



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
ENGENHARIA DE MINAS

DAIANE PEREIRA CAMPOS

**ALTERNATIVAS PARA APRIMORAR A CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DA
FILTRAGEM DE REJEITO FINO E LAMAS PARA EMPILHAMENTO A SECO**

ARAXÁ

2023

DAIANE PEREIRA CAMPOS

**ALTERNATIVAS PARA APRIMORAR A CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DA
FILTRAGEM DE REJEITO FINO E LAMAS PARA EMPILHAMENTO A SECO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal
de Educação Tecnológica de Minas Gerais -
CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção
do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Henrique Santos
Coorientador: Prof. Dr. Leonardo Júnior
Fernandes Campos

ARAXÁ
2023

DAIANE PEREIRA CAMPOS

**ALTERNATIVAS PARA APRIMORAR A CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DA
FILTRAGEM DE REJEITO FINO E LAMAS PARA EMPILHAMENTO A SECO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal
de Educação Tecnológica de Minas Gerais -
CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção
do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Araxá, 04 de julho de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Presidente e Orientador: Prof. Dr. Leandro Henrique Santos

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

Coorientador: Prof. Dr. Leonardo Júnior Fernandes Campos

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG – Belo Horizonte

Membro Titular: Prof. Dr. Alexander Martin Silveira Gimenez

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

Membro Titular: Prof. Dr. Fábio de São José

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

*“Deus nunca disse que a jornada seria fácil, mas
Ele disse que a chegada valeria a pena.” Max
Lucado*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me permitir a realização deste sonho, viver momentos incríveis e estar comigo em todos eles, dando força para superar todos os desafios ao longo da minha caminhada.

Aos meus pais, Aidê e Vaner, agradeço por todo amor e incentivo e por não medirem esforços para que todos os meus propósitos sejam alcançados, principalmente este. À minha irmã, Maria Fernanda, por ser minha metade, me acompanhar e me apoiar sempre. Ao Diego, meu parceiro de vida, que esteve comigo em todos os momentos, com muito companheirismo e carinho.

Vocês sempre acreditaram, lutaram e hoje celebram essa vitória comigo!

Aos meus orientadores, Leandro e Leonardo, por todo apoio e dedicação durante a realização deste trabalho, por estarem sempre presentes e dispostos a me ajudar. Que eu possa me tornar uma excelente profissional, assim como são. A vocês e aos demais professores que estiveram comigo, vocês me formaram Engenheira de Minas, minha sincera gratidão por todos os conhecimentos repassados.

Aos meus amigos da graduação, Amanda, Guilherme, Hênila, Larissa, Milena e, em especial, a Bárbara, minha dupla de sempre. Vocês tornaram tudo mais fácil, leve e divertido. Obrigada por tudo e sucesso para todos nós!

RESUMO

É de conhecimento geral a crescente produção de insumos provenientes do setor mineral. Os depósitos minerais, por sua vez, apresentam teores médios cada vez menores e a necessidade por aproveitamento desses materiais está maior, fazendo com que as rotas de processamento mineral sejam mais complexas, gerando, assim, cada vez mais resíduos. A disposição desse material, que é um passivo ambiental, traz preocupações com a segurança e problemas como poluição, alterações de ecossistemas, assoreamentos dos cursos d'água, degradação da paisagem, entre outros. No projeto inicial de um processamento mineral, atualmente, espera-se que haja a busca pelo gerenciamento do rejeito, proporcionando valor econômico a ele e gerando um co-produto. Caso não seja possível, por inviabilidade técnica ou econômica, espera-se encontrar alternativas para promover a recuperação dos sólidos e realizar a disposição do material a seco ou até mesmo a reciclagem desse material, seja para realizar a recomposição de cava, como material de construção, produto agrícola e outros. Neste cenário, uma das alternativas é a separação sólido líquido, a partir da filtração de rejeitos. O objetivo principal consiste em reduzir o volume de material a ser depositado, evitando o represamento de polpas, e aumentar a recirculação de água declinando, consequentemente, o modo de disposição em barragens que é usualmente utilizado. Em relação a filtração de rejeitos, um dos grandes desafios presentes atualmente na indústria mineral é a filtração de materiais finos em grandes empreendimentos, devido a facilidade de entupimento dos filtros pelas partículas finas. Outro fator que dificulta o processo de filtração, no caso das lamas, é a alta superfície específica, provocando dificuldades de sedimentação e tornando-se necessário, em muitos casos, o uso de agentes agregantes para se ter eficiência na filtração. O presente trabalho teve como objetivo promover levantamentos de alternativas para maximizar a capacidade de produção da filtração de rejeitos finos e lamas, de modo a reduzir os custos desse processo e promover o sistema de disposição de rejeitos filtrados, também chamado de empilhamento a seco (Dry Stacking). Para isso, foram analisados fabricantes de equipamentos de filtração, dando destaque ao filtro prensa, utilizado para prensagem e filtração da lama, de modo que a filtração de rejeitos seja vista como uma alternativa vantajosa, eficaz e mais segura para disposição de resíduos. O embasamento teórico foi obtido a partir de pesquisas exploratórias e bibliográficas em plataformas acadêmicas, artigos, dissertações, teses, monografias e materiais de congressos tecnológicos de mineração, que tenham envolvimento com o assunto que será abordado neste trabalho. Além disso, foram apresentados alguns casos em que a filtração de rejeito está em

processo de iniciação ou já em operação, com objetivo de destacar como as empresas estão se adaptando para promover melhorias no processo de filtração em estudo. Por tudo isso, conclui-se que o processo de extração e beneficiamento mineral exige a utilização de grandes volumes de água e a necessidade de armazenamento do material sem valor econômico no momento promove a busca de novos métodos de disposição e o aprimoramento da produtividade dos métodos já existentes, principalmente aqueles que envolvem a técnica de filtração, alternativa esta que traz benefícios quanto a segurança e recuperação de água.

Palavras-chave: Filtro Prensa. Filtração de Rejeitos. Empilhamento a seco.

ABSTRACT

The increasing production of inputs from the mineral sector is widely known. Mineral deposits, in turn, exhibit progressively lower average grades, and the need for utilization of these materials is growing, leading to more complex mineral processing routes and consequently generating increasing amounts of waste. The disposal of this material, which represents an environmental liability, raises concerns regarding safety and issues such as pollution, ecosystem alterations, watercourse siltation, landscape degradation, among others. In the initial design of a mineral processing project, there is currently an expectation for waste management efforts, aiming to provide economic value and generate by-products. Should this not be feasible due to technical or economic reasons, alternatives are sought to promote the recovery of solids and enable dry disposal of the material or even its recycling for purposes such as pit reclamation, construction material, agricultural product, among others. In this scenario, one of the alternatives is the solid-liquid separation through waste filtration. The main objective is to reduce the volume of material to be deposited, preventing slurry ponding, and increase water recirculation, consequently avoiding the commonly used method of tailings disposal in impoundments. Regarding waste filtration, one of the major challenges currently faced in the mining industry is the filtration of fine materials in large-scale operations, due to the propensity of fine particles to cause filter clogging. Another factor that hinders the filtration process, in the case of sludges, is the high specific surface area, which leads to sedimentation difficulties, often requiring the use of agglomerating agents to ensure filtration efficiency. The present study aims to explore alternatives to maximize the filtration capacity for fine tailings and sludges, in order to reduce the costs associated with this process and promote the filtered tailings disposal system, also known as Dry Stacking. For this purpose, filtration equipment manufacturers will be analyzed, with emphasis on the filter press, which is used for sludge dewatering and filtration, aiming to establish waste filtration as an advantageous, effective, and safer alternative for waste disposal. The theoretical framework will be based on exploratory and bibliographical research conducted on academic platforms, scientific papers, dissertations, theses, monographs, and materials from mining technology conferences, all related to the subject matter addressed in this study. Additionally, several cases in which tailings filtration is either under initiation or already in operation will be presented to highlight how companies are adapting to promote improvements in the filtration process under investigation. For all this, it is concluded that the process of mineral generation and benefit requires the use of large volumes of water and the

need to store material with no economic value at the moment promotes the search for new disposal methods and the improvement of the productivity of the methods existing ones, mainly those involving the filtering technique, an alternative that brings benefits in terms of water safety and recovery.

Keywords: Filter Press. Waste Filtration. Dry Stacking.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Barragem de Fundão após o rompimento	15
Figura 2. Momento do rompimento da barragem de Brumadinho	16
Figura 3. Substâncias metálicas comercializada em 2021.....	17
Figura 4. Faturamento do setor mineral	18
Figura 5. Fluxograma das etapas de um empreendimento mineiro	19
Figura 6. Fluxograma do processo de beneficiamento	22
Figura 7. Comparativo de Técnicas de Disposição	24
Figura 8. Tipos de rejeito, equipamentos para desagramento e meio de transporte	24
Figura 9. Método a montante.....	27
Figura 10. Método a Jusante.....	28
Figura 11. Método de Linha de Centro.....	28
Figura 12. Princípio de Filtragem.....	31
Figura 13. Representação do filtro tipo mesa	34
Figura 14. Filtro tipo mesa	34
Figura 15. Filtro de correia.....	35
Figura 16. Princípio de filtragem do Filtro de Disco.....	36
Figura 17. Filtro de Disco.....	36
Figura 18. Filtro de Disco Cerâmico	37
Figura 19. Filtro de Tambor	38
Figura 20. Filtro de Tambor	38
Figura 21. Mecanismo de funcionamento do Filtro Prensa.....	39
Figura 22. Filtro prensa horizontal	40
Figura 23. Filtro prensa vertical	40
Figura 24. Rota de processo Mina Pau Branco - Vallourec	42
Figura 25. Planta de Filtragem de Rejeitos da Mina Pau Branco.....	43
Figura 26. Filtro prensa alugado para aumento de produção na Mina Pau Branco.....	43
Figura 27. Planta de filtragem e foto da descarga em uma das baias	44
Figura 28. Vista geral da Planta de Filtragem da Mina Casa de Pedra	46
Figura 29. Planta de filtragem e galpão de estocagem	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valor das substâncias metálicas comercializadas em 2021	18
Tabela 2. Variáveis que afetam a filtração	32
Tabela 3. Problemas operacionais de filtração e medidas adotadas.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANM - Agência Nacional de Mineração

AMB - Anuário Mineral Brasileiro

APP - Áreas de Preservação Permanente

CEFET - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

CP - Cimento Portland

CSN - Companhia Siderúrgica Nacional

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração

GOV/MG - Governo do Estado de Minas Gerais

MG - Minas Gerais

MME - Ministério de Minas e Energia

PAE - Planos de Ação de Emergência

PNSB - Política Nacional de Segurança de Barragens

RMF - Rejeito de Minério de Ferro

SIGBM - Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Cenário da mineração	17
2.2 Uso e importância da água na mineração.....	19
2.3 Disposição de Rejeitos.....	22
2.3.1 Barragens de Rejeito	25
2.3.2 Considerações legais	29
2.3.3 Empilhamento de rejeitos filtrados.....	30
2.4 Filtragem	31
2.4.1 Equipamentos de filtragem.....	33
3. METODOLOGIA.....	41
4. ESTUDO DE CASO – EMPRESAS QUE UTILIZAM O MÉTODO DE FILTRAGEM DE REJEITOS E EMPILHAMENTO A SECO	41
4.1 Vallourec - Mina Pau Branco	41
4.2 CSN - Mina Casa de Pedra	45
4.3 Nexa Resources - Unidade Vazante.....	47
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50

1. INTRODUÇÃO

A produção e disposição de rejeitos tem se tornado, no âmbito da indústria mineral, foco para questionamentos ambientais e tema para pesquisas e desenvolvimento. Os depósitos minerais apresentam teores médios cada vez menores, sendo necessário o aproveitamento máximo desses materiais. A complexidade das rotas de processamento mineral cresce a cada dia e, conseqüentemente, promove a geração de mais resíduos e igualmente crescente consumo de água.

Normalmente, em todas as etapas faz-se uso da água e todo o processo de beneficiamento ocorre em meio úmido, o que provoca um consumo excessivo de água e posterior dificuldade no descarte, que deve ocorrer de forma segura e com viabilidade econômica.

Os resíduos sólidos provindos da lavra são chamados de estéreis. Por apresentarem menor umidade são mais fáceis de promover o armazenamento. Os rejeitos, são os resíduos provindos da etapa de beneficiamento de minérios, que geralmente se apresentam em formato de polpa, com alta porcentagem de sólidos e na maioria dos casos, granulometria fina a ultrafina. Atualmente, a disposição desses resíduos ainda ocorre em barragens e traz preocupações com a segurança e problemas como poluição, alterações de ecossistemas, assoreamentos dos cursos d'água, degradação e supressão da paisagem, além de ser passivo de riscos ambientais de potencial elevado.

Na última década, o Brasil passou pela maior tragédia ambiental e pelo maior impacto social já registrado na história. O rompimento da barragem de Fundão, na cidade de Mariana – MG, no ano de 2015, e da barragem do córrego do Feijão, em Brumadinho – MG, em 2019.

A cidade de Mariana fica localizada no quadrilátero ferrífero, no centro-sudeste do estado de Minas Gerais, região de grande importância econômica e social. No dia 05 de novembro de 2015, ocorreu o rompimento da barragem de Fundão, que armazenava 50 milhões de m³ de rejeito da atividade de mineração de Ferro. Destes, 34 milhões de m³ foram lançados e carreados para fora da contenção, atingindo 663,2 km de pontos hídricos. Em toda extensão do Rio Doce, nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo, foi notável o efeito da lama de rejeito (IBAMA, 2015).

A tragédia provocou 20 mortes, sendo que um dos corpos continua desaparecido. Dentre as vítimas haviam trabalhadores da empresa e moradores da comunidade. Além disso, comprovaram-se desalojamento da população, destruição de estruturas, assoreamentos dos cursos d'água, destruição de áreas de preservação permanente (APP), vegetação nativa de Mata

Atlântica, entre outras consequências ambientais, sociais e econômicos imensuráveis. A Figura 1 mostra a barragem de Fundão após o rompimento.



Figura 1. Barragem de Fundão após o rompimento

FONTE: IBAMA, 2015.

No dia 25 de janeiro de 2019, ocorreu o rompimento da barragem do córrego do Feijão, em Brumadinho, do Complexo Paraopeba, localizado na Região Metropolitana de Belo Horizonte, em Minas Gerais. A barragem, que já estava inativa, armazenava 12 milhões de m³ de lama de rejeito da mineração de Ferro. Os primeiros pontos atingidos pela lama foram escritórios administrativos, restaurantes, oficinas de manutenção, entre outros pontos da própria estrutura da empresa.

Segundo informações prestadas pela mineradora Vale S.A., 300 trabalhadores estavam na unidade no momento do rompimento, Figura 2. A mancha de lama atingiu uma pousada, um vilarejo e alcançou o leito do Rio Paraopeba. Foram 272 mortes, nas quais três vítimas ainda estão desaparecidas, tornando o rompimento da barragem de Brumadinho o maior acidente de trabalho do Brasil. Além disso, o desastre causou enormes prejuízos ambientais e socioeconômicos (OLIVEIRA et al, 2019; ROCHA, 2021).



Figura 2. Momento do rompimento da barragem de Brumadinho

FONTE: Governo do Estado de Minas Gerais.

Segundo boletim da Agência Nacional de Mineração (ANM), em maio de 2023, 919 barragens estão cadastradas no Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração (SIGBM). Dentre essas, 93 se encontram em categoria de alerta ou emergência. Por tudo isso, a necessidade de métodos de disposição de rejeitos mais seguros e sustentáveis deve ser objetivo principal em uma indústria mineral. A redução da porcentagem de sólidos nas lamas de rejeito minimiza as chances de ruptura ou colapso dos meios de contenção, além de promover a recirculação de água, reduzindo consideravelmente a utilização de novos recursos hídricos.

Um dos grandes desafios é a filtragem de materiais finos e lamas, devido a elevadas taxas de entupimento dos filtros pelas partículas finas. Outro ponto em destaque é a alta superfície específica, que provoca dificuldade de sedimentação dos sólidos finos. Em casos de inviabilidade econômica ou operacional, deve-se realizar o gerenciamento do rejeito, proporcionando valor econômico a ele e gerando um co-produto.

Este trabalho tem por finalidade promover levantamentos de alternativas para maximizar a capacidade de produção da filtragem de rejeitos finos e lamas, de modo a reduzir os custos desse processo e promover o sistema de disposição de rejeitos filtrados, também chamado de empilhamento a seco (*Dry Stacking*), além de ilustrar como as empresas e indústrias vêm se adaptando para novas alternativas nos métodos de disposição.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cenário da mineração

A agricultura e a mineração fazem parte das atividades mais antigas da civilização e estão relacionadas diretamente à economia do país, atuando com objetivo de aprimorar a qualidade de vida atual e das gerações futuras. A mineração foi considerada fundamental, contribuindo para o desenvolvimento econômico e social de vários países, na conferência “Rio + 10”, realizada de 26 de maio a 29 de agosto de 2002, em Johannesburgo (Farias, 2002).

Ainda segundo o mesmo autor, a mineração no Brasil contempla importantes e variados depósitos minerais. De acordo com o Anuário Mineral Brasileiro, as principais substâncias metálicas extraídas no Brasil em 2021 foram: Alumínio, Cobre, Cromo, Estanho, Ferro, Manganês, Nióbio, Níquel, Ouro, Vanádio e Zinco. O valor da produção desses 11 elementos representou 89% do valor total da produção, concentradas grande parte nos estados do Pará e Minas Gerais, conforme apresentado na Figura 3 e Tabela 1.

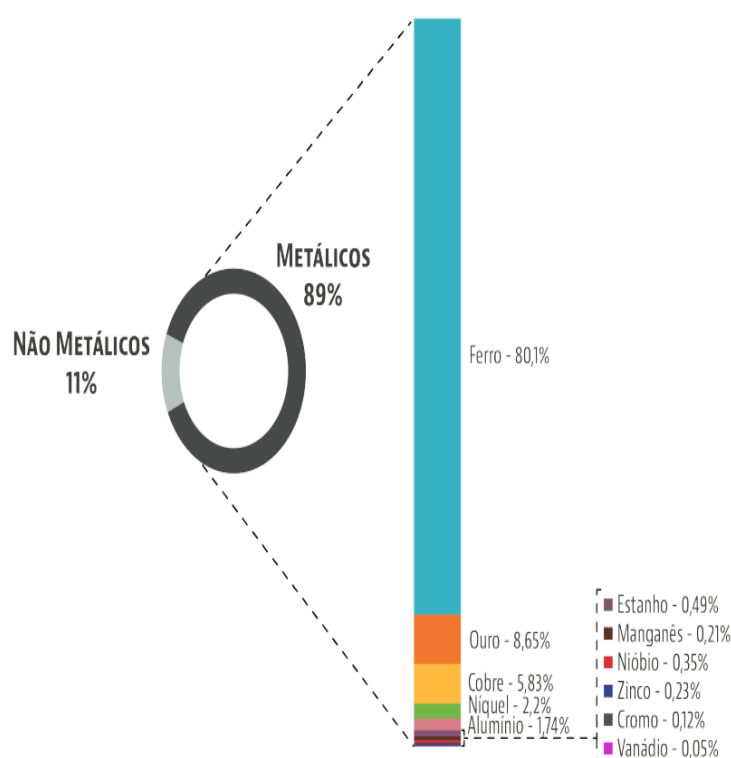


Figura 3. Substâncias metálicas comercializada em 2021

FONTE: AMB, 2023.

Tabela 1. Valor das substâncias metálicas comercializadas em 2021

Unidade da Federação	Valor (R\$)	Participação (%)
Brasil	312.916.142.439	
Pará	145.957.483.760	46,64
Minas Gerais	129.776.411.960	41,47
Espírito Santo	9.030.644.539	2,89
Goiás	8.590.761.465	2,74
Bahia	7.376.658.607	2,36
Mato Grosso	5.121.891.325	1,64
Mato Grosso do Sul	2.398.660.303	0,76
Rondônia	1.513.591.856	0,48
Maranhão	1.279.169.450	0,41
Amapá	943.042.688	0,31
Amazonas	511.126.633	0,16
Tocantins	134.797.004	0,04
Alagoas	104.392.866	0,03
Paraná	98.435.566	0,03
São Paulo	49.631.963	0,02
Ceará	29.474.882	0,02

FONTE: AMB, 2021.

Conforme apresentado na Figura 4, no ano de 2022, o setor mineral apresentou queda de 26% no faturamento, se comparado ao ano de 2021. O principal motivo foi em função da menor demanda por minério de Ferro pela China e queda no preço da *commodity*. Ainda assim, gerou mais de cinco mil vagas de emprego diretas e mais de dois milhões de vagas, incluindo vagas indiretas, segundo informações do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2023).

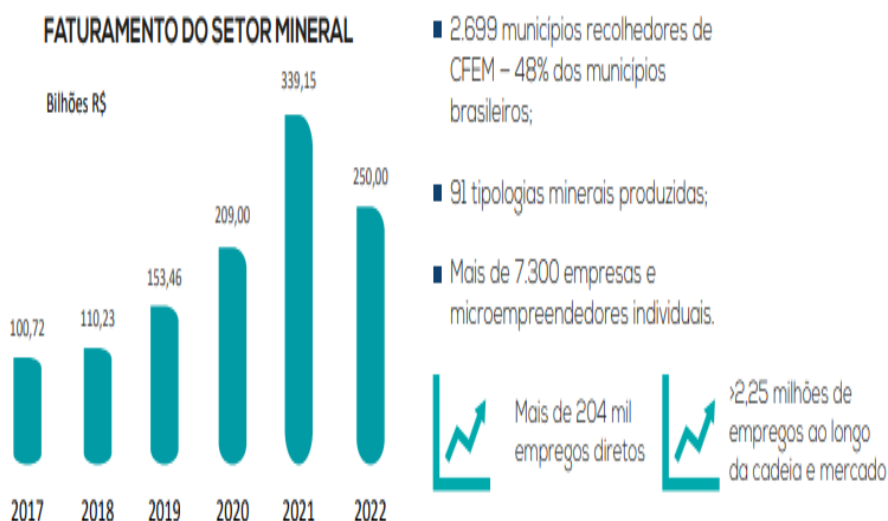


Figura 4. Faturamento do setor mineral

FONTE: IBRAM, 2023.

Os maiores investimentos previstos para a mineração, até o ano de 2027, abrange os minérios de Ferro, Cobre e Níquel, principalmente voltadas para questões socioambientais.

2.2 Uso e importância da água na mineração

As reservas minerais existentes, nas mais variadas formas e composições, dificilmente são comercializadas como são encontradas, sendo necessário um tipo específico de tratamento, visando sempre a viabilidade econômica.

A pesquisa, desenvolvimento de uma mina, o beneficiamento, comercialização, disposição ou aproveitamento de rejeitos e estéreis e o fechamento da mina reúnem e resumem as fases da mineração (BRASIL,2018).

A Figura 5 mostra, de forma esquemática, as principais etapas constituintes de um empreendimento mineiro:

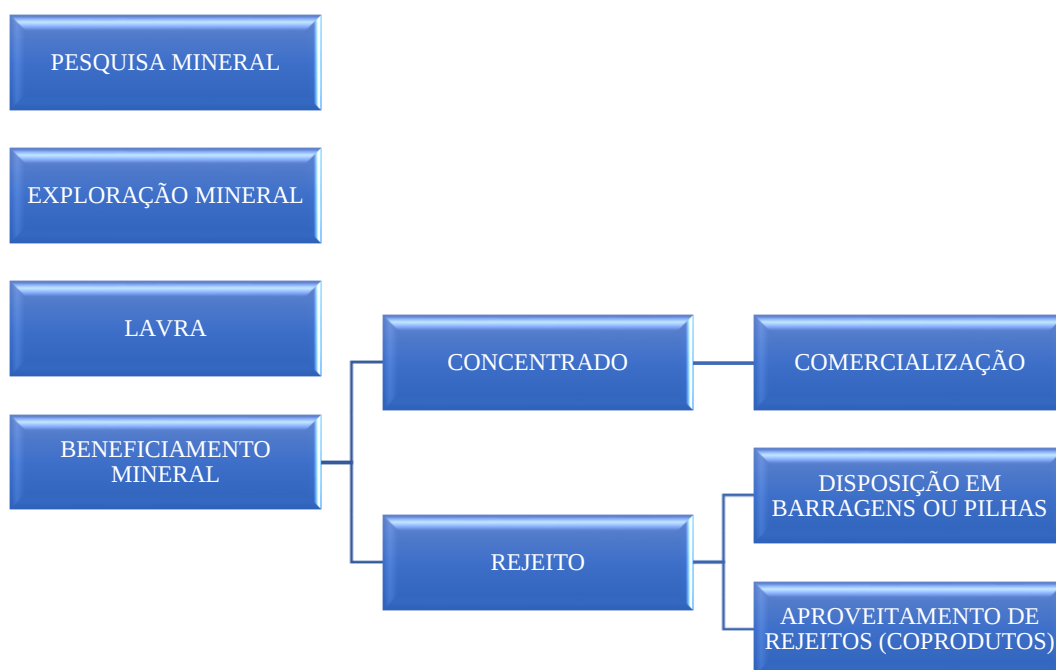


Figura 5. Fluxograma das etapas de um empreendimento mineiro

FONTE: Autor, 2023

Os estágios de uma mina podem ser divididos em prospecção, avaliação, desenvolvimento, exploração e recuperação, e podem ser resumidos da seguinte forma:

- A prospecção, que é baseada em pesquisas, levantamentos geológicos, geoquímicos e geofísicos, com objetivo de identificar e localizar a jazida e avaliar sua viabilidade econômica, ou seja, a procura de um bem mineral.
- A avaliação se trata do estudo aprofundado sobre o bem mineral e, acontece interligada e combinada com a prospecção.
- O desenvolvimento de uma mina é uma etapa importante da mineração, envolve atividades de infraestrutura necessárias para realizar a lavra de uma jazida mineral, como acessos, galerias, rampas, áreas de deposição, dentre outros (FERREIRA, 2013). Neste caso, é a preparação de forma geral para a extração.
- A exploração é a extração do minério, consistindo na lavra propriamente dita. Essa, pode ser executada utilizando o método a céu aberto ou subterrâneo e a escolha depende diretamente da localização e formato do depósito mineral, levando em consideração viabilidade técnica e econômica.

A utilização de água na fase de Lavra é mais frequente do que se imagina. Operações como desmonte, carregamento, transporte e atividades como drenagem de mina e abatimento de poeiras fazem uso direto da água.

O beneficiamento ou tratamento de minérios define-se como o conjunto de operações para preparar e adequar o mineral original para maior efeito econômico. Nesta etapa existem as operações unitárias, que contemplam o transporte de sólidos, cominuição e fragmentação, classificação, concentração e separação sólido líquido.

Para Chaves (2012), a cominuição é o conjunto de operações executadas com intuito de reduzir o tamanho das partículas minerais. Sendo uma etapa executada de forma controlada e com objetivo predeterminado, incluindo as exigências de tamanho máximo. Tais operações são necessárias em uma planta industrial por razões como:

- Facilitar o transporte e manuseio;
- Permitir o transporte contínuo, levando em consideração a utilização de correias transportadoras. Essas, possuem menor gasto, utilizam energia elétrica, são silenciosas e operam de forma contínua e automatizada;
- Para permitir a separação dos minerais, liberando as partículas úteis dos minerais de ganga, entre outros.

As operações de britagem e moagem compõem a etapa de cominuição. Além da faixa granulométrica, se distinguem pelos mecanismos de fragmentação e redução de tamanho

envolvidos. Nos processos de britagem, forças de compressão ou impacto atuam sobre as partículas grossas. Para a moagem, que se trata de frações mais finas, faz-se uso mecanismos de abrasão e arredondamento (CHAVES, 2012).

A classificação é a separação de um determinado material em duas ou mais frações distintas pela composição e distribuição granulométrica das partículas. O equipamento classificador recebe a alimentação com granulometria variada, e o mecanismo de separação faz com que as partículas maiores sejam arrastadas para a parte inferior, denominada *underflow*, e as partículas menores para a parte superior, denominada *overflow* (CHAVES, 2012).

Para a operação de classificação existem inúmeros tipos de equipamentos, mas, para uso industrial, prevalecem a utilização dos classificadores espiral, ciclones e cones. Os ciclones são equipamentos que operam a úmido, ou seja, partículas sólidas unidas a água formam a polpa, material este que alimenta o equipamento. São capazes de transformar a energia potencial que vem da alimentação em energia cinética e promover a movimentação interna necessária para que as partículas finas sejam arrastadas pela corrente para o *overflow* e as partículas grossas afundem e saem pelo *underflow*.

Outra etapa fundamental para o tratamento de minérios é a concentração. Nessa, ocorre a separação por espécies de interesse, a partir de uma propriedade diferenciadora, seja esta natural ou induzida. Para que ocorra essa concentração é necessário que premissas sejam atendidas. Sendo elas:

- Liberabilidade (Grau de liberdade);
- Diferenciabilidade (Propriedade diferenciadora);
- Separabilidade dinâmica.

Atualmente, os métodos de concentração utilizados podem ser divididos em densitários ou gravíticos, magnéticos, elétricos, flotação e outros.

Em diversos processos industriais há, ainda, a necessidade de separar a fase líquida e a sólida, de modo a atingir dois objetivos básicos: um sólido desaguado e um líquido clarificado. A etapa de Separação Sólido-Líquido, também chamada de Desaguamento, é de extrema importância e criticidade, uma vez que, visam a recuperação e recirculação de água, preparação e adequação do percentual de sólidos da polpa, desaguamento final de concentrados e descarte de rejeitos.

O espessamento, filtração, centrifugação, peneiramento, secagem, flotação e separação magnética são operações que podem ser utilizadas na separação sólido líquido e o tipo de

equipamento a ser escolhido depende de uma série de parâmetros a serem analisados, como os objetivos de processo, tipo de operação, vazão de alimentação, concentração de sólidos, dentre outros.

A Figura 6 apresenta o circuito completo de extração e beneficiamento, desde a lavra até o produto de interesse.

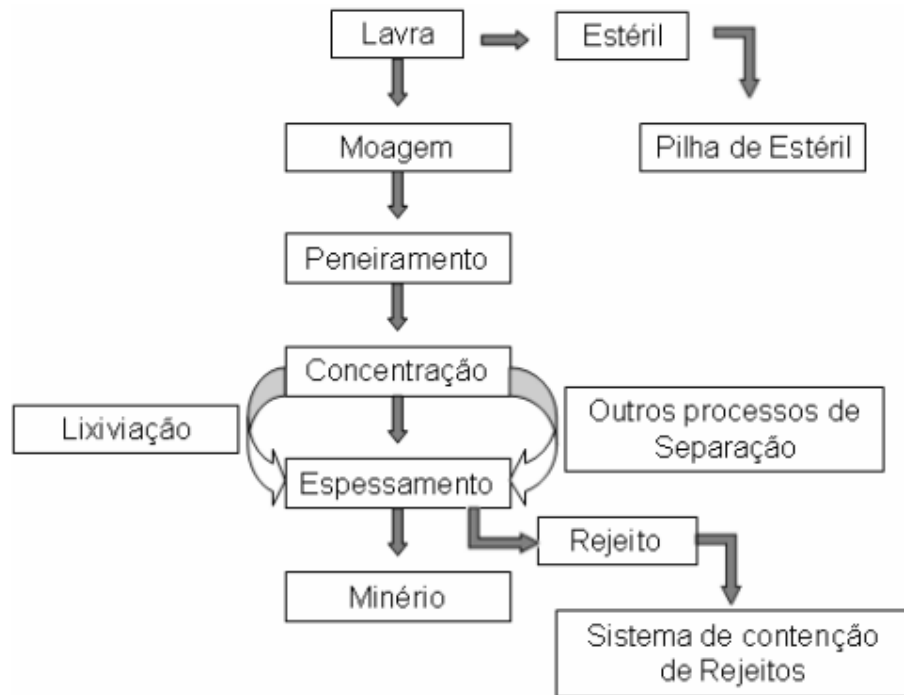


Figura 6. Fluxograma do processo de beneficiamento

FONTE: Russo, 2007.

2.3 Disposição de Rejeitos

Os rejeitos de mineração não possuem valor econômico atrativo no momento, sendo necessário dispor de um local para armazenamento temporário ou permanente, ou ainda, alguma alternativa para reaproveitamento. O método mais comum e mais utilizado ainda são as barragens (ALVES, 2020). Segundo Portes (2013), existem outros métodos usados para a disposição de rejeitos, como o empilhamento drenado, lama espessada, pasta, disposição subaérea e disposição de rejeitos filtrados (*dry stacking*). As diferentes técnicas de disposição

apresentam desafios e vantagens em relação a sua aplicabilidade, conforme apresentado na Figura 7.

MÉTODO DE DISPOSIÇÃO	PRINCIPAIS VANTAGENS	PRINCIPAIS DESAFIOS
Convencional	-Baixo Custo de Operação; -Facilidade de transporte do material até o local de disposição por meio de bombas centrífugas; -Alta capacidade de disposição.	-Cumprimento de atendimentos legais de alta complexidade; -Baixo potencial de recuperação da área.
Em cavas	-Facilidade de recuperação das áreas lavradas concomitante ao avanço da lavra; -Redução de impactos ambientais e visuais; -Minimização de custos operacionais.	-Problemas relacionados à percolação de fluidos e estabilidade; -Pouco volume disponível para disposição de rejeitos dado o grande volume ocupado pela estrutura de contenção.
Co-Disposição e Disposição compartilhada	-Melhor aproveitamento de áreas de disposição; -Possibilidade de iniciar a recuperação da área impactada desde o início de sua operação; -Apresenta bons parâmetros de estabilidade dos taludes.	-Exige um planejamento operacional bem definido entre as áreas de planejamento de lavra e beneficiamento mineral; -Durante períodos chuvosos a compactação dos materiais fica comprometida.
Disposição Subaérea	-Alta recuperação de água; -Maior capacidade de armazenamento de material por área, em relação ao método convencional; -Maior densidade e estabilidade das estruturas.	-Alto custo de operação com atividades de espessamentos e infraestruturas locais; -Necessidade da existência de mais de um reservatório para garantir a continuidade da operação.
Empilhamento Drenado	-Baixo risco de liquefação; -Baixo custo operacional; -Melhores condições ambientais para o fechamento e recuperação da área.	-Aplicável somente em rejeitos com altos coeficientes de permeabilidade; -O sistema de drenagem interno deve ser robusto e eficiente.

Empilhamento de rejeito filtrado	-A revegetação pode ser realizada concomitante à operação; -Alto reaproveitamento de água do processo; -Baixos impactos ambientais.	-Alto custo de operação; -Não aplicável a rejeitos com granulometrias finas ($>74\mu\text{m}$).
----------------------------------	---	--

Figura 7. Comparativo de Técnicas de Disposição

FONTE: Silva, 2021.

Grande parte dos rejeitos, passam pela etapa de desaguamento, visando o desaguamento da polpa e aumentar a concentração de sólidos. A Figura 8 mostra os tipos de rejeito de acordo com sua concentração, o tipo de equipamento para espessamento ou filtragem e o meio de transporte (ALVES, 2020).

Consistência do rejeito	Tecnologia de desaguamento	Transporte
Polpa 30 a 58% de sólidos	Espessador convencional	Por gravidade a partir de calhas ou tubulação de baixa pressão. Com ou sem bombas centrífugas.
Lama espessada de alta porcentagem de sólidos 55 a 65% de sólidos	Espessador <i>High rate</i>	Bombas centrífugas ou de diafragma.
Pasta de baixa densidade 60 a 70% de sólidos	Espessadores <i>Deep bed</i> ou <i>Deep cone</i>	Bombas de pistão ou diafragma (alta pressão).
Pasta de alta densidade 65 a 75% de sólidos	Espessador <i>Deep cone</i> ou filtro	Bombas de deslocamento positivo com tubulação de alta pressão.
Torta filtrante >80% de sólidos	Filtro	Caminhão ou correia.

Figura 8. Tipos de rejeito, equipamentos para desaguamento e meio de transporte

FONTE: Adaptado Alves, 2020.

Outro tema que tem ganhado notoriedade é o aproveitamento de rejeitos. O desenvolvimento de novas aplicações para co-produtos promove benefícios ambientais e econômicos. São vários co-produtos sendo estudados e testados em área industrial, todos em busca de soluções sustentáveis e casos potenciais de aproveitamento.

Atualmente, a construção civil tem como principal material de consumo o cimento Portland (CP). A fabricação deste produto emite grandes quantidades de CO_2 , contribuindo significativamente para o efeito estufa. Uma das alternativas para reduzir essa emissão seria a partir do desenvolvimento de ligantes de baixo carbono, como os geopolímeros. Estes materiais

são produzidos diante a ativação alcalina de aluminossilicatos, como metacaulim, cinza volante ou escória de alto-forno. Existem relatos de ativação alcalina da lama de rejeitos de minas de Tungstênio, alumínio, escória de ferro-níquel, entre outros (FERREIRA, 2022).

Em alguns casos, estuda-se aplicar o rejeito de minério de ferro (RMF) na fabricação do cimento Portland, como uma alternativa sustentável (FIGUEIREDO, 2021). Segundo Ferreira (2022), na maioria dos casos estuda-se a aplicabilidade de rejeitos finos como aglutinantes, mas, se moídos, materiais mais grossos podem fazer parte da matriz do geopolímero. Um exemplo seria a substituição dos agregados naturais (areia e cascalho), por rejeitos mais grossos. Outra aplicabilidade do rejeito em investigação, envolvendo geopolímeros, seria a aplicação dos minerais de ferro hematita, magnetita e goethita, para aumentar ou diminuir a resistência à compressão de materiais (LI, 2022).

Além dos geopolímeros, existem inúmeros estudos voltados para o aproveitamento de rejeitos e, conforme apresentado por Campos (2022), uma das possibilidades seria o reprocessamento. Neste caso, a partir de um rejeito de minério de ferro de baixo teor (10,80% de Fe), aplicou-se misturas de reagentes coletores (dodecilamina, ácidos graxos, hidroxamatos e sulfosuccinamato) e, por meio da flotação direta, buscou-se uma rota de reprocessamento que resultasse em um concentrado de maior teor (62,84% de Fe) e 59% de recuperação metalúrgica.

Inúmeros outros trabalhos e estudos buscam alternativas para aproveitamento de rejeitos, como por exemplo:

- Avaliação da Flotação do Resíduo de Rochas Ornamentais para Concentração e Recuperação de Diamantes Sintéticos (ALVES, D. T; ALMEIDA, P.F; VIDAL, F W. H., 2022);
- Beneficiamento do Silicato de Alumínio para Utilização como Carga Mineral em Processo de Produção de Tintas, Plásticos e Borrachas (SANTANA, A.C; SOUZA, J.R.R; BRITO, R.F; OLIVEIRA, B.F.B. 2022);
- Reaproveitamento de Resíduos da Exploração do Ouro na Produção de Tijolo Solo-Cimento (ASSIS, R.B; MACHADO, T.G; MONTEIRO, F.M; SOUSA, R.F; 2022).

2.3.1 Barragens de Rejeito

Com teores de minérios cada vez mais baixos a necessidade por maior volume de produção está cada vez maior e, conseqüentemente, maior quantidade de rejeitos provindos do beneficiamento. O método de disposição desse material mais utilizado são as barragens de

retenção de rejeito, construídas a partir dos solos, de estéreis ou até mesmo do próprio rejeito (IBRAM, 2016). A partir disso, o estudo e análise dos meios de disposição devem ser avaliados com frequência e de forma minuciosa.

De acordo com Resolução do MME/ANM nº 130, de 24 de fevereiro de 2023, as barragens de rejeito de mineração, são definidas como:

“Barragens, barramentos, diques, cavas com barramentos construídos, associados às desenvolvidas com base em direito minerário, construídos em cota superior à da topografia original do terreno, utilizados em caráter temporário ou definitivo para fins de retenção, acumulação, decantação ou descarga de rejeitos de mineração ou de sedimentos provenientes de atividades de mineração com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas, excluindo-se deste conceito as barragens de retenção de resíduos industriais.”

Grande parte das produções industriais de mineração depositam rejeitos represados em barragens, como forma de armazenamento. Nestes casos, a construção e manutenção estrutural são de extrema necessidade e importância. Nestas barragens, as lamas de rejeito são destinadas com cerca de 25% a 60% de sólidos e imensas quantidades de água, que permeia entre os vazios, vaza e depois evapora (DAVIES, 2011).

O processo de construção de uma barragem se inicia a partir de um dique inicial. Ao atingir a capacidade máxima, o dique é alteado. Os alteamentos podem ser realizados utilizando três métodos construtivos: de montante, de jusante e de linha de centro (RUSSO, 2007).

No método de montante o processo construtivo ocorre a partir de um dique inicial, construído com enrocamento ou solo compactado drenante. Ao atingir a capacidade máxima de volume uma nova camada de rejeito é lançada na crista de montante do barramento. A praia que será formada neste ponto serve de base para o próximo dique, conforme Figura 9. Este processo ocorre da mesma forma até que se atinja a cota estipulada por projetos. Para Oliveira-Filho e Abrão (2015), este método é limitado a rejeitos com 40% a 60% de fração do tamanho areia.

O menor volume de material necessário para construção desse método reduz o custo de operação, tornando-se a principal vantagem de sua aplicabilidade, porém, existem restrições o que diz respeito a segurança, uma vez que, a fundação base dos alteamentos é o próprio rejeito, constituído com material heterogêneo e com alto índice de vazios. Ainda há a susceptibilidade

à liquefação ocorrência do fenômeno de *Piping*, já que a linha freática fica próxima ao talude de jusante.

Após as tragédias, envolvendo barragens alteadas a montante, nas cidades de Mariana e Brumadinho, o método foi proibido no Brasil, segundo a Lei Federal nº 14.066 de 30 de setembro de 2020.

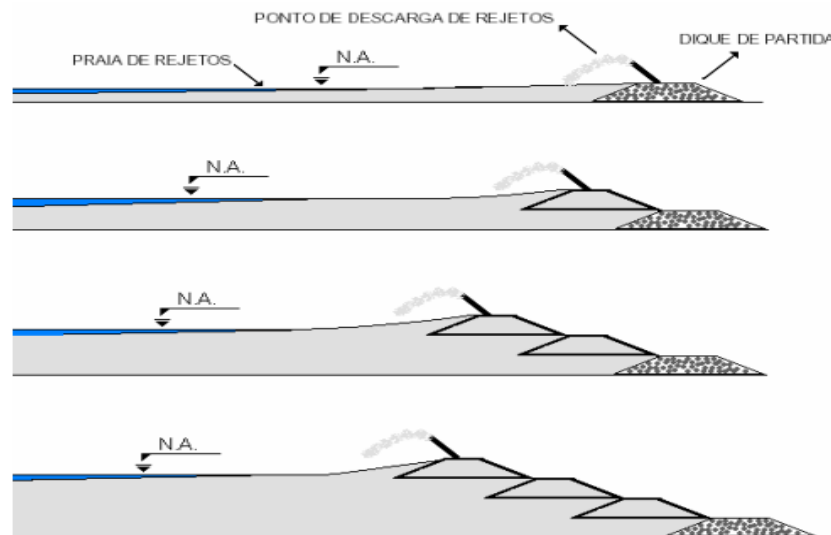


Figura 9. Método a montante

FONTE: Russo, 2007.

No método de jusante, apresentado na Figura 10, o alteamento ocorre a jusante do barramento, evitando que o novo dique tenha como base o rejeito depositado anteriormente, possibilitando estruturas mais confiáveis com fatores de segurança mais confiáveis. O dique inicial deve apresentar baixa permeabilidade ou possuir talude de montante impermeabilizado e drenagem interna, controlando assim a linha de freática. Com isso, os fenômenos de *Piping* e liquefação são menores, mas, em contrapartida, são pontuados como desvantagens a necessidade de grandes quantidades de materiais, maior investimento, dependência de fatores climáticos para compactação e exigência de sistemas de monitoramento de erosão do talude a jusante. Além de ser necessário um planejamento detalhado da área de construção, para não interferir em áreas adjacentes.

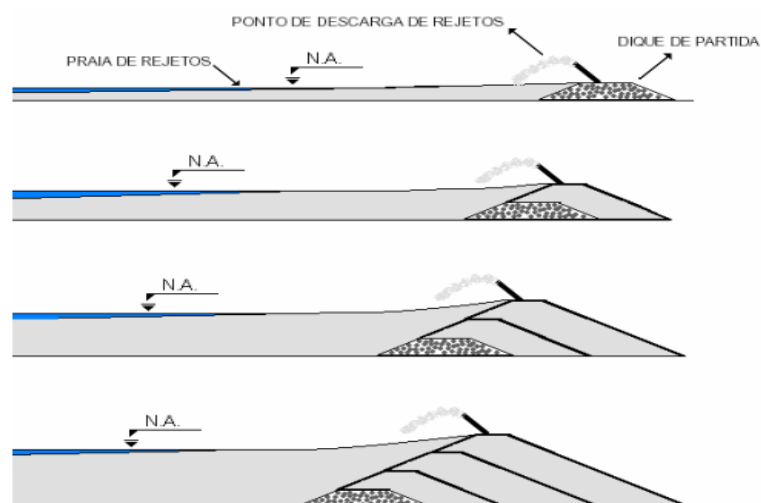


Figura 10. Método a Jusante

FONTE: Russo, 2007.

No método de linha de centro, ocorre a junção dos métodos anteriores, como apresentado na Figura 11. A base de montante se apoia sobre o rejeito e o de jusante sobre a fundação do terreno. Em termos de custos, é uma solução intermediária e em comportamento estrutural, se aproxima mais do método a jusante. Necessita de uma quantidade menor de material, se comparado ao método de montante, mas a necessidade de sistema de drenagens eficiente, de contenção a jusante e equipamentos para disposição podem elevar os custos.

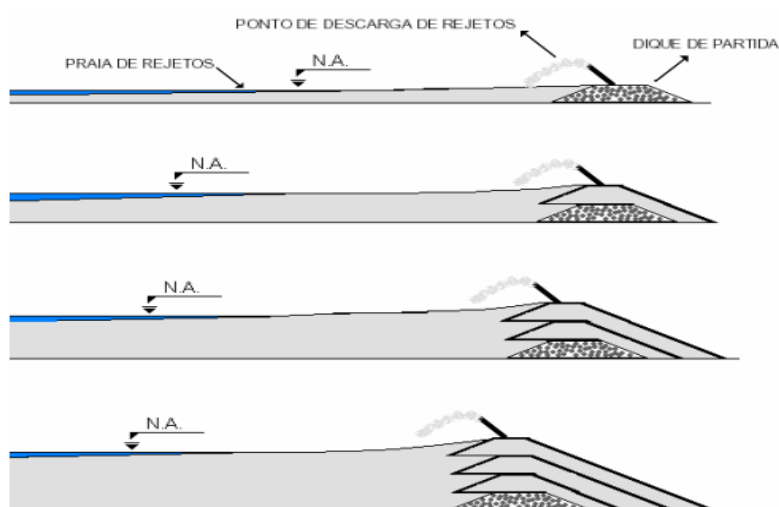


Figura 11. Método de Linha de Centro.

FONTE: Russo, 2007.

Com a crescente preocupação de administração do meio ambiente, busca-se alternativas sustentáveis e seguras de gerenciar o material, tornando os rejeitos filtrados uma excelente alternativa, com condições ótimas de permissão e operação.

2.3.2 Considerações legais

As barragens foram surgindo a partir do ano de 1930 e problemas envolvendo suas estruturas sempre foram frequentes. A primeira norma regulamentadora de barragens de rejeito, no Brasil, foi a Portaria nº 237, de 18 de outubro de 2001, criada pelo DNPM, atual ANM. Desde então, diversas atualizações e novas normas surgiram, mas nenhuma legislação que fosse seguida de forma criteriosa conforme o necessário. A partir da Lei 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), iniciaram-se ações visando a fiscalização e segurança de barragens, mas ainda eram pouco aplicadas e apresentavam vários pontos de melhorias.

Após a tragédia ocorrida em Mariana, a preocupação com as barragens foi ganhando notoriedade entre a população e em audiências e, dentro da morosidade do sistema público, não houve grandes evoluções. No ano de 2019, com o rompimento da barragem de Brumadinho, a necessidade de retorno rápido à sociedade, por parte do governo, fez com que o Estado de Minas Gerais, que já estava em processo de construção de deliberações normativas sobre as barragens antes da tragédia de Brumadinho, publicasse a Lei estadual nº 23.291/2019, 30 dias após o rompimento (MINAS GERAIS, 2019).

Na época do fato o órgão responsável pela fiscalização era o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), sendo substituído pela Agência Nacional de Mineração (ANM), com objetivo de mudar a imagem e atrair novos investimentos. Enquanto o responsável era o DNPM, não havia atribuições específicas de fiscalização das barragens. A atividade estava contemplada na fiscalização geral de atividade minerária e os instrumentos utilizados eram análise de documentos, enviados pelos empreendedores, e fiscalizações in loco. De forma geral, o DNPM não tinha como verificar a veracidade das informações prestadas e grande parte das barragens não eram vistoriadas. Uma das justificativas apresentadas era a deficiência orçamentária e carência de recursos humanos, dificultando as inúmeras atribuições (SILVA, 2019).

No ano seguinte a tragédia de Brumadinho, usando como base a Lei estadual de Minas Gerais e com alteração em alguns termos decretou-se a Lei Nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. De acordo com atualização, a lei aplica-se a barragens que atendam pelo menos uma das seguintes características:

- Altura do maciço maior ou igual a 15 metros, levando em consideração o encontro do pé do talude de jusante com o solo até a crista do barramento;
- Capacidade maior ou igual a 3.000.000m³;
- Contenha resíduos perigosos;
- Dano potencial associado, médio ou alto (em aspectos econômicos, sociais, ambientais ou que possa prejudicar vidas humanas);
- Risco alto, de acordo com órgão fiscalizador.

Além disso, houve a inclusão do artigo que proíbe a construção ou alteamento de barragens utilizando o método de montante e exige a descaracterização das barragens já construídas usando o método, seguindo prazo determinado juntamente com autoridade licenciadora.

Outro ponto revisado diz respeito as classificações, realizadas por fiscalizadores. As classificações são direcionadas por categorias de risco alto, médio ou baixo, em função de características técnicas, conservação, idade da barragem e plano de segurança apresentado. Outra categoria analisada, envolve o dano potencial associado, baseada em função do potencial de vidas e impactos, em casos de rompimentos.

A Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) tem como objetivo garantir, prevenir e reduzir a possibilidade de acidentes ou desastres, de acordo com padrões de segurança de barragens. Informar, regulamentar, monitorar e acompanhar padrões de segurança a serem atendidos. Além disso, estabelecer planos de ação de emergência (PAE), juntamente com o empreendimento, para casos de acidentes.

2.3.3 Empilhamento de rejeitos filtrados

Para Oliveira-Filho e Abrão (2015), no método de empilhamento de rejeitos, a polpa é submetida a etapa de desaguamento, em espessadores, e filtrada, utilizando filtro de pressão ou a vácuo, tornando possível o reaproveitamento de água do processo. Um dos principais pontos

a serem analisados no processo de filtração é o teor de umidade da torta, que interfere diretamente no transporte, manejo e compactação do material.

2.4 Filtração

Um dos métodos de destaque para separação sólido-líquido é a Filtração. O princípio de filtração, apresentado na Figura 12, consiste em passar a polpa mineral por um meio poroso permeável, geralmente constituído de uma tela de tecido ou metálica. Esse meio filtrante é capaz de reter os sólidos, denominado de torta e permitir a saída da água, nomeado como clarificado ou filtrado. A pressão hidrostática do líquido sobre o meio filtrante é uma das ações que permitem o processo de filtração, sendo realizada por gravidade. Além desta, existem as filtrações a vácuo, sob pressão, centrífuga, hiperbárica e capilar (CHAVES, 2013).

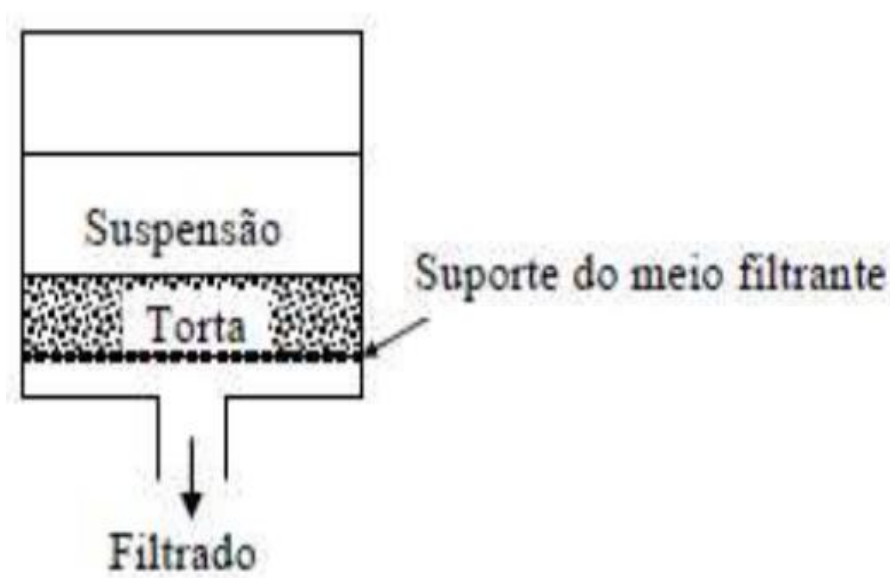


Figura 12. Princípio de Filtração

FONTE: Braga, 2021.

Ainda para Chaves (2013), a operação de filtração pode ser realizada de forma contínua ou descontínua, conhecida como filtração por bateladas. No primeiro caso, a filtração contínua consiste em fases de formação de torta, secagem e descarga. A formação da torta é realizada de modo a acumular o material (torta) no meio filtrante. A secagem é a aspiração da água existente e para a descarga, o fluxo de ar é invertido, de modo a soprar a tela e desprender a torta do meio filtrante.

De acordo com Figueiredo (2018), de forma a garantir uma separação eficaz na filtração, deve-se escolher de forma adequada o meio filtrante e analisar fatores e características relacionadas a polpa, sendo eles:

- Espessura da torta;
- Temperatura da polpa;
- Viscosidade da polpa;
- Velocidade média;
- % de sólidos na polpa;
- Vazão de alimentação;
- Granulometria dos sólidos;
- Potencial hidrogeniônico da polpa (pH);
- Densidade e volume da polpa.

A escolha do método de filtração depende diretamente da granulometria, do tipo de material e das características desejadas para o produto de interesse. Segundo Guimarães (2011), em um processo de filtração existem variáveis que podem interferir no processo. Tais variáveis podem ser agrupadas em quatro categorias, conforme Tabela 2.

Tabela 2. Variáveis que afetam a filtração

Sólido	Torta/filtrado	Polpa	Equipamento
Área superficial específica	Espessura da torta	Taxa de alimentação	Ciclo
Distribuição granulométrica	Porosidade do leito	Porcentagem de sólidos	Nível de vácuo e/ou sopro e/ou pressão
Forma geométrica	Permeabilidade do leito	Temperatura	Meio filtrante
Propriedades de superfície	Viscosidade do filtrado	Viscosidade	Geometria dos componentes
Massa específica		pH	Nível de agitação
		Adição de reagentes auxiliares	
		Presença de sais dissolvidos.	

FONTE: Guimarães, 2011.

Em relação à filtração de lamas, é necessária atenção especial e estudos aprofundados. As lamas apresentam aspectos negativos para filtração, devido à dificuldade de se obter altas taxas de filtração e vastos problemas com entupimentos dos meios filtrantes. Em alguns casos, há a necessidade de adição de floculantes, de modo a maximizar a eficiência de filtração (ALVES, 2020)

Segundo Guimarães (2011), as lamas apresentam efeito negativo por “cegarem” o meio filtrante e, para reduzir esses efeitos e ampliar a taxa de filtração, em alguns casos são necessários a adição de floculantes.

2.4.1 Equipamentos de filtração

Para filtrar concentrados, rejeitos ou apenas preparar o material para uma etapa consecutiva é necessário que haja ação da gravidade ou a diferença de pressão entre os meios, promovendo a filtração à vácuo ou à pressão. Na filtração à vácuo, é exercida uma pressão negativa no lado oposto ao da polpa, de forma a puxar o fluido. Para a filtração à pressão, uma força positiva é direcionada na polpa, promovendo a passagem do fluido para o lado oposto do meio filtrante. Atualmente, existem como tecnologias de filtração os filtros a vácuo convencionais, filtros cerâmicos e filtros tipo prensa.

Os filtros à vácuo se dividem em quatro tipos de equipamentos e todos atuam de forma contínua, são eles: mesa, correia, disco e tambor. O filtro de mesa, também conhecido como filtro plano, recebe alimentação da polpa por gravidade e o material é distribuído igualmente por toda sua superfície circular horizontal. O filtro gira em torno de um eixo vertical promovendo a separação entre o meio fluido e o material sólido que compõe a torta. A separação é realizada pela sucção que a câmara de vácuo realiza e o desprendimento da polpa ocorre por sopros, provocados pela câmara de ar comprimido, ambas sob o filtro, conforme Figuras 13 e 14. Este método destina-se a polpas heterogêneas e apresentam melhores resultados com sólidos mais grossos, por não viabilizar a lavagem do filtro (CHAVES, 2013).

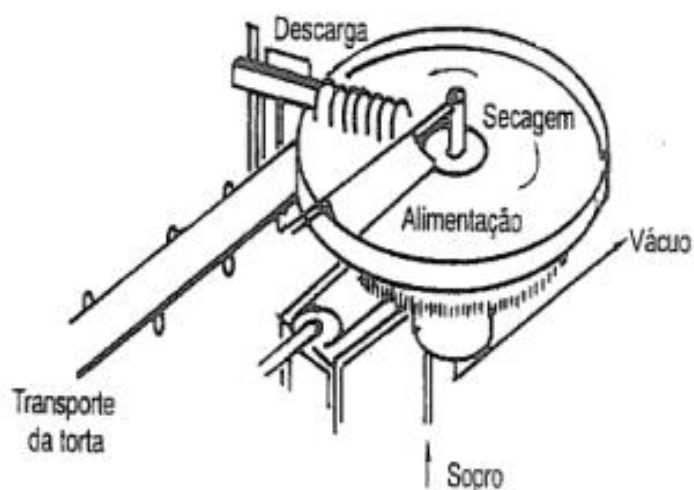


Figura 13. Representação do filtro tipo mesa

FONTE: Chaves, 2013.

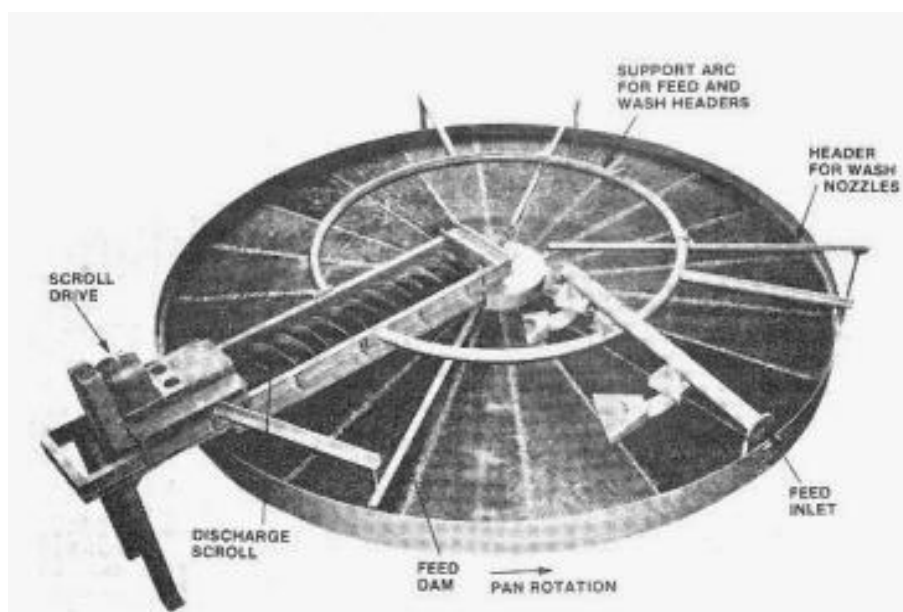


Figura 14. Filtro tipo mesa

FONTE: Oliveira et al., 2004.

O filtro de correia consiste, basicamente, em um transportador de correia com um meio filtrante em sua superfície. Conforme Figura 15, a alimentação ocorre na sua extremidade e passa por uma zona de sucção, no qual, no decorrer do percurso o meio fluído permeia pela tela e os sólidos são escoados sobre a peneira. Se necessário, a tela pode ser lavada com jatos

pressurizados. Se trata de um equipamento eficiente, permitindo processar grandes vazões, além de fácil adaptação para mudanças operacionais.

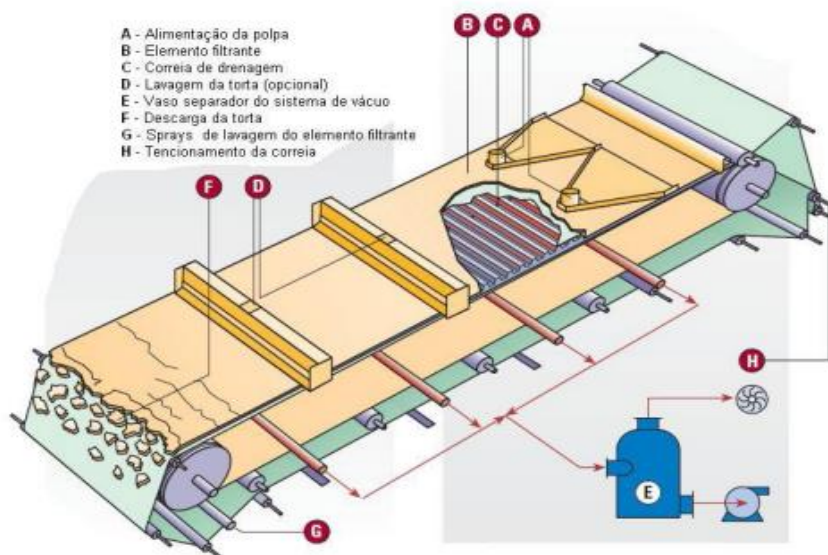


Figura 15. Filtro de correia

FONTE: Guimarães, 2011.

O filtro de disco, apresentado nas Figuras 16 e 17, consiste em um eixo horizontal contendo discos verticais perpendiculares ao eixo. Os discos paralelos são cobertos com telas revestidas com tecido filtrante, que se interligam com o sistema de vácuo e ar comprimido. A polpa é armazenada no compartimento inferior do filtro e por meio de movimentos rotativos do disco é continuamente aspirada por ação do vácuo para junto da tela, promovendo a filtração da polpa. No ponto de descarga, há calhas que direcionam a torta para o transportador de correia embaixo do filtro. Por ser um equipamento que não permite lavagem, pode apresentar problemas devido a presença de finos. Em contrapartida, apresenta como vantagem sua ampla área filtrante, alta capacidade de filtração e necessidade de pouco espaço para instalação.

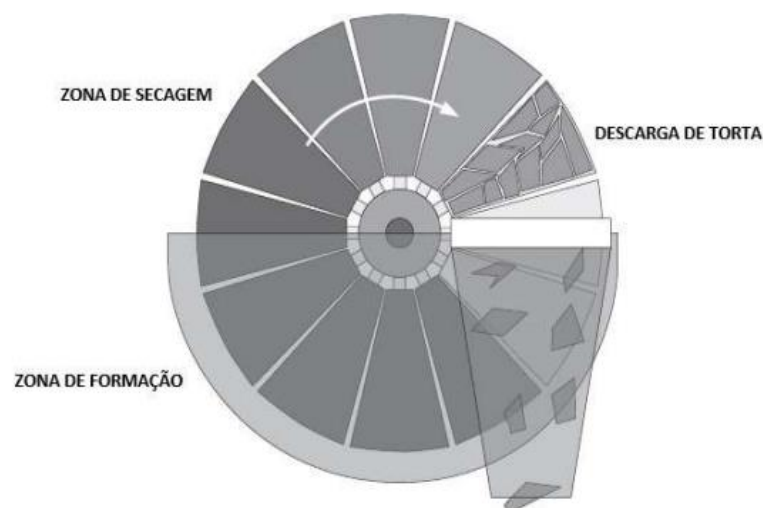


Figura 16. Princípio de filtragem do Filtro de Disco

FONTE: Braga, 2021.

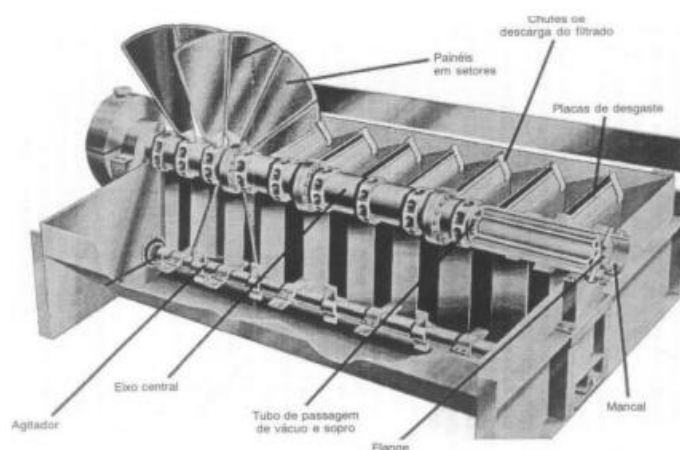


Figura 17. Filtro de Disco

FONTE: Chaves, 2013.

O filtro de disco cerâmico, se assemelha ao filtro de disco rotativo, mas, neste equipamento, o meio filtrante consiste em um disco cerâmico poroso. Os discos são feitos de alumina sinterizada e a partir da ação de capilaridade, a vácuo, atraem o material a ser filtrado (BRAGA, 2021). Por ser fabricado de material resistente e inerte torna-se uma alternativa de fácil aplicação. Uma ilustração desse filtro está mostrada na Figura 18.



Figura 18. Filtro de Disco Cerâmico

FONTE: Junior, 2014.

O filtro de tambor tem seu princípio de funcionamento similar ao filtro de disco. Como representado nas Figuras 19 e 20, sua estrutura consiste em um cilindro, revestido com material filtrante, que gira ao redor de um eixo horizontal. A polpa fica armazenada no tanque abaixo do filtro e ao realizar o movimento giratório o cilindro entra em contato com o material. A ação do vácuo faz com que a polpa seja aspirada e forme a torta na superfície do tambor, que é submetida a processo de secagem, lavagem e descarga (OLIVEIRA, 2004).

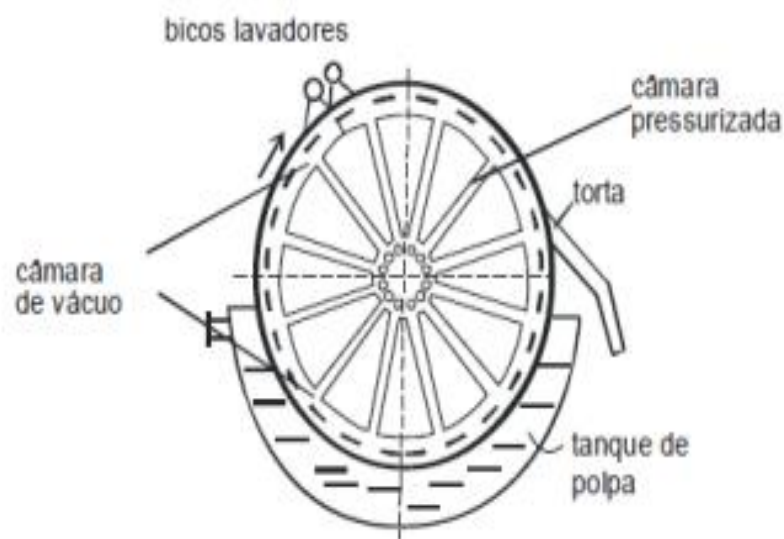


Figura 19. Filtro de Tambor

FONTE: Luz, Sampaio, França, 2010.



Figura 20. Filtro de Tambor

FONTE: Junior, 2014.

Uma das vantagens de utilizar a filtragem por pressão, se comparado a outros métodos, é a produção de tortas com menor percentual de umidade. Os filtros prensa de placas verticais, também conhecido como filtro prensa horizontal, são equipamentos que utilizam a pressão como ação externa de filtragem e sua operação é realizada por bateladas, ou seja, de forma descontínua. Conforme Figuras 21 e 22, o equipamento consiste em um conjunto de placas, revestidas de tela filtrante. Ao sofrerem ação da pressão, promovem o desaguamento, coletam o clarificado em uma calha e retém a torta de material (GUIMARÃES, 2011). As placas são

interligadas e recebem a alimentação da polpa, que é pressionada a atravessar as telas. O filtrado escorre pelos espaços entre as placas e a torta permanece nas telas, até que sejam abertas, uma por uma, para que ocorra a descarga (CHAVES, 2013). A operação do filtro prensa horizontal pode ser resumido em:

- Enchimento;
- Filtragem sob pressão máxima;
- Descarga da torta.

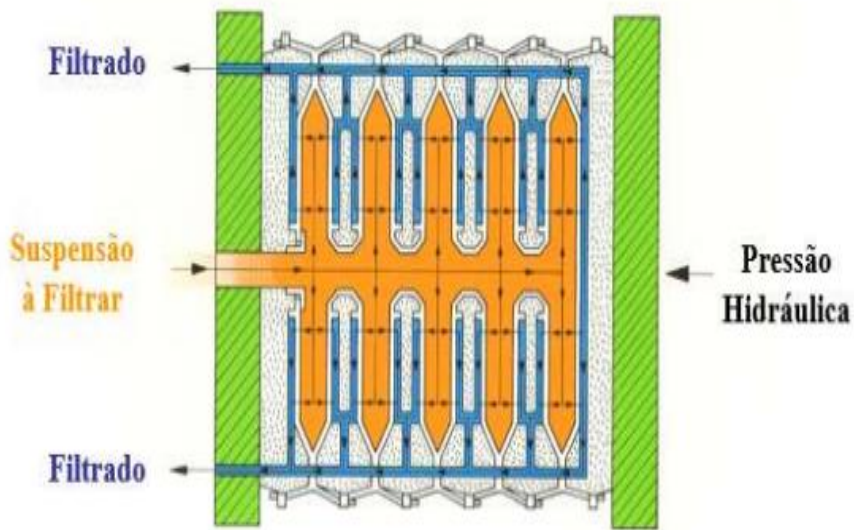


Figura 21. Mecanismo de funcionamento do Filtro Prensa

FONTE: Braga, 2021.

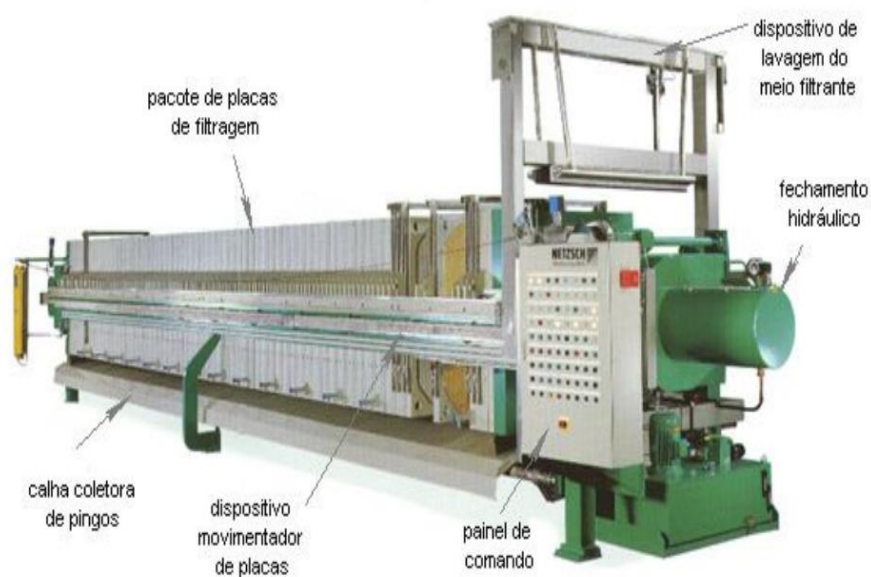


Figura 22. Filtro prensa horizontal

FONTE: Guimarães, 2011.

O filtro prensa de placas horizontais, também conhecido como filtro prensa vertical (Figura 23), é uma tecnologia recente. Possuem como vantagens a economia de espaço, tortas com baixa umidade e menor custo de operação. Como desvantagem, apresentam alto custo de investimento.



Figura 23. Filtro prensa vertical

FONTE: Guimarães, 2011

3. METODOLOGIA

Foram realizadas pesquisas exploratórias, com objetivo de ampliar os conceitos de interesse e buscar uma maior familiaridade sobre o processo de filtração e secagem de material fino e de lamas, os tipos de disposição desse material e os equipamentos utilizados nesse processo.

As informações foram coletadas na literatura nacional e internacional, em monografias, dissertações, livros e sites. Para identificar informações sobre o tema, buscaram-se as palavras chaves (dry stacking, filtração, filtração de rejeitos, barragens), em bases científicas como Web of Science, Scielo, Repositórios, Jornais e Revistas.

O material foi disposto em tópicos para facilitar o entendimento, com uma abordagem qualitativa e apresentados os equipamentos de filtração, principalmente o equipamento “filtro prensa”. Além disso, foram ilustrados casos que já realizam a filtração de rejeito e como estão em relação aos processos e produtos filtrados.

Ao obter a maior gama de informações foram analisadas as alternativas relevantes para melhorar a capacidade do processo de filtração e reduzir gastos no processo, de modo que cada dia haja mais interesse na disposição a seco do material de rejeito, evitando assim as barragens convencionais, utilizadas nos tempos atuais.

4. ESTUDO DE CASO – EMPRESAS QUE UTILIZAM O MÉTODO DE FILTRAÇÃO DE REJEITOS E EMPILHAMENTO A SECO

Algumas empresas já aplicam o método de filtração de rejeitos e promovem o empilhamento do material a seco. Além disso, buscam alternativas de aprimorar e maximizar a capacidade de produção da filtração de resíduos finos, conforme casos apresentados a seguir.

4.1 Vallourec - Mina Pau Branco

No ano de 2010, a empresa Vallourec, localizada na Serra da Moeda, em Brumadinho – MG avaliou interromper suas atividades quando constatada a necessidade de alteamento a montante da barragem de rejeito Cachoeirinha. A empresa iniciou suas atividades de extração de minério de Ferro na década de 80, beneficiando os minérios de Hematita, Goethita e Itabirito.

O processo de beneficiamento envolve classificação, ciclonagem, jigagem, concentração magnética, espessamento de lamas e filtragem, conforme fluxograma apresentado na Figura 24 (SUPPA, 2019).

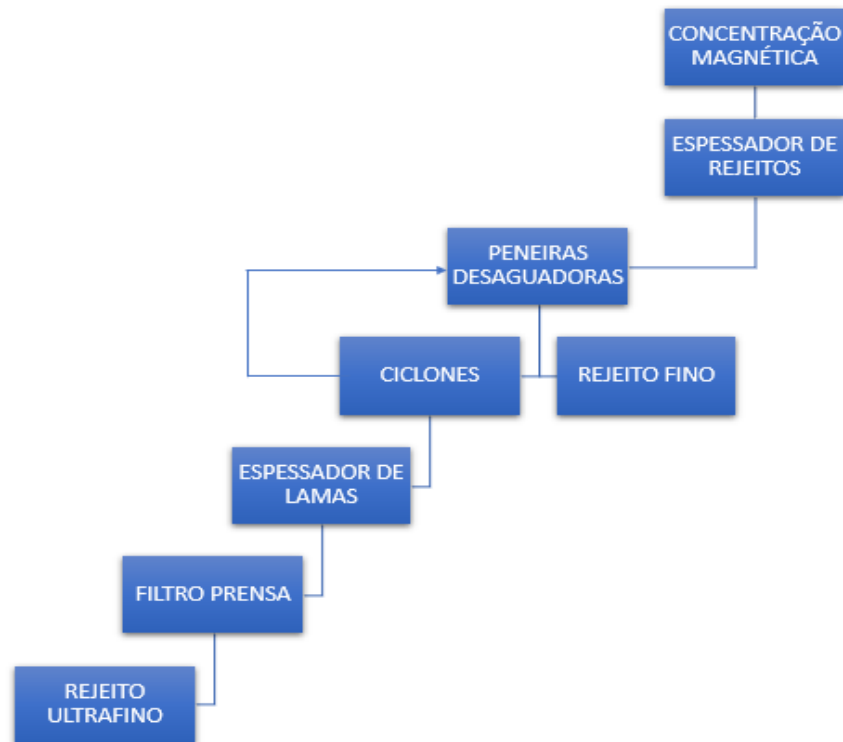


Figura 24. Rota de processo Mina Pau Branco - Vallourec

FONTE: Adaptado Suppa, 2019.

Em busca de alternativas e tecnologias que reduzissem os riscos e promovessem o empilhamento do material a seco, conhecido como *Dry Staking*, iniciou-se o processo de filtragem de rejeitos, fazendo-se uso do filtro prensa. A disposição de rejeitos filtrados foi iniciada no ano de 2015, sendo a empresa pioneira a aplicar o método de empilhamento. A Figura 25 apresenta a planta de filtragem de rejeitos da Mina de Pau Branco.



Figura 25. Planta de Filtragem de Rejeitos da Mina Pau Branco

FONTE: Matec, 2019.

Segundo ALVES (2020), a planta apresentada na Figura 26, continha dois filtros prensa idênticos. Cada filtro com 140 placas e tinha como capacidade de produção 80 toneladas de rejeito por hora. No ano de 2019, visando aumentar a filtragem de rejeitos para mais 150 toneladas por hora, um novo projeto foi iniciado e se encontra em fase de instalação (*ramp up*), contando com um filtro de 190 placas. Além destes, há outro filtro de menor dimensão (100 placas), com capacidade de produção de 50 toneladas por hora, alugado com intuito de ampliar a produção.

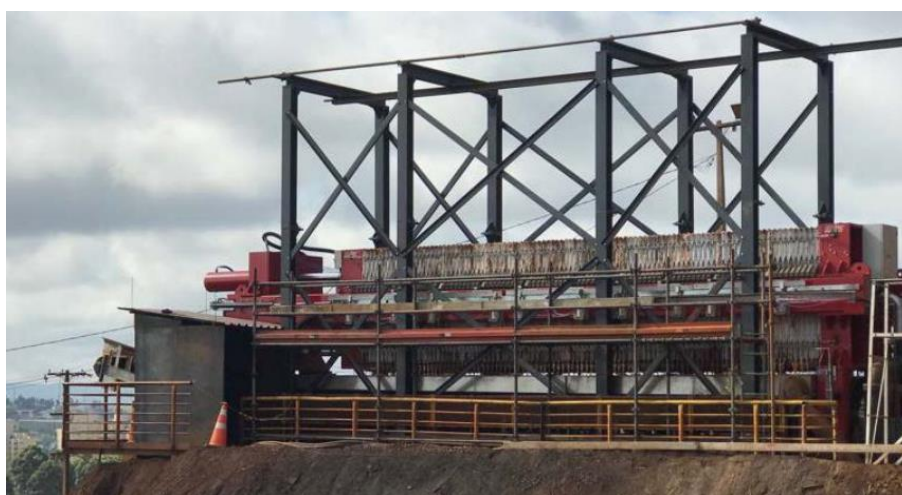


Figura 26. Filtro prensa alugado para aumento de produção na Mina Pau Branco

FONTE: Matec, 2019.

Para a filtragem, materiais com densidade abaixo de $1,5\text{g/cm}^3$ dificultam a operação e acima de $1,7\text{g/cm}^3$ dificultam o bombeamento do rejeito. O rejeito do processo de beneficiamento da empresa passa pela etapa de espessamento e sai com uma densidade entre $1,5$ e $1,7\text{ g/cm}^3$. O tempo de ciclo entre um filtro e outro é de 17 a 20 minutos e, conforme Figura 27, o material filtrado é descarregado em baias abaixo do filtro, com teor de umidade entre 15% e 17%. O material é transportado por caminhões e depositado em uma antiga pilha de estéril, método conhecido como co-disposição (ALVES, 2020).



Figura 27. Planta de filtragem e foto da descarga em uma das baias

FONTE: Matec, 2019.

No local de disposição, o material filtrado é colocado na proporção 2R:1E, ou seja, 2 partes de rejeito para 1 de estéril. Quando observada maior umidade, ou em períodos chuvosos, a disposição é realizada mais próximo do estéril, como medida de compensação da umidade. Em seguida, são espalhados e compactados no formato da pilha, que vem sendo construída adotando as seguintes premissas:

- 10 metros de altura;
- 10 metros de berma;
- Taludes com 30° de inclinação;
- Sistema de drenagem de água.

Assim como há vantagens nesse método de disposição, existem ainda dificuldades, como:

- Troca dos elementos filtrantes, devido a manutenção ser realizada manualmente e o espaço para essa troca ser desfavorável;
- Desafios no período de chuvas intensas, devido à ausência de um pátio de estocagem temporária;
- Em casos de parada nas operações de filtragem, transporte e disposição, a produção sofre impacto diretamente.

A Mina Pau Branco se encontra em fase de licenciamento para ampliar sua produção e, atualmente, realiza a lavra de alguns pontos da pilha de estéril, processando o que antes não era viável economicamente. Estima-se que futuramente, será realizado o reprocessamento do rejeito que é empilhado atualmente.

4.2 CSN - Mina Casa de Pedra

A mineração de ferro mais antiga em operação no Brasil foi iniciada em 1913, na mina Casa de Pedra, localizada no município de Congonhas. A Companhia Siderúrgica Nacional – CSN opera a mina desde 1946, realizando atividades de extração, beneficiamento e embarque de minério de Ferro. A capacidade de produção é, atualmente, de 30 milhões de toneladas de minério de ferro por ano e vida útil prevista até 2052 (CSN, 2021).

A Mina Casa de Pedra possui uma das maiores barragens do mundo, com capacidade para 50 milhões de metros cúbicos. Devido à proximidade com a área urbana, buscou-se como alternativa a utilização do método de *Dry Stacking*. No ano de 2018 iniciou-se a filtragem e, cerca de 45% do rejeito gerado é filtrado e disposto em pilhas.

A empresa contém duas plantas de filtragem e pretende expandir sua produção para mais 30 milhões de toneladas, prevendo a filtragem e disposição em pilhas de todo o rejeito gerado. A primeira planta contém quatro filtros prensa, contendo 193 placas cada e a segunda, que está em fase de *ramp up*, com cinco filtros, conforme Figura 28.

Antes de ser filtrado o rejeito passa, inicialmente, pela etapa de separação magnética, em seguida é direcionado para um tanque, onde é adicionado floculante e bombeado para três espessadores com capacidade de 550m³ cada. Nesse bombeamento acontece a junção com o rejeito da deslamagem e o rejeito fino da deslamagem, resultando em 45% de rejeito arenoso e

55% de rejeito fino, d_{50} e d_{80} iguais a $20\mu\text{m}$ e $74\mu\text{m}$, respectivamente, atingindo uma polpa de 19% de sólidos (ALVES, 2020).



Figura 28. Vista geral da Planta de Filtragem da Mina Casa de Pedra

FONTE: Matec, 2019.

A polpa chega nos filtros com uma densidade entre $1,5$ e $1,55\text{g/cm}^3$ e 50% de sólidos em massa. Ao finalizar a filtragem, a torta é descarregada, com teor de umidade de 16,5%, em transportadores de correia, que direcionam o material para uma empilhadeira radial e este promove o empilhamento em um pátio de estocagem temporária. O local abrange uma área de 8.000m^2 e permite a formação de várias frentes de carregamento para o destino de disposição, facilitando principalmente nos períodos chuvosos e com neblinas, no qual a dificuldade de transporte e tráfego é maior. O destino do rejeito filtrado é na Barragem B5, uma antiga barragem de rejeito construída em 1993, onde é lançado, espalhado e compactado.

Algumas dificuldades foram encontradas na planta de filtragem e medidas foram adotadas para evitar perdas na produção, conforme Tabela 3.

Tabela 3. Problemas operacionais de filtragem e medidas adotadas

PROBLEMAS	MEDIDA ADOTADA	OBSERVAÇÕES
Troca manual das placas	Instalação de uma talha elétrica no teto da planta, permitindo o içamento e transporte para manutenção.	Há placas sobressalentes próximas ao filtro, favorecendo a disponibilidade.
Desgaste maior nas primeiras placas que recebe a alimentação.	Realizar rodízio das placas a cada 20 dias.	

FONTE: Alves, 2020.

4.3 Nexa Resources - Unidade Vazante

A Nexa Resources surgiu em 2017, a partir da união entre Votorantim Metais e a empresa peruana Milpo. Hoje a mina de Zinco está localizada na cidade de Vazante em Minas Gerais e é pertencente ao grupo Nexa. As atividades foram iniciadas no ano de 1969, via lavra a céu aberto e em 1982, houve a necessidade de migrar para a modalidade subterrânea.

Segundo Alves (2020), a disposição de rejeitos era realizada em barragens, desde o ano de 2001, a partir do qual a mesma passou por 7 alteamentos pelo método de jusante, apresentando 44 metros de altura, 690 metros de comprimento de crista, 4,7 metros de borda livre e capacidade de armazenamento de 15 milhões de metros cúbicos. Atualmente a barragem armazena 12,2 milhões de metros cúbicos de material, sendo 11 milhões de rejeito e o restante de água. Outra função da barragem é receber as águas bombeadas da mina subterrânea e da planta de beneficiamento, de modo a realizar a clarificação e posterior recirculação. A água nova é utilizada apenas para os banheiros e refeitórios.

A filtragem e empilhamento de rejeitos surgiu com a necessidade de ampliar a vida útil da mina, uma alternativa que apresentaria menor risco geotécnico, de projeto e impacto ambiental, além de uma área de disposição com maior capacidade e menor distância da planta. A planta de filtragem foi construída entre março de 2018 e março de 2019.

Ao sair da planta de beneficiamento, o rejeito é bombeado por uma tubulação de 1,5 quilômetros de extensão e chega à planta de filtragem com 18% de sólidos em massa. A polpa passa por um espessador com capacidade de 1.260 m³ e desagua o rejeito até a faixa de 60% de sólidos em massa. A planta de filtragem contém três filtros prensa, cada um com 65 placas e a

taxa de produção é de 144 toneladas por hora. Para adequar aos parâmetros de projeto, o teor de umidade da torta deve estar entre 9 e 11%.

Conforme apresentado na Figura 29, após a filtragem, a torta é descarregada em um transportador de correia posicionado na parte inferior dos filtros que, por sua vez, promove a formação de pilhas em uma área coberta, de 1.300m², com a finalidade de reduzir o impacto da chuva sobre o rejeito filtrado.



Figura 29. Planta de filtragem e galpão de estocagem

FONTE: Alves, 2020.

O rejeito é diretamente transportado por caminhões até o local de disposição na pilha, em caso de condições climáticas e umidade da torta favoráveis. Na ausência dessas condições, o material é reservado no galpão e, em períodos longos de chuva é transportado até o pátio de armazenamento temporário, nomeado como “platô de secagem”, permanecendo no local até que seja possível transportar para o destino.

Ao ser descarregado, o rejeito é espalhado até atingir 35 cm de espessura de camada. Em seguida, é regularizado e gradeado, com objetivo de torná-lo mais homogêneo. Por último, as camadas são compactadas até atingir um grau de compactação de 95% e selado, para evitar perda de umidade em períodos de chuvosos.

A água é direcionada para a barragem por meio de canais de drenagem periférica, com capacidade para 30 mil metros cúbicos por hora, drenagem subterrânea e um canal paralelo ao canal de adução. Para medidas de monitoramento, utiliza-se poços para verificar qualidade da

água e medidores de nível d'água. Para controle de erosão, as vias são umidificadas e revegetadas, conforme alteamento.

Atualmente, a empresa Nexa Resource utiliza três métodos de disposição. São eles, retorno à mina, preenchendo os espaços de onde foi retirado o mineral (*backfill*), empilhamento a seco (*dry stacking*) e disposição hidráulica (barragens), ambos possuem métodos de controle, seguindo legislação vigente. Além disso, no ano de 2021, atingiram a meta de redução de uso de água nas operações em cerca de 84%. Outro ponto abordado pela empresa, é a utilização dos rejeitos em coprodutos, aplicados em diversas áreas, como agricultura, pecuária, mineração, siderurgia e indústria química (NEXA, 2021).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando as discussões apresentadas, é perceptível verificar que em todas as etapas do processo produtivo de uma indústria faz-se uso da água. Grande parte das atividades são realizadas a úmido, promovendo elevado consumo de água e em muitos casos, altas taxas de desperdícios. Atualmente, estudam-se técnicas para beneficiamento “a seco”, mas ainda se tratam de minorias em aplicação. Outro fato, é a necessidade de realizar a disposição do material “sem valor econômico” obtido no beneficiamento mineral.

Atualmente, após os casos de rompimentos das barragens de Mariana e Brumadinho, o Brasil passa por uma reformulação em suas formas de controle e avaliação de barragens, promovendo uma robusta legislação, que contempla medidas rigorosas de controle. Unindo estes pontos, é possível verificar a necessidade de novas formas para realizar e implementar a disposição dos rejeitos, uma delas por meio da filtragem e, conseqüentemente, ampliar a recuperação da água utilizada.

A execução e operação para realizar-se a filtragem de rejeitos, deve ser estudada e testada em plantas piloto, para garantir a escolha do tipo de filtro adequado, levando em consideração as características da polpa, porcentagem de sólidos e finos e o teor de umidade a ser atingido. Além de fatores de segurança, outra vantagem da utilização de filtragem de rejeitos está no reaproveitamento de água, visto que, na disposição em barragens a polpa chega com baixa porcentagem de sólidos, contrário ao que acontece com o rejeito filtrado, que chega praticamente seco.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, D. T; ALMEIDA, P.F; VIDAL, F W. H. **AVALIAÇÃO DA FLOTAÇÃO DO RESÍDUO DE ROCHAS ORNAMENTAIS PARA CONCENTRAÇÃO E RECUPERAÇÃO DE DIAMANTES SINTÉTICOS.** In: ANAIS DO XXIX ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 2022, Armação dos Búzios. Anais eletrônicos. Campinas, 2022.

ALVES, P.I.A. **EMPILHAMENTO DE REJEITO FILTRADO: A EXPANSÃO DE UMA ALTERNATIVA PARA SUBSTITUIÇÃO DE BARRAGENS.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2020.

ANM. **Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas** / Agência Nacional de Mineração; coordenação técnica de Karina Andrade Medeiros. Brasília, 2023.

ANM. **Report Mensal Barragens e Mineração/** Superintendência de Segurança de Barragens de Mineração. Brasília, 2023.

Anuário Mineral Brasileiro: **principais substâncias metálicas** / Agência Nacional de Mineração; coordenação técnica de Karina Andrade Medeiros. Brasília: ANM, 2023. Disponível em: PreviaAMB2022.pdf (www.gov.br).

ASSIS, R.B; MACHADO, T.G; MONTEIRO, F.M; SOUSA, R.F. **REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DA EXPLORAÇÃO DO OURO NA PRODUÇÃO DE TIJOLO SOLO-CIMENTO.** In: ANAIS DO XXIX ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 2022, Armação dos Búzios. Anais eletrônicos. Campinas, 2022.

BRAGA, F.Y.A., **UTILIZAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE FILTRAGEM DE REJEITOS PARA EMPILHAMENTO A SECO.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2021.

BRASIL. **Decreto nº 9.406, de 12 de junho de 2018.** Diário Oficial da União. Poder executivo.

BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010.** Presidência da República.

BRASIL. **Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020.** Presidência da República.

BRASIL. **Resolução Conjunta Ministério de Minas e Energia/Agência Nacional de Mineração nº 130, de 24 de fevereiro de 2023.** Diário Oficial da União.

CAMPOS, L. J. F. **FLOTAÇÃO DIRETA DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO [RECURSO ELETRÔNICO: AVALIAÇÃO DE COLETORES MISTO.** Tese de doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2022.

CHAVES, A. P. **TEORIA E PRÁTICA DO TRATAMENTO DE MINÉRIOS. BOMBEAMENTO DE POLPA E CLASSIFICAÇÃO.** 4ª Edição. Vol 1. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CHAVES, A. P. **TEORIA E PRÁTICA DO TRATAMENTO DE MINÉRIOS. DESAGUAMENTO, ESPESSAMENTO E FILTRAGEM.** 4ª Edição. Vol 2. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **TEORIA E PRÁTICA DO TRATAMENTO DE MINÉRIOS. BRITAGEM, PENEIRAMENTO E MOAGEM.** 5ª Edição. Vol 3. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CSN **MINERAÇÃO.** 2023. Disponível em: <https://www.csn.com.br/quem-somos/grupocsn/csn-mineracao/>>.

DAVIES, M. P. **Filtered Dry Stacked Tailings - The Fundamentals. Proceedings Tailings and Mine Waste.** Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/325976393_Filtered_Dry_Stacked_Tailings-The_Fundamentals. Vancouver, 2011.

DNPM. Portaria nº 237, de 18 de outubro de 2001. Aprova as Normas Reguladoras de Mineração - NRM, de que trata o art. 97 do Decreto-lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967. Brasília, 2001.

DUARTE, A. P. **Classificação das Barragens de Contenção de Rejeitos de Mineração e de Resíduos Industriais no Estado de Minas Gerais em Relação ao Potencial de Risco.** Dissertação de Mestrado. Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008.

FARIAS, C. E. G. **Mineração e meio ambiente no Brasil.** Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2002.

FIGUEIREDO, R.A.M.; SILVEIRA, A.B.M.; MELO, E.L.P.; COSTA, G.Q.G.; BRANDÃO, P.R.G.; AGUILAR, M.T.P.; HENRIQUES, A.B.; MAZZINGHY, D.B. **MECHANICAL AND CHEMICAL ANALYSIS OF ONE-PART GEOPOLYMERS SYNTHESISED WITH IRON ORE TAILINGS FROM BRAZIL.** Journal of Materials Research and Technology. v.14, p. 2650-2657, 2021.

FIGUEIREDO, T.D. **APLICAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS NO DESAGUAMENTO DE REJEITOS.** Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Campus Araxá. 2018.

FILHO, A.C.R. **ALTERNATIVAS PARA DESAGUAMENTO E DISPOSIÇÃO DOS REJEITOS DO COMPLEXO MINERAL DE TAPIRA.** Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2021.

FERREIRA, I.C.; GALÉRY, R., HENRIQUES, A.B.; TEIXEIRA, A.P.C.; PRATES, C.D.; LIMA; A.S.; SOUZA FILHO, I.R. **REUSE OF IRON ORE TAILINGS FOR PRODUCTION OF METAKAOLIN-BASED GEOPOLYMERS.** Journal of Materials Research and Technology. v.18, p. 4194-4200, 2022.

FERREIRA, L. A. **ESCAVAÇÃO E EXPLORAÇÃO DE MINAS A CÉU ABERTO.** Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia Civil. UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, Juiz de Fora, 2013.

GOV. **Histórico do rompimento das barragens da Vale na Mina Córrego do Feijão. Governo do Estado de Minas Gerais.** Disponível em: < <https://www.mg.gov.br/pro-brumadinho/pagina/historico-do-rompimento-das-barragens-da-vale-na-mina-corrego-do-feijao>>.

GUIMARÃES, N. C. **FILTRAGEM DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO VISANDO À SUA DISPOSIÇÃO EM PILHAS.** Dissertação de Mestrado - Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2011.

GUIMARÃES, N. C.; VALADÃO, G. E. S.; PERES, A. E. C. **FILTRAGEM DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO VISANDO À SUA DISPOSIÇÃO EM PILHAS.** REM: Revista Escola de Minas, out.dez 2012.

IBAMA. **Laudo Técnico Preliminar- Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana.** Minas Gerais. 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, IBRAM. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração.** 1ª. ed. Brasília, 2016. 128 p. v. 1. Disponível em: [Gestao-e-Manejo-de-Rejeitos-da-Mineracao-2016.pdf \(ibram.org.br\)](#).

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, IBRAM. **Mineração em Números Brasileira.** 2023. Disponível em: <https://ibram.org.br/mineracao-em-numeros/>.

JUNIOR, A.M.A. **INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO NA FILTRAGEM CERÂMICA DE POLPAS DE MINÉRIO DE FERRO.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro - Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Rio de Janeiro, 2014.

LI, X.; WANG, P.; GUO, Z.; QIN, J.; LIANG, K. **EFFECT OF Fe^{2+}/Fe^{3+} ON HIGH-STRENGTH CERAMSITE PREPARED BY SINTERING GEOPOLYMERS USING IRON ORE TAILINGS.** Ceramics International. v.48, n.4, p. 5681-5688, 2022.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minério**. Rio de Janeiro: CETEM / MCT, 2010.

MATEC. **Filtragem de rejeitos – estudos de caso. Apresentação no evento “Fornecedores de Tecnologias para gestão e manejo de rejeitos de mineração”**. Belo Horizonte, Minas Gerais, 2019.

MEYER, M.F et al. **A IMPORTÂNCIA DA ÁGUA E SUAS DIVERSAS APLICAÇÕES NA MINERAÇÃO**. XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Disponível em: <https://eventos.abrh.org.br/xiisrh/anais/papers/PAP017664.pdf>.

MINAS GERAIS. **Lei Estadual 23.291, de 25 de fevereiro de 2019**. Política Estadual de Segurança de Barragens. Belo Horizonte, 2019.

NEXA RESOURCES. **Relatório Anual 2021**. Disponível em: <https://www.nexaresources.com/wp-content/uploads/2022/07/RelatorioAnual_2021.pdf>.

OLIVEIRA, M. L. M.; LUZ, J. A. M.; LACERDA, C. M. M.; **ESPESSAMENTO E FILTRAGEM**. Universidade Federal de Ouro Preto – Departamento de Engenharia de Minas. 2004.

OLIVEIRA, W. K.; ROHLFS, D. B.; GARCIA, L. P. **O DESASTRE DE BRUMADINHO E A ATUAÇÃO DA VIGILÂNCIA EM SAÚDE. EPIDEMIOLOGIA E SERVIÇOS DE SAÚDE, BRASÍLIA**, v. 28, n. 1, e20190425, mar. 2019. Disponível em <http://scielo.iec.gov.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S167949742019000100001&lng=pt&nrm=iso>.

OLIVEIRA-FILHO, W. L., ABRÃO, P. **DISPOSIÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO**. In: ZUQUETTE, L. V. (Org.). *Geotecnia Ambiental*. Elsevier, Rio de Janeiro, 2015.

PORTAL OFICIAL DO GOVERNO DE MINAS GERAIS. **Histórico do rompimento das barragens da Vale na Mina Córrego do Feijão**. Governo de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2021. Disponível em: <https://www.mg.gov.br/probrumadinho/pagina/historico-do-rompimento-das-barragens-da-vale-na-mina-corrego-do-feijao>.

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, Minas Gerais, 2013.

ROCHA, L.C. **As Tragédias de Mariana e Brumadinho: É Prejuízo? Para Quem?**. Caderno de Geografia, v.31, Número Especial 1, 2021.

RUSSO, F. M. **COMPORTAMENTO DE BARRAGENS DE REJEITO CONSTRUÍDAS POR ATERRO HIDRÁULICO: CARACTERIZAÇÃO LABORATORIAL E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO CONSTRUTIVO**. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

SANTANA, A.C; SOUZA, J.R.R; BRITO, R.F; OLIVEIRA, B.F.B. **BENEFICIAMENTO DO SILICATO DE ALUMÍNIO PARA UTILIZAÇÃO COMO CARGA MINERAL EM PROCESSO DE PRODUÇÃO DE TINTAS, PLÁSTICOS E BORRACHAS**. In: ANAIS DO XXIX ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 2022, Armação dos Búzios. Anais eletrônicos. Campinas, 2022.

SILVA, I.M. **ANÁLISE DA ATUAÇÃO DO ESTADO NA FISCALIZAÇÃO DAS BARRAGENS DE MINERAÇÃO: O CASO SAMARCO**. Revista de Iniciação Científica e Extensão da Faculdade de Direito de Franca. Franca, 2019.

SILVA, L.C. **DISPOSIÇÃO DE REJEITOS GRANULARES VIA DRY STACKING: UMA ALTERNATIVA À DISPOSIÇÃO EM BARRAGENS**. Monografia - Curso de Engenharia de Minas – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Araxá, 2021.

SOUZA, T.S.A. EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA LEGISLAÇÃO BRASILEIRA E DO ESTADO DE MINAS GERAIS RELACIONADO AO TEMA DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO EM BARRAGENS. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2019.

SUPPA, B.G. ALTERNATIVA DE DISPOSIÇÃO A SECO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO. Monografia. Curso de Engenharia de Minas. Universidade federal de minas. Belo Horizonte, 2019.

TONIETTO, A.; SILVA, J. J. M. C. Valoração de danos nos casos de mineração de ferro no brasil. Revista brasileira de criminalística, v.1. 2011.

VINAUD, L.U.P. BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO EM MINAS GERAIS: LISTAS DE VERIFICAÇÃO DE ASPECTOS TÉCNICOS, LEGAIS E AMBIENTAIS. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Campus Araxá. 2019.

WILLIAMS, R, Zink, D & O'Brien, S 2017, 'REJEITOS FILTRADOS AGREGAM VALOR EM INDÚSTRIAS COMPETITIVAS DE CUSTO', em A Wu & R Jewell (eds), Paste 2017: Proceedings of the 20th International Seminar on Paste and Thickened Tailings, University of Science and Technology Beijing, Beijing, pp. 363-370. 2017.