

---

Andrews Malone Pontes da Costa  
Akila Ketelen Camara da Silva  
Arthemio da Silva Pereira  
Matheus Maffioletti Dias

Tipos de  
**Contenções** em  
**Barragens** e  
estudo de caso  
de **Brumadinho**



**AYA** EDITORA

2024

---

---

Tipos de  
**Contenções** em  
**Barragens** e  
estudo de caso  
de **Brumadinho**

---

Andrews Malone Pontes da Costa  
Akila Ketelen Camara da Silva  
Arthemio da Silva Pereira  
Matheus Maffioletti Dias

Tipos de  
**Contenções** em  
**Barragens** e  
estudo de caso  
de **Brumadinho**



**AYA EDITORA**

**2024**

---

---

## **Direção Editorial**

Prof.º Dr. Adriano Mesquita Soares

## **Autores**

Andrews Malone Pontes da Costa

Akila Ketelen Camara da Silva

Arthemio da Silva Pereira

Matheus Maffioletti Dias

## **Capa**

AYA Editora©

## **Revisão**

Os Autores

## **Executiva de Negócios**

Ana Lucia Ribeiro Soares

## **Produção Editorial**

AYA Editora©

## **Imagens de Capa**

br.freepik.com

## **Área do Conhecimento**

Engenharias

# **Conselho Editorial**

Prof.º Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva

*Universidade para o Desenvolvimento do Alto Vale do Itajaí*

Prof.º Dr. Aknaton Toczec Souza

*Centro Universitário Santa Amélia*

Prof.ª Dr.ª Andréa Haddad Barbosa

*Universidade Estadual de Londrina*

Prof.ª Dr.ª Andreia Antunes da Luz

*Faculdade Sagrada Família*

Prof.º Dr. Argemiro Midonês Bastos

*Instituto Federal do Amapá*

Prof.º Dr. Carlos López Noriega

*Universidade São Judas Tadeu e Lab. Biomecatrônica - Poli - USP*

Prof.º Dr. Clécio Danilo Dias da Silva

*Centro Universitário FACEX*

Prof.ª Dr.ª Daiane Maria de Genaro Chirolí

*Universidade Tecnológica Federal do Paraná*

Prof.ª Dr.ª Danyelle Andrade Mota

*Universidade Federal de Sergipe*

Prof.ª Dr.ª Déborah Aparecida Souza dos Reis

*Universidade do Estado de Minas Gerais*

Prof.ª Ma. Denise Pereira

*Faculdade Sudoeste – FASU*

Prof.ª Dr.ª Eliana Leal Ferreira Hellvig

*Universidade Federal do Paraná*

Prof.º Dr. Emerson Monteiro dos Santos

*Universidade Federal do Amapá*

Prof.º Dr. Fabio José Antonio da Silva

*Universidade Estadual de Londrina*

Prof.º Dr. Gilberto Zammar

*Universidade Tecnológica Federal do Paraná*

Prof.ª Dr.ª Helenadja Santos Mota

*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano, IF Baiano - Campus Valença*

Prof.ª Dr.ª Heloísa Thaís Rodrigues de Souza

*Universidade Federal de Sergipe*

Prof.ª Dr.ª Ingridi Vargas Bortolaso

*Universidade de Santa Cruz do Sul*

Prof.ª Ma. Jaqueline Fonseca Rodrigues

*Faculdade Sagrada Família*

Prof.ª Dr.ª Jéssyka Maria Nunes Galvão

*Faculdade Santa Helena*

Prof.º Dr. João Luiz Kovaleski

*Universidade Tecnológica Federal do Paraná*

Prof.º Dr. João Paulo Roberti Junior

*Universidade Federal de Roraima*

Prof.º Me. Jorge Soistak

*Faculdade Sagrada Família*

Prof.º Dr. José Enildo Elias Bezerra

*Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará, Campus Ubajara*

Prof.ª Dr.ª Karen Fernanda Bortoloti

*Universidade Federal do Paraná*

Prof.ª Dr.ª Leozenir Mendes Betim

*Faculdade Sagrada Família e Centro de Ensino Superior dos Campos Gerais*

Prof.ª Ma. Lucimara Glap

*Faculdade Santana*

Prof.º Dr. Luiz Flávio Arreguy Maia-Filho

*Universidade Federal Rural de Pernambuco*

**Prof.º Me. Luiz Henrique Domingues**

*Universidade Norte do Paraná*

**Prof.º Dr. Milson dos Santos Barbosa**

*Instituto de Tecnologia e Pesquisa, ITP*

**Prof.º Dr. Myller Augusto Santos Gomes**

*Universidade Estadual do Centro-Oeste*

**Prof.ª Dr.ª Pauline Balabuch**

*Faculdade Sagrada Família*

**Prof.º Dr. Pedro Fauth Manhães Miranda**

*Universidade Estadual de Ponta Grossa*

**Prof.º Dr. Rafael da Silva Fernandes**

*Universidade Federal Rural da Amazônia, Campus  
Pauapebas*

**Prof.ª Dr.ª Regina Negri Pagani**

*Universidade Tecnológica Federal do Paraná*

**Prof.º Dr. Ricardo dos Santos Pereira**

*Instituto Federal do Acre*

**Prof.ª Dr.ª Rosângela de França Bail**

*Centro de Ensino Superior dos Campos Gerais*

**Prof.º Dr. Rudy de Barros Ahrens**

*Faculdade Sagrada Família*

**Prof.º Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares**

*Universidade Federal do Piauí*

**Prof.ª Dr.ª Silvia Aparecida Medeiros**

**Rodrigues**

*Faculdade Sagrada Família*

**Prof.ª Dr.ª Silvia Gaia**

*Universidade Tecnológica Federal do Paraná*

**Prof.ª Dr.ª Sueli de Fátima de Oliveira Miranda  
Santos**

*Universidade Tecnológica Federal do Paraná*

**Prof.ª Dr.ª Thaisa Rodrigues**

*Instituto Federal de Santa Catarina*

© 2024 - **AYA Editora** - O conteúdo deste Livro foi enviado pelos autores para publicação de acesso aberto, sob os termos e condições da Licença de Atribuição *Creative Commons* 4.0 Internacional (**CC BY 4.0**). Este livro, incluindo todas as ilustrações, informações e opiniões nele contidas, é resultado da criação intelectual exclusiva dos autores. Os autores detém total responsabilidade pelo conteúdo apresentado, o qual reflete única e inteiramente a sua perspectiva e interpretação pessoal. É importante salientar que o conteúdo deste livro não representa, necessariamente, a visão ou opinião da editora. A função da editora foi estritamente técnica, limitando-se ao serviço de diagramação e registro da obra, sem qualquer influência sobre o conteúdo apresentado ou opiniões expressas. Portanto, quaisquer questionamentos, interpretações ou inferências decorrentes do conteúdo deste livro, devem ser direcionados exclusivamente aos autores.

---

C8373 Costa, Andrews Malone Pontes da

Tipos de contenções em barragens e estudo de caso de Brumadinho.  
[recurso eletrônico]. / Andrews Malone Pontes da Costa...[et al.]. -- Ponta  
Grossa: Aya, 2024. 78 p.

Inclui biografia

Inclui índice

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

ISBN: 978-65-5379-530-3

DOI: 10.47573/aya.5379.1.277

1. Barragens de rejeitos - Brumadinho (MG) - Medidas de segurança. 2. Barragens de rejeitos - Brumadinho (MG) – Acidentes. 3 Rejeitos (Metalurgia) - Aspectos ambientais - Brumadinho (MG). 4. Desastres ambientais - Brumadinho (MG) – Prevenção. I. Silva, Akila Ketelen Camara da. II. Pereira, Arthemio da Silva . III. Dias, Matheus Maffioletti. IV. Título

CDD: 363.7098151

---

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Bruna Cristina Bonini - CRB 9/1347

---

**International Scientific Journals Publicações  
de Periódicos e Editora LTDA**

**AYA Editora©**

**CNPJ:** 36.140.631/0001-53

**Fone:** +55 42 3086-3131

**WhatsApp:** +55 42 99906-0630

**E-mail:** contato@ayaeditora.com.br

**Site:** <https://ayaeditora.com.br>

**Endereço:** Rua João Rabello Coutinho, 557  
Ponta Grossa - Paraná - Brasil  
84.071-150

# SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>APRESENTAÇÃO .....</b>                                  | <b>9</b>  |
| <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                    | <b>10</b> |
| <b>OBJETIVOS.....</b>                                      | <b>11</b> |
| Objetivo Geral .....                                       | 11        |
| Objetivos Específicos .....                                | 11        |
| <b>TIPOS DE CONTENÇÕES EM BARRAGENS..</b>                  | <b>12</b> |
| .....  | 12        |
| Barragens de Concreto.....                                 | 12        |
| Barragens de Enrocamento.....                              | 13        |
| Barragens de Terra .....                                   | 14        |
| <b>TIPOS DE ALTEAMENTO DE BARRAGENS ....</b>               | <b>16</b> |
| .....  | 16        |
| Alteamento a Jusante .....                                 | 16        |
| Alteamento de Linha de Centro .....                        | 17        |
| Alteamento a Montante .....                                | 17        |
| <b>ASPECTOS TÉCNICOS DAS CONTENÇÕES EM BARRAGENS .....</b> | <b>19</b> |
| Análise Geotécnica e Hidrológica .....                     | 19        |
| Impermeabilização e o Sistema e Drenagem .....             | 21        |
| A Estabilidade Estrutural .....                            | 24        |
| Monitoramento Constante e a Manutenção Regular.....        | 27        |
| <b>DISPOSIÇÃO DOS REJEITOS .....</b>                       | <b>28</b> |
| <b>NÍVEL DE PERICULOSIDADE .....</b>                       | <b>30</b> |
| <b>ESTUDO DE CASO: BRUMADINHO .....</b>                    | <b>32</b> |
| O Caso Brumadinho.....                                     | 32        |
| Estrutura da Barragem I .....                              | 34        |

|                                    |           |
|------------------------------------|-----------|
| Características do Solo.....       | 36        |
| Riscos .....                       | 37        |
| Ocorrências.....                   | 39        |
| Possíveis Gatilhos .....           | 63        |
| Entendimento Sobre o Acidente..... | 68        |
| <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>   | <b>70</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>           | <b>71</b> |
| <b>SOBRE OS AUTORES .....</b>      | <b>72</b> |
| <b>ÍNDICE REMISSIVO .....</b>      | <b>73</b> |

# Apresentação

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma análise detalhada dos tipos de contenções utilizadas em barragens, bem como os diferentes métodos de alteamento empregados. Inicialmente, são discutidos os tipos de barragens, abrangendo estruturas de concreto, enrocamento e terra, além de detalhar suas subcategorias, como barragens de concreto gravidade, em arco, de contrafortes, entre outras.

Em seguida, são explorados os métodos de alteamento, incluindo o a jusante, de linha de centro e a montante. No contexto dos aspectos técnicos das contenções em barragens, são abordados temas como análise geotécnica e hidrológica, impermeabilização, sistemas de drenagem, estabilidade estrutural e monitoramento constante, enfatizando a importância desses aspectos para a segurança e estabilidade das estruturas.

Um estudo de caso específico é apresentado, focalizando o desastre ocorrido em Brumadinho. Neste estudo, são discutidos detalhes sobre a estrutura da barragem, características do solo, riscos associados, ocorrências prévias, leitura de equipamentos de monitoramento, fatores de segurança para condições drenadas e não drenadas, bem como possíveis gatilhos que contribuíram para o acidente, como sismos, instabilização local, movimento rápido da fundação e elevação da superfície freática.

Além disso, é realizada uma análise da pluviometria da região como parte do entendimento do acidente. Por fim, são apresentadas conclusões baseadas nos dados e análises realizadas, ressaltando a importância de medidas preventivas, monitoramento constante e ações corretivas para garantir a segurança de barragens e prevenir desastres como o ocorrido em Brumadinho.

Boa leitura!

# Introdução

As estruturas de contenção desempenham um papel vital na construção e operação de barragens em todo o mundo. Projetadas para reter com segurança os materiais depositados nas barragens, como rejeitos de mineração, resíduos industriais e sedimentos, essas estruturas desempenham um papel crucial na proteção de áreas ambientalmente sensíveis. No contexto brasileiro, onde a mineração e outras atividades industriais têm um impacto significativo na economia, a segurança e a eficácia das estruturas de contenção em barragens são de suma importância, considerando os riscos associados a possíveis falhas.

Os trágicos eventos ocorridos no Brasil, como o rompimento da barragem de Fundão em Mariana (2015) e o subsequente desastre em Brumadinho (2019), destacaram de forma dolorosa a necessidade urgente de medidas rigorosas de segurança e monitoramento em todas as fases de projeto, construção e operação de barragens. Esses incidentes serviram como um alerta alarmante para a indústria, governos e sociedade em geral sobre os perigos potenciais e as consequências devastadoras de falhas nas estruturas de contenção de barragens.

Este estudo visa explorar a importância das estruturas de contenção em barragens, analisando seus diferentes tipos, aspectos técnicos e estruturais. Além disso, será realizado um estudo de caso específico sobre o desastre de Brumadinho, onde serão examinadas as falhas nas estruturas de contenção da barragem e as lições aprendidas com esse evento trágico. Por meio dessa análise, buscamos contribuir para a promoção de práticas mais seguras e responsáveis na construção e operação de barragens, visando prevenir desastres e proteger o meio ambiente e as comunidades afetadas.

# Objetivos

## Objetivo Geral

O estudo tem como objetivo geral analisar os diferentes tipos de contenções em barragens, investigando seus aspectos técnicos e estruturais, e aplicar esses conhecimentos em um estudo de caso sobre a tragédia de Brumadinho.

## Objetivos Específicos

- Investigar os principais tipos de contenções utilizadas em barragens, destacando suas características, vantagens e desafios;
- Analisar detalhadamente os aspectos técnicos e estruturais das contenções em barragens, identificando os elementos que influenciam sua eficácia e segurança;
- Realizar uma revisão crítica da tragédia de Brumadinho, examinando as falhas nas contenções da barragem e os fatores que contribuíram para o desastre.

# Tipos de Contenções em Barragens

De acordo com a Norma Brasileira de Mineração (NBR 13028/2017), o termo “barragem” é utilizado pelos operadores de mina para se referir à completa instalação para disposição de rejeitos. É considerada como sendo a estrutura principal de contenção que envolve o sistema de disposição de rejeitos. Dentro da estrutura de disposição de rejeitos, podem existir também estruturas internas de retenção de sólidos e fluidos.

Além disso, o termo “dique” é utilizado por alguns operadores de mina, sendo considerado como pequenas barragens, frequentemente utilizadas para contenção de sedimentos de pilha de estéril e/ou área de operação. Portanto, podemos definir barragem como uma estrutura essencial em sistemas de disposição de rejeitos em operações de mineração, responsável por conter os materiais descartados de forma segura.

Existem vários tipos de estruturas de contenção utilizadas em barragens, incluindo barragens de enrocamento, barragens de terra e barragens de concreto (Dias, 2013). Cada tipo tem suas próprias características e aplicações específicas, sendo selecionado com base nas condições geotécnicas do local, nos materiais disponíveis e nos requisitos de segurança.

## Barragens de Concreto

Segundo Dias (2013), estas barragens são construídas com materiais granulares produzidos artificialmente, aos quais se adicionam cimento e aditivos químicos, resultando em um concreto de alta resistência e durabilidade. Esse concreto pode ser armado, com a inclusão de armação metálica para reforçar a estrutura, ou rolado, compactado em camadas para formar a barragem.

Existem diferentes tipos de barragens de concreto, cada uma com características específicas e aplicações particulares.

## *Barragem de concreto gravidade*

Este tipo de barragem possui uma forma triangular típica, onde a estabilidade é garantida principalmente pelo peso próprio da estrutura. A força da gravidade impede que a barragem se mova ou se desloque, oferecendo uma solução robusta e confiável para a contenção de água ou rejeitos.

## *Barragem de concreto em arco*

Neste caso, a estrutura é delgada e em formato de arco, apoiada em ombreiras e fundações rochosas. O concreto utilizado é armado em forma de arco para trabalhar à compressão, aproveitando as características naturais de resistência do material. Este tipo de barragem é especialmente adequado para locais onde há uma topografia favorável para a construção de arcos, oferecendo uma solução estética e eficaz para a contenção de água.

## *Barragem de contrafortes*

Esta configuração envolve a utilização de lajes de sustentação, conhecidas como contrafortes, ao longo do corpo da barragem. Os contrafortes ajudam a distribuir o peso da estrutura de forma mais uniforme, aumentando sua estabilidade e resistência. Este tipo de barragem é comumente utilizado em situações em que é necessário suportar grandes pressões hidrostáticas, proporcionando uma solução eficiente e econômica para a contenção de água.

## *Barragens de Enrocamento*

De acordo com Costa (2016), as barragens de enrocamento podem apresentar diferentes configurações para garantir sua impermeabilidade e estabilidade. Duas das principais configurações são aquelas com núcleo impermeável e aquelas com face impermeável.

## *Barragens de enrocamento com núcleo impermeável*

Nesse tipo de barragem, o material rochoso é predominante na estrutura, e a vedação da água é realizada por meio de um núcleo argiloso. Esse núcleo argiloso é separado do enrocamento por zonas de transição, evitando o carreamento do material fino para o interior do enrocamento. O núcleo impermeável pode ser centralizado ou inclinado para montante, proporcionando uma barreira eficaz contra a infiltração de água.

## *Barragens de enrocamento com face impermeável*

Nesse tipo de barragem, a vedação da água é assegurada pela impermeabilização da face de montante da barragem. Isso pode ser alcançado de diversas formas, como através da aplicação de uma camada de asfalto, uma placa de concreto ou uma chapa de aço. Essa face impermeável atua como uma barreira física contra a passagem da água, garantindo a estanqueidade da barragem.

## **Barragens de Terra**

As barragens de terra são estruturas de contenção construídas principalmente com materiais naturais, como argilas, siltes e areias, ou materiais produzidos artificialmente, como britas e enrocamentos. Estas barragens são utilizadas em uma variedade de aplicações, desde a contenção de água para abastecimento e irrigação até a disposição de rejeitos de mineração e resíduos industriais.

Conforme Costa (2016), as barragens de terra podem ser classificadas em dois tipos principais:

- **Homogêneas:** Nesse tipo de barragem, há predominância de um único material ao longo de sua estrutura. No entanto, elementos diversificados, como filtros, rip-rap (pedras soltas utilizadas para proteger taludes e margens de rios contra erosão), entre outros, podem ser incorporados conforme necessário para garantir a estabilidade e a eficácia da barragem.

- **Zonadas:** Nas barragens zonadas, ocorre um zoneamento de materiais terrosos em função de suas características e/ou permeabilidade. Isso significa que diferentes tipos de solo são utilizados em camadas específicas da barragem, de acordo com suas propriedades geotécnicas, proporcionando uma estrutura mais eficiente e estável.

A construção de barragens de terra exige cuidadosa engenharia e planejamento para garantir sua estabilidade e durabilidade ao longo do tempo. Em particular, é essencial considerar fatores como a compactação adequada dos materiais, a drenagem eficiente para evitar a saturação do solo e a proteção contra erosão causada pelo fluxo de água.

No contexto do desastre de Brumadinho, a barragem envolvida era uma barragem de rejeitos construída principalmente com materiais de terra e/ou enrocamento.

# Tipos de Alçamento de Barragens

A abordagem de construir um dique inicial ou aterro para suportar uma produção inicial de dois a três anos é uma prática comum na indústria mineradora. Conforme destacado por Zardari (2010), essa estratégia permite que as mineradoras comecem a operar rapidamente, utilizando uma capacidade inicial de armazenamento de rejeitos que atenda às demandas iniciais do processo de mineração.

Após esse período inicial, caso haja necessidade de aumentar o volume disponível para a deposição de rejeitos, é comum recorrer à técnica de alçamento. Esta técnica envolve a elevação do dique inicial ou aterro para aumentar sua capacidade de armazenamento. A motivação por trás da implementação do alçamento em diferentes estágios é principalmente econômica, pois permite que as empresas mineradoras distribuam os custos de construção da barragem ao longo dos anos de operação. Dessa forma, o investimento inicial é amortizado ao longo do tempo, alinhando-se com a produção e as necessidades de armazenamento de rejeitos Thomé e Passini (2018).

A Norma Brasileira de Mineração (NBR 13028/2017) destaca que os métodos de alçamento em barragens podem ou não utilizar os rejeitos para sua construção. Dentre os principais métodos de alçamento mencionados na norma, estão o alçamento a jusante, o alçamento a montante e o alçamento de linha de centro.

## Alçamento a Jusante

No método de alçamento a jusante, o material de construção é disposto na parte a jusante do maciço inicial da barragem. Esse método envolve o depósito progressivo de rejeitos ou outros materiais de construção sobre a face a jusante da barragem já existente.

Conforme a construção avança, o material é depositado sobre a própria estrutura da barragem, aumentando sua altura gradativamente em direção ao curso d'água. Essa técnica é uma das abordagens comuns para a expansão de barragens existentes, porém, é importante ressaltar que o alteamento a jusante pode apresentar desafios adicionais de segurança devido à utilização da estrutura existente como base para o aumento da altura da barragem.

## Alteamento de Linha de Centro

No método de alteamento de linha de centro, os materiais de construção são dispostos tanto a jusante quanto a montante do dique inicial. Nesse método, a construção é realizada ao longo de uma linha de centro pré-definida, onde parte do material é depositada a jusante da estrutura inicial da barragem, enquanto outra parte é depositada a montante.

Essa abordagem permite uma distribuição equilibrada do material de construção, contribuindo para o aumento controlado da altura da barragem. Ao seguir essa linha de centro, a expansão da barragem é realizada de forma coordenada e estratégica, buscando garantir a estabilidade e a eficácia da estrutura ao longo do processo de alteamento.

## Alteamento a Montante

O método de alteamento a montante demanda uma atenção especial em todas as fases do projeto, desde o planejamento até a desativação da barragem. Sua escolha deve ser fundamentada em um alto nível de detalhamento na engenharia dos rejeitos, seja para sua utilização como fundação ou material de construção.

Além disso, é necessário considerar cuidadosamente os elementos de drenagem interna e conduzir análises para as solicitações de carregamento não drenado. Para garantir a eficácia e segurança deste método, é crucial que o manual de operação seja integrado ao projeto, apresentando um detalhamento minucioso para evitar erros operacionais que possam comprometer a estabilidade e funcionamento da barragem ao longo do tempo.

No contexto do desastre de Brumadinho, a barragem B1, operada pela Vale S.A., era uma barragem de alteamento a montante. A ruptura dessa estrutura em 25 de janeiro de

2019 resultou em uma tragédia humana e ambiental de grandes proporções. Investigações subsequentes revelaram uma série de falhas no projeto, construção, monitoramento e operação da barragem, incluindo problemas relacionados à drenagem interna, ausência de sistemas de alerta eficazes e falta de comunicação adequada sobre os riscos.

# Aspectos Técnicos das Contenções em Barragens

É imprescindível destacar a importância da segurança e estabilidade na preservação da integridade de uma barragem. Segundo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) para assegurar esses aspectos fundamentais, uma série de medidas técnicas devem ser consideradas com atenção. Entre elas, destacam-se a análise geotécnica e hidrológica, que envolve a compreensão das características do solo e das condições de água na região.

Além disso, a impermeabilização e o sistema de drenagem desempenham um papel crucial na prevenção de vazamentos e erosões que podem comprometer a estrutura da barragem. A estabilidade estrutural é outra questão primordial, garantindo que a barragem seja capaz de resistir às pressões da água armazenada e a possíveis desastres naturais, como terremotos. Por fim, o monitoramento contínuo e a manutenção adequada são essenciais para garantir que a barragem permaneça segura ao longo do tempo, prevenindo potenciais falhas e danos.

## Análise Geotécnica e Hidrológica

A análise geotécnica e hidrológica desempenha um papel de extrema importância em todas as fases da concepção e construção de uma barragem. Esse processo envolve uma avaliação minuciosa das características do solo e das condições hidrológicas específicas da região onde a barragem será construída. Essa análise profunda é fundamental para garantir a segurança e a estabilidade da estrutura.

Por meio da análise geotécnica, é possível compreender as propriedades do solo presente no local da barragem, incluindo sua capacidade de suporte, resistência,

compressibilidade e permeabilidade. Essas informações são obtidas através de uma combinação de ensaios de laboratório e investigações realizadas diretamente no local (ensaios “in situ”).

**Figura 1 - Ensaio Granulométrico.**



**Fonte: EMBRAPA (2019)**

De acordo com a ABNT NBR 13028:2017, esses estudos geológico-geotécnicos devem fornecer um entendimento abrangente das características dos materiais de fundação e dos materiais que serão utilizados na construção da barragem. Isso inclui não apenas a análise das propriedades do solo, mas também a compreensão de como esses materiais responderão às cargas impostas pela estrutura da barragem e pelo conteúdo do reservatório.

Além disso, segundo Agência Nacional de Águas (ANA) a análise hidrológica é crucial para determinar as condições de fluxo de água na região, incluindo a previsão de vazões máximas e mínimas, a distribuição de chuvas e a possibilidade de eventos extremos, como enchentes. Essas informações são essenciais para calcular as cargas hidráulicas que a barragem enfrentará ao longo do tempo e garantir que sua estrutura seja projetada para suportá-las com segurança.

# Impermeabilização e o Sistema e Drenagem

Segundo o Departamento Nacional de Obras contra as Secas (DNOCS) a impermeabilização e o sistema de drenagem são aspectos críticos na manutenção da estabilidade e segurança das barragens. A impermeabilização é um processo detalhado que envolve a aplicação de materiais específicos, como geomembranas, argamassas ou concretos especiais, com a finalidade de criar uma barreira impermeável que impeça a infiltração de água através da estrutura da barragem. Esses materiais são selecionados cuidadosamente com base nas características do solo e nas condições hidrológicas da região, garantindo sua eficácia ao longo do tempo.

Por outro lado, o sistema de drenagem é projetado para lidar com a água que se acumula tanto na superfície quanto no interior da barragem. Isso inclui a instalação de canais, tubulações, caixas de drenagem e dispositivos de controle de fluxo, que são dimensionados e posicionados estrategicamente para coletar e conduzir a água de forma segura para fora da barragem. O sistema de drenagem é projetado levando-se em consideração as características hidráulicas da região, incluindo a previsão de vazões máximas e mínimas, a distribuição de chuvas e a possibilidade de eventos extremos, como enchentes.

**Figura 2 - Canal de restituição.**



Fonte: Construtora Terraço (2020)

A imagem acima nos mostra um vertedouro de abandono, que é uma estrutura hidráulica com o objetivo de controlar o nível de água em reservatórios, barragens ou canais, ele permite que a água seja liberada de forma controlada quando o volume armazenado atinge o seu nível pré-determinado. Quando um reservatório atinge a capacidade máxima o vertedouro é acionado, assim desviando o excesso do fluido em segurança e de forma controlada.

Pode ser dito que a função de um vertedouro de abandono é reduzir a pressão que é exercida pela água quando o reservatório fica cheio, com isso evitando danos à estrutura da barragem. Também pode ser notado sua utilização para a liberação de sedimentos acumulados, contribuindo para a manutenção da capacidade de armazenamento e da qualidade da água.

**Figura 3 - Túnel de drenagem Tulipa.**



**Fonte: Quora (2021)**

Podemos observar na imagem acima o túnel de drenagem Tulipa, nomeado pelo seu formato, ele é utilizado em projetos de engenharia hidráulica para se obter um melhor controle sobre o escoamento da água em locais onde existe uma necessidade de drenagem eficiente, como áreas urbanas, rodovias, ferrovias, entre outros. Os materiais

mais utilizados em sua construção são concreto armado, aço e materiais poliméricos, dessa forma assegurando resistência e durabilidade ao túnel de drenagem

Segundo a ABNT NBR 15551:2015 as drenagens em barragens de rejeito seguem princípios semelhantes as barragens convencionais, porem tem algumas considerações levando em conta as características do material armazenado. As principais diferenças são as características do rejeito, sua permeabilidade, contenção de vazamentos e gestão de águas pluviais.

Nas barragens de rejeitos, que são estruturas críticas para o armazenamento de resíduos provenientes de atividades industriais, mineradoras ou de outras fontes, os materiais depositados podem apresentar uma grande diversidade em sua composição. Essa heterogeneidade pode abranger desde partículas de diferentes tamanhos e densidades até a presença de substâncias altamente tóxicas ou contaminantes.

Devido a essa complexidade, é essencial que o sistema de drenagem das barragens de rejeitos seja meticulosamente projetado para lidar com essas características específicas. Isso envolve a consideração de diversos fatores, incluindo a análise detalhada dos materiais armazenados, a identificação dos possíveis contaminantes presentes e a previsão de como esses elementos podem interagir com o ambiente circundante ao longo do tempo.

Além disso, o projeto de drenagem deve garantir a eficiência na coleta e no tratamento dos efluentes gerados dentro da barragem, de forma a minimizar o risco de vazamentos ou contaminação do solo e da água subterrânea nas proximidades. Isso pode incluir a instalação de sistemas de revestimento impermeável, a construção de canais de drenagem adequados e a implementação de medidas de controle de erosão para proteger as estruturas contra danos.

Também vale ressaltar quem em regiões com alta precipitação, as barragens de rejeitos precisam de sistemas de drenagem robustos para lidar com as águas pluviais e evitar sobrecargas nos sistemas principais. Isso envolve a instalação de canais, bacias de retenção e dispositivos de controle de fluxo. A gestão eficaz requer análises hidrológicas detalhadas para dimensionar adequadamente as estruturas de drenagem e evitar impactos ambientais adversos.

# A Estabilidade Estrutural

Conforme estabelecido pela ABNT NBR 13028:2017, a estabilidade estrutural de uma barragem é um fator primordial para garantir sua capacidade de resistir às diversas forças externas que agem sobre ela. Isso inclui não apenas a pressão exercida pela água armazenada, mas também os impactos decorrentes de desastres naturais, como terremotos. Para garantir essa estabilidade, os projetos de engenharia são elaborados de forma meticulosa e abrangente.

Ao projetar uma barragem, é essencial realizar uma análise detalhada das propriedades geotécnicas do solo no local da construção. Isso envolve avaliar a capacidade de suporte do solo e seu comportamento sob diferentes condições de carga, considerando também os efeitos da ação da água sobre a estrutura. Essa análise é crucial para determinar a melhor abordagem de construção e os materiais mais adequados a serem utilizados.

Além disso, a distribuição adequada dos materiais ao longo da estrutura da barragem desempenha um papel crítico na garantia de sua estabilidade. É necessário selecionar materiais que possuam propriedades mecânicas adequadas e capacidade de suportar as cargas aplicadas em cada parte da estrutura. A geometria da barragem também é cuidadosamente projetada para distribuir uniformemente as tensões e evitar pontos de concentração de esforços que possam comprometer sua integridade ao longo do tempo.

Dessa forma, ao considerar todos esses aspectos, os projetos de engenharia robustos são capazes de assegurar a estabilidade estrutural das barragens, garantindo sua segurança operacional e protegendo as áreas a jusante contra possíveis riscos associados a falhas estruturais.

## *Fator de segurança*

Um fator de segurança é uma medida crucial em qualquer estrutura de engenharia, especialmente em barragens, onde a segurança é fundamental devido às consequências catastróficas de uma falha. Em termos simples, o fator de segurança é uma relação entre

a capacidade de carga de uma estrutura e as cargas que ela suporta. Para barragens, isso significa a capacidade de retenção de água em relação às forças que atuam sobre ela, como pressão hidrostática, sismicidade, erosão e outros.

Existem diferentes abordagens para calcular e aplicar o fator de segurança em barragens. Um método comum é usar a análise de elementos finitos para simular as condições de carga esperadas e determinar como a estrutura responde a essas condições. Com base nesses resultados, os engenheiros podem ajustar o projeto para garantir que a estrutura tenha uma margem adequada de segurança.

A ABNT NBR 13028:2017 estabelece diretrizes fundamentais para o projeto, construção, operação, monitoramento e desativação de barragens de rejeitos de mineração. Em relação ao fator de segurança em relação ao modo de falha de liquefação, a norma não define uma margem mínima de segurança. Em vez disso, ela reconhece que a ocorrência desse fenômeno requer condições específicas, que podem ser consideradas como gatilhos, desencadeando uma solicitação excepcional sobre a estrutura da barragem.

Essa abordagem indica que a liquefação não é uma ameaça iminente que exige uma margem de segurança padronizada, mas sim um evento que ocorre em situações específicas, geralmente relacionadas a variações extremas nas condições do solo e nas solicitações sobre a barragem. Essas condições excepcionais podem incluir fatores como variações extremas na pressão hidrostática do rejeito, sismicidade intensa ou outras condições geotécnicas adversas.

Portanto, a norma NBR 13028:2017 não estabelece uma margem mínima de fator de segurança em relação à liquefação, mas sim destaca a importância de compreender e avaliar os gatilhos específicos que podem desencadear esse fenômeno. Isso implica em uma abordagem mais contextualizada e adaptável, onde a análise de risco e a compreensão das condições geotécnicas locais desempenham um papel fundamental na garantia da segurança da barragem em relação à liquefação.

Segundo o CPCUH (2003), o fator de segurança ao tombamento em qualquer direção é descrito como a relação entre o momento estabilizante e o momento de tombamento,

em relação a um ponto ou linha efetiva de rotação (CPCUH, 2003, p.147). Por outro lado, o Criteria For Design Of Solid Gravity Dams (2010) estabelece o fator de segurança de estabilidade contra o tombamento através de uma equação específica (Equação 1).

#### Equação 1 - Fator de Segurança

$$FS = \frac{\Sigma \text{momentos estabilizantes}}{\Sigma \text{momento de tombamento}} = \frac{\Sigma Mr}{\Sigma Mt}$$

É exigido que o fator de segurança calculado seja superior a 1,5. Kruger (2008) esclarece que, na análise de tombamento, os momentos estabilizadores derivam do próprio peso da estrutura, enquanto os momentos instabilizadores resultam da pressão hidrostática, subpressão e empuxos de terra. Kruger também ressalta a importância de desconsiderar os coeficientes de coesão e atrito entre a barragem e a fundação.

O manual *Crítérios de Projeto Civil para Usinas Hidrelétricas* (2003) define os seguintes fatores de segurança para o tombamento (Tabela 1):

**Tabela 1 - Fatores de segurança ao tombamento.**

| Condição de carregamento               | Coefficiente de segurança |
|--|---------------------------|
| Condição de carregamento normal        | 1,5                       |
| Condição de carregamento de construção | 1,3                       |
| Condição de carregamento excepcional   | 1,2                       |
| Condição de carregamento última        | 1,1                       |

**Fonte: CPCUH (2003)**

O fator de segurança não é apenas uma questão de conformidade com os regulamentos; é uma medida crítica para garantir a segurança das comunidades que vivem rio abaixo da barragem. Uma falha em uma barragem pode resultar em inundações devastadoras, perda de vidas humanas, danos ambientais irreparáveis e prejuízos econômicos significativos (Eletrobrás, 2003)

Além disso, o fator de segurança não é estático; ele deve ser constantemente monitorado e avaliado ao longo do tempo. Mudanças nas condições ambientais, como aumento da precipitação, atividade sísmica ou erosão do solo, podem afetar a estabilidade da barragem. Portanto, programas de monitoramento contínuo são essenciais para detectar quaisquer sinais de problemas e tomar medidas corretivas antes que ocorram falhas.

# Monitoramento Constante e a Manutenção Regular

Conforme a ABNT NBR 13028:2017 para garantir a segurança contínua da barragem ao longo de sua vida útil, é essencial implementar um programa de monitoramento constante e manutenção regular. Isso implica na utilização de uma variedade de instrumentos de monitoramento, tais como piezômetros, inclinômetros, extensômetros, entre outros, para acompanhar possíveis movimentos do solo, variações no nível da água e outras condições relevantes que possam indicar potenciais problemas.

Além disso, é necessário realizar inspeções visuais periódicas, que podem ser feitas por equipes especializadas ou por meio de tecnologias de sensoriamento remoto, para identificar qualquer sinal de deterioração, erosão, ou danos na estrutura da barragem. Essas inspeções devem abranger não apenas a superfície da barragem, mas também suas fundações, vertedouros, sistemas de drenagem, e outras partes essenciais.

Caso sejam identificados quaisquer problemas durante o monitoramento ou inspeções, é crucial realizar reparos e manutenções imediatas para garantir a integridade e estabilidade da barragem. Isso pode incluir a correção de fissuras, o reforço de estruturas enfraquecidas, a limpeza de sistemas de drenagem obstruídos, entre outras ações corretivas.

A implementação eficaz desses processos de monitoramento e manutenção é fundamental para assegurar a estabilidade, segurança e eficácia da barragem na proteção de vidas humanas, comunidades e recursos naturais circundantes. Portanto, essas práticas devem ser integradas de forma contínua ao ciclo de vida da barragem, desde sua construção até o seu descomissionamento, garantindo assim a mitigação adequada de riscos ao longo do tempo.

# Disposição dos Rejeitos

Conforme a Agência Nacional de Mineração (ANM) e o Ministério do Meio Ambiente (MMA), o descarte de rejeitos de barragens é uma questão complexa e crucial para a gestão ambiental e de resíduos. Os rejeitos de barragens podem ser compostos por uma variedade de materiais, incluindo partículas minerais finas, metais pesados, substâncias químicas tóxicas e outros resíduos provenientes de processos industriais, de mineração ou de outras atividades.

O descarte adequado desses rejeitos é essencial para prevenir impactos ambientais adversos, como a contaminação do solo, da água e do ar, bem como para proteger a saúde pública e os ecossistemas circundantes. Existem várias abordagens para o descarte de rejeitos de barragens, dependendo das características dos resíduos e das regulamentações locais e internacionais.

Uma opção comum é a disposição controlada dos rejeitos em áreas específicas designadas para esse fim, como barragens de rejeitos ou pilhas de disposição. Essas áreas devem ser projetadas e construídas de forma a minimizar o risco de vazamentos, rupturas ou contaminação do meio ambiente. Isso pode incluir a instalação de revestimentos impermeáveis, sistemas de drenagem e monitoramento ambiental para garantir a segurança e a estabilidade das estruturas.

Outra abordagem é o tratamento dos rejeitos para reduzir seu volume, toxicidade ou impacto ambiental antes do descarte. Isso pode envolver processos físicos, químicos ou biológicos, como sedimentação, filtração, neutralização química ou biodegradação, dependendo da composição dos rejeitos e dos objetivos de tratamento.

Além disso, medidas de recuperação e reutilização de materiais presentes nos rejeitos também podem ser adotadas para minimizar o desperdício e reduzir a necessidade de descarte. Isso pode incluir a recuperação de metais valiosos, a reciclagem de materiais

inertes ou a utilização de rejeitos tratados em outras aplicações, como na construção civil ou na recuperação de áreas degradadas.

Em qualquer caso, é fundamental que o descarte de rejeitos de barragens seja realizado de acordo com as melhores práticas ambientais e de segurança, em conformidade com as regulamentações aplicáveis e após uma avaliação cuidadosa dos potenciais impactos e riscos envolvidos. Isso requer uma abordagem integrada e colaborativa entre governos, indústrias, comunidades locais e especialistas em gestão ambiental e de resíduos.

# Nível de Periculosidade

Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA), em conjunto com a Agência Nacional de Mineração (ANM), a classificação de barragens por periculosidade é uma importante ferramenta de gestão de riscos que visa identificar e categorizar as barragens de acordo com o potencial de danos que podem causar em caso de acidentes ou falhas estruturais. Essa classificação é essencial para direcionar ações preventivas, planos de contingência e medidas de segurança adequadas para mitigar os riscos associados a essas estruturas.

**Figura 4 - Barragem de rejeitos.**



**Fonte: UFPR (2020)**

As barragens são geralmente classificadas em diferentes níveis de periculosidade com base em critérios como altura, volume armazenado, tipo de rejeito retido, localização e potencial impacto socioambiental em caso de falha. Essa classificação pode variar de acordo com a legislação de cada país ou região, bem como as diretrizes estabelecidas por órgãos reguladores e agências ambientais.

Em muitos sistemas de classificação, as barragens são agrupadas em categorias que refletem o nível de risco associado. Por exemplo, as barragens podem ser classificadas como de baixa, média, alta ou muito alta periculosidade, ou em outras categorias similares.

Cada categoria é definida com base em critérios específicos, como altura da barragem, volume do reservatório, proximidade a áreas habitadas, potencial de inundação, entre outros.

Barragens classificadas como de baixa periculosidade geralmente representam riscos menores, com potencial de danos limitado em caso de falha. Já as barragens de média periculosidade podem apresentar riscos moderados, exigindo medidas de segurança e monitoramento mais rigorosos. As barragens de alta e muito alta periculosidade representam os maiores riscos, podendo causar danos significativos à vida humana, ao meio ambiente e à infraestrutura em caso de falha.

A classificação de barragens por periculosidade também influencia a aplicação de regulamentações, normas técnicas, planos de emergência e sistemas de monitoramento. Barragens classificadas como de maior periculosidade são frequentemente submetidas a requisitos mais rigorosos de segurança, monitoramento e manutenção, além de serem alvo de uma supervisão mais intensiva por parte das autoridades competentes.

Na região de Itaituba, no estado do Pará, está situada a Bacia de Rejeitos 14/15 do Garimpo Palito, operada pela Serabi Mineração. De acordo com o Relatório de Segurança de Barragens de 2019 divulgado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), essa barragem foi classificada como nível de emergência 1. A estrutura está localizada em uma área distante da cidade e está associada à atividade de extração de ouro. Estar em nível de emergência 1 significa que a barragem foi classificada como tendo um potencial de risco moderado. Geralmente, os níveis de emergência são categorizados em uma escala que vai de 1 a 3, sendo 1 o menor nível de risco e 3 o mais alto.

# Estudo de caso: Brumadinho

## O Caso Brumadinho

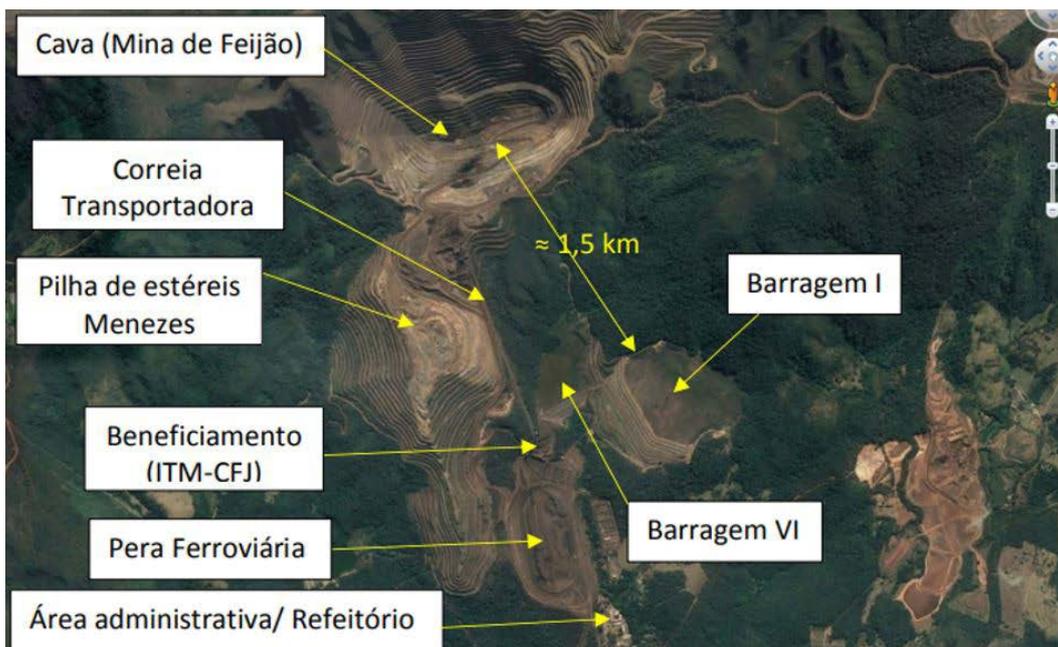
Em 25 de janeiro de 2019, às 12:28, a Barragem I do Complexo Paraopeba da Mina de Córrego do Feijão, pertencente à Vale S.A., rompeu-se. Esta barragem, destinada à contenção de rejeitos de minério de ferro, situava-se nas proximidades das coordenadas 591.955 E/7.775.080 N, no município de Brumadinho, a sessenta quilômetros de Belo Horizonte, M.G.

O rompimento culminou no maior acidente de trabalho do Brasil, resultando em dezenas de feridos e a trágica perda de centenas de trabalhadores da empresa e de suas contratadas, assim como membros da comunidade local afetados pela inundação provocada pelos rejeitos. Os impactos ambientais e sociais adicionais o elevaram a um desastre de proporções globais (ME, 2019).

As ondas de rejeitos resultantes do rompimento avançaram sobre trabalhadores, veículos, equipamentos e diversas instalações relacionadas ao tratamento e carregamento de minério. Estima-se que a lama atingiu uma velocidade de aproximadamente 80 quilômetros por hora (ME, 2019).

A Barragem I tinha por finalidade conter os rejeitos gerados no processo de beneficiamento do minério de ferro, que ocorria na Instalação de Tratamento de Minério do Córrego do Feijão (ITM – CFJ), após serem lavrados na Mina do Córrego do Feijão (SETEC, 2019).

Figura 5 - Imagem satélite do Complexo, destacando-se as principais unidades existentes.

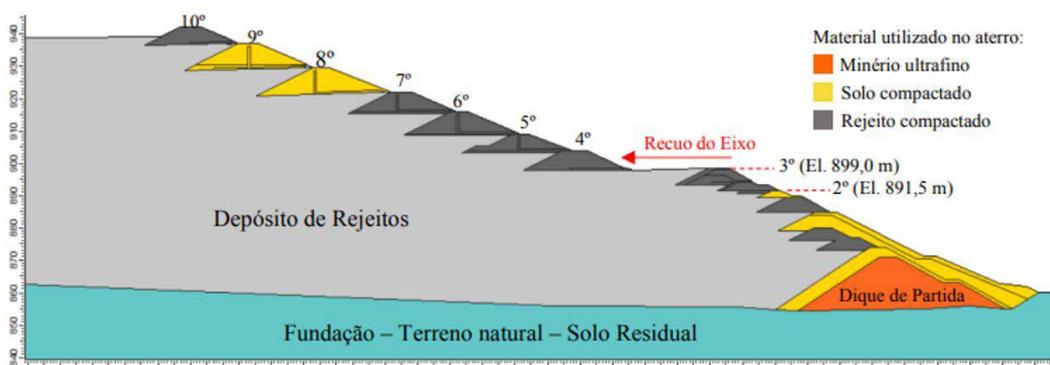


Fonte: Google Earth® - adaptado).

Conforme documentação examinada, o complexo minerário, do qual fazia parte a Barragem I, era originalmente de propriedade da empresa Ferteco Mineração S.A. O projeto inicial dessa estrutura foi elaborado em 1975 pela empresa Christoph ERB, e a primeira etapa de sua construção foi finalizada em 1976.

O 2º alteamento correspondia a vários alteamentos menores que foram “envelopados”. Até o 3º alteamento, a geometria da Barragem I era irregular, mas por ocasião do projeto e execução do 4º alteamento em 1995, com fins de atender condições mínimas de estabilidade, o seu eixo foi recuado e retificado, formando uma berma de largura variável (Figura 5) (SETEC, 2019).

Figura 6 - Ilustração da geometria da Barragem I.



Fonte: Relatório Auditoria Técnica de Segurança de Barragem por TÜV SÜD (2018)

A empresa VALE S.A. adquiriu os direitos minerários em 27/04/2001, quando a Barragem I encontrava-se no 6º alteamento, com 60,50 m de altura. O material constituinte da maior parte dos alteamentos foi o próprio rejeito de minério compactado, sendo que alguns alteamentos, como por exemplo o 9º, foram construídos com solo compactado, retirado de áreas de empréstimo (SETEC, 2019).

Foram construídos ao todo 10 (dez) alteamentos, tendo sido o último executado em 2013, atingindo-se uma altura final de 86,00 m (oitenta e seis metros), comprimento da crista (parte superior da barragem. Conforme o projeto, o volume total previsto do reservatório (capacidade de armazenamento) seria de 8.797.136 m³. Com a interrupção da operação em 2016, o volume total de rejeitos depositados teria ficado em 7.529.033 m³, de acordo com o descrito nos documentos analisados (SETEC, 2019).

A Barragem I é classificada como Classe III, de acordo com a normativa DN COPAM N° 87 (somatório > 5). Essa classificação a posiciona como o segundo nível mais grave em termos de potencial de dano ambiental. Em todos os parâmetros, a barragem atinge o valor máximo, exceto no quesito “Ocupação Humana a Jusante”, onde se enquadra na categoria “Existente”, o valor máximo neste caso seria “Grande”, confira a tabela 2.

**Tabela 2 - Classificação da Barragem I conforme DN COPAM N° 87.**

| <b>Característica</b>         | <b>Parâmetro</b>       | <b>Valor</b> |
|-------------------------------|------------------------|--------------|
| Altura do Maciço              | 86 m                   | 2            |
| Volume do Reservatório        | 7,5x10 <sup>6</sup> m³ | 2            |
| Ocupação Humana a Jusante     | Existente              | 3            |
| Interesse Ambiental a Jusante | Elevado                | 3            |
| Instalações a Jusante         | Alta Concentração      | 2            |
| <b>Somatório</b>              |                        | <b>12</b>    |

**Fonte: Relatório Auditoria Técnica de Segurança de Barragem por TÜV SÜD (2018)**

## Estrutura da Barragem I

A Barragem I tratava-se de um depósito de rejeitos de minério de ferro, construída pelo método de montante, uma técnica antiga, simples e econômica. A economia desse método é devida principalmente ao menor volume de material necessário para sua

construção, tornando-se atraente para as mineradoras como alternativa para maximizar suas margens de lucro.

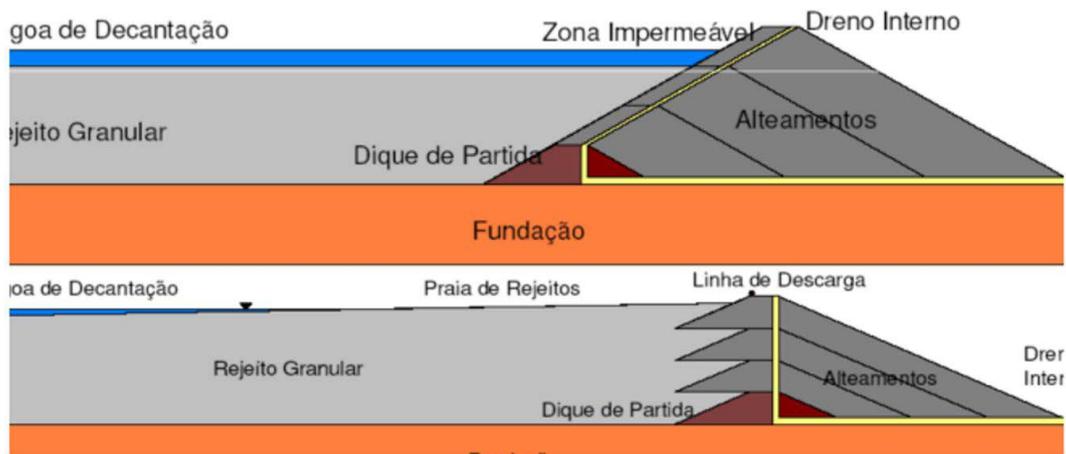
De acordo com a concepção desse tipo de estrutura, uma vez executado o dique inicial ou de partida, em solo compactado, na medida em que os rejeitos são depositados, estes passam a servir como terreno de fundação para novos alteamentos, que serão executados avançando-se sobre o reservatório para montante (no sentido da nascente), a partir do dique de partida (SETEC, 2019).

Contudo, esse método apresenta desvantagens em virtude de uma maior dificuldade de controle construtivo, tornando-se crítico, principalmente, em relação à segurança estrutural, devido ao fato de os alteamentos serem construídos sobre materiais previamente depositados e não consolidados. Assim, sob condição saturada e estado de baixa compacidade, os rejeitos com características predominantemente granulares tendem a apresentar baixa resistência ao cisalhamento, ficando susceptíveis ao fenômeno da liquefação, seja por carregamentos dinâmicos e/ou estáticos. Outra desvantagem é a dificuldade na implantação de um sistema interno de drenagem eficiente para controlar o nível d'água no interior da barragem, constituindo um problema adicional com reflexos na estabilidade estrutural (SETEC, 2019).

As soluções alternativas, em relação ao método construtivo de barragens de rejeitos, seriam o de alteamento para jusante (Figura 6) e o de alteamento pela linha de centro (Figura 6). Para barragens construídas pelo método de alteamento para jusante a etapa inicial consiste na construção de um dique de partida, sendo que os alteamentos subsequentes são realizados para jusante, isto é, no sentido da foz.

Por sua vez, barragens alteadas pelo método de linha de centro apresentam uma solução intermediária entre os dois métodos citados anteriormente. Além dessas alternativas, poderiam ser construídas barragens convencionais em solo compactado, empregando material de empréstimos e sem uso de rejeitos no seu corpo, ou mesmo, poderiam ser construídas barragens de concreto, além da disposição dos rejeitos na forma de empilhamento drenado. Todas essas alternativas são mais onerosas em termos construtivos (SETEC, 2019).

**Figura 7 - Métodos Construtivos de Barragens de Contenção de Rejeitos. De cima para baixo, respectivamente, método de: jusante e linha de centro**



Fonte: SETEC (2019)

As desvantagens inerentes às barragens de rejeitos alteadas a montante podem e devem ser mitigadas com a adoção de medidas que contribuam para elevar a sua segurança estrutural, por meio do controle rígido da qualidade ao longo das diferentes fases do empreendimento, desde o projeto, passando pela fase de construção, operação, monitoramento, manutenção e descomissionamento, tais como: a adoção de taludes com menor ângulo de inclinação; a redundância dos dispositivos de drenagem; baixas velocidades de alteamento; a manutenção de praia mínima; o controle sobre a disposição do rejeito; a execução periódica de campanhas de ensaios geotécnicos; dentre outras (SETEC, 2019).

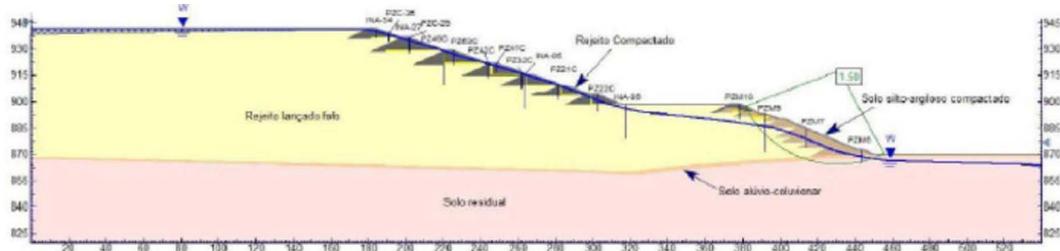
## Características do Solo

Conforme destacado na Revisão Periódica de Segurança (RPS) de 2018 da Barragem 1, preparada pela TÜV SÜD, a região da barragem é caracterizada por um maciço rochoso composto principalmente por gnaisses bandados. Além disso, a área do barramento é coberta por um horizonte de material terroso, composto por solos saprólitos/residuais/coluvionares. Esses solos demonstram uma boa capacidade de suporte e apresentam baixa permeabilidade.

As informações sobre as características de fundação do terreno natural são limitadas, abrangendo um material predominantemente silto-argiloso, com um índice de penetração (NSPT) entre 5 e 11 golpes. Este solo cobre um horizonte de solo saprolítico

mais resistente, com um número de golpes variando entre 15 e 40. A Figura 7 ilustra os diferentes tipos de solo presentes na Barragem 1, enquanto a Tabela 3 fornece detalhes sobre suas propriedades específicas. (ME, 2019).

**Figura 8 - Tipos de solo da B I**



Fonte: Geoconsultoria (2018)

**Tabela 3 - Parâmetros geotécnicos utilizados para o cálculo do coeficiente de segurança na B I.**

| Material                          | yn (kN/m³) | Parâmetros de Resistência |       |
|-----------------------------------|------------|---------------------------|-------|
|                                   |            | Drenada                   |       |
|                                   |            | c' (kPa)                  | φ (°) |
| Rejeito compactado                | 30         | 5                         | 37    |
| Rejeito lançado fofo              | 26         | 0                         | 34    |
| Rejeito lançado compactado        | 27         | 0                         | 37    |
| Solo alúvio-coluvionar            | 18         | 5                         | 26    |
| Solo silto-argiloso compactado    | 19,5       | 10                        | 30    |
| Solo alúvio-coluvionar c/ pedreg. | 18         | 0                         | 33    |

Fonte: Estudo de liquefação estática da B I (VL47MC01-R0), Geoconsultoria, 2016

## RISCOS

No documento elaborado pela empresa Potamos, uma seção é dedicada ao cálculo do risco monetizado em caso de ruptura da Barragem I. Neste tópico, a empresa calcula os prejuízos que a mineradora Vale poderia enfrentar em caso de falha na estrutura da barragem, considerando diferentes modos de falha, como galgamento, instabilização, erosão interna e liquefação.

Esses cálculos são separados por cenários. O Cenário C1 representa a população noturna sem alerta antecedente, o cenário C2 representa a população noturna com alerta antecedente, o cenário D1 representa a população diurna sem alerta e o cenário D2 representa a população diurna com alerta.

Tabela 4 - Valores de risco monetizado para a Barragem I.

| Evento / Modo de Falha | Cenário | Descrição   | Probabilidade da chuva | Probabilidade do modo de falha | Probabilidade final * | Consequência (R\$) | Risco (R\$) |
|------------------------|---------|---|------------------------|--------------------------------|-----------------------|--------------------|-------------|
| Galgamento             | D1      | Dia Chuvoso - Ruptura Noturna - SEM alerta prévio | -                      | 1,00E-08                       | 1,00E-08              | 14.602.591.523     | 146         |
|                        | D2      | Dia Chuvoso - Ruptura Noturna - COM alerta prévio | -                      | 1,00E-08                       | 1,00E-08              | 7.051.440.165      | 71          |
| Instabilização         | C1      | Dia Seco - Ruptura Noturna - SEM alerta prévio    | -                      | 1,00E-08                       | 1,00E-08              | 11.684.848.358     | 117         |
|                        | C2      | Dia Seco - Ruptura Noturna - COM alerta prévio    | -                      | 1,00E-08                       | 1,00E-08              | 6.500.769.418      | 65          |
|                        | D1      | Dia Chuvoso - Ruptura Noturna - SEM alerta prévio | 1,00E-04               | 1,00E-08                       | 1,00E-08              | 14.602.591.523     | 146         |
|                        | D2      | Dia Chuvoso - Ruptura Noturna - COM alerta prévio | 1,00E-04               | 1,00E-08                       | 1,00E-08              | 7.051.440.165      | 71          |
| Erosão Interna         | C1      | Dia Seco - Ruptura Noturna - SEM alerta prévio    | -                      | 2,00E-04                       | 2,00E-04              | 11.684.848.358     | 2.336.970   |
|                        | C2      | Dia Seco - Ruptura Noturna - COM alerta prévio    | -                      | 2,00E-04                       | 2,00E-04              | 6.500.769.418      | 1.300.154   |
|                        | D1      | Dia Chuvoso - Ruptura Noturna - SEM alerta prévio | 1,00E-04               | 2,00E-04                       | 2,00E-08              | 14.602.591.523     | 292         |
|                        | D2      | Dia Chuvoso - Ruptura Noturna - COM alerta prévio | 1,00E-04               | 2,00E-04                       | 2,00E-08              | 7.051.440.165      | 141         |
| Liquefação             | C1      | Dia Seco - Ruptura Noturna - SEM alerta prévio    | -                      | 3,00E-04                       | 3,00E-04              | 11.684.848.358     | 3.505.455   |
|                        | C2      | Dia Seco - Ruptura Noturna - COM alerta prévio    | -                      | 3,00E-04                       | 3,00E-04              | 6.500.769.418      | 1.950.231   |
|                        | D1      | Dia Chuvoso - Ruptura Noturna - SEM alerta prévio | 1,00E-04               | 3,00E-04                       | 3,00E-08              | 14.602.591.523     | 438         |
|                        | D2      | Dia Chuvoso - Ruptura Noturna - COM alerta prévio | 1,00E-04               | 3,00E-04                       | 3,00E-08              | 7.051.440.165      | 212         |

Fonte: ME (2019)

Tabela 5 - Custo Associado à Perda de Vidas Humanas, para os Cenários C1-C2 e D1-D2, para o rompimento da B I

| Cenários | Edificações Atingidas | População Atingida | Perda Potencial de Vidas | Alerta            | Custo (Perda de Vidas) |
|----------|-----------------------|--------------------|--------------------------|-------------------|------------------------|
| C1       | 279                   | 524                | 161,57                   | Sem Alerta Prévio | R\$ 1.424.051.538,00   |
| C2       | 279                   | 524                | 4,15                     | 4 horas           | R\$ 36.542.844,00      |
| D1       | 789                   | 1420               | 214,91                   | Sem Alerta Prévio | R\$ 1.894.216.740,00   |
| D2       | 789                   | 1420               | 5,08                     | 4 horas           | R\$ 44.792.748,00      |

Fonte: ME (2019)

Além da Potamos, Ramos aponta 19 municípios mineiros como potenciais locais que podem ser atingidos pela lama transportada pelo rio Paraopeba. Estes municípios são: Betim, Brumadinho, Curvelo, Esmeraldas, Felixlândia, Florestal, Fortuna de Minas, Igarapé,



detectadas só foram corrigidas após um longo período, indicando um descaso com a conservação do barramento.

Dos 99 registros de inspeções regulares analisados, 89 (90%) relataram algum tipo de problema no sistema de drenagem superficial. Em 52 inspeções (52,5%), foram observadas anomalias relacionadas à vegetação alta ou arbustos em alguma área da barragem. Além disso, em 57 inspeções (57,5%), foram detectados animais e/ou insetos, incluindo gado bovino, cupins e formigas, na estrutura do barramento, com 35 referências de bovinos sobre a barragem (ME, 2019).

Durante o período de 2015 a 2019, foram relatadas 17 inspeções que identificaram surgência/umidade no talude de jusante do barramento, sendo que 16 delas ocorreram em 2018, representando uma irregularidade em 67% das inspeções realizadas naquele ano. Outro ponto significativo diz respeito às anomalias relacionadas ao lançamento de rejeitos e formação de praia: 19 inspeções mencionaram problemas nesse aspecto, todas registradas em 2015, o que equivale a 79% das inspeções daquele ano.

Isso indica que, durante praticamente todo o período em que a Barragem B I ainda recebia rejeitos, havia questões com o lançamento e/ou formação de praia. Além disso, foram recorrentes os problemas no extravasor do barramento ou no bombeamento de água do lago para o sistema extravasor, com 42 ocorrências (42% dos casos), e recalques, deformações, trincas e/ou erosões no talude do barramento, reportadas em 44 inspeções (44,5%) nas FIR (ME, 2019).

Figura 10 - Arbustos no talude.



Fonte: Ministério da Economia (2019)

Figura 11 - Vegetação alta obstruindo a canaleta de drenagem.



Fonte: Ministério da Economia (2019)

Figura 12 - Vegetação alta no pé do talude.



Fonte: Ministério da Economia (2019)

Figura 13 - Vegetação arbustiva no talude de montante e dentro do reservatório.



Fonte: Ministério da Economia (2019)

Figura 14 - Obstrução de canaleta por vegetação.



Fonte: Ministério da Economia (2019)

Figura 15 - Vegetação arbustiva no talude do barramento e dentro das canaletas de drenagem.



Fonte: Ministério da Economia (2019)

Figura 16 - Surgência de água no talude junto à canaleta.



Fonte: Ministério da Economia (2019)

Figura 17 - Surgência de água no entorno da saída de Dreno Horizontal Profundo.



Fonte: Ministério da Economia (2019)

Figura 18 - Surgência de água no talude próximo à canaleta de drenagem, que está assoreada.



Fonte: Ministério da Economia (2019)

Figura 19 - Canaleta de drenagem constantemente assoreada e acumulando água



Fonte: Ministério da Economia (2019)

**Figura 20 - Canaleta de drenagem superficial assoreada**



**Fonte: Ministério da Economia (2019)**

**Figura 21 - Drenagem superficial da barragem obstruída com acúmulo de água na crista do barramento**



**Fonte: Ministério da Economia (2019)**

Figura 22 - Drenagem superficial inadequada causando acúmulo de água no pé do barramento e formação de erosão.



Fonte: Ministério da Economia (2019)

Figura 23 - Erosão (ravina) no talude do barramento.



Fonte: Ministério da Economia (2019)

**Figura 24 – Erosão causada por vazamento de água da tubulação de drenagem que foi danificada por gado.**



**Fonte: Ministério da Economia (2019)**

**Figura 25 - Erosão no pé da barragem devido a drenagem inadequada.**



**Fonte: Ministério da Economia (2019)**

**Figura 26 - Presença de gado no talude do barramento.**



**Fonte: Ministério da Economia (2019)**

**Figura 27 - Canal de drenagem superficial parcialmente obstruído pela vegetação e presença de gado no talude.**



**Fonte: Ministério da Economia (2019)**

**Figura 28 – Formação de cupinzeiros no barramento.**



**Fonte: Ministério da Economia (2019)**

**Figura 29 - Bomba de água inoperante com formação de lago no reservatório da barragem**



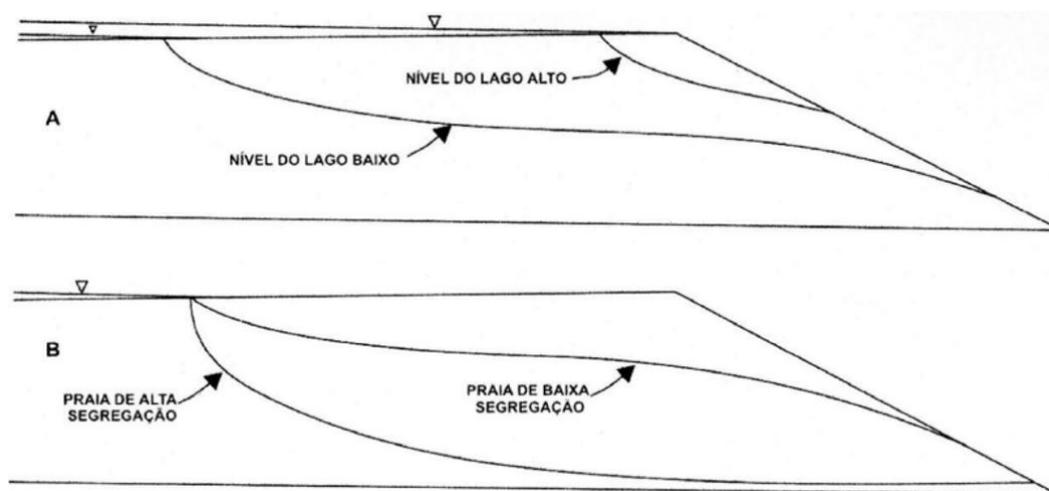
**Fonte: Ministério da Economia (2019)**

## Praia de rejeitos

Segundo o Ministério da Economia, conforme citado por Castro, muitas rupturas em barragens construídas pelo método de alteamento a montante são atribuídas à separação inadequada entre o lago de decantação e a crista. A estabilidade dessas barragens é influenciada pelo avanço do lago de decantação, que pode elevar o nível freático no corpo da barragem, resultando em surgimento de água em partes altas do talude de jusante e possibilitando o processo de piping, como ilustrado no diagrama

A da figura 29. O diagrama B mostra praias com baixa segregação dos rejeitos lançados, geralmente de baixa permeabilidade, o que também pode causar elevação do nível freático no corpo da barragem, levando ao surgimento de água no talude de jusante e possível ocorrência de piping.

**Figura 30 - Posicionamento do nível freático em decorrência do nível do lago e da segregação da praia.**



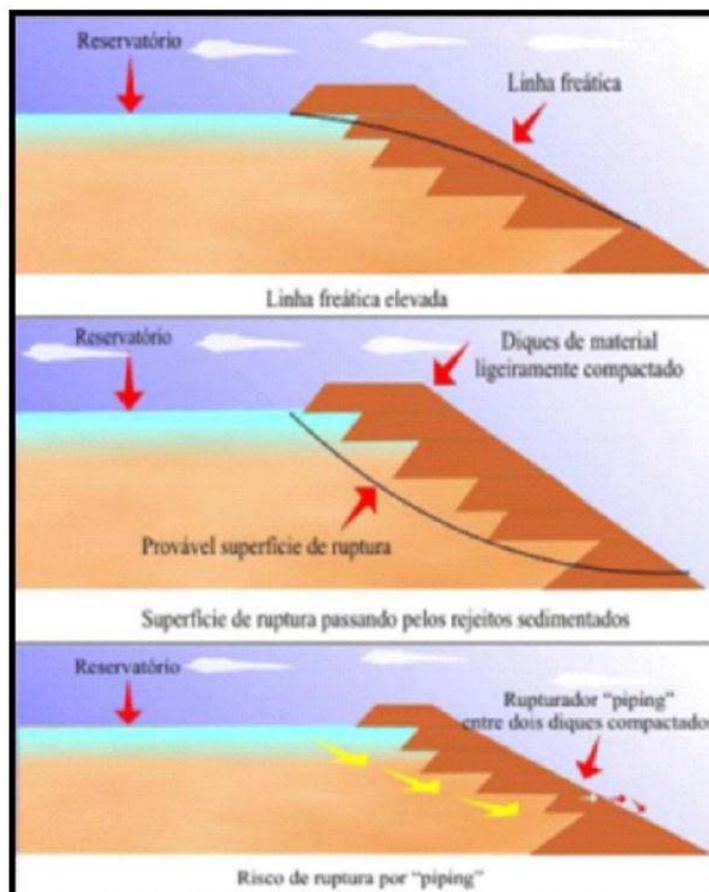
**Fonte: Ministério da Economia (2019)**

A Superintendência Regional do Trabalho em Minas Gerais *apud*. Galvão Sobrinho, destaca que o uso do rejeito como material construtivo é economicamente vantajoso, porém apresenta algumas desvantagens, como alta susceptibilidade à formação interna de *piping*, alta erodibilidade da superfície e alta probabilidade de liquefação sob carregamentos dinâmicos ou estáticos.

O relatório também aponta que praias com baixa segregação dos rejeitos lançados

e baixa permeabilidade tendem a elevar o nível freático no corpo da barragem, o que pode resultar em entubamento devido à surgência d'água no talude de jusante da barragem, conforme ilustrado na figura 30.

**Figura 31 - Método de alteamento a montante com possíveis colapsos.**



**Fonte: Ministério da Economia (2019)**

Na Revisão Periódica de Segurança (RPS) de 2018 da Barragem B I, elaborada pela TÜV SÜD, observa-se que o processo de segregação sedimentar não é característico na praia de rejeitos, sendo praticamente inexistente no lado esquerdo e mais evidente no lado direito.

Os diques externos foram geralmente construídos com rejeitos compactados, exceto pela camada superficial que cobre os três primeiros alteamentos, feita com solo argiloso, separada do quarto alteamento por uma berma relativamente larga. Internamente aos diques, os rejeitos foram lançados hidraulicamente, resultando em um processo heterogêneo, alternando entre o lançamento em praias e submerso, o que gerou compacidades muito variáveis.

O Manual de Operação (VL28-MO-01, Rev. 1), datado de agosto de 2007 e elaborado pela Geoconsultoria, estabelece que um aspecto a ser considerado, especificamente para a retirada dos “stop logs”, é a largura da praia, a qual deve ter no mínimo 150 metros, conforme indicado na Tabela 6.

**Tabela 6 - Quadro resumo das características da B I.**

| Resumo   |                        |
|--|------------------------|
| Volume de reservação de água                     | Mínimo Possível        |
| N.A. operacional abaixo da crista da barragem    | 2 m                    |
| Largura mínima da praia                          | 150 m                  |
| Vazão de água descartada da usina c/ os rejeitos | 957 m <sup>3</sup> /h  |
| Soleira do vertedor                              | 2,5 m abaixo da crista |
| Borda livre mínima                               | 1,5 m                  |

**Fonte: Manual de Operação, Geoconsultoria (2007)**

Em uma apresentação em PowerPoint intitulada “Decommissioning B 1 Dam”, a Vale demonstra como ocorreu a formação da praia de rejeitos ao longo dos anos, contrariando o estabelecido no projeto. Isso é corroborado por vários documentos que indicam que a largura da praia de rejeitos nunca foi respeitada pela Vale até 2015.

Na mesma apresentação, são destacados momentos em que foram observadas inadequações na largura da praia: em 2005 e 2006, foi relatada a ausência de uma praia adequada, enquanto em 2012 e 2014 foram identificados problemas como presença de finos próximos à barragem e preenchimento da área escavada com rejeitos, respectivamente.

Figura 32 - Barragem B I com largura de praia igual a zero em 2002.



Fonte: Decommissioning B 1 Dam (2018)

Figura 33 – Barragem B I sem largura de praia em 2006.



Fonte: Decommissioning B 1 Dam (2018)

Figura 34 - Barragem B I com a praia começando a ser formada em 2012 (linha amarela tracejada), mas ainda com finos perto do barramento.



Fonte: Decommissioning B 1 Dam (2018)

## *Leitura de equipamentos*

Durante a análise dos relatórios, foram encontradas várias inconsistências que apontam para a falta de organização no mapeamento da instrumentação e negligência em sua interpretação. As leituras da instrumentação realizadas entre janeiro de 2017 e dezembro de 2018 foram apresentadas à fiscalização, porém, mesmo após três notificações, a Vale não entregou os relatórios de leitura manual dos instrumentos de janeiro de 2019.

Além disso, é importante destacar que diversos piezômetros que supostamente estariam instalados na barragem não constam da Carta de Risco, o que evidencia a falta de parâmetros de referência para interpretar as leituras desses instrumentos. Adicionalmente, os relatórios de leitura contêm resultados de medições de vários instrumentos que não foram contemplados na Carta de Risco, aumentando a incerteza sobre a eficácia do monitoramento da barragem (ME, 2019).

Essas discrepâncias levantam sérias preocupações sobre a integridade do sistema de monitoramento da barragem e a capacidade da Vale em fornecer dados precisos e

atualizados para a avaliação de riscos. A falta de informações consistentes e a ausência de parâmetros de referência para interpretação dos dados coletados comprometem significativamente a eficácia das medidas de segurança implementadas.

Isso destaca a necessidade urgente de revisão e aprimoramento dos procedimentos de monitoramento e comunicação de dados, a fim de garantir uma abordagem mais transparente e eficaz na gestão de riscos relacionados à segurança das barragens.

Sempre que havia alguma leitura discrepante em relação ao histórico, a instrução era desconsiderá-la, pois não estava de acordo com os padrões anteriores. A maioria dos piezômetros estava sem água ou com leituras constantes, indicando pouca ou nenhuma carga hidrostática, enquanto alguns poucos mostravam uma carga excessiva.

O relatório indica que, de maneira geral, a maioria dos instrumentos instalados nos 9º e 10º alteamentos permanecia sem água desde a instalação, possivelmente devido à manutenção da praia, que afasta o nível da água da crista da barragem. Da mesma forma, os instrumentos localizados a jusante do filtro nos alteamentos 6º a 8º também permaneciam secos desde a instalação.

Portanto, não podemos concluir que as leituras refletiam a verdadeira condição de saturação da barragem. Na planilha de medições, há registro de dois instrumentos, ambos na berma 942, indicando vazamento em 31/10/2018. No entanto, as demais medições desses instrumentos, tanto anteriores quanto posteriores, indicam que estavam secos.

Na Carta de Risco, um piezômetro é indicado erroneamente como instalado em duas seções diferentes. Dos 17 piezômetros instalados na fundação, quatro mostraram resultados consistentemente “seco” em todas as medições de dezembro de 2017 a dezembro de 2018, um mês antes do colapso.

Um piezômetro ficou “seco” apenas de dezembro de 2017 a abril de 2018. Entre maio de 2018 e outubro de 2018, registrou um nível piezométrico entre 869,929 e 871,459. Após outubro de 2018, não há mais registros de medição para esse piezômetro. Os relatórios de medição também mencionam um piezômetro que não está listado na Carta de Risco.

Um relatório de 2017 revela várias irregularidades nos instrumentos, como “destruídos”, “danificados”, “não encontrados” e “tampa danificada”. Dez piezômetros foram identificados como destruídos, sete como não encontrados e um como danificado.

Alguns piezômetros foram marcados como “não encontrados” em meses de 2017, mas houve medições em 2018, sugerindo possíveis substituições não registradas. Por exemplo, um piezômetro não foi encontrado desde junho de 2017. Outro piezômetro foi listado como “destruído” por 10 meses em 2017, mas foram feitas leituras em 2018, indicando uma possível substituição não documentada.

## *Monitoramento por radar*

De acordo com a Superintendência Regional do Trabalho de Minas Gerais, conforme o depoimento de Tércio Andrade Costa na Reunião Deliberativa Ordinária da Comissão Parlamentar de Inquérito da Câmara dos Deputados sobre as causas do rompimento da barragem de mineração Mina Córrego do Feijão, ocorrida em 14 de maio de 2019, o radar da B I, instalado em março de 2018 a cerca de 800 metros da barragem, monitora movimentos em um raio de até quatro quilômetros. Em apenas sete dias após a instalação, em torno do dia 8 de março, já detectou variações nas estruturas.

Com o passar do tempo, foram identificadas pequenas variações em áreas de 200, 400 e 500 metros quadrados, comunicadas mensalmente aos engenheiros da Vale. Em 18 de janeiro de 2019, o radar registrou uma variação significativa em uma área de aproximadamente 1,5 hectare, abrangendo várias seções da barragem. Desde novembro de 2018, o radar indicava uma deformação gradual e constante na B I, em contraste com as variações menores observadas anteriormente.

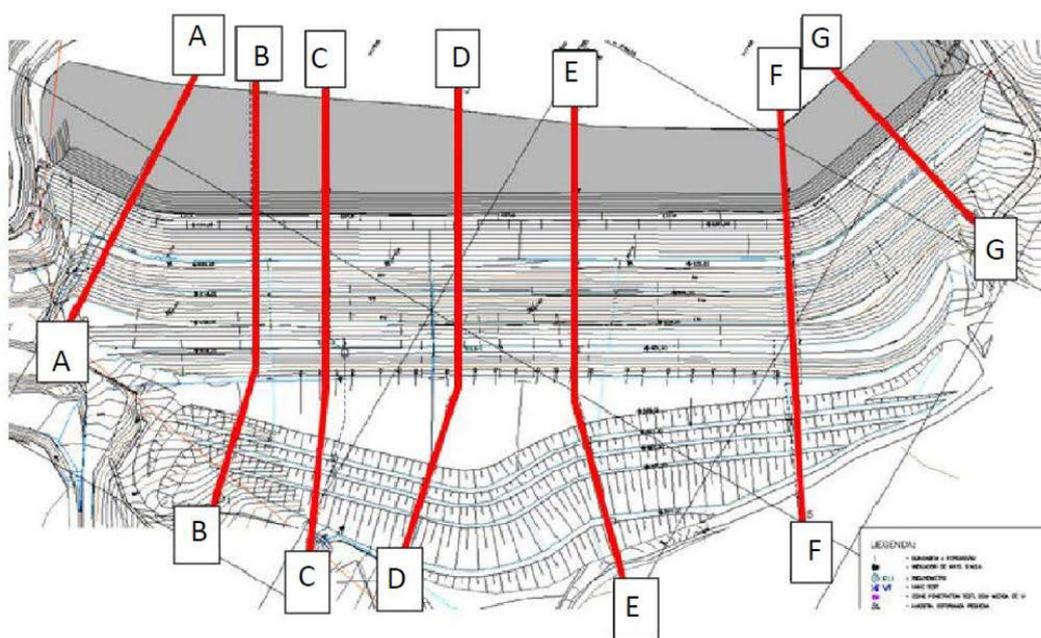
Uma variação na amplitude do sinal do radar também chamou atenção. Esse equipamento emite uma onda com uma certa potência, que se propaga até o talude, sofrendo uma perda de potência e retornando ao equipamento. Essa mudança na amplitude do sinal pode indicar diversas alterações. Por exemplo, o crescimento de vegetação pode amortecer a onda de retorno, enquanto uma mudança na umidade do material da estrutura pode afetar a absorção da onda pelas partículas de água.

As variações detectadas pelo radar em janeiro foram comunicadas aos superiores, que indicaram que outros instrumentos na barragem estavam operando normalmente, sugerindo que as variações detectadas poderiam ser consideradas normais. Esses eventos reforçam a observação de deformações na B I desde sua instalação em março de 2018.

## Fator de segurança

Conforme o documento da TÜV SÜD, foram consideradas apenas três seções transversais (C, D e) para a realização das análises de estabilidade da barragem. Estas eram “conformadas por cinco materiais: rejeito, aterro com minério ultrafino, aterro em solo compactado, aterro de rejeito compactado e fundação em solo residual”.

Figura 35 - Seções Transversais.



Fonte: ME - adaptado (2019)

Foram realizadas análises de estabilidade para duas condições de comportamento frente à presença d'água: análise drenada, cujos parâmetros necessários são o peso específico do material ( $\gamma$ ), sua coesão efetiva ( $c'$ ) e seu ângulo de atrito efetivo ( $\phi'$ ); e análise não-drenada, na qual os materiais saturados suscetíveis a liquefação apresentam resistência não-drenada ( $su$ ) e os demais materiais mantêm sua resistência drenada ( $c'$  e  $\phi'$ ).

## FS para condição drenada

A análise de estabilidade da B I sob condições drenadas foi realizada utilizando-se os parâmetros geotécnicos da tabela 6. A condição de piezometria adotada foi interpretada considerando as medidas de piezômetros e INAs, bem como os resultados de CPTu que permitiram identificar a presença de lençóis empoleirados no reservatório (ME, 2019).

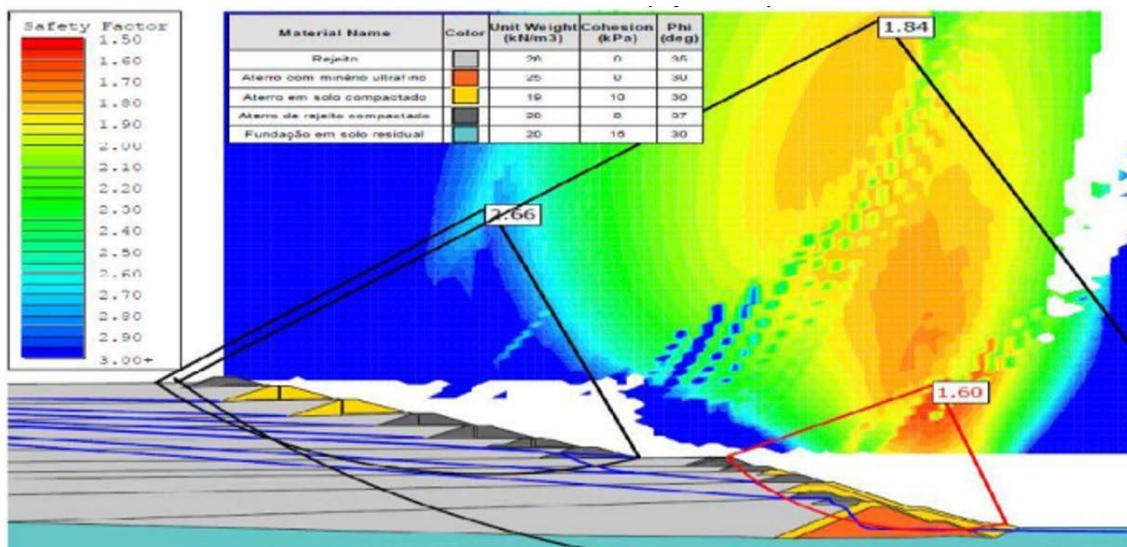
Tabela 7 - Parâmetros geotécnicos considerados para a B I pela TÜV SÜD.

| Material                     | $\gamma$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | c'<br>(kPa) | $\phi'$<br>(graus) | $S_u/\sigma'_{v0}$ |          |
|------------------------------|----------------------------------|-------------|--------------------|--------------------|----------|
|                              |                                  |             |                    | pico               | residual |
| Rejeito                      | 26                               | 0           | 35                 | 0,26               | 0,09     |
| Aterro com minério ultrafino | 25                               | 0           | 30                 | ---                | ---      |
| Aterro em solo compactado    | 19                               | 10          | 30                 | ---                | ---      |
| Aterro de rejeito compactado | 28                               | 0           | 37                 | ---                | ---      |
| Fundação em solo residual    | 20                               | 16          | 30                 | ---                | ---      |

Fonte: Relatório Auditoria Técnica de Segurança de Barragem por TÜV SÜD (2018)

Os FS obtidos foram FS = 1,93 (Seção C-C), FS = 1,76 (Seção D-D) e FS = 1,60 (Seção E-E), sendo que as superfícies críticas se desenvolveram abaixo da berm de recuo da cota 899 m, interceptando o dique de partida e condicionando a estabilidade da B I sob condições drenadas, conforme figura 36 (TÜV SÜD, 2019).

Figura 36 – Análise de estabilidade para a condição drenada, superfície circular (Seção E-E): FS=1,60 (Spencer).



Fonte: Relatório Auditoria Técnica de Segurança de Barragem por TÜV SÜD (2018)

A empresa TÜV SÜD concluiu que a B I se encontrava estável para o cenário de instabilização do talude de jusante sob a condição drenada, em razão dos FS encontrarem-se superiores ao preconizado na NBR 13.028/2006 ( $FS > 1,5$ ).

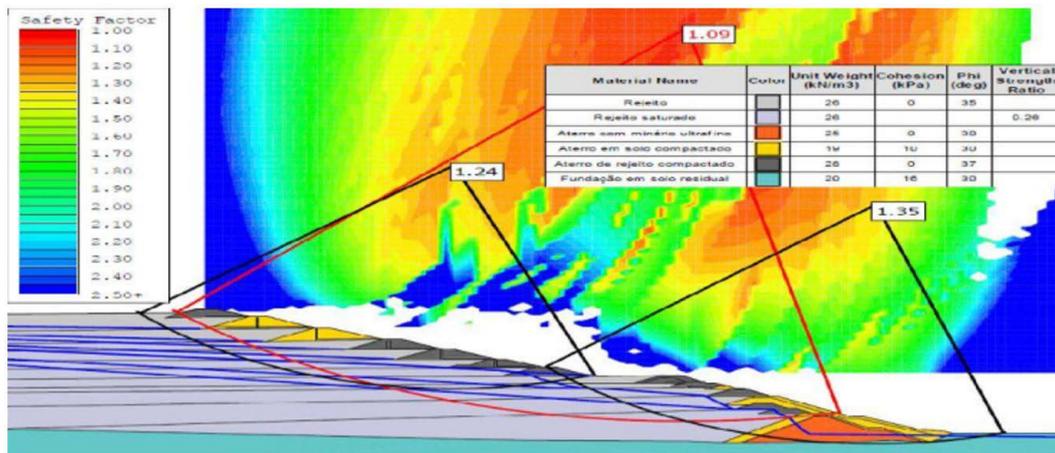
## *FS para condição não drenada*

A condição não drenada ocorre quando o material constituinte do rejeito depositado na barragem, estando saturado, isto é, com os poros completamente preenchidos por líquido, ou possui baixa capacidade de drenagem (pouco permeável), ou encontra-se confinado por camadas adjacentes com essa característica, ou ainda, submetido a alguma ineficiência dos dispositivos internos de drenagem. Nessas condições, a aplicação de solicitações externas, produz o efeito da elevação da pressão do líquido (pressão neutra) presente nos poros, também conhecido por excesso da poropressão (SETEC, 2019).

Essas solicitações externas, por sua vez, podem ser em forma de um carregamento contínuo ou estático, devido à execução de alteamentos; cíclico ou dinâmico, devido à ocorrência de vibrações ou sismos; bem como pela combinação desses dois tipos concomitantemente. Resumindo, a condição não drenada também pode ser denominada condição de excesso de poropressão (SETEC, 2019).

As análises da estabilidade sob condição não drenada têm o intuito de avaliar a ruptura da barragem por liquefação. Para a avaliação do potencial de liquefação considerou-se que algo imprevisível (gatilho) possa ocorrer e levar os materiais suscetíveis a liquefação a atingirem sua resistência não drenada de pico. Deste modo, conforme a figura 37, as análises realizadas considerando um gatilho desconhecido resultaram nos  $FS = 1,22$  (Seção C-C),  $FS = 1,18$  (Seção D-D) e  $FS = 1,09$  (Seção E-E).

Figura 37 - Análise de estabilidade para a condição não drenada, superfície circular e gatilho desconhecido (Seção E-E): FS=1,09 (Spencer).



Fonte: Relatório Auditoria Técnica de Segurança de Barragem por TÜV SÜD (2018)

Para avaliar se os fatores de segurança calculados estão acima do mínimo necessário para a emissão da Declaração de Condição de Estabilidade (DCE), a TÜV SÜD considera que a norma NBR-13028 (2017) não estabelece um fator de segurança mínimo para a liquefação. Para que esse fenômeno ocorra, é preciso uma situação excepcional de baixa probabilidade, um fator de segurança superior a 1 é suficiente segundo estudos de Leshchinsky e Ambauen (2015). Um fator de segurança acima de 1,05 pode compensar erros no método de cálculo utilizado. Conclui-se que a Barragem I estável quanto à liquefação do rejeito, mesmo em cenários não-drenados, com  $FS > 1,05$ , considerando valores médios de resistência.

Por fim, recomendou-se evitar a indução de vibrações, proibir detonações próximas, evitar o tráfego de equipamentos pesados na barragem e impedir a elevação do nível de água no rejeito. Também foi sugerido não executar obras que retirassem material dos pés dos taludes ou causassem sobrecarga no reservatório ou na barragem. Além disso, recomendou-se a instalação de um registro sismológico no entorno da barragem.

## Considerações

A TÜV SÜD adotou um critério conservador ao calcular o parâmetro da envoltória de resistência não drenada ( $S_u/\sigma'_v$ ), baseando-se apenas nos resultados dos ensaios de SPT e CPTu, seguindo a metodologia de Olson. No entanto, ao estabelecer o limite para

os fatores de segurança (FS) na condição não drenada da B I, não segue esse padrão de prudência, ignorando o valor mínimo de 1,3 recomendado pela metodologia de Olson. Utilizando o método de Equilíbrio Limite (LE), a TÜV SÜD calculou um FS de 1,09 para a seção mais crítica da barragem.

A empresa auditora opta por ignorar fatores de segurança mais conservadores, que recomendam um limite mínimo de 1,3 para o fator de segurança na condição não drenada, em vez disso, adotando 1 como referência de segurança. Para justificar essa escolha, recorre a um artigo científico que sugere possíveis imprecisões na determinação do fator de segurança ao comparar diferentes metodologias de cálculo. Em uma tentativa aparentemente cautelosa, estabelece uma “margem de segurança” e aumentam o fator de segurança mínimo para a condição não drenada de 1 para 1,05. No entanto, há uma falta de transparência na interpretação do artigo de Leshchinsky e Ambauen para justificar o fator de segurança de 1,05, citando que resultados anteriores indicam que um valor acima desse cobre possíveis erros no método de cálculo utilizado.

No entanto, o artigo mencionado não trata dos Fatores de Segurança mínimos aceitáveis nem aborda questões relacionadas aos gatilhos de liquefação. O texto citado pela TÜV SÜD no Relatório de Inspeção de Segurança Regular (RISR) de setembro de 2018 apenas apresenta uma nova metodologia de cálculo de Fator de Segurança denominada “DLO-LA”, usando um programa de computador.

Esta nova abordagem é comparada com métodos tradicionais, como o Método de Equilíbrio Limite “LE”, e conclui que os cálculos de Fatores de Segurança obtidos são semelhantes aos métodos convencionais usados pela engenharia geotécnica, sem tratar de FS mínimos

O Fator de Segurança calculado para a Barragem B I em setembro de 2018 foi de 1,09, superando o novo mínimo de 1,05 adotado pela TÜV SÜD e permitindo a emissão da Declaração de Condição de Estabilidade. O PIESEM estabeleceu um valor mínimo aceitável de 1,3 para o Fator de Segurança em condição não drenada de pico, conforme definido pela Vale em dezembro de 2017. É importante notar que a TÜV SÜD utilizou um

Fator de Segurança mínimo de 1,3 para condição não drenada ao elaborar relatórios para outras barragens da Vale entre 2015 e 2019.

A TÜV SÜD calculou os Fatores de Segurança mínimos para a Barragem I considerando três cenários de liquefação para sua seção mais crítica, a Seção 4-4. Para os Cenários 1 e 3, que abordam a resistência residual pós-liquefação e a resistência de pico em sollicitação sísmica, respectivamente, os valores mínimos de FS foram de 0,44 e 0,79.

É importante notar que a norma NBR nº 13.028/2017 estabelece um FS mínimo de 1,1 para carregamento sísmico. Além disso, a probabilidade de ruptura foi calculada pelo método de Monte Carlo, resultando em 100,00% para o Cenário 1 e 97,34% para o Cenário 3. No entanto, nos relatórios de segurança subsequentes, a TÜV SÜD utilizou apenas o resultado menos crítico, um FS mínimo de 1,09 para condição de resistência não drenada, indicando uma condição não segura e evidenciando uma quebra de paradigma em detrimento da segurança da barragem.

## Possíveis Gatilhos

### *Sismos e vibrações induzidas*

A área onde está situada a Barragem I não tem histórico relevante de atividade sísmica, mas é sugerido uma investigação mais aprofundada sobre sismicidade local. Os taludes naturais ao redor do reservatório parecem estáveis e bem cobertos por vegetação, sem histórico de problemas geotécnicos. Quanto às vibrações causadas pelo tráfego de equipamentos, a Vale indica que não há planos de novos alteamentos na barragem, o que reduz a possibilidade de tráfego na área.

Sobre as vibrações induzidas por detonações na mina próxima, relata-se que a mina opera há cerca de 40 anos com detonações quase diárias, sem impacto identificado na estabilidade da barragem. A Auditoria Fiscal do Trabalho, após revisar entrevistas e documentos técnicos, descarta essas hipóteses como gatilho para a liquefação da Barragem I (ME, 2019).

## Eventos sísmicos

O Centro de Sismologia da USP compartilhou dados que indicam que detonações em pedreiras e desmontes em minas são frequentes, geralmente com magnitudes abaixo de 2,5, mas raramente incluídas em seus boletins. Devido à distância das estações sismológicas em Minas Gerais, a mais próxima está em torno de 100 km de distância, o que dificulta a detecção de eventos de baixa magnitude e aumenta a margem de erro na determinação de seus epicentros.

O CS/USP forneceu uma lista dos desmontes detectados próximos à Mina de Córrego do Feijão entre 21 e 25 de janeiro de 2019, dentro de um raio de 20 km das coordenadas fornecidas, com magnitudes acima de 1,3, independentemente do tipo de detonação. Os detalhes estão na Tabela 8.

**Tabela 8 - Desmontes detectados próximos à Mina de Córrego do Feijão entre os dias 21 e 25 de janeiro de 2019.**

| <b>Data</b> | <b>Hora Local</b> | <b>Longitude</b> | <b>Latitude</b> | <b>Magnitude (mR)</b> |
|-------------|-------------------|------------------|-----------------|-----------------------|
| 21/01/2019  | 11:45:41          | -44,08           | -20,12          | 1,70                  |
| 22/01/2019  | 13:21:25          | -44,25           | -20,10          | 2,00                  |
| 23/01/2019  | 10:50:21          | -44,02           | -20,18          | 1,80                  |
| 25/01/2019  | 12:34:17          | -44,17           | -20,13          | 1,90                  |

**Fonte: ME por Centro de Sismologia da USP (2019)**

Os sismos detectados devido às detonações foram de baixa intensidade, com uma margem de erro nos epicentros de cerca de +/- 10 km, devido à pouca quantidade de estações e à grande distância da Mina de Córrego do Feijão. Segundo um e-mail de 04 de julho de 2019 do Diretor do Centro de Sismologia da USP:

O rompimento ocorreu às 12:27:58 (Hora Local), seguido por uma detonação em Água Limpa perto da Mina de Feijão às 12:34:17, seis minutos após o rompimento. Não foram detectadas detonações ou tremores naturais nas proximidades da mina antes do rompimento (ME, 2019).

Não há evidências de detonações próximas à Mina nem de sismos naturais que pudessem desencadear o processo de liquefação que causou o rompimento da Barragem I.

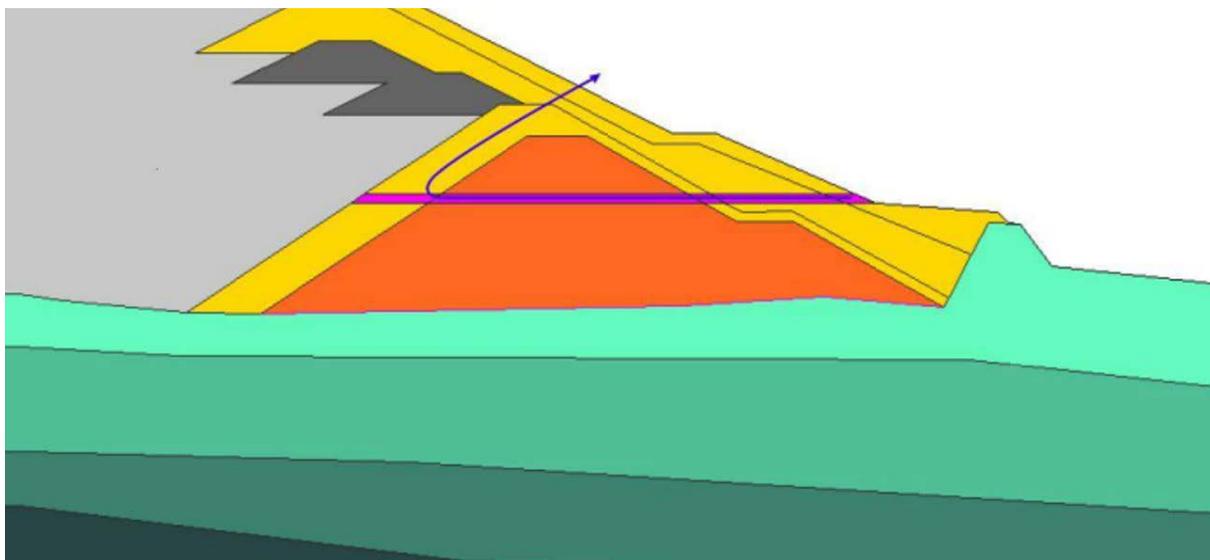
## Remoção da camada de suporte posicionada no pé da estrutura

A empresa Pimenta de Ávila, em seu documento de 2015, menciona que não há planos para intervenções na região do pé da barragem que possam remover a camada de suporte. Essa conclusão foi reafirmada pela Potamos em 2018 e pela Auditoria Fiscal do Trabalho.

## Instabilização local

O documento afirma que não há sinais de instabilidade ou mau comportamento da barragem, com uma análise de estabilidade probabilística que sugere uma probabilidade bastante reduzida de problemas. No entanto, durante o 15º DHP em 11 de junho de 2018, ocorreu um fenômeno conhecido como “Fratura Hidráulica”, onde a água utilizada na perfuração emergiu em uma cota superior da barragem, próximo a uma escada de drenagem. Segundo o Eng.º Makoto Namba, representante da TÜV SÜD, a pressão aumentada da água foi necessária para superar uma camada de enrocamento, resultando na emergência da água alguns metros acima do local de perfuração planejado, conforme figura 38 (ME, 2019).

**Figura 38 - Em rosa, posição de instalação dos DHP. Em azul, possível caminho da água de perfuração após encontrar a camada de enrocamento (em amarelo) a montante do dique inicial.**



Fonte: Relatório Auditoria Técnica de Segurança de Barragem por TÜV SÜD (2018)

Após interromper a perfuração, foi instalado um filtro invertido onde a água emergiu e a escada de drenagem foi reparada. No entanto, não há detalhes sobre qualquer tratamento aplicado à fratura, desde o ponto de entrada da ferramenta até o local onde a água surgiu.

## Perfurações e sondagens a úmido no barramento

Antes do rompimento da barragem B I, foram realizadas diversas atividades de perfuração na barragem. Embora essas atividades possam aumentar as poropressões nos rejeitos, nos estudos de liquefação feitos pelas empresas de consultoria, as perfurações no barramento não foram consideradas como um possível gatilho. No dia do rompimento, havia sondas da Geocontrole e Fugro coletando dados na base da barragem e na berma do 8º alteamento, respectivamente, conforme orientação da TÜV SÜD.

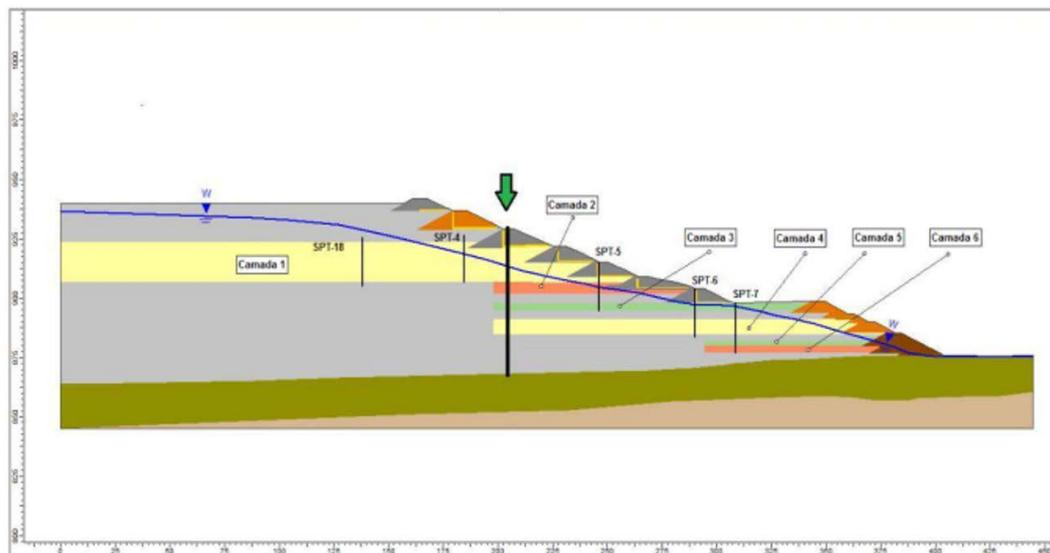
A Alphageos tinha um contrato para serviços de construção de drenos sub-horizontais nas minas do Sistema Sul da Vale e MBR, dividido em instalação de Drenos Horizontais Profundos (DHP) e As is de barragens. Houve discordância sobre o método de perfuração proposto pela Alphageos, que considerava o uso de água mais arriscado. A empresa se desligou do contrato devido a essa discordância.

Houve discussão entre Alphageos e TÜV SÜD sobre os métodos de instalação de equipamentos na barragem, com a TÜV SÜD pressionando por perfuração rápida e a Alphageos sugerindo o método “*hollow auger*”, sem água. A produtividade da *hollow auger* foi considerada baixa pela TÜV SÜD, que sugeriu a utilização de perfuração com máquina rotativa com mínimo de água. A Alphageos esclareceu que o equipamento usado não tinha força suficiente para os furos *hollow auger* e que qualquer perfuração com água seria feita com aprovação da Vale (ME, 2019).

A TÜV SÜD foi notificada pela Vale sobre o atraso da Alphageos, fazendo-a desistir do contrato. A Vale optou pelos DHP como uma alternativa para melhorar a segurança da barragem, e com a retirada da Alphageos, a TÜV SÜD contratou a Fugro In Situ para continuar o trabalho. A Fugro In Situ realizou sondagens com água sob pressão para instalar piezômetros e alegou desconhecer as condições da B I. Já haviam sido instalados vinte piezômetros elétricos multiníveis quando ocorreu o rompimento da barragem (ME, 2019).

O furo concluído em 25 de janeiro de 2019, por volta das 11:15h, atravessou as camadas 1 e 2 que se mostraram mais críticas à liquefação. A seta verde na figura 39 extraída do documento indica a localização do furo de 68 m em relação às camadas 1 e 2.

**Figura 39 - Furo vertical (seta verde) que foi executado no dia do rompimento da BI.**



**Fonte: Ministério da Economia (2019)**

Segundo informações colhidas pela Auditoria Fiscal dos profissionais geotécnicos entrevistados, a execução desta operação, tendo em vista a profundidade do furo, poderia se constituir em um potencial acionamento do gatilho da liquefação, devido à existência de camadas de rejeito da B I que apresentavam estabilidade crítica com baixos fatores de segurança para a condição não drenada.

### *Movimento rápido da fundação*

Ap princípio a maior parte dos recalques já ocorreu, sendo pouco provável a ocorrência de movimento rápido o suficiente da fundação para acionar o gatilho da liquefação.

### *Elevação rápida da superfície freática*

Este gatilho pode ocorrer em função de uma precipitação de grande magnitude, acarretando na saturação dos rejeitos, diminuição do comprimento de praia e subida da superfície freática / poropressões. A Auditoria do Trabalho, baseada nas informações colhidas em documentos técnicos, também descarta a hipótese de que houve uma elevação rápida da superfície freática, que tenha, por si só, atuado como um gatilho (ME, 2019).

## Pluviometria da região da barragem I

Na semana anterior ao rompimento, a região da barragem teve pouca chuva (menos de 10mm), mas é importante considerar que a variação da poropressão não é imediata. Para investigar a influência das chuvas, foram analisados dados pluviométricos de duas estações meteorológicas do INMET: Ibitaré e Belo Horizonte.

A estação de Ibitaré foi prioritária, mas os dados de Belo Horizonte foram usados em meses sem registros em Ibitaré. O relatório indica que a Vale parou de lançar rejeitos na barragem após uma inspeção em maio de 2016, quando ela atingiu sua capacidade máxima. Nos anos seguintes, as chuvas de fim de ano aumentaram progressivamente após a barragem parar de receber rejeitos. De 2015 a 2018, as precipitações aumentaram mais de 62%, mas deveriam ser suportáveis por uma barragem com sistema de drenagem funcionando corretamente (ME, 2019).

## Entendimento Sobre o Acidente

A liquefação é um fenômeno causado pelo aumento da poropressão em solos saturados, principalmente granulares e pouco coesivos, em condições de carregamento não drenadas. Esse aumento reduz a resistência ao cisalhamento, levando à ruptura da estrutura granular e à reorganização dos grãos, o que resulta em uma diminuição do volume e um aumento da pressão nos poros, desencadeando um processo em cadeia no depósito de rejeitos. Esse fenômeno pode ocorrer de forma estática, com carregamento contínuo, ou dinâmica, com carregamento cíclico.

Quando uma barragem não é projetada para resistir à liquefação, pode romper, e o rejeito fluirá como um fluido denso. A Auditoria Fiscal do Trabalho conclui que o rompimento da Barragem B I foi causado pela liquefação, possivelmente desencadeado por instabilização local devido ao fraturamento hidráulico em junho de 2018 e pelas perfurações úmidas no barramento, ambos relacionados a um alto nível freático devido à drenagem inadequada.

Quanto às perfurações (incluindo sondagens) a úmido no barramento, estas não

foram consideradas nos estudos de liquefação, elaborados pelas empresas consultoras contratadas pela Vale. Porém, segundo o documento “*Guidelines for Drilling and, Sampling in Embankment Dam*”, o processo de perfuração a úmido provoca danos por fraturamento hidráulico durante a realização dos furos que podem abrir caminho para infiltração e por consequência criar condições para conduzir a um *piping* e, enfim, à falência da barragem.

Em relação ao elevado nível freático, constatamos que ocorreram volumosas chuvas no último trimestre de 2018 e este fato, associado à inexistência de um sistema de drenagem interna até a elevação do terceiro alteamento (El. 898), pode ter causado um aumento da poropressão no barramento, diminuindo a tensão efetiva vertical do rejeito com a consequente perda da resistência ao cisalhamento e, nesta hipótese, a B I poderia romper por liquefação.

Por outro lado, o fraturamento hidráulico ocorrido durante a execução do 15º DHP, pode ter ocasionado um vazio interno no dique inicial que contribuiria para a formação de um *piping*, situação que pode ter levado a uma instabilização local, possível gatilho da liquefação. Esta interpretação foi corroborada por geotécnicos entrevistados pela equipe da Auditoria Fiscal.

No dia do rompimento da B I foi concluído um furo vertical de 68 m de profundidade a partir da berma do 8º alteamento da B I com uso de uma perfuratriz que utilizava água pressurizada. Este furo atravessou as camadas 1 e 2 que se mostraram mais críticas à liquefação conforme a análise de estabilidade probabilística. Esta situação pode ter levado a uma ruptura das citadas camadas, que por sua vez pode ter atuado como um gatilho, ocasionando a liquefação da barragem.

# Considerações Finais

Em conclusão, este estudo forneceu uma análise abrangente de diferentes tipos de estruturas de barragens de aterro, bem como diversos métodos de elevação de barragens. Ele começou discutindo a classificação de barragens, abrangendo estruturas de concreto, enrocamento e aterro, juntamente com suas subcategorias. Além disso, explorou os métodos de elevação de barragens, incluindo elevação a jusante, de linha de centro e a montante.

Os aspectos técnicos das estruturas de barragens de aterro também foram abordados, incluindo análise geotécnica e hidrológica, impermeabilização, sistemas de drenagem, estabilidade estrutural e monitoramento contínuo. Esses aspectos foram destacados como cruciais para garantir a segurança e estabilidade das estruturas de barragens.

Além disso, um estudo de caso detalhado focado no desastre de Brumadinho foi apresentado, discutindo a estrutura da Barragem I, características do solo, riscos associados, ocorrências passadas, considerações imparciais sobre fatores de segurança para condições drenadas e não drenadas, e possíveis gatilhos que contribuíram para o acidente.

O estudo concluiu enfatizando que o rompimento da Barragem B I foi causado pela liquefação do solo, possivelmente desencadeada por diversos fatores, incluindo instabilização local devido ao fraturamento hidráulico, perfurações úmidas no barramento e aumento do nível freático devido à falta de drenagem adequada. Esses eventos foram identificados como possíveis gatilhos para o colapso da estrutura.

# Referências

ASSOCIAÇÃO Brasileira De Normas Técnicas. **ABNT NBR: 13024: Mineração — Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água — Requisitos**. Rio de Janeiro, 2007.

BRASIL de Fato. **Onda de lama da Vale deve atingir 19 municípios de MG, afirmam especialistas**. São Paulo, Janeiro de 2019. Disponível em: <https://www.brasildefato.com.br/2019/01/25/onda-de-lama-da-vale-deve-atingir-19-municipios-de-mg-afirmam-especialistas>. Acesso em 01 de Maio de 2024

COSTA, Walter Duarte. **Geologia de barragens**. Oficina de Textos, 2016.

DIAS, Laissa Kethllin Leitão *et al.* **Geotecnia: fundações e obras de terra**. Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-SERGIPE, v. 1, n. 2, p. 27-43, 2013.

DUARTE, Anderson 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**. Belo Horizonte – MG. 2008.

ELETROBRÁS. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. 2003. Disponível em: <https://q.eletronbras.com/Projetos.pdf>. Acesso em 30 de Abril de 2024.

SUPERINTENDÊNCIA Regional em Minas Gerais – Setor Técnico-Científico. **Laudo de Perícia Criminal Federal Nº 1070/2019**. Belo Horizonte, Junho de 2019. Disponível em: [https://www.estadao.com.br/blogs/blog/wp-content/uploads/sites/41/2019/11/laudo\\_1070\\_2019\\_setec\\_sr\\_pf\\_mg\\_assinado-2.pdf](https://www.estadao.com.br/blogs/blog/wp-content/uploads/sites/41/2019/11/laudo_1070_2019_setec_sr_pf_mg_assinado-2.pdf). Acesso em 29 de Abril de 2019

SUPERINTENDÊNCIA Regional do Trabalho em Minas Gerais. **Relatório de Análise de Acidente de Trabalho Rompimento da barragem B I da Vale S.A. em Brumadinho/MG em 25/01/2019**. Belo Horizonte, Setembro de 2019. Disponível em: [https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/inspecao-do-trabalho/seguranca-e-saude-no-trabalho/acidentes-de-trabalho-informacoes-1/relatorio\\_analise\\_acidentes\\_brumadinho.pdf](https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/inspecao-do-trabalho/seguranca-e-saude-no-trabalho/acidentes-de-trabalho-informacoes-1/relatorio_analise_acidentes_brumadinho.pdf). Acesso em 29 de Abril de 2024

THOMÉ, Romeu; PASSINI, Matheus Leonardo. **Barragens de rejeitos de mineração: características do método de alteamento para montante que fundamentaram a suspensão de sua utilização em Minas Gerais**. Ciências Sociais Aplicadas em Revista, v. 18, n. 34, p. 49-65, 2018.

# Sobre os Autores

## Andrews Malone Pontes da Costa

Possui graduação em Engenharia Civil pela Faculdade Católica de São Paulo. Possui especialização em Engenharia de segurança do trabalho, em Restauração e pavimentação rodoviária pela Universidade vale do Iguaçu, e também em arquitetura, construção e gestão de edificações sustentáveis. Também é especialista em engenharia de pericias e avaliações de engenharia. Atualmente é professor substituto da Universidade Federal do Oeste do Pará, nas disciplinas de mecânica dos sólidos, estruturas de concreto 2, estruturas de aço e mecânica dos solos 2 e mestrando em engenharia industrial.

## Akila Ketelen Camara da Silva

Atualmente acadêmica de Engenharia Civil na Universidade Federal do Oeste do Pará - UFOPA. Coautora do artigo intitulado: "Eventos extremos de precipitação em cidades amazônicas: uma análise dos impactos em Itaituba, sudoeste do Pará." Publicado no XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Experiência como Diretora de Marketing na Empresa Júnior da UFOPA, Eng Lab.

## Arthemio da Silva Pereira

Atualmente é discente de Engenharia Civil e monitor de laboratório na Universidade Federal do Oeste do Pará - UFOPA

## Matheus Maffioletti Dias

Atualmente é discente de Engenharia Civil na Universidade Federal do Pará - UFOPA

# Índice Remissivo

## A

ações preventivas 28  
águas pluviais 21  
alçamento 8, 15, 16, 31, 32, 34, 50, 51, 65, 68, 69, 71  
análise geotécnica 8, 17, 70  
análises hidrológicas 21  
armazenamento 15, 20, 21, 32

## B

barragem 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 28, 29, 30, 32, 33, 35, 36, 39, 45, 47, 49, 50, 51, 52, 54, 55, 56, 57, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 71  
barragens 2, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 26, 27, 28, 29, 34, 50, 55, 62, 65, 70, 71  
barramento 35, 39, 42, 45, 46, 48, 49, 54, 65, 68, 70

## C

condições ambientais 24  
condições geotécnicas 11, 23  
construção 9, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 31, 33, 34, 65  
contenção 9, 11, 12, 13, 21, 30, 71  
controle 19, 20, 21, 33, 34  
controle de fluxo 19, 21

## D

danos ambientais 24  
desastre 8, 9, 10, 14, 16, 30, 70  
desastres naturais 17, 22  
descarte 26, 27  
distribuição 16, 18, 19, 22  
drenagem 8, 14, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 25, 26, 33, 34, 39, 40, 42, 44, 45, 47, 48, 59, 64, 65, 67, 68, 70

## E

efluentes 21  
engenharia 14, 16, 20, 22, 61  
estabilidade estrutural 8, 17, 22, 33, 70  
estrutura 8, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 29, 31, 33, 36, 38, 39, 56, 64, 68, 70  
estruturas 8, 9, 11, 13, 21, 25, 26, 28, 56, 70

## F

falhas estruturais 22, 28  
fator 22, 23, 24, 60, 61  
fatores 8, 10, 14, 21, 23, 24, 60, 61, 67, 70  
fraturamento hidráulico 68, 70  
fundação 8, 16, 18, 24, 33, 35, 55, 57, 67

## G

gatilhos 8, 23, 61, 70  
gestão ambiental 26, 27

## I

impactos ambientais 21, 26, 30  
inadequações 52  
instrumentos 25, 54, 55, 56, 57

## L

liquefação 23, 33, 36, 50, 57, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70

## M

manutenção 17, 18, 20, 25, 29, 34, 55  
medidas 8, 9, 17, 21, 25, 26, 28, 29, 34, 55, 58

medidas corretivas 25  
meio ambiente 9, 26, 29  
minas 63, 65  
mineração 9, 11, 13, 15, 23, 26, 56, 71  
monitoramento 8, 9, 16, 17, 23, 24, 25, 26, 29, 34,  
54, 55, 70

## N

nível freático 50, 68, 70

## P

parâmetros geotécnicos 58  
pluviometria 8  
poropressão 59, 67, 68  
poropressões 65, 67  
problemas 16, 25, 38, 39, 52, 62, 64  
procedimentos 55  
projeto 9, 16, 21, 23, 31, 32, 34, 52, 71  
propriedades geotécnicas 14, 22

## R

rejeitos 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 21, 23, 26, 27, 28, 30,  
32, 33, 34, 39, 50, 51, 52, 65, 67, 68, 71  
resíduos 9, 13, 21, 26, 27  
riscos 8, 9, 16, 22, 25, 27, 28, 29, 55, 70  
rompimento 9, 30, 37, 56, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70

## S

segregação sedimentar 51  
segurança 8, 9, 10, 11, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24,  
25, 26, 27, 28, 29, 33, 34, 36, 55, 57, 60, 61, 62, 66, 67,  
70  
solo 8, 14, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 32, 33, 34,  
35, 51, 57, 70  
superfície freática 8, 67

---

# T

tratamento 21, 26, 30, 65





**AYA EDITORA**  
**2024**