

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS**

**CONSIDERAÇÕES DE PROJETO PARA EMPILHAMENTO DE REJEITO  
FILTRADO – ESTUDO DE CASO MINÉRIO DE FERRO**

**PATRICIA MONTEIRO BRAGA**

**BELO HORIZONTE - MG**

**2022**

PATRICIA MONTEIRO BRAGA

**CONSIDERAÇÕES DE PROJETO PARA EMPILHAMENTO DE REJEITO  
FILTRADO – ESTUDO DE CASO MINÉRIO DE FERRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de bacharel.

Orientador: Prof. Pedro Casagrande

Co-Orientador: Eng. Elder Beirigo

BELO HORIZONTE - MG

JULHO 2022

## **AGRADECIMENTOS**

Aos professores do curso de Engenharia de Minas da UFMG pelos ensinamentos ao longo do curso e por me fazerem admirar ainda mais a área de mineração.

Ao orientador, professor Pedro Casagrande, agradeço por toda a troca de conhecimentos durante o curso e a contribuição para este trabalho.

Ao co-orientador, engenheiro Elder Beirigo, pela parceria no desenvolvimento do projeto e na minha trajetória profissional.

À Mineração Usiminas S.A. (MUSA) pelo fornecimento de dados e materiais que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

À equipe da HATCH, que além do fornecimento de dados, tem sido essencial no meu processo de formação profissional. Agradeço também por todo o apoio durante o curso.

Aos familiares e amigos que estão sempre torcendo pelo meu sucesso.

## RESUMO

O processamento mineral tem como consequência inevitável a geração de rejeitos. Por muitos anos, esses rejeitos foram dispostos em forma de polpa em reservatórios de barragens, o que se chama de método convencional de disposição. Após acidentes graves ocorridos nesse tipo de estrutura de armazenamento, houve intenso movimento no sentido de dificultar o licenciamento de novas barragens, com mudanças na legislação brasileira e em guias de boas práticas internacionais. Nesse contexto, as empresas de mineração, buscando maior segurança e menores impactos ambientais, migraram para outros métodos de disposição de rejeitos. Dentre esses métodos, ganhou destaque o empilhamento de rejeitos filtrados (Dry stacking), que consiste na disposição a seco (após filtração) em forma de pilha.

Com a ampliação do uso dessa tecnologia, faz-se necessário um domínio, cada vez maior, da técnica, o que gerou a motivação para esse estudo. Esse trabalho objetiva apresentar as principais considerações que devem ser observadas para que o projeto do empilhamento drenado seja viável e seguro. Para isso, apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre o “estado da arte” do uso da tecnologia de empilhamento de rejeito, no mundo e no Brasil, com as informações relevantes presentes na literatura. Apresenta-se também estudo de caso de projeto de disposição de rejeitos de minério de ferro, ilustrando-se o que foi apresentado na revisão bibliográfica.

Neste trabalho são abordados temas importantes a serem considerados durante a elaboração de um projeto de empilhamento de rejeitos filtrados como, por exemplo, características dos rejeitos, filtração, estabilidade, taxa de alçamento, geração de poropressão, gestão de água, clima, zoneamento da estrutura, aspectos econômicos e importância da gestão integrada de rejeitos.

**Palavras-chave:** empilhamento drenado, mineração, disposição, rejeitos, gestão integrada, pilha de rejeitos, filtração, minério de ferro.

## **ABSTRACT**

Mineral processing inevitably results in generation of tailings. For many years, these tailings were disposed in form of pulp in dam reservoirs, what we call the conventional method of disposal. After serious accidents that occurred in this type of storage structure, there was an intense movement to difficult the licensing of new dams, with changes in Brazilian legislation and international guides of best practices. In this context, mining companies, seeking greater safety and lower environmental impacts, have migrated to other tailings disposal methods. Among these methods, the stacking of filtered tailings (Dry stacking) has gained prominence, which consists of the dry disposal (after filtering) in the form of a pile.

With the expansion of the use of this technology, an increasing mastery of the technique is necessary, which generated the motivation for this study. This work aims to present the main considerations that must be observed so that the dry stacking design is viable and safe. For this, a literature review will be presented that aims to know the "state of the art" of the use of tailings dry stacking technology, in the world and in Brazil, with the relevant information present in the literature. A case study of an iron ore tailings disposal design will also be presented, illustrating what was presented in the literature review.

In this work, important issues to be considered during the elaboration of a dry stacking design will be addressed, such as tailings characteristics, filtration, stability, raising rate, generation of pore pressure, water management, climate, structural zonation, economic aspects, and importance of integrated tailings management.

**Key words:** Dry stacking, mining, disposal, tailings, integrated management, tailings pile, filtering, iron ore.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 4-1 – Rejeitos Desaguados e Tipos de Instalação Correspondentes .....	17
Figura 4-2 – Esquema para uma estrutura de rejeitos convencional .....	18
Figura 4-3 – Esquema para uma estrutura de rejeitos em pasta/espessado – disposição em encosta.....	19
Figura 4-4 – Esquema para uma estrutura de rejeitos em pasta/espessado – disposição em cone central.....	21
Figura 4-5 – Considerações para estratégia de gerenciamento de rejeitos.....	22
Figura 4-6 – Comparação entre pilhas de rejeitos filtrados existentes ou propostas viáveis e o projeto da mina Magino baseada na precipitação anual e taxa de produção de rejeitos.....	30
Figura 4-7 – Seção transversal típica de pilha de rejeitos filtrados .....	32
Figura 5-1 – Representação 3D do arranjo geral do Sistema de Disposição de Rejeitos Filtrados - SDRF.....	37
Figura 5-2 – Layout Planta de Filtragem. ....	40
Figura 5-3 – Localização da pilha de rejeitos e do dique de contenção de sedimentos.....	41
Figura 5-4 – Mapa geotécnico de superfície da área pilha de disposição de rejeitos filtrados.....	42
Figura 5-5 – Delimitação das ZE e ZNE de disposição de rejeitos. A) Planta. B) Seção típica .....	47
Figura 5-6 – Drenagem superficial: Cenário Final .....	49
Figura 5-7 – Arranjo geral dos drenos de fundo da pilha de rejeitos filtrados.....	50
Figura 5-8 – Exemplo de análise de estabilidade realizada .....	51
Figura 5-9 – Plano de Monitoramento .....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1 - Tipos de ensaios de caracterização física e seu uso em projetos de rejeitos Fonte: Adaptado de (CHAPMAN <i>et al.</i> , 2022).....	24
Tabela 4-2 – Considerações Típicas de Armazenamento de Água para Diferentes Tipos de Instalações de Rejeitos	27
Tabela 5-1 – Características Gerais da Pilha de Disposição de Rejeitos Filtrados. ....	37
Tabela 5-2 – Amostras de Rejeitos Coletadas .....	44
Tabela 5-3 – Resumo dos Resultados dos Ensaios de Caracterização Geotécnica dos Rejeitos. Fonte: HATCH, 2021.....	45
Tabela 5-4 – Resumo dos Resultados dos Ensaios Especiais. Fonte: HATCH, 2021 .....	46

## **LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS**

ANM – Agência Nacional de Mineração

CID – Consolidado, Isotrópico, Drenado

CIUsat – Consolidado, Isotrópico, Não Drenado, Saturado

CPE – Canal Periférico

CPT – Canal Periférico de Topo

EAR – Estrutura de Armazenamento de Rejeitos

GC – Grau de compactação

GNL – Grupo Nova Lima

ICMM – International Council of Mining and Metals

IP – Índice de Plasticidade

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

ML – Silte com Baixa Compressibilidade

NL – Não Líquido

NP – Não Plástico

MUSA – Mineração Usiminas

PDR – Pilha de Disposição de Rejeitos

SDRF – Sistema de Disposição de Rejeitos Friáveis

SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solos

VPL – Valor Presente Líquido

ZE – Zona Estrutural

ZNE – Zona Não Estrutural

## LISTA DE SÍMBOLOS

$n^{\circ}$  - número

km – quilômetro

m – metro

mm – milímetro

$\mu\text{m}$  – micrômetro

$\text{g}/\text{cm}^3$  – grama por centímetro cúbico

$\text{cm}/\text{s}$  – centímetro por segundo

$\text{cm}^2/\text{s}$  – centímetro quadrado por segundo

$C_v$  – coeficiente de adensamento

$\rho_{d_{\text{max}}}$  – densidade seca máxima

$W_{ot}$  – umidade ótima

% – por cento

$^{\circ}\text{C}$  – graus Celsius

$\phi$  – diâmetro

kPa – quilo Pascal

g – Aceleração da gravidade

$\text{m}^3$  – metro cúbico

H – horizontal

V – vertical

c – coesão

$c'$  – coesão efetiva

$\phi$  – ângulo de atrito

$^{\circ}$  – graus

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	12
2. OBJETIVOS .....	14
2.1. Objetivo geral .....	14
2.2. Objetivos específicos .....	14
3. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO .....	15
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	16
4.1. Métodos de Disposição de Rejeitos .....	16
4.1.1. Disposição convencional de rejeitos.....	18
4.1.2. Disposição de rejeitos em pasta / espessados.....	19
4.1.3. Disposição de rejeitos filtrados .....	19
4.2. Considerações para projeto de disposição de rejeitos filtrados.....	21
4.2.1. Características dos Rejeitos.....	22
4.2.2. Filtragem do Rejeito e teor de umidade.....	25
4.2.3. Altura da Pilha e Estabilidade .....	26
4.2.4. Taxa de alteamento e Geração de Poropressão .....	26
4.2.5. Infiltração e gestão de água.....	27
4.2.6. Clima.....	29
4.2.7. Liquefação e Zoneamento.....	31
4.3. Aspectos econômicos do empilhamento de rejeito filtrado .....	32
4.4. Importância da gestão integrada de rejeitos .....	33
5. ESTUDO DE CASO .....	36
5.1. Caracterização do projeto.....	36
5.1. Planta de Filtragem .....	39
5.2. Características do local .....	40
5.2.1. Localização.....	40

5.2.2. Condições climáticas .....	41
5.3. Características da Fundação .....	42
5.4. Características do Rejeito Filtrado.....	43
5.5. Zoneamento da Pilha de Rejeitos .....	47
5.6. Gestão de água.....	48
5.7. Estabilidade da Pilha.....	50
5.8. Plano de Monitoramento.....	52
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	54
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	56

## 1. INTRODUÇÃO

A geração de rejeitos provenientes do beneficiamento mineral é inevitável dentro do processo, o que leva empresas a buscarem por alternativas de disposição que aliadas à segurança, minimizem os impactos ambientais.

No Brasil, a crescente pressão da sociedade pela adoção de práticas mais sustentáveis na mineração, fortalecida principalmente pelas grandes rupturas recentes de barragens de rejeitos, tem aumentado a possibilidade de se viabilizar a utilização de tecnologias de tratamento e disposição dos rejeitos que usualmente têm custos de implantação e operação superiores às soluções até então mais comuns (disposição de polpa em reservatórios de barragens).

Além da pressão da sociedade e a preocupação das empresas com redução dos riscos associados à disposição em barragens, a legislação tornou-se mais restritiva, a exemplo da Resolução nº 13 (ANM, 2019), que proibiu a utilização do método de alteamento “a montante”, dificultando o licenciamento desse tipo de estrutura. Em fevereiro de 2022, a Resolução nº 95 (ANM,2022), consolidou esse e outros atos normativos com relação à segurança de barragens de mineração.

Nesse contexto, a filtragem de rejeitos para a disposição a seco foi iniciada recentemente em diversos empreendimentos de mineração no Brasil (MUSA, VALE, ALCOA, ALUNORTE, GERDAU, VALLOUREC; FERRO+, MORRO DO IPÊ, CSN, SAMARCO, ETC.). Isso torna cada vez maior a importância do domínio da técnica, o que motivou esse estudo.

Acidentes ocorridos mundialmente, em particular no Canadá e no Brasil, motivaram a elaboração de um guia padrão de gerenciamento de rejeitos “*Global Industry Standard on Tailings Management* (Padrão Global da Indústria para a Gestão de Rejeitos)”, elaborado pelo ICMM (*International Council of Mining and Metals* - Conselho Internacional de Mineração e Metais) em 2020. Esse padrão visa evitar qualquer dano às pessoas e ao meio ambiente (zero dano), com tolerância zero para fatalidades humanas.

Embora o conceito de gestão integrada de rejeitos seja bastante utilizado no contexto global, no Brasil o conceito, que é importante para garantir sucesso na implantação de novas tecnologias de disposição de rejeitos, ainda está sendo incorporado à prática das empresas.

As estruturas de rejeitos filtrados têm-se tornado mais comuns à medida que os avanços tecnológicos tornam esta aplicação mais viável como uma opção de armazenamento de rejeitos.

O presente trabalho apresenta estudo de caso, de um sistema de disposição de rejeitos filtrados, no município de Itatiaiuçu, Minas Gerais. O projeto desse sistema previu a operação integrada de todas as estruturas que o compõem: uma Planta de Filtragem, com um pátio de estocagem e carregamento de rejeitos; uma pilha de disposição de rejeitos filtrados; um dique de contenção de sedimentos; assim como os respectivos acessos de interligação. Este trabalho será direcionado principalmente ao estudo da pilha de rejeitos. O projeto da pilha de rejeitos foi desenvolvido buscando a implantação e a operação desta estrutura de forma produtiva, segura e sustentável, respeitando as melhores práticas internacionais da indústria e a legislação aplicável.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1.Objetivo geral**

O objetivo deste trabalho é apresentar os principais elementos que devem ser levados em consideração para que o projeto do empilhamento drenado seja viável e seguro". O trabalho também objetiva ilustrar a revisão bibliográfica com um estudo de caso de empilhamento de rejeito de minério de ferro filtrado (Dry Stacking) em Itatiaiuçu, Minas Gerais.

### **2.2.Objetivos específicos**

A fim de atingir o objetivo geral, pretende-se:

- Avaliar as alternativas de disposição de rejeito;
- Comparar os métodos de disposição de rejeitos;
- Apresentar as principais considerações que devem ser feitas em um projeto de empilhamento drenado (Dry Stacking).
- Apresentar o empreendimento do estudo de caso;
- Apresentar a caracterização do rejeito do estudo de caso;
- Apresentar a concepção do projeto de empilhamento drenado (Dry Stacking) do estudo de caso.

### 3. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

- Resumo / Abstract: apresenta o resumo do conteúdo deste trabalho, em português e em inglês.
- Capítulo 1 – Introdução: apresenta a motivação e a contextualização do estudo, discussão formal do tema da pesquisa, ressaltando a abrangência e a importância do trabalho.
- Capítulo 2 – Objetivos: apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos do presente trabalho.
- Capítulo 3 – Organização do documento: apresenta como o trabalho está organizado, de forma a auxiliar o leitor no entendimento.
- Capítulo 4 – Revisão Bibliográfica: contempla a revisão bibliográfica que visa conhecer o “estado da arte” do uso da tecnologia de empilhamento de rejeito drenada, no mundo e no Brasil, com as informações relevantes presentes na literatura. Também aborda a importância da gestão integrada de rejeitos.
- Capítulo 5 – Estudo de Caso: descreve o projeto apresentado como estudo de caso que ilustra o que é descrito na revisão bibliográfica.
- Capítulo 6 – Conclusão: apresenta as principais observações e conclusões.
- Capítulo 7 – Referências Bibliográficas: lista todos os materiais técnicos consultados e referenciados ao longo do trabalho, em conformidade com a Associação Brasileira de Normas Técnicas.

## 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção apresenta-se a revisão bibliográfica referente à evolução das técnicas de disposição de rejeito. Descrevem-se os métodos de disposição de rejeitos e apresentam-se as principais considerações para projetos de disposição de rejeitos filtrados.

### 4.1. Métodos de Disposição de Rejeitos

As atividades de mineração, por muito tempo descartaram seus resíduos na natureza, seja em cursos d'água, seja em terrenos adjacentes, formando-se depósitos sem nenhuma preocupação de ordenação e sistematização. A situação no Brasil não foi diferente do resto do mundo. (ÁVILA e SAWAYA, 2011)

A metodologia tradicional de disposição de rejeitos em forma de polpa exige, em geral, o uso de grandes áreas e apresenta forte impacto ambiental. Por essa razão, as empresas têm maiores dificuldades para a realização de novos licenciamentos. A proximidade de áreas urbanas e a pressão pública têm despertado a necessidade de se buscarem alternativas a essa metodologia. (GUIMARÃES *et al.*, 2012 apud ALVES, 2020)

Nas últimas décadas, os impactos da atividade minerária têm levantado questionamentos em âmbitos político e social, o que foi intensificado por eventos recentes envolvendo o rompimento de barragens de rejeitos no Brasil.

Com a constante geração de rejeitos provenientes do beneficiamento mineral as empresas do setor buscam alternativas de disposição que aliadas à segurança, minimizem os impactos ambientais.

Nesse contexto, são apresentadas, a seguir, as principais tecnologias de disposição de rejeitos, categorizadas por MEND (2017) pelo tipo de depósito onde os rejeitos são armazenados:

**1. Depósitos convencionais de rejeitos:** depósitos que recebem rejeitos de polpa não espessados ou espessados, e que são contidos por barragens.

**2. Depósitos de rejeitos em pasta / espessados de alta densidade:** depósitos que recebem rejeitos com espessamento de alta densidade ou rejeitos em pasta; os rejeitos são materiais viscosos com resistência ao escoamento, muitas vezes na faixa de 40 Pa a mais de 200 Pa. Esses rejeitos são geralmente contidos por barragens. No entanto, as barragens podem ser menores se o depósito tirar vantagem dos taludes mais íngremes.

**3. Depósitos de rejeitos filtrados:** depósitos que armazenam rejeitos filtrados de forma a que eles se comportem como um solo, geralmente produzido próximo ao teor de umidade ótimo para facilitar a compactação. Os rejeitos são geralmente colocados em pilhas e têm zonas estruturais compactadas.

A Figura 4-1 ilustra essa divisão por consistência e tipo de depósito.

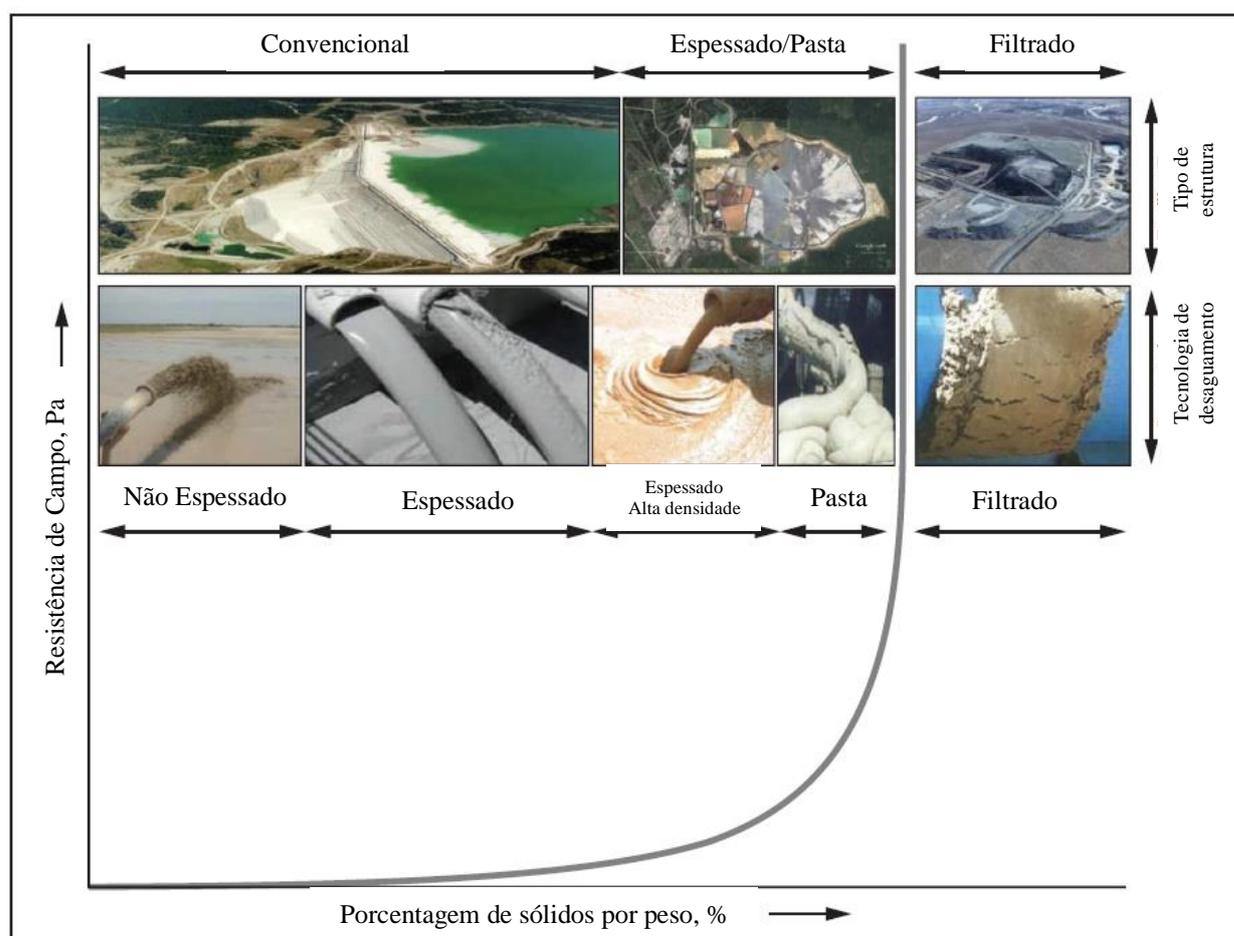


Figura 4-1 – Rejeitos Desaguados e Tipos de Instalação Correspondentes

Fonte: Adaptado de (MEND,2017)

A seguir apresentam-se as principais alternativas de disposição de rejeitos considerando-se o tipo de depósito em que são lançados, com maior ênfase na disposição de rejeitos filtrados, objeto deste trabalho.

#### 4.1.1. Disposição convencional de rejeitos

De acordo com Watson *et al.* (2010), a disposição convencional de rejeitos, envolve a descarga da polpa de rejeitos da usina no reservatório de barragens com teor de sólidos entre 25% e 45% em peso.

Ainda conforme o mesmo autor, a disposição convencional os rejeitos são depositados hidráulicamente, em estado solto, atrás de barragens de contenção. Os rejeitos são depositados acima ou abaixo do nível d'água e, normalmente, segregam com as partículas mais grossas assentando perto do ponto de descarga, o material mais fino, por outro lado, é transportado para longe do ponto de descarga. Essa segregação pode ser um aspecto vantajoso ou prejudicial da deposição convencional. A água liberada da lama é coletada em uma lagoa na superfície de rejeitos e (a) evapora, (b) é descarregada do depósito, ou (c) é recuperada para a instalação de processamento de minério através de uma lagoa de recuperação.

A Figura 4-2 mostra um esquema típico de um depósito de rejeitos convencional.

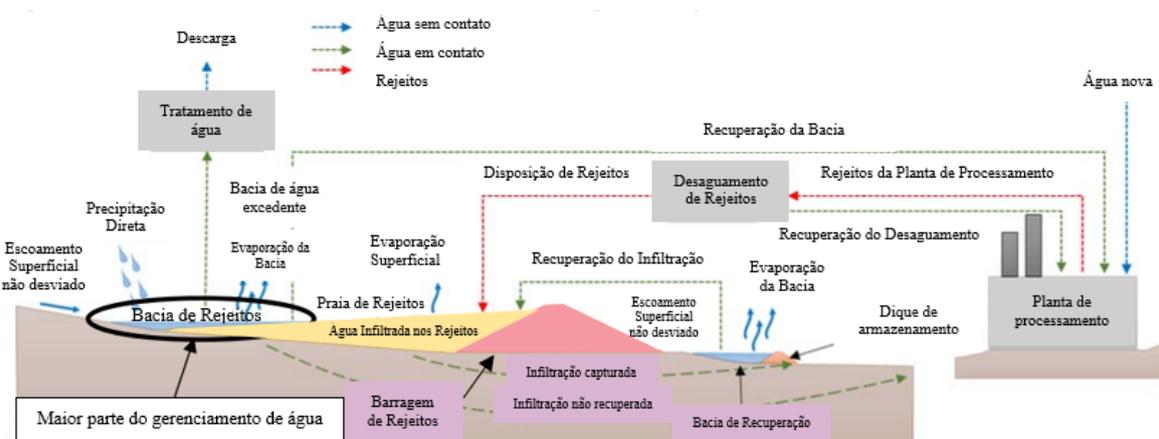


Figura 4-2 – Esquema para uma estrutura de rejeitos convencional  
Fonte: Adaptado de (MEND,2017)



disco ou correia (por vácuo) ou com filtros-prensa (usando pressão) para densidades de pasta superiores a 85% de sólidos em peso. O produto filtrado (torta) requer transporte por caminhão ou esteira.

De acordo com Pimenta (2011), os principais objetivos deste método são:

- Obter um maciço não saturado e estável;
- Obter maior densidade e, portanto, maior capacidade e vida útil;
- Obter menor potencial de dano em uma eventual ruptura;
- Obter maior facilidade para o fechamento e recuperação ambiental;
- Aplicação segura do método de montante, com baixo risco de liquefação e de ruptura.

Conforme Lupo e Hall (2010) algumas das principais vantagens da disposição de rejeitos filtrados em comparação com outros métodos incluem:

- Minimizar o consumo de água (a maior parte da água é recuperada durante o processo de filtração);
- Rejeitos filtrados frequentemente têm propriedades adequadas ao empilhamento, reduzindo assim as necessidades de área para disposição;
- A pilha de rejeitos filtrados permite a disposição de forma estável, garantindo que a recuperação seja conduzida simultaneamente com o descarte, o que pode gerar economia de tempo e custo para a operação.

Segundo Ulrich e Coffin (2013), tal como acontece com outras opções de disposição, a decisão de selecionar rejeitos filtrados deve levar em consideração requisitos e condições específicas do local, incluindo custos operacionais, de implantação, e de fechamento, além de outros aspectos, como o resultado de uma avaliação de risco, o uso e a disponibilidade de água e questões ambientais.

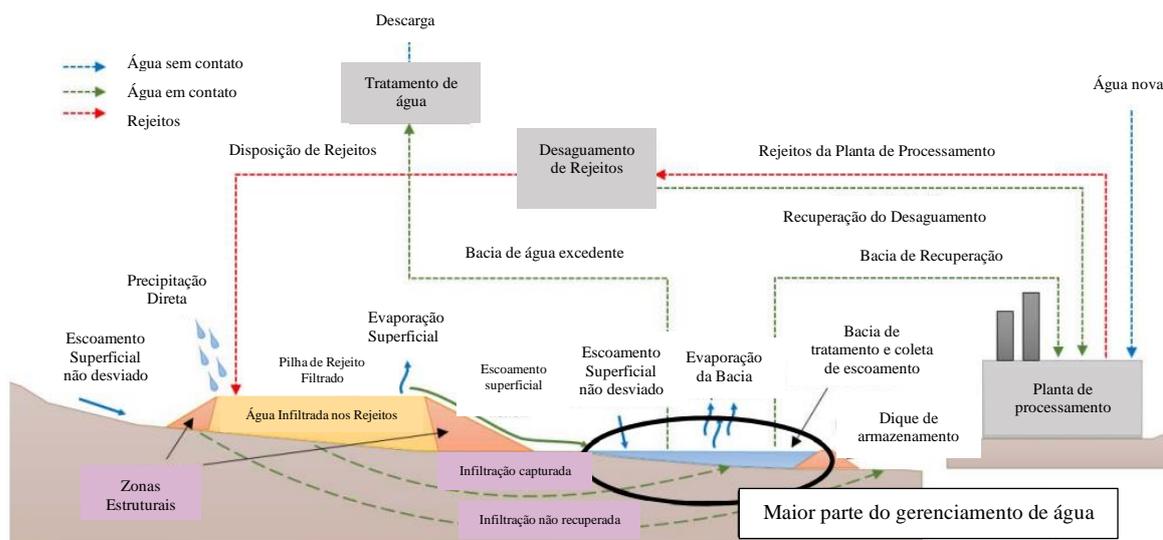


Figura 4-4 – Esquema para uma estrutura de rejeitos em pasta/espessado – disposição em cone central

Fonte: Adaptado de (MEND,2017)

#### 4.2. Considerações para projeto de disposição de rejeitos filtrados

Lupo e Hall (2010) afirmam que o projeto de disposição de rejeitos filtrados é um equilíbrio entre manuseio de materiais e construção com as propriedades geotécnicas do rejeito.

MEND (2017) aponta que as tecnologias de rejeitos e o tipo de depósito ideais para determinado projeto devem ser escolhidos para reduzir o risco geral do projeto, especialmente considerando-se o fechamento a longo prazo, assim como devem ser específicos para o rejeito e as características do local. Além disso, as tecnologias disponíveis e os sistemas sociais/regulatórios devem ser considerados. Essa relação é ilustrada na Figura 4-5.

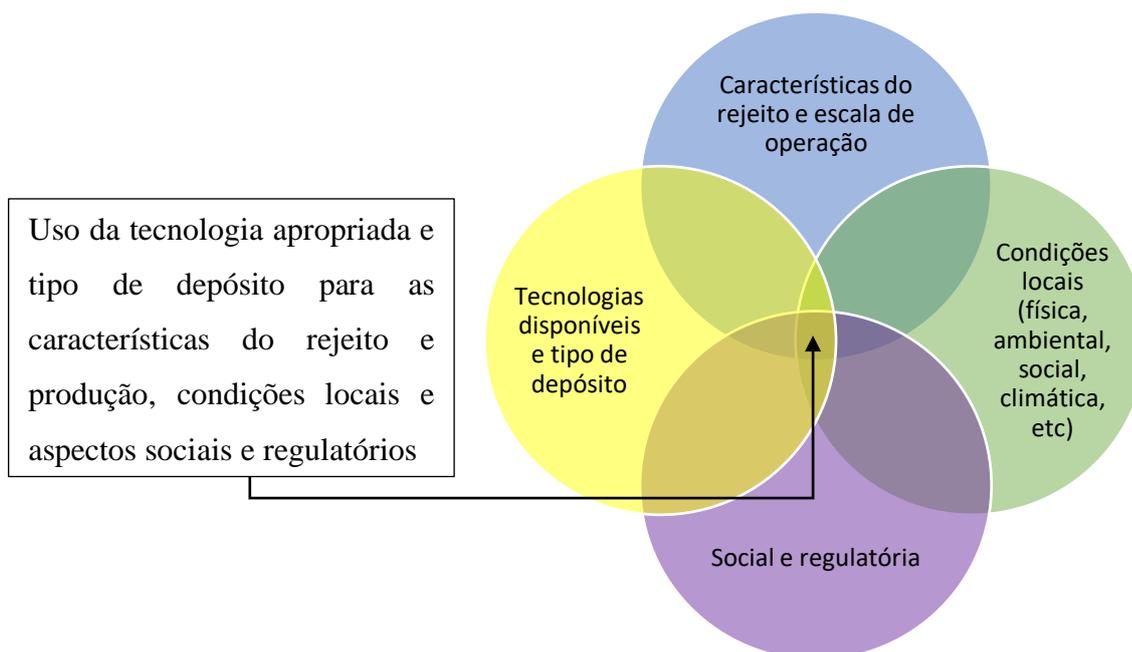


Figura 4-5 – Considerações para estratégia de gerenciamento de rejeitos  
 Fonte: Adaptado de (MEND,2017)

A seguir são apresentados alguns desses conceitos aplicados à disposição de rejeitos filtrados. Este trabalho prioriza os aspectos técnicos, não abordando as considerações sociais ou regulatórias.

#### 4.2.1. Características dos Rejeitos

A caracterização de rejeitos é o processo de identificar e descrever suas propriedades, atributos; e comportamento. Esse processo começa pela identificação dos constituintes que compõem os rejeitos. Os rejeitos consistem principalmente de rocha processada e água, mas também podem conter produtos químicos usados no processo de extração mineral, minerais dissolvidos e materiais orgânicos que podem afetar significativamente suas características bem como a forma pela qual devem ser gerenciados. Cada um desses constituintes deve ser considerado ao avaliar-se como os rejeitos serão manejados. Não há dois rejeitos iguais e sua composição determina os potenciais riscos associados à sua gestão. (CHAPMAN *et al.*, 2022)

Os rejeitos provenientes dos processos de beneficiamento e de concentração de minérios apresentam características específicas que variam em função da natureza do minério bruto

e dos processos aplicados. Em termos granulométricos, podem apresentar desde materiais arenosos e não plásticos até solos de granulometria muito fina e elevada plasticidade (GOMES, 2006 apud CARVALHO,2017).

Conforme Lupo e Hall (2010) e Gomes *et al.* (2019) os principais parâmetros para o estudo/projeto são obtidos por meio de testes de campo e de laboratório, destacando-se:

- Granulometria completa,
- Limites de Atterberg,
- Compactação Proctor Normal,
- Permeabilidade,
- Resistência ao cisalhamento,
- Adensamento oedométrico.

Segundo Gomes *et al.* (2019) a granulometria completa, os limites de Atterberg e a permeabilidade, são essenciais para definir o comportamento do material durante o processo de filtração. A densidade seca máxima e o teor de umidade ideal são obtidos através do ensaio de compactação proctor normal. Esse ensaio é essencial para definir as especificações de compactação e ajudar a avaliar os equipamentos que irão trabalhar no espalhamento e compactação do material para densidades específicas exigidas em zonas estruturais e zonas não estruturais.

Lupo e Hall (2010) afirmam que a resistência ao cisalhamento dos rejeitos da pilha de rejeito filtrado é variável, dependendo do teor de umidade, densidade dos rejeitos e condições de drenagem dentro da pilha. Do ponto de vista do projeto, é importante reconhecer que essas características estão mudando à medida que mais rejeitos são colocados na pilha de rejeito filtrado. Além disso, a densidade de rejeitos e o teor de umidade pode variar dependendo da eficiência do filtro e da mineralogia do minério.

Conforme Gomes *et al.* (2019) os ensaios de adensamento oedométrico contribuem para o entendimento da consolidação e comportamento de drenagem do material, que são chave para entender o potencial de consolidação do peso próprio e a necessidade para

alívio da poropressão adicional que ocorre no caso de materiais de permeabilidade muito baixa empilhados muito rapidamente, como discutido no item 4.2.4.

Chapman *et al.* (2022) afirmam que a caracterização física de rejeitos geralmente consiste na determinação de propriedades de índice e determinação de propriedades físicas e comportamentos por meio de testes laboratoriais padronizados. As propriedades de índice são usadas para identificar e classificar materiais semelhantes ao solo, como rejeitos para fins de engenharia. Propriedades físicas e comportamentos importantes para a caracterização de rejeitos incluem resistência ao cisalhamento, densidade seca, rigidez, permeabilidade e estrutura. Um resumo dos vários tipos de testes de índice e testes de propriedades físicas realizados para determinar as propriedades e comportamentos dos rejeitos são fornecidos na Tabela 4-1.

Os autores indicam que não é realista esperar que um conjunto completo de testes possa ser realizado durante as etapas do processo de projeto. O profissional de rejeitos, portanto, precisa organizar o programa de testes de acordo com a disponibilidade e representatividade da(s) amostra(s), requisitos regulatórios e expectativas, e as necessidades de informação e nível de confiança exigido.

Tabela 4-1 - Tipos de ensaios de caracterização física e seu uso em projetos de rejeitos  
Fonte: Adaptado de (CHAPMAN *et al.*, 2022)

<b>Tipo</b>	<b>Descrição do Teste</b>	<b>Uso em Projetos de Rejeitos</b>
Índice	Granulometria	Classificação, estimativas, indicação do ângulo de bancada
	Limites de Atterberg	Classificação, estimativas, testes de flocculantes
	Peso específico (sólidos)	Cálculo de densidade e volume, indicação do ângulo de bancada
	Peso específico (polpa)	Cálculo de densidade e volume
	Composição mineralógica	Composição das partículas de rejeito, comportamento de campo
	Dispersão	Potencial para erosão interna

<b>Tipo</b>	<b>Descrição do Teste</b>	<b>Uso em Projetos de Rejeitos</b>
Força de cisalhamento	Drenado	Análises de estabilidade
	Não-drenado	
Densidade seca	Sedimentada	Dimensionamento da EAR, avaliação da taxa de alteamento, cálculo da capacidade, decantação/clarificação da água
	Seca ao ar	Dimensionamento da EAR, avaliação da taxa de alteamento, cálculo da capacidade
	Consolidada	
	Compactada	Metas de construção, referência para condições de testes remodelados
Rigidez	Adensamento	Estimativa de recalque, estimativa de deformação, dissipação de poropressão, abordagens de construção
Permeabilidade	Saturada	Análises de percolação, estimativa do tempo de adensamento, avaliação das condições de carregamento drenado e não-drenado
	Não-saturada	Análises de percolação, projeto de fechamento, cálculo de infiltração
Estrutura	Inclinação da praia	Dimensionamento da EAR, cálculo de capacidade, cálculo de borda livre

#### **4.2.2. Filtragem do Rejeito e teor de umidade**

Conforme Crystal *et al.* (2018), o percentual de finos (fração de silte passante na peneira nº 200 e fração argila menor que 2µm) afetam de maneira significativa a eficiência do processo de filtragem, os tempos de ciclo, a possibilidade de colmatação do filtro e o teor de umidade alcançado. Considerar o potencial de variabilidade da distribuição granulométrica do rejeito e da porcentagem de sólidos em massa da alimentação do filtro são fatores-chave a serem considerados na disposição de rejeito filtrado. A variação de rejeitos sempre esteve presente nas operações de mina, mas a disposição de rejeito filtrado é mais sensível a essa variação do que a disposição convencional.

Segundo Gomes *et al.* (2019) o teor de umidade geotécnico (ou gravimétrico) ideal é um parâmetro chave na avaliação de requisitos da planta de desaguamento, em particular sobre o tipo e quantidade de filtros. O teor de umidade especificado, deve ser comparado com a meta de teor de umidade prometida pelos fornecedores de equipamentos com base em testes de desaguamento em escala de bancada com o real, todos os dias. O teor de umidade “alcançável” deve ser comparado com operações semelhantes.

#### **4.2.3. Altura da Pilha e Estabilidade**

A altura da pilha é geralmente baseada nas análises de estabilidade conduzidas em diversas seções da pilha. Segundo Lupo e Hall (2010) as análises de estabilidade precisam considerar:

- Resistência ao cisalhamento de todos os materiais que compõe a seção (rejeitos, fundação etc.);
- As condições de drenagem (drenada/não drenada) assumidas nas análises de estabilidade devem refletir aquelas que podem se desenvolver durante a operação;
- Presença de uma superfície de água subterrânea estática.
- Carga sísmica e resistência ao cisalhamento residual. O carregamento sísmico deve ser considerado para estabilidade de taludes para configurações operacionais e pós-fechamento.

#### **4.2.4. Taxa de alteamento e Geração de Poropressão**

Segundo Lupo e Hall (2010), a taxa de alteamento e geração de poropressão devem ser consideradas nos casos em que os rejeitos apresentam um alto grau de compressibilidade, pois rejeitos com essa característica, caso empilhados muito rapidamente, podem gerar um excesso de poropressão, que pode comprometer a estabilidade da pilha.

Conforme Crystal *et al.* (2018) o controle da taxa de alteamento do depósito, assim como na disposição convencional, é de grande importância para que haja tempo suficiente de ocorrer o adensamento e a drenagem do material, bem como para a dissipação de qualquer excesso de poropressão. O controle de alteamento com uma rigorosa instrumentação e

monitoramento para verificar a real dissipação de poropressão é fundamental para minimizar ou mitigar riscos principalmente em taxas grandes de produção/disposição.

#### 4.2.5. Infiltração e gestão de água

A gestão da água é um fator importante, pois influencia a estabilidade física dos rejeitos. MEND (2017), resume onde a água é normalmente armazenada, indicando os principais dados de preocupações referente à gestão da água, para cada tipo de disposição. Esse resumo é apresentado na Tabela 4-2.

Tabela 4-2 – Considerações Típicas de Armazenamento de Água para Diferentes Tipos de Instalações de Rejeitos  
Fonte: Adaptado de (MEND,2017)

<b>Tipo de disposição</b>	<b>Água armazenada no depósito de rejeitos</b>	<b>Água armazenada em um depósito separado</b>	<b>Preocupação com a gestão de água no depósito de rejeitos</b>	<b>Preocupação com a gestão de água em um depósito separado</b>
<b>Convencional</b>	Maior parte da água	Não se aplica	<ul style="list-style-type: none"> <li>Potencial para falha catastrófica com mobilização de rejeitos se o volume do reservatório for liberado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Um depósito de água separado pode ser uma medida de risco</li> </ul>
<b>Pasta / Espessado</b>	Volume mais baixo que o convencional	Maior parte da água	<ul style="list-style-type: none"> <li>Potencial de mobilização de rejeitos um pouco menor que no caso convencional já que o volume de água no depósito geralmente é mínimo, mas os rejeitos são depositados soltos e saturados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Operação de depósitos externos grandes</li> <li>Consequência de ruptura de um depósito de água</li> </ul>

Tipo de disposição	Água armazenada no depósito de rejeitos	Água armazenada em um depósito separado	Preocupação com a gestão de água no depósito de rejeitos	Preocupação com a gestão de água em um depósito separado
			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Controle de erosão e gestão de sedimentos</li> </ul>	
<b>Filtrado</b>	Mínimo requerido	Toda a água	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Controle de erosão e gestão de sedimentos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operação de depósitos externos (potencialmente grandes)</li> <li>• Consequência de ruptura de um depósito de água</li> <li>• Gestão de sedimentos</li> </ul>

Segundo Lupo e Hall (2010), uma das situações mais comuns em pilhas de rejeitos filtrados é a água superficial (por exemplo, água de chuva) infiltrar-se através dos rejeitos e saturar a pilha levando à falha. Experiências de operações reais de pilha de rejeito filtrado mostraram que a infiltração através da pilha não é um problema significativo, desde que controles de gestão de água superficial sejam adequados.

Conforme Crystal *et al.* (2018), a infiltração de água de chuvas em pilhas de rejeitos filtrados é um fenômeno transiente e governado pela condutividade hidráulica não saturada desses materiais, o que a torna limitada e significativamente menor que a quantidade de água que infiltra em estruturas convencionais que operam saturadas constantemente. Conforme os mesmos autores e Davies e Rice (2001), a tomada de medidas que minimizem a quantidade de infiltração de água das chuvas é mais eficiente no controle da saturação dos rejeitos compactados que a implementação de complexos sistemas de drenagem interna que visem coletar esta água.

Davies (2011) aponta que uma lição aprendida de pilhas de rejeito filtrado já em operação é que quando há compactação apropriada e manutenção do teor de umidade especificado, a percolação é insignificante.

#### 4.2.6. Clima

Crystal *et al.* (2018) apresentam algumas ponderações para os diferentes tipos de clima:

- Clima árido: foi o primeiro a adotar projetos de empilhamento a seco com maior taxa de produção, normalmente impulsionados pela economia e escassez de água para processamento, mas também devido ao potencial de permitir melhorar ainda mais o processo de secagem e garantir que a pilha permaneça insaturada. A deposição em camadas/faces finas em grandes áreas pode resultar em uma secagem adicional significativa dos rejeitos. No entanto, deve-se notar que o transporte e a deposição por caminhão e compactação limitarão o impacto e a eficácia da secagem evaporativa. Instalações com arranjos de empilhamento de transportadores que colocam material solto em faces finas alcançarão uma secagem por evaporação mais alta, mas isso ainda pode ser limitado aos poucos centímetros externos, dependendo do tempo do ciclo de empilhamento.
- Clima úmido: enfrenta desafios adicionais com o gerenciamento das águas superficiais e normalmente deve empregar o gerenciamento ativo operacional para facilitar um escoamento alto. Empilhar o material filtrado em pilhas relativamente íngremes que escoam água facilmente durante chuvas intensas também é uma abordagem operacional que foi implementada.

SLR (2016) apresenta estudos realizados para a definição do método de disposição de rejeito mais apropriado para o projeto da mina de ouro Magino, em Ontário, Canadá. O autor discute as precipitações médias anuais em comparação com a produção de estruturas em operação. A Figura 4-6 ilustra essa comparação.

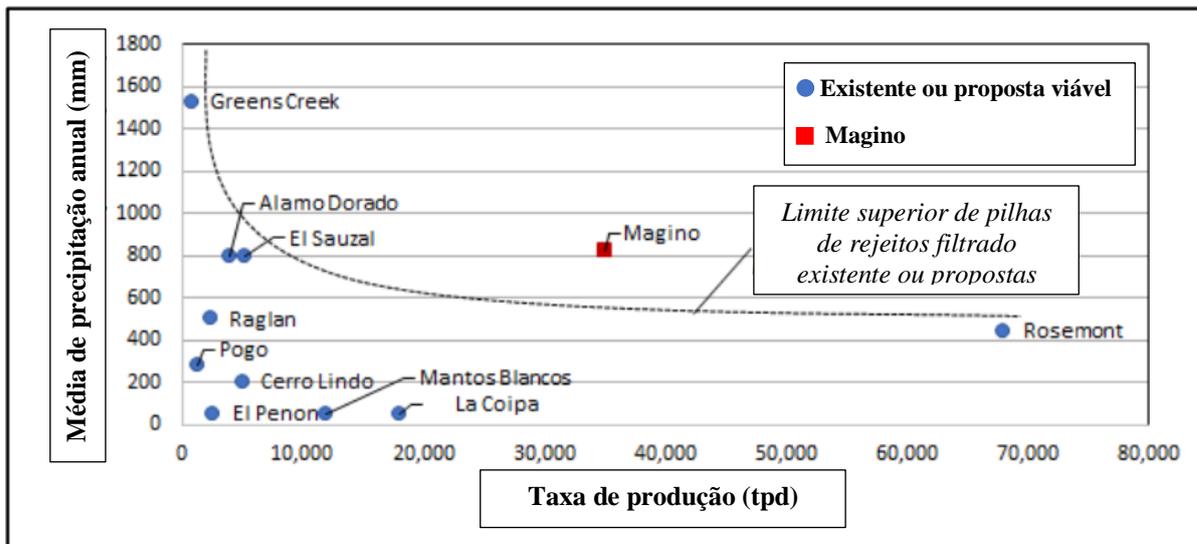


Figura 4-6 – Comparação entre pilhas de rejeitos filtrados existentes ou propostas viáveis e o projeto da mina Magino baseada na precipitação anual e taxa de produção de rejeitos

Fonte: Adaptado de (SLR, 2016)

Alves (2020) afirma que locais com média de precipitação anual alta, dificultam e podem até mesmo contraindicar a aplicação do método de disposição de rejeito filtrado. A ocorrência de chuvas faz aumentar a umidade do rejeito a ser depositado e ao mesmo tempo diminui a trafegabilidade das vias e da própria pilha de rejeitos. Além disso, a média de precipitação alta irá requerer um sistema de drenagem mais robusto e que demandará uma gestão mais intensiva.

Segundo Ulrich e Coffin (2013) em locais onde a precipitação ocorre sazonalmente, muitas vezes é benéfico ter áreas separadas dentro da pilha de rejeitos filtrados para conter rejeitos do período chuvoso e rejeitos do período seco. Os rejeitos do período seco são frequentemente dispostos na área mais externa da pilha, onde podem ser compactados a um grau em que possam fornecer contenção para os rejeitos do período chuvoso (que podem ter um menor grau de compactação e serem dispostos de forma que os rejeitos compactados mais externos proporcionem seu confinamento). É obviamente importante que o projetista considere quanto de cada material é colocado ao longo do tempo para que a zona estrutural externa seja construída a tempo de fornecer contenção dos rejeitos da estação chuvosa.

#### 4.2.7. Liquefação e Zoneamento

Liquefação é a perda da força cisalhante em um solo por causa da mudança na tensão ou deformação que resulta em aumento da poropressão (redução na tensão efetiva e força cisalhante associada) ou que transforma o solo para uma condição de estado crítico (força de cisalhamento residual). Consequentemente, se a tensão cisalhante aplicada exceder a força de cisalhamento liquefeita (ou residual), o solo pode sofrer deformação excessiva semelhante a um líquido viscoso. (JAMES *et al.*, 2022)

A liquefação dos rejeitos pode ser causada por um estímulo que causa a contração dos rejeitos e aumento da poropressão. Esse estímulo pode ser o resultado de terremotos ou de deformação dos rejeitos em longo prazo. (ANDREWS *et al.*, 2022)

Conforme MEND (2017) e Crystal *et al.* (2018), para manter a estabilidade estrutural, os rejeitos precisam ser bem drenados e/ou compactados para garantir a estabilidade estática e para evitar a liquefação. Não deve ser considerada somente a drenagem para evitar a liquefação, especialmente em climas úmidos. Portanto, uma parcela dos rejeitos, deve ser desaguada formando uma zona estrutural externa da pilha. Essa parcela de rejeitos deve ser bem compactada (ou seja, próximo ou ligeiramente abaixo do teor de umidade ótimo). Os rejeitos restantes podem ser colocados no interior e podem ser um pouco mais úmidos e ter menor grau de compactação.

Segundo Lara *et al.* (2013) as condições topográficas e a atividade sísmica do local do depósito de rejeitos são relevantes para a decisão de compactar ou não os rejeitos filtrados. Uma estrutura de rejeitos filtrados bem compactada é necessária em áreas com declives mais acentuados (>20%) e alta sismicidade (>0,25g). Quando essas condições locais são menos importantes para o projeto, uma alternativa híbrida envolvendo uma zona compactada e outra não compactada pode ser adotada (Figura 4-7).

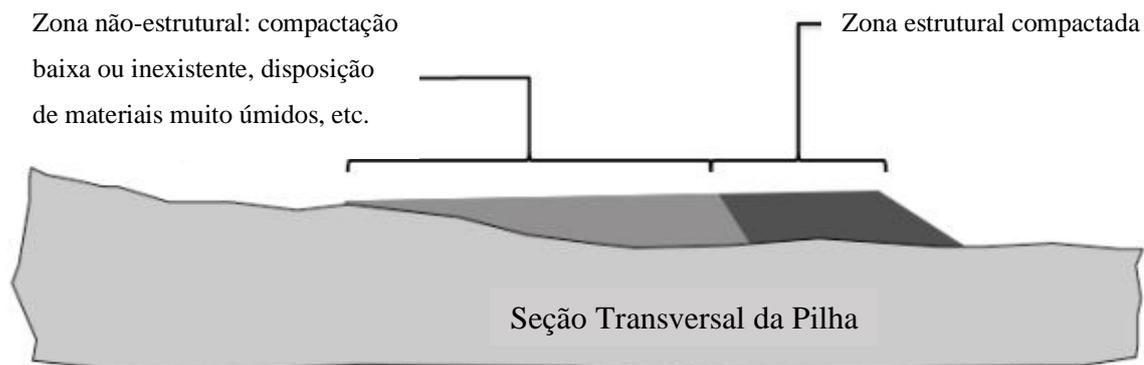


Figura 4-7 – Seção transversal típica de pilha de rejeitos filtrados  
 Fonte: Adaptado de (LUPO e HALL, 2010)

### 4.3. Aspectos econômicos do empilhamento de rejeito filtrado

Aspectos econômicos dos projetos devem incluir todas as fases do ciclo de vida da mina, incluindo planejamento, projeto, construção, operação, fechamento e pós-fechamento, que são tipicamente agrupadas em subcontas definidas como custos pré-capital, custos de capital, custos operacionais e de manutenção de capital, custos de fechamento e custos pós-fechamento. (MALGESINI e CHAPMAN, 2022)

Os mesmos autores também sinalizam que os custos são uma barreira potencial para a implantação da tecnologia de disposição de rejeitos filtrados, uma vez que usando a abordagem tradicional de valor presente líquido (VPL) pode ser difícil justificar despesas de projetos adicionais relacionadas ao desaguamento de rejeitos. Com despesas operacionais maiores, custos de fechamento, e custos de potencial tratamento de longo prazo ocorrendo mais tarde na linha do tempo que informa o VPL, tais custos são frequentemente dispensados como insignificantes no cálculo.

Crystal *et al.* (2018) afirmam que fatores como: distância média de transporte, locação, compactação e necessidade de remanejamento de materiais aumentam de maneira significativa o custo unitário da disposição de rejeitos filtrados em comparação com o método convencional. Baseado na experiência dos autores, os custos de capital (CAPEX) para disposição de rejeitos filtrados geralmente não são muito superiores ao método de disposição convencional. Os custos operacionais (OPEX) podem, porém, representar um

diferencial significativo que pode ou não ser compensado caso o projeto de forma ampla e os custos de vida útil da mina sejam apropriadamente considerados.

SLR (2016) indica que embora o custo por tonelada de rejeitos armazenados seja maior em pilhas de rejeito filtrado do que rejeitos convencionais os custos de filtragem podem ser compensados por uma maior eficiência de armazenamento e uma menor área de impacto ambiental. Os custos de movimentação de rejeitos para a disposição são maiores do que aqueles de transporte convencional de polpa, pois é necessário a utilização de caminhões ou transportadores. Além disso, normalmente é necessária uma frota de equipamentos para espalhar e compactar o material que é colocado para formar a zona estrutural.

O custo operacional de capital e o custo por tonelada das várias opções de desaguamento continuam a melhorar à medida que sua escala de uso aumenta e os projetos visam a aumentar a disponibilidade. Esta economia de escala está sendo atendida pelo custo crescente do uso da água (real e político) ao ponto em que, para muitos projetos, o rejeito desaguado não é somente a melhor opção técnica, mas também a opção mais lógica de uma perspectiva econômica global. (DAVIES, *et al.*, 2022)

#### **4.4.Importância da gestão integrada de rejeitos**

Muitos processos na mina são normalmente considerados externos ao sistema de rejeitos, mas afetam esse sistema e devem, portanto, ser considerados. O mais importante desses processos é o processamento e extração de minério. Pequenas alterações nas propriedades, preparação e processamento do minério podem ter um impacto significativo nas características dos rejeitos e, conseqüentemente, nas suas instalações. A natureza dos depósitos de minério determina em grande parte como serão extraídos, processados, a escala da operação de mineração, bem como a variabilidade desses fatores, que determinam a quantidade de estéril e rejeitos que serão produzidos pela mina e a natureza mineralógica, química e física dos rejeitos. (WATES *et al.*, 2022)

Seguindo os autores supracitados, tradicionalmente, a tecnologia de processamento de minério tendia a ser exclusivamente focada em maximizar a recuperação e minimizar

custos. Entretanto, atualmente, há uma tendência crescente de levar-se em consideração as propriedades dos rejeitos resultantes. O processamento secundário pode melhorar a recuperação e otimizar as propriedades dos rejeitos. As decisões de governança estão evoluindo para uma análise de negócios mais ampla do sistema que considera otimizar não apenas a recuperação, mas também as operações de gerenciamento de rejeitos, construção e fechamento de instalações e gerenciamento ambiental. Essas tendências recentes são positivas, pois as decisões tomadas em torno do processamento de minério podem ter um impacto profundo na instalação de rejeitos e devem ser incluídas no sistema de rejeitos.

Os mesmos autores afirmam que as instalações de rejeitos são sistemas dinâmicos altamente integrados e com alto grau de complexidade. Portanto, o risco deve ser gerenciado usando uma abordagem orientada ao sistema de maneira interdisciplinar, pois a segurança é afetada por decisões, comportamentos e ações dos participantes em todos os níveis do sistema.

Considerando o risco das instalações de rejeitos, os acidentes ocorridos e a multidisciplinaridade mencionada, o ICMM, em 2020, em conjunto com outras instituições, lançou o “Padrão Global da Indústria sobre Gestão de Rejeitos”. A Norma foi desenvolvida por um painel de especialistas multidisciplinar, com a contribuição de um Grupo Consultivo de várias partes interessadas. A revisão envolveu extensa consulta pública com as comunidades afetadas, representantes do governo, investidores, organizações multilaterais e partes interessadas do setor de mineração e reúne as melhores práticas existentes e as descobertas de falhas anteriores de instalações de rejeitos.

O Padrão Global da Indústria sobre Gestão de Rejeitos esforça-se para alcançar o objetivo final de zero danos às pessoas e ao meio ambiente com tolerância zero para a fatalidade humana. Apoiado por uma abordagem integrada à gestão de rejeitos, o Padrão visa prevenir falhas catastróficas e aumentar a segurança das instalações de rejeitos de minas em todo o mundo. Ele incorpora uma mudança radical em termos de transparência, responsabilidade e proteção dos direitos das pessoas afetadas pelo projeto. Compreendendo seis áreas de Tópicos, 15 Princípios e 77 Requisitos auditáveis, o Padrão é apoiado por protocolos de implementação que fornecem orientação detalhada para

certificação ou garantia conforme aplicável e para equivalência com outros padrões.  
(GTR,2020)

## 5. ESTUDO DE CASO

Como apresentado no item 1, a viabilidade de utilização de tecnologias de processamento para alternativas de disposição de rejeitos tem aumentado significativamente no Brasil. Nesse contexto, a Mineração Usiminas (MUSA), em parceria com a HATCH, desenvolveu um projeto integrado de um sistema de disposição de rejeitos filtrados (SDRF).

A seguir são apresentadas as principais características desse projeto, com foco na disposição de rejeitos, correlacionando-se com a bibliografia apresentada no item 4.

As informações e figuras apresentadas a seguir, no item 5, foram retiradas dos relatórios técnicos (HATCH,2019 e HATCH,2021), elaborados pela HATCH, empresa contratada pela MUSA para desenvolvimento do projeto.

### 5.1.Caracterização do projeto

O projeto detalhado do SDRF prevê a operação integrada de todas as estruturas que o compõem, a saber: uma Planta de Filtragem, com um pátio de estocagem e carregamento de rejeitos; uma pilha de disposição de rejeitos filtrados (PDR); um dique de contenção de sedimentos; assim como os respectivos acessos de interligação. Na Figura 5-1 são ilustradas as estruturas e acessos da Planta de Filtragem até os locais de destino dos rejeitos, bem como o dique de contenção de sedimentos.



Figura 5-1 – Representação 3D do arranjo geral do Sistema de Disposição de Rejeitos Filtrados - SDRF

Fonte: HATCH, 2021

Na Tabela 5-1 é apresentado um resumo das principais características da pilha de rejeitos filtrados.

Tabela 5-1 – Características Gerais da Pilha de Disposição de Rejeitos Filtrados.

Fonte: HATCH, 2021

<b>DADOS GERAIS</b>	
Finalidade	Disposição de Rejeitos Filtrados
Declividade longitudinal das bermas	0,5% em direção às descidas d'água e canais periféricos
Declividade transversal das bermas	2,0% em direção à canaleta de pé de cada berma
Altura máxima da pilha	77,20 m
Altura máxima dos taludes	5,0 m

<b>DADOS GERAIS</b>	
Espessura máxima de cada camada de rejeitos para espalhamento e compactação	0,30 m
Largura mínima das bermas	7,0 m
Inclinação dos taludes de face	2,6 H: 1.0 V <sup>(1)</sup>
Inclinação do talude global	4,0 H: 1.0 V <sup>(1)</sup>
Largura dos acessos operacionais	12,0m
Declividade máxima dos acessos	10,0%
Capacidade de armazenamento de rejeitos	9.201.410 m <sup>3</sup>
Tipo de Seção	<p>Seção do tipo Zonada, dividida em 02 (duas) zonas:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Zona Não Estrutural (ZNE) ou Geral = zona de material disposto em que a compactação será feita somente com o peso próprio dos equipamentos de espalhamento (entre 80 e 85% do Proctor Normal).</li> <li>2. Zona Estrutural (ZE) = zona de material disposto com controle de compactação (98% do Proctor Normal)</li> </ol>
Drenagem de Fundo	Drenagem de fundo com pedra de mão $\phi$ 100 mm e transições com brita 1, areia grossa e camada de proteção de rejeitos ou outro material com maior capacidade de drenagem.
Instrumentação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Marcos superficiais;</li> <li>• Piezômetros de corda vibrante;</li> <li>• Medidor de vazão.</li> </ul>

<sup>(1)</sup> H = Horizontal, V = Vertical

### 5.1.Planta de Filtragem

A Planta de Filtragem será composta por espessador, tanque de alimentação dos filtros, bombas de polpa, filtros prensa, alimentadores de correia, tanque de água filtrada, tanque de água limpa e bombas de água. A seguir, a rota de processamento é descrita de forma breve.

O tanque de recebimento da área de filtragem receberá os rejeitos da Planta Flotação e a Planta de Filtragem, por meio de um rejeitoduto. A partir do tanque, o rejeito será bombeado para o distribuidor e, em seguida, para o espessador. O *underflow* do espessador seguirá para o tanque de alimentação da filtragem por meio de bombeamento, enquanto o *overflow* será encaminhado por gravidade para o tanque de filtrado.

O rejeito espessado será, então, bombeado a partir dos tanques de alimentação dos filtros prensa. O tanque terá quatro pares de bombas (cada par é constituído por duas bombas em série), sendo cada par dedicado à alimentação de um filtro.

Depois do preenchimento dos filtros, as bombas interromperão a alimentação e será aplicada pressão nas câmaras. Essa ação promoverá o desaguamento; o filtrado será recolhido em calhas laterais dispostas em cada filtro. Quando o nível de filtrado nas calhas diminuir até determinado ponto, a operação de filtragem será finalizada. A tubulação de alimentação, então, será esvaziada com um jato de ar (“*core blow*”) no sentido contrário ao de bombeamento, de forma a evitar a presença de resíduos de polpa na torta. Em seguida, os filtros começarão o processo de abertura e liberação da torta. Depois que todas as placas tiverem sido abertas, o ciclo será novamente iniciado e as bombas de alimentação voltarão a operar.

A torta será recolhida pelos alimentadores de correia, localizados sob cada um dos filtros; um transportador de correia receberá esse produto e o direcionará para um *tripper*, que formará uma pilha intermediária de material filtrado. Posteriormente, esse material será recuperado por pás carregadeiras e carregado em caminhões, para disposição final na área de empilhamento a seco.

A Figura 5-2 ilustra os componentes da Planta de Filtragem.

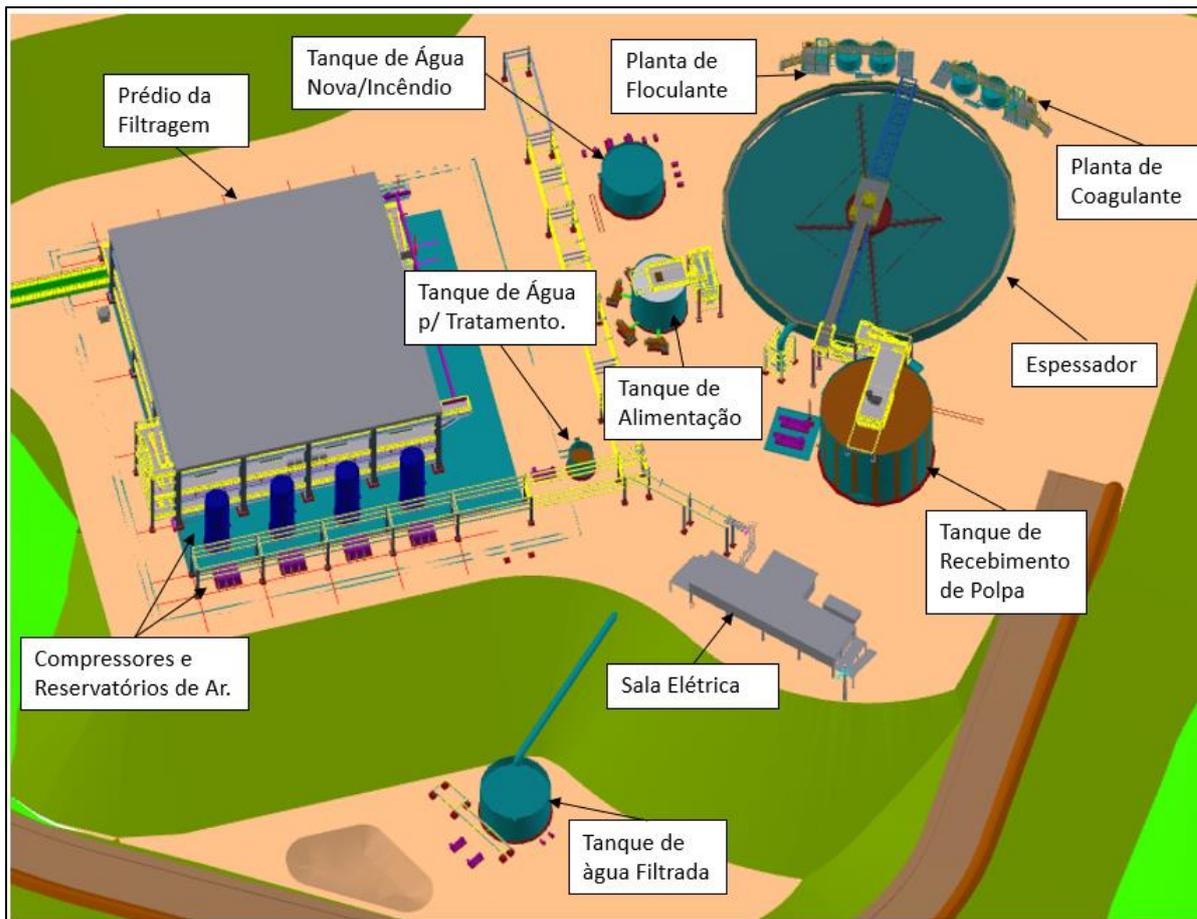


Figura 5-2 – Layout Planta de Filtragem.  
Fonte: HATCH, 2019

## 5.2. Características do local

As características locais básicas da área de implantação da pilha de rejeitos são apresentadas a seguir.

### 5.2.1. Localização

As minas da MUSA estão localizadas cerca de 85 km a sudoeste de Belo Horizonte, no estado de Minas Gerais. Os principais acessos são a rodovia federal Fernão Dias, BR-381, e a rodovia estadual MG-431. O projeto situa-se na porção ocidental da Serra do Curral, que é um dos elementos mais proeminentes na região do Quadrilátero Ferrífero. A Serra do Curral é subdividida em segmentos orientais, centrais e ocidentais. O

segmento Ocidental situa-se de Ponta da Serra até o Pico dos Três Irmãos; o segmento central, do Pico Três Irmãos ao Pico Belo Horizonte; e a parte oriental do Pico Belo Horizonte até a Serra da Piedade. A Figura 5-3 mostra o mapa da região e localização das minas da Mineração Usiminas S. A. (MUSA).

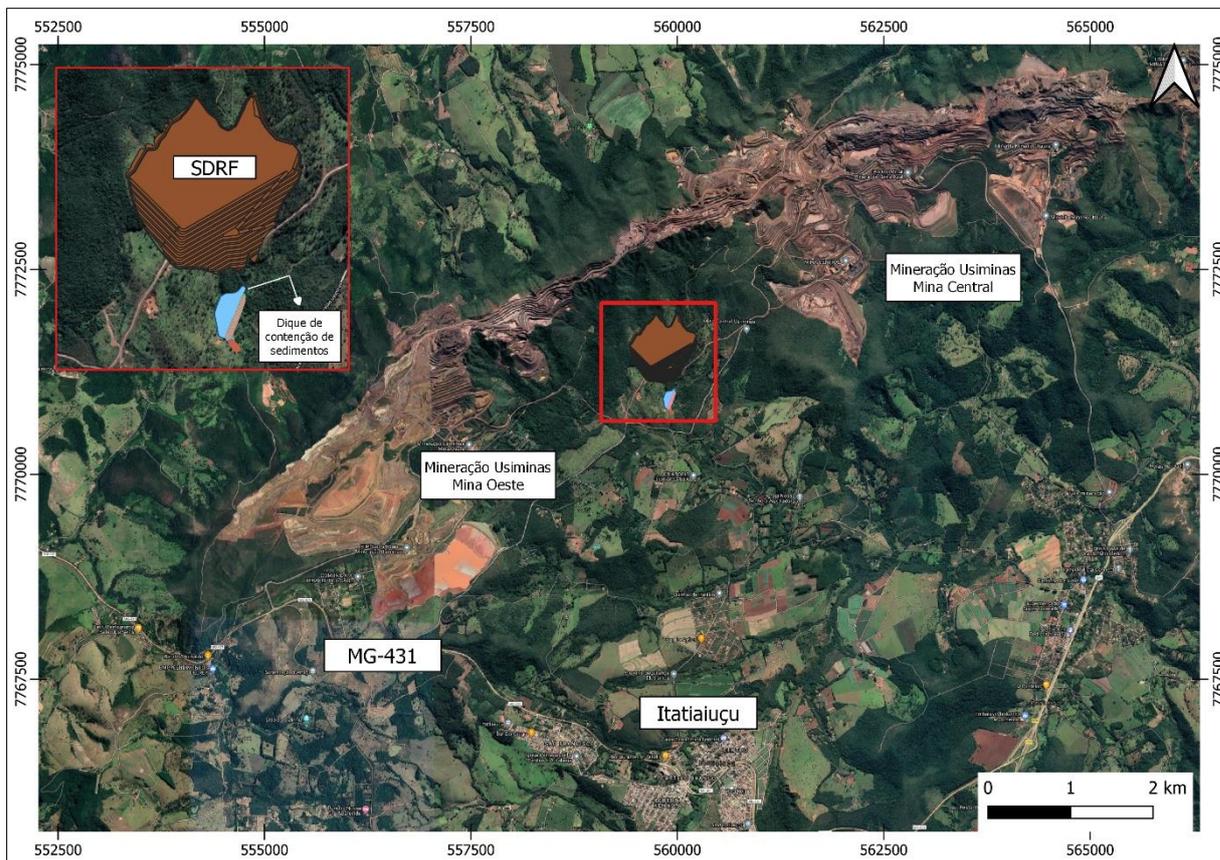


Figura 5-3 – Localização da pilha de rejeitos e do dique de contenção de sedimentos.  
Fonte: HATCH, 2021

### 5.2.2. Condições climáticas

A temperatura média anual na região é de 25° C. As temperaturas médias mais baixas são em torno de 8° C durante junho a agosto e as temperaturas médias mais elevadas são de 30° C em janeiro e fevereiro. O ponto máximo atingido na série histórica é 38°C, sendo que a umidade do ar varia de 53,5 a 74,7%. A precipitação anual é de cerca de 1.500 mm e ocorre principalmente na época das chuvas que dura de outubro a março. De abril a setembro o tempo é relativamente seco. A evaporação anual é da ordem de 1.000 mm.

### 5.3. Características da Fundação

A caracterização da fundação da pilha de rejeitos foi realizada por meio de levantamento de informações existentes, mapeamento de campo e investigações geotécnicas de campo e laboratório. Por meio dessas informações, foram identificados os materiais que compõem a fundação da pilha, bem como sua distribuição espacial e suas características geotécnicas.

Foram identificadas diferentes unidades geotécnicas na área de implantação da pilha de rejeitos. Dentre elas, as unidades que se destacaram foram denominadas por: cobertura aluvionar (aluvião e planície aluvionar); formação ferrífera; cobertura colúvio-eluvionar; e os solos residuais, saprolitos e rocha alterada do Grupo Nova Lima (GNL). O mapa geotécnico resultante está apresentado na Figura 5-4.

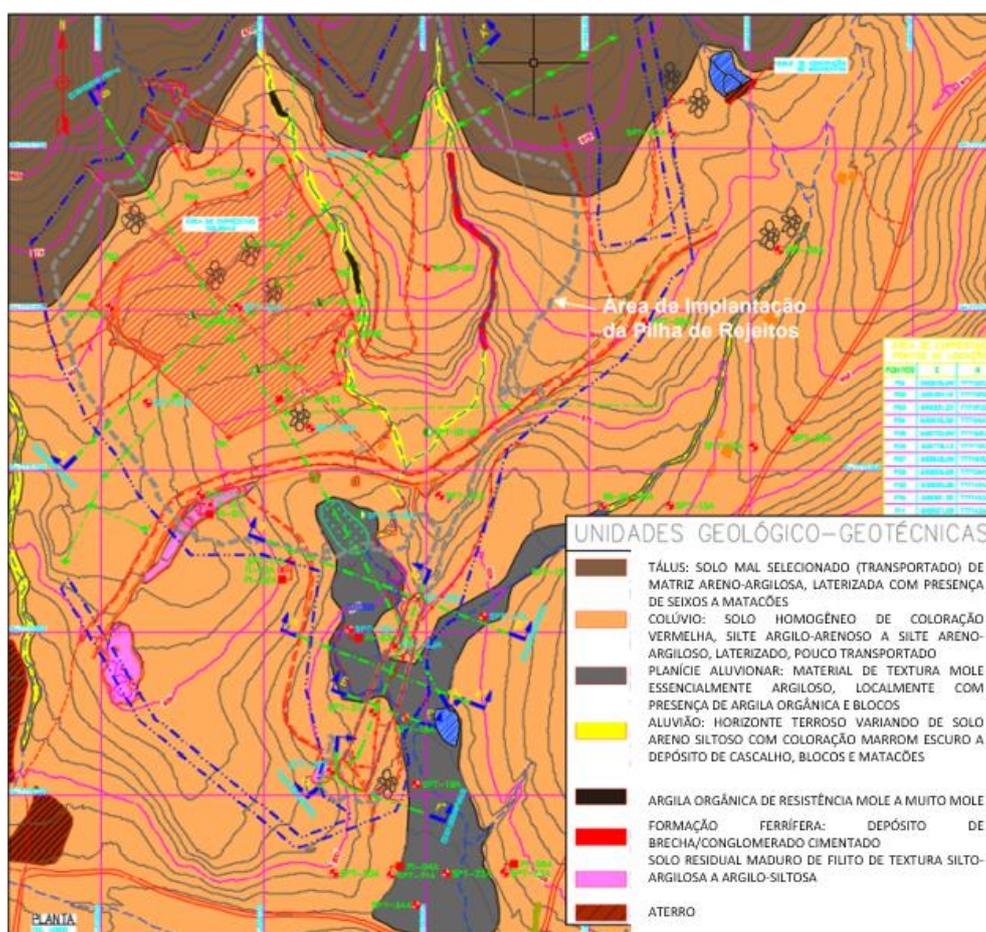


Figura 5-4 – Mapa geotécnico de superfície da área da pilha de disposição de rejeitos filtrados.

Fonte: HATCH, 2021

Foram ainda realizadas campanhas de investigações geotécnicas de campo e laboratório para a caracterização da área de fundação da PDR. Essas investigações consistiram em sondagens a percussão, sondagens mistas, trincheiras e poços de inspeção diretamente na área de fundação da pilha de rejeitos.

Com as amostras coletadas, foram realizados os seguintes ensaios para caracterização do material presente na fundação da PDR: Granulometria completa, Massa específica dos grãos, Limites de Atterberg, Peso específico natural, Umidade natural, Compactação Proctor Normal, Permeabilidade à carga variável, Adensamento oedométrico e Triaxial CIUsat (consolidado não drenado).

Essas investigações foram utilizadas na preparação das seções do modelo geotécnico do projeto detalhado, auxiliando principalmente na interpretação da distribuição espacial e na estimativa da espessura das diferentes unidades geotécnicas identificadas.

#### **5.4.Características do Rejeito Filtrado**

Como apresentado no item 4.2.1, o profissional de rejeitos deve definir ensaios para a caracterização dos rejeitos, baseando-se na disponibilidade e representatividade da(s) amostra(s), nos requisitos regulatórios e expectativas, nas necessidades de informação e seu no nível de confiança exigido.

Dessa forma, foram coletadas amostras de diferentes tipos de rejeitos produzidos nas plantas de beneficiamento de minérios friáveis de ferro da MUSA. Essa amostragem foi realizada em quantidade representativa, foi realizada a secagem, homogeneização e quarteamento para execução dos ensaios. A descrição das amostras coletadas é apresentada na Tabela 5-2.

Tabela 5-2 – Amostras de Rejeitos Coletadas

Fonte: HATCH, 2021

<b>IDENTIFICAÇÃO</b>	<b>TIPO DE REJEITOS</b>	<b>PLANTA DE BENEFICIAMENTO</b>
AMOSTRA A	Lamas	Planta Oeste
AMOSTRA B	Lamas	Planta Flotação
AMOSTRA C	Rejeitos de Flotação	Planta Flotação
AMOSTRA D	Rejeitos compostos por 60% da AMOSTRA C e 40% da AMOSTRA A	Planta Oeste e Planta Flotação
AMOSTRA E	Rejeitos compostos por 50% da AMOSTRA C e 50% da AMOSTRA A	Planta Oeste e Planta Flotação
AMOSTRA F	Lamas	Planta Flotação
AMOSTRA G	Rejeitos de Flotação	Planta Flotação
AMOSTRA H	Rejeito Não Magnético	Planta Flotação
AMOSTRA I	Rejeitos compostos por 50% da AMOSTRA H e 50% da AMOSTRA B	Planta Flotação
AMOSTRA J	Rejeitos compostos por 50% da AMOSTRA C e 50% da AMOSTRA B	Planta Flotação
AMOSTRA K	Rejeitos compostos por 40% da AMOSTRA C e 60% da AMOSTRA B	Planta Flotação

As amostras foram submetidas a ensaios geotécnicos em laboratório visando o entendimento das suas características e de seu comportamento geotécnico. Foram realizados os seguintes ensaios: Granulometria completa, Massa específica dos grãos, Limites de Atterberg, Compactação Proctor Normal, Permeabilidade à carga variável, Permeabilidade de parede flexível, Adensamento oedométrico, Triaxial CIUsat (consolidado não drenado), Triaxial CID (consolidado drenado).

Os resultados obtidos nos ensaios realizados em laboratório para a caracterização geotécnica dos rejeitos estão apresentados na Tabela 5-3 e Tabela 5-4. Conforme pode ser observado, os ensaios de massa específica dos grãos e de compactação foram repetidos para algumas amostras para verificação da consistência dos resultados.

Tabela 5-3 – Resumo dos Resultados dos Ensaio de Caracterização Geotécnica dos Rejeitos. Fonte: HATCH, 2021

Amostra	Massa Específica dos Grãos (g/cm <sup>3</sup> )	Limites de Atterberg (%)			Granulometria Completa								Classificação pelo SUCS <sup>(2)</sup>	Compactação	
		LL	LP	IP	Descrição do solo	Pedregulho (%)	Areia Grossa (%)	Areia Média (%)	Areia Fina (%)	Silte (%)	Argila (%)	%Finos <sup>(1)</sup>		$\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	W <sub>ot</sub> (%)
A	3.626	NL	NP	-	Silte Arenoso, com pouca argila	0.0	0.1	7.7	37.0	46.2	9.0	67	-	1.741	17.1
B	3.901	21.2	16.1	5.1	Silte Argiloso, com pouca areia	0.0	0.0	0.2	6.1	78.3	15.4	100	ML	2.197	17.2
	3.857													2.206	17.2
	-													2.297	16.0
C	3.108	NL	NP	-	Areia Siltosa, com vestígios de argila	0.0	0.0	13.4	36.0	49.0	1.6	61	-	1.984	9.9
	3.110													1.916	13.1
	-													1.921	12.4
D	3.425	NL	NP	-	Silte Areno Argiloso	0.0	0.0	2.3	22.2	62.1	13.4	84	-	2.292	11.0
E	3.762	NL	NP	-	Silte Areno Argiloso	0.0	0.0	4.4	18.5	63.7	13.4	84	-	2.296	11.2
	3.663	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.301	10.3
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.330	12.6
F	-	-	-	-	Silte Argiloso, com vestígios de areia	0.0	0.1	0.2	2.8	75.4	21.5	100	-	-	-
G	-	-	-	-	Silte Arenoso, com vestígios de argila	0.0	0.1	0.6	27.2	69.8	2.4	90	-	-	-
H	2.809	NL	NP	-	Areia Siltosa, com vestígios de argila	0.0	0.0	7.0	43.2	47.4	2.4	64	-	1.626	15.7
	2.752													1.633	15.2
	-													1.607	17.5
I	3.299	NL	NP	-	Silte Areno Argiloso	0.0	0.0	5.8	26.0	55.9	12.3	78	-	1.971	14.1
	3.313	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.977	14.3
J	3.384	17.4	10.4	7.0	Silte Areno Argiloso	0.0	0.4	0.9	14.7	73.1	10.9	94	ML	1.884	18.2
K	3.526	17.7	12.2	5.5	Silte Argiloso, com pouca areia	0.0	0.0	0.4	9.3	77.0	13.4	96	ML	1.897	18.3

Notas: 1) Percentual de partículas passantes na peneira de 0,074mm; 2) Classificação das amostras de acordo com o sistema unificado de classificação de solos (SUCS) (ASTM, 1983).

Tabela 5-4 – Resumo dos Resultados dos Ensaio Especiais. Fonte: HATCH, 2021

Amostra	Ensaio de Laboratório														
Identificação	Permeabilidade à Carga Variável (cm/s)	Permeabilidade de Parede Flexível (cm/s)		Adensamento Oedométrico						Triaxiais					
		100 kPa	800 kPa	C <sub>v</sub> (cm <sup>2</sup> /s) <sup>(1)</sup>			Permeabilidade (cm/s)			CIU <sub>SAT</sub> e CID <sub>SAT</sub> - 95% e 80% de GC		CIU <sub>SAT</sub> - 95% de GC		CIU <sub>SAT</sub> - 80% de GC	
				a 12,5 kPa	a 100 kPa	a 400 kPa	a 12,5 kPa	a 100 kPa	a 400 kPa	c' (kPa)	φ' (o)	c (kPa)	φ (o)	c (kPa)	φ (o)
AMOSTRA A	1x10 <sup>-5</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AMOSTRA B	3x10 <sup>-6</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AMOSTRA C	6x10 <sup>-5</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AMOSTRA D	9x10 <sup>-6</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AMOSTRA E	3x10 <sup>-6</sup>	1x10 <sup>-6</sup>	4x10 <sup>-7</sup>	-	-	-	-	-	-	0	37,3	0	31,1	-	-
AMOSTRA H	1x10 <sup>-4</sup>	2x10 <sup>-4</sup>	1x10 <sup>-4</sup>	0,216	0,636	1,360	1x10 <sup>-5</sup>	3x10 <sup>-6</sup>	3x10 <sup>-6</sup>	0	35,8	0	-	0	-
AMOSTRA I	4x10 <sup>-6</sup>	3x10 <sup>-6</sup>	8x10 <sup>-6</sup>	0,227	0,660	1,090	8x10 <sup>-6</sup>	1x10 <sup>-5</sup>	6x10 <sup>-6</sup>	0	30,7	0	30,7	0	13,6
AMOSTRA J	9x10 <sup>-5</sup>	6x10 <sup>-5</sup>	1x10 <sup>-5</sup>	0,203	0,615	0,810	7x10 <sup>-6</sup>	6x10 <sup>-6</sup>	6x10 <sup>-6</sup>	0	33,3	0	18,1	0	14,5
AMOSTRA K	1x10 <sup>-5</sup>	9x10 <sup>-6</sup>	3x10 <sup>-6</sup>	0,243	0,928	0,859	2x10 <sup>-5</sup>	8x10 <sup>-6</sup>	5x10 <sup>-6</sup>	0	30,8	0	18,6	0	12,4

Nota: 1) Coeficiente de adensamento definido por meio do método de Taylor

## 5.5. Zoneamento da Pilha de Rejeitos

Buscando mitigar os riscos de ocorrência do fenômeno de liquefação para a pilha de disposição de rejeitos do SDRF e considerando os resultados dos ensaios de laboratório realizados para a amostra I (mais representativa do rejeito a ser disposto), foram estabelecidos requisitos de operação para essa estrutura, com a disposição dos rejeitos ocorrendo em duas zonas distintas (Figura 5-5): i) Zona Estrutural (ZE), em que os rejeitos deverão ser compactados a no mínimo 98% do Proctor Normal visando a obtenção de uma área da estrutura (dilatante) não suscetível à liquefação para pequenas deformações; e ii) Zona Não Estrutural (ZNE), em que se admite a disposição dos rejeitos com compactação realizada apenas por espalhamento (cerca de 80 a 85% de grau de compactação).

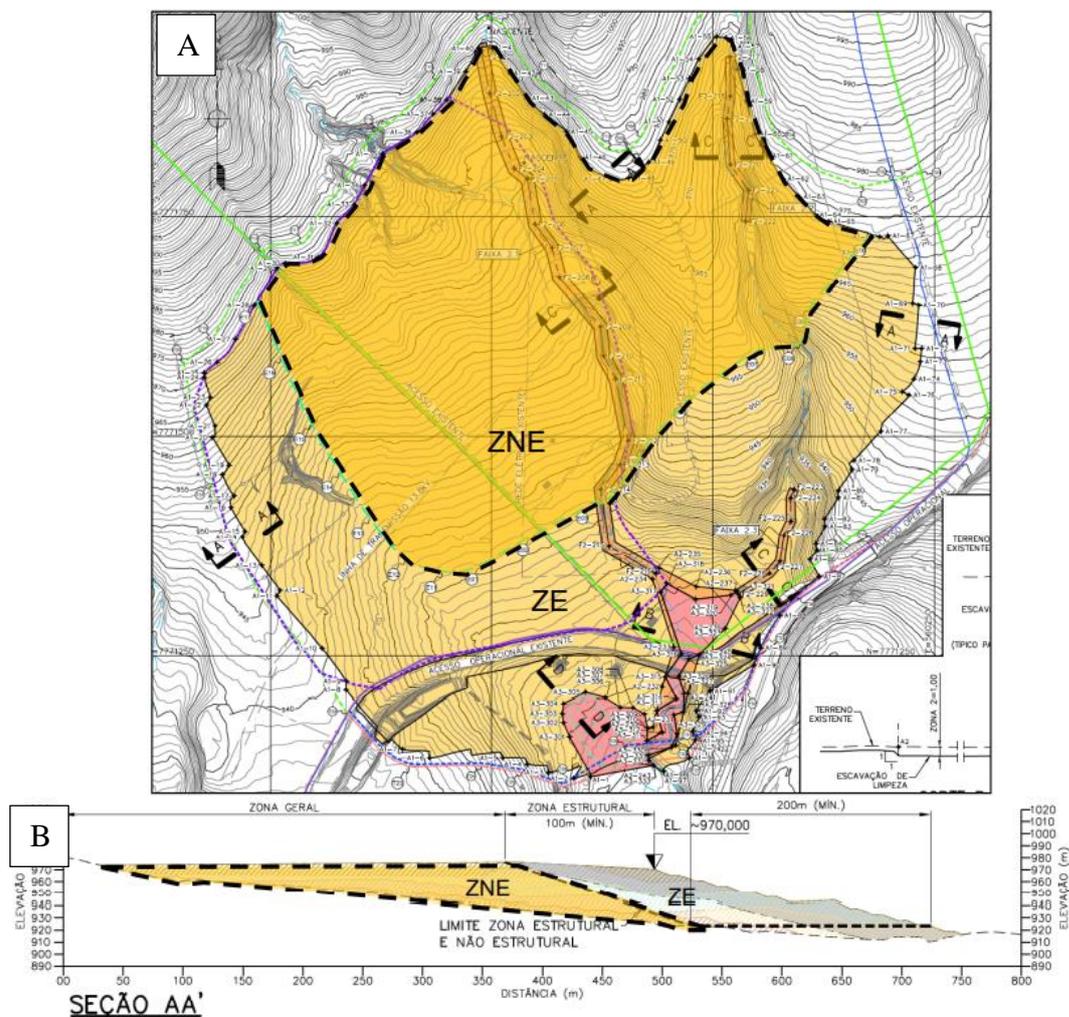


Figura 5-5 – Delimitação das ZE e ZNE de disposição de rejeitos. A) Planta. B) Seção típica

Fonte: HATCH, 2021

Em ambos os casos, ZNE e ZE, os alteamentos foram projetados para serem realizados por meio da sucessiva sobreposição de camadas até o limite de 2,0 m de altura máxima por praça de trabalho por mês, com taludes de 2,6 H: 1,0 V de inclinação de face e 7,0 m de largura mínima. Esta medida visa viabilizar a dissipação do excesso de poropressão gerado pela disposição sobre as camadas superficiais dos rejeitos, melhorando as condições de trabalhabilidade e de segurança da área para espalhamento e compactação das próximas camadas. Porém, durante a operação, este requisito poderá ser reavaliado pela segurança da pilha de rejeitos em função da dissipação da poropressão a ser observada no monitoramento piezométrico.

### **5.6.Gestão de água**

Para o gerenciamento de água, foram projetadas drenagem superficial e de fundo na Pilha de Rejeitos. O Sistema de Drenagem Superficial destina-se a proteger a pilha de rejeito contra possíveis danos decorrentes do escoamento superficial não controlado da água proveniente de chuvas intensas, principalmente a inundação indesejada e erosão em taludes de corte e aterro. O Sistema de Drenagem Interna objetivou principalmente a coleta de potenciais contribuições subterrâneas caracterizadas nas surgências de água pontuais e difusas identificadas na área de fundação da pilha.

O sistema de drenagem superficial foi previsto para implantação em etapas, de acordo com o alteamento da pilha. Conta com as seguintes estruturas:

- Canaleta de berma;
- Descidas d'água;
- Canais periféricos – divididos em canais periféricos de topo (CPT) e canais periféricos (CPE);
- Galerias;
- Bacia de dissipação.

A configuração final planejada para o sistema de drenagem superficial é ilustrada na Figura 5-6.

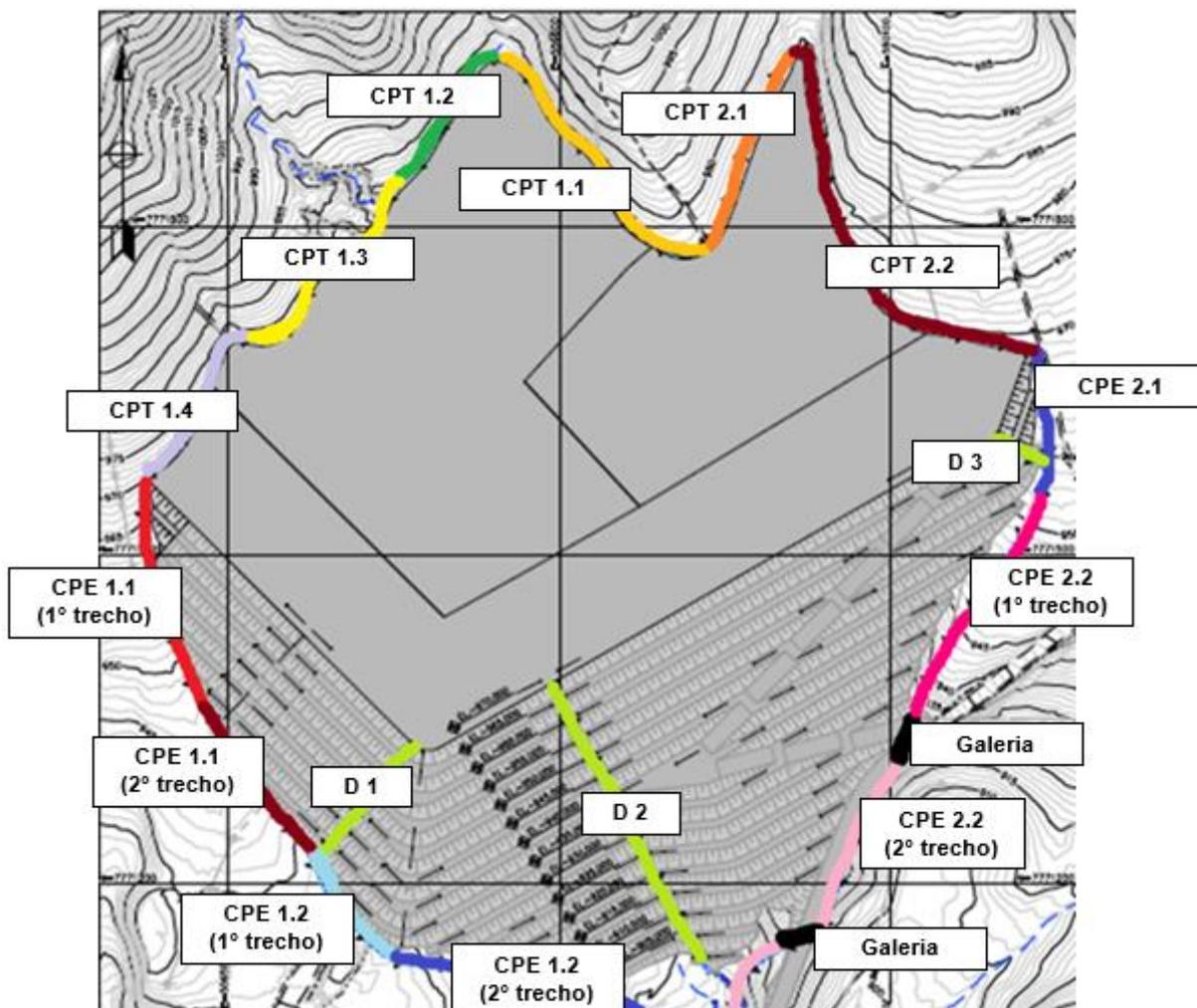


Figura 5-6 – Drenagem superficial: Cenário Final  
 Fonte: HATCH, 2021

O sistema de drenagem interna será responsável pelo controle de percolação no interior da pilha de rejeitos filtrados e será realizado por dois drenos de fundo principais implantados ao longo dos talvegues. No dimensionamento desses dispositivos foram estimadas as potenciais contribuições oriundas de infiltrações de água de chuvas na área da sub-bacia hidrográfica em que a pilha de rejeitos está inserida. Todavia, a infiltração de água de chuvas em pilhas de rejeitos filtrados tende a ser limitada e insignificante em se seguindo as orientações de gestão dos escoamentos superficiais. Em função disso, a locação dos drenos de fundo objetivou principalmente a coleta de potenciais contribuições subterrâneas caracterizadas nas surgências de água pontuais e difusas identificadas na área de fundação da pilha.

O arranjo geral do sistema de drenagem interna da PDR é ilustrado na Figura 5-7.

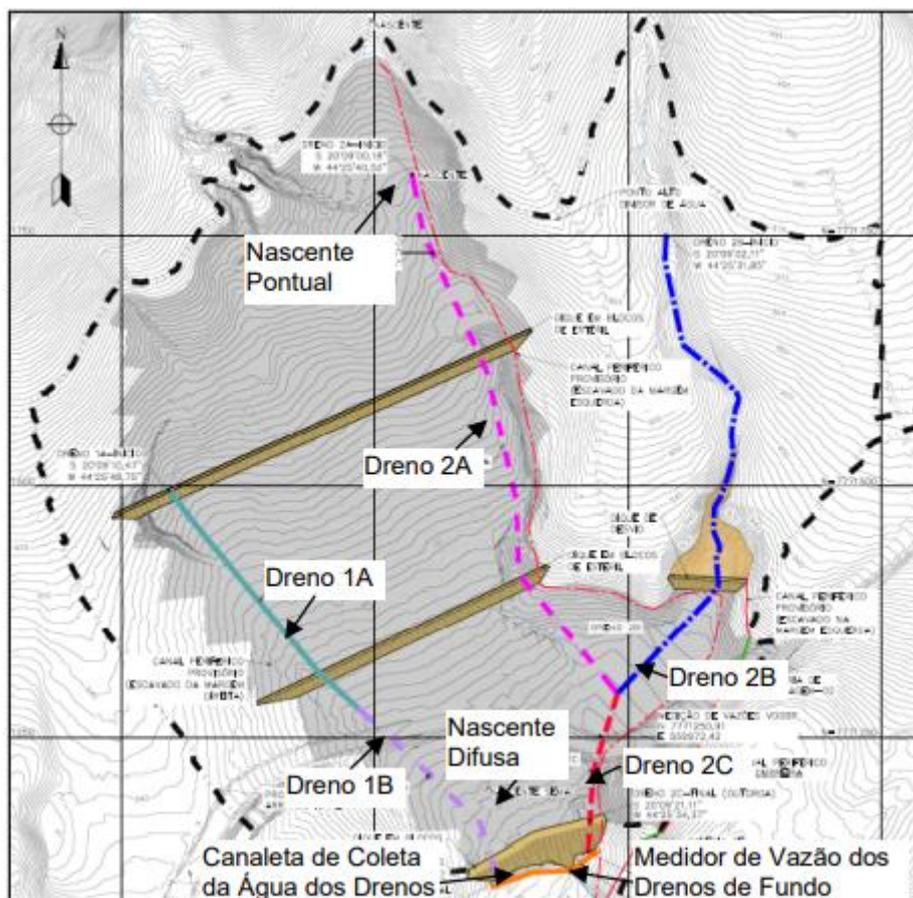


Figura 5-7 – Arranjo geral dos drenos de fundo da pilha de rejeitos filtrados.  
Fonte: HATCH, 2021

### 5.7. Estabilidade da Pilha

As análises geotécnicas desenvolvidas para o projeto detalhado da pilha de disposição de rejeitos filtrados do SDRF foram, basicamente, análises numéricas de percolação e estabilidade. A seguir é feita uma breve descrição das metodologias e dos resultados obtidos nessas análises, os quais refletiram na geometria do arranjo da pilha de rejeitos e no respectivo plano de monitoramento.

As análises de estabilidade para os taludes da pilha de disposição de rejeitos do SDRF foram realizadas utilizando um software geotécnico, com aplicação do método de

equilíbrio limite em seções bidimensionais. As análises foram realizadas buscando-se atender aos fatores de segurança exigidos pela legislação e as boas práticas internacionais.

Os parâmetros geotécnicos adotados nas análises de percolação e estabilidade realizadas para o projeto detalhado da pilha de disposição de rejeitos filtrados do SDRF foram definidos com base nos resultados das investigações geotécnicas de campo e de laboratório realizadas.

Foram realizadas análises de estabilidade em 5 seções representativas e consideradas mais críticas, para as seguintes condições: Drenada (longo prazo), Não-Drenada (curto prazo), Pseudo-Estática (sismo) e Pós-Sismo. A Figura 5-8 ilustra um dos resultados de saída das análises realizadas (condição drenada – Seção EE’).

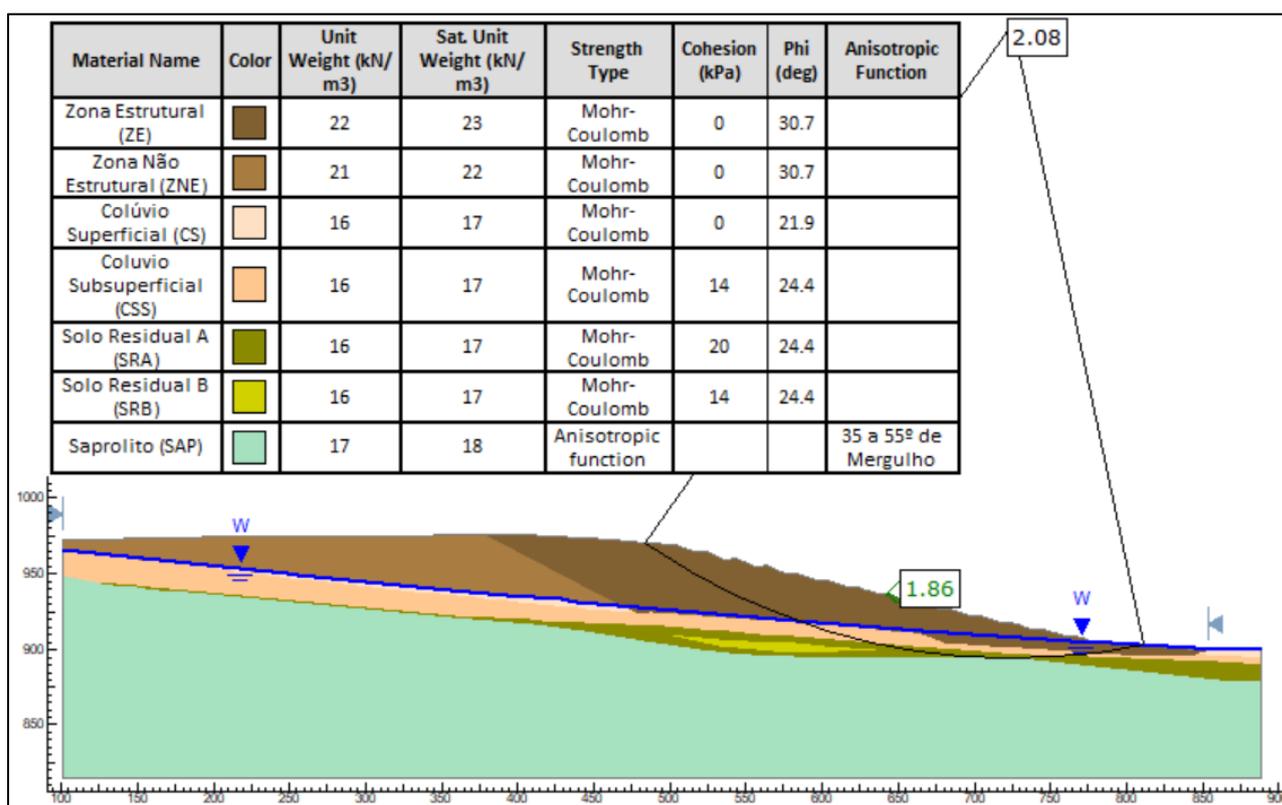


Figura 5-8 – Exemplo de análise de estabilidade realizada

Fonte: HATCH, 2021

De modo geral, as principais condicionantes que influenciaram nos resultados obtidos nas análises de estabilidade foram:

- A condição de nível d'água subterrâneo e as poropressões existentes nos rejeitos da zona estrutural, no colúvio subsuperficial e no solo residual de xisto;
- A resistência dos rejeitos da zona estrutural, do colúvio subsuperficial e no solo residual de xisto; e
- A distribuição dos materiais na fundação da pilha (espessura).

### **5.8.Plano de Monitoramento**

Para permitir o monitoramento das condições geotécnicas da pilha de rejeito do SDRF, foi prevista a instalação da seguinte instrumentação:

**Piezômetros elétricos:** medição da poropressão na fundação e no interior da pilha durante a construção da mesma;

**Marcos superficiais:** monitoramento dos deslocamentos horizontais e verticais na superfície;

**Medidores de vazão:** para medir a quantidade de água efluente do sistema de drenagem de fundo da pilha.

A Figura 5-9 ilustra o plano de monitoramento previsto para a PDR.



## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A disposição de rejeitos em empilhamento de rejeitos filtrados está se tornando cada vez mais viável para armazenamento de rejeitos inerentes ao processo de beneficiamento mineral. É importante que a técnica associada a esse método de disposição seja aprimorada para que a disposição seja realizada de forma segura e sustentável, tanto no curto, como no longo prazo.

A escolha do tipo de disposição deve ser realizada considerando-se aspectos como: Características dos rejeitos, escala de operação, condições locais (física, ambiental, climática), tecnologias disponíveis, além de aspectos sociais e legais.

A caracterização dos rejeitos deve ser realizada por meio de ensaios de laboratório definidos pelo profissional de rejeitos, ou grupo de profissionais, responsável pela elaboração do projeto. As características variam de acordo com a natureza do minério (geologia) e processos aplicados no seu beneficiamento.

A filtrabilidade dos rejeitos é fundamental para a definição do tipo e dimensionamento dos filtros e a definição do teor de umidade final, que também é influenciado pela compactação necessária na pilha de rejeitos.

Uma consideração importante é a avaliação da taxa de alteamento da pilha de forma a possibilitar a dissipação da poropressão. Outro fator importante é a gestão de águas, tanto superficiais quanto internas (infiltração). O clima local influencia no projeto de empilhamento drenado, no sentido da secagem do rejeito, no gerenciamento das águas superficiais e na geração de poeira. A divisão da pilha de rejeitos em zonas estrutural e não estrutural é fundamental para manter a estabilidade da estrutura e prevenir a ocorrência do fenômeno de liquefação.

A geração de rejeitos, portanto, é iniciada desde a retirada do minério, quando são definidas suas características mineralógicas, passando também pelo processamento mineral, onde são adicionados reagentes. No empilhamento de rejeitos filtrados ainda é importante a etapa de processo de filtragem desse rejeito antes da disposição. Além disso,

a gestão de rejeitos abrange aspectos sociais, ambientais e regulatórios. Conclui-se, portanto, que a gestão de rejeitos não é um processo isolado e, deve ser realizada de forma integrada para que seja mais efetiva.

O estudo de caso apresentado, ilustra a implantação de um projeto de empilhamento de rejeito filtrado (Dry Stacking) que foi elaborado levando-se em conta, para além da legislação vigente e das boas práticas de engenharia, a integração entre os processos, de forma a otimizar toda a operação.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, P. I. A. Empilhamento de rejeito filtrado: a expansão de uma alternativa para substituição de barragens. 2020. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mineral, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

ANDREWS, Jason *et al.* Closure Planning and Landform Design. In: MORRISON, KIMBERLY FINKE (Org.). *Tailings Management Handbook: A LifeCycle Approach*. [S.l.]: Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME), 2022. p. 235–276.

ANM. Agência Nacional de Mineração. Resolução nº 13, de 8 de agosto de 2019. Estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante" ou por método declarado como desconhecido e dá outras providências. Brasília, 2019

ANM. Agência Nacional de Mineração. Resolução nº 95, de 07 de fevereiro de 2022. Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. Brasília, 2022

ÁVILA, J. P. e SAWAYA, M. As barragens de rejeitos no Brasil: Sua evolução nos últimos anos. In De Mello, F. M. & Piasentin, C. (Orgs). *História das barragens do Brasil: Séc. XIX, Séc XX e Séc. XXI*. (1ª ed., s/cap., pp.369-395). Rio de Janeiro, Brasil: CBDB, 524p., 2011

CARVALHO, W. D. S. Sistema de disposição compartilhada de estéreis e rejeitos desaguados da mina de Fernandinho. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, 163 p. 2017

CHAPMAN, Peter *et al.* Tailings Laboratory Characterization. In: MORRISON, KIMBERLY FINKE (Org.). *Tailings Management Handbook: A LifeCycle Approach*. [S.l.]: Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME), 2022. p. 479–493.

CRYSTAL, C. *et al.* Filter-pressed dry stacking: design consideration based on practical experience. In: *Proceedings Tailings and Mine Waste*. Keystone, Colorado, EUA, 2018.

DAVIES, Michael *et al.* Dewatered Tailings. In: MORRISON, KIMBERLY FINKE (Org.). *Tailings Management Handbook: A LifeCycle Approach*. [S.l.]: Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME), 2022. p. 85–108.

DAVIES, M.P. e Rice, S. An Alternative to Conventional Tailings Management – ‘Dry Stack’ Filtered Tailings. AMEC Earth & Environmental, Vancouver, 2001

DAVIES, M. P. Filtered Dry Stacked Tailings - The Fundamentals. 2011.

GOMES, Márcio Mansur *et al.* Disposal of tailings and the mining industry perspective: a case study of the Cuiabá Mine. 2019, [S.l: s.n.], 2019. p. 219–231.

GLOBAL TAILINGS REVIEW (GTR). Padrão global da indústria para a gestão de rejeitos: minuta final. International Council on Mining and Metals (ICMM), United Nations Environment Program (UNEP), Principles for Responsible Investment (PRI), 2020, 42 p.

HATCH. *Sistema de Disposição De Rejeitos Friáveis - Relatório Técnico - Engenharia Detalhada*. Belo Horizonte: [s.n.], 2019.

HATCH. *Sistema de Disposição De Rejeitos Friáveis – Memorial Descritivo – Pilha de Rejeitos - Engenharia Detalhada*. Belo Horizonte: [s.n.], 2021.

JAMES, John *et al.* Geotechnical Design Analyses. In: MORRISON, KIMBERLY FINKE (Org.). *Tailings Management Handbook: A LifeCycle Approach*. [S.l.]: Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME), 2022. p. 551–580.

LARA, J.L. *et al.* Geotechnical-geochemical and operational considerations for the application of dry stacking tailings deposits – state-of-the-art. In: R.J. Jewell, A.B. Fourie,

J. Cadwell, & J. Pimenta (Eds.), *Paste 2013*. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2013

LUPO, J.; HALL, J. Dry Stack Tailings – Design Considerations. Proceedings of International conference, 14th, Tailings and mine waste. Vail, Colorado, Estados Unidos, 2010

MALGESINI, Matt; CHAPMAN, Peter. Site and Technology Selection Studies. In: MORRISON, KIMBERLY FINKE (Org.). *Tailings Management Handbook: A LifeCycle Approach*. [S.l.]: Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME), 2022. p. 181–210.

MEND – Mine Environment Neutral Drainage Project. MEND Report 2.50.1 Study of Tailings Management Technologies. Klohn Crippen Berger. The Mining Association of Canada (MAC), Canadá, 2017.

PIMENTA, J. The drained stacking of granular tailings: a disposal method for a low degree of saturation of the tailings mass. Proceedings Tailings and Mine Waste, Vancouver, BC. 11p., 2011.

ULRICH, Bryan; COFFIN, Jeffrey. Considerations for tailings facility design and operation using filtered tailings. 2013, [S.l.: s.n.], 2013. p. 201–210.

SLR Consulting, Schedule 2 Assessment of Alternatives for Mine Waste Management, Magino Gold Project, Prodigy Gold, Inc. Markham, ON, Canadá, 2016

WATES, John *et al.* Systems Approach to Tailings Management. In: MORRISON, KIMBERLY FINKE (Org.). *Tailings Management Handbook: A LifeCycle Approach*. [S.l.]: Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME), 2022. p. 859–874.

WATSON, Andrew *et al.* A comparison of alternative tailings disposal methods — the promises and realities. 2010, [S.l.]: Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2010. p. 499–514.