



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



Larissa Caroline Ferreira

INFLUÊNCIA DO CIMENTO PORTLAND NO EMPILHAMENTO DO REJEITO DE BARRAGEM DE MINÉRIO DE FERRO

Ouro Preto

2022

Influência do Cimento Portland no Empilhamento do Rejeito de Barragem de Minério
de Ferro

Larissa Caroline Ferreira

Trabalho Final de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção
do Grau de Engenheiro Civil na
Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 13/06/2022

Área de concentração: Materiais de Construção

Orientador: Prof. D.Sc. Ricardo André Fiorotti Peixoto – UFOP

Orientador: Prof^a. M.Sc. Laís Cristina Barbosa Costa – UFOP

Ouro Preto

2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F383i Ferreira, Larissa Caroline.
Influência do cimento Portland no empilhamento do rejeito de
barragem de minério de ferro. [manuscrito] / Larissa Caroline Ferreira. -
2022.

81 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadores: Ma. Laís Cristina Barbosa Costa, Prof. Dr. Ricardo André
Fiorotti Peixoto.

Coorientador:

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola
de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Minério de ferro - Rejeito. 2. Cimento Portland. 3. Rejeito -
Empilhamento. I. Costa, Laís Cristina Barbosa. II. Peixoto, Ricardo André
Fiorotti. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Larissa Caroline Ferreira

Influência do cimento Portland no empilhamento do rejeito de barragem de minério de ferro

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Civil

Aprovada em 13 de junho de 2022

Membros da banca

D.Sc. - Ricardo André Fiorotti Peixoto - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
M.Sc. - Laís Cristina Barbosa Costa - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
M.Sc. - Tainá Varela de Melo - Circlua
M.Sc. - Ana Carolina de Paula Matias - Sesi/Anglo American

Ricardo André Fiorotti Peixoto, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 13/06/2022



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Andre Fiorotti Peixoto, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/06/2022, às 09:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0350833** e o código CRC **E8E9E60C**.

*Dedico este trabalho à todas as pessoas que me auxiliaram até aqui.
Com palavras de incentivo, coragem, apoio, torcida e pelos
incontáveis gestos de cuidado!*

AGRADECIMENTOS

Nesse último capítulo da minha graduação, encerro com o sentimento de gratidão pelos inúmeros aprendizados, crescimento e por ter tido tantas pessoas que me ajudaram a chegar até aqui.

Agradeço, primeiramente, a Deus por me permitir viver tudo isso com força, coragem e sabedoria. Aos meus pais, Cheile e Ricardo, por todo o amor e suporte. Aos meus familiares pela torcida e apoio. Aos meus amigos por todo cuidado e incentivo.

Agradeço, em especial, aos meus orientadores, professor Ricardo Fiorotti e professora Laís Costa. Ao prof. Ricardo por me permitir desenvolver esse trabalho, pela confiança depositada e por toda orientação concedida. À Laís, pela paciência, por não ter medido esforços para me auxiliar nessa caminhada do TCC, sempre disposta e me incentivando a dar sempre o meu melhor.

Agradeço, também, a aluna de iniciação, Nicole Alves, por ter me ajudado em tantos momentos importantes desse estudo com dedicação e empenho. Ao grupo de pesquisa Reciclos, por mais uma vez ter me acolhido tão bem no laboratório. E ao Juninho por todo auxílio e paciência frente as atividades do laboratório.

Agradeço, ainda, à Walm BH Engenharia, especialmente Luciana Villefort, pela compreensão e apoio nos momentos que mais precisei. Por fim, agradeço à instituição, à Gloriosa Escola de Minas, por essa jornada de grandes aprendizados e crescimento.

RESUMO

A mineração gera grandes volumes de resíduos que precisam ser armazenados e destinados de forma adequada e segura a longo prazo. O método mais comum para dispor os rejeitos são as barragens. No entanto, com intuito de diminuir os impactos ambientais e sociais ocasionados e atender às normas vigentes em relação à segurança, outras alternativas estão sendo utilizadas, como o empilhamento de rejeito. Implementar novas tecnologias que permitam à disposição segura e eficaz desses rejeitos tem se mostrado necessário frente ao cenário atual. Assim, esse trabalho avaliou a influência da adição de cimento Portland no empilhamento de rejeitos de barragem de minério de ferro. Para esse estudo, foram utilizados dois tipos de rejeitos de barragem de minério de ferro com teores sólidos-água de 40% e 70%. Inicialmente, os rejeitos foram caracterizados fisicamente. Subsequente, foi realizado um estudo de dosagem do teor de incorporação de cimento Portland e para avaliação do tempo de empilhamento com produção de corpos de prova prismáticos, foi incorporado na mistura NaCl com objetivo de acelerar o processo de enrijecimento da matriz. Por fim, foram produzidos protótipos de pilhas de rejeito sendo analisado seu desempenho ao longo do tempo de empilhamento, teor de umidade final e resistência à ruptura. Os rejeitos com teores sólidos-água de 40% apresentaram granulometria arenosa e aqueles com 70% de sólidos granulometria fina, ambos com predominância de ferro e sílica em suas composições químicas. Em geral, as pilhas tiveram bom desempenho, suportando o peso de suas camadas ao longo do tempo de empilhamento estipulado. Apresentaram, ainda, resistência à compressão equivalente à tensão admissível de solos arenosos pouco compactos e solos argilosos moles. Quanto ao teor de umidade, o cimento contribuiu na redução do teor de umidade da pilha com o rejeito de 70% de sólidos. Para o rejeito com 40% de sólidos, foi observado uma maior disponibilidade de água sobrenadante reforçando a necessidade de um sistema de drenagem, contribuindo para o melhor desempenho da pilha. Assim, observou-se que a incorporação de cimento Portland auxilia no processo de disposição de rejeito, contribuindo para a maior estabilidade das pilhas.

Palavras-chaves: Rejeito de Minério de Ferro; Cimento Portland; Empilhamento de Rejeito.

ABSTRACT

Mining generates large volumes of tailings that need to be stored and disposed of properly and safely in the long term. The most common method to dispose of tailings are dams. However, in order to reduce the environmental and social impacts caused and to meet current regulations in relation to safety, other alternatives are being used, such as tailings piles. Implementing new technologies that allow the safe and effective disposal of these tailings has proven necessary in the current scenario. Thus, this study evaluated the influence of the addition of Portland cement in the stacking of tailings from iron ore dams. For this study, two types of iron ore dam tailings were used with solid-water contents of 40% and 70%. Initially, the tailings were physically characterized. Subsequently, a study was conducted on the dosage of the content of Portland cement incorporation and to evaluate the stacking time with the production of prismatic specimens, NaCl was incorporated into the mixture in order to accelerate the matrix stiffening process. Finally, prototype tailings piles were produced and their performance was analyzed in terms of piling time, final moisture content and breaking strength. The tailings with solid-water content of 40% had a sandy grain size and those with 70% solids had a fine grain size, both with a predominance of iron and silica in their chemical compositions. In general, the piles had good performance, supporting the weight of its layers throughout the stipulated piling time. They also presented compressive strength equivalent to the admissible stress of soft sandy soils and soft clayey soils. As for the moisture content, the cement contributed in reducing the moisture content of the pile with the 70% solids tailings. For the tailings with 40% solids, a greater availability of supernatant water was observed reinforcing the need for a drainage system, contributing to the better performance of the pile. Thus, it was observed that the incorporation of Portland cement helps in the process of tailings disposal, contributing to the greater stability of the piles.

Keywords: Iron Ore Tailings; Portland Cement; Tailings Piles.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Método de alteamento a montante (IBRAM, 2016).	8
Figura 2 - Método de alteamento a jusante (IBRAM, 2016).....	9
Figura 3 - Método de alteamento por linha de centro (IBRAM, 2016).....	10
Figura 4 - Empilhamento Drenado (IBRAM, 2016).	11
Figura 5 – Processo de filtragem dos rejeitos (BARREDA, 2020).	13
Figura 6 – Tipos de rejeitos espessados (DIAS, 2017).....	14
Figura 7 – Fluxograma das etapas do estudo proposto.....	19
Figura 8 – (a) BMF 1 localizada em Itabirito (Google Earth); (b) BMF 2 localizada em Mariana (Google Earth).	20
Figura 9 – a) Vista frontal; b) Vista superior do Protótipo.	22
Figura 10 – Molde da 1ª camada do protótipo da pilha.....	23
Figura 11 – Esquema representativo da tensão de empilhamento.	24
Figura 12 – Modelo de nomenclatura adotada para os corpos de prova	26
Figura 13 – Sequência de moldagem adotada.	26
Figura 14 – (a) Moldagem da 1ª camada da pilha RBMF-70; (b) Moldagem da 1ª camada da pilha RBMF-40.....	28
Figura 15 – a) Peso fixo de 1 kg; b) Ensaio de ruptura com peso igual a 18 kg.	30
Figura 16 – Processamento dos rejeitos RBMF-70 e RBMF-40	32
Figura 17 – Distribuição granulométrica dos rejeitos utilizados no estudo.....	33
Figura 18 – Moldagem dos corpos de prova para tempo de cura igual à 2 horas	35
Figura 19 – a) Tensão x tempo dos corpos de prova com RBMF-70; b) Gráfico com ampliação para os traços REF, 1% e 3%.	37
Figura 20 – Corpos de prova RBMF-70 no tempo de 8 horas	39

Figura 21 – Tensão x tempo dos corpos de prova com RBMF-40.....	40
Figura 22 – Corpos de prova RBMF-40 no tempo de 8 horas.	42
Figura 23 – Exsudação da água presente no RBMF-40.....	43
Figura 24 – Moldagem da pilha RBMF-70-1-4.....	45
Figura 25 – Pilha RBMF-70-1-4 - 1ª Camada.....	46
Figura 26 – Pilha RBMF-70-1-4 - 2ª Camada.....	46
Figura 27 – Pilha RBMF-70-1-4 - 3ª Camada.....	47
Figura 28 – Pilha RBMF-70-1-4 - 4ª Camada.....	47
Figura 29 – Moldagem da pilha RBMF-40-REF-4.....	49
Figura 30 – Pilha RBMF 40-REF-4 - 1ª Camada.....	49
Figura 31 – Moldagem da pilha RBMF-40-1-2.....	51
Figura 32 – Pilha RBMF-40-1-2 - 1ª Camada.....	51
Figura 33 – Pilha RBMF-40-1-2 - 2ª Camada.....	52
Figura 34 – Pilha RBMF-40-1-2 - 3ª Camada.....	52
Figura 35 – Pilha RBMF-40-1-2 - 4ª Camada.....	53
Figura 36 – Fissura da pilha RBMF-40-1-2 - 4ª Camada.....	55
Figura 37 – Pilha RBMF-40-1-2 ao final do ensaio de ruptura.....	55
Figura 38 – Pilha RBMF-70-1-4 ao final do ensaio de ruptura.....	56
Figura 39 – Teor de umidade das pilhas RBMF.....	57
Figura 40 – pH das pilhas RBMF-40-REF e RBMF-40-1.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipo de RBMF e teor sólidos-água	21
Tabela 2: Processamento dos rejeitos.....	21

Tabela 3: Tensão de empilhamento.....	25
Tabela 4: Caracterização física e química dos rejeitos.....	33
Tabela 5: Quantidades das pilhas RBMF-70 e RBMF-40	44
Tabela 6: Ruptura das Pilhas RBMF 40-1% e RBMF 70-1%.....	54

LISTA DE SIGLAS

ANM – Agência Nacional de Mineração

BMF – Barragem de Minério de Ferro

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração

PDR – Pilha de Rejeito

RBMF – Rejeito de Barragem de Minério de Ferro

SIGBM - Sistema de Gestão de Segurança de Barragem de Mineração

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivo	3
1.1.1	Objetivos Específicos.....	3
2	Revisão Bibliográfica.....	4
2.1	Rejeitos de Mineração	4
2.2	Métodos de Disposição de Rejeitos.....	5
2.2.1	Disposição em Barragens	7
2.2.2	Empilhamento Drenado	11
2.2.3	Empilhamento a Seco – <i>Dry Stacking</i>	12
2.2.4	Disposição de Rejeitos Espessados – lama espessada, torta e/ou pasta	14
2.2.5	Outros Métodos de Disposição	15
2.3	Tecnologias para Redução do Teor de Umidade	17
2.4	Qualidade da Água para Reutilização na Mineração.....	17
3	Metodologia.....	18
3.1	Materiais	19
3.2	Caracterização dos Rejeitos (RBMF)	20
3.3	Reconstituição dos Rejeitos (RBMF).....	20
3.4	Idealização dos Protótipos das Pilhas	22
3.5	Estudo Piloto de Dosagem e Tempo de Empilhamento	23
3.6	Moldagem dos Protótipos das Pilhas.....	27
3.7	Caracterização das Pilhas	28

3.7.1	Análise Qualitativa	28
3.7.2	Análise Quantitativa	29
4	Resultados	32
4.1	Reconstituição e Caracterização dos Rejeitos (RBMF)	32
4.2	Estudo Piloto - Dosagem e Tempo de Empilhamento	34
4.2.1	RBMF-70.....	36
4.2.2	RBMF-40.....	40
4.3	Protótipos – Pilhas RBMF.....	43
4.3.1	Moldagem e Desempenho das Pilhas.....	43
4.3.2	Resistência.....	54
4.3.3	Teor de Umidade Final.....	57
4.3.4	Qualidade da Água – RBMF 40%	58
5	Conclusão	60
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	61
	Referências.....	62

1 INTRODUÇÃO

A mineração é um dos setores básicos da economia brasileira, sendo responsável por aproximadamente 2,5% do PIB nacional (MME, 2022). Nesse contexto, as atividades de extração do minério de ferro se destacam por serem o principal item da produção mineral e de exportação no Brasil (IBRAM, 2021). Todavia, é intrínseco às atividades de mineração a geração de resíduos, devido aos processos de beneficiamento que os minerais são submetidos (PORTES, 2013).

Com o crescente aumento da produção mineral no país e a consequente diminuição do teor de minério nas jazidas, maiores volumes de rejeitos têm sido produzidos (SOBRINHO, 2014). Os rejeitos impactam o meio ambiente e necessitam ser armazenados e destinados de forma adequada e segura a longo prazo (PAIXÃO, 2019; PORTES, 2013). No Brasil, o método mais comumente utilizado para a disposição dos rejeitos é através de diques de contenção ou barragens. As barragens são destinadas a reservar os rejeitos descartados em forma de polpa, mistura sólido-água, e demanda grandes áreas para disposição. Consequentemente, ocasiona impactos ambientais e sociais de grande escala.

Os impactos ambientais ocasionados pelas barragens são: risco de ruptura; supressão da vegetação; poluição de recursos hídricos e do ar; redução da biodiversidade, alterações da paisagem, contaminação do solo e água em caso de ruptura, entre outros (GUIMARÃES, 2011). Como impactos sociais destacam-se: o risco para as comunidades que vivem próximas as essas estruturas; conflitos com a população pelo uso do solo; impactos na saúde das comunidades vizinhas com ações dos explosivos e poluição do ar; dependência econômica de muitas comunidades com a atividade mineradora; ausência de infraestrutura local adequada para atender a demanda; crescimento desordenado de muitos municípios; aumento da violência e prostituição; prejuízos para economia local em caso de rompimento; destruição de patrimônios, entre outros (OLIVEIRA, 2019; NOGUEIRA, 2021).

Assim, as mineradoras vêm sendo questionadas quanto ao uso e construção das barragens, principalmente, após as rupturas das barragens de Fundão (2015) e B1 na

mina Córrego do Feijão (2019). Adicionalmente, intensificaram-se a fiscalização dessas estruturas para garantir maior segurança (PAIXÃO, 2019; ALVES, 2020). Além disso, as empresas tem enfrentado dificuldades para obter novos licenciamentos para a construção dessas estruturas e outorga para uso de recurso hídrico, tornando o cenário de disposição de rejeitos em barragens cada vez mais desafiador (GUIMARÃES, 2011). Dessa forma, os métodos alternativos para disposição dos rejeitos tem se mostrado promissores, principalmente, os que são realizados com baixo grau de saturação, cujo objetivo é eliminar a água que gera maior instabilidade as estruturas de barramento (FRANÇA et al, 2018).

Nesse contexto, o empilhamento de rejeitos tem se mostrado uma alternativa eficaz na disposição de rejeitos na forma espessada ou filtrada, principalmente, quanto à segurança das estruturas e a recuperação de água no processo (PORTES, 2013; ALVES, 2020). Ressalta-se ainda que, os rejeitos espessados ou filtrados proporcionam maior densidade, menor susceptibilidade de liquefação e rupturas, menor potencial de contaminação de lençóis freáticos, menor área para disposição e facilidade na recuperação das áreas degradadas (PORTES, 2013; ALVES, 2020). Apesar do empilhamento de rejeitos ter custo inicial mais elevado para o empreendimento, devido aos investimentos necessários na planta de desaguamento e transporte do rejeito, esses são amortizados ao final da vida útil da mina quando a recuperação das áreas degradadas ocorre de maneira mais rápida e fácil, devido a menor área afetada (GOMES, 2009).

O estudo de tecnologias que auxiliem na retirada de água do rejeito, reduzindo o teor de umidade destes, e contribuindo para o melhor desempenho mecânico mostra-se necessário para auxiliar a disposição desses na forma espessada ou filtrada. Assim, a incorporação do cimento Portland no rejeito pode se apresentar como uma alternativa viável, visto que o cimento auxilia na redução do teor de umidade e contribui para o enrijecimento das matrizes, auxiliando no empilhamento desses rejeitos.

No entanto, sabe-se pouco ainda como o cimento se comporta na situação de empilhamento de rejeitos. Assim, o presente trabalho busca estudar a influência da

incorporação do cimento Portland no empilhamento do rejeito de barragem de minério de ferro para entender o comportamento da mistura frente ao desempenho da pilha, desempenho mecânico e teor de umidade final nesse método de disposição e, assim, contribuir com novas tecnologias para a disposição segura dos rejeitos e desenvolvimento da mineração.

1.1 Objetivo

Avaliar a influência da incorporação do cimento Portland no empilhamento do rejeito da barragem de minério de ferro.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Verificar a dosagem ideal de cimento Portland e o tempo para o empilhamento de rejeito de barragem de minério de ferro, através da tensão de empilhamento a ser suportada;
- Verificar a influência da incorporação de cimento Portland no teor sólido-água do rejeito de barragem de minério de ferro;
- Avaliar o efeito da incorporação de cimento Portland no empilhamento do rejeito pelo comportamento qualitativo das pilhas ao longo do tempo e pelo seu desempenho mecânico; e
- Contribuir com o estudo de novas alternativas para a disposição segura dos rejeitos e desenvolvimento da mineração.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Rejeitos de Mineração

A mineração compreende o conjunto de atividades destinadas ao aproveitamento dos recursos naturais disponíveis no meio ambiente (DNPM, 2012). As atividades de mineração envolvem as etapas de pesquisa, lavra, desenvolvimento da mina, beneficiamento, comercialização, aproveitamento dos estéreis e rejeito, e o fechamento da mina (DECRETO Nº 9.406, 2018).

No Brasil, a mineração é um dos setores básicos da economia em constante expansão tendo grande importância para o desenvolvimento econômico e social do país. De acordo com o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), o setor teve um aumento de 9% em sua produção e 62% no faturamento entre janeiro a agosto de 2021, em relação ao mesmo período em 2020, evidenciando o crescimento contínuo da mineração no país (IBRAM, 2021).

No entanto, a atividade de mineração gera volumes significativos de resíduos que impactam o meio ambiente de forma direta e carecem serem armazenados e dispostos de forma segura (PORTES, 2013). Segundo Silva et al. (2012), os resíduos da mineração são advindos de diferentes etapas: o material estéril, do processo de extração; o rejeito, do processo de beneficiamento; e demais de outras operações das plantas de mineração (pneus, baterias, entre outros).

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei Federal nº 12.305/2010), os rejeitos são resíduos sólidos que não apresentam possibilidade de tratamento e recuperação dos minerais de interesse, sendo necessário à sua disposição final de forma adequada, podendo ser provenientes dos diferentes processos de beneficiamento em que o minério é submetido. Esses processos visam aumentar a pureza, qualidade e teor do produto final, como também, padronizar o tamanho das partículas e remover os minerais que não possuam valor econômico (ESPÓSITO, 2000).

Assim, os processos de beneficiamento variam em função da qualidade e do tipo de minério a ser extraído, sendo encontrados rejeitos com diferentes características

mineralógicas, físico-químicas e geotécnicas (PAIXÃO, 2019). De acordo com Mend (2017), a granulometria é ainda influenciada pelo grau de cominuição, pela mineralogia do minério e a fração argilosa presente. Quando os rejeitos estão abaixo de 0,074 mm são classificados como de granulometria fina (lama) e se acima de 0,074 mm são denominados rejeitos granulares (PORTES, 2013).

Os rejeitos podem ser caracterizados ainda quanto a presença de argila, reologia, plasticidade, massa específica, condutividade hidráulica, consolidação, mineralogia, potencial de geração de ácido, potencial de neutralização e potencial de lixiviação de metais. Essas propriedades são mais relevantes e influenciam na escolha do método de disposição e técnicas de desaguamento do rejeito que podem ser aplicadas (ALVES, 2020).

Quanto ao método de disposição, geralmente no beneficiamento o minério é fragmentado pelos processos de britagem e moagem. Nessas etapas, assim como na flotação, uma grande quantidade de água é utilizada para resfriar o calor gerado pela energia das quebras dos blocos (SOBRINHO, 2014) . Dessa forma, os rejeitos se apresentam na forma de lama (polpa) ao final do processo na planta de produção. Devido à grande quantidade de água, os rejeitos em polpa apresentam grande mobilidade relacionada a pequena ou inexistente resistência ao cisalhamento. Assim, esses rejeitos necessitam ser dispostos de maneira segura, econômica e ambientalmente adequada (ALVES, 2020).

2.2 Métodos de Disposição de Rejeitos

A metodologia tradicional de disposição dos rejeitos consiste em dispor o rejeito na forma de polpa em reservatórios a céu aberto que consistem em diques ou barragens de contenção (ALVES, 2020).

Alves (2020) destaca que além do método convencional, é possível utilizar a técnica de desaguamento do rejeito para dispor esse material na forma espessada, em pasta ou filtrado. A técnica de espessamento consiste em obter um material com maior concentração de sólidos, realizada através de espessadores de grande porte ou filtros a vácuo. A característica e estado do rejeito desaguado são baseados no

teor de sólidos e na tensão de escoamento. Assim, baseado na consistência e no teor de sólidos, os rejeitos podem ser ainda classificados como:

- Rejeito em polpa: baixo teor de sólidos, em torno de 15 à 55%, e nenhuma ou baixa resistência para transporte por gravidade ou bombeamento;
- Rejeito espessado: parcialmente desaguado, com teor de sólidos de 40 à 50%, com possibilidade de transporte por bombeamento (semelhante a polpa);
- Rejeito em pasta: rejeito espessado com maior quantidade de sólidos (aproximadamente 60%) que não flui naturalmente (consistência de pasta);
- Rejeito filtrado úmido: aspecto de massa saturada que não é bombeável e com alto teor de sólidos;
- Rejeito filtrado seco: massa não-saturada, não bombeável com baixo teor de umidade e alta porcentagem de sólidos (aproximadamente 80% ou mais, dependendo do tipo de filtro empregado).

Dessa forma, os rejeitos podem ser ainda dispostos utilizando métodos alternativos, como: empilhamento drenado, pasta, lama espessada, disposição de rejeitos filtrados e subaérea, co-disposição, disposição compartilhada, disposição em cava e subterrânea para preencher as galerias (PAIXÃO, 2019, ALVES 2020).

A escolha do método de disposição dependerá do custo-benefício para o empreendimento, como também dos seguintes aspectos: o processo de mineração; condições geológicas e topográficas da região; propriedades mecânicas dos materiais; condições climáticas e poder de impacto ambiental dos rejeitos (IBRAM, 2016). Adicionalmente, a escolha do método deve contabilizar também os custos associados ao risco, custos sociais e ambientais (CARNEIRO E FOURIE, 2018 apud ALVES, 2020).

Além disso, a utilização do rejeito como reaproveitamento na alimentação das plantas de beneficiamento tem apresentado viabilidade em virtude das novas tecnologias empregadas na mineração. Outra possibilidade de utilização do rejeito é na construção civil na produção de materiais como tijolos, pavers intertravados,

ladrilhos, como também, material rodoviário (PEIXOTO, *et al.*, 2016; BASTOS, *et al.*, 2016).

2.2.1 Disposição em Barragens

No Brasil, o método mais comum para dispor os rejeitos é através de barragens de contenção (ARAUJO, 2006). Esse método concilia a construção da estrutura de contenção com a disposição do rejeito em polpa.

As barragens podem ser construídas com o próprio rejeito, em conjunto, com material estéril, solos e material de empréstimo. Todavia, a construção dependerá do tipo e da finalidade da estrutura. As barragens de rejeito diferenciam-se das barragens de contenção de água, visto que são construídas ao longo do tempo, por meio de alteamentos sucessivos, para diminuir os custos da exploração mineral. Já as barragens de contenção de água são utilizadas e desempenham sua função só ao final do processo de construção (ALVES, 2020).

Os rejeitos que são lançados nas barragens são constituídos da mistura da rocha fragmentada com os fluidos utilizados no beneficiamento. Dessa forma, os rejeitos apresentam uma textura superficial angular, granulometria fina e composição química dependendo da composição da rocha de origem e dos reagentes utilizados no processo de beneficiamento (KOSSOF *et al.*, 2014 *apud* ALVES, 2020).

A construção da barragem inicia-se com um dique de partida, utilizando material de empréstimo. Após o dique de partida, são construídos alteamentos sucessivos com material de empréstimo, estéril ou com o próprio rejeito por deposição hidráulica ou ciclonagem dos rejeitos (PAIXÃO, 2019; ALVES, 2020). Conforme Alves (2020) destaca, para a construção das barragens três métodos construtivos podem ser realizados: método a montante, método a jusante e por linha de centro.

2.2.1.1 Método a Montante

Nesse método os alteamentos são realizados para dentro do depósito, sendo o rejeito o material de sustentação (ALVES, 2020). Na etapa inicial é construído um dique de partida com material argiloso ou enrocamento compactado. Esse dique tem a função de ser um suporte para os rejeitos que são descartados posteriormente. Além

disso, deve ser construído com material permeável para controlar a erosão e possibilitar a drenagem da água (SILVA, VIANA e CAVALCANTE, 2012).

Após o dique de partida, os rejeitos são lançados na direção montante da linha de simetria do dique, dando origem a praia de deposição. Essa praia, posteriormente, será a fundação e material para a construção do próximo alteamento (Figura 1). Os alteamentos são realizados até a cota de projeto ser atingida (ARAUJO, 2006).



Figura 1 - Método de alteamento a montante (IBRAM, 2016).

O alteamento por montante era o método mais adotado pelas empresas mineradoras, devido ao baixo custo de construção, a rapidez e o menor volume de material necessário para construção dos diques de alteamento (ARAUJO, 2006). Todavia, esse método apresenta menor segurança pela maior susceptibilidade a liquefação, elevação da linha freática e *piping*. Esses riscos estão associados aos alteamentos serem construídos sobre uma fundação formada de camadas de rejeitos e pela dificuldade em implantar a drenagem interna do sistema (ESPÓSITO, 2000).

A Agência Nacional de Mineração (ANM) através da Resolução nº4, de 15 de fevereiro de 2019, estabeleceu que em todo o território nacional está proibido o método de construção por montante e as barragens que utilizam esse método deveriam ser desativadas até o ano de 2021. Essas medidas foram tomadas, principalmente, após as rupturas das barragens do Fundão (2015) e B1 na mina Córrego do Feijão (2019), objetivando assegurar a estabilidade das barragens (ANM, 2019).

Adicionalmente, a Resolução Conjunta SEMAD/FEAM nº 2.784, de 21 de março 2019, determinou que no estado de Minas Gerais todas as barragens alteadas pelo método de montante deveriam ser descaracterizadas até o início do ano de 2022 (FEAM, 2019). No entanto, uma nova resolução ANM (Nº 95, 7 de fevereiro de 2022) determinando que as mineradoras que ainda não realizaram esse processo poderão solicitar um prazo maior para descaracterização dessas barragens até no máximo 5 anos após o previsto pela legislação mineira, podendo se estender até o ano de 2027 (ANM, 2022).

2.2.1.2 Método a Jusante

Nesse método, os alteamentos acontecem para fora do depósito, ocorrendo a compactação sobre o talude de jusante anterior, como mostra a Figura 2. Na construção podem ser empregados o rejeito ou material estéril e solos de empréstimo. Contudo, se o rejeito for utilizado como material de construção, é necessário que na área do maciço da barragem seja utilizado apenas a fração grossa deste (PAIXÃO, 2019; ALVES, 2020; SILVA et al, 2012).

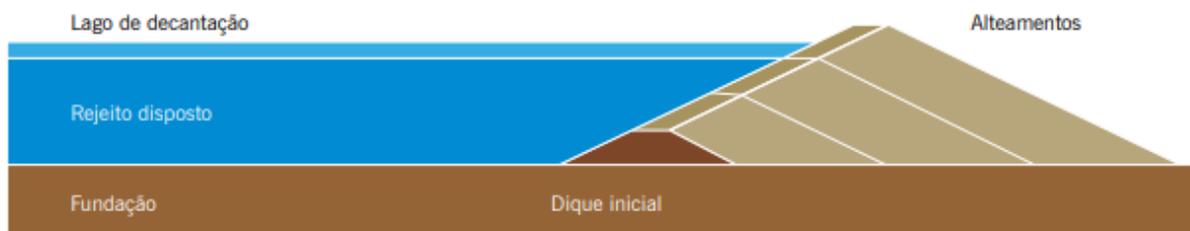


Figura 2 - Método de alteamento a jusante (IBRAM, 2016).

O alteamento a jusante apresenta como vantagens a possibilidade de taxas mais elevadas de alteamento e menor susceptibilidade à liquefação e *piping*, visto que a posição da linha freática no maciço pode ser melhor monitorada por um sistema de drenagem interna. Assim, esse método construtivo é considerado mais seguro para as barragens de contenção de rejeitos (ALVES, 2020; PAIXÃO, 2019).

No entanto, destaca-se que esse método tem como desvantagens os maiores custos associado a demanda por maiores volumes de material (rejeito, estéril ou material de empréstimo) para construção dos alteamentos e uso de ciclones para deposição do rejeito (ARAUJO, 2006). Além disso, o método exige maior área para construção, devido aos alteamentos ocorrerem a jusante da estrutura.

2.2.1.3 Método de Linha de Centro

Nesse método, os alteamentos são construídos de modo que as cristas estejam alinhadas verticalmente (Figura 3). Dessa forma, parte da construção é realizada sobre a praia de deposição de rejeitos e outra parte sobre o talude de jusante anterior (ALVES, 2020; PAIXÃO, 2019).

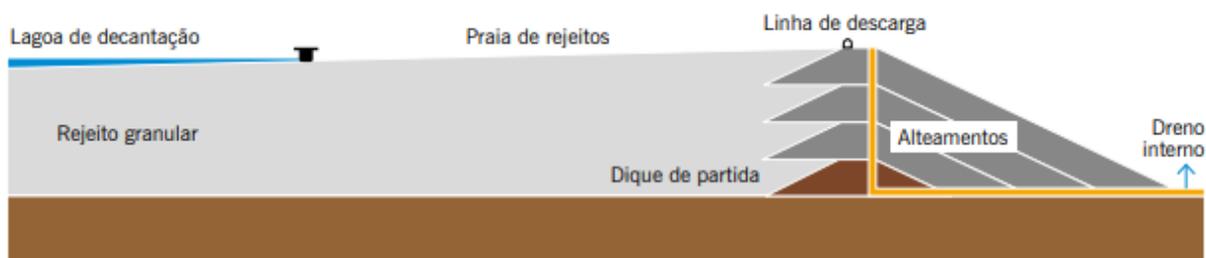


Figura 3 - Método de alteamento por linha de centro (IBRAM, 2016).

O método apresenta como vantagens a segurança do método jusante e a velocidade de alteamento do método montante. Portanto, o alteamento por linha de centro conjuga as técnicas dos outros dois métodos de alteamento. Além disso, esse método permite a utilização de um sistema de drenagem interna em todas as etapas de alteamento, facilitando o controle da linha freática e dissipação das poropressões (PAIXÃO, 2019).

Lozano (2006) ressalta que as desvantagens desse método estão associados aos custos que podem ser elevados, a complexidade de operação e controle do sistema de drenagem e contenção a jusante que devem ser eficientes para não acontecer a saturação do maciço.

2.2.2 Empilhamento Drenado

O empilhamento drenado representado na Figura 4 consiste em um método que dispõe rejeitos granulares na forma de pilha, utilizando a técnica de aterro hidráulico (PORTES, 2013).



Figura 4 - Empilhamento Drenado (IBRAM, 2016).

Nessa metodologia é adotada uma estrutura drenante que libera a água livre que sai dos poros do rejeito. Essa água é liberada por meio de um sistema de drenagem interna que está ligada aos rejeitos do reservatório, resultando em um depósito despressurizado em relação a poropressão (IBRAM, 2016).

Dessa forma, o sistema inibe o acúmulo da água no interior da estrutura e pode contar com estruturas de captação de água ou extravasores para retirada da água em épocas de maiores índices pluviométricos (GOMES, 2009).

No empilhamento drenado deve ser utilizado somente rejeitos arenosos que apresentem coeficiente de permeabilidade capaz de permitir um fluxo de drenagem gravitacional e subvertical no interior da estrutura. Assim, os rejeitos finos precisam ser dispostos de outra forma quando adotado esse método (OLIVEIRA-FILHO, 2017).

Segundo Guedes e Schneider (2017), é construído inicialmente um dique de partida e o sistema de drenagem interna. Posteriormente, são lançados os rejeitos arenosos da crista do dique de partida pela técnica de aterro hidráulico. Os alteamentos são construídos sucessivamente, a montante, com rejeitos da praia de deposição e compactados com o uso de um trator esteira. Esse método de disposição é semelhante ao alteamento por montante da barragem, no entanto, o dique de alteamento é construído com o próprio rejeito (ver Figura 1).

As vantagens desse método consistem na obtenção de um maciço com mais estabilidade e não-saturado; aproveitamento de encostas para construção da pilha e assim, menor área para deposição; maximização do aproveitamento da água em outras operações da mina pela captação desta; menor custo de reabilitação ambiental; menor potencial de rupturas catastróficas e melhores condições para fechamento (ÁVILA, 2011 apud PAIXÃO, 2019). Como desvantagem, apresenta o elevado custo operacional, como também, um maior controle operacional que é exigido no empilhamento das camadas (MOREIRA, 2021).

2.2.3 Empilhamento a Seco – *Dry Stacking*

O empilhamento a seco, denominado também como “*dry stacking*”, é um método que consiste empilhar o rejeito após a separação do sólido da água, através de um sistema de filtragem. Inicialmente, utiliza-se os espessadores para alcançar uma certa consistência do rejeito e, em seguida, a filtragem onde ocorrerá a separação sólido-água do rejeito. Após a filtragem, o material é transportado e empilhado, através da compactação das camadas (OLIVEIRA-FILHO e ABRÃO, 2015). A Figura 5 mostra o processo em que o rejeito é submetido até chegar a fase de disposição.

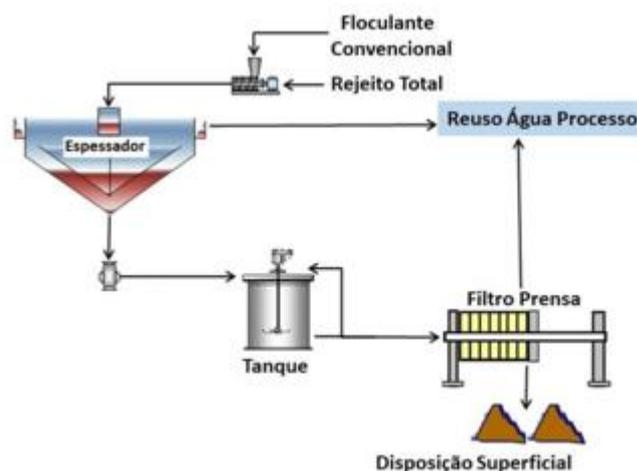


Figura 5 – Processo de filtragem dos rejeitos (BARREDA, 2020).

As pilhas de rejeito filtrado – *dry stacking*, geralmente, não necessitam de um sistema de contenção. No entanto, as características do material, como plasticidade e umidade, devem ser avaliadas para que se necessário, seja construído um sistema de contenção de menor porte (GOMES, 2009; ALVES, 2020).

O sistema de filtragem acontece pela ação de uma força sobre as partículas do rejeito que pode ser por: gravidade, vácuo, pressão ou centrifugação. A polpa é lançada no meio filtrante que tem a função de liberar a passagem do líquido e reter as partículas sólidas. Se o rejeito é composto de muitos finos, a técnica de filtragem fica inviável (PORTES, 2013).

Dessa forma, os rejeitos podem ser filtrados a úmido com grau de saturação próximo a 100%, ou filtrados a seco com grau de saturação entre 70 a 85%. A definição do teor de umidade deve ser suficiente para permitir a compactação, a segurança da pilha e proporcionar o reaproveitamento da água (DAVIES, 2011).

A maior vantagem desse método está na recuperação da água pelo sistema de filtragem que permite a sua reutilização em outros processos. Adicionalmente, a facilidade de recuperar e fechar progressivamente a área de disposição, possibilitando maior controle dos impactos ambientais e emissão de poeira, como também, no controle dos materiais empregados na recuperação. Além disso, é um método que ocupa também menor área de disposição, facilitando o emprego desta metodologia

(PORTES, 2013; ALVES, 2020). As limitações desse método consistem no custo elevado da planta de filtragem, transporte e disposição final, como também, na quantidade de finos que influenciará na viabilidade do método. Contudo, os custos dessa tecnologia são compensados ao final do empreendimento na fase desativação (GOMES, 2009).

2.2.4 Disposição de Rejeitos Espessados – lama espessada, torta e/ou pasta

A disposição de rejeitos espessados consiste no aumento do teor de sólidos, através da técnica de espessamento do rejeito em polpa. Esse conceito foi introduzido por Robinsky no ano de 1968 como uma alternativa para a disposição de rejeitos. Dessa forma, a lama espessada, torta e pasta são três alternativas para dispor o rejeito fino em substituição ao método convencional (PORTES, 2013). A Figura 6 mostra os tipos de rejeitos espessados.



a) Rejeito espessado



b) Rejeito na forma de pasta



c) Rejeito na forma de torta

Figura 6 – Tipos de rejeitos espessados (DIAS, 2017).

Para esse procedimento são empregados os espessadores que tem por objetivo separar os sólidos dos líquidos, através da sedimentação das partículas pela gravidade. Esse procedimento pode ainda levar reagentes, como floculantes e coagulantes, quando necessário para auxiliar o processo de sedimentação (PORTES, 2013).

O aumento no teor de sólidos promove ganho de resistência e contribui com o aumento da capacidade do reservatório. Além disso, essa técnica se configura mais

eficiente que a disposição convencional porque a concentração de sólidos que se obtém é maior, contribuindo para que não haja segregação do material durante a disposição (ALVES, 2020).

A característica do rejeito em não segregar está associada à resistência ao cisalhamento, assim quanto maior o teor de sólidos maior será a resistência ao cisalhamento do rejeito espessado. Dessa maneira, o que diferencia a lama espessada da torta e pasta é o nível de resistência de cada um e as características de bombeamento do material. Quando o rejeito possui tensão de escoamento abaixo de 200 Pa é denominado lama espessada. Se o rejeito espessado tem acima de 200 Pa de tensão é chamado de pasta. O limite superior da pasta é o limite operacional das bombas de deslocamento positivo, assim a torta é o rejeito espessado que estiver acima desse limite (ALVES, 2020; OLIVEIRA-FILHO E ABRÃO, 2015).

O rejeito na forma de torta pode ser obtido através da gravidade, pressão, centrifugação ou vácuo e podem ser transportados por caminhões ou correias transportadoras. Nessa consistência, o rejeito se comporta como um solo natural com baixa umidade (PORTES, 2013). Já os rejeitos na forma de pasta são transportados até o local de disposição utilizando bombas de deslocamento positivo (OLIVEIRA-FILHO e ABRÃO, 2015).

As vantagens que esse método de disposição apresenta são: maior taxa de recuperação de água; estruturas menores para a disposição final; maiores ângulos de disposição; menor susceptibilidade a liquefação; menor risco de rupturas; menor impacto ambiental e maior recuperação dos reagentes utilizados (ALVES, 2020; GOMES, 2009). Todavia, apresenta limitações, como: a necessidade de se ter uma topografia mais plana; custos elevados; nível elevado de tecnologia e infraestrutura local para controle e eficiência do método (PORTES, 2013).

2.2.5 Outros Métodos de Disposição

Outros métodos de disposição podem ser utilizados em substituição ao método convencional. Esses métodos são conhecidos, como: disposição em cava, subterrânea, subaérea, compartilhada e co-disposição.

A disposição em cava ou disposição em *pit*, é um método que utiliza cavas exauridas a céu aberto ou que há ainda extração de minério para depositar a polpa de rejeito sem a necessidade de construir diques (PORTES, 2013). Essa técnica apresenta como vantagens: redução de impactos ambientais; menor risco a jusante da estrutura; menor custo operacional; facilidade em recuperar as áreas lavradas concomitante ao avanço desta e facilidade em recuperar a área na fase final do empreendimento (IBRAM, 2016; PORTES, 2013). Todavia, têm como desvantagem a logística de operação que se deve ter para extrair o minério concomitante a construção de estrutura de contenção dentro da cava; pouco volume disponível para deposição dos rejeitos; problemas com percolação e estabilidade da cava (VICK, 1983 apud PAIXÃO, 2019).

Outra possibilidade é a disposição em cavas subterrâneas. Essa disposição tem por objetivo preencher as cavidades das galerias subterrâneas, proporcionar um piso de trabalho para as atividades de extração, dar suporte as paredes das escavações e potencializar a recuperação do corpo de minério (VICK, 1983 apud PAIXÃO, 2019).

Na disposição subaérea os rejeitos são depositados em ciclos de lançamento e espera, em finas camadas, visando o adensamento e drenagem do rejeito antes que a próxima camada seja lançada. Dessa forma, no período de espera acontece o ressecamento da camada lançada e o adensamento, promovendo ganho de resistência, menor volume e baixa poropressão (LIMA, 2006; ALVES, 2020). Esse método apresenta a vantagem de ser mais simples, com menor custo e promover a densificação do material e aumento de resistência. Contudo, o método apresenta algumas desvantagens relacionadas ao número de reservatórios e áreas que são necessárias para a disposição. Adicionalmente, a cada lançamento do rejeito o início do ressecamento se dá cada vez mais tardio, assim o tempo de espera para o lançamento das camadas posteriores será mais longo e deve ser considerado para que o método tenha eficiência (LIMA, 2006).

No método de disposição compartilhada e codisposição são integrados os sistemas de disposição de estéril e rejeito em um mesmo depósito. Assim, a codisposição é uma técnica que consiste em dispor rejeito-rejeito ou rejeito-estéril

quando os materiais são misturados previamente ou no local da disposição. Já a disposição compartilhada é quando os materiais são dispostos no mesmo local, no entanto, não há mistura do rejeito com estéril (PEIXOTO, 2012). As vantagens que essa metodologia de disposição apresenta são: melhoria da resistência e drenagem do rejeito e redução do volume e impactos ambientais. No entanto, apresenta como desvantagem a necessidade de um maior controle operacional, implicando em custos elevados, já que a disposição de estéril e rejeito pode comprometer a estabilidade do depósito. Além disso, o impacto ambiental que pode ser ocasionado se o rejeito for tóxico ou quimicamente ativo (SILVA, 2014; PAIXÃO, 2019).

2.3 Tecnologias para Redução do Teor de Umidade

Com as exigências para reduzir os impactos gerados na disposição dos rejeitos no meio ambiente e dispô-los de forma segura, técnicas que objetivam a redução do seu teor de umidade têm crescido. Nesse sentido, para a realização do desaguamento do rejeito, algumas tecnologias têm sido empregadas e apresentando-se eficientes, como: uso de espessadores de alta densidade; filtração a vácuo (rejeitos grossos) e sob pressão (rejeitos finos) e centrifugação. Além disso, o desenvolvimento de floculantes para utilização no espessamento e filtração auxiliam na eficiência do processo de desaguamento (TESSAROTTO, 2015).

Segundo Tessarotto (2015) para definição da técnica de desaguamento a ser aplicada deve ser definido inicialmente o teor de sólidos ideal para compactação dos rejeitos, ângulo de talude do depósito de rejeitos, como também, deve ser considerado estudos de estabilidade, índices pluviométricos, chuvas torrenciais, entre outros aspectos.

2.4 Qualidade da Água para Reutilização na Mineração

A água é um elemento importante nas atividades da mineração, principalmente para o processamento mineral. Sendo a sua disponibilidade um dos requisitos básicos para esse processo e para a escolha da localização da usina de beneficiamento em função da disponibilidade da água (SAMPAIO, 2010).

A reutilização da água no processo vem sendo estimulada, visando a redução do impacto da mineração sobre o meio ambiente (HESPANHOL, 1997 apud OLIVEIRA, 2001). No entanto, o processamento mineral e as atividades de lavra podem acarretar na poluição de águas superficiais e subterrâneas, sobretudo, quando não há um controle das operações envolvidas (OLIVEIRA, 2001).

Nesse contexto, a água é tratada para minimizar custos operacionais, recuperar reagentes quando for de interesse, reduzir quantidade de efluentes lançados no meio ambiente e minimizar necessidade de captação de água nova, como também, o custo envolvido nesse processo (SAMPAIO, 2010). Assim, para a reciclagem e reaproveitamento da água em outros processos na mineração, o monitoramento da qualidade desta é imprescindível.

No entanto, como Sampaio et al. (2010) destaca, a qualidade da água a ser aceita como tolerável e benéfica para o processo é algo ainda pouco conhecido nas operações industriais das usinas de beneficiamento mineral. Isso ocorre porque a água que é reciclada precisa ser avaliada e tratada de modo a atender as especificações de cada processo em que for novamente empregada, como por exemplo a flotação. O pH, a concentração iônica e a salinidade são alguns dos fatores considerados e que influenciam no beneficiamento do minério, como também em seu descarte na natureza (SAMPAIO et al, 2010).

Algumas alternativas para o tratamento dessa água de reciclagem podem ser empregados e avaliados de acordo com a finalidade. Dentre esses, destaca-se a biolixiviação e uso de atividade bacteriológica para promover a degradação de alguns componentes químicos presentes na água (SAMPAIO et al, 2010).

3 METODOLOGIA

O estudo foi dividido em seis etapas resumidas na Figura 7. Inicialmente, os materiais utilizados foram preparados e caracterizados. Conhecidas suas propriedades físicas, idealizou-se o protótipo de empilhamento e executou-se o estudo piloto de dosagem das misturas, através da moldagem de corpos de prova prismáticos. Posteriormente, procedeu-se com a construção dos modelos de

empilhamento que foram, ao final, analisados sob aspectos quantitativos e qualitativos.

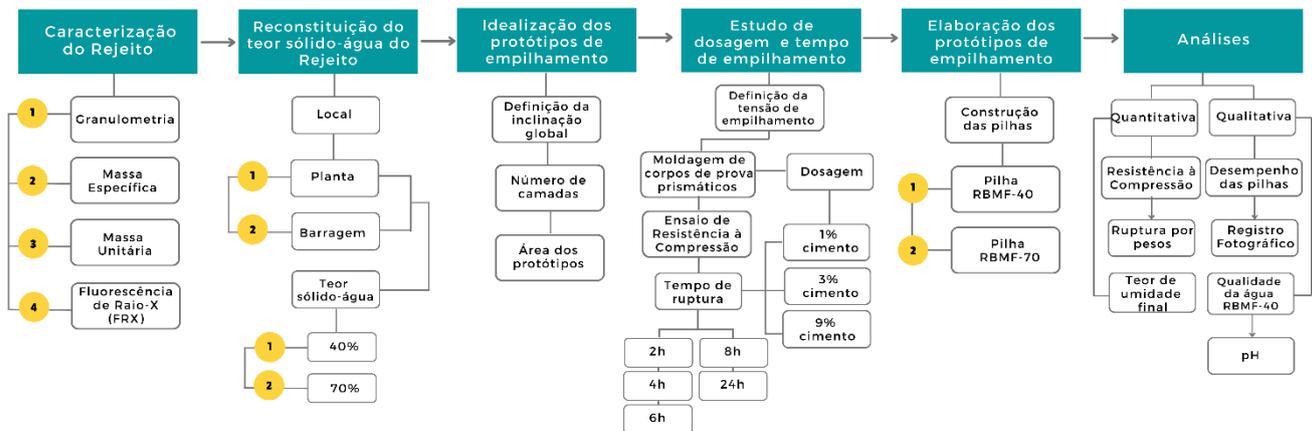
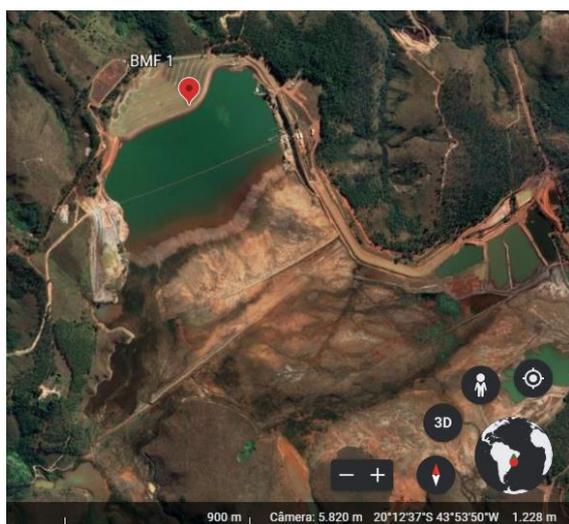


Figura 7 – Fluxograma das etapas do estudo proposto.

3.1 Materiais

Para a elaboração dos modelos de empilhamento foi escolhido o cimento Portland CP V-ARI, alta resistência inicial. Esse cimento foi escolhido a fim de garantir aos modelos maior resistência inicial em baixas idades. O material possui massa específica de $3,12 \text{ g/cm}^3$ e massa unitária de $0,80 \text{ g/cm}^3$. Além disso, foi utilizado o cloreto de sódio (NaCl) para acelerar as reações de hidratação do cimento Portland na mistura, contribuindo com o endurecimento e enrijecimento da matriz, evidenciado no trabalho de MATIAS (2022).

Quanto ao rejeito utilizado, foram adotados dois tipos de rejeitos de barragem de minério de ferro, denominados RBMF. Os rejeitos são provenientes de barragens de minério de ferro localizadas nos municípios de Itabirito e Mariana. A Figura 8a e Figura 8b mostram a localização das barragens denominadas BMF 1 e BMF 2.



(a)



(b)

Figura 8 – (a) BMF 1 localizada em Itabirito (Google Earth); (b) BMF 2 localizada em Mariana (Google Earth).

Sabe-se que o RBMF pode possuir características físicas, mineralógicas e químicas distintas dependendo do processo de beneficiamento que o minério é submetido. Assim, a escolha desses dois tipos de rejeitos permitiu avaliar o comportamento do RBMF com características distintas dispostos em pilhas.

3.2 Caracterização dos Rejeitos (RBMF)

Os rejeitos (RBMF) foram caracterizados quanto a sua composição granulométrica com auxílio de peneiras (NBR NM 248), massa específica (NBR NM 52), massa unitária (NBR NM 45) e composição química por fluorescência de raio-X (PANalytical Epsilon3x). A caracterização desses parâmetros é importante para avaliar a melhor dosagem e auxiliar no entendimento do comportamento do rejeito na situação de empilhamento quando adicionado o cimento Portland.

3.3 Reconstituição dos Rejeitos (RBMF)

Para proceder com a elaboração dos protótipos de empilhamento foi importante reconstituir o teor sólidos-água do RBMF, visto que a umidade desse foi alterada durante o seu fornecimento. Duas condições foram adotadas, teor de sólido-água de

40% para simular o RBMF no seu lançamento na barragem e teor de sólido-água de 70% para simular o RBMF já adensado na estrutura. A Tabela 1 apresenta as informações do teor sólido-água e a barragem de origem de cada rejeito.

Tabela 1: Tipo de RBMF e teor sólidos-água

Nomenclatura	Teor de sólidos	Teor de água	Barragem (origem)	Cenário
RBMF- 70	70%	30%	BMF 1	Rejeito já adensado na Barragem
RBMF- 40	40%	60%	BMF 2	Rejeito sendo lançado na Barragem

A escolha dos rejeitos e sua barragem de origem para representar cada condição se deu pela característica predominante de cada rejeito. Entende-se que o RBMF1 (derivado de BMF1) e o RBMF2 (derivado de BMF2) apresentam características físicas e mineralógicas distintas, visto que são provenientes de barragens diferentes a qual o processo de beneficiamento diferem-se entre si. Assim, os rejeitos foram submetidos a um processamento, para assegurar as suas características mais próximas das condições definidas, apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Processamento dos rejeitos

Rejeito	Processamento
RBMF- 70	O rejeito foi inicialmente exposto por 48h em lâmpadas UV. Posteriormente, seco em estufa a 100° C por 24 horas. E, por fim, destorroado com auxílio de soquetes até obter material passante na peneira de abertura 1,18 mm.

RBMF- 40	<p>O rejeito foi lavado para retirada do material pulverulento (passante na peneira #200) para obtenção de um rejeito com característica mais arenosa. Posteriormente, exposto por 48h em lâmpadas UV e seco em estufa a 100° C por 24h.</p>
----------	--

3.4 Idealização dos Protótipos das Pilhas

Com o objetivo de construir um protótipo de pilha de rejeito (PDR) determinou-se as dimensões do modelo pensando no pior cenário em termos de estabilidade e na sua viabilidade de fabricação, com uma inclinação global de 45° (valor conservador em relação ao ângulo de 20° à 30° aplicado convencionalmente). O modelo foi idealizado com empilhamento em quatro camadas com altura constante e sem um sistema de drenagem interna. Isso porque buscou-se avaliar a influência do cimento na condição mais desfavorável para a estabilidade da estrutura. A Figura 9a e a Figura 9b apresentam a vista frontal e superior do protótipo com as medidas adotadas.

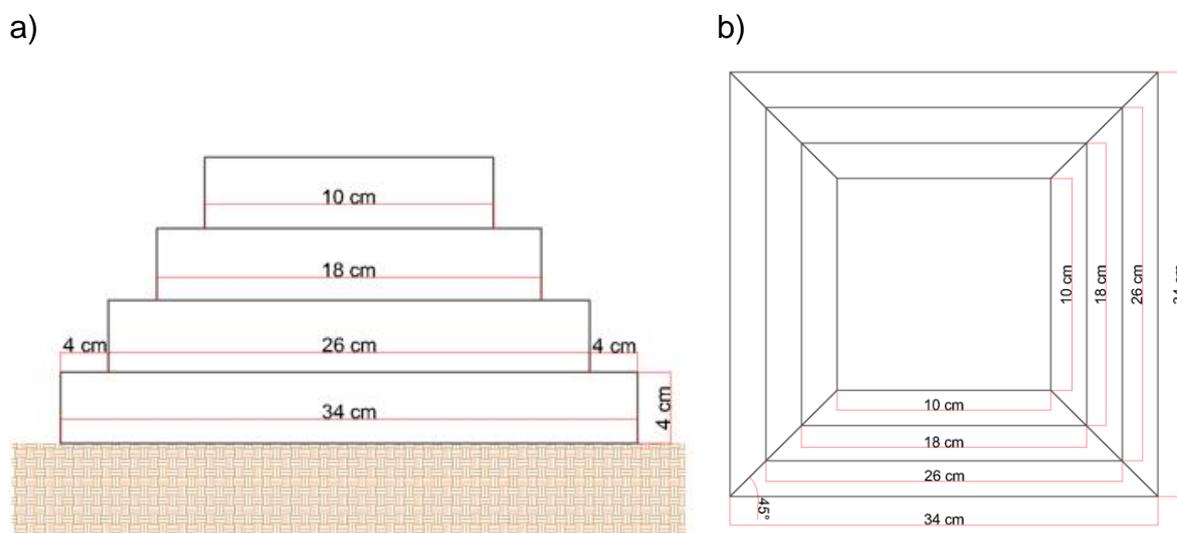


Figura 9 – a) Vista frontal; b) Vista superior do Protótipo.

O molde de cada camada da pilha foi produzido com tábuas de madeira pinus com espessura de 2 cm nas dimensões, apresentadas na Figura 9. Pregos e elásticos foram utilizados para conexão de uma madeira a outra. A Figura 10 apresenta um dos moldes e como foi realizada a conexão das placas.



Figura 10 – Molde da 1ª camada do protótipo da pilha

3.5 Estudo Piloto de Dosagem e Tempo de Empilhamento

Para definir a dosagem ideal de cimento Portland e o tempo de empilhamento necessário foi realizado um estudo piloto. O objetivo do estudo piloto é determinar a resistência a compressão das misturas de RBMF com cimento Portland, ao longo do tempo, permitindo determinar o momento que seria alcançada uma resistência igual a tensão de empilhamento. A tensão de empilhamento foi definida como a tensão que a primeira camada da pilha precisa suportar para que a camada subsequente consiga ser empilhada (Figura 11), a mesma foi calculada a partir das dimensões definidas para os protótipos das pilhas.

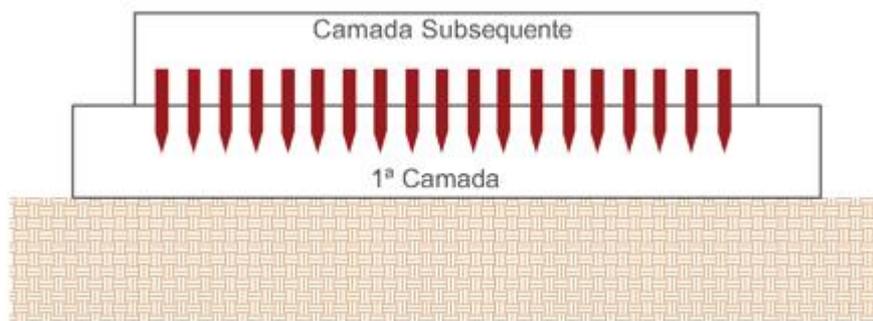


Figura 11 – Esquema representativo da tensão de empilhamento.

A Equação 1 apresenta o cálculo realizado para determinar a massa que o rejeito ocupa em cada camada:

$$D = \frac{M}{V} \therefore$$

$$\text{Massa rejeito} = \text{Densidade} \times \text{Volume (camada)} \therefore$$

$$\text{Massa rejeito} = \text{Massa específica} \times \text{Volume (camada)}$$

Equação 1: Cálculo da massa de RBMF por camada

Após o cálculo da massa de RBMF, procedeu-se com o cálculo da tensão de empilhamento. A Equação 2 apresenta a relação utilizada para obtenção das tensões em cada camada:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{\text{Massa rejeito} \times \text{gravidade}}{\text{área da base (por camada)}}$$

Equação 2: Cálculo da tensão de empilhamento

A tensão de empilhamento foi determinada e está apresentado na Tabela 3. Para cálculo da tensão de empilhamento, procedeu-se primeiramente com a determinação da tensão que cada camada da pilha realiza, a partir da massa de rejeito ocupada e as dimensões dessas camadas (ver Equação 2). Como a primeira camada precisa suportar a tensão inicial imposta pela camada subsequente (ver Figura 11), a

tensão de empilhamento foi considerada como sendo o resultado da 2ª camada, sendo igual a 9,33 KPa.

Tabela 3: Tensão de empilhamento

Camada	Tensão que a camada realiza (Pa)	Tensão de Empilhamento (KPa)
1ª	12.195,12	9,33
2ª	9.325,68	6,46
3ª	6.456,24	3,59
4ª	3.586,8	-

Para isso, foram moldados corpos de prova 4x4x16 cm que após o período de cura foram seccionados em corpos de prova de 4x4x4 cm. Foram utilizadas as dosagens de cimento Portland de 1%, 3% e 9% em relação ao teor de sólidos do RBMF em massa e todas as misturas tiveram incorporação de 1% de NaCl, em relação à massa de cimento, como aditivo acelerador de pega (MATIAS, 2022). Ressalta-se que em testes exploratórios prévios com uma mistura de apenas RBMF e cimento não foi observado enrijecimento em um período de 24 horas, por isso a incorporação do aditivo acelerador de pega.

Os corpos de prova foram curados ao ar, nos períodos de 2h, 4h, 6h, 8h e 24h. Com a finalidade de comparação, foram moldados corpos de prova sem cimento (referência). Para sua identificação, os corpos de prova foram nomeados baseados no teor de sólidos do RBMF, seguido da dosagem de cimento e o tempo de cura. Para os corpos de prova de referência, o termo REF foi adotado para identificar que não houve adição de cimento. A Figura 12 apresenta o modelo de nomenclatura adotada.



Figura 12 – Modelo de nomenclatura adotada para os corpos de prova

A moldagem foi realizada em um balde metálico com o auxílio de um marteleto da marca Dewalt e hélice de metal para mistura e homogeneização. A Figura 13 apresenta a sequência de moldagem adotada.



Figura 13 – Sequência de moldagem adotada.

Os moldes utilizados não eram hermeticamente fechados. Para observar se os corpos de prova perdiam água, foi registrado com auxílio de uma balança com precisão de 5g o peso total do conjunto (molde + mistura do RBMF) no início da moldagem e ao fim do período de cura quando foram desmoldados. Assim, ao final foi determinado a perda de água de cada corpo de prova.

Ao atingir cada tempo de cura, a resistência mecânica dos corpos de prova foi determinada por compressão axial com ruptura em prensa servo controlada (EMIC DL 20000, com célula de carga de 5 kN) com taxa de carregamento 35 N/s até a ruptura com critérios de parada definidos em função do deslocamento. Com os resultados dos ensaios foram plotados gráficos da força aplicada (N) versus tempo (s) de cada corpo de prova. A partir dos gráficos, foi possível determinar a força média que cada corpo de prova foi submetido ao longo do ensaio de compressão.

Com a determinação da força média e conhecendo-se a seção dos corpos de prova submetidos a ruptura (8 corpos de prova de 4x4x4 cm) determinou-se, então, a tensão em cada corpo de prova. A Equação 3 descreve o cálculo realizado para a determinação dessas tensões:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{\text{força média aplicada}}{\text{área do corpo de prova}}$$

Equação 3: Cálculo da tensão nos corpos de prova (KPa)

Posteriormente, foi calculado a tensão média de cada traço por tempo de cura e plotado em gráficos de tensão (KPa) versus tempo (horas). Com o auxílio desses gráficos e a tensão de empilhamento, foram determinado os traços e tempo de empilhamento para as pilhas. O critério de escolha foi adotar traços com menor teor de cimento Portland para o tempo de cura em que a tensão do corpo de prova foi superior à tensão de empilhamento.

3.6 Moldagem dos Protótipos das Pilhas

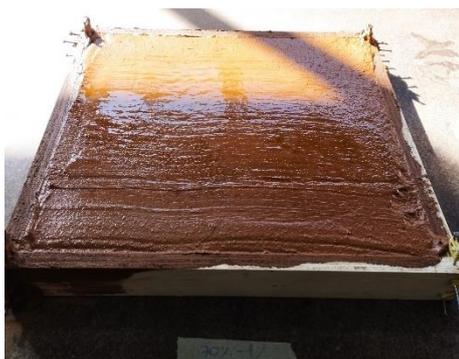
O processo de empilhamento consistiu em moldar a primeira camada e aguardar o tempo de empilhamento. Ao fim desse período, o molde utilizado para empilhar a primeira camada foi retirado. Procedeu-se com o posicionamento do molde da segunda camada e empilhamento da segunda camada. Esse processo foi repetido até finalizar as 4 camadas.

Para o RBMF-70, a moldagem foi realizada despejando o rejeito na camada. Pela sua consistência, representativo do rejeito na barragem, não foi necessário compactação, apenas o despejo do mesmo. Ao preencher cada camada o mesmo foi rasado com auxílio de uma espátula para retirada de excessos de material e regularização da camada.

O RBMF-40 apresenta um teor de água elevado, representativo da condição do rejeito sendo lançado na barragem, e o protótipo de pilha não possui um sistema de drenagem interno. Então, para moldagem aguardou-se um período para a decantação parcial da mistura de RBMF com cimento, permitindo retirar o excesso de água e procedendo-se com a moldagem de forma similar ao RBMF-70. Esse procedimento

foi adotado, pois a água era rapidamente escoada. Assim, foi necessário retirar seu excesso para não comprometer o empilhamento devido ao carregamento excessivo de sólidos. Parte da água liberada foi coletada para posterior análise da qualidade da água.

A Figura 14a e Figura 14b apresentam a moldagem da primeira camada de cada pilha.



(a)



(b)

Figura 14 – (a) Moldagem da 1ª camada da pilha RBMF-70; (b) Moldagem da 1ª camada da pilha RBMF-40

3.7 Caracterização das Pilhas

As pilhas foram caracterizadas em aspectos qualitativos (desempenho do empilhamento e qualidade da água – pilha RBMF-40) e quantitativos (resistência e teor de umidade final).

3.7.1 Análise Qualitativa

3.7.1.1 Desempenho do Empilhamento

Para avaliar o desempenho das pilhas foi realizado o registro fotográfico de cada camada ao longo do empilhamento. Esse registro realizado em vários ângulos, com auxílio de uma câmera de celular de 5 MP, buscou avaliar aspectos qualitativos que evidenciam ou não o melhor desempenho do rejeito quando associado ao cimento.

Os aspectos avaliados foram:

- Textura;
- Superfície;
- Formação de trincas; e
- Homogeneidade.

3.7.1.2 Qualidade da Água – Pilha RBMF-40

A pilha RBMF-40, cujo teor sólido-água é de 40%, representa o cenário do rejeito sendo lançado na barragem. Essa condição apresenta grande quantidade de água (60%) e requer um sistema de drenagem para retirada da água liberada pelos poros do rejeito.

Para a mineração, essa água liberada e drenada pelo sistema interno de drenagem, apresenta-se como uma possibilidade de reaproveitamento em outros processos dentro de uma planta de produção, desde que seja viável sua utilização nos processos de beneficiamento. Dessa forma, buscou-se avaliar a qualidade da água das pilhas de RBMF-40, através do ensaio do potencial hidrogeniônico (pH), que indica a acidez, neutralidade ou alcalinidade de uma solução.

O ensaio de pH foi realizado com o auxílio de um peagâmetro que mede em um intervalo de tempo o pH da solução em análise com auxílio de um eletrodo de referência introduzido na solução. Assim, foram analisadas amostras da água retirada das pilhas RBMF-40. O valor registrado pelo equipamento foi anotado e realizado uma média entre as amostras.

3.7.2 Análise Quantitativa

3.7.2.1 Resistência à Compressão

A fim de avaliar a resistência mecânica, as pilhas foram submetidas a ruptura com auxílio de alguns pesos de valor conhecido. O ensaio foi realizado após a cura da última camada de cada pilha e consistiu em acrescentar a cada 30 segundos um peso fixo sobre a última camada até o surgimento de fissuras e ruptura.

A primeira etapa do ensaio consistiu em descobrir o peso inicial e o acréscimo de peso que deveria ser feito ao longo do ensaio. Dessa forma, conhecendo a tensão de

empilhamento (kgf/cm²) e a área da última camada (cm²), foi determinado o peso inicial de ruptura. A Equação 4 apresenta o cálculo realizado para descobrir o peso:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{\text{Massa} \times \text{gravidade}}{\text{área da base (4ª camada)}}$$

∴

$$\text{Massa} = \frac{\sigma_{\text{empilhamento}} \times \text{Área}_{4^{\text{ª}} \text{ camada}}}{g}$$

Equação 4: Cálculo do peso inicial de ruptura

Assim, o peso inicial, como também, o acréscimo ao longo do ensaio foi estimado em aproximadamente 1 kg. Posteriormente, realizou-se a aferição dos pesos que foram utilizados e a separação dos conjuntos de ruptura, de modo que ocorresse sempre o acréscimo fixo de 1 kg.

Nessa etapa, determinou-se, também, que o primeiro conjunto de peso (igual a 1 kg) ficaria sempre fixo na última camada ao longo dos acréscimos. Dessa forma, foi possível garantir a aplicação de peso sob toda área da 4ª camada (10 x 10) cm. A Figura 15a apresenta a base fixa de 1 kg que foi utilizada e a Figura 15b mostra o ensaio sendo realizado com peso igual a 18 kg.

a)



b)



Figura 15 – a) Peso fixo de 1 kg; b) Ensaio de ruptura com peso igual a 18 kg.

Durante o ensaio, foram registrados o tempo e o peso correspondente ao aparecimento de fissuras e/ou a ruptura das pilhas. O fim do ensaio se deu com a ruptura dos modelos.

Adicionalmente, foi gravado com auxílio de uma câmera GoPro toda a realização do ensaio para cada pilha com o objetivo de registrar os movimentos de recalque e a ruptura dos modelos.

3.7.2.2 Teor de Umidade Final

O teor sólido-água é um fator importante na disposição de rejeitos, visto que a água é o fator de instabilidade nessas estruturas. Assim, buscou-se avaliar a redução do teor de umidade promovida pela incorporação do cimento Portland e a sua contribuição para o melhor desempenho estrutural da pilha. Para isso, foi utilizado o ensaio de teor de umidade pelo método da estufa, conforme NBR 6457/86.

Para a execução do ensaio foram retiradas duas amostras da 1ª camada e duas amostras da 4ª camada de cada uma das pilhas, ao final do ensaio de resistência. A massa das cápsulas e do conjunto (cápsula + RBMF) foram registradas e levadas para a estufa por 24 horas.

Ao final do ensaio, as cápsulas foram retiradas da estufa e pesadas para o cálculo do teor de umidade. A Equação 5 apresenta o cálculo realizado:

$$w (\%) = \frac{M_W}{M_S} \therefore$$
$$w (\%) = \frac{m_i - m_f}{m_f - m_c}$$

Equação 5: Cálculo do teor de umidade

Onde: m_i = massa da cápsula com rejeito úmido;

m_f = massa da cápsula com rejeito seco;

m_c = massa da cápsula.

Adicionalmente, para determinar o teor de umidade que a pilha RBMF-40 teve ao ser empilhada, após a decantação do rejeito e retirada de parte da água, foi retirado

uma cápsula com amostra do material para determinar o seu teor de umidade. Assim, após 24 horas, o material foi novamente pesado e determinado o teor de umidade da pilha RBMF-40.

4 RESULTADOS

4.1 Reconstituição e Caracterização dos Rejeitos (RBMF)

A Figura 16 apresentam os rejeitos processados para assegurar características próximas as condições estabelecidas (RBMF-40: rejeito lançado na barragem; RBMF-70: rejeito já adensado na barragem). A partir dessa imagem já é possível observar distinção de coloração entre eles.



(a) RBMF-70



(b) RBMF-40

Figura 16 – Processamento dos rejeitos RBMF-70 e RBMF-40

A distribuição granulométrica desses rejeitos é apresentada na Figura 17.

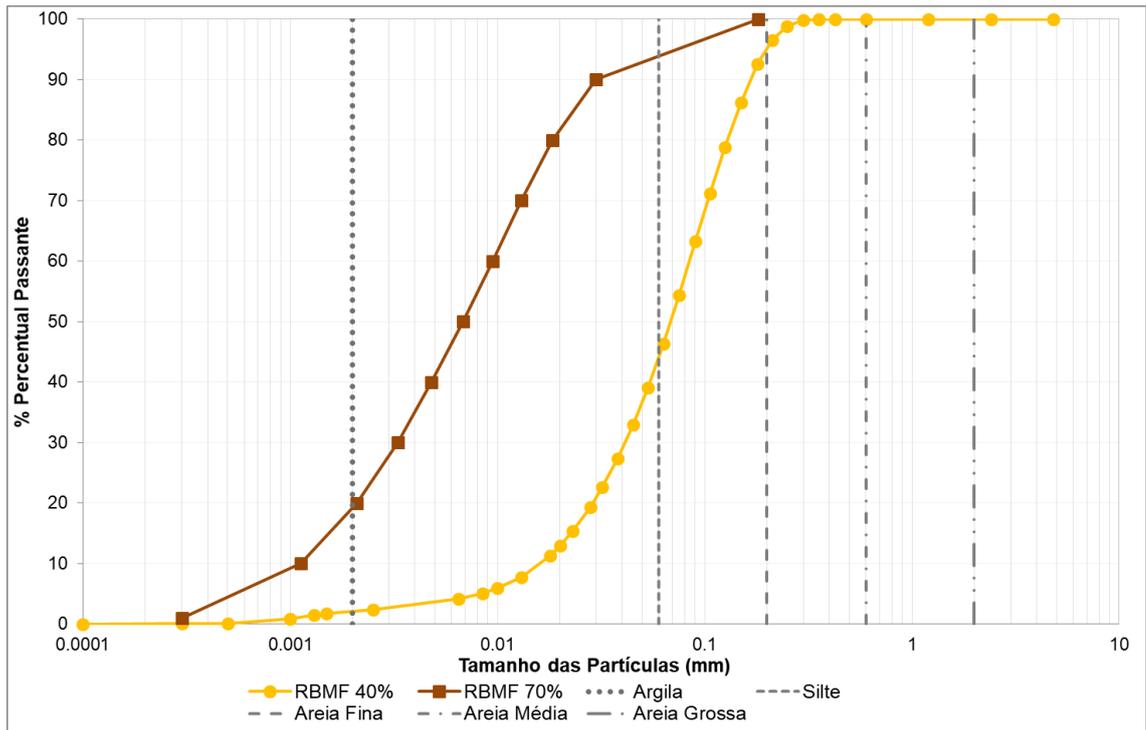


Figura 17 – Distribuição granulométrica dos rejeitos utilizados no estudo.

As demais características físicas e químicas desses rejeitos estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4: Caracterização física e química dos rejeitos

	RBMF 70%	RBMF 40%
Massa Específica (g/cm ³)	3,67	2,70
Massa Unitária (g/cm ³)	1,18	1,73
Composição Química - FRX		
Al ₂ O ₃	8,69%	2,03%
SiO ₂	8,40%	89,83%
Fe ₂ O ₃	71,40%	7,35%

CO ₂	10,0%	0,49%
Outros	1,50	0,31%

Observa-se pelas curvas granulométricas e limites estabelecidos pela NBR 6502 que o RBMF-70 é um rejeito mais fino composto de 20% de argila e cerca de 74% de silte. Já o RBMF-40 é mais arenoso com 2% de argila, 42% de silte e cerca de 54% de areia fina. Com relação as massas específicas, a do RBMF-70 é 26,4% superior à do RBMF-40. Quando analisado a composição química, essa diferença entre os rejeitos fica mais evidente, visto que o RBMF-70 é composto predominantemente por óxido de ferro III (Fe₂O₃), caracterizando-se um rejeito mais ferruginoso que o RBMF-40 que possui predominância de óxido de silício (SiO₂). Por esse motivo, a massa específica do rejeito com 70% de sólidos é maior que a do rejeito com teor de 40%. Salienta-se que a massa específica do RBMF-40 foi obtida após processamento do material, enquanto a composição granulométrica e química foi realizada com o rejeito in natura.

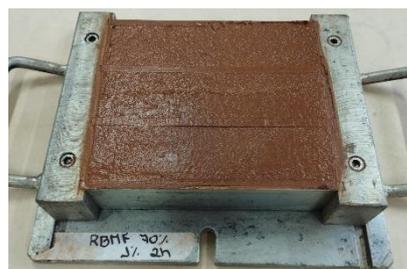
Ressalta-se ainda que, embora os rejeitos sejam provenientes de barragem de minério de ferro, sua composição química, mineralógica e características físicas podem se diferenciar devido ao processo de beneficiamento em que o minério é submetido. Além disso, a formação geológica do local em que é realizada a extração do minério de ferro influencia no processo de beneficiamento e nas características finais dos rejeitos. Assim, analisar o rejeito de forma individual é importante para entender seu comportamento, visando sua disposição final.

4.2 Estudo Piloto - Dosagem e Tempo de Empilhamento

A Figura 18 apresenta um registro fotográfico das moldagens realizadas com período de cura de 2 horas.



a) RBMF-70-REF-2



b) RBMF-70-1-2



c) RBMF-70-3-2



d) RBMF-70-9-2



e) RBMF-40-REF-2



f) RBMF-40-1-2



g) RBMF-40-3-2



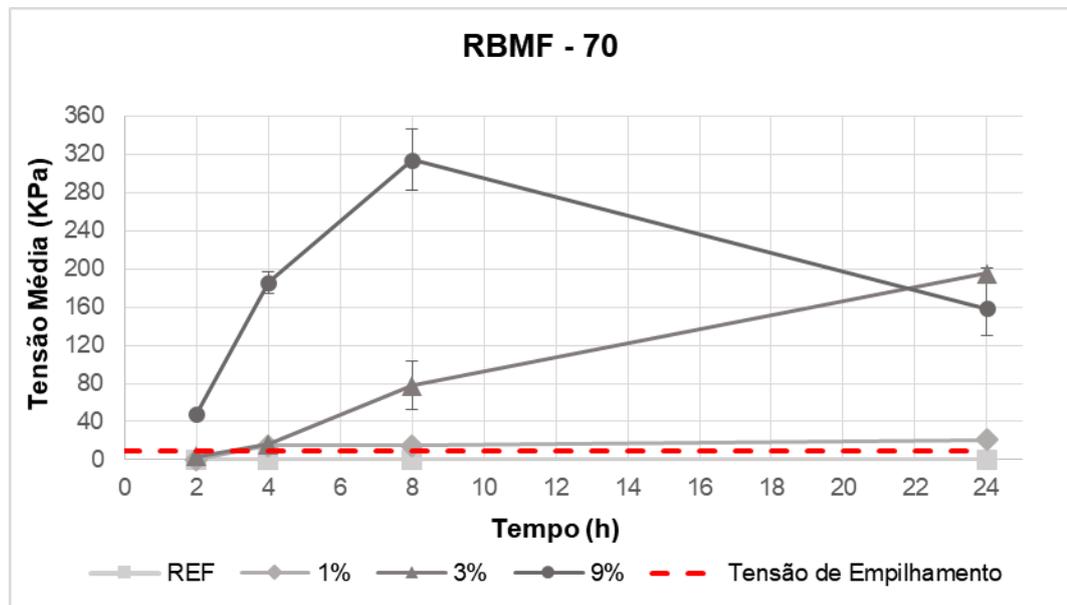
h) RBMF-40-9-2

Figura 18 – Moldagem dos corpos de prova para tempo de cura igual à 2 horas

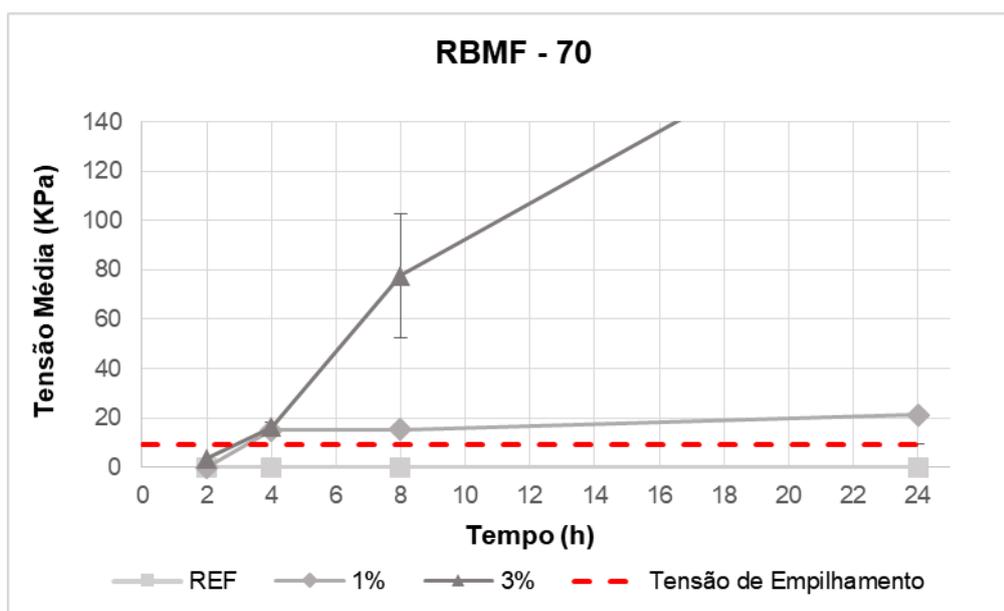
A partir dessas imagens é possível observar que os traços contendo o RBMF-40 possuem excesso de água que se apresenta como um sobrenadante da mistura. Já os traços de RBMF-70, observa-se que o aumento do teor de cimento Portland diminui o aspecto molhado das matrizes.

4.2.1 RBMF-70

A Figura 19 apresenta os resultados da tensão ao longo do tempo dos corpos de prova produzidos com o RBMF-70.



(a) Gráfico sem ampliação



(b) Gráfico com ampliação

Figura 19 – a) Tensão x tempo dos corpos de prova com RBMF-70; b) Gráfico com ampliação para os traços REF, 1% e 3%.

Destaca-se inicialmente que, os resultados dos corpos de prova produzidos para o tempo de ruptura igual a 6 horas foram excluídos da análise por terem apresentado resultados espúrios para todos os traços. Acredita-se que um provável erro no processo de moldagem desses corpos de prova levou os resultados a destoarem dos demais. Assim, esses resultados foram descartados e procedeu-se com a análise para os tempos de ruptura igual a 2, 4, 8 e 24 horas, como destacado no gráfico acima.

O traço RBMF-70-REF (traço de referência) não foi submetido ao ensaio de resistência para nenhum dos tempos de curas estudados. Ao desmoldar os corpos de prova para o ensaio, essas matrizes não apresentavam sinais de endurecimento, não sendo possível realizar o ensaio de compressão. Esse comportamento era esperado, pois trata-se de um rejeito fino, cuja matriz retém água em seus poros, retardando o processo de endurecimento da mesma. Assim, por ser uma matriz que não há adição de cimento, a única forma dela obter resistência é com a saída da água que fica retida em seus poros. A possível fixação da água devido ao tamanho da partícula de RBMF-

70 é confirmada, devido a nenhuma dosagem de cimento Portland ou tempo de cura ter registrado perdas de água pelos corpos de prova. Dessa forma, as matrizes produzidas sem o cimento tiveram tensão igual a zero, demonstrando inviabilidade para o seu empilhamento in natura.

Adicionalmente, o traço RBMF-70-1 atingiu com 4 horas de cura sua tensão máxima, se mantendo constante para os outros períodos. O traço RBMF-70-1 obteve com 4 horas uma tensão média 59,7% superior a tensão de empilhamento. Acredita-se que esse resultado para o traço com teor de 1% de cimento Portland é devido ao baixo teor de cimento combinado ao excesso água disponível no RBMF e a presença do acelerador de pega que possibilita com 4 horas, permitindo o desenvolvimento do máximo potencial de hidratação do cimento incorporado.

Para os traços RBMF-70-3 e RBMF-70-9 foi possível observar tendência de aumento da tensão ao longo do tempo. O traço RBMF-70-3 apresentou uma tensão média 73,6% superior a tensão de empilhamento a partir de 4 horas.

Já o traço RBMF-70-9, observou-se que com 2 horas de cura a matriz registrou uma tensão 419,2% superior à tensão de empilhamento. No período de 24 horas foi registrado uma queda na tensão do RBMF-70-9 comparado ao período de 8 horas, isso pode estar relacionado a questão da moldagem. Mas, destaca-se que apesar da queda, a tensão registrada foi superior a tensão de empilhamento. Dessa forma, os traços com exceção do RBMF-70-REF apresentaram viabilidade para o empilhamento.

A Figura 20 apresenta o resultado das moldagens do RBMF-70 para o tempo de 8 horas.



RBMF-70-REF-8



RBMF-70-1-8



RBMF-70-3-8



RBMF-70-9-8

Figura 20 – Corpos de prova RBMF-70 no tempo de 8 horas

Observa-se que o traço de referência (RBMF-70-REF-8) tende a recalcar no processo de desmolde, evidenciando que a matriz não possui resistência. Além disso, quando comparada aos traços com adição de cimento, observa-se que o RBMF-70-REF possui aspecto mais úmido que os demais traços. Isso porque o cimento consome parte da água disponível nas matrizes nas suas reações de hidratação, o que não acontece na matriz de referência. Ademais, para os demais traços, o cimento contribui para a estabilidade das matrizes, visto que essas apresentam sinais de endurecimento e ganho de resistência.

De forma geral, observa-se então que o aumento da incorporação de cimento Portland promove melhora no desempenho mecânico das matrizes. Além disso, nota-se que o NaCl contribui para que as matrizes se apresentem mais estáveis ao final do tempo de cura.

Assim, para o protótipo da pilha RBMF-70 o traço escolhido foi o 1% de teor de cimento Portland no tempo de empilhamento de 4 horas (RBMF-70-1-4). A justificativa

para essa escolha é pelo menor consumo de cimento e um tempo mínimo em que a tensão supera à tensão de empilhamento.

Ressalta-se que, o menor consumo de cimento é economicamente vantajoso para a disposição dos rejeitos, considerando a alta geração de RBMF e a minimização dos custos para sua disposição na forma empilhada, que já se apresenta como uma desvantagem como visto anteriormente nos itens 2.2.2 e 2.2.3. Além disso, conseguir empilhar o rejeito em um menor tempo pode representar um ganho para as mineradoras que precisam dispor seus rejeitos de forma segura e rápida.

4.2.2 RBMF-40

Assim como para o RBMF-70, os resultados para o tempo de ruptura igual a 6 horas foram descartados da análise, por apresentarem dados anômalos devido à um provável erro no processo de moldagem. Dessa forma, os resultados foram avaliados para o tempo de 2h, 4h, 8h e 24h.

A Figura 21 apresenta os resultados da tensão dos corpos de prova produzidos com o RBMF-40.

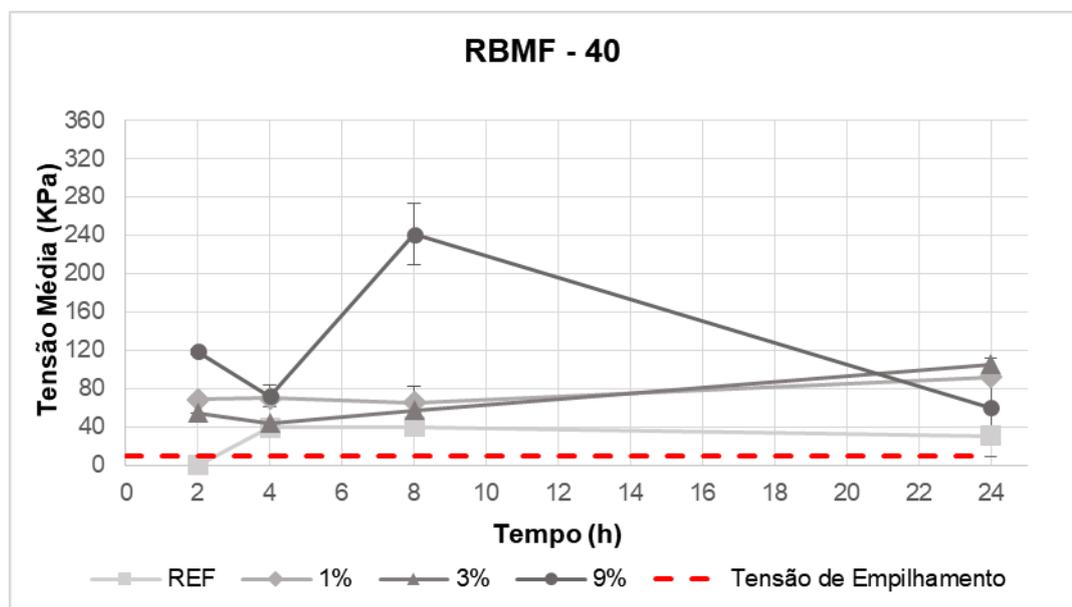


Figura 21 – Tensão x tempo dos corpos de prova com RBMF-40

O traço RBMF-40-REF teve um comportamento diferente do RBMF-70-REF e foi submetido ao ensaio de resistência à compressão. Essa diferença se deve ao fato do RBMF-40 ser mais arenoso e possuir uma permeabilidade maior que o RBMF-70, o que possibilita a saída da água dos poros da matriz, ocasionando no ganho de resistência. Assim, observou-se que após 2 horas houve um aumento na tensão e um comportamento quase constante desta. Dessa forma, com 4 horas o traço apresentou tensão média 317,6% superior à tensão de empilhamento.

O traço RBMF-40-1 apresentou um comportamento constante nas primeiras horas e tendência de crescimento da tensão a partir de 8 horas. No entanto, com 2 horas já apresentava uma tensão média 635,3% superior à tensão de empilhamento. Já o traço RBMF-40-3, apresentou a tendência de crescimento da tensão, exceto no período de 4 horas, quando houve uma diminuição desta. Contudo, essa tensão se manteve acima da tensão de empilhamento. Para esse traço, a tensão média foi superior 482,3% à tensão de empilhamento no tempo de 2 horas.

Para o traço RBMF-40-9, observou-se que para o tempo de 4 e 24 horas a tensão diminuiu, apresentando assim comportamento mais instável que os demais traços. No entanto, para todo o tempo analisado a tensão se manteve superior à tensão de empilhamento. Com 2 horas a tensão já era superior 1170% à tensão de empilhamento.

A Figura 22 apresenta o resultado das moldagens do RBMF-40 para o tempo de 8 horas.



RBMF-40-REF-8



RBMF-40-1-8



RBMF-40-3-8



RBMF-40-9-8

Figura 22 – Corpos de prova RBMF-40 no tempo de 8 horas.

Observa-se que o traço de referência (RBMF-40-REF) tende a recalcar, também, no processo de desmolde. No entanto, apresenta-se mais estável que o RBMF-70-REF, por parte da água ter sido liberado da matriz. Contudo, os traços com consumo de cimento apresentam-se mais estáveis que o traço de referência (RBMF-40-REF) e não é notado um aspecto úmido. Isso indica a ação do cimento ao consumir parte da água restante para as reações de hidratação.

Ressalta-se que, o RBMF-40 possui elevado teor de água e grande parte desta foi liberada através dos moldes que não eram hermeticamente fechados. Por essa razão, os corpos de prova apresentam-se com alturas variadas, devido a moldagem e a perda da água ao longo do processo.

No entanto, todos os traços apresentaram viabilidade para serem empilhados. Em geral, a incorporação de cimento Portland promoveu melhora no desempenho mecânico das matrizes de RBMF-40. E o NaCl contribui, também, para que as matrizes se apresentem mais estáveis ao final do tempo de cura.

Portanto, para o protótipo da pilha RBMF-40, o traço escolhido foi o com 1% de consumo de cimento (RBMF-40-1-2) para o tempo de empilhamento de 2 horas. A justificativa para essa escolha, também, é pelo menor consumo de cimento e pelo tempo mínimo em que a tensão supera à tensão de empilhamento. Para fins de comparação, foi escolhido também o traço de referência (RBMF-40-REF-4) para o tempo de empilhamento de 4 horas, visto que o mesmo atingiu nesse tempo a tensão de empilhamento.

Como ressaltado anteriormente, o RBMF-40 liberou grande parte da água presente na sua composição. A Figura 23 apresenta a exsudação (percentual de água perdida) ocorrida em cada traço, em relação a massa inicial da mistura (sólidos + água).

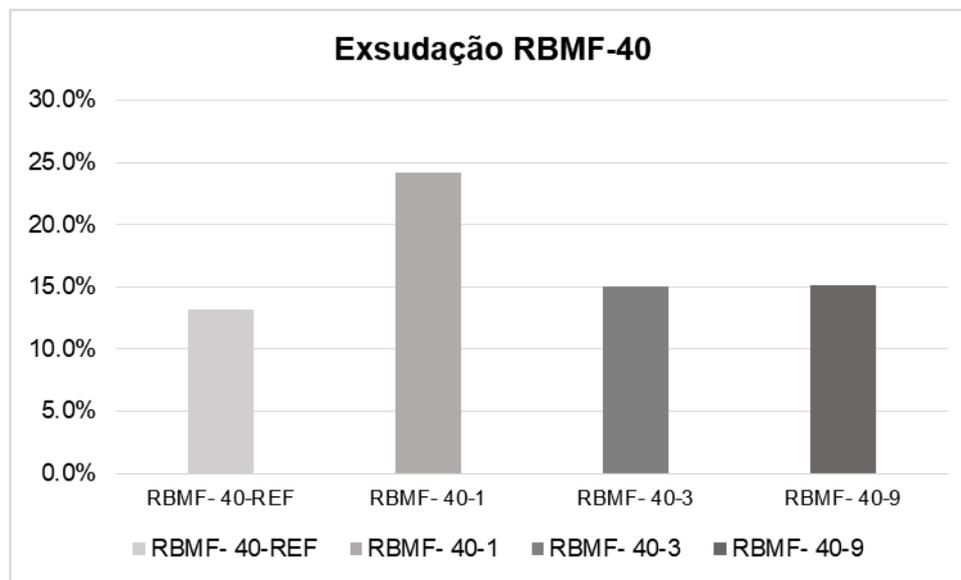


Figura 23 – Exsudação da água presente no RBMF-40

Apesar do RBMF-40-REF ter apresentado menor exsudação, sua massa inicial (1,00 Kg) era menor que os demais traços, devido à variação que cada corpo de prova apresentou pela liberação da água. Dessa forma, com relação a massa inicial observou-se que com o aumento da adição de cimento nas matrizes, a água foi sendo consumida pelo cimento e reduziu a perda de água por exsudação.

Ressalta-se ainda que, embora o traço RBMF-40-1 tenha liberado maior quantidade de água, essa água tem potencial de ser reaproveitada em outros processos da mineração ou destinada a outro local, como uma bacia de contenção.

4.3 Protótipos – Pilhas RBMF

4.3.1 Moldagem e Desempenho das Pilhas

A partir dos resultados do estudo piloto, determinou-se a construção das pilhas de RBMF-70-1, RBMF-40-1 e RBMF-40-REF. A Tabela 5 apresenta as quantidades de material para cada pilha.

Tabela 5: Quantidades das pilhas RBMF-70 e RBMF-40

Traço	Camada	Rejeito (kg)	Água (kg)	Cimento ⁽¹⁾ (kg)	NaCl ⁽²⁾ (kg)
RBMF-70-1-4	1 ^a	11.847	5,077	0,169	0,0017
	2 ^a	6,928	2,969	0,099	0,001
	3 ^a	3,320	1,423	0,047	0,0005
	4 ^a	1,025	0,439	0,015	0,0001
RBMF-40-REF-4	1 ^a	6,770	10,154	-	-
	2 ^a	3,959	5,938	-	-
	3 ^a	1,897	2,846	-	-
	4 ^a	0,586	0,878	-	-
RBMF-40-1-2	1 ^a	6,770	10,154	0,169	0,0017
	2 ^a	3,959	5,938	0,099	0,001
	3 ^a	1,897	2,846	0,047	0,0005
	4 ^a	0,586	0,878	0,015	0,0001
<p>⁽¹⁾ O cimento foi utilizado na dosagem de 1% em relação a massa rejeito + massa da água;</p> <p>⁽²⁾ O NaCl foi utilizado na dosagem de 1% em relação a massa de cimento (MATIAS, 2022);</p>					

4.3.1.1 Pilha RBMF-70-1-4

A pilha RBMF-70-1-4 foi a primeira a ser empilhada com início às 7 horas da manhã e término as 19 horas com a quarta camada sendo empilhada. A Figura 24 apresenta o processo de moldagem de cada camada dessa pilha.



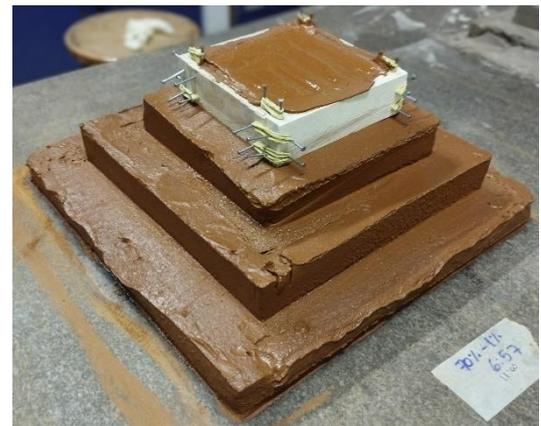
a) 1ª camada – 07:00 h



b) 2ª camada – 11:00 h



c) 3ª camada – 15:00 h



d) 4ª camada – 19:00 h

Figura 24 – Moldagem da pilha RBMF-70-1-4

A Figura 25 a Figura 28 apresentam a evolução do empilhamento por camada.



Figura 25 – Pilha RBMF-70-1-4 - 1ª Camada.



Figura 26 – Pilha RBMF-70-1-4 - 2ª Camada.



Figura 27 – Pilha RBMF-70-1-4 - 3ª Camada.



Figura 28 – Pilha RBMF-70-1-4 - 4ª Camada.

Em geral, a pilha RBMF-70-1-4 teve um bom desempenho ao longo do tempo de empilhamento, suportando o peso das quatro camadas sem sinais de ruptura ou

recalque. Quanto aos aspectos físicos avaliados, a pilha apresentou homogeneidade e consistência semelhante à de uma pasta.

Observou-se o surgimento de uma fissura no centro da primeira camada ao final do seu período de cura. Ao longo do empilhamento não foi notado prolongamento dessa fissura ou surgimento de outras nas demais camadas. Acredita-se que essa fissura surgiu pela maior área da primeira camada, podendo ser resolvido em empilhamento reais com a formação de juntas ao longo do processo de empilhamento.

Ressalta-se que durante o processo de retirada das madeiras algumas camadas acabaram sendo atingidas e por isso são vistas algumas marcas na pilha, como apresentado da Figura 25 a Figura 28. Salieta-se então que, a consistência da pilha ao final de todo empilhamento é ainda como de uma pasta. Acredita-se que as reações de hidratação do cimento ocorram de início e, por isso, a consistência de pasta se mantém ao final do empilhamento. O acréscimo na adição de cimento pode promover o aumento da resistência e uma melhor consistência da pilha. Em geral, a incorporação de cimento influenciou positivamente no comportamento da pilha, contribuindo para que a pilha se mantivesse estável.

4.3.1.2 Pilha RBMF-40-REF-4

A pilha RBMF-40-REF-4 foi a segunda a ser empilhada, iniciando-se às 07h30 da manhã. No entanto, teve somente sua primeira camada empilhada, visto que essa não apresentou resistência mínima capaz de suportar a camada subsequente. A Figura 29 apresenta a moldagem da primeira camada.



a) 1ª camada – 07:30 h



b) 1ª camada – 07:30 h

Figura 29 – Moldagem da pilha RBMF-40-REF-4

A Figura 30 apresenta o resultado da 1ª camada da pilha RBMF-40-REF-4.



Figura 30 – Pilha RBMF 40-REF-4 - 1ª Camada.

No estudo piloto, o traço de referência (RBMF-40-REF) apresentou tensão superior à de empilhamento para o tempo de 4 horas, indicando viabilidade para ser empilhado. No entanto, observou-se que ao empilhar a primeira camada da pilha o traço de referência não apresentava coesão suficiente que permitisse a estabilidade

de pilhas maiores. Isso porque a água presente no RBMF-40 tende a percolar para a base da pilha, formando bolsões na sua estrutura até seu completo escoamento, como pode ser observado na Figura 30. Como o protótipo não contemplava um sistema de drenagem, a água escoou para fora do molde e formou-se três áreas de acúmulo de água que, posteriormente, causaram a instabilidade para empilhar a segunda camada.

Adicionalmente, acredita-se que esse resultado obtido no estudo de dosagem possa ter sido resultado de uma falsa coesão do rejeito. No entanto, para a situação do empilhamento com um volume maior de água, somente o rejeito e água não foram suficientes.

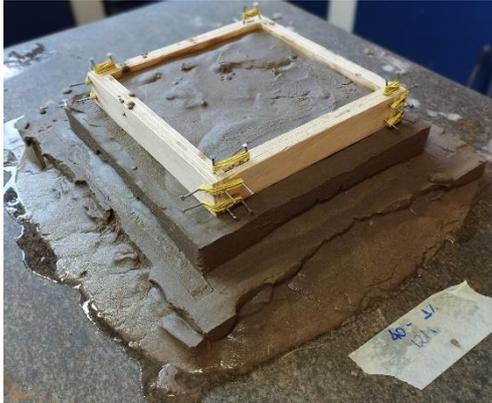
Ressalta-se ainda que, por se tratar de um rejeito mais arenoso ele possui uma característica drenante maior que o RBMF-70, devido à sua maior permeabilidade. Assim, acredita-se que ao empilhar as demais camadas da pilha RBMF-40-REF-4 a primeira camada iria desfazer, devido ao escoamento da água e a instabilidade já apresentada. Portanto, para essa condição (rejeito arenoso com alto teor de água) é necessário um sistema de drenagem interno à pilha para garantir a drenagem de toda água disponível, como destacado no item 2.2.2 que trata sobre o empilhamento drenado.

4.3.1.3 Pilha RBMF-40-1-2

A pilha RBMF-40-1-2 teve início de empilhamento às 12 horas e término as 18 horas com o empilhamento da quarta camada. A Figura 31 apresenta o processo de moldagem da pilha RBMF-40-1-2.



a) 1ª camada – 12:00 h



b) 2ª camada – 14:00 h



c) 3ª camada – 14:00 h



d) 4ª camada – 18:00 h

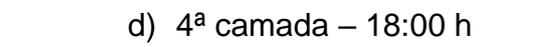


Figura 31 – Moldagem da pilha RBMF-40-1-2.

A Figura 32 a Figura 35 apresentam a evolução do empilhamento por camada.



Figura 32 – Pilha RBMF-40-1-2 - 1ª Camada.



Figura 33 – Pilha RBMF-40-1-2 - 2ª Camada.



Figura 34 – Pilha RBMF-40-1-2 - 3ª Camada.



Figura 35 – Pilha RBMF-40-1-2 - 4ª Camada.

A pilha RBMF-40-1-2, diferente da pilha de referência, pôde ser empilhada. A primeira camada da pilha se manteve íntegra, apresentando capacidade de suportar a camada subsequente. No entanto, observou-se que ao empilhar as camadas subsequentes algumas rupturas e fraturas surgiram na primeira camada em diversos pontos, devido à percolação da água dessas camadas. Além disso, por ser um rejeito arenoso apresenta-se com baixa coesão, contribuindo para o desabamento das laterais da camada após retirada do molde. Salienta-se então que, a drenagem interna da pilha é primordial para que água possa ser escoada de forma adequada, sem comprometer a estabilidade da estrutura. Além disso, é necessário cuidado ao lançar o material na camada para que as camadas da pilha se mantenham íntegras e a drenagem ocorra de forma eficiente.

Quanto ao aparecimento de fissuras longitudinais, diferente da RBMF-70-1-4 a pilha não apresentou tais sinais. Além disso, pela característica drenante do rejeito, nenhuma película de água foi formada sobre as camadas. Observou-se ainda que, a consistência final da pilha era como de uma massa sólida e rígida.

Dessa forma, apesar do ocorrido com a primeira camada e a necessidade de um sistema de drenagem, a pilha suportou o peso das camadas se mantendo íntegra da 2ª camada em diante. Assim, a incorporação do cimento Portland contribuiu para que o rejeito pudesse ser empilhado.

4.3.2 Resistência

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos no ensaio de ruptura das pilhas.

Tabela 6: Ruptura das Pilhas RBMF 40-1% e RBMF 70-1%

Pilha	Tipo de Ruptura	Tensão equivalente (KPa)
RBMF-40-1-2	Fissuração	76,90
	Ruptura Total	192,20
RBMF-70-1-4	Ruptura Total	28,80

A pilha RBMF-40-1-4 foi submetida ao ensaio de ruptura após o período de 8 horas, equivalente a cura das quatro camadas. Durante o ensaio, a 4ª camada apresentou uma fissura quando colocado o peso de 8 kg. Após a fissura ocorrer e os pesos serem acrescidos, foi observado o aumento gradual desta e o recalque da quarta camada. A Figura 36 apresenta a evolução da fissura observada.



Figura 36 – Fissura da pilha RBMF-40-1-2 - 4ª Camada.

Com 20 kg, tensão equivalente de 192,2 KPa (2 kgf/cm²), a pilha apresentou um recalque diferencial significativo na última camada. Com isso, o ensaio foi interrompido, visto que se considerou a ruptura local da última camada.

A Figura 37 apresenta a pilha ao final do ensaio.



Figura 37 – Pilha RBMF-40-1-2 ao final do ensaio de ruptura.

A pilha RBMF-70-1-4 foi submetida ao ensaio de ruptura após o período de 16 horas, equivalente ao tempo de cura das quatro camadas. Com o peso de 3 kg e

tensão equivalente à 28,8 KPa (0,3 kgf/cm²), ocorreu o deslizamento do peso posicionado na quarta camada que, conseqüentemente, ocasionou na instabilidade das demais camadas da pilha. A Figura 38 apresenta a pilha rompida ao final do ensaio.



Figura 38 – Pilha RBMF-70-1-4 ao final do ensaio de ruptura.

Sabe-se que um solo arenoso pouco compacto apresenta tensão admissível variando entre 1,0 e 2,0 kgf/cm². Para um solo argiloso de consistência mole essa tensão varia entre 0,30 à 0,60 kgf/cm² (LIMA, 1979). Dessa forma, observou-se que, a pilha RBMF-40-1-2 apresenta uma resistência equivalente à um solo arenoso pouco compacto e a pilha RBMF-70-1-4 equivalente à um solo argiloso mole.

Ressalta-se ainda que, embora a pilha RBMF-70 tenha resistido a uma menor tensão (28,8 KPa), a pilha apresentou um bom desempenho mecânico, visto que a tensão de empilhamento foi suportada (9,33 KPa \approx 1 kg) e a tensão resistida foi de, aproximadamente, três vezes superior à tensão de empilhamento.

Portanto, as pilhas de RBMF com adição de cimento tiveram bom desempenho mecânico, ainda que não houvesse um sistema de drenagem, obtendo tensões equivalentes a solos arenosos e argilosos. Isso evidencia que o cimento contribui para o aumento de resistência mecânica da matriz, principalmente, comparado aos de referência que não apresentaram resistência suficiente para serem empilhados.

4.3.3 Teor de Umidade Final

A Figura 39 apresenta os resultados obtidos para o teor de umidade final das pilhas. Através desta, é possível observar a evolução do teor de umidade da 1ª camada para a 4ª camada de cada pilha, como também, o teor médio que cada uma das pilhas obteve ao final do empilhamento.

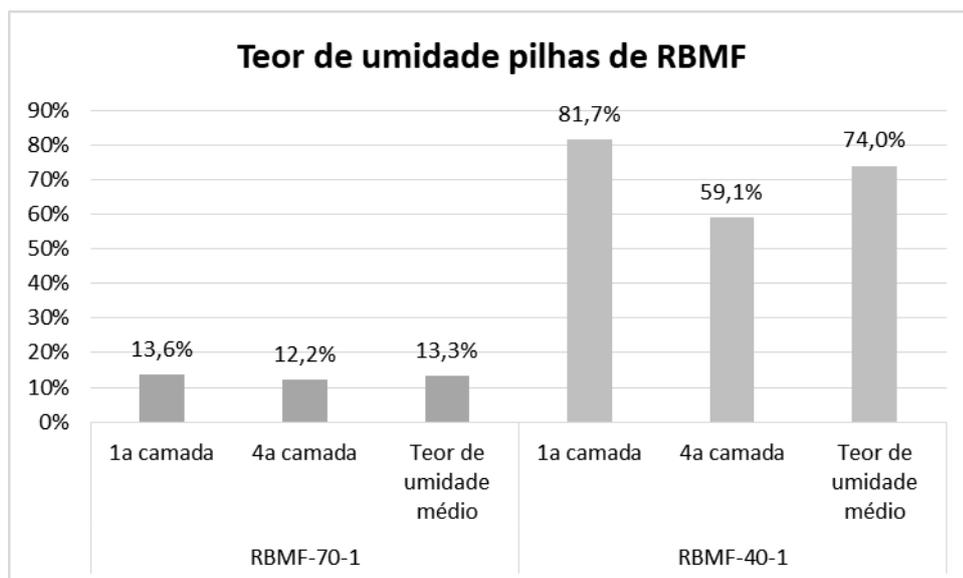


Figura 39 – Teor de umidade das pilhas RBMF

Para a pilha RBMF-70-1-4, cujo teor de umidade inicial era de 30%, foi observado a redução do teor de umidade na matriz. Ao final do processo, o teor médio da pilha era 55,6% menor que o teor inicial. Além disso, entre a primeira e última camada houve também a redução do teor de umidade. Dessa forma, o cimento contribuiu para diminuir o teor sólido-água do rejeito, auxiliando no seu desempenho.

Como destacado no item 3.7.2.2, a pilha RBMF-40 teve seu teor de umidade reavaliado, visto que o teor inicial de 60% de água não era representativo da moldagem devido ao processo de decantação. Assim, o teor de umidade inicial registrado para a pilha RBMF-40, após sua moldagem, foi de 29,8%.

Sendo assim, para a pilha RBMF-40-1-2 observou-se um aumento significativo em seu teor de umidade final, apresentado média de 74,0%. Além disso, a primeira

camada teve maior teor de umidade quando comparado a última camada. Esse resultado não era esperado, visto que o teor de água na pilha reduziu, devido ao processo de empilhamento. Dessa modo, esse resultado deve ser reavaliado, através de novos ensaios de empilhamento e teor de umidade, a fim de compreender o resultado e a influência do cimento na redução ou não do teor de umidade de rejeitos arenosos.

Dessa forma, aparentemente o cimento não contribuiu para redução do teor de umidade nesse tipo de empilhamento (RBMF-40-1). Para que fosse melhor avaliado a influência do cimento, é necessário a simulação de um sistema de drenagem interno à pilha para que a água possa ser retirada e todas camadas apresentem o mesmo grau de saturação.

4.3.4 Qualidade da Água – RBMF 40%

Com as amostras de água retiradas das pilhas RBMF-40-REF e RBMF-40-1 foi determinado o pH da água referente à cada pilha. A Figura 40 apresenta os resultados obtidos.

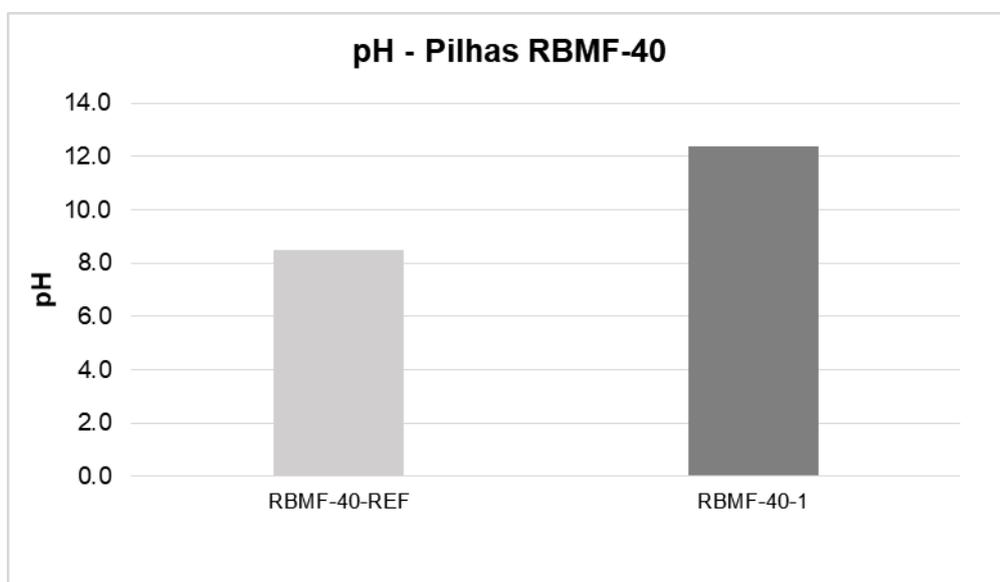


Figura 40 – pH das pilhas RBMF-40-REF e RBMF-40-1

Nota-se que em ambas as pilhas a água obteve um pH maior que 7, indicando uma alcalinidade desta ($pH > 7$). Sabe-se que a água é neutra e tem pH igual a 7.

Dessa forma, compreende-se que em ambos os casos há mistura entre rejeito e água (RBMF – REF) e a mistura de rejeito, água, cimento e NaCl (RBMF – 1%) provoca a alteração do pH da água para o meio alcalino. Adicionalmente, o tipo de processamento que o minério é submetido pode influenciar na elevação desse pH, principalmente, se utilizado mais reagentes no processo.

Sabe-se que as soluções alcalinas são adstringentes e condutoras de eletricidade. Além de possuírem alta concentração de íons OH^- e são formadas em sua maioria por íons metálicos. Sua solubilidade altera conforme o elemento formador que pode ser os metais alcalinos, como o Na (sódio), nitrogênio, metais alcalinos terrosos e metais de transição. No caso dos metais de transição, como o ferro (Fe), formam-se bases insolúveis. Assim, o pH da água da pilha RBMF-40-1 foi alterado devido ao acréscimo de materiais que em sua composição química é rica em metais, como o Na (sódio), Fe (ferro), Al (alumínio), entre outros. E o cimento que tem a presença de íons OH^- , configurando-se um agente alcalino. Por esse motivo, a pilha RBMF-40-1 apresenta alcalinidade maior que a pilha contendo somente o rejeito e água.

Ressalta-se no entanto que, a adição de NaCl na proporção de 1% em relação a massa de cimento é infinitesimal. Assim, sua incorporação ao rejeito e cimento para o empilhamento não influencia na qualidade final dessa água.

Destaca-se ainda que, nas operações de beneficiamento é comum que o pH da água e outros parâmetros sejam ajustados, de modo a se atingir a qualidade esperada para uso dessa água (FONSECA, 2005). Dessa maneira, é usual que o pH da água seja elevado e ajustado para um meio alcalino ($\text{pH} > 7$).

Dessa forma, a água proveniente da pilha RBMF-40-1 ($\text{pH} > 7$), apresenta potencial para ser reciclada e reutilizada em outros processos, como o de flotação. Devido ao seu $\text{pH} > 7$, a reutilização dessa água pode reduzir custos no tratamento da água utilizada nesses processos da mineração. No caso da flotação, para atender as especificações e garantir a eficiência do processo, é necessário monitoramento dessa água para que os íons metálicos presentes não prejudiquem o beneficiamento. Porém, como destacado no item 2.4 alguns tratamentos podem ser aplicados quando há a necessidade de degradação de alguns metais presentes na composição da água.

5 CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos, observa-se que a incorporação de 1% de cimento e NaCl às pilhas de RBMF se mostrou eficaz para formação de matrizes mais coesas, o que contribui para as pilhas suportarem o peso das suas camadas em poucas horas. Além disso, os tempos de 4h e 2h foram suficientes para garantir o empilhamento das quatro camadas e as pilhas se manterem íntegras.

Quanto ao teor de umidade, o cimento reduz o teor na pilha em que o rejeito é mais fino (RBMF-70) e possui uma permeabilidade menor. Dessa forma, o cimento consome parte da água disponível na matriz, acarretando em um teor de umidade menor. Já para a pilha em que o rejeito é mais arenoso (RBMF-40) e com uma permeabilidade maior, o cimento não contribuiu para redução do teor. No entanto, destaca-se a necessidade de reavaliar o resultado do teor de umidade da pilha RBMF-40, a fim de entender melhor esse resultado e a influência do cimento com um rejeito arenoso.

Observa-se ainda que, para ambas as pilhas o sistema de drenagem é primordial. Esse sistema é importante para drenar a água liberada das matrizes, armazenando-a de forma segura para o meio ambiente, como também, para garantir a maior estabilidade dessas estruturas. Além disso, para o RBMF-40 é importante que o lançamento do material na camada seja controlado para que se tenha o funcionamento adequado do sistema de drenagem. Assim, faz-se interessante a adoção de um sistema de contenção de pequeno porte de modo a contemplar sistemas auxiliares de drenagem e contribuir para a estabilidade da estrutura.

Quanto ao desempenho mecânico, a incorporação do cimento Portland contribui para o aumento de resistência mecânica das matrizes. As pilhas de RBMF com adição de cimento tiveram tensões equivalentes a solos arenosos e argilosos, ainda que não houvesse um sistema de drenagem interno.

Portanto, o trabalho demonstrou que a incorporação do cimento Portland no rejeito apresenta viabilidade técnica para o empilhamento, na medida em que produziu-se matrizes mais estáveis, densas e pilhas com bom desempenho comparado as de

referência. Quanto a viabilidade financeira, é necessário estudos acerca dos custos envolvidos para a disposição desses rejeitos na forma empilhada. Dessa forma, a utilização do cimento se apresenta como uma tecnologia para dispor os rejeitos de minério de ferro de forma mais segura.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, a fim de aprimorar os resultados aqui obtidos e contribuir com novos, sugere-se:

- Aprimorar o protótipo da pilha, simulando um sistema de drenagem;
- Avaliar de forma aprofundada questões relativas ao teor de umidade de pilhas produzidas com RBMF-40;
- Avaliar a incorporação de outros materiais, como escória de aciaria para melhoria do desempenho mecânico;
- Avaliar outras dosagens de cimento e tempos de empilhamento;
- Aprimorar a disposição dos rejeitos no protótipo, principalmente quando este for mais arenoso;
- Realização de mais ensaios nos protótipos, como lixiviação e fluorescência de raio-X para análise da água drenada; e
- Avaliação de alguns parâmetros geotécnicos dos rejeitos, como índice de vazios, permeabilidade, grau de compactação e compressibilidade;

REFERÊNCIAS

ALVES, P. I. A. **Empilhamento de Rejeito Filtrado: a expansão de uma alternativa para substituição de barragens**. Programa de Pós-Graduação. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 116. 2020.

ANM. RESOLUÇÃO Nº 4, DE 15 DE FEVEREIRO DE 2019. **Diário Oficial da União**, 2019. Disponível em: <https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/63799094/do1-2019-02-18-resolucao-n-4-de-15-de-fevereiro-de-2019-63799056>. Acesso em: 29 Dezembro 2021.

ANM. Classificação Nacional de Barragens de Mineração. **Agência Nacional de Mineração**, 2021. Disponível em: <<https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/ClassificacaoNacionalDaBarragem>>. Acesso em: 04 Janeiro 2022.

ANM, A. N. D. M.-. RESOLUÇÃO Nº 95, DE 7 DE FEVEREIRO DE 2022. **Diário Oficial da União**, 2022. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-95-de-7-de-fevereiro-de-2022-380760962>>. Acesso em: 25 Maio 2022.

ARAÚJO, C. B. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 143. 2006.

BARREDA, R. H. O. . V. G. E. S. POLÍMEROS DESAGUADORES PARA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS ADENSADOS. **HOLOS**, 20 Novembro 2020. 14.

BASTOS, L. A. C. . S. G. C. . M. J. C. E. P. R. A. F. Using iron ore tailings from tailing dams as road material. **ASCE Library**, Ouro Preto, 10 Outubro 2016. Volume 28.

CORR, D. J. et al. Investigating entrained air voids and Portland cement hydration with low-temperature scanning electron microscopy. **Cement & Concrete Composites**, v. 26, p. 1007–1012, 2004.

DAVIES, M. Filtered Dry Stacked Tailings – The Fundamentals. **Proceedings Tailings and Mine Waste**, Vancouver, BC, 6 to 9 November 2011. 11.

DECRETO Nº 9.406, D. 1. D. J. D. 2. Diário Oficial da União, 2018. Disponível em: <https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/25406081/do1-2018-06-13-decreto-n-9-406-de-12-de-junho-de-2018-25405926>. Acesso em: 27 Dezembro 2021.

DIAS, A. N. **Determinação de Propriedades Reológicas de Rejeito de Mineração por meio de Reômetro Rotacional**. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. Dissertação de Mestrado. Espírito Santo, p. 90. 2017.

DNPM. Sumário Mineral 2012. **Departamento Nacional de Pesquisa Mineral, DNPM**, 2012. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2012/view>>. Acesso em: 27 Dezembro 2021.

ESPÓSITO, T. J. **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico**. Dissertação de Doutorado. Universidade Federal de Brasília. Brasília, p. 363. 2000.

FEAM, S. Resolução Conjunta SEMAD/FEAM nº 2.784, de 21 de 2019. **Fundação Estadual do Meio Ambiente**, 2019. Disponível em: <<http://www.feam.br/gestao-de-barragens/descadastramento-e-descaracterizacao>>. Acesso em: 29 Dezembro 2021.

FIGUEIREDO, M. M. **Estudo de metodologias alternativas de disposição de rejeitos para a mineração Casa de Pedra – Congonhas/MG**. Dissertação de Mestrado. Núcleo de Geotecnia (NUGEO) da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 100. 2007.

FONSECA, D. C. A. **ALTERNATIVAS DE REUSO DE ÁGUA EM INDÚSTRIAS DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 59. 2005.

FRANÇA, A. C. S. . T. C. B. Desaguamento de Rejeitos Minerais para aplicação de métodos de disposição alternativos às barragens de rejeito convencionais. **CETEM - Centro de Tecnologia Mineral**, Rio de Janeiro, v. 102, n. Série Tecnologia Ambiental, p. 60, 2018.

GOMES, A. M. **Caracterização Tecnológica no aproveitamento do Rejeito de Minério de Ferro**. Pós-Graduação em Engenharia Mineral. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 89. 2009.

GOMES, M. F. M. **Metodologia de análise hierárquica aplicada para escolha do sistema de disposição de subprodutos da mineração com ênfase nos rejeitos de minério de ferro**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 193. 2009.

GRASSE, P. B. . S. P. S. . A. O. M. O. S. A. C. B. M. F. . C. H. E. . R. L. Avaliação do comportamento geotécnico de um solo laterítico estabilizado com cal e rejeito de flotação de minério de ferro. **33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET**, Balneário Camboriú, n. 33, p. 12, Novembro 2019.

GUERRA, P. L. N. A. **Caracterização e utilização de rejeito de minério de ferro pellet feed em pavimentos de blocos intertravados de concreto**. Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 127. 2014.

GUIMARÃES, N. C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 129. 2011.

HESPANHOL, I. Reuso integrado à gestão de recursos hídricos bases para planejamento. **XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Vitória, Espírito Santo, 1997.

IBRAM. Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração. **Instituto Brasileiro de Mineração**, 2016. Disponível em: <<https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/Gestao-e-Manejo-de-Rejeitos-da-Mineracao-2016.pdf>>. Acesso em: 29 Dezembro 2021.

IBRAM. **Coletiva de Imprensa - Dados do Setor Mineral Janeiro-Agosto 2021**. INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. [S.l.], p. 34. 2021.

IBRAM, I. B. D. M.-. IBRAM Mineração do Brasil, 2021. Disponível em: <<https://ibram.org.br/noticia/producao-mineral-cresce-14-em-toneladas-no-3o-trimestre/>>. Acesso em: Dezembro 2021.

LIMA, J. C. P. **Prospecção Geotécnica do subsolo**. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos editora S.A, 1979.

LIMA, K. M. L. **Retroanálise da formação de um depósito de rejeitos finos de mineração construído pelo método subaéreo**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 140. 2006.

LOZANO, F. A. E. **Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 128. 2006.

MARÇAL, G. Empilhamento de rejeitos filtrados (minério de ferro): Aspectos de projeto, implantação e operação para o Depósito Cianita. **GEOMIM - Geotecnia Aplicada a Mineração 2021**, n. ABMS, Outubro 2021.

MATIAS, A. C. P. **Influência da adição de compósito estabilizador no comportamento reológico de rejeitos de minério de ferro depositados em barragens**. Universidade Federal de Ouro Preto (Dissertação de Mestrado). Ouro Preto. 2022.

MEND. **Mine Environment Neutral Drainage Project. Study of Tailings Management Technologies**. MEND NEDEN. Klohn Crippen Berger. The Mining Association of Canada (MAC). Canadá. 2017.

MME. Ministério de Minas e Energia. **gov.br - Governo Federal**, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/secretario-destaca-crescimento-da-producao-de-cobre-em-evento-no-chile>>. Acesso em: 05 Junho 2022.

MOREIRA, B. O. **VIABILIDADE ECONÔMICA DE LAVRA DE EMPILHAMENTO DRENADO**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2021.

NOGUEIRA, M. A. **Tecnologias Sociais Aplicadas a Mitigação de Impactos Provocados pela Mineração aos Municípios da Bacia do Rio Doce - MG.** Universidade Federal de Minas Gerais - UFOP. Ouro Preto, p. 99. 2021.

OLIVEIRA, A. P. A. E. L. A. B. Recursos Hídricos e Tratamento de águas na Mineração. **CETEM - Série de Tecnologia Ambiental**, Rio de Janeiro, 2001.

OLIVEIRA, J. A. **IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS PROVOCADOS PELO IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS PROVOCADOS PELA MINERAÇÃO NO ESTADO DE MINAS GERAIS.** UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO. Três Rios - RJ. 2019.

OLIVEIRA-FILHO, L. W. **Manejo de Estéreis e de Rejeitos de Mineração. Notas de aula.** Ouro Preto: Departamento de Engenharia de Minas , 2017.

OLIVEIRA-FILHO, W. L.; ABRÃO, P. Disposição de rejeitos de mineração. **Geotecnia Ambiental. Elsevier**, Rio de Janeiro, 2015.

PAIXÃO, D. . M. **Alternativas de disposição de rejeito úmido na avaliação de impactos ambientais de atividades minerárias no estado de Minas Gerais.** CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS. Belo Horizonte, p. 87. 2019.

PEIXOTO, C. L. P. **Proposta de nova metodologia de desaguamento de rejeitos em polpa.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 108. 2012.

PEIXOTO, R. F. et al. **Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro na construção civil.** Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2016.

PORTES, A. M. C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 180. 2013.

SAMPAIO, J. A. . L. A. B. . A. M. C. E. F. S. C. A. **Água no Processamento Mineral.** 5ª. ed. Rio de Janeiro: CETEM - Centro de Tecnologia Mineral, 2010.

SILVA, A. K. R. **Co-Disposição e Disposição compartilhada de rejeitos e estéreis em cava exaurida**. Mestrado Profissional. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 158. 2014.

SILVA, A. P. M.; VIANA, J. P.; CAVALCANTE, A. L. B. **Diagnóstico dos resíduos sólidos da atividade de mineração de substâncias não energéticas**. Relatório de pesquisa, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). Brasília. 2012.

SOBRINHO, A. R. V. G. **Metodologia para implantação de um sistema de disposição de rejeitos em minério de ferro na região do semiárido: Estudo de caso**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, p. 134. 2014.

TESSAROTTO, C. EMPILHAMENTO A SECO PARA REJEITOS DE PROCESSOS MINERAIS (DRY STACKING). **XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**, Poços de Caldas, 2015.