



UFOP



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

Universidade Federal de Ouro Preto

Escola de Minas – Departamento de Engenharia Urbana

Curso de Graduação em Engenharia Urbana



ESCOLA DE MINAS

Vitória Queiroz Borges

CLASSIFICAÇÃO DE PILHAS DE ESTÉRIL SEGUNDO O WASTE STABILITY RATING AND HAZARD CLASSIFICATION (WSRHC)

Ouro Preto

2025

Classificação de Pilhas de Estéril Segundo o Waste Stability Rating and Hazard Classification

Vitória Queiroz Borges

Projeto Final de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Urbana na Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 03/04/2025

Áreas de concentração: Geotecnia e Recursos Hídricos

Orientadora: Prof.^a Dra. Iraydes Tálita de Sena Nola – UFOP

Coorientador: Prof. Dr. Lucas Deleon Ferreira – UFOP

Ouro Preto

2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

B732c Borges, Vitoria Queiroz.

Classificação de pilhas de estéril segundo o Waste Stability Rating and Hazard Classification (WSRHC). [manuscrito] / Vitoria Queiroz Borges. - 2025.

98 f.: il.: color., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Iraydes Talita Nola.

Coorientador: Prof. Dr. Lucas Deleon Ferreira.

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

1. Mineração. 2. Pilha de estéril. 3. Mecânica do solo. 4. Engenharia geotécnica. I. Nola, Iraydes Talita. II. Ferreira, Lucas Deleon. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 62:711.4

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza - SIAPE: 1.763.787



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA URBANA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Vitória Queiroz Borges

Classificação de pilhas de estéril segundo o Waste Stability Rating and Hazard Classification (WSRHC)

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

Aprovada em 03 de abril de 2025

Membros da banca

Doutor- Lucas Deleon Ferreira - Orientador(a) (Universidade Federal de Ouro Preto)
Doutora- Bárbara Cristina Mendanha Reis - Membro da banca (Universidade Federal de Ouro Preto)
Doutor- Eleonardo Lucas Pereira - Membro da banca (Universidade Federal de Ouro Preto)

Lucas Deleon Ferreira, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 16/04/2024



Documento assinado eletronicamente por **Lucas Deleon Ferreira, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 21/04/2025, às 13:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0889520** e o código CRC **7BE03CEC**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.004469/2025-71

SEI nº 0889520

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: (31)3559-1471 - www.ufop.br

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Deus, pois sem Ele nada sou; ao meu pai, Weder, que nunca mediu esforços para que eu chegasse até aqui; à minha mãe, Fernanda, que sempre foi meu porto seguro; aos meus irmãos, Jonnathan e Maria Tereza, pelo companheirismo; à minha avó, Cristina, pela minha criação; ao meu avô, Sérgio, por todo amor e apoio nessa caminhada; e as duas estrelas que, apesar de não estarem aqui comigo nesse momento, eu tenho certeza de que estão orgulhosas onde quer que estejam: meu avô Mauri e minha priminha Lara.

Aos meus professores, por todos os ensinamentos adquiridos ao longo desses cinco anos, em especial Paulo Vieira por todas as oportunidades em trabalhos de extensão e iniciações científicas, a Tálita e ao Lucas pela orientação para desenvolvimento deste trabalho. Às amigas da UFOP, Ana, Gabi e Paloma, que nunca me deixaram desistir, sempre me apoiaram. E aos amigos que fiz ao longo dessa caminhada — Djalma, Igor, Bruno, Maria Laura, Larissa, Bruna, Luana, Mirelly, e Dantas —, obrigada por sempre estarem do meu lado.

Por fim, dedico a todos que acreditaram em mim, principalmente aqueles que me inspiram a nunca desistir dos meus sonhos. Afinal, “o futuro pertence àqueles que acreditam na beleza de seus sonhos”.

RESUMO

Este trabalho investigou a estabilidade geotécnica de pilhas de estéril utilizando o sistema Waste Stability Rating and Hazard Classification (WSRHC). Foram analisadas as condições das pilhas de estéril de duas localidades (Capão da Serra e Correia) mediante a avaliação de parâmetros geotécnicos, hidrológicos e construtivos, com ênfase em fatores regionais, como a precipitação, e em aspectos de sismicidade. A metodologia permitiu comparar o comportamento das estruturas sob diferentes contextos climáticos, evidenciando que, em regiões com alta média pluviométrica (ex.: Belém do Pará), a classificação final de estabilidade tende a indicar um risco moderado, enquanto localidades com menores índices de precipitação (ex.: Xique-Xique) apresentam uma classificação de risco inferior. Os resultados demonstram a eficácia do WSRHC na identificação de áreas críticas e no suporte à implementação de medidas preventivas, enfatizando a necessidade de reavaliação periódica das condições vigentes para garantir a segurança das estruturas e a proteção ambiental.

Palavras-chave: Pilhas de estéril; Estabilidade geotécnica; WSRHC; Precipitação; Segurança ambiental; Mineração.

ABSTRACT

This study investigated the geotechnical stability of sterile stockpiles using the Waste Stability Rating and Hazard Classification (WSRHC) system. Two sterile stockpiles, Capão da Serra and Correia, were analyzed based on geotechnical, hydrological, and construction parameters, with particular emphasis on regional factors such as precipitation and seismicity. The methodology allowed for a comparative assessment of the structural behavior under different climatic conditions, revealing that in regions with high annual precipitation (e.g., Belém do Pará), the final stability classification indicates a moderate risk, whereas locations with lower precipitation levels (e.g., Xique-Xique) exhibit a lower risk classification. The results underscore the effectiveness of the WSRHC system in identifying critical areas and guiding the implementation of preventive measures. Moreover, the study highlights the need for periodic re-evaluation of prevailing conditions to ensure ongoing structural safety and environmental protection.

Keywords: Sterile stockpiles; Geotechnical stability; WSRHC; Precipitation; Environmental safety; Mining

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama do beneficiamento do minério. (Fonte: Presotti, 2002).....	6
Figura 2 - Barragem de Rejeito (Fonte: IBRAM, 2024).	7
Figura 3 - Pilha de Estéril. (Fonte: Seminário sobre estabilidade geotécnica de Pilha de Estéril - Udesc, 2021)	8
Figura 4 - Tipos de barragens e elementos construtivos (Fonte: Prof. David de Carvalho - UNICAMP– SP)	10
Figura 5 - Preenchimento de vale, Mina Pierina, Peru.....	11
Figura 6 - Tipos de estocagem em pilha (a - preenchimento de vale, b - preenchimento de vale cruzado, c - preenchimento lateral, d - preenchimento da crista do cume, e - preenchimento amontoado). (Fonte: Hawley e Cuning, 2017).	12
Figura 7 - Construção de pilha de estéril do modo ascendente por camadas	16
Figura 8 - Construção de pilha de estéril do modo descendente (Fonte: Freitas, 2004).	16
Figura 9 - Sequência construtiva de pilha de estéril (Fonte: Azevedo, 2014).	17
Figura 10 - Segunda etapa da sequência construtiva de pilha de estéril.	17
Figura 11 - Sequência construtiva de pilha de estéril, fechamento de pilha de estéril. (Fonte: Azevedo, 2014).	18
Figura 12 - Drenagem tipo espinha de peixe. (Fonte: Fróes, 2014).....	20
Figura 13 - Sistema de drenagem (Fonte: Motta, adaptado de Azevedo, 2014)	20
Figura 14 - Sistema de drenagem (Fonte: Motta, adaptado de Azevedo, 2014)	20
Figura 15 - Sistema de drenagem (Fonte: Motta, adaptado de Azevedo, 2014)	21
Figura 16 - Deslocamento de Pilha em mina de Turmalina. (Fonte: ANM, 2025)	23
Figura 17 - Caminhões limpam a sujeira da BR-040. A lama da Vallourec também atingiu unidades de conservação e um centro do Ibama. (Fonte: Projeto Manuelzão, 2025)	24

Figura 18 - Parâmetros de Geometria. (Fonte: Hawley e Cunning, 2017)	32
Figura 19 - Métodos de Construção.....	42
Figura 20 - Gráfico de estabilidade e risco de depósito de resíduos e pilhas ilustrando os resultados das pesquisas de 1991 e 2013.	44
Figura 21 - Metodologia do Projeto (Fonte: Elaborado pela autora)	47
Figura 22 - - Vista de um dos diques de contenção de finos em cima da pilha (Fonte: Aragão, 2008)	52
Figura 23 - Imagens de satélite da pilha Capão da Serra em construção (Fonte:Aragão, 2008).	53
Figura 24 - - Vista do pé da Pilha (Fonte: Aragão, 2008).....	53
Figura 25 - Pilha Capão da Serra (Fonte: <i>Google Maps</i> , 2025).....	54
Figura 26 - Mapa da localização da Mina de Gongo Soco (Fonte: Pereira, 2009).	56
Figura 27 - Pilha de Estéril do Correia (Fonte: <i>Google Maps</i> , 2025).	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de estabilidade e gráfico de classe de risco de depósitos de resíduos e pilhas	45
Tabela 2 - Resumo da classificação de estabilidade de depósito de resíduos e pilhas, classes de risco e risco relativo de instabilidade.....	46
Tabela 3 - Quadro de Variáveis analisadas na Pilha Capão da Serra, Mina de Tamanduá (Fonte: Aragão, 2008)	55
Tabela 4 - Fatores e classificações de configuração regional	58
Tabela 5 - Fatores e classificações das condições da fundação.	59
Tabela 6 - Fatores e classificações de qualidade do material	64
Tabela 7 - Fatores e Classificações de geometria e massa	67
Tabela 8 - Fatores e Classificações de análise de estabilidade	69
Tabela 9 - Fatores de construção e classificações	70
Tabela 10 - Classificações de desempenho	72
Tabela 11 - Resultados PDE Correia.....	73
Tabela 12 - Resultados PDE Capão da Serra	73
Tabela 13 - Gráfico de classificação de estabilidade de depósitos de resíduos e pilhas de estoque	74
Tabela 14 - Classificação de Estabilidade de Depósitos de Resíduos e Pilhas de Estoque	75
Tabela 15 - Fatores e classificações de configuração regional (adaptada)	76
Tabela 16 - Resultados PDE Correia em Belém do Pará	77
Tabela 17 - Resultados PDE Correia em Xique Xique.....	77
Tabela 18 - Resultados PDE Capão da Serra em Belém do Pará.....	78
Tabela 19 - Resultados PDE Capão da Serra em Xique Xique	78

LISTA DE SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANA - Agência Nacional das Águas

ANM - Agência Nacional de Mineração

DAR - Drenagem Ácida de Rochas

DPI - *Design and Performance Index*

EGI - *Engineering Geology Index*

FoS - Fator de Segurança

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração

IDF - Intensidade-Duração-Frequência

LE - Equilíbrio Limite

PAE - Plano de Ação de Emergência

PNSB - Política Nacional de Segurança de Barragens

PoF - Probabilidade de Falha

SRF - Fator de Redução de Resistência

WSR - *Waste Stability Rating*

WSRHC - *Waste Stability Rating and Hazard Classification*

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivo	5
1.1.1	Objetivos Específicos	5
2	Revisão Bibliográfica.....	6
2.1	Aspectos da mineração	6
2.1.1	Minério, Rejeito e Estéril	6
2.1.2	Barragens.....	9
2.2	A Disposição de Rejeito e Estéril em Pilhas	11
2.2.1	Planejamento da estrutura	13
2.2.2	Métodos Construtivos de pilhas	15
2.2.3	Caracterização Geotécnica de pilhas.....	18
2.2.4	Sistema de drenagem de pilhas	19
2.2.5	Instrumentação de pilhas	21
2.3	Problemáticas com Pilhas.....	22
2.4	A segurança das estruturas de mineração	24
2.5	Níveis de segurança para pilhas de estéril	27
2.5.1	Contexto Regional	30
2.5.2	Condições da Fundação	31
2.5.3	Qualidade Do Material.....	35
2.5.4	Geometria e Massa	36
2.5.5	Volume e Massa.....	37
2.5.6	Análise de Estabilidade	38
2.5.7	Construção	40

2.5.8	Desempenho	42
2.5.9	Classe de Risco de Depósito e Estoques	43
3	Metodologia	47
4	Resultados	51
4.1	Área de estudo.....	51
4.1.1	Pilha Capão da Serra	51
4.1.2	Pilha de Estéril do Correia.....	56
4.2	Fatores e Classificações de Configuração Regional.....	57
4.3	Fatores e Classificações das Condições de Fundação	59
4.4	Fatores e Classificações da Qualidade do Material	63
4.5	Fatores e Classificações de Geometria e Massa.....	67
4.6	Fatores e Classificações de Análise de Estabilidade	68
4.7	Fatores de Construção e Classificação	70
4.8	Classificação de Desempenho.....	71
4.9	Classificação Final	72
4.10	Avaliação dos Fator Precipitação Para Diferentes Regiões.....	75
4.10.1	Pilha de Estéril Correia	76
4.10.2	Pilha de Estéril Capão da Serra.....	77
5	Conclusão	80
	Referências.....	82

1 INTRODUÇÃO

A atividade mineradora remonta aos primórdios da civilização, tanto em centros urbanos quanto rurais. No Brasil Colônia (1500 - 1822), já eram explorados recursos como pau-brasil e açúcar. Com a descoberta do ouro em Minas Gerais entre 1693 e 1695, iniciou-se uma corrida para a exploração desse recurso, bem como de diamantes e esmeraldas (Figueirôa, 1994). O minério de ferro teve seus primeiros estudos geológicos e explorações conduzidos por Harder e Chamberlain em 1913 (Cabral *et al.*, 2012). Estes estudos representam um marco significativo na transição da exploração de ouro para a de minério de ferro no país.

A mineração desempenha um papel crucial no país, sendo responsável por 4% do PIB nacional (IBRAM, 2023). Ela contribui significativamente para a construção da economia nacional, devido à abundância de recursos minerais, como minério de ferro, manganês, bauxita, cobre, alumínio, estanho, ouro, entre outros. Essa riqueza mineral posiciona o país como um dos maiores produtores e exportadores de minérios do mundo, abrigando algumas das maiores mineradoras globais (Andrade; Cunha; Vieira, 1995). Segundo dados do último anuário do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), no ano de 2023, o Brasil exportou, somente de minério de ferro um volume de 179,5 milhões de toneladas de ferro exportadas (US\$ 169,6 bilhões) no primeiro semestre deste ano (IBRAM, 2024).

A crescente demanda por materiais oriundos da mineração resulta em um aumento global na produção de bens minerais. Esse fenômeno, aliado ao avanço tecnológico, permitiu o aproveitamento de minérios de baixo teor e/ou de difícil processamento. Em contrapartida, essa situação leva a um aumento na quantidade de rejeitos gerados durante os processos de extração e beneficiamento (Soares, 2010).

O aumento na produção de rejeitos e estéril levou não apenas à expansão das estruturas de armazenamento, mas também à busca por métodos alternativos. As barragens e pilhas de estéril são as soluções mais comuns adotadas pela indústria no Brasil para atender a essa necessidade. O desafio consiste em gerenciar o crescente volume de estéril de maneira ambientalmente responsável e economicamente viável,

promovendo uma gestão eficaz e desenvolvendo estratégias para o armazenamento eficiente desses materiais (Soares, 2010).

As pilhas de estéril são formadas pelo acúmulo de materiais, esses que são cuidadosamente empilhados e compactados em áreas específicas, seguindo critérios de engenharia para garantir a estabilidade das estruturas. Além disso, para detectar qualquer sinal de instabilidade ou movimentação anômala, são implementadas técnicas de monitoramento contínuo, como o uso de sensores e drones.

Outra medida importante é a revegetação das pilhas de estéril, que ajuda a minimizar a erosão e a diminuir dispersão de partículas pelo vento e pela chuva. A cobertura vegetal contribui para a recuperação ambiental das áreas impactadas, melhorando a qualidade do solo.

No que diz respeito aos rejeitos, as mineradoras têm investido em tecnologias de desaguamento, como filtros prensa e centrífugas, para reduzir o volume de água presente nos rejeitos antes de sua disposição. Isso resulta em rejeitos mais secos e estáveis, que podem ser armazenados em pilhas ou em cavas exauridas, reduzindo significativamente o risco de rompimento de barragens.

As pilhas de estéril, embora vantajosas economicamente por demandarem menores custos de construção e permitirem maior flexibilidade de disposição em relação a barragens de rejeitos (Williams, 2017), apresentam desafios ambientais e geotécnicos significativos. Conforme destacado por Lima e Marques (2013), a formação dessas estruturas está associada a impactos como desmatamento, alteração paisagística e potencial contaminação de solos e águas subterrâneas devido à lixiviação de resíduos minerais. Adicionalmente, Williams (2017) alerta para riscos de instabilidade, como deslizamentos, especialmente em casos de saturação do material ou compactação inadequada, exigindo critérios técnicos rigorosos em seu projeto.

No passado, a ausência de monitoramento e a falta de atenção aos estudos das condições das pilhas de estéril resultaram em consequências graves. Um exemplo é o acidente em Aberfan, País de Gales, onde uma pilha de carvão construída sobre uma nascente deslizou após chuvas intensas. A liquefação da pilha resultou em um deslizamento de lama que atingiu uma escola e casas, causando a morte de 116

crianças e 28 adultos. A pilha tinha 31 metros de altura e quase 300 mil metros cúbicos de material (Hawley e Cuning, 2017). Outro exemplo é o deslizamento ocorrido em 2011 na mina Zortman, em Alder Gulch, Montana, EUA. Após uma chuva intensa, considerada um evento de retorno de 500 anos, aproximadamente um quarto da pilha de estéril deslizou por um pequeno vale, resultando em um prejuízo de US\$1 milhão, embora não tenha havido vítimas. As causas identificadas incluíram a saturação da base da pilha, que aumentou as poropressões e reduziu a resistência do material, além de um desgaste devido à decomposição química dos minerais de sulfeto ao longo de várias décadas (SAFF Engenharia, 2021). Assim, as pilhas de estéril e rejeito não estão isentas de problemas de estabilidade.

Outro ponto a ser considerado em relação às pilhas de estéril é a potencial contaminação do lençol freático, que pode ocorrer devido à infiltração de substâncias tóxicas. Quando a água da chuva percola através dessas pilhas, ela pode transportar metais pesados e outros contaminantes para o solo e, eventualmente, para o lençol freático. Um exemplo notável de contaminação ocorreu durante a mineração de cromo (minérios que possuem cromo (FeCr_2O_4) em Sukinda, Índia, foi observada a contaminação do lençol freático por cromo hexavalente – Cr (VI), altamente tóxico proveniente das pilhas de estéril, especialmente durante a estação chuvosa, quando a concentração de Cr (VI) variou entre 0,009 e 0,452 mg/L, ultrapassando os limites permitidos (Dhakate *et al.*, 2021).

Esse cenário traz desafios no que diz respeito à estabilidade e segurança das estruturas geotécnicas, bem como uma preocupação quanto à contaminação dos lençóis freáticos, exigindo um monitoramento eficiente que leve em conta tanto a estabilidade quanto à durabilidade das estruturas e, principalmente a prevenção de possíveis desastres tecnológicos ou ambientais.

Deste modo, a análise geotécnica de estabilidade uma pilha de estéril é crucial para o monitoramento e prevenção de desastres físicos e ambientais em operações de mineração. No contexto de desastres físicos, com o monitoramento de parâmetros e fatores corretos, essa ferramenta permite a identificação e classificação do risco geotécnico a ocorrência de rupturas das pilhas de estéril.

A análise geotécnica de estabilidade auxilia na definição de níveis de segurança e no planejamento do sistema de monitoramento contínuo dessas estruturas de

grande porte, a associação destas ferramentas permite a detecção precoce de sinais de instabilidade. Além disso, elas auxiliam na elaboração de planos de emergência específicos, permitindo uma resposta rápida e eficaz em caso de desastres.

1.1 Objetivo

Avaliar a estabilidade geotécnica de pilhas de estéril em estruturas de mineração, utilizando o Índice de Estabilidade de Pilhas de Estéril (WRS) proposto por Hawley (2017), e realizar a análise da pilha em locais diferentes do Brasil com diferentes valores de precipitação média anual, avaliando assim a influência desse dado. É importante colocar que este trabalho possui abordagem acadêmica, e não é subsídio para projeto e análise técnica.

1.1.1 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos tem-se os seguintes pontos:

- Selecionar uma estrutura viável para aplicação da metodologia, garantindo a disponibilidade de dados necessários para o estudo.
- Coletar dados de dissertações e analisar dados de caracterização da geometria da pilha de estéril, do material do depósito e da fundação, além de dados pluviométricos e sísmicos da região.
- Identificar e avaliar os fatores que causam instabilidade nas pilhas de estéril, utilizando o Índice de Estabilidade de Pilhas de Estéril (WRS).
- Realizar a análise dos fatores de variação regional, qualidade do material, geometria, massa da pilha, estabilidade, e aspectos construtivos e de desempenho estrutural.
- Classificar a pilha de estéril utilizando o índice WSR, complementado pelo cálculo do DPI e do EGI, para uma avaliação quantitativa dos riscos e do comportamento estrutural da pilha.
- Definir os níveis de segurança baseados no Índice de Estabilidade de Pilhas de Estéril (WRS - *Waste Stability Rating*) de Hawley (2017).
- Análise das Pilhas estudadas em diferentes regiões do Brasil, com diferentes valores médios de precipitação, afim de verificar a influencia desse dado na classificação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspectos da mineração

2.1.1 Minério, Rejeito e Estéril

Um mineral é um corpo natural, inorgânico e homogêneo, com composição química e propriedades físicas bem definidas, encontrado na crosta terrestre ou em outros corpos celestes. Uma rocha é um agregado de minerais e, quando contém um ou mais minerais de valor econômico, é chamada de minério. Os minerais de valor econômico são conhecidos como minerais, minério, enquanto aqueles sem valor econômico são chamados de ganga (Luz *et al.*, 2010).

O tratamento ou beneficiamento de minérios consiste em uma série de operações aplicadas aos recursos minerais com o objetivo de alterar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presentes ou a forma dos minerais, sem modificar sua identidade química ou física (Luz *et al.*, 2010). A Figura 1 apresenta um exemplo prático de beneficiamento, ilustrado por um fluxograma.



Figura 1 - Diagrama do beneficiamento do minério. (Fonte: Presotti, 2002)

De acordo com o artigo 1º da Resolução ANM nº 85 de 2 de dezembro de 2021 (ANM, 2021), entende-se por estéril, material in natura descartado diretamente na operação de lavra, antes do beneficiamento. Rejeito, material descartado durante e/ou após processo de beneficiamento do minério. O estéril é geralmente classificado como um resíduo não perigoso e inerte (classe II-B). No entanto, dependendo da sua composição mineralógica, ele pode ser considerado não inerte ou até mesmo perigoso. Na mineração, o estéril pode ser classificado como estéril ou espólio e rejeito, também conhecido como “*finings waste rock*”. A principal diferença entre eles está no tamanho das partículas. Segundo Younger *et al.* (2002), o estéril possui grãos com tamanho entre 1 mm e 50 mm, enquanto os rejeitos apresentam grãos finos, menores que 1 mm. Além disso, os estéreis são geralmente armazenados em pilhas secas, enquanto os rejeitos são geralmente depositados em bacias de decantação, Figura 2 (Younger *et al.*, 2002).



Figura 2 - Barragem de Rejeito (Fonte: IBRAM, 2024).

O volume de estéril gerado depende das características geológicas da área de lavra e é determinado pela relação entre a quantidade de estéril a ser removido para cada unidade de minério bruto extraído. Essa relação é utilizada não apenas para calcular o volume de estéril nas frentes de lavra, mas também para planejar a área e os parâmetros de disposição desse resíduo (Forgearini, 2015). Este material deve, necessariamente, ser disposto de forma adequada no meio ambiente, em áreas licenciadas pelos órgãos ambientais, uma maneira de disposição são as chamadas Pilhas de Disposição de Estéril (PDE), Figura 3.

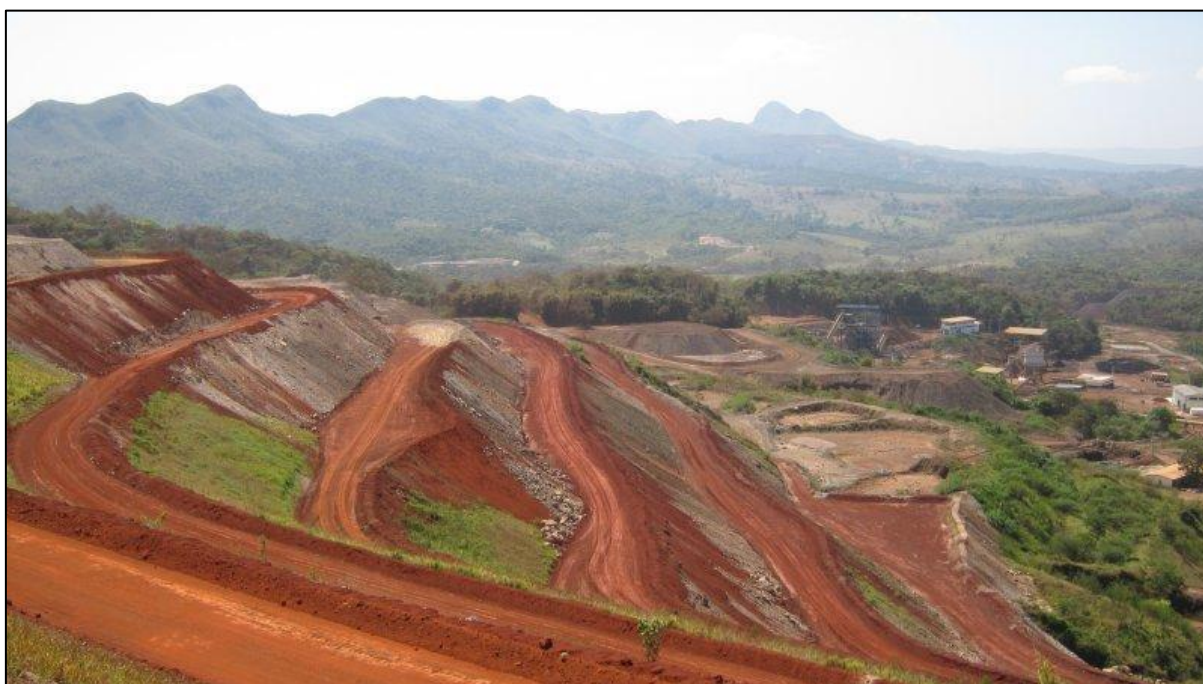


Figura 3 - Pilha de Estéril. (Fonte: Seminário sobre estabilidade geotécnica de Pilha de Estéril - Udesc, 2021)

Os materiais gerados durante a mineração, como estéril e rejeitos, precisam ser dispostos de forma adequada para minimizar impactos ambientais. Existem diferentes métodos de disposição, como barragens de rejeitos e pilhas de estéril, cada um com suas particularidades e requisitos de planejamento, para garantir a segurança e a sustentabilidade dessas estruturas.

2.1.2 Barragens

Barragens são estruturas importantes na mineração para armazenar resíduos gerados durante o beneficiamento de minérios. Esses rejeitos, muitas vezes contendo substâncias químicas residuais, são armazenados em barragens que devem atender a rigorosos critérios de segurança e proteção ambiental. A crescente demanda mundial por bens minerais e o desenvolvimento econômico e tecnológico têm levado ao aumento significativo da quantidade de rejeitos produzidos, superando em muito a quantidade de minérios extraídos (Soares, 2010).

O projeto de uma barragem de rejeitos envolve diversas áreas do conhecimento, incluindo geologia, geotecnia e engenharia ambiental. A segurança é uma preocupação central, especialmente devido aos riscos de acidentes que podem causar danos materiais e perda de vidas. A construção dessas barragens deve considerar a facilidade de operação, inserção segura no meio ambiente e viabilidade econômica. A tecnologia aplicada ao projeto e construção de barragens de rejeitos deve acompanhar a evolução tecnológica dos projetos de mineração para garantir a segurança e eficiência (Soares, 2010).

Existem dois métodos principais para a construção de barragens de rejeitos: método de jusante e método de linha de centro, Figura 4. O método de montante é o mais antigo e era o mais utilizado, caracterizado pelo deslocamento do eixo da barragem para montante durante os alteamentos, mas depois dos rompimentos de Barragens esse método foi proibido. O método de jusante envolve a construção de um dique inicial impermeável e a utilização de rejeitos grossos para os alteamentos subsequentes. O método de linha de centro é uma variação do método de jusante, onde o eixo da barragem permanece no centro durante os alteamentos. Cada método tem suas vantagens e desvantagens em termos de custo, segurança e complexidade de construção (Soares, 2010).

A segurança das barragens de rejeitos é monitorada continuamente através de instrumentação específica, como piezômetros e medidores de recalque, que ajudam a detectar anomalias e garantir a estabilidade da estrutura. A manutenção regular e o monitoramento são cruciais para prevenir acidentes e garantir a integridade da barragem ao longo do tempo. A instrumentação permite avaliar a segurança estrutural e ambiental da barragem, monitorando variações nos níveis piezométricos,

composição química das águas e deslocamentos verticais e horizontais (Soares, 2010).

A desativação de barragens de rejeitos deve ser planejada desde a fase de viabilidade do projeto. Métodos de estabilização incluem a cobertura com solos ou materiais sintéticos, uso de produtos químicos para formar crostas estáveis e revegetação da área. A desativação visa minimizar impactos ambientais e garantir a segurança a longo prazo. A estabilização química, embora não permanente, pode ser utilizada em locais inadequados para o crescimento de vegetação devido a condições climáticas severas ou presença de elementos tóxicos (Soares, 2010).

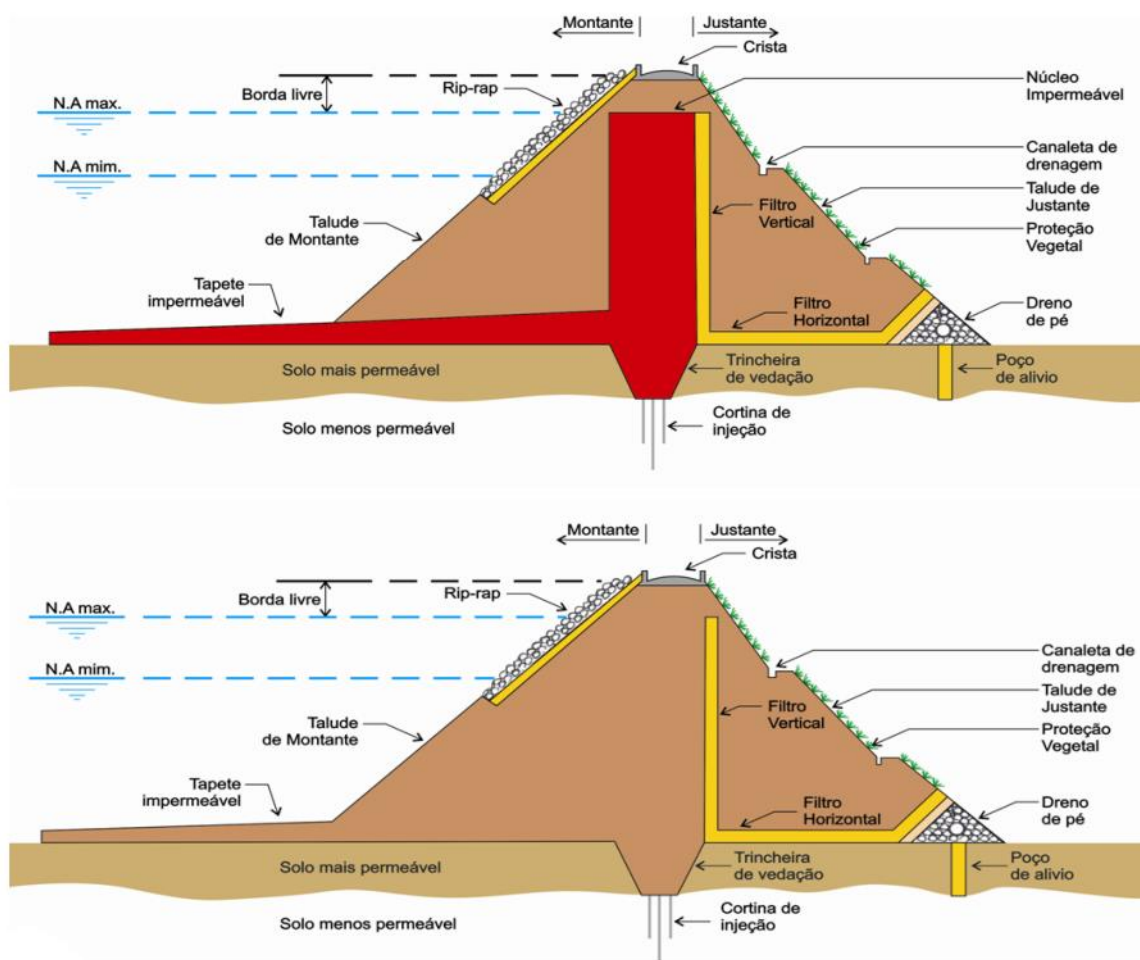


Figura 4 - Tipos de barragens e elementos construtivos (Fonte: Prof. David de Carvalho - UNICAMP– SP)

2.2 A Disposição de Rejeito e Estéril em Pilhas

A disposição de estéril em pilhas (Figura 5) visa otimizar o uso do espaço disponível, reduzir os impactos ambientais e facilitar as práticas de recuperação ambiental. Durante esse processo, os estéreis são empilhados de forma controlada e organizada, garantindo a estabilidade da pilha, que pode ser realizada de diversas maneiras. Técnicas de compactação e revestimento apropriadas podem ajudar a diminuir a permeabilidade e prevenir impactos ambientais (Hawley e Cuning, 2017).



Figura 5 - Preenchimento de vale, Mina Pierina, Peru.
(Fonte: Hawley e Cuning, 2017)

*Publicado com a permissão da Companhia Minera Barrick Misquichilca S.A.

Os depósitos de estéreis e pilhas de estoque são classificados com base em seu propósito, que pode ser contenção permanente ou armazenamento temporário e nos materiais utilizados em sua construção, como enrocamentos, aterros e aterros mistos. Enrocamentos são formados por rochas extraídas e taludes naturais com partículas de rocha coerentes e angulares com pouco material fino. Aterros incluem materiais de cobertura, solos residuais, materiais saprolíticos (camada de solo proveniente da decomposição da rocha matriz, herdando suas feições, com presença de minerais não estáveis) e rochas fracas que se desagregam facilmente. Aterros mistos são aqueles que combinam materiais de enrocamento e aterro (Hawley e Cuning, 2017).

Esses depósitos também podem ser caracterizados pela sua configuração e restrições topográficas Figura 6. Preenchimentos de vale podem preencher parcial ou completamente um vale, sendo nivelados para evitar o acúmulo de água, ou a água superficial é desviada ao redor do preenchimento em canais ou sob o preenchimento através de um dreno de rocha de fluxo contínuo. Preenchimentos transversais de vale

atravessam o vale sem preenchê-lo completamente, necessitando de estruturas de drenagem para evitar o acúmulo de água, também podem ser usados para passagem de estradas de transporte, vias de acesso para veículos leves, ou aterros para correias transportadoras ou ferrovias. Os preenchimentos laterais são tipicamente construídos em terrenos inclinados, sem obstruir drenagens principais. As inclinações desses preenchimentos geralmente seguem a topografia natural, com a base situada em áreas mais planas no fundo do vale ou apoiada na encosta oposta. Uma variação desse tipo são os preenchimentos de crista de cume, que atravessam uma crista e possuem inclinações em ambos os lados. Já os preenchimentos acumulados são estabelecidos em terrenos relativamente planos ou levemente inclinados, com inclinações em todas as direções. Esses preenchimentos são construídos em camadas, de baixo para cima (Hawley e Cuning, 2017).

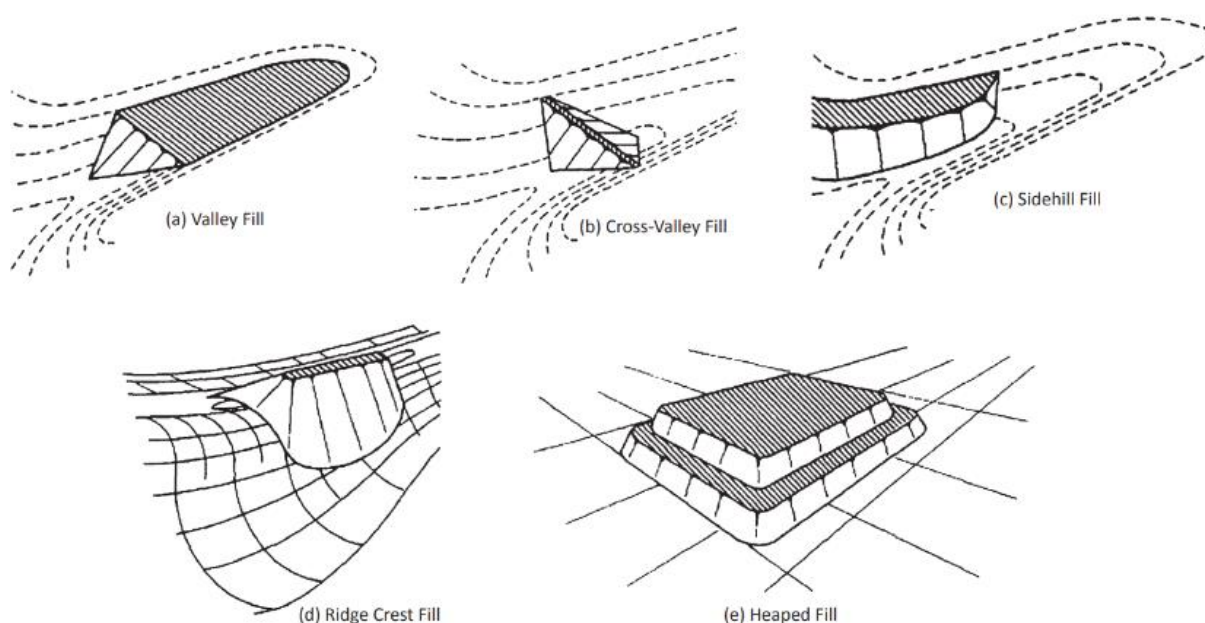


Figura 6 - Tipos de estocagem em pilha (a - preenchimento de vale, b - preenchimento de vale cruzado, c - preenchimento lateral, d - preenchimento da crista do cume, e - preenchimento amontoado). (Fonte: Hawley e Cuning, 2017).

A Norma Brasileira (NBR) 13029/2017, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2017), define diretrizes para a elaboração e apresentação de projetos de pilhas para disposição de resíduos estéreis. Essas diretrizes asseguram a conformidade com requisitos de segurança, operacionalidade, eficiência econômica e desativação. Além disso, a construção dessas pilhas deve seguir as normas

ambientais e atender a critérios econômicos, estruturais, sociais, de segurança e de risco.

2.2.1 Planejamento da estrutura

O planejamento de depósitos de resíduos e pilhas de estoque exige considerações de fatores interrelacionados que podem variar ao longo do ciclo de vida da mina. Os critérios de seleção do local devem ser estabelecidos e utilizados para identificar e classificar alternativas desde o início. Devem ser desenvolvidos projetos conceituais que respeitem as restrições físicas do local e atendam aos objetivos econômicos, geotécnicos, sociais e ambientais (Hawley e Cuning, 2017).

Estudos de pré-viabilidade são necessários para estabelecer linhas de base ambientais, investigar e caracterizar locais alternativos, caracterizar materiais de preenchimento, validar conceitos de projeto e restringir o processo de seleção do local. Investigações e estudos de projeto são realizados para abordar quaisquer lacunas de dados, refinar projetos e desenvolver planos de implementação detalhados, diretrizes e controles operacionais, além de planos preliminares de fechamento (Hawley e Cuning, 2017).

A seleção do local para a instalação é o primeiro passo no processo de design. Este deve ser realizado de forma metódica e cuidadosa, pois impacta significativamente as etapas subsequentes. Uma escolha inadequada pode causar atrasos consideráveis no design e licenciamento, além de exigir iterações caras e demoradas. Fatores regulatórios e sociais, mineração, terreno e geologia, ambiental, geotécnico, qualidade do material de enchimento e encerramento devem ser levados em consideração (Hawley e Cuning, 2017).

Após identificar os locais potenciais, o próximo passo é desenvolver projetos conceituais para cada um deles. O objetivo principal da fase de projeto conceitual é criar uma lista de locais viáveis e conceitos de design para investigações detalhadas. Estimativas de custos de desenvolvimento e operação ajudam a refinar as classificações dos locais e a focar nos mais promissores. É crucial entender antecipadamente as configurações geológicas, físicas e climáticas do local, além da geoquímica dos materiais de preenchimento e seu potencial para o desenvolvimento.

Esses projetos devem, no mínimo, atender aos requisitos de capacidade, seja de forma individual ou conjunta. Neste estágio, é essencial considerar rotas de acesso, requisitos de preparação do local, opções de equipamento e alternativas de construção (Hawley e Cuning, 2017).

No estágio de projeto de pré-viabilidade, são realizadas investigações de campo e testes de laboratório para desenvolver modelos e estudos analíticos, visando uma precisão de custos de mais ou menos 25 a 35%. É importante entender as expectativas da mina para definir orçamentos e cronogramas realistas. Investigações preliminares, como mapeamento de superfície e perfuração, são conduzidas para caracterizar fundações e obter amostras. Estudos ambientais são elaborados para validar conceitos de projeto e identificar requisitos de licenciamento. Projetos conceituais e planos de gerenciamento são refinados, e análises de estabilidade são realizadas para otimização. Estimativas de custos são usadas para comparar alternativas e selecionar locais preferidos, com ajustes iterativos para alcançar um projeto compatível (Hawley e Cuning, 2017).

A fase de viabilidade começa com uma análise detalhada de lacunas para identificar deficiências nos dados de suporte, seguida por investigações suplementares de campo e laboratório, estudos ambientais e de licenciamento, testes de materiais e perfuração. A precisão das estimativas de custo visa uma margem de 15 a 20%. Após esses estudos, modelos e classificações de locais são atualizados. O refinamento dos conceitos de projeto e planos de gestão leva a análises avançadas de estabilidade e modelagem. O plano de fechamento é finalizado e implementado, com monitoramento de desempenho a longo prazo. Se necessário, ciclos iterativos são realizados para garantir a compatibilidade com o plano da mina (Hawley e Cuning, 2017).

O projeto detalhado pode exigir investigações suplementares do local, amostragem em massa e testes de materiais para refinar modelos constituintes e atualizar planos de gerenciamento, água e fechamento, além de análises detalhadas. Ajustes nos critérios de estabilidade podem ser necessários se houver melhorias na confiança dos parâmetros de entrada e mudanças nas consequências da instabilidade. Análises detalhadas de estabilidade podem incluir modelagem numérica, análises paramétricas, modelagem de deformação e avaliação de risco. Os

resultados dessas análises, com a contribuição dos planejadores da mina, otimizam o projeto. Diretrizes operacionais preliminares, procedimentos de monitoramento e planos de resposta são desenvolvidos. Parâmetros detalhados do projeto são inseridos no plano de mina, ajustado conforme necessário. Atividades de preparação do local, como remoção da fundação, construção de desvios e instalação de instrumentação, verificam condições assumidas e identificam necessidades de modificações no projeto (Hawley e Cuning, 2017).

2.2.2 Métodos Construtivos de pilhas

A responsabilidade pelo planejamento de longo prazo, dentro das diretrizes estratégicas dos planos de lavra, inclui a elaboração dos projetos detalhados das pilhas de disposição de estéril e o sequenciamento. Com base nos dados e premissas de longo prazo, são levantados os quantitativos referentes ao projeto final de lavra e ao sequencial. Estimam-se os volumes e tipos de estéril a serem empilhados, além de determinar o empolamento de cada material para ajustar a configuração projetada da pilha.

A disposição de estéril é frequentemente realizada por meio da construção de camadas espessas ou bancos, formando uma série de plataformas de lançamento com intervalos verticais de 10 metros ou mais. A estabilidade do depósito pode variar, sendo controlada pela largura e comprimento das plataformas e pela altura entre elas. Entre as plataformas, são deixadas bermas com as seguintes finalidades: permitir o acesso das máquinas para manutenção, auxiliar na drenagem superficial e controle da erosão, suavizar o ângulo geral de talude da estrutura e facilitar os trabalhos de revegetação durante o fechamento (Fróes, 2014).

Pilhas podem ser construídas de forma descendente ou ascendente. O método ascendente é preferido, pois cada nova camada é suportada pela plataforma anterior, cujo comportamento pode ser analisado e compreendido. Qualquer ruptura deve atravessar o banco anterior, que também serve de apoio para o pé do talude e oferece confinamento aos solos de fundação. Além disso, o pé de cada banco é sustentado por uma superfície plana, a berma inferior (Fróes, 2014).

A construção de pilhas pelo método ascendente pode ser realizada de duas maneiras: por camadas (Figura 7) ou por bancadas. Na construção por camadas, a pilha é desenvolvida em horizontes com espessura de até 1,5 metros. Já na construção por bancadas, a pilha é formada na altura de um banco de 10 metros, utilizando tratores de lâmina para espalhar o material e conformar o platô.



Figura 7 - Construção de pilha de estéril do modo ascendente por camadas (Fonte: Freitas, 2004).

A construção descendente, conforme ilustrado na Figura 8, não é recomendada por diversos autores, pois a camada superior é suportada pelo pé do talude anterior. Nessas circunstâncias, a estabilidade é frequentemente controlada pelas condições de fundação e pelos taludes do terreno natural na base da pilha. Se a fundação não for adequada para suportar a carga, a estrutura pode se tornar instável. Além disso, a construção descendente não permite a compactação do aterro durante o processo, e o fechamento e a revegetação só podem ser iniciados após a conclusão da pilha (Figura 9, Figura 10 e Figura 11).



Figura 8 - Construção de pilha de estéril do modo descendente (Fonte: Freitas, 2004).

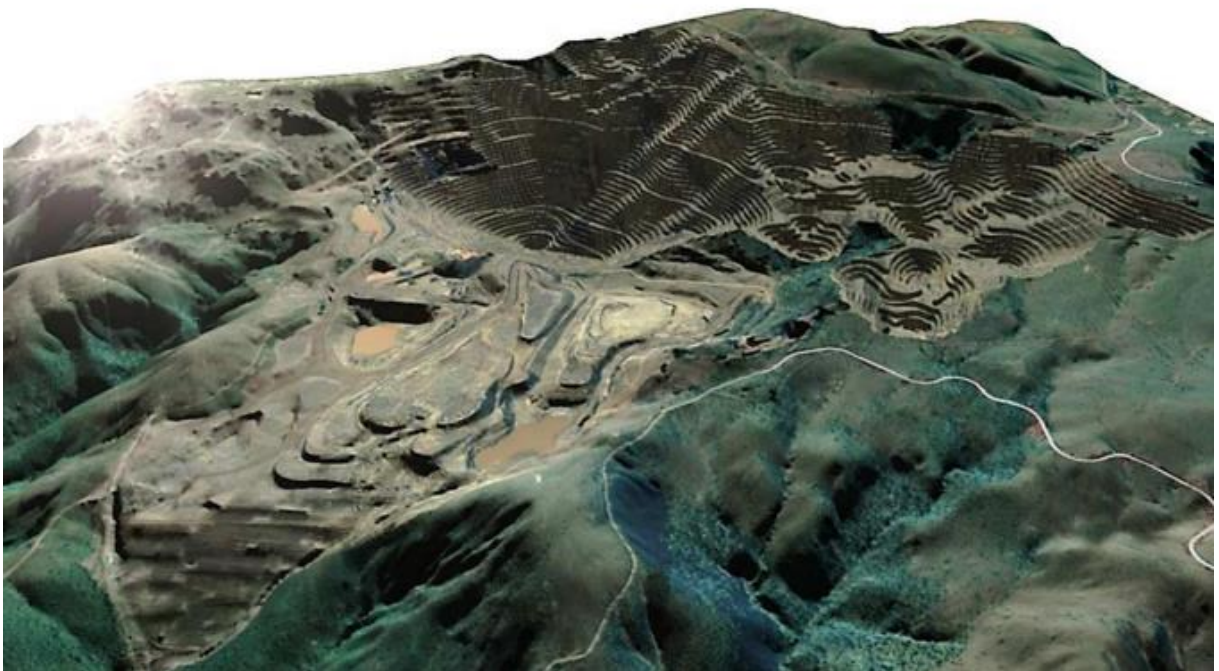


Figura 9 - Sequência construtiva de pilha de estéril (Fonte: Azevedo, 2014).

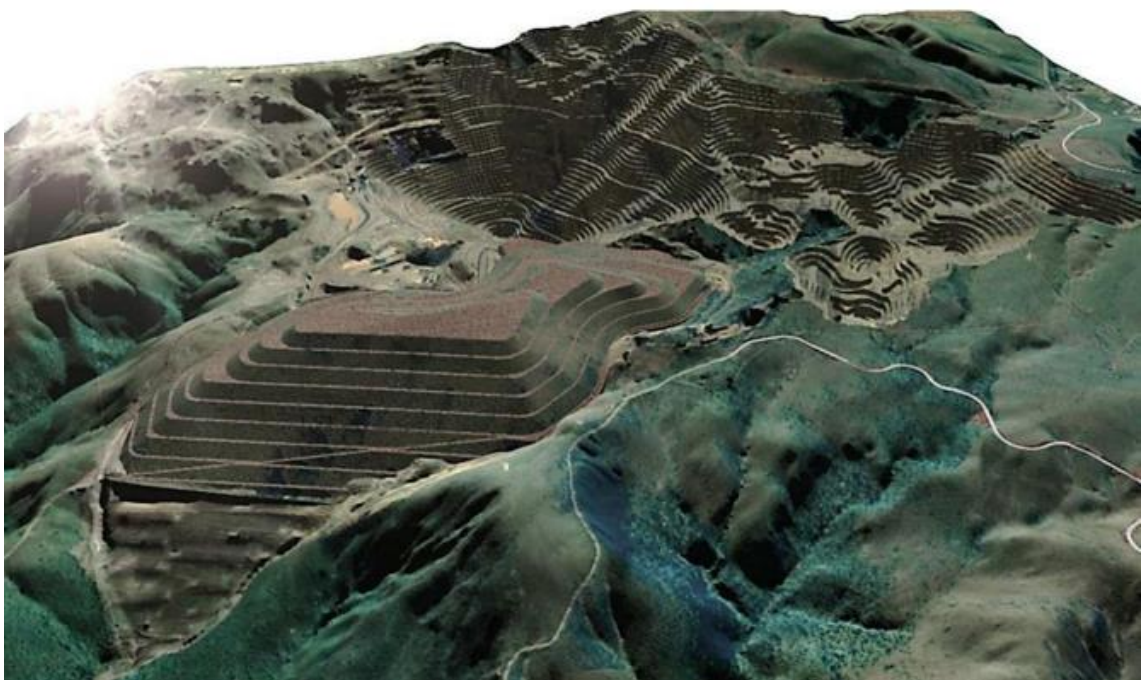


Figura 10 - Segunda etapa da sequência construtiva de pilha de estéril.
(Fonte: Azevedo, 2014).

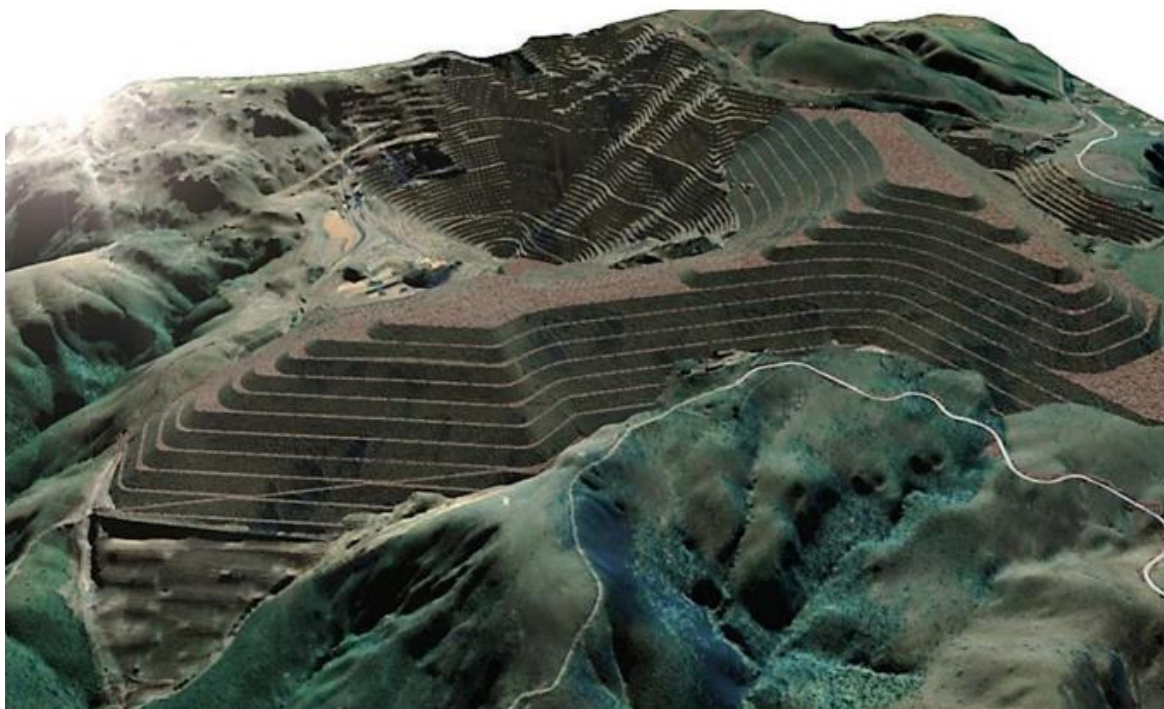


Figura 11 - Sequência construtiva de pilha de estéril, fechamento de pilha de estéril.
(Fonte: Azevedo, 2014).

2.2.3 Caracterização Geotécnica de pilhas

Os dados coletados durante as investigações das reservas minerais são frequentemente utilizados no projeto das pilhas. Essas informações são essenciais para a caracterização tanto da rocha estéril quanto da fundação que suportará a futura pilha.

Diversos estudos e ensaios são realizados para obter informações sobre as rochas estéreis, dados geotécnicos da rocha e da fundação, como coesão e ângulo de atrito interno, e parâmetros hidrogeológicos, como condutividade hidráulica, permeabilidade e diâmetro dos poros.

Além disso, são analisados os índices físicos do estéril e da fundação, como peso específico, granulometria, teor de umidade, e grau de saturação. Também são determinados os teores de metais pesados, e realizada a caracterização mineralógica dos estéreis. As informações obtidas a partir desses ensaios, análises e dados da exploração da jazida são fundamentais para a elaboração dos diversos projetos e

planos de construção da pilha de estéril, além de orientar quanto ao seu monitoramento.

2.2.4 Sistema de drenagem de pilhas

De acordo com a ABNT NBR 13029 (ABNT, 2017), o projeto de uma pilha de estéril deve incluir o dimensionamento da drenagem interna, definindo a localização, geometria dos drenos e transições, além dos materiais utilizados. O cálculo da drenagem interna considera as características dos materiais da fundação e do estéril, aplicando um fator de segurança entre 1,5 e 2,5 para as vazões estimadas. Em pilhas de material rochoso, a drenagem interna pode ser dispensada devido à alta permeabilidade.

O projeto também deve detalhar a drenagem superficial, com canaletas e descidas de água projetadas para um período de recorrência mínimo de 100 anos. Conforme (Bosco, 2008), os canais periféricos temporários devem seguir este mesmo critério, enquanto estruturas definitivas exigem períodos de retorno de 500 anos devido aos riscos associados à Drenagem Ácida de Rochas (DAR). Esta ocorre principalmente pela oxidação de minerais sulfetados (como pirita e calcopirita) presentes nos estéreis, que geram ácido sulfúrico e promovem a lixiviação de metais pesados, contaminando solos e recursos hídricos (Bosco, 2008, p. 13-15, 125-132).

Para mitigar esses impactos, os sistemas de drenagem devem ser projetados com base em estudos geoquímicos, isolando os resíduos do contato com água. Três sistemas de drenagem são recomendados: o primeiro na base da pilha, com canaletas tipo espinha de peixe; o segundo, nas bermas para escoamento superficial; e o terceiro ao redor da pilha, prevenindo a entrada de água externa.

Estudos hidrológicos, como os de intensidade de chuva, são fundamentais para dimensionar os sistemas de drenagem como os demonstrados na Figura 13, Figura 14 e Figura 15. A intensidade de chuva, determinada por análises de curvas de intensidade-duração-frequência (IDF), orienta o dimensionamento de drenos, como o tipo espinha de peixe, Figura 12. O cálculo da vazão dos drenos depende de parâmetros como coeficiente de escoamento, área de contribuição e intensidade da chuva.

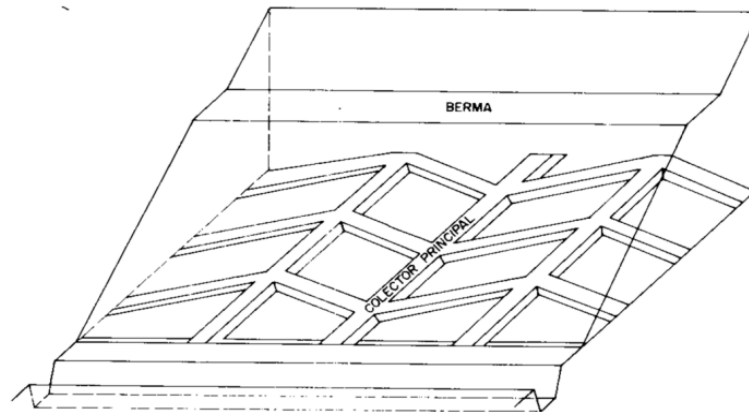


Figura 12 - Drenagem tipo espinha de peixe. (Fonte: Fróes, 2014)

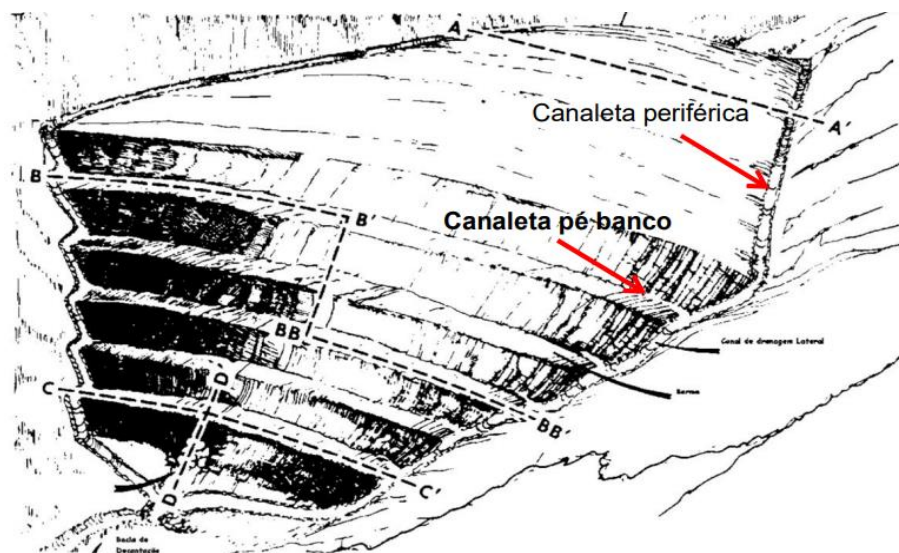


Figura 13 - Sistema de drenagem (Fonte: Motta, adaptado de Azevedo, 2014)

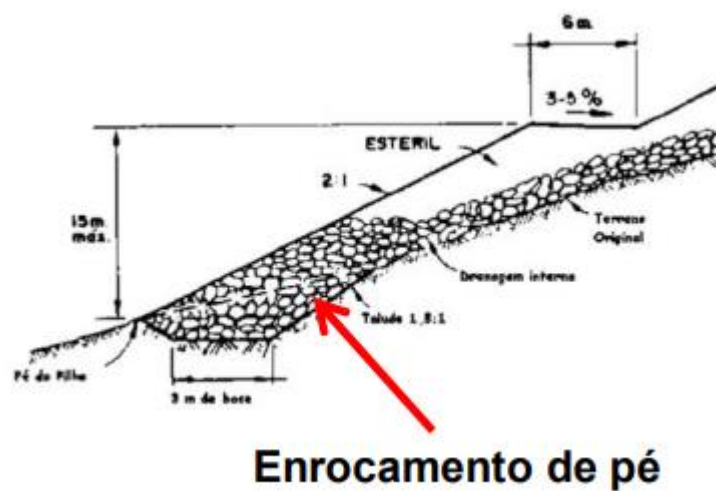


Figura 14 - Sistema de drenagem (Fonte: Motta, adaptado de Azevedo, 2014)

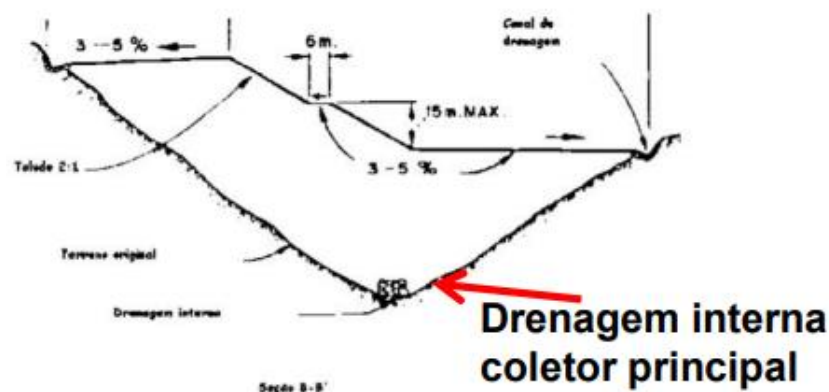


Figura 15 - Sistema de drenagem (Fonte: Motta, adaptado Azevedo, 2014)

2.2.5 Instrumentação de pilhas

A instrumentação geotécnica é uma ferramenta essencial no monitoramento de pilhas de estéril, pois permite avaliar parâmetros críticos para a estabilidade da estrutura, como pressão de poros, fluxos de água, deslocamentos, tensões, deformações e variações térmicas. Esses dados são fundamentais para detectar alterações no comportamento da pilha ainda em estágios iniciais, possibilitando a adoção de medidas corretivas antes que evoluam para situações de risco (SILVA, 2019). Além disso, a instrumentação possibilita a comparação entre o comportamento real da estrutura e os resultados obtidos por meio de modelagens numéricas, contribuindo para a validação e aprimoramento de projetos (PEREIRA, 2020).

Os instrumentos mais comumente utilizados incluem piezômetros, para medição da pressão intersticial; poços de observação, que permitem o monitoramento do nível d'água ao longo da profundidade da pilha; inclinômetros, que detectam variações na inclinação da estrutura; extensômetros, utilizados para observar movimentações internas; e pluviômetros, que monitoram a precipitação no local (PEREIRA, 2020). Também são empregados sensores de deslocamento superficial, como marcos de recalque, radares e GPS, além de sismômetros e acelerômetros para o monitoramento de eventos sísmicos (SILVA, 2019).

A frequência das leituras deve ser definida considerando fatores como o grau de risco da pilha, sua altura, idade, histórico de instabilidades, volume de água recebido durante períodos chuvosos e suscetibilidade a eventos sísmicos. De maneira geral,

quanto maior o risco, mais frequente deve ser o monitoramento (SILVA, 2019). Ressalta-se que a qualidade e confiabilidade dos dados dependem da correta instalação, calibração e manutenção dos instrumentos, bem como do treinamento das equipes envolvidas. Leituras imprecisas podem induzir a interpretações equivocadas, colocando em risco a segurança da estrutura.

O planejamento de um sistema de instrumentação deve considerar as características geotécnicas da pilha, como tipo de solo, permeabilidade e histórico de comportamento. O foco principal deve estar no monitoramento da percolação da água, dos movimentos internos e superficiais do solo, e das condições ambientais locais (PEREIRA, 2020). A análise dos dados deve seguir critérios técnicos rigorosos, com rotinas sistemáticas de coleta, tratamento e interpretação, visando identificar tendências que possam comprometer a estabilidade da estrutura (SILVA, 2019).

2.3 Problemáticas com Pilhas

É importante estudar a segurança de estruturas de armazenamos de resíduos da mineração, a Figura 16 é possível observar um deslocamento de uma pilha que ocorreu na manhã de 07/12/2024, da Mina Turmalina, em Conceição do Pará/MG, resultando no rompimento parcial da estrutura. A área foi isolada e a evacuação da comunidade de Casquilho de Cima começou às 9:48, com 75 pessoas realocadas. Um posto de combustível e um tanque de emulsão foram atingidos, mas os tanques permanecem intactos. A Agência Nacional de Mineração (ANM) interditou o local e suspendeu as atividades, exigindo ações para estabilizar a pilha e proteger a comunidade e o meio ambiente. Várias autoridades, incluindo a Defesa Civil e o Corpo de Bombeiros, estão monitorando a situação e prestando assistência (ANM, 2025).



Figura 16 - Deslocamento de Pilha em mina de Turmalina. (Fonte: ANM, 2025)

Existe também o caso de Nova Lima que de acordo com o portal de notícias G1, em 8 de janeiro de 2022, o dique para contenção de sedimentos Lisa da Mina Pau Branco, pertencente à mineradora Vallourec, transbordou em Nova Lima, na Região Metropolitana de Belo Horizonte. O transbordamento foi causado pelo excesso de chuvas, que resultou no escorregamento de parte da pilha Cachoeirinha para o interior do dique. A água invadiu a BR-040, bloqueando a rodovia e atingindo veículos que passavam pelo local. Apesar do incidente, não houve rompimento da barragem, e uma pessoa ficou ferida, é possível observar na Figura 17 o ocorrido (Projeto Manuelzão, 2025).



Figura 17 - Caminhões limpam a sujeira da BR-040. A lama da Vallourec também atingiu unidades de conservação e um centro do Ibama. (Fonte: Projeto Manuelzão, 2025)

2.4 A segurança das estruturas de mineração

A Resolução nº 95, de 07 de fevereiro de 2022, da Agência Nacional de Mineração (ANM, 2022), estabelece novas regras sobre a gestão e a segurança de barragens de mineração no Brasil. Essa norma complementa as disposições da Lei nº 12.334/2010, que institui a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), com foco especial em barragens de alto risco ou com elevado potencial de dano associado essa lei foi mudada em 2020, virando a Lei nº14.066/2020 e a mudança foi a proibição da construção das barragens pelo método a montante.

Um dos pontos centrais da resolução é a exigência de um Plano de Ação de Emergência (PAE) mais rigoroso, que deve ser atualizado periodicamente e conter orientações detalhadas sobre as ações a serem tomadas em caso de falha ou acidente com a barragem. O PAE precisa ser claro e de fácil compreensão para que as medidas emergenciais possam ser executadas de forma eficaz e rápida.

A norma também redefine os critérios para a classificação de barragens, levando em conta tanto o risco quanto o potencial de dano. As barragens classificadas como de alto risco ou alto potencial de dano requerem um monitoramento mais frequente e uma fiscalização mais severa. A periodicidade das inspeções de segurança varia de acordo com a classificação da barragem, e estas inspeções devem ser realizadas por profissionais qualificados e seguir normas técnicas específicas.

Outro aspecto importante da resolução é o foco na descaracterização de barragens a montante, que são consideradas mais vulneráveis. A medida visa garantir que barragens inativas ou desativadas sejam transformadas em estruturas seguras, sem capacidade de reter rejeitos, reduzindo assim o risco de acidentes futuros.

A responsabilidade dos empreendedores também é reforçada pela resolução. Eles devem garantir a integridade e a segurança das barragens sob sua administração, mantendo as informações atualizadas junto à ANM e implementando todas as medidas necessárias para prevenir falhas. Além disso, a resolução exige a divulgação de informações ao público e às autoridades competentes, assegurando transparência sobre a condição das barragens, com relatórios periódicos e resultados das inspeções sendo acessíveis de maneira clara e objetiva.

Essa resolução foi implementada em resposta aos trágicos acidentes envolvendo barragens, como os casos de Mariana e Brumadinho, e tem como objetivo fortalecer a regulamentação e a fiscalização das barragens de mineração no Brasil, especialmente aquelas que apresentam maior risco.

A NBR 13029 (ABNT, 2024) é uma norma técnica que estabelece diretrizes para a disposição de estéreis em pilhas, focada na segurança geotécnica e proteção ambiental. O primeiro ponto de destaque é a estabilidade geotécnica, que exige que as pilhas sejam projetadas com base em análises detalhadas de estabilidade, tanto estáticas quanto dinâmicas. Essas análises devem considerar fatores como o tipo de solo, a compactação do aterro, a inclinação dos taludes e a influência de condições climáticas, como chuvas intensas ou eventos sísmicos. O controle da pressão da água nos poros e o uso de sistemas de drenagem interna e superficial também são cruciais para garantir a estabilidade das pilhas, reduzindo o risco de liquefação ou falhas estruturais.

No planejamento e projeto, a norma orienta que a escolha do local para disposição do estéril deve considerar a geologia, topografia e as condições hidrológicas, evitando áreas sujeitas a deslizamentos e inundações. A drenagem de águas superficiais é um aspecto fundamental para evitar a erosão e garantir a segurança da estrutura, devendo ser implementados sistemas de escoamento adequados. Além disso, a construção das pilhas deve ser feita de forma progressiva, com compactação adequada de cada camada, para prevenir instabilidade.

O monitoramento contínuo é um requisito essencial, envolvendo o uso de instrumentação geotécnica como piezômetros, inclinômetros e extensômetros, que ajudam a detectar variações na integridade estrutural. Inspeções visuais regulares também são necessárias para identificar possíveis falhas, como rachaduras ou erosão, e as operações de manutenção devem ser ajustadas com base nos resultados dessas inspeções. Caso sejam detectados problemas, medidas corretivas devem ser implementadas imediatamente para evitar acidentes.

A norma também destaca a importância de medidas ambientais rigorosas, como o controle de drenagem ácida, comum em áreas com presença de sulfetos nos estéreis, o que pode levar à contaminação de recursos hídricos. Sistemas de barreiras físicas ou químicas devem ser implantados para prevenir essa contaminação. Além disso, a revegetação das áreas afetadas é essencial para estabilizar o solo e promover a recuperação do ecossistema, minimizando impactos a longo prazo. O controle de poeira e material particulado é outra medida ambiental necessária, que pode ser realizada por meio de irrigação ou cobertura vegetal.

A segurança também é garantida pela aplicação de fatores de segurança adequados ao projeto, considerando as características dos materiais e as condições locais, como a inclinação e a resistência dos solos. Esses fatores devem ser revisados e ajustados conforme as particularidades de cada projeto e região. A norma ainda prevê a existência de planos de contingência para emergências, como rupturas ou deslizamentos, garantindo que as operações de resposta a desastres sejam rápidas e eficazes.

Por fim, a NBR 13029 (ABNT, 2024) estabelece responsabilidades legais claras, exigindo que as empresas documentem todas as etapas do projeto, desde a construção até o monitoramento e manutenção das pilhas. Esses registros são

essenciais para garantir a transparência e a conformidade com as regulamentações ambientais. Ao final da vida útil da pilha, a norma exige a implementação de um plano de descomissionamento, que inclui a recuperação completa da área, com a desativação das estruturas de drenagem apenas após a estabilização e revegetação total do local. O monitoramento pós-fechamento é também necessário para assegurar a eficácia das medidas de recuperação ambiental.

Esse conjunto de diretrizes abrange todos os aspectos necessários para o gerenciamento adequado das pilhas de estéril, garantindo tanto a segurança geotécnica quanto a proteção ambiental, de forma a evitar impactos adversos e promover a sustentabilidade nas operações de mineração.

2.5 Níveis de segurança para pilhas de estéril

O capítulo sobre o "Sistema de Classificação de Estabilidade e Perigos para Pilhas de Estéril" do livro "Projeto de Depósito de Estéril e Pilha de Estocagem em Minas" introduz no capítulo 3 uma metodologia de classificação de pilhas de estéril e estoques em mineração. Baseado em um sistema anterior de 1991, este sistema, denominado *Waste Stability Rating and Hazard Classification (WSRHC)*, é composto por 22 fatores distribuídos em sete categorias que afetam a estabilidade, incluindo altura, volume, inclinação, materiais de fundação, qualidade do material, método de construção, taxa de carregamento, e condições climáticas e sísmicas (Hawley, 2017).

A metodologia utilizada para avaliar classificação de pilhas de estéreis em mineração baseia-se na análise de diversos fatores que influenciam o risco de instabilidade. Entre os fatores avaliados, destacam-se a altura e o volume da pilha, pois pilhas maiores e mais altas tendem a danos potenciais elevados. Além disso, a inclinação do terreno e a qualidade da fundação desempenham um papel fundamental: terrenos inclinados ou com fundações frágeis aumentam significativamente o perigo de instabilidade (Hawley, 2017).

Outro fator crucial é a qualidade do material utilizado na construção da pilha. Materiais com alta resistência e durabilidade contribuem para uma maior estabilidade, enquanto materiais de baixa resistência são mais suscetíveis à liquefação, um fenômeno que pode comprometer a integridade da estrutura. Condições climáticas,

como a intensidade das chuvas, e piezométricas, como a pressão de água no solo, também são analisadas, uma vez que a precipitação intensa e pressões elevadas podem desencadear processos de instabilidade. Além disso, a sismicidade da região é considerada, sendo que áreas com maior risco sísmico exigem ajustes adicionais no projeto para garantir a segurança da estrutura (Hawley, 2017).

Cada um desses fatores recebe uma pontuação específica. A soma dessas pontuações resulta em uma classificação de estabilidade, onde valores mais altos indicam uma estrutura mais estável, e valores mais baixos sinalizam uma maior possibilidade de instabilidade. Com base na pontuação final, as pilhas de resíduos são classificadas em diferentes níveis de perigo, variando de baixa a alta possibilidade de instabilidade (Hawley 2017).

O objetivo desse sistema de avaliação é oferecer uma abordagem quantitativa e padronizada para o projeto, investigação e monitoramento da estabilidade das pilhas de resíduos. Dessa forma, ele permite a implementação de medidas preventivas e corretivas adequadas, garantindo a minimização de falhas estruturais. Além disso, busca-se a criação de um sistema aplicável em diferentes cenários e tipos de pilhas, assegurando a segurança e a estabilidade dessas estruturas a longo prazo. A metodologia é embasada em fatores geotécnicos, climáticos e de construção, fornecendo um instrumento robusto e confiável para a gestão desses riscos (Hawley, 2017). No Quadro 1 é possível observar os fatores abordados na metodologia, e suas respectivas classificações.

Quadro 1 – Estrutura do sistema de classificação de estabilidade e risco de depósitos de resíduos e pilhas de estoque (WSRHC)

Fator	Grupo	Índice	Índice de Estabilidade da Pilha (WSR)	Classe de Risco da Pilha (WHC)
Sismicidade	Variação Regional	Índice de engenharia e geologia (EGI)	WSR (EGI + DPI)	WHC I (WSR >80)
Precipitação				
Talude da fundação	Condições da fundação			WHC II (WSR 60-80)
Forma da Fundação				
Tipo de carregamento				
Espessura da sobrecarga				
Potencial de rompimento não drenado				
Potencial de liquefação da fundação				
Base rochosa				
Nível d'água				
Gradação				
Durabilidade				
Potencial de liquefação do material				
Estabilidade química	Geometria e massa			Índice de projeto e performance (DPI)
Altura				
Ângulo do talude				
Volume e massa	Análise de Estabilidade	WHC V (WSR <20)		
Estabilidade estática				
Estabilidade dinâmica				
Método construtivo	Construção			
Razão de carregamento				
Performance de estabilidade	Performance			

Fonte: Hawley e Cuning, 2017.

2.5.1 Contexto Regional

A categoria “Contexto Regional” do sistema WSRHC avalia fatores geográficos e climáticos que influenciam a estabilidade dos depósitos de resíduos e pilhas. Os principais fatores considerados são sismicidade e precipitação, enquanto outros, como temperatura e umidade, são avaliados indiretamente. Esses fatores contribuem com até 10% do valor máximo do WSR, refletindo sua importância relativa na estabilidade das estruturas (Hawley, 2017).

2.5.1.1 Sismicidade

Na comunidade geotécnica, é amplamente aceito que o projeto de aterros de terra e enrocamento, como barragens de retenção de água e de rejeitos, deve considerar o impacto potencial de terremotos. Comumente, a consideração destes eventos em projetos era exigida por normas e regulamentações em zonas de alto risco sísmico, como Chile e Peru que exigiam a consideração da sismicidade no projeto de todas as estruturas de mina. Contudo, após os eventos ocorridos após a ruptura da barragem de Fundão, este aspecto passou a ser amplamente discutido e considerado em projetos de estruturas também no Brasil sendo os estudos sísmicos exigidos pela norma ABNT NBR 13029 (ABNT, 2024). A sismicidade é incluída como um fator de estabilidade no sistema WSRHC.

A classificação de sismicidade no WSRHC é baseada na aceleração esperada do solo, utilizando critérios como a aceleração máxima esperada do solo em um evento sísmico com período de retorno de 1:475 anos e a aceleração máxima do solo devido ao terremoto máximo confiável. Esses valores são obtidos a partir de estudos de risco sísmico e mapas fornecidos por agências governamentais. O fator Sismicidade tem uma ponderação máxima de 2 pontos, refletindo seu impacto limitado na estabilidade geral. No entanto, os impactos sísmicos também são considerados indiretamente na avaliação do potencial de liquefação e diretamente na análise de estabilidade dinâmica, podendo ter um impacto significativo no WSR dependendo das condições específicas do local.

2.5.1.2 Precipitação

Depósitos de resíduos e pilhas construídas em ambientes úmidos tendem a apresentar maior incidência de falhas e desempenho inferior em comparação com aqueles em ambientes áridos. Estudos mostram que lixões com desempenho ruim geralmente estão em áreas com precipitação anual superior a 1000 mm, enquanto aqueles com bom desempenho estão em áreas com menos de 1000 mm de precipitação anual. A precipitação é classificada no WSRHC com base na precipitação anual equivalente, incluindo neve, e pode ser ajustada para locais com variações sazonais intensas ou eventos de chuva sobre neve.

O fator Precipitação tem uma classificação máxima de 8 pontos, refletindo seu impacto significativo na estabilidade dos depósitos de resíduos e pilhas. Altos níveis de precipitação podem aumentar os níveis de água subterrânea, afetando indiretamente a estabilidade através dos fatores Potencial de Água Subterrânea e Liquefação. A ponderação alta deste fator no WSRHC destaca a importância de considerar a precipitação no projeto e avaliação de estabilidade dessas estruturas.

2.5.2 Condições da Fundação

O grupo "Condições da Fundação" no sistema WSRHC avalia fatores físicos da fundação de depósitos de resíduos e pilhas de estoque, incluindo topografia, tipo e espessura dos solos de fundação, competência e estrutura do leito rochoso subjacente, e condições das águas subterrâneas. Esses fatores são críticos para a estabilidade das estruturas e são ponderados para representar até 20% do valor máximo do WSR.

Além disso, fatores como Potencial de Falha Não Drenado e Potencial de Liquefação da Fundação são considerados, mas apenas para um subconjunto específico de depósitos onde esses riscos são relevantes. Esses fatores são ponderados negativamente, impactando o WSR apenas em situações em que são aplicáveis, refletindo a importância de avaliar cuidadosamente as condições da fundação para garantir a estabilidade das estruturas de resíduos. Segue abaixo a tabela de avaliação desse fator.

2.5.2.1 Declive da Fundação

A inclinação da fundação de um depósito de resíduos ou pilha de estoque influencia diretamente sua estabilidade e desempenho. Estruturas construídas em fundações íngremes são mais propensas a instabilidades e deformações em comparação com aquelas em fundações planas. Estudos de 1991 mostraram que 29% dos lixões em declives maiores que 25° tiveram desempenho ruim, enquanto apenas 17% dos lixões em declives menores ou iguais a 25° relataram problemas semelhantes. A inclinação média da fundação deve ser considerada ao longo de todo o ciclo de desenvolvimento, não apenas na configuração final, é necessário definir os parâmetros de geometria logo no início do planejamento Figura 18.

Além da inclinação, o formato da fundação também afeta a estabilidade. Fundações com perfis irregulares que interrompem interfaces de cisalhamento também apresentam melhor desempenho. O formato da planta, ou a forma da fundação vista de cima, é importante; fundações em vales estreitos ou ravinas, que oferecem confinamento lateral natural, tendem a ser mais estáveis do que aquelas em declives uniformes ou convexos.

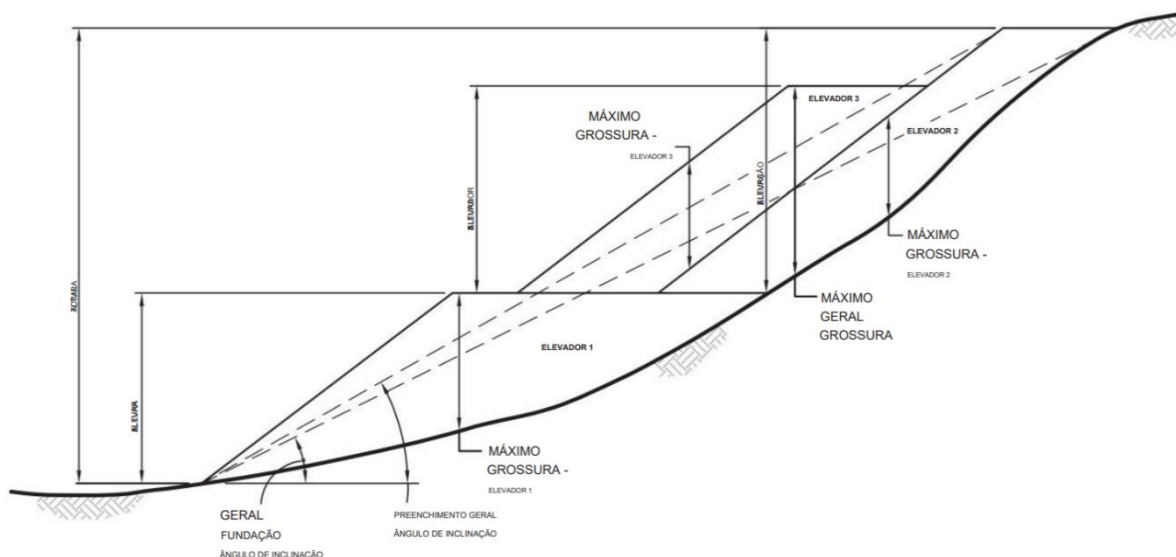


Figura 18 - Parâmetros de Geometria. (Fonte: Hawley e Cuning, 2017)

2.5.2.2 Tipo de sobrecarga

No sistema WSRHC, "sobrecarga" refere-se a qualquer solo ou material de aterro sob um depósito de resíduos ou pilha de estoque, excluindo leito rochoso moderadamente intemperizado ou fresco. A sobrecarga pode impactar significativamente a estabilidade e, em alguns casos, controlar o projeto. Cinco tipos gerais de sobrecarga são definidos:

- **Tipo I:** Solos altamente orgânicos e muito fracos, como turfa amorfa e argilas muito moles, com resistência ao cisalhamento não drenada tipicamente menor que 10 kPa.
- **Tipo II:** Solos moles a firmes, fracos e de granulação fina, como depósitos lacustres e argilas aluviais, com resistências ao cisalhamento não drenadas menores que 25 kPa.
- **Tipo III:** Depósitos aluviais de granulação média a grossa, como areias e cascalhos soltos a moderadamente densos, com resistências ao cisalhamento não drenadas de mais de 50 kPa.
- **Tipo IV:** Leito rochoso altamente intemperizado e coerente, solos de granulação grossa e morena densa, com resistências ao cisalhamento não drenadas de mais de 200 kPa.
- **Tipo V:** Solos muito competentes ou duros, como morena densa de grãos mistos, com resistências ao cisalhamento não drenadas de mais de 500 kPa.

A espessura da sobrecarga também é crucial, pois camadas finas de sobrecarga fraca podem ser deslocadas ou penetradas pelo material de despejo, enquanto camadas espessas podem conter lentes fracas que afetam a estabilidade.

2.5.2.3 Potencial de Falha Não Drenada

A falha não drenada pode ocorrer quando solos de fundação fracos são carregados rapidamente, aumentando as pressões dos poros mais rápido do que podem ser dissipadas. Solos saturados e de baixa condutividade hidráulica são particularmente suscetíveis. Materiais densos e bem graduados têm baixa suscetibilidade à falha não drenada, a depender do nível de tensão a que esteja submetido (altura do aterro a ser construído). O sistema WSRHC atribui uma

classificação padrão de zero para potencial insignificante de falha não drenada, e igual a -20 para potencial muito alto, incentivando a avaliação detalhada desse risco.

2.5.2.4 Potencial de Liquefação da Fundação

A liquefação pode ocorrer se a pressão dos poros no material se aproximar ou exceder o estresse de confinamento, frequentemente induzida por tremores sísmicos ou condições de fluxo artesianos. Materiais suscetíveis à liquefação recebem uma classificação padrão de zero para potencial insignificante de liquefação, e igual a -20 para potencial muito alto, incentivando a avaliação detalhada desse risco.

2.5.2.5 Base Rochosa

A competência do leito rochoso subjacente pode influenciar a estabilidade, especialmente em depósitos altos. Cinco tipos de fundações rochosas são definidos:

- **Tipo A:** Rochas muito fracas e altamente alteradas, com GSI/RMR menor que 20.
- **Tipo B:** Rochas sedimentares de granulação fina, moderadamente intemperizadas e fraturadas, com GSI/RMR de 20 a 40.
- **Tipo C:** Rochas moderadamente competentes e fraturadas, com GSI/RMR de 40 a 60.
- **Tipo D:** Rochas competentes e duras, com GSI/RMR de 60 a 80.
- **Tipo E:** Rochas muito competentes e inalteradas, com GSI/RMR maior que 80.

2.5.2.6 Águas Subterrâneas

As condições das águas subterrâneas influenciam as pressões dos poros na fundação. Altos níveis de água subterrânea podem afetar negativamente a estabilidade estática e aumentar o potencial de liquefação. As condições são classificadas como altas, moderadas ou baixas, com base na profundidade do lençol freático e no potencial de desenvolvimento de pressões adversas nos poros.

Esses fatores são críticos para avaliar a estabilidade de depósitos de resíduos e pilhas de estoque, e suas classificações ajudam a identificar e mitigar riscos potenciais.

2.5.3 Qualidade Do Material

O grupo "Qualidade do Material" é essencial para avaliar a estabilidade de depósitos de resíduos e pilhas de estoque, pois abrange diversos atributos físicos dos materiais utilizados na construção dessas estruturas. Esses atributos influenciam diretamente a resistência ao cisalhamento, o comportamento deformacional e as características hidrológicas da estrutura.

2.5.3.1 Gradação

Refere-se à distribuição do tamanho das partículas no material. Materiais bem graduados, com uma alta porcentagem de partículas grossas e angulares, tendem a apresentar maior resistência ao cisalhamento. A gradação é avaliada pela proporção de partículas menores que 0,075 mm (teor de finos) e maiores que 75 mm (seixos e pedras).

Este fator considera a resistência ao cisalhamento das partículas individuais e sua durabilidade ao longo do tempo. Materiais com baixa durabilidade podem se degradar devido a processos como hidratação ou congelamento-degelo, resultando na geração de finos adicionais e alteração da gradação do material.

2.5.3.2 Resistência e Durabilidade Intactas

A resistência ao cisalhamento do material de um depósito de resíduos ou pilha de estoque é influenciada pela resistência intacta e durabilidade das partículas individuais, especialmente em depósitos altos onde as tensões entre partículas podem exceder a resistência intacta do material, resultando em esmagamento. Materiais com baixa durabilidade mecânica podem se degradar durante a colocação ou ao longo do tempo devido a processos como hidratação ou congelamento-degelo, gerando finos adicionais e alterando a gradação do material.

2.5.3.3 Estabilidade Química

Avalia a suscetibilidade dos materiais à degradação química, como a oxidação de minerais de sulfeto ou a dissolução de sulfatos. Precipitados resultantes desses processos podem impactar a condutividade hidráulica da estrutura, aumentando a saturação e as pressões dos poros.

2.5.3.4 Potencial de Liquefação do Material

Embora aplicável a um subconjunto menor de depósitos, este fator é crucial para identificar materiais suscetíveis à liquefação. Materiais soltos, saturados e uniformemente graduados, com baixo teor de argila e partículas arredondadas, são mais propensos à liquefação.

2.5.4 Geometria e Massa

O grupo Geometria e Massa abordam os fatores relacionados ao tamanho e formato dos depósitos de resíduos ou pilhas de estoque. Estruturas maiores e mais altas, com declives mais íngremes, tendem a ser mais suscetíveis à instabilidade, resultando em maiores escoamentos e impactos adversos comparados a estruturas menores e mais planas.

2.5.4.1 Altura

Altura Geral: Medida do pé à crista do depósito.

Espessura Máxima do Aterro: A maior espessura do material depositado.

Altura Máxima de Elevação Individual: A altura das elevações individuais dentro do depósito.

2.5.4.2 Declive

Ângulo Geral de Declive: O ângulo medido da linha reta que conecta o pé e a crista do aterro. Para aterros muito baixos (menores do que 50 m), uma classificação

padrão mínima de 2 é atribuída. Para alturas entre 50 e 100 m, a classificação mínima é 1.

2.5.4.3 Volume e Massa

Volume: O volume total do material depositado.

Massa: A massa total do material depositado.

Os fatores de Geometria e Massa são ponderados para contabilizar um máximo de 10 pontos, ou 10% do WSR (*Waste Stability Rating*) máximo possível. A consideração desses fatores é crucial para avaliar a estabilidade e o desempenho dos depósitos de resíduos e pilhas de estoque, garantindo a segurança e eficiência das operações de mineração.

2.5.5 Volume e Massa

O fator de volume e massa deve ser calculado com base no volume solto ou a granel do depósito de resíduos ou pilha de estoque. Caso seja utilizado o volume do banco (ou seja, o volume do material medido *in situ*, antes da detonação e escavação), é necessário aplicar um fator de volume. Este fator é a razão entre o volume solto do material detonado e seu volume *in situ*. Verifica-se neste contexto, que a aplicação deste item é mais indicada para pilhas de estéril sendo necessários ajustes à proposta para se adequar a pilhas de estéril (material proveniente anteriormente do processo de beneficiamento do minério).

Os fatores de volume típicos para rochas escavadas utilizando técnicas de detonação em massa, como as comumente aplicadas em minas a céu aberto, variam entre aproximadamente 1,25 e 1,5. As faixas para o fator de volume e massa apresentadas na Tabela 6 foram calculadas assumindo uma densidade úmida solta do material de 2 t/m³, uma densidade *in situ* de 2,7 t/m³ e um fator de volume de 1,35. Estes valores precisam ser adaptados para a condição de estéril de mineração.

Se as densidades úmidas reais ou os fatores de volume diferem significativamente desses valores de referência, as faixas de fator de volume e massa devem ser ajustadas de acordo. Alternativamente, a classificação de volume e massa pode ser

baseada apenas na massa, já que este é geralmente o parâmetro mais facilmente obtido.

2.5.6 Análise de Estabilidade

A análise de estabilidade também da própria metodologia, tem como objetivo capturar e contrastar a diferença na estabilidade com base nos resultados da análise objetiva e nos critérios de aceitabilidade do projeto. Existem duas categorias principais de técnicas analíticas para analisar a estabilidade de resíduos ou pilhas de estoque: determinísticas e probabilísticas.

As técnicas determinísticas calculam um índice específico que representa a estabilidade, como o fator de segurança (FOS) e o fator de redução de resistência (SRF). O FOS é geralmente associado a técnicas de análise de equilíbrio limite (LE), enquanto o SRF é mais comum em técnicas de modelagem numérica de tensão-deformação, como elementos finitos e elementos distintos. Embora se sugira uma equivalência entre FOS e SRF, isso nem sempre é o caso.

As técnicas probabilísticas, por outro lado, calculam a Probabilidade de Falha (PoF), que representa a chance de uma falha ocorrer com base na variabilidade dos parâmetros de entrada. O PoF é frequentemente preferido em metodologias de design econômicas e baseadas em risco.

A análise de estabilidade é dividida em duas categorias: Estabilidade Estática Geral e Estabilidade Dinâmica Geral. A Estabilidade Estática Geral captura o comportamento esperado sob condições de carga estática normal, enquanto a Estabilidade Dinâmica Geral considera condições excepcionais, como cargas de terremoto. Os critérios de aceitabilidade para essas categorias são diferentes e são expressos em termos de valores determinísticos (FOS e SRF) e probabilísticos (PoF).

Modelos numéricos podem ser caracterizados como 'estáveis' se convergirem após ciclos iterativos, ou 'instáveis' se não convergirem. A convergência é determinada com base na deformação cumulativa, velocidade residual de deformação ou outros critérios específicos.

A análise de estabilidade é crucial para o processo de *design*, e um valor padrão é atribuído se nenhum resultado de análise estiver disponível para incentivar a realização dessas análises.

Os valores de classificação pressupõem que há pelo menos um nível moderado de confiança nos dados de entrada e que os resultados da análise são considerados credíveis e confiáveis. Se a confiança nos dados de entrada for baixa ou os resultados forem considerados não confiáveis, um valor de classificação mais baixo deve ser atribuído. Para se qualificar como tendo um nível moderado de confiança, os resultados devem ser revisados e aceitos como razoáveis e confiáveis por um especialista. Orientações sobre a atribuição de um nível de confiança são fornecidas em seções específicas.

A classificação de Estabilidade Dinâmica Geral deve ser determinada com base nos resultados de uma análise de equilíbrio limite ou técnica de modelagem numérica. Quando análises são usadas para avaliar a estabilidade dinâmica, uma redução apropriada na aceleração horizontal de pico deve ser aplicada. No caso em que a estabilidade dinâmica foi avaliada usando um modelo numérico e os resultados são expressos apenas em termos de convergência, um valor padrão deve ser atribuído para comportamento convergente e um valor zero para comportamento não convergente. Para incentivar os projetistas a conduzirem análises de estabilidade para dar suporte ao processo de projeto, um valor padrão baixo é atribuído se nenhum resultado de análise de estabilidade estiver disponível.

A classificação de Estabilidade Dinâmica Geral deve ser determinada com base nos resultados de uma análise de equilíbrio limite ou técnica de modelagem numérica. Quando análises são usadas para avaliar a estabilidade dinâmica, uma redução apropriada na aceleração horizontal de pico deve ser aplicada. No caso em que a estabilidade dinâmica foi avaliada usando um modelo numérico e os resultados são expressos apenas em termos de convergência, um valor padrão deve ser atribuído para comportamento convergente e um valor zero para comportamento não convergente. Para incentivar os projetistas a conduzirem análises de estabilidade para dar suporte ao processo de projeto, um valor padrão baixo é atribuído se nenhum resultado de análise de estabilidade estiver disponível.

2.5.7 Construção

A classificação de construção inclui dois fatores principais: o método de construção e a taxa de carregamento, representando um total de 15 pontos ou 15% do WSR máximo. A sequência de construção e a taxa de desenvolvimento podem ter um impacto significativo na estabilidade e no desempenho dos depósitos de resíduos e pilhas de estoque. Em condições iguais, depósitos construídos lentamente e de baixo para cima em camadas finas são mais estáveis e apresentam melhor desempenho em comparação com aqueles construídos rapidamente com elevações altas e simples. Neste contexto, o desempenho inclui aspectos como instabilidade e assentamento.

O método de construção visa capturar as principais diferenças no sequenciamento e desenvolvimento de um depósito de resíduos ou pilha de estoque que podem afetar a estabilidade e o desempenho geral (Figura 19). Existem cinco métodos principais de construção, cada um com suas características específicas.

O primeiro método envolve a construção descendente com elevações únicas ou múltiplas muito altas, superiores a 200 metros, em terrenos muito íngremes com inclinações de fundação maiores que 32 graus. Este método é geralmente considerado o menos favorável do ponto de vista da estabilidade geotécnica, mas é frequentemente o mais econômico devido às distâncias de transporte mais curtas.

O segundo método também é descendente, mas com elevações simples ou múltiplas em terrenos com inclinações de fundação entre 25 e 32 graus, e alturas de elevação limitadas a menos de 200 metros. Este método resulta em uma estabilidade melhorada em comparação com o primeiro, embora as alturas de elevação mais baixas aumentam as distâncias de transporte e os custos.

O terceiro método é uma combinação de construção descendente e ascendente, também conhecido como método híbrido. Ele envolve elevações iniciais em terrenos moderados com inclinações de fundação menores que 25 graus, seguidas por elevações envolventes em terrenos com inclinações entre 25 e 32 graus, com alturas de elevação limitadas a menos de 200 metros. Este método representa um compromisso entre a estabilidade da construção de baixo para cima e os custos mais baixos da construção de cima para baixo.

O quarto método é a construção ascendente ou de baixo para cima, com vários elevadores em terrenos moderados com inclinações de fundação entre 15 e 25 graus, e alturas de elevação limitadas a menos de 100 metros. Este método é tipicamente mais estável do que a construção de cima para baixo, mas pode ser mais caro se o material precisa ser transportado morro abaixo. Em terrenos planos além da crista do poço, a diferença de custo entre os dois métodos pode ser mínima.

O quinto método pode ser ascendente ou descendente, com múltiplas elevações em terrenos suavemente inclinados ou planos, com inclinações de fundação menores que 15 graus, e alturas de elevação limitadas a menos de 50 metros. Este método é considerado o mais estável devido à fundação suavemente inclinada e às baixas alturas de elevação.

Os projetistas devem comparar o método de construção proposto para seus depósitos de resíduos e pilhas de estoque com as descrições de referência e escolher um valor de classificação que melhor se encaixe. Quando os planos de desenvolvimento contêm atributos de mais de um método de referência, uma classificação intermediária deve ser selecionada.

A taxa de carregamento é um fator que visa capturar o impacto na estabilidade devido à velocidade de construção. Taxas de construção mais lentas permitem que os materiais do aterro e da fundação se consolidem e ganhem resistência, além de permitir a dissipação das pressões dos poros induzidas pela construção. Três parâmetros alternativos e relacionados foram definidos para ajudar a caracterizar a taxa de construção: taxa de carregamento volumétrico, taxa de carregamento de massa e taxa de avanço da crista.

A taxa de carregamento volumétrico é definida como a quantidade média de material solto colocado no depósito de resíduos ou pilha de estoque em um período de 24 horas, dividida pelo comprimento médio da crista ativa. A taxa de carregamento de massa é definida como a massa média colocada no depósito de resíduos ou pilha de estoque em um período de 24 horas, dividida pelo comprimento médio da crista

ativa. A taxa de avanço da crista é definida como a taxa média de avanço da crista ativa em um período de 24 horas, multiplicada pela altura média de elevação.

Esses três parâmetros são relacionados pelo fator de volume e densidade. Se os fatores de volume diferem significativamente dos valores de referência assumidos, os intervalos das taxas de carregamento volumétrico e de avanço da crista devem ser ajustados de acordo. Caso contrário, a classificação da taxa de carregamento deve ser baseada apenas na taxa de carregamento de massa, que é geralmente o parâmetro mais fácil de obter.

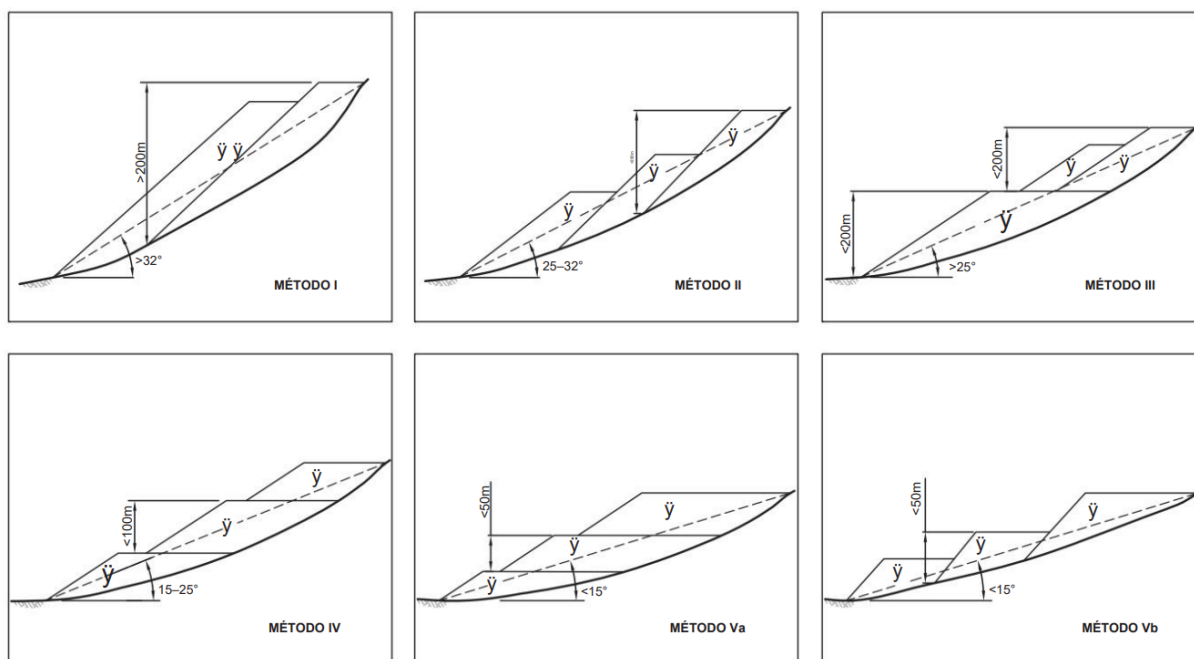


Figura 19 - Métodos de Construção.

2.5.8 Desempenho

A classificação de desempenho de estabilidade visa capturar a estabilidade real e documentada de resíduos e pilhas de estoque existentes. As categorias de desempenho são:

- Muito Ruim: Instável, com instabilidades em larga escala ou múltiplas que impactaram operações ou exigiram grandes recuperações.
- Pobre: Metaestável a instável, com fechamentos frequentes de curto prazo ou instabilidades locais frequentes, mas sem grandes instabilidades.

- Regular: Metaestável a estável, com fechamentos ocasionais devido a deformações ou falhas pequenas, com impactos limitados.
- Bom: Estável, com pequenas deformações ou fechamentos raros que tiveram impacto insignificante nas operações.
- Muito Bom: Muito estável, sem deformações significativas, fechamentos ou instabilidades que impactaram as operações.

Os valores de classificação variam de -15 a 15, com as classificações "muito ruim" e "ruim" sinalizando estruturas para posterior análise.

- Classificação de Depósitos e Pilhas: a classificação de estabilidade de depósitos de resíduos e pilhas (WSR) é calculada com base em vários fatores, resumidos no Quadro 1. Além do WSR geral, são calculados dois índices complementares:
 - *Engineering Geology Index* (EGI): Soma dos índices de Configuração Regional, Condições de Fundação e Qualidade do Material, representando fatores geológicos influenciáveis pelo projetista.
 - *Design and Performance Index* (DPI): Soma dos índices de Geometria e Massa, Análise de Estabilidade, Construção e Desempenho, representando fatores sob controle do projetista.

Os valores máximos desses índices são balanceados para que ambos representem 50% do WSR.

2.5.9 Classe de Risco de Depósito e Estoques

Para fins descritivos e para simplificar a comparação de diferentes configurações alternativas possíveis ou abordagens de projeto, a ponderação dos índices EGI e DPI facilita a comparação de diferentes depósitos de resíduos e estoques, bem como possíveis configurações alternativas ou fases de desenvolvimento para um dado depósito de resíduos ou estoque. A Figura 20 mostra os resultados das pesquisas de 1991 e 2013 plotados em um gráfico de classificação de estabilidade e classe de risco de depósito de resíduos e estoque. Também pode ser instrutivo traçar os resultados do WSR no gráfico. O depósito de resíduos ou pilha de estoque deve ser classificado

como WHC V (Perigo Muito Alto), independentemente do WSR. Da mesma forma, se o Potencial de Liquefação da Fundação ou o Potencial de Liquefação do Material forem considerados altos, ou o Desempenho for considerado ruim, o depósito de resíduos ou pilha de estoque deve ser classificado como WHC IV (Perigo Alto), a menos que o WSR seja menor que 20, caso em que deve ser classificado como WHC V.

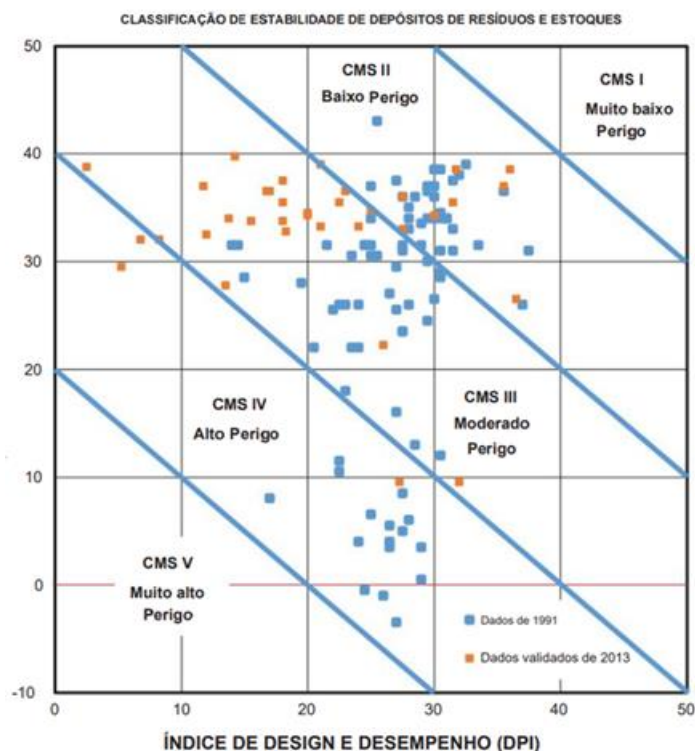
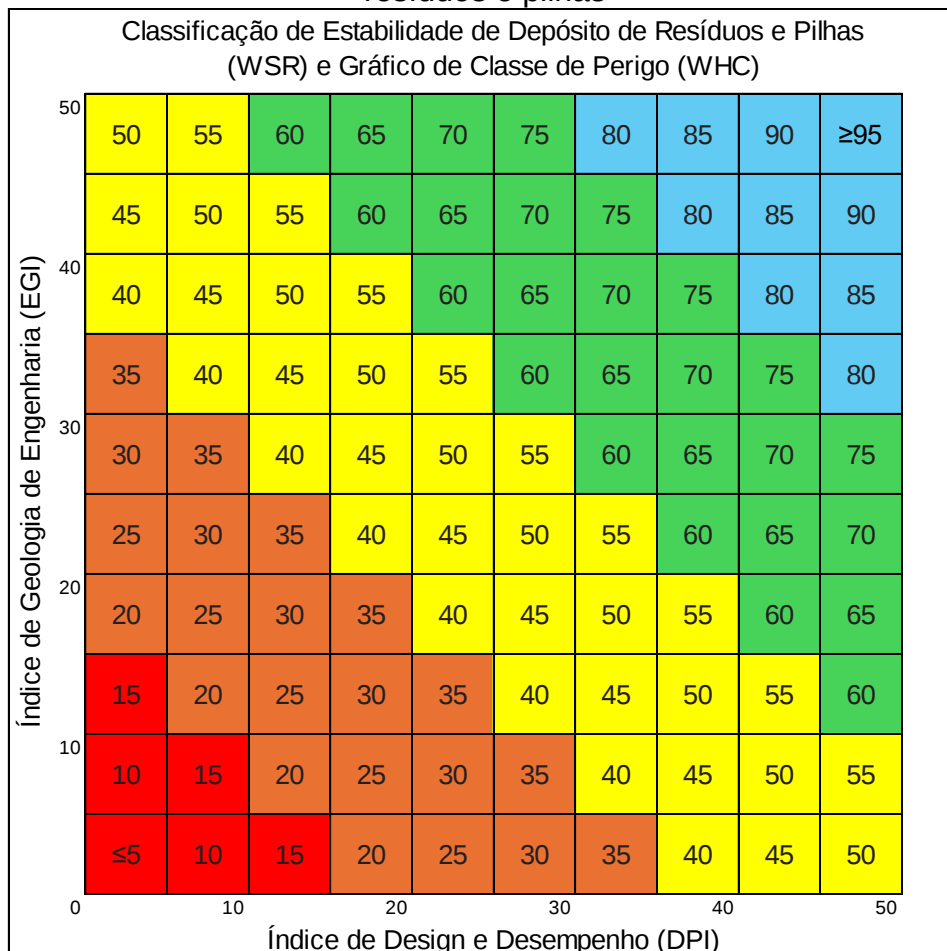


Figura 20 - Gráfico de estabilidade e risco de depósito de resíduos e pilhas ilustrando os resultados das pesquisas de 1991 e 2013.

Semelhante ao DSC de 1991, o sistema WSRHC pode ser usado como um guia para o nível de esforço necessário para investigar, projetar e construir um depósito de resíduos. Depósitos de resíduos e pilhas de estoque com classificações de estabilidade mais baixas, ou que se enquadram em classes de risco mais altas, logicamente devem exigir mais esforço investigativo e de projeto, além de mais cuidado e monitoramento durante a construção e operações, do que depósitos de resíduos e pilhas de estoque com classificações de estabilidade mais altas, ou que se enquadram em classes de risco mais baixas. A Tabela 1 fornece sugestões sobre o nível apropriado de esforço para a investigação e caracterização do local, análise e

projeto, e estágios de construção e operação no ciclo de vida de um depósito de resíduos ou pilha de estoque com base no WSR e WHC.

Tabela 1 - Classificação de estabilidade e gráfico de classe de risco de depósitos de resíduos e pilhas



Fonte: Hawley e Cunning, 2017.

Para um determinado depósito de resíduos ou pilha de armazenamento, e em reconhecimento da natureza um tanto subjetiva do esquema de classificação, a possível faixa de valores de WSR foi subdividida em cinco categorias ou classes de risco de despejo e pilha de resíduos (WHCs), conforme mostrado na Tabela 2. Uma descrição qualitativa do risco de instabilidade é associada a cada classe para ajudar a transmitir seu potencial relativo à instabilidade. Essas descrições podem ser úteis em avaliações de risco qualitativas e comparativas, como as discutidas no Capítulo 10. Observe que, se o Potencial de Liquefação da Fundação ou o Potencial de Liquefação do Material for considerado muito alto, ou o Desempenho for considerado muito ruim, o depósito de resíduos ou pilha de estoque deve ser classificado como

WHC V (Perigo Muito Alto), independentemente do WSR. Da mesma forma, se o Potencial de Liquefação da Fundação ou o Potencial de Liquefação do Material forem considerados altos, ou o Desempenho for considerado ruim, o depósito de resíduos ou pilha de estoque deve ser classificado como WHC IV (Perigo Alto), a menos que o WSR seja menor que 20, caso em que deve ser classificado como WHC V.

Tabela 2 - Resumo da classificação de estabilidade de depósito de resíduos e pilhas, classes de risco e risco relativo de instabilidade

WSR	WHC	Perigo de instabilidade
80–100	I	Risco muito baixo
60–80	II	Baixo risco
40–60	III	Risco Moderado
20–40	IV	Risco alto
<20	V	Risco Muito Alto

Fonte: Hawley e Cuning, 2017.

3 METODOLOGIA

A metodologia do estudo compreende inicialmente na escolha de uma estrutura que seja viável à aplicação da metodologia, ou seja uma estrutura em que sejam disponibilizados o máximo de dados necessários para o estudo. Serão avaliados os dados de caracterização da geometria da pilha de estéril e os dados de caracterização geotécnica do material do depósito e da fundação. Além disso, também serão avaliados os dados pluviométricos e sísmicos da região.

A partir desses dados procede-se analisar os fatores que causam instabilidade, baseados no Índice de Estabilidade de Pilhas de Estéril (WRS - *Waste Stability Rating*) proposto por Hawley (2017).

Para uma melhor visualização da organização deste trabalho, apresenta-se o fluxograma ilustrado na Figura 21.

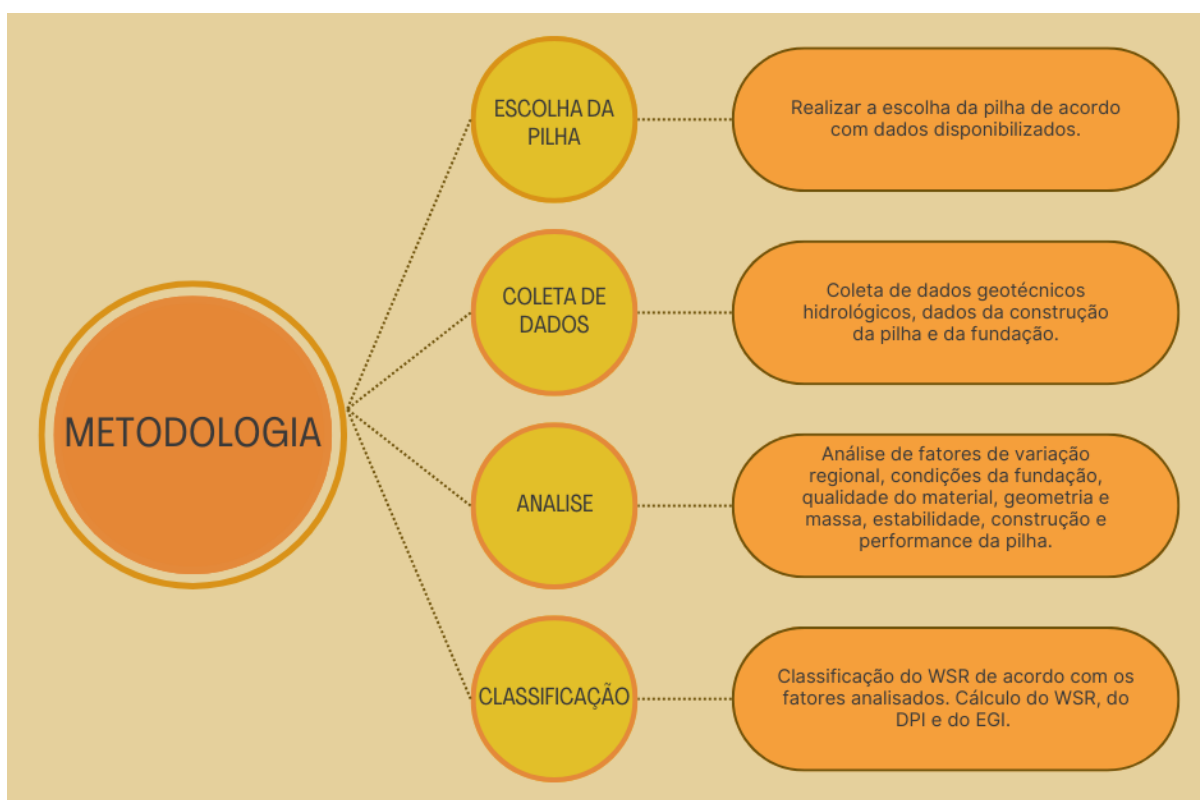


Figura 21 - Metodologia do Projeto (Fonte: Elaborado pela autora)

A metodologia adotada para a análise da estabilidade da pilha de estéril seguiu quatro etapas principais. Inicialmente, foi realizada a escolha da pilha, considerando dados previamente disponibilizados e critérios técnicos que englobam aspectos

geotécnicos, hidrológicos e construtivos. Em seguida, procedeu-se à coleta de dados em dissertações já prontas, abrangendo informações sobre a geotecnia do material, as condições hidrológicas da região, além das características estruturais da pilha e de sua fundação. Posteriormente, foi conduzida a análise dos fatores de variação regional, qualidade do material, geometria, massa da pilha, estabilidade, bem como aspectos construtivos e de desempenho estrutural. Por fim, foi realizada a classificação da pilha, utilizando o índice WSR, complementado pelo cálculo do DPI e do EGI, permitindo uma avaliação quantitativa dos riscos e do comportamento estrutural da pilha.

O sistema de classificação WSRHC (Waste Stockpile and Residue Hazard Classification) avalia a estabilidade e o risco de falha de depósitos de materiais e pilhas de estocagens com base em 22 fatores, que são distribuídos em 7 grupos principais: Contexto Regional; Condições da Fundação; Qualidade do Material; Geometria e Massa; Análise de Estabilidade; Construção; e Desempenho.

Cada fator recebe uma pontuação com base em critérios objetivos ou subjetivos padronizados. A pontuação total do sistema (WSR) pode variar de 0 a 100, sendo que valores mais altos indicam maior estabilidade. A classificação final de risco (WHC) é determinada com base no valor WSR.

Para aplicar os fatores é necessário ter os dados disponíveis, de:

- Sismicidade, do qual é necessário dado de aceleração máxima esperada do solo, com base em eventos sísmicos com períodos de retorno específicos; ou a aceleração máxima do solo esperada com base na magnitude máxima de um sismo.
- Precipitação, que avalia a precipitação média anual; ou a queda de neve média; ou a precipitação total anual equivalente.
- Dados do declive da fundação, que é necessário o ângulo médio geral da inclinação da fundação.
- Formato da fundação, que pode ser utilizado o formato da seção; ou o formato da superfície.
- O tipo de sobrecarga, do qual se avalia o solo.

- A espessura de sobrecarga, que avalia em metros a espessura da sobrecarga.
- O potencial de ruptura não drenado da fundação.
- O potencial de liquefação da fundação.
- A base rochosa, que utiliza a competência, dados como RMR ou o tipo de estrutura.
- A água subterrânea da fundação que avalia o nível de água.
- A graduação, que utiliza dados de ensaios granulométricos pode ser através de % de finos passantes na peneira #200, ou seja, menor que 0,075mm; ou então a % maior que 75mm; ou a plasticidade do material, obtida através de ensaios laboratoriais.
- Força e durabilidade intactas, que necessita da força intacta que avalia a resistência da rocha através de parâmetros UCS; ou durabilidade através da descrição do material; ou Permafrost.
- Potencial de liquefação do material da pilha.
- Estabilidade química, que considera se o material é quimicamente modificável;
- Altura da pilha, que considera, a altura total da pilha, ou a espessura vertical máxima em metros, ou a altura máxima de elevação individual por metro.
- Declive da pilha, que se considera o ângulo geral de inclinação.
- O volume e massa, que considera o volume da pilha em m^3 ou a massa em toneladas.
- A estabilidade estática que considera o fator de segurança (FoS) ou redução de força fator (SRF); ou a probabilidade de falha (PoF),
- A estabilidade dinâmica que considera o fator de segurança (FoS) ou a redução de força fator (SRF).
- O método construtivo, que leva em consideração a forma em que foi construída a pilha.
- A taxa de carregamento, que pode ser adquirida através de três dados, a taxa de carregamento ($m^3/d/m$); ou a taxa de carregamento em massa ($t/d/m$); ou a taxa de avanço da crista.

- E o desempenho da estabilidade, que leva em conta a descrição da estabilidade com base na deformação e falhas.

Os dados utilizados para avaliar esses fatores foram obtidos de duas dissertações antigas, os dados, e a avaliação, não representam a situação das pilhas atualmente. Dados de pluviometria foram retirados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Nos casos em que dois critérios se sobrepõem ou há ausência de dados específicos, adota-se a recomendação do sistema WSRHC de utilizar valores médios ou intermediários, a fim de refletir uma condição representativa, mas conservadora.

Após a classificação geral de cada fator, é necessário o cálculo dos seguintes índices:

- WSR (*Waste Stockpile Rating*): Soma das pontuações dos 22 fatores.
- EGI (*Engineering Geology Index*): Soma das pontuações das categorias Contexto Regional, Condições da Fundação e Qualidade do Material.
- DPI (*Design and Performance Index*): Soma das pontuações das categorias Geometria e Massa, Análise de Estabilidade, Construção e Desempenho.
- WHC (*Waste Hazard Classification*): Determinado a partir da pontuação WSR total, conforme os intervalos estabelecidos (ex: $WSR > 80 = WHC I =$ Risco muito baixo; $WSR < 20 = WHC V =$ Risco muito alto).

Após o cálculo desses índices foi necessária uma análise gráfica, relacionando os índices EGI e DPI, e entre WSR e as classes WHC.

Para realizar a análise comparativa dos fatores de classificação regional em diferentes contextos climáticos do Brasil, reavaliaram-se os dados de precipitação, visando identificar a influência desse fator sobre a classificação final de estabilidade. As duas pilhas de estéril estudadas foram hipoteticamente realocadas para regiões com dados pluviométricos contrastantes: uma em Belém do Pará, onde a média anual de precipitação atinge 2.894,60 mm/ano, e outra em Xique-Xique, na Bahia, com 485,95 mm/ano (ANA, 2025). Assim, evidencia-se uma discrepância significativa entre os valores registrados, possibilitando uma análise focada na influência da pluviometria sobre os resultados do sistema WSRHC, sem alterar as condições estruturais e configuracionais das pilhas.

4 RESULTADOS

4.1 Área de estudo

Para aplicar a metodologia estudada, serão analisadas duas pilhas de estéril: a Pilha Capão da Serra e a Pilha de Estéril do Correia, os dados para análise foram retirados das seguintes dissertações de pós graduação e mestrado respectivamente a primeira “Classificação de Pilhas de Estéril na Mineração de Ferro” da autora Giane Aparecida Santana Aragão, de 2008 e a segunda “Análise de Estabilidade da Pilha de Estéril do Correia- Mina de Gongo Soco- Para Implementação da Estrada de Ferro Vitória Minas- EFVM” de Wellington Luiz Pereira, de 2009. Por se tratar de dissertações antigas, as condições apresentadas nessas épocas podem não representar as condições atual das estruturas.

4.1.1 Pilha Capão da Serra

A pilha de estéril Capão da Serra está localizada na Mina de Tamanduá, no município de Nova Lima, Minas Gerais. A pilha, que estava em fase de construção em 2008 e atualmente encontra-se concluída, é de grande porte. Foi erguida sobre Xisto do Grupo Nova Lima e, em altitudes mais elevadas, atinge o filito da Formação Batatal (Grupo Caraça). A pilha possui três diques de contenção de finos que foram reposicionados conforme o crescimento da pilha, um deles é visível na Figura 22 (Aragão, 2008).



Figura 22 - - Vista de um dos diques de contenção de finos em cima da pilha (Fonte: Aragão, 2008)

A Figura 23, Figura 24 e Figura 25 apresentam vistas parciais da pilha, que se encontra sobre um vale aberto, ficando somente com o seu pé confinado. A Figura 23 e Figura 24 são do ano de 2008, apresentadas na dissertação de Aragão, já a Figura 25, é apenas representativa, para demonstrar como ela se encontra nos dias atuais.



Figura 23 - Imagens de satélite da pilha Capão da Serra em construção
(Fonte:Aragão, 2008).



Figura 24 - - Vista do pé da Pilha (Fonte: Aragón, 2008).



Figura 25 - Pilha Capão da Serra (Fonte: *Google Maps*, 2025).

A pilha é classificada como de grande porte, atingindo uma altura de 300 metros e contendo aproximadamente 5.000.000 m³ de material de estéril por banco. Apresenta um ângulo geral de talude de 22°. A fundação é intermediária, construída sobre saprólitos jovens e maduros (xistos e filitos), além de algum aluvião consolidado, que ganha resistência com o tempo devido ao adensamento. A qualidade do material da pilha é moderada, composta por filitos, xistos, itabiritos pobres, quartzitos e rochas básicas em diferentes estados de alteração, sem presença de porcentagens de finos (Aragão, 2008).

A pilha foi erguida em camadas ascendentes com bancadas variando entre 5, 10 e 15 metros, dependendo do setor, predominando bancadas de 10 metros ao longo das curvas de nível. As condições piezométricas e climáticas são intermediárias, adotando-se uma abordagem conservadora devido à presença de bacias de contenção de finos no topo da pilha, sem informações sobre a drenagem no fundo dessas bacias (Aragão, 2008).

Para realizar a classificação, foram utilizados dados da dissertação "Classificação de Pilhas de Estéril na Mineração de Ferro" (2008) da autora Giane Santana. As condições climáticas foram atualizadas para a média anual mais recente, com os dados retirados da Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico. Abaixo é apresentado no Quadro 1, retirado do documento, do qual possui as principais informações da pilha.

Tabela 3 - Quadro de Variáveis analisadas na Pilha Capão da Serra, Mina de Tamanduá (Fonte: Aragão, 2008)

Mina Tamanduá	Dados
Situação Atual da Mina	Atividade
Pilha	Capão da Serra
Projeto	Executivo 10.4.1 (RT004) (RT008)
Localização	Sudoeste da cava da mina
Altura da Pilha	110m atual
Altura do Banco	20m (variável de 0-20 atualmente) cota 1110 acabada – atualmente
Volume Total	77.000.000m ³
Volume por Banco	5.000.000m ³
Inclinação Geral da Pilha	22°
Inclinação entre Bancos	29°
Ângulo de Inclinação da Fundação	5°
Método Construtivo	Formação prevista pelo método ascendente
Geometria	Aterro em Vale (Valley Fill)
Taxa de Subida	3,76m ³ /banco por metro linear de crista por dia
Condições Climáticas	1800 mm de chuva 2006
Condições Piezométricas	Analisadas
Material e tipo de Fundação	A pilha de modo geral, estará assente sobre fundação resistente, constituída de saprólitos jovens e maduros (xisto e filitos) e algum coluvião consolidado
Grau de Confinamento	Aterro em Vale (Valley Fill)
Material da Pilha (tipo)	Estéril de granulometria fina(filitos, xistos, itabiritos pobres, quartzitos e rochas básicas em diversos estados de alteração)
Fonte de Estéril	Originados da mesma Mina
Situação Atual da Pilha	Atividade

4.1.2 Pilha de Estéril do Correia

A pilha de estéril do Correia está localizada na Mina de Gongo Soco como pode-se observar na Figura 26, no município de Barão de Cocais, Minas Gerais.

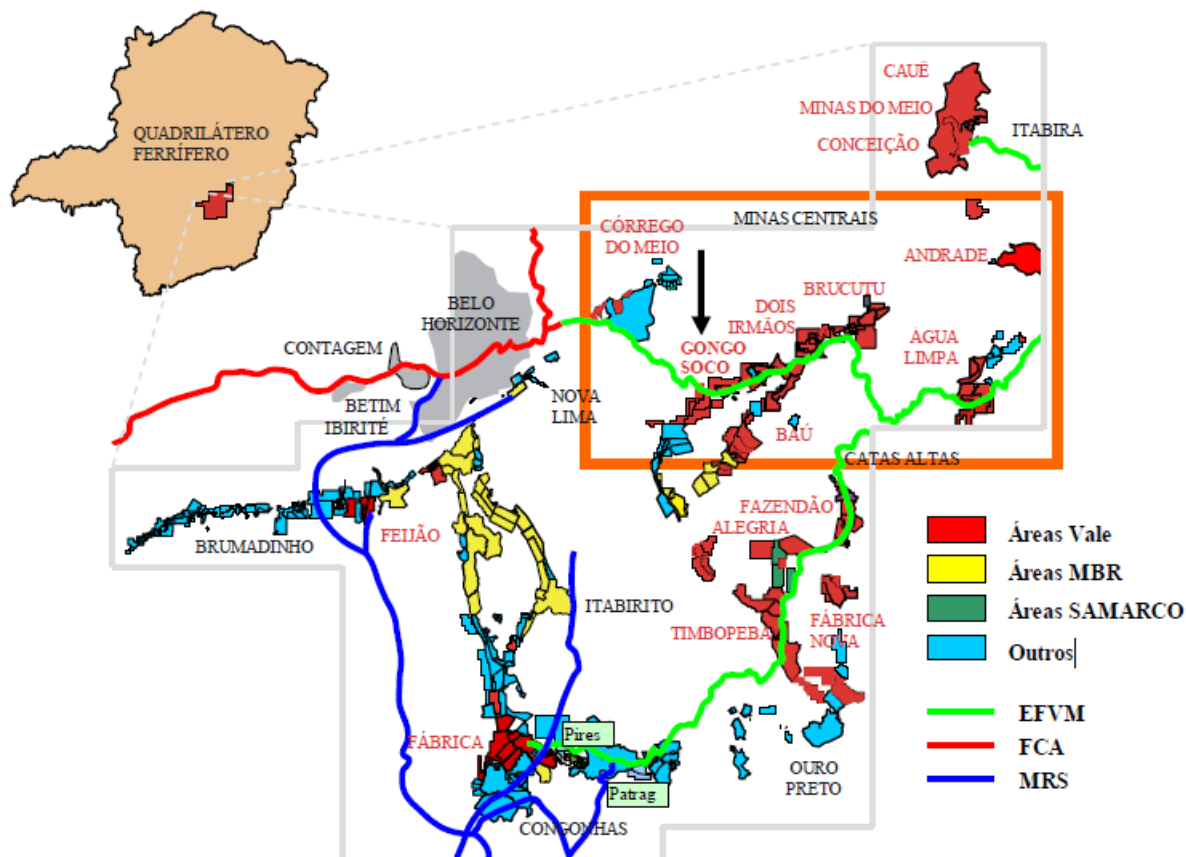


Figura 26 - Mapa da localização da Mina de Gongo Soco (Fonte: Pereira, 2009).

A pilha de estéril do Correia, Figura 28, possui uma região caracterizada por depósitos sedimentares paleocênicos e coberturas cenozoicas. A geologia local inclui dolomitos ferro-manganíferos e itabiritos, que influenciam diretamente as propriedades geotécnicas da pilha. A pilha de estéril é composta por materiais de granulometria variada, incluindo argilas, siltes, areias e blocos rochosos. Esses materiais são dispostos em camadas, com espessura máxima de 2 metros, e compactados pelo tráfego de veículos e máquinas. A estrutura da pilha é projetada para garantir a estabilidade, com taludes inclinados e bermas para controle de erosão. A metodologia foi feita com dados de 2009, a figura a seguir, é só uma representação de como ela se encontra nos dias atuais.



Figura 27 - Pilha de Estéril do Correia (Fonte: *Google Maps*, 2025).

Não foi possível obter todos os dados das duas pilhas, deste modo seguiu-se as recomendações da própria classificação que recomenda, utilizar um valor mediano para dados que não foram obtidos, ou que tenha causado dúvidas para decidir entre dois ou mais fatores.

4.2 Fatores e Classificações de Configuração Regional

A análise dos parâmetros de fatores e classificações de configuração regional será realizada de forma conjunta para as duas pilhas, Capão da Serra e Correia, após a apresentação da tabela que configura esse fator. Nesta classificação, serão analisados a sismicidade e a precipitação regional de cada estrutura, Tabela 4.

Tabela 4 - Fatores e classificações de configuração regional

Fatores¹	Classificação				
Sismicidade	Muito alto	Alto	Moderado	Baixo	Muito baixo
Aceleração máxima do solo esperada (g): com base em um período de retorno de 1:475 anos/Probabilidade de excedência de 10% em 50 anos.	> 0,4	0,2–0,4	0,1–0,2	0,05–0,1	<0,05
Aceleração máxima do solo esperada (g): com base magnitude máxima de um sismo (MCE).	> 0,6	0,4–0,6	0,2–0,4	0,1–0,2	<0,1
Avaliação	0	0.5	1	1.5	2
Precipitação	Muito alto	Alto	Moderado	Baixo	Muito baixo
Precipitação média anual: precipitação (mm)	> 2000	1000–2000	350–1000	100–350	<100
Precipitação média anual: queda de neve (cm)	> 200	100–200	35–100	10–35	<10
Precipitação total anual: precipitação equivalente (mm)	> 2000	1000–2000	350–1000	100–350	<100
Avaliação²	0	2	4	6	8
Avaliação de configuração regional³	Avaliação máxima possível:				10

Notas:

1. Selecione uma classificação para cada fator. Quando mais de um critério é mostrado para um dado fator, ou se você não consegue decidir entre duas classificações, selecione uma média ou classificação intermediária.
2. Para locais que sofrem com chuvas sazonais intensas ou eventos rápidos de escoamento, diminua o valor da classificação em 1 ponto.
3. A soma das classificações para os fatores individuais é a classificação do Ambiente Regional.

Fonte: Hawley e Cuning, 2017.

A Pilha de Estéril Capão da Serra, localizada na Mina de Tamanduá, em Nova Lima, Minas Gerais, apresenta uma configuração regional caracterizada por sismicidade baixa, com zona de risco sísmico entre 0 e 1, o que resulta em uma pontuação de 1,5. A precipitação média anual na região é de 1.537,10 mm/ano (Agência Nacional das Águas E Saneamento Básico, 2025), classificada como alta, com pontuação de 2. A soma desses fatores resulta em 3,5 pontos, em um máximo de 10.

A Pilha de Estéril do Correia, situada na Mina de Gongo Soco, em Barão de Cocais, Minas Gerais, também apresenta sismicidade baixa, com aceleração máxima do solo de 0,07g, atribuindo 1,5 pontos. A precipitação média anual é de 1.362,58 mm/ano (Agência Nacional das Águas- ANA), classificada como alta, com pontuação

de 2. Assim, a soma dos fatores de configuração regional para a Pilha do Correia também é de 3,5 pontos, em um máximo de 10.

4.3 Fatores e Classificações das Condições de Fundação

A análise dos parâmetros de Fatores e Classificações das Condições de Fundação será realizada de forma conjunta para as duas pilhas, Capão da Serra e Correia, após a apresentação da tabela que configura esse fator. Nesta classificação, serão analisados o declive da fundação, formato, espessura de sobrecarga, potencial de ruptura não drenado, potencial de liquefação da fundação, base rochosa e água subterrânea, Tabela 5.

Tabela 5 - Fatores e classificações das condições da fundação.

Fatores ¹	Classificação				
Fundação - Declive	Muito íngreme	Íngreme	Moderado	Leve	Plano; talude rochoso em bancada; aterros de poço
Ângulo médio geral de inclinação da fundação (°)	> 32	25–32	15–25	5–15	<5
Avaliação	0	1	2.5	4	5
Formato da fundação ²					
Formato da Seção	Convexo em encostas inclinadas a muito íngremes	Convexo em encostas moderadamente inclinadas; côncavo ou Plano em encostas íngremes a muito íngremes	Convexo em encostas suaves; Plano ou Côncavo em encostas moderadamente inclinadas	Plano ou Côncavo em encostas suaves	Planar ou côncavo em encostas planas as inclinações muito irregulares
Formato do Superfície	Encostas com formato plano convexo projetado ('nariz') Encostas com uma forma de plano pronunciadamente convexa ('nariz')	Encostas convexas de grande raio	Encostas planas sem confinamento lateral	Encostas côncavas e vales amplos que proporcionam confinamento natural limitado	Vales estreitos ou ravinas que proporcionam um confinamento natural substancial
Avaliação	0	0.5	1	1.5	2

Fonte: Hawley e Cuning, 2017. (Continua)

Tabela 5 - Fatores e classificações das condições da fundação, continuação.

Fatores ¹		Classificação			
Tipo de Sobrecarga	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	Tipo V
Descrição	Solos altamente orgânicos; siltes e argilas muito moles a moles; argilas muito sensíveis; outros solos muito fracos	Solos macios a firmes, fracos ou sensíveis de granulação fina (por exemplo, depósitos lacustres, siltes e argilas, solos residuais de granulação fina)	Depósitos aluviais; areias e cascalhos soltos a moderadamente densos; depósitos coluvionares de granulação mista; solo residual arenoso; solos rígidos de granulação fina	Base rochosa altamente intemperizada, mas coeso; depósitos de Tálus competentes; solos moderadamente densos a densos e de grão grosso; solo de grão misto moderadamente denso (relevo glacial)	Solo muito denso, de granulação mista (relevo glacial) e outros solos muito competentes ou duros; solos perpetuamente congelados com potencial insignificante para deformação devido à carga do aterro; leito rochoso competente
Avaliação	0	1	2	3	4
Espessura (m) da Sobrecarga	> 5	3–5	1–3	0,3–1	<0,3
Avaliação	0	0.5	1	1.5	2
Potencial de ruptura não drenada ³	Muito alto ⁵	Alto ⁶	Moderado	Baixo	Insignificante
Descrição	Solos saturados, normalmente adensados ou subadensados, solos compressíveis do Tipo I ou II, com condutividade hidráulica muito baixa e comportamento semelhante a materiais de baixa resistência não drenada (Su) (sem atrito); potencial muito alto para geração de poropressão em excesso quando carregados rapidamente	Saturados, normalmente adensados ou levemente sobreadensados, solos compressíveis do Tipo I ou II que possuem baixa condutividade hidráulica e se comportam como materiais de Mohr-Coulomb ($c-\phi$); alto potencial para geração de excesso e poropressão quando carregado rapidamente	Saturados, normalmente adensados, solos de granulometria fina ou mista, Tipo III ou IV, com condutividade hidráulica baixa a moderada e moderado potencial para geração de excesso de poropressão quando carregados rapidamente; potencial desconhecido para ruptura não drenada	Insaturado, normalmente adensados ou sobreadensados, misto ou de granulação fina, solos do tipo III ou IV com condutividade hidráulica moderada e baixo potencial para geração de excesso de poropressão quando carregados rapidamente; baixo potencial de ruptura não drenada, mas não pode ser totalmente desconsiderado	Solos de granulação mista Tipo III, IV ou V, ou rochas competentes fortemente sobreadensados, ou solos granulares Tipo III ou IV com alta condutividade hidráulica, alta resistência e potencial insignificante para geração de excesso de poropressão quando carregados rapidamente.
Avaliação	-20	-10	-5	-2.5	0

Fonte: Hawley e Cuning, 2017. (Continua)

Tabela 5 - Fatores e classificações das condições da fundação, continuação.

Fatores ¹	Classificação				
Potencial de liquefação da fundação ⁴	Muito alto ⁵	Alto ⁶	Moderado	Baixo	Insignificante
Descrição	Muito uniforme; muito solto; baixíssimo teor de finos plásticos; estrutura suportada por clastos; alto índice de vazios; clastos arredondados; saturado	Argilas extrassensíveis e de resistência baixíssima.	Potencial de liquefação moderado (ou desconhecido)	Baixo potencial de liquefação, mas não pode ser totalmente desconsiderado	Bem graduado; denso; alto teor de finos plásticos; baixo índice de vazios; clastos angulares; seco
Avaliação	-20	-10	-5	-2.5	0
Base rochosa	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D	Tipo E
Competência ⁷	Rochas muito fracas e/ou altamente alteradas em argila, cisalhadas ou altamente fraturadas; camadas de carvão altamente carbonáceas e laminadas; filito; flysch (formação sedimentar composta por camadas alternadas de sedimentos finos e grossos); IGS/RMR <20; G<1	Rochas sedimentares de granulação fina; rochas moderadamente intemperizadas ou alteradas; fraturada moderada a intensamente; GSI/RMR 20–40; Q 1–4	Moderadamente competente; moderadamente fraturado; ligeiramente desgastado/alterado GSI/RMR 40–60; Q 4–10	Competente, duro, intemperizado/inalterado, em bloco; GSI/TMR 60–80; Q 10–40	Muito competente, intemperizado, inalterado, duro, maciço; GSI/RMR > 80; Q > 40
Estrutura	Falhas ou zonas de cisalhamento com orientação adversa; potencial para ruptura da fundação controlada pela estrutura.	Juntas contínuas e de orientação adversa; potencial para ruptura da fundação em poços anisotropia de tecido desenvolvida	Potencial limitado (ou desconhecido) para ruptura de fundação em estrutura principal ou anisotropia de tecido moderadamente desenvolvida	Potencial insignificante para falha de fundação em estrutura principal ou anisotropia de tecido pouco desenvolvida	Sem estrutura adversa
Avaliação	0	1	2	3	4

Fonte: Hawley e Cuning, 2017. (Continua)

Tabela 5 - Fatores e classificações das condições da fundação, continuação.

Fatores ¹	Classificação				
Água subterrânea	Alto		Moderado		Baixo
Condições esperadas de Lençóis freáticos	Nível d'água na superfície do terreno; descarga ou fluxo ativo; gradientes ascendentes elevados; potencial para geração de poropressões elevadas na fundação devido ao carregamento do aterro.		Nível d'água > 5 m abaixo da superfície do solo; potencial limitado para desenvolvimento de poropressões adversas na fundação devido ao carregamento do aterro		Nível d'água em grande profundidade; potencial insignificante para poropressões adversas na fundação
Avaliação	0	1	1.5		3
Classificação ⁸ das condições da fundação				Classificação máxima possível:	20

Notas:1. Selecione uma classificação para cada fator. Quando mais de um critério for mostrado para um determinado fator, ou você não puder decidir entre duas classificações, selecione uma classificação média ou intermediária.2. Escolha a forma que melhor descreve a geometria da fundação em planta e corte. As fundações convexas são inclinadas em direção à ponta da seção e não possuem confinamento lateral na planta; fundações côncavas achatam-se em direção à ponta da seção e fornecem confinamento lateral na planta.3. A avaliação do potencial de ruptura de fundações não drenadas pode exigir investigações detalhadas in situ e testes laboratoriais especializados. Se não tiver certeza ou não tiver certeza, use um valor padrão de -5 e consulte um especialista geotécnico.4. A avaliação do potencial de liquefação dos solos de fundação pode exigir investigações detalhadas in situ. Se não tiver certeza, use um valor padrão de -5 e consulte um especialista geotécnico.5. Se o Potencial de Ruptura Não Drenada ou Potencial de Liquefação da Fundação for considerado muito alto, o depósito de resíduos ou pilha de armazenamento deve ser classificado como WHC V (Perigo Muito Alto), independentemente do WSR.6. Se o Potencial de Ruptura Não Drenada ou o Potencial de Liquefação da Fundação for considerado Alto, o depósito de resíduos ou estoque deve ser classificado como WHC IV (Alto Risco), a menos que o WSR seja ≤ 20 , caso em que deve ser classificado como WHC V. (Perigo muito alto).7. Ver Hoek et al. (2013) para uma descrição do Índice de Força Geológica (GSI), Bieniawski (1976) para uma descrição do RMR, e Barton et al. (1974) para uma descrição de Q.8. A soma das classificações dos fatores individuais é a classificação das Condições de Fundação.

Fonte: Hawley e Cuning, 2017.

Na Pilha de Estéril Capão da Serra, a inclinação da fundação é suave, com um ângulo de 5°, o que classifica a inclinação como leve, o que resulta na atribuição de 4 pontos. A geometria da fundação é do tipo aterro em vale (Valley Fill), proporcionando confinamento natural substancial, com pontuação de 2. A sobrecarga é resistente, composta por saprólitos jovens e maduros (xistos e filitos) e algum colúvio consolidado, será classificada como Tipo IV, com pontuação de 3. A espessura da sobrecarga é estimada entre 1 e 3 metros, atribuindo 1 ponto. O potencial de ruptura e a liquefação foram estimados com base em valores médios devido à falta de dados

completos, a própria metodologia afirma que na dúvida entre um ou mais fatores, ou na falta de um deles, deve-se utilizar o valor médio, resultando em -5 pontos para cada. A base rochosa e a presença de água subterrânea também foram avaliadas com valores médios, atribuindo 2 e 1,5 pontos, respectivamente. A soma total para as condições de fundação é de 8,5 pontos, em um máximo de 20.

Para a Pilha de Estéril do Correia, a inclinação da fundação é classificada como moderada, com pontuação de 2,5. O formato da fundação é côncavo, caracterizado por encostas côncavas e vales amplos, o que proporciona confinamento natural limitado, atribuindo 1,5 pontos. A sobrecarga é constituída por depósitos paleogênicos terciários, com solo de textura argilo-siltosa pouco arenosa e pedregulhos de consistência média a dura, resultando em 3 pontos. A espessura da sobrecarga é de 1 a 3 metros, com pontuação de 1. O nível d'água foi identificado em sondagens com profundidade pequena, classificando-se como moderado, com 1,5 pontos. A soma total para as condições de fundação é de 9 pontos, em um máximo de 20.

4.4 Fatores e Classificações da Qualidade do Material

A análise dos parâmetros de Fatores e Classificações da Qualidade do Material será realizada de forma conjunta para as duas pilhas, Capão da Serra e Correia, após a apresentação da tabela que configura esse fator. Nesta classificação, serão analisados a gradação, força e durabilidade intactas, potencial de liquefação do material e estabilidade química, Tabela 6.

Tabela 6 - Fatores e classificações de qualidade do material

Fatores ¹		Classificação			
Gradação	Granulação muito fina		Granulação mista		Granulação muito grossa
% de finos (passando pela peneira # 200; < 0,075 mm)	> 50%	25–50%	10–25%	5–10%	< 5%
% Maior que 75 mm	<10%	10–25%	25–50%	50–75%	> 75%
Plasticidade ²	Finos altamente plásticos; LL > 50; IP > 20	Finos moderadamente plásticos; LI 35–50; PI 10–20	Finos de baixa plasticidade; LL < 35; IP < 10	N / A	N / A
Avaliação	0	2	3.5	5	7
Força e durabilidade intactas	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Força intacta	Rochas extremamente fracas a muito fracas, R0-1 (UCS<5 MPa); Base rochosa tipo A; Sobrecarga tipos I e II	Rochas fracas, R2 (UCS 5–25 MPa); Base tipo B; Tipos III, IV e a maioria das sobrecargas do Tipo V	Rochas de resistência média, R3 (UCS 25-50 MPa); a maioria das rochas do Tipo C; aluvião de granulação grossa e depósitos de tálus derivados de rochas duras	Rochas resistentes a muito resistentes, R4 (UCS 50–100 MPa); a maioria do leito rochoso do Tipo D	Rochas muito resistentes a extremamente resistentes R5–6 (UCS >100 Mpa); a maioria leito rochoso do Tipo E
Durabilidade ³	Material sujeito a deterioração durante o posicionamento, degradação dependente do tempo devido à esfoliação ou ciclos de congelamento e descongelamento, ou esmagamento sob cargas estáticas previstas		Material sujeito a uma deterioração limitada durante o posicionamento, degradação dependente do tempo devido à esfoliação ou ciclos de congelamento e descongelamento, ou esmagamento sob cargas estáticas previstas		Material não sujeito a deterioração durante o posicionamento, degradação dependente do tempo devido à esfoliação ou ciclos de congelamento e descongelamento, ou esmagamento sob cargas estáticas previstas
Permafrost ⁴		Materiais Tipo 1 perpetuamente congelados	Materiais Tipo 2 perpetuamente congelados	Materiais Tipo 3 perpetuamente congelados	Materiais dos Tipos 4 e 5 perpetuamente congelados
Avaliação	0	2	4	6	8

Fonte: Hawley e Cuning, 2017 (Continua).

Tabela 6 - Fatores e classificações de qualidade do material, continuação.

Fatores ¹	Classificação				
Potencial de liquefação do Material ⁵	Muito alto ⁶	Alto ⁷	Moderado ou Desconhecido	Baixo	Insignificante
Descrição	Graduado de maneira muito uniforme; muito solto; muitas plásticas mínimas; estrutura aberta e apoiada em clastos; alto índice de vazios; clastos arredondados; saturado		Potencial de liquefação moderado (ou desconhecido)	Baixo potencial de liquefação, mas não pode ser totalmente desconsiderado	Bem graduado; denso; alto teor de finos plásticos; estrutura suportada por matriz; baixo índice de vazios; clastos angulares; seco
Avaliação	-20	-10	-5	-2.5	0
Estabilidade química	Altamente Reativo		Moderadamente reativo		Neutro
Potencial de ARD	Alto potencial de decomposição química/ oxidação/geração de ARD		Potencial moderado (ou desconhecido) para degradação química/ oxidação/geração de ARD		Material quimicamente muito estável com conteúdo negligenciável de minerais reativos
Impacto de Precipitados	Alto potencial para precipitados preencherem vazios, diminuir a condutividade hidráulica e aumentar a poropressão ao longo do tempo		Potencial limitado (ou desconhecido) para que precipitados preencham vazios, diminuam a condutividade hidráulica e aumentem a poropressão ao longo do tempo		Precipitados insignificantes, ou os precipitados resultam em cimentação e aumentam a resistência ao cisalhamento ao longo do tempo sem afetar adversamente as poropressões
Avaliação	-5	-2.5	0	2.5	5

Fonte: Hawley e Cuning, 2017 (Continua).

Tabela 6 - Fatores e classificações de qualidade do material, continuação.

Fatores ¹	Classificação				
Classificação o ^a de qualidade do material				Classificação máxima possível:	20

Notas:

1. Selecione uma classificação para cada fator. Quando mais de um critério for mostrado para um determinado fator, ou você não puder decidir entre duas classificações, selecione uma classificação média ou intermediária.
2. LL = Limite de Liqueidez; PI = Índice de Plasticidade. Estes critérios aplicam-se apenas aos casos em que o teor deargas é > 10%.
3. Sob condições climáticas ambientais esperadas.
4. Se o material estiver perpetuamente congelado, selecione a próxima categoria mais alta para levar em conta o aumento esperado de durabilidade e resistência.
5. A avaliação do potencial de liquefação de depósitos de resíduos e materiais armazenados pode exigir investigações detalhadas. Se desconhecido, use um valor padrão de -5 e consulte um especialista geotécnico.
6. Se o Potencial de Liquefação do Material for considerado Muito Elevado, o depósito ou pilha de resíduos deverá ser classificado como WHC V (Perigo Muito Alto), independentemente do RSR.
7. Se o Potencial de Liquefação do Material for considerado alto, o depósito ou pilha de resíduos deve ser classificado como WHC IV (Alto Risco), a menos que o WSR seja ≤ 20 , caso em que deve ser classificado como WHC V (Muito Alto Risco).
8. A soma das classificações dos fatores individuais é a classificação de Qualidade do Material.

Fonte: Hawley e Cuning, 2017 (Continua).

Na Pilha de Estéril Capão da Serra, a qualidade do material foi avaliada com base em valores médios devido à falta de dados específicos, apesar de ter uma descrição de estéril de granulometria fina (filitos, xistos, itabiritos pobres, quartzitos e rochas básicas em diversos estados de alteração) não foram feitos ensaios sobre este material para uma classificação mais precisa. A gradação recebeu 3,5 pontos, enquanto a força e durabilidade foram classificadas com 4 pontos. O potencial de liquefação foi estimado em -5 pontos, e a estabilidade química foi considerada neutra, com 0 pontos. A soma total para a qualidade do material é de 2,5 pontos, em um máximo de 20.

Já na Pilha de Estéril do Correia, a análise granulométrica indicou que 60% do material passa na peneira #200 (partículas menores que 0,075 mm), classificando a gradação como muito fina, com 0 pontos. A força e durabilidade foram estimados adotando o valor médio, classificadas como Tipo III, com rochas de resistência média e depósitos aluvionares de granulação grossa, atribuindo 4 pontos. O potencial de liquefação também foi mediado, classificado como moderado, com -5 pontos, e a estabilidade química foi considerada estável, com 0 pontos, obtido pelo valor médio. A soma total para a qualidade do material é de 4 pontos, em um máximo de 20.

4.5 Fatores e Classificações de Geometria e Massa

A análise dos parâmetros de Fatores e Classificações de Geometria e Massa será realizada de forma conjunta para as duas pilhas, Capão da Serra e Correia, após a apresentação da tabela que configura esse fator. Nesta classificação, serão analisados a altura e o declive, Tabela 7.

Tabela 7 - Fatores e Classificações de geometria e massa

Fatores ¹	Classificação				
Altura	Muito alto	Alto	Moderado	Baixo	Muito baixo
Altura total (m)	> 500	250–500	100–250	50–100	<50
Espessura Vertical Máxima (m)	> 500	250–500	100–250	50–100	<50
Altura Máxima de Elevação Individual (m)	> 200	100–200	50–100	25–50	<25
Classificação	0	1	2	3	4
Declive	Muito íngreme	Íngreme	Moderado	Plano	Muito plano
Ângulo geral de inclinação de preenchimento (°) ²	> 35	30–35	25–30	15–25	<15
Classificação	0	1	2	3	4
Volume e Massa	Muito grande	Grande	Médio	Pequeno	Muito pequeno
Volume (m ³)	> 1 × 10 ⁹	1 × 10 ⁸ – 1 × 10 ⁹	1 × 10 ⁷ – 1 × 10 ⁸	1 × 10 ⁶ – 1 × 10 ⁷	<1 × 10 ⁶
Massa (t)	> 2 × 10 ⁹	2 × 10 ⁸ – 2 × 10 ⁹	2 × 10 ⁷ – 2 × 10 ⁸	2 × 10 ⁶ – 2 × 10 ⁷	<2 × 10 ⁶
Classificação	0	0.5	1	1.5	2
Classificação de geometria e massa³				Classificação máxima possível:	10

Notas:

1. Selecione uma classificação para cada fator. Quando mais de um critério for mostrado para um determinado fator, ou você não puder decidir entre duas classificações, selecione uma classificação média ou intermediária.

2. O ângulo geral da inclinação do aterro é medido da ponta até a crista. Onde a altura geral do declive for inferior a 50 m, use uma classificação padrão mínima de 2. Quando a altura geral do declive estiver entre 50 e 100 m, use um valor de classificação padrão mínimo de 1.

3. A soma das classificações dos fatores individuais é a classificação de Geometria e Massa.

Fonte: Hawley e Cuning, 2017.

A Pilha de Estéril Capão da Serra possui uma altura total de 110 metros, classificada como moderada, com pontuação de 2. O ângulo geral da pilha é de 22°, considerado plano, com pontuação de 3. O volume total é de 77.000.000 m³, enquadrando-se na faixa entre 1x10⁷ e 1x10⁸, com pontuação de 1. A soma total para geometria e massa é de 6 pontos, em um máximo de 10.

A pilha do correia possui 925 m³ de estéril, uma área total de limpeza de 5.052 hectares, cada banco individual possui uma inclinação de 1V para 2H, altura individual dos bancos de 10 metros, largura das bermas de 7,5 metros, altura máxima da pilha

de 48 metros (distância vertical entre a base e a superfície exposta da pilha), desnível máximo da pilha de 70 metros (altura máxima entre o pé e a crista da pilha), declividade das bermas longitudinal é 1%, com caimento para ambas ombreiras, e a transversal é de 3%.

Como a altura é 70 metros do pé até a crista podemos classificar de acordo com a tabela de geometria como muito baixo, somando um valor de 3. Para determinar o ângulo de inclinação da pilha, foram utilizadas as seguintes informações: cada banco individual possui uma inclinação de 1V para 2H, com altura de 10 metros e largura das bermas de 7,5 metros. A altura máxima da pilha é de 48 metros, e o desnível máximo da pilha é de 70 metros. A declividade das bermas longitudinal é de 1%, com caimento para ambas as ombreiras, e a transversal é de 3%.

Primeiramente, calculou-se o número de bancos necessários para atingir a altura máxima da pilha, resultando em 5 bancos. Em seguida, determinou-se a distância horizontal total coberta pelos bancos, que é de 100 metros. Adicionou-se a distância horizontal total das bermas, que é de 30 metros, resultando em uma distância horizontal total da pilha de 130 metros.

Utilizando a Equação 1, tangente, para calcular o ângulo de inclinação, obteve-se:

$$\tan \theta = \frac{\text{altura}}{\text{distancia horizontal}} = \frac{48}{130} = 21,08 \quad (1)$$

Desta forma classifica-se como plano, somando 2 na pontuação total.

Ao analisarmos o volume da pilha, sendo 925 m³, temos que de acordo com o parâmetro volume, determina-se a classificação 2. A pontuação total foi de 8 pontos. A pontuação máxima para esses fatores é 10.

4.6 Fatores e Classificações de Análise de Estabilidade

A análise dos parâmetros de Fatores e Classificações de Análise de Estabilidade será realizada de forma conjunta para as duas pilhas, Capão da Serra e Correia, após a apresentação da tabela que configura esse fator. Nesta classificação, serão analisadas a estabilidade estática e a estabilidade dinâmica, Tabela 8.

Tabela 8 - Fatores e Classificações de análise de estabilidade

Fatores ¹	Classificação				
Estabilidade Estática²					
Fator de Segurança (FoS) ou Redução de Força Fator (SRF) ³	<1,1	1,1–1,2	1,2–1,3	1,3–1,5	> 1,5
Probabilidade de falha (PoF)	> 20%	10–20%	5–10%	1–5%	< 1%
Outros critérios ^{4,5}	Modelo Numérico Não Convergente	Ausência de Análise de Estabilidade de Apoio	Modelo Numérico Convergente		
Avaliação	0	2	3.5	5	7
Estabilidade Dinâmica^{2,6}					
Fator de Segurança (FoS) ou Redução de Força Fator (SRF) ³	<1,0	1,0–1,05	1,05–1,10	1,10–1,15	> 1,15
Outros critérios ^{4,5}	Modelo Numérico Não Convergente	Ausência de Análise de Estabilidade de Apoio	Modelo Numérico Convergente		
Avaliação	0	1	1.5	2	3
Classificação de Análise de Estabilidade⁹				Classificação máxima possível:	10

Notas:

1. Selecione uma classificação para cada fator. Quando mais de um critério for mostrado para um determinado fator, ou você não puder decidir entre duas classificações, selecione uma classificação média ou intermediária.
2. Presume-se que existe pelo menos um nível moderado de confiança nos parâmetros de entrada e que os resultados da análise são credíveis e razoáveis.
3. Os valores do índice de estabilidade mostrados são baseados em FoS. Se os resultados da análise de estabilidade forem apresentados em termos de SRF, o usuário deverá decidir se o SRF é equivalente a FoS com base nas especificidades da análise e é aconselhado a consultar um especialista geotécnico para fazer esta determinação.
4. Caso a análise numérica indique um comportamento convergente, deverá ser atribuído uma avaliação mínima de 3,5. Caso as análises numéricas indiquem comportamento não convergente, deverá ser utilizada uma classificação padrão de zero (0).
5. Se não estiverem disponíveis análises de estabilidade de apoio, deverá ser atribuído um valor predefinido de 2.
6. Se forem utilizadas análises pseudoestáticas para avaliar a estabilidade dinâmica, deverá ser aplicada uma redução adequada no pico de aceleração horizontal de cálculo.
7. Caso as análises numéricas indiquem um comportamento convergente, deverá ser atribuído uma avaliação de mínimo 1,5. Se as análises numéricas indicarem comportamento não convergente, deverá ser utilizada uma classificação padrão de zero (0).
8. Se não estiverem disponíveis análises de estabilidade de apoio, deverá ser atribuído um valor predefinido de 1.
9. A soma das classificações dos fatores individuais é a classificação da Análise de Estabilidade.

Fonte: Hawley e Cuning, 2017.

Na Pilha de Estéril Capão da Serra, não houve análise de estabilidade que se calculou o fator de segurança, desta maneira como recomendado pelo método, pegou-se os valores intermediários de 3,5 para estabilidade estática e 1,5 para estabilidade dinâmica, totalizando uma pontuação de 5. A pontuação máxima para esse parâmetro é 10.

Na pilha de estéril do Correia a análise de estabilidade foi realizada de acordo com o método de equilíbrio limite, utilizando dados do sismo, a estrutura possui um fator de segurança de 1,65, em condições de estabilidade, já na análise probabilística o valor mínimo de fator de segurança foi 1,35. Desta maneira temos como avaliação de

acordo com a tabela, o valor do fator de segurança dinâmico, adotando 7 no somatório. E para estática como não foi calculado, soma-se 3,5 adotando o valor mediano, como manda a tabela. Totalizando uma pontuação de 10,5 no total de 15.

4.7 Fatores de Construção e Classificação

A análise dos parâmetros de Fatores de Construção e Classificação será realizada de forma conjunta para as duas pilhas, Capão da Serra e Correia, após a apresentação da tabela que configura esse fator. Nesta classificação, serão analisados o método de construção e a taxa de carregamento, Tabela 9.

Tabela 9 - Fatores de construção e classificações

Fatores ¹	Classificação				
Método de construção ²	Método I	Método II	Método III	Método IV	Método V
Descrição	Sequência descendente com elevações únicas ou múltiplas (envolvendo completamente o terreno), construídas em terreno muito íngreme; alturas de elevação > 200 m; inclinações gerais da fundação > 32°	Sequência descendente com elevações únicas ou múltiplas (envolvendo completamente o terreno) construídas em terreno íngreme; alturas de elevação < 200 m; inclinações gerais da fundação de 25 a 32°	Sequência híbrida (combinação de descida e ascensão) projetada para evitar fundações nas extremidades das elevações em terrenos íngremes ou muito íngremes; alturas de elevação < 200 m; inclinações gerais da fundação > 25°	Sequência ascendente com várias elevações construídas em terreno moderado; alturas de elevação < 100 m; inclinações gerais da fundação de 15 a 25°	Sequência descendente ou ascendente em terreno suave ou plano; alturas de elevação < 50 m; inclinações gerais da fundação < 15°
Avaliação	0	2	4	6	8
Taxa de carregamento Volumétrico	Muito alta	Alto	Moderado	Baixo	Muito baixo
Taxa de carregamento ⁴ (m ³ /d/m)	> 500	150–500	50–150	15–50	<15
Taxa Carregamento em massa ⁵ (t/d/m)	> 250	75–250	25–75	7,5–25	<7,5
Taxa de avanço crista ⁶	> 500	150–500	50–150	15–50	<15
Avaliação	0	2	3.5	5	7

Fonte: Hawley e Cuning, 2017 (Continua).

Tabela 9 - Fatores de construção e classificações, continuação.

Classificação de Construção ⁷				Classificação máxima possível:	15
Notas: 1. Selecione uma classificação para cada fator. Quando mais de um critério for mostrado para um determinado fator, ou você não puder decidir entre duas classificações, selecione uma classificação média ou intermediária. 2. Selecione o método que melhor descreve a sequência de desenvolvimento. Quando a sequência de construção incluir atributos de mais de um método, escolha uma classificação intermediária. 3. A sequência descendente refere-se a aterros que são construídos de cima para baixo utilizando elevadores envolventes; sequência ascendente refere-se a aterros que são construídos em elevadores de baixo para cima. 4. Taxa de carregamento volumétrico = volume solto médio diário (m ³ /d) ÷ comprimento médio da crista ativa (m). Inclui fator de volume. 5. Taxa de carregamento de massa = massa média diária de aterro consignada ao depósito de resíduos ou pilha de armazenamento (t/d) ÷ comprimento médio da crista ativa (m). Assume uma densidade aparente nominal de 2,0 t/m ³ ; ajuste conforme necessário. 6. Taxa de avanço da crista = taxa média diária de avanço da crista (m/d) × altura média de elevação (m). 7. A soma das classificações dos fatores individuais é a classificação de Construção.					

Fonte: Hawley e Cuning, 2017.

Na Pilha de Estéril Capão da Serra, o método de construção é ascendente, com elevações em terreno suave ou plano, atribuindo 8 pontos. A taxa de subida é de 3,76 m³ por metro linear de crista por dia, enquadrando-se na categoria < 15, com pontuação de 7. A soma total para análise de estabilidade é de 15 pontos, em um máximo de 15.

A pilha do Correia foi construída de forma ascendente e possui altura de 70 metros, inclinação de 21,08% se encaixando na classificação, sequência ascendente com várias elevações construídas em terreno moderado; alturas de elevação < 100 m; inclinações gerais da fundação de 15 a 25, somando 6 na avaliação. A taxa de carregamento não foi informada, então considerou-se o valor médio de 3,5 no somatório. A pontuação máxima para esses fatores é 15.

4.8 Classificação de Desempenho

A análise dos parâmetros de Classificação de Desempenho será realizada de forma conjunta para as duas pilhas, Capão da Serra e Correia, após a apresentação da tabela que configura esse fator. Nesta classificação, será analisado o desempenho da estabilidade,

Tabela 10.

Tabela 10 - Classificações de desempenho

Fatores ¹	Classificação				
Desempenho da estabilidade	Muito ruim ²	Ruim ³	Justo	Bom	Muito Bom
Descrição	Instável; encerramentos substanciais a longo prazo ou trabalho corretivo significativo necessário; instabilidade em grande escala ($> 1 \times 10^6$ t); impacto significativo nas operações	Metastável a instável; encerramentos frequentes a curto prazo; falhas frequentes na borda ou no topo e/ou falhas locais na fundação, mas sem instabilidades em grande escala ($> 1 \times 10^6$ t); impacto moderado nas operações	Metastável a estável; encerramentos ocasionais devido a deformações/afundamentos; falhas ocasionais de pequenas partes ($< 1 \times 10^5$ t); impacto limitado nas operações; depósitos de resíduos e pilhas sem histórico de desempenho	Estábulo; pequenas deformações e/ou recalques; fechamentos raros; pequenas falhas raras; impacto insignificante nas operações	Muito estável; deformação insignificante/povoado; sem fechamentos; sem falhas; sem impacto nas operações
Avaliação	-15	-7.5	0	7.5	15
Classificação de desempenho ⁴				Classificação máxima possível:	15

Notas:

1. Selecione uma classificação para cada fator. Quando mais de um critério for mostrado para um determinado fator, ou você não puder decidir entre duas classificações, selecione uma classificação média ou intermediária.
2. Se o Desempenho de Estabilidade for considerado Muito Fraco, o despejo ou pilha de resíduos deverá ser classificado como WHC V (Perigo Muito Alto), independentemente do WSR calculado.
3. Se o Desempenho de Estabilidade for considerado Fraco, o depósito de resíduos ou pilha de resíduos deve ser classificado como WHC IV (Alto Perigo), a menos que o WSR seja ± 20 , caso em que deve ser classificado como WHC V (Muito Alto Perigo).
4. A soma das classificações dos fatores individuais é a Classificação de Desempenho.

Fonte: Hawley e Cuning, 2017.

Tanto para a Pilha de Estéril Capão da Serra, quanto para a Pilha de Estéril do Correia foi classificada como muito estável, com deformações insignificantes e sem histórico de falhas, atribuindo a pontuação máxima de 15 pontos.

4.9 Classificação Final

Após a análise detalhada das características geotécnicas e ambientais das pilhas de estéril, foi realizada uma classificação geral conforme os resultados obtidos nos capítulos anteriores.

A soma das pontuações atribuídas a cada grupo de fatores é denominada como a classificação de estabilidade de aterros e pilhas de armazenamento (WSR). Além de calcular a WSR geral, devem ser calculados dois índices componentes: o Índice de Geologia de Engenharia (EGI) e o Índice de Projeto e Desempenho (DPI). O EGI é igual à soma dos índices de Ambiente Regional, Condições de Fundação e Qualidade do Material e representa fatores relacionados à localização do local e às condições geológicas. O DPI é igual a somatório dos índices de Geometria e Massa, Análise de Estabilidade, Construção e Desempenho.

Para a classificação de estabilidade de aterros e pilhas de armazenamento (WSR), realizou-se uma somatória para classificar cada Pilha de Estéril. Para PDE Correia adquiriu-se os seguintes resultados, Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados PDE Correia

Fator	Pontuação
Configuração Regional	3,50
Condições de Fundação	9,00
Qualidade do Material	4,00
Geometria e Massa	8,00
Análise de Estabilidade	10,50
Construção	9,50
Desempenho	15,00
WSR	59,50

Fonte: Elaborado pela autora.

O resultado obtido foi 59,50, dessa forma, ela se encontra entre 40 e 60, significando perigo moderado. Resultando em uma classificação que se enquadra como baixo risco de perigo, de acordo com a Tabela 13 e Tabela 14.

Para a Pilha de Capão da Serra adquiriu-se os seguintes resultados, Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados PDE Capão da Serra

Fator	Pontuação
Configuração Regional	3,50
Condições de Fundação	8,50
Qualidade do Material	2,50
Geometria e Massa	6,00
Análise de Estabilidade	5,00
Construção	15,00
Desempenho	15,00
WSR	55,50

Fonte: Elaborado pela autora.

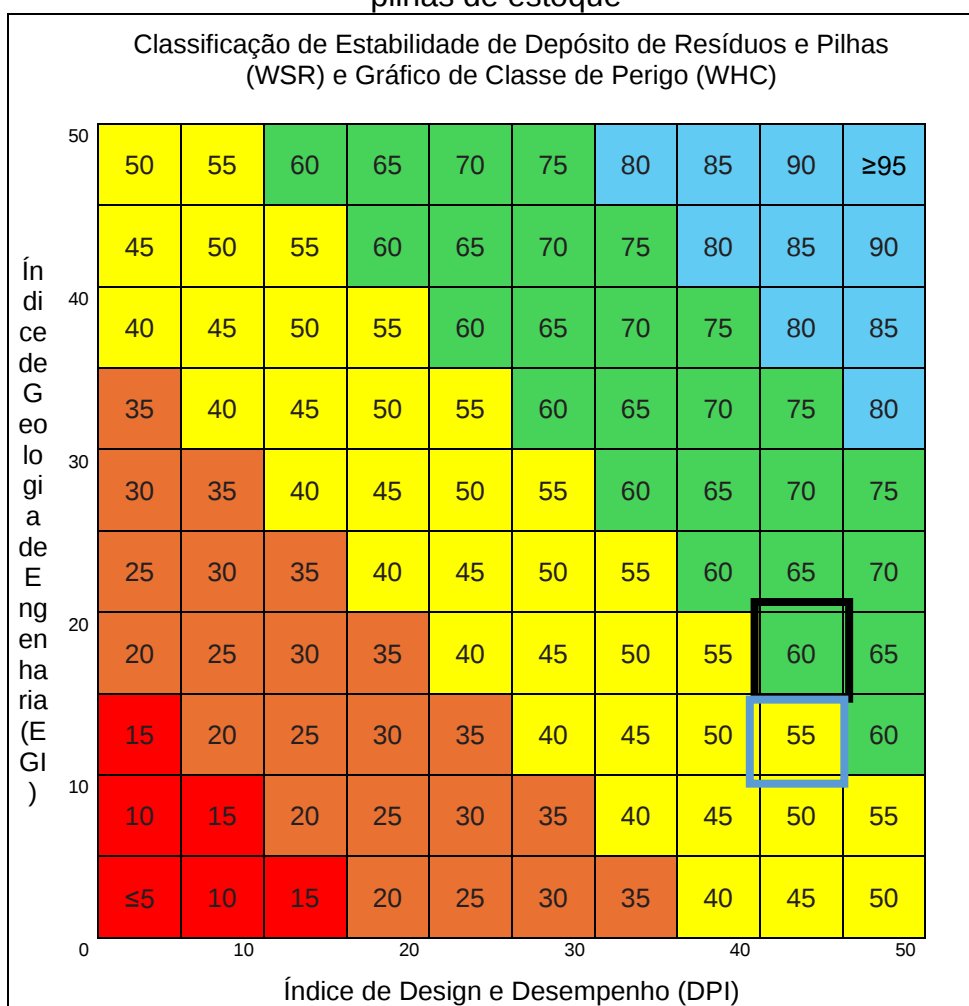
O resultado obtido foi 55,50, dessa forma entre 40 e 60, significando perigo moderado.

Para calcular o EGI somou-se os índices de Ambiente Regional, Condições de Fundação e Qualidade do Material, para PDE Correia obteve-se o resultado de 16,5 e para Capão da Serra 14,5.

Para calcular o DPI utilizou-se o somatório dos índices de Geometria e Massa, Análise de Estabilidade, Construção e Desempenho para PDE Correia obteve-se 43 como resultado, e para Capão da Serra 41.

Para essa classificação, foram utilizadas as tabelas 12 e 13, onde o retângulo em preto representa PDE Correia, e o retângulo azul, representa Capão da Serra:

Tabela 13 - Gráfico de classificação de estabilidade de depósitos de resíduos e pilhas de estoque



Fonte: Hawley e Cuning, 2017.

Tabela 14 - Classificação de Estabilidade de Depósitos de Resíduos e Pilhas de Estoque

WSR	WHC	Perigo de instabilidade
80–100	I	Risco muito baixo
60–80	II	Baixo risco
40–60	III	Risco Moderado
20–40	IV	Risco alto
<20	V	Risco Muito Alto

Fonte: Hawley e Cuning, 2017.

4.10 Avaliação dos Fator Precipitação Para Diferentes Regiões

Com o objetivo de realizar uma análise comparativa dos fatores de classificação regional em diferentes contextos climáticos do Brasil, foi feita uma reavaliação dos dados de precipitação, buscando identificar a influência desse fator sobre a classificação final de estabilidade. Para isso, as duas pilhas de estéril foram hipoteticamente realocadas para regiões distintas do país — uma onde os dados de precipitação são maiores, e outra onde são valores menores — permitindo observar como variações climáticas, especialmente relacionadas à precipitação, impactam os resultados do sistema WSRHC.

Para tanto, foram selecionados dois locais: Belém do Pará, que apresenta uma das maiores médias anuais de precipitação do país, com 2.894,60 mm/ano, conforme dados da ANA, e Xique-Xique, na Bahia, onde a média anual de chuva é de 485,95 mm/ano segundo dados da ANA. Evidencia-se, assim, uma discrepância significativa entre os valores registrados. Em seguida, serão reavaliadas as pilhas previamente estudadas, mantendo-se as mesmas condições de estrutura e configuração, porém alterando a localização, a fim de se concentrar especificamente na influência dos dados pluviométricos sobre a classificação.

Afim de aplicar essa mudança, na classificação da pilha a Tabela 15 foi adaptada para manter apenas os valores da precipitação de forma a deixar mais clara a visualização. A reavaliação será apresentada nos dois próximos tópicos.

Tabela 15 - Fatores e classificações de configuração regional (adaptada)

Fatores¹	Classificação				
Precipitação	Muito alto	Alto	Moderado	Baixo	Muito baixo
Precipitação média anual: precipitação (mm)	> 2000	1000–2000	350–1000	100–350	<100
Precipitação média anual: queda de neve (cm)	> 200	100–200	35–100	10–35	<10
Precipitação total anual: precipitação equivalente (mm)	> 2000	1000–2000	350–1000	100–350	<100
Avaliação²	0	2	4	6	8
Avaliação de configuração regional³	Avaliação máxima possível:				10

Notas:

1. Selecione uma classificação para cada fator. Quando mais de um critério é mostrado para um dado fator, ou se você não consegue decidir entre duas classificações, selecione uma média ou classificação intermediária.
2. Para locais que sofrem com chuvas sazonais intensas ou eventos rápidos de escoamento, diminua o valor da classificação em 1 ponto.
3. A soma das classificações para os fatores individuais é a classificação do Ambiente Regional.

4.10.1 Pilha de Estéril Correia

Para a pilha de estéril do Correia, primeiro, encontrou-se a precipitação média anual de 1.362,58 mm/ano (Agência Nacional das Águas- ANA), para o Município de Barão de Cocais de onde se origina a pilha, foi classificado como alta, com pontuação de 2. Na nova avaliação para o município de Belém do Pará, com uma média de 2.894,60 mm/ano se enquadra em muito alto, do qual são valores acima de 2000mm/ano, mudando a classificação para muito alto, somando 0 pontos na classificação. E para o município de Xique Xique o valor da média anual foi de 485,95 mm/ano se enquadrando no moderado, sendo de 350 a 1000 mm/ano, somando 4 pontos na pontuação total. Para os dados de sismicidade, foi considerado os resultados obtidos anteriormente, sendo classificado como baixa, somando 1,5 pontos.

Deste modo temos que a classificação total para PDE Correia, para a localização em Belém do Pará na Tabela 16 e para Xique Xique na

Tabela 17.

Tabela 16 - Resultados PDE Correia em Belém do Pará

Fator	Pontuação
Configuração Regional	1,5
Condições de Fundação	9,00
Qualidade do Material	4,00
Geometria e Massa	8,00
Análise de Estabilidade	10,50
Construção	9,50
Desempenho	15,00
WSR	57,50

Tabela 17 - Resultados PDE Correia em Xique Xique

Fator	Pontuação
Configuração Regional	5,50
Condições de Fundação	9,00
Qualidade do Material	4,00
Geometria e Massa	8,00
Análise de Estabilidade	10,50
Construção	9,50
Desempenho	15,00
WSR	61,5

Para calcular o EGI somou-se os índices de Ambiente Regional, Condições de Fundação e Qualidade do Material, para Belém do Pará obteve-se o resultado de 14,5 e para Xique Xique 18,5.

Para calcular o DPI utilizou-se o somatório dos índices de Geometria e Massa, Análise de Estabilidade, Construção e Desempenho para Belém do Pará obteve-se 43 como resultado, e para Xique Xique 43.

Dessa forma, para a Pilha de Estéril Correia em Belém do Pará temos a classificação de risco moderado, e para a pilha em Xique Xique o risco é baixo, nesse caso já é possível observar que o local e as condições climáticas tem influência na classificação final.

4.10.2 Pilha de Estéril Capão da Serra

Para a pilha de estéril do Capão da Serra, primeiro, encontrou-se a precipitação média anual de 1.537,10 mm/ano (Agência Nacional das Águas E Saneamento

Básico, 2025), para o Município de Nova Lima de onde se origina a pilha, foi classificado como alta, com pontuação de 2. Na nova avaliação para o município de Belém do Pará, com uma média de 2.894,60 mm/ano se enquadra em muito alto, do qual são valores acima de 2000mm/ano, mudando a classificação para muito alto, somando 0 pontos na classificação. E para o município de Xique Xique o valor da média anual foi de 485,95 mm/ano se enquadrando no moderado, sendo de 350 a 1000 mm/ano, somando 4 pontos na pontuação total. Para os dados de sismicidade, foi considerado os resultados obtidos anteriormente, sendo classificado como baixa, somando 1,5 pontos.

Deste modo temos que a classificação total para Capão da Serra, para a localização em Belém do Pará na Tabela 18 e para Xique Xique na Tabela 19..

Tabela 18 - Resultados PDE Capão da Serra em Belém do Pará

Fator	Pontuação
Configuração Regional	1,50
Condições de Fundação	8,50
Qualidade do Material	2,50
Geometria e Massa	6,00
Análise de Estabilidade	5,00
Construção	15,00
Desempenho	15,00
WSR	53,50

Tabela 19 - Resultados PDE Capão da Serra em Xique Xique

Fator	Pontuação
Configuração Regional	5,50
Condições de Fundação	8,50
Qualidade do Material	2,50
Geometria e Massa	6,00
Análise de Estabilidade	5,00
Construção	15,00
Desempenho	15,00
WSR	57,50

Para calcular o EGI somou-se os índices de Ambiente Regional, Condições de Fundação e Qualidade do Material, para Belém do Pará obteve-se o resultado de 12,5 e para Xique Xique 16,5.

Para calcular o DPI utilizou-se o somatório dos índices de Geometria e Massa, Análise de Estabilidade, Construção e Desempenho para Belém do Pará obteve-se 41 como resultado, e para Xique Xique 41.

Dessa forma, para a Pilha de Estéril Capão da Serra em Belém do Pará temos a classificação de risco moderado, e para a pilha em Xique Xique o risco é baixo, nesse caso também é possível observar que o local e as condições climáticas tem influência na classificação final.

5 CONCLUSÃO

A análise da estabilidade das pilhas de estéril Capão da Serra e Correia, utilizando o Sistema de Avaliação de Estabilidade e Classificação de Perigos WSRHC, revelou importantes percepções sobre a segurança geotécnica dessas estruturas. A metodologia aplicada possibilitou avaliar detalhadamente os fatores que influenciam a estabilidade—abrangendo aspectos geológicos, hidrológicos e construtivos—embora o objetivo deste estudo seja a descrição e compreensão do método, e não uma análise operacional real, uma vez que as informações utilizadas foram extraídas de estudos anteriores (Pereira, 2009; Aragão, 2008) e podem não refletir as condições atuais das pilhas.

Na Pilha de Estéril Capão da Serra, localizada na Mina de Tamanduá, em Nova Lima (MG), a classificação geral de estabilidade (WSR) foi de 55,50 pontos, indicando perigo moderado. A análise evidenciou uma fundação resistente e uma construção adequada, embora a qualidade do material e a própria análise de estabilidade apresentem valores intermediários. Já a Pilha de Estéril do Correia, situada na Mina de Gongo Soco, em Barão de Cocais (MG), obteve um WSR de 59,50 pontos, também configurando perigo moderado, com condições favoráveis de configuração regional, fundação e desempenho estável, mas com aspectos relativos à qualidade do material que demandam atenção.

A comparação entre as pilhas evidencia a significativa influência dos dados pluviométricos na classificação final de risco. Ao reavaliar os índices regionais, observou-se que a realocação hipotética para regiões com diferentes médias de precipitação—Belém do Pará, com 2.894,60 mm/ano, e Xique-Xique, com 485,95 mm/ano (dados da ANA)—altera a pontuação dos fatores regionais. Em Belém, o elevado aporte pluviométrico reduz o valor final do WSR, elevando o risco classificado para moderado, enquanto em Xique-Xique, o menor aporte contribui para uma classificação de risco inferior, mantendo constantes os demais parâmetros, como condições de fundação e sismicidade.

Por fim, apesar de a classificação WSRHC fornecer uma análise confiável do estado das pilhas estudadas, ela reflete as condições vigentes no momento da avaliação e pode ser alterada por modificações na geometria, nas condições

hidrogeológicas ou em função de eventos extremos, como chuvas intensas e sismos. Ressalta-se, ainda, que os fatores de liquefação, embora considerados relevantes na metodologia, podem assumir um valor mínimo quando aplicados a pilhas de estéril, já que esse tipo de material, por sua natureza granular e boa capacidade de drenagem, apresenta baixa suscetibilidade à liquefação. Portanto, recomenda-se a reavaliação periódica da estabilidade—preferencialmente anualmente ou após intervenções significativas—para assegurar o monitoramento contínuo dos riscos. Destaca-se, por fim, que os resultados e abordagens apresentados neste trabalho possuem caráter exclusivamente acadêmico, não devendo ser utilizados como base para análises ou projetos das estruturas investigadas.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 13029:2017. In: Normas técnicas de mineração. Rio de Janeiro, 2017. p. 12-15.

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Índices e Estatísticas Hidrometeorológicas - Estação Pluviométrica (Dados Consistidos) - número de anos da série. Disponível em: <https://dadosabertos.ana.gov.br/datasets/1a111215d36c424c9ff85ede46ada968/explore?location=-19.947133%2C-43.426963%2C12.00>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Mapa de precipitação média anual no Brasil. Belém do Pará, 2025. Disponível em: <https://dadosabertos.ana.gov.br/datasets/1a111215d36c424c9ff85ede46ada968/explore?location=-1.455136%2C-48.500240%2C14.38>. Acesso em: 15 abr. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Dados abertos – Precipitação. Disponível em: <https://dadosabertos.ana.gov.br/datasets/1a111215d36c424c9ff85ede46ada968/explore?location=-10.953001%2C-42.686564%2C9.92>. Acesso em: 15 abr. 2025

Agência Nacional de Mineração (ANM). (2021). Resolução ANM nº 85, de 2 de dezembro de 2021. Diário Oficial da União. Disponível em: https://anmlegis.datalegis.net/action/UrlPublicasAction.php?acao=abrirAtoPublico&num_ato=00000085&sgl_tipo=RES&sgl_orgao=DC/ANM/MME&vlr_ano=2021&seq_ato=000&cod_tipo=&des_item=&des_item_fim=&num_linha=.

Agência Nacional de Mineração (ANM). Comunicado sobre deslizamento de pilha de rejeitos na mina Turmalina em Minas Gerais. 2025. Disponível em: < <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/noticias/comunicado-sobre-deslizamento-de-pilha-de-rejeitos-na-mina-turmalina-em-minas-gerais>.>

ANDRADE, M. L. A.; CUNHA, L. M.S; VIEIRA, J. R. M. O mercado mundial de minério de ferro e a inserção brasileira. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 2, p. [88] -107, nov. 1995.

ARAGÃO, Giani Aparcida Santana. *Classificação de pilhas de estéril na mineração de ferro.* 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 200

BOSCOV, Maria Eugenia Gimenez. Geotecnia Ambiental. São Paulo: Oficina de Textos, 2008

CABRAL, Alexandre Raphael; ZEH, Armin; KOGLIN, Nikola; GOMES JR., Antônio Augusto Seabra; VIANA, Deiwys José; LEHMANN, Bernd. Dating the Itabira iron formation, Quadrilátero Ferrífero of Minas Gerais, Brazil, at 2.65 Ga: Depositional U–Pb age of zircon from a metavolcanic layer. Elsevier, [S. l.], p. 40-45, 7 dez. 2012.

CARVALHO, David de. Barragens: uma introdução para graduandos. Em atualização. Campinas: UNICAMP, Faculdade de Engenharia Agrícola, maio 2011. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/81389209/barragens-principais-elementos>

FIGUEIRÔA, Silvia F. de M. Mineração no Brasil: aspectos técnicos e científicos de sua história na Colônia e no Império (séculos XVIII-XIX). América Latina en la Historia Económica, v. 1, n. 1, p. 41-55, 1994.

FORGEARINI, L. A. Gestão de estéril em mineração: métodos de cálculo e disposição. 2015. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

FRÓES, Igor Azevedo. Avaliação técnica de pilhas de estéreis. 2014. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Goiás, Campus Catalão, Catalão, 2014

GOVERNO DA ÍNDIA. Central Water Commission. Guidelines for Instrumentation of Large Dams. Nova Delhi: Central Dam Safety Organization, 2017. 66 p.

HAWLEY, Mark; CUNNING, John. *Guidelines for Mine Waste Dump and Stockpile Design.* Clayton South: CSIRO Publishing, 2017. Cap. 1, 3.

IBRAM. Mineração em Números 2023. Brasília: Instituto Brasileiro de Mineração, 2024.

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração. Publicações. Disponível em: <<https://www.ibram.org.br/publicacoes/>>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Segurança: mais duas barragens da Vale deixam situação de emergência e têm estabilidade atestada. 2024. Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/seguranca-mais-duas-barragens-da-vale-deixam-situacao-de-emergencia-e-tem-estabilidade-atestada/>. Acesso em: out. 2024.

Lima, H. M., & Marques, J. E. (2013). Environmental and geotechnical impacts of waste dumps in mining areas. *Journal of Geochemical Exploration*, 132, 1-10.

LUZ, Adão Benvindo (Ed.); SAMPAIO, João Alves (Ed.); ALMEIDA, Salvador Luiz Matos (Ed.). Tratamento de Minérios 2010. 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 932p.

MANUELZÃO (Projeto Manuelzão). Estrutura da Mina Pau Branco da Vallourec se rompe em Nova Lima., [2024]. Disponível em: <https://manuelzao.ufmg.br/estrutura-da-mina-pau-branco-da-vallourec-se-rompe-em-nova-lima/>.

NOTÍCIA - Udesc Joinville promove seminário sobre estabilidade geotécnica de Pilha de Estéril. Disponível em:< https://www.udesc.br/noticia/udesc_joinville_promove_seminario_sobre_estabilidade_geotecnica_de>.

PEREIRA, Wellington Luiz. Análise da estabilidade da pilha de estéril do Correia - Mina de Gongo Soco - para implantação da ferrovia Estrada de Ferro Vitória Minas - EFVM. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, ano.

PEREIRA, L. M. Instrumentação e monitoramento de pilhas de estéril e de rejeitos. Effyia Consultoria, 2020. Disponível em: <https://effyia.com.br/instrumentacao-e-monitoramento-de-pilhas-de-esteril-e-de-rejeitos/>. Acesso em: 15 abr. 2025.

PRESOTTI, Ednelson da Silva. Influência do Teor de Ferro nos Parâmetros de Resistência de um Rejeito de Minério de Ferro. Ouro Preto, 2002 Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2002.

SILVA, C. A. Revisão dos principais instrumentos utilizados para monitoramento geotécnico. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2019. Disponível em: https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/6856/5/MONOGRAFIA_Revis%C3%A3oInstrumenta%C3%A7%C3%A3oGeot%C3%A9cnica.pdf. Acesso em: 15 abr. 2025

SAFF Engenharia. Níveis de Controle para Instrumentação de Estruturas Geotécnicas. Disponível em: <https://saffengenharia.com.br/niveis-de-controle-para-instrumentacao-de-estruturas-geotecnicas/>.

SAFF Engenharia. Pilhas de estéril e rejeito: devemos nos preocupar com elas? Disponível em: < <https://saffengenharia.com.br/pilhas-de-esteril-e-rejeito-devemos-nos-preocupar-com-elas/> >.

SOARES, Lindolfo. Barragem de rejeitos. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. Comunicação Técnica elaborada para o livro Tratamento de Minérios, 5ª edição, Capítulo 19, p. 831-896. Editores: Adão B. da Luz, João Alves Sampaio e Silvia Cristina A. França.

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA. Udesc Joinville promove seminário sobre estabilidade geotécnica de Pilha de Estéril. 29 set. 2021. Disponível em: http://udesc.br/cct/noticia/udesc_joinville_promove_seminario_sobre_estabilidade_geotecnica_de_pilha_de_esteril. Acesso em: set. 2024.

VAINA, Fonte. Mina Turmalina provocou desabastecimento de água na região; rejeitos desabaram, mineradora. UAI, Belo Horizonte, 31 jan. 2025. Disponível em: <https://vainafonte.uai.com.br/mina-turmalina-provocou-desabastecimento-agua-na-regiao-rejeitos-desabaram-mineradora/>. Acesso em: 31 jan. 2025.

Williams, D. J. (2017). Waste rock dumps: Geotechnical and geohydrological design. In Mine waste management. CRC Press.

Younger, P. L., Banwart, S. A., & Hedin, R. S. (2002). Mine water: Hydrology, pollution, remediation. Kluwer Academic Publishers