

<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-material-em/dner-em037-97.pdf>;

DNER ME 089/1994 Agregados - Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou magnésio. Disponível em:

<https://newroads.com.br/wp-content/uploads/2018/01/dner-me089-94.pdf>;

DNER ME 197/1994 Agregados - Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos. Disponível em:

<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dner-me197-97.pdf>;

ELS, G. **Placer formation and placer minerals.** Pretória, 2005. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169136805001083>;

The SW - 846 Compendium. Disponível em: <https://www.epa.gov/hw-sw846/sw-846-compendium>;

Method 1313 - Liquid-Solid Partitioning as a Function of Extract pH Using a Parallel Batch Extraction Procedure. Disponível em:

<https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/1313.pdf>;

EPA 3050 - Acid Digestion of Sediments, Sludges and Soils. Disponível em:

<https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/epa-3050b.pdf>;

Method 9045D - Soil and Waste pH. Disponível em:

<https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/9045d.pdf>;

EVANGELOU, V. P. **Pyrite Oxidation and Its Control.** Boca Raton, 1995. Disponível

em: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9780203741641/pyrite-oxidation-control-evangelou>;

FILHO, J. R. A. et al. **The Use of Static and Humidity Cell Tests to Assess the Effectiveness of Coal Waste Desulfurization on Acid Rock Drainage Risk.** Cape

Town, 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10230-017-0435-7>;

FRANÇA, S. C. A. et al. **Desaguamento de Rejeitos Minerais para Aplicação de Métodos de Disposição Alternativos às Barragens de Rejeito Convencionais.** Rio

de Janeiro, 2018. Disponível em:

<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/2192/3/sta-102.pdf>;

FRAZÃO, E. B.. **Tecnologia de Rochas na Construção Civil**. São Paulo, 2002. Disponível em:

https://books.google.com.br/books/about/Tecnologia_de_rochas_na_construção_civ.html?id=FkvvAAAACAAJ&redir_esc=y;

FRIBER, M. A. et al. **Study of the Mining Waste in the Production of Calcined Aggregate for Use in Pavement**. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em:

<https://www.mdpi.com/2075-163X/13/12/1543>;

GAYANA, B. C., CHANDAR, K. R. **Sustainable use of mine waste and tailings with suitable admixture as aggregates in concrete pavements-A review**. Mangalore, 2018. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/326253540_Sustainable_use_of_mine_waste_and_tailings_with_suitable_admixture_as_aggregates_in_concrete_pavements-A_review;

GONTIJO, M. D. **Manuseio e aproveitamento de estéreis em mineração**. João Monlevade, 2021. Disponível em:

<https://revista.uemg.br/index.php/reis/article/download/6005/3913/22802>;

GUSMÃO, I. C. D., et al. **Os Impactos Ambientais Causados Pela Atividade Mineradora**. Natal, 2021. Disponível em: <https://www.confea.org.br/midias/uploads-imce/Contecc2021/Civil/OS%20IMPACTOS%20AMBIENTAIS%20CAUSADOS%20PELA%20ATIVIDADE%20MINERADORA.pdf>;

HAMMOND, A. A. **Engineering characteristics of mining waste aggregates**. Paris, 1984. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02594349>;

HOLMES, P. R., et al. **The Mechanism of Bacterial Action in the Leaching of Pyrite by Thiobacillus ferrooxidans. An Electrochemical Study**. Chicago, 1999. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.1392027/pdf>;

Instituto Brasileiro de Mineração, Setor Mineral, 2021. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2022/02/Apresentacao-Coletiva-de-Imprensa-resultados-2021-01022022-versao-01-de-fevereiro.pdf>

Instituto Brasileiro de Mineração. **Setor Mineral, 2023**. Brasília, 2024. Disponível em: https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2024/01/20240129_Coletiva-de-Imprensa-Resultados-2023_.pdf;

- JU, W. J. **Environmental Compatibility of Lightweight Aggregates from Mine Tailings and Industrial Byproducts.** Seoul, 2017. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-4701/7/10/390>;
- KASPER, A. C.; VEIT, H. M. **GOLD RECOVERY FROM PRINTED CIRCUIT BOARDS OF MOBILE PHONES SCRAPS USING A LEACHING SOLUTION ALTERNATIVE TO CYANIDE.** Porto Alegre, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjce/a/4J3QYYYrBR3SCRQhhj5sSrD/?format=pdf&lang=en>;
- KELLY, D., WOOD, A. **Reclassification of some species of Thiobacillus to the newly designated genera Acidithiobacillus gen. nov., Halothiobacillus gen. nov. and Thermithiobacillus gen. nov.** Londres, 2000. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/12557274_Reclassification_of_some_species_of_Thiobacillus_to_the_newly_designated_genera_Acidithiobacillus_gen_nov_Halothiobacillus_gen_nov_and_Thermithiobacillus_gen_nov;
- Kinross Gold Corporation. **Paracatú technical report.** Paracatú, 2020. Disponível em: <https://www.kinross.com/news-and-investors/news-releases/press-release-details/2020/Kinross-files-new-Paracatu-technical-report/default.aspx>;
- KOMNITSAS, C.; POOLEY, F. D. **Mineralogical characteristics and treatment of refractory gold ores.** Cardiff, 1989. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0892687589900800>;
- LA SERNA, H. A., REZENDE, M. M. **Agregados para a Construção Civil.** Brasília, 2009. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/8-1-2013-agregados-minerais#:~:text=Agregados%20para%20Construção%20Civil%20são,dos%20substitutivos%20como%20resíduos%20inertes>;
- LIU, H. et al. **Environmental behavior of construction and demolition waste as recycled aggregates for backfilling in mines: Leaching toxicity and surface subsidence studies.** Xuzhou, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/337868819_Environmental_behavior_of_construction_and_demolition_waste_as_recycled_aggregates_for_backfilling_in_mines_Leaching_toxicity_and_surface_subsidence_studies;

- LUZ, A. B., ALMEIDA, S. L. M. **Manual de Agregados para Construção Civil**. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2043>;
- LUZ, A. B., OLIVEIRA, C. H.. **Argila - Bentonita**. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1100/1/11.BENTONITA%20Rev%20Adao%20Fernando%20Lins.pdf>;
- MACHADO, W. G. F. **Monitoramento de Barragens de Contenção de Rejeitos da Mineração**. São Paulo, 2007. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-31032008-154124/publico/DissertacaoWillianGladstoneMachado.pdf>;
- MAJUSTE, D. **Oxidação da Calcopirita: Investigação do Mecanismo Eletroquímico via difração de Raios-X ex situ e in situ Usando Radiação Síncrotron e Quantificação do Efeito Galvânico da Associação com Pirita**. Belo Horizonte, 2011. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-93CF4E/1/2011_tese_doutorado_ppgem_ufmg_daniel_majuste.pdf;
- MARSDEN, J., HOUSE, I. **The Chemistry of Gold Extraction**. Washington, 2006. Disponível em: https://books.google.com.br/books/about/The_Chemistry_of_Gold_Extraction.html?id=OuoV-o_Xf-EC&redir_esc=y;
- MARTÍNEZ, K. I. J. **Estudio cinético y electroquímico de la disolución de pirita en medio cloruro con ion cúprico**. Santiago, 2018. Disponível em: <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/152139/Estudio-cinético-y-electroquímico-de-la-disolución-de-pirita-en-medio-cloruro-con-ion-cúprico.pdf?sequence=1&isAllowed=y>;
- MARTINS, C. R., et al. **Sulfetos: Por Que Nem Todos São Solúveis?**. Salvador, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/hdqHpbwL8Jb6m99Y5WNpvvm/?format=pdf&lang=pt>;
- MCKIBBEN, M. A., TALLANT, B. A., ANGEL, J. K. **Kinetics of inorganic arsenopyrite oxidation in acidic aqueous solutions**. , 2008. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0883292707002740?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=896667b74d345680;

Miller et al.. **Advances in Acid Drainage Prediction Using the Net Acid Generation (NAG) Test.** Vancouver, 1997. Disponível em: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/620895>;

Miller et al.. **Advances in Acid Drainage Prediction Using the Net Acid Generation (NAG) Test.** Vancouver, 1997. Disponível em: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/620895>;

Mine Environment Neutral Drainage. **Quantitative Analysis of Chemical and Biological Kinetics for the Acid Mine Drainage Problem.** Calgary, 1994. Disponível em: <https://mend-nedem.org/wp-content/uploads/1.51.1.pdf>;

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº5, de 10 de março de 2016.** Brasília, 2016. Disponível em: <https://www.sgb.gov.br/remineralizadores/faq.html>;

Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Mineração 2050.** Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/pnm-2050>;

Ministério de Minas e Energia. **Transição Energética: A mudança de energia que o planeta precisa.** Brasília, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/transicao-energetica-a-mudanca-de-energia-que-o-planeta-precisa>;

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos.** Brasília, 2022. Disponível em: <https://portal-api.sinir.gov.br/wp-content/uploads/2022/07/Planares-B.pdf>;

MOHANTY, M., et al. **A systematic review exploring the utilization of coal mining and processing wastes as secondary aggregate in sub-base and base layers of pavement.** Dhanbad, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061823001198?via%3Dihub>;

MOHS, F. **Versuch einer Elementar-Methode zur naturhistorischen Bestimmung und Erkennung der Fossilien.** Alemanha, 1812. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=r0JbAAAAcAAJ&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false;

NÓBREGA, F. A.; DE LIMA, H. M.; LEITE, A. L. **Análise de múltiplas variáveis no**

- fechamento de mina - Estudo de caso da pilha de estéril BF-4, Mina Osamu Utsumi, INB Caldas, Minas Gerais.** Ouro Preto, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rem/a/96kfWgzSfwrCLrRtDGLjVDJ/?format=pdf&lang=pt;>
- NOGUEIRA, K. A. Reação Álcali-Agregado: Diretrizes e Requisitos da ABNT NBR 15577/2008.** São Paulo, 2010. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9A5HJ4/1/monografia_kelso.pdf;
- PEARCE et al.. Copper oxidation state in chalcopyrite: Mixed Cu d9 and d10 characteristics.** Manchester, 2006. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016703706002754?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=7fdc7e85ead25893;
- PEYS, A. et al. Transformation of mine tailings into cement-bound aggregates for use in concrete by granulation in a high intensity mixer.** Mol, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622025811?via%3Dihub;>
- PIAN, E. Kilonova Emission and Heavy Element Nucleosynthesis.** Bolonha, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2218-1997/9/2/105;>
- RAMADON, L. F. Extração ilegal de Areia se Aproxima de R\$ 20 Bilhões ao ano.** Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2023-06/extracao-ilegal-de-areia-se-aproxima-de-r-20-bilhoes-ao-ano;>
- ROBERT, F. et al. Models and exploration methods for major gold deposit types.** Toronto, 2007. Disponível em: <https://www.911metallurgist.com/blog/wp-content/uploads/2015/10/Models-and-Exploration-Methods-for-Major-Gold-Deposit-Types.pdf;>
- SCHMID, R. et al. Como Denominar uma Rocha Metamórfica.** Cambridge, 2007. Disponível em: https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/ofitexto.arquivos/deg_rochasmeta.pdf;
- SHARATH, B. P., DAS, B. B. Production of Artificial Aggregates Using Industrial By-Products Admixed with Mine Tailings—A Sustainable Solution.** Mangalore, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-15-8293-6;>
- SILVA, A. P. M. Diagnóstico dos resíduos sólidos da atividade de mineração de substâncias não energéticas.** Brasília, 2012. Disponível em:

https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/7702/1/RP_Diagnóstico_2012.pdf;

SILVA, D. A., MELO, C. E. L.. **Processo de Britagem e Sua Influência nas Características Físicas do Agregado Graúdo para o Concreto Reciclado**. Brasília, 2020. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/342481101_Processo_de_britagem_e_sua_influencia_nas_caracteristicas_fisicas_do_agregado_graudo_para_concreto_Paranao_26;

SILVA, D. A., MELO, C. E. L., GEYER, A. L. B.. **Estudo da Influência do Agregado Graúdo Inadequado nas Propriedades dos Concretos Fresco e Endurecido**. João Pessoa, 2021. Disponível em: <http://www.realp.unb.br/jspui/handle/10482/46053?locale=en>;

SILVA, J. C. M. **Propriedades Químicas da Arsenopirita, Adsorção de Agentes Lixivantes e seu Mecanismo de Oxidação a Partir de Cálculos DFT**. Belo Horizonte, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/SFSA-AEDRKR>;

Sobek et al. **Field and Laboratory Methods Applicable to Overburdens and Minesoils**. Morgantown, 1978. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=riW5CsRFY4sC&oi=fnd&pg=PR10&ots=ag2N8UwB09&sig=4JDvrlhPfskhfPgxucubDoKI-w0&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false;

Sobek et al. **Field and Laboratory Methods Applicable to Overburdens and Minesoils**. Morgantown, 1978. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=riW5CsRFY4sC&oi=fnd&pg=PR10&ots=ag2N8UwB09&sig=4JDvrlhPfskhfPgxucubDoKI-w0&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false;

SOUZA, V. P. **Drenagem Ácida, Aspectos Ambientais: Uma Revisão**. São Paulo, 2015. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1836/1/STA-87.pdf>;

TONNESEN, D. A., LUZ, A. B., BERTOLINO, L. C.. **Caracterização e beneficiamento das bentonitas dos novos depósitos de Cubati e Pedra Lavrada - PB**. Rio de Janeiro, 2003. Disponível em:

http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/527/1/Diego_Tonnesen.pdf;

TUTU, H. et al, 2008. **The chemical characteristics of acid mine drainage with particular reference to sources, distribution and remediation: The Witwatersrand Basin, South Africa, a case study**. Witwatersrand, 2008. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/223647762_The_chemical_characteristics_of_acid_mine_drainage_with_particular_reference_to_sources_distribution_and_remediation_The_Witwatersrand_Basin_South_Africa_a_case_study;

TV SENADO. **Reportagem da TV SENADO**. Brasília, 2016. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/tv/programas/ecosenado/2023/10/responsavel-por-4-do-pib-mineracao-encontra-manieras-de-ser-mais-sustentavel-no-brasil#:~:text=Responsável%20por%204%25%20do%20PIB,sustentável%20no%20Brasil%20-%20TV%20Senado&text=Em%20Discussão!>;

WALKER, F. P., SCHREIBER, M. E., RIMSTIDT, J. D. **Kinetics of arsenopyrite oxidative dissolution by oxygen**. Blacksburg, 2006. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016703705009634?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=89666680cfbe5680;

WEILER, J. **Benefícios ambientais da recuperação da pirita na mineração de carvão em SC**. Porto Alegre, 2016. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/141197/000991865.pdf?sequence=1&isAllowed=y>;

WEILER, J. et al. **Using static, kinetic and metal mobility procedures to evaluate possibilities of coal waste land disposal at Moatize Mine, Mozambique**. Porto Alegre, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/remi/a/yWwfvJzm9g9FFgj6kqrH7qN/?lang=en>;

WINGE, M. **Petrologia Metamórfica - Notas de Aula**. Brasília, 1996. Disponível em: <https://mw.eco.br/ig/cursos/met1/index.htm#Class>;

YOUSUF, S. et al.. **The pH of cement-based materials: A review**. Wuhan, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/346077699_The_pH_of_Cement-based_Materials_A_Review;

ZAMBOTTO, D. **Estudo Preliminar dos Efeitos da Reação Álcali-Agregado nas Respostas Estruturais de Pavimentos de Concreto**. São Paulo, 2014. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-05012016-154709/publico/Dissertacao_Danielle_Zambotto.pdf;

ZEGARDŁO, B. **Comparative Assessment of Environmental Effects by LCA Method**

of Natural Aggregates Extraction Processes and Production of Their Substitutes from Waste in the City Mining System. Siedlce, 2021. Disponível em:

<http://www.jeeng.net/Comparative-Assessment-of-Environmental-Effects-by-LCA-Method-of-Natural-Aggregates,139119,0,2.html>;

ZHOU, J. et al. **Establishing the process mineralogy of gold ores.** Lakefield, 2004.

Disponível em:

<https://www.sgs.com/en/-/media/sgscorp/documents/corporate/brochures/sgs-min-tp2004-03-process-mineralogy-of-gold-ores.cdn.en.pdf>;

ABNT NBR 10004/2017 Resíduos Sólidos - Classificação. Disponível em:

www.abntcatalogo.com.br/;