

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

AVALIAÇÃO A LONGO PRAZO DA ESTABILIDADE DE
PILHAS DE REJEITO DE MINERAÇÃO

GIOVANNA BAPTISTA DO NASCIMENTO

ORIENTADOR: MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO

PROJETO FINAL 2

BRASÍLIA/DF: Maio – 2022

SUMÁRIO

Capítulo	Página
1 INTRODUÇÃO	9
1.1 CONTEXTO GERAL	9
1.2 OBJETIVOS	11
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 IMPACTOS AMBIENTAIS NA MINERAÇÃO	11
2.1.1 FALHAS NA LEGISLAÇÃO AMBIENTAL E RELAÇÃO COM DESASTRES AMBIENTAIS	15
2.2 SUSTENTABILIDADE NA MINERAÇÃO	13
2.3 GESTÃO DE RESÍDUOS E BARRAGENS DE REJEITO	16
2.3.1 CONCEITUAÇÃO BÁSICA	18
2.3.2 SEGURANÇA DE BARRAGENS DE REJEITO	18
2.3.3 CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITO	20
2.3.4 DESCOMISSIONAMENTO E DESCARACTERIZAÇÃO	24
2.3.5 TECNOLOGIAS ALTERNATIVAS DE DEPOSIÇÃO DE REJEITOS	24
2.4 PILHAS DE REJEITO	25
2.5 EMBASAMENTO TEÓRICO DAS ANÁLISES	27
2.5.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	27
2.5.2 MÉTODO DO EQUILÍBRIO LIMITE	27
2.5.3 VARIÁVEIS CLIMÁTICAS COMO CONDIÇÕES DE CONTORNO	28
2.5.3.1 EVAPORAÇÃO	27
2.5.3.2 PRECIPITAÇÃO E SÉRIE HISTÓRICA PLUVIOMÉTRICA	27
2.5.4 PROPRIEDADES DO REJEITO	28
3. METODOLOGIA	31
3.1 ATIVIDADES	31

3.2 FERRAMENTAS UTILIZADAS	32
3.2.1 SEEP/W	33
3.2.2 SIGMA/W	35
3.2.3 SLOPE/W	36
3.2.3 INMET	38
3.2.4 CLIMATE-DATA.ORG	38
4. RESULTADOS	39
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA PILHA DE REJEITOS FICTÍCIA	39
4.2 ANÁLISE ACOPLADA	42
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	46
5.1.CONCLUSÕES	46
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1.1 - Informe Mineral do 1º trimestre de 2021	10
2.1 - Registro do Rio Tinto em Huelva	8
2.2 - Caracterização cartográfica da área desflorestada em 1984 - Carajás	12
2.3 - Caracterização cartográfica da área desflorestada entre 2008 e 2012 - Carajás	13
2.4 - Vista geral da mina de Serra Pelada por Sebastião Salgado	15
2.5 - Distribuição espacial de incidentes de ruptura de barragens de acordo com o mineral primário de cada uma em uma escala global	21
2.6 - Dados atuais de barragens por categoria de risco	22
2.7 - Barragem de rejeito com alteamento a montante	22
2.8 - Barragem de rejeito com alteamento a jusante	23
2.9 - Barragem de rejeito com alteamento de linha de centro	23
2.10 Exemplo de análise de estabilidade para subsidiar a definição da zona estruturante na pilha de rejeito filtrados.	26
3.1 - Mapa de processos das atividades	31
3.2 - Dados de entrada das condições de contorno de massa da interação solo-atmosfera	33
3.3 – Condições de contorno na relação solo- atmosfera	33
3.4 – Condições de contorno referentes à precipitação	35
3.5 – Análise de tensão-deformação in situ de uma barragem pelo SIGMA/W	35
3.6 - Dados de entrada com tipo de análise Morgenstren-Price	36
3.6 - Dados de entrada das condições de contorno de massa da interação solo-atmosfera	34
3.5 – Análise de tensão-deformação in situ de uma barragem pelo SIGMA/W	36
3.7 - Definição de dados do tipo de superfície	37
3.8 - Cálculo do fator de segurança	37

4.1- Função curva de permeabilidade dos materiais	40
4.2- Entrada de dados de tensão da fundação da pilha de rejeitos	40
4.3- Curva de teor volumétrico de água	42
4.4- Geometria da pilha de rejeitos	42
4.5- Divisão das camadas da pilha por ano	43
4.6- Aplicação das condições de limite de deslocamento fixo	43
4.7- Definição de propriedades mecânicas do rejeito	44
4.8- Definição de propriedades hidráulicas do rejeito	44
4.9- Aplicação dos materiais nas regiões	45
4.10- Definição de malha	45
4.11 - Análise SLOPE/W para o cálculo do fator de segurança regiões	46
4.12 - Gráfico com fatores de segurança do Cenário 1 e 2	46
4.13 - Cenário 1 - Mosaico de poropressões dos anos 1,4, 7 e 10	47
4.14 - Cenário 1 - Mosaico de tensões verticais efetivas dos anos 1,4, 7 e 10	47

DEDICATÓRIA

À minha família.

"Nada na vida deve ser temido, somente compreendido. Agora é hora de compreender mais para temer menos."

Marie Curie

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho final foi concebido com muita resiliência e ao longo não apenas do último ano mas de toda a minha trajetória na Universidade de Brasília eu não posso deixar de agradecer pela oportunidade que tive em experienciar o melhor curso de engenharia ambiental do país e às principais pessoas que fizeram parte dessa jornada.

À meus pais e irmãos, pelo incentivo, apoio nos momentos mais difíceis, inspiração e amor incondicional.

À minha querida amiga Luisa Daldegan pelo apoio, inspiração e pela ousadia de ter criado, comigo, a Dois Pontos. Saiba que nossa microempresa de educação me trouxe ainda mais paixão pela engenharia, habilidades além de crescimento pessoal e profissional como nenhuma outra experiência nos últimos anos!

À Amanda Araújo, João Pedro Doederlein, Sofia Emi, Júlia Namie e Matheus Mendes pelo infinito apoio - emocional e técnico - no período de produção desse trabalho e nos últimos treze anos de amizade. Ao Vinícius Tasso, Arthur Meneses e Lorena Campos pelas amizades valiosas e companhia nesse período de conclusão de curso e em toda a nossa história.

À Cristine Gobbato por seu carinho e, especialmente, por ter plantado em mim, ainda no pré-vestibular, a semente de curiosidade e conhecimento sobre a área ambiental e de saneamento que me direcionou ao curso dos meus sonhos.

Aos colegas profissionais que tive a sorte de encontrar no caminho de todas as experiências profissionais e pessoais que me trouxeram para a geotecnia em mineração, com agradecimento especial à algumas pessoas:

À Mariana Volkmer e toda a equipe da Welt por todas as trocas na minha primeira experiência de estágio da graduação. Em especial à Mariana por me mostrar a potência que uma mulher pode ter no setor de engenharia, por tanto ter me ensinado sobre liderança e empreendedorismo com seu brilhante exemplo.

Ao meu eterno veterano Hugo Vogt Volkmer pelas valiosas trocas que tivemos durante a minha graduação. Boa parte da profissional que me tornei foi construída trilhando caminhos sobre os quais conversamos. Obrigada pela inspiração e amizade inabalável!

Karina Bassan, Erika Radespiel e equipe da CAESB pelos 2 incríveis anos de trabalho conjunto na área de educação ambiental. Vocês me abriram a mente e o coração para um olhar mais humano dentro das questões ambientais e, por isso, serei eternamente grata! À Karina, especialmente, agradeço pela paciência e empoderamento que tanto me transformaram pessoal e profissionalmente.

À gestão de 2020-2021 da Flua Consultoria Ambiental, ao Dextra, ao Coletivo Perene e à gestão da SiNUS 19 e 20 pelas oportunidades e confiança em mim.

Ao prezado professor Carlos Lima pelas valiosas trocas e ensinamentos que enriqueceram muito esse projeto final, além de, em suas aulas de Climatologia Aplicada e Estatística Aplicada à Engenharia Ambiental, ter me garantido atenciosas oportunidades de amadurecimento profissional.

Ao professor Rafael Shayani de engenharia elétrica pelas lições passadas e pelo inabalável esforço em transformar estudantes de engenharia em profissionais questionadores e orientados ao desenvolvimento sustentável.

Aos(às) professores(as) Ariuska Amorim, Cristina Brandão, Ricardo Minotti e Yovanka Perez por terem moldado meu perfil profissional, aumentando minha paixão pela docência, pela área ambiental e por tantos ensinamentos que não caberiam nesse agradecimento. Vocês foram os responsáveis por solidificar meu olhar centrado nas pessoas. Em especial, às professoras Ariuska e Yovanka, na função de coordenadoras do curso de engenharia ambiental, pelo olhar humanizado e gentil que tiveram comigo quando mais precisei.

Ao meu parceiro, Thiago Ribeiro Nicolaidis, pelo apoio, por ser meu melhor exemplo de engenheiro apaixonado pela área numérica mas principalmente por ter transformado os últimos períodos da minha graduação nos meses mais felizes da minha vida. O seu amor, apoio, inspiração e experiência garantiram leveza ao meu processo. Obrigada por tanto!

E, por último, agradeço meu prezado orientador Manoel Porfírio por toda a paciência, ética profissional, ensinamentos, gentileza e pela fé em mim e no meu trabalho. Obrigada por ser meu principal exemplo do poder transformador da educação!

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO GERAL

A relação entre os seres humanos e os metais remonta à Pré-História. No período de 6.000 AC aconteceu a época conhecida como Idade dos Metais. Essa época se caracterizou pelo surgimento das primeiras cidades, aumento da produção agrícola e, como consequência, também da população. Os metais, enquanto instrumentos de trabalho, transformaram atividades cotidianas como agricultura e fabricação de objetos em processos mais eficientes.

Para além dos metais, atualmente define-se mineração como a extração, elaboração e beneficiamento de minerais que se encontram em estado natural: sólido, como o carvão e outros; líquido, como o petróleo bruto; e gasoso, como o gás natural. Inclui a exploração de minas (subterrâneas e de superfície), pedreiras e poços e todas as atividades de preparo e beneficiamento do minério, a fim de torná-lo comercializável.

O setor de mineração é essencial para suprir as necessidades da sociedade contemporânea e pode contribuir grandemente para o desenvolvimento econômico de uma nação. Esse setor também contribui de forma decisiva para o bem-estar e a melhoria da qualidade de vida das presentes e futuras gerações e é fundamental para o desenvolvimento de uma sociedade equânime. Esses objetivos são atingidos quando a mineração é feita tendo em vista os preceitos do desenvolvimento sustentável.

Desenvolvimento sustentável é um conceito que vem sofrendo alterações ao longo do tempo. John Elkington, autor e representante do movimento de sustentabilidade corporativa, definiu o tripé da sustentabilidade (Triple Bottom Line) em 1994. Ele defende que o desenvolvimento sustentável deve ser economicamente viável, socialmente justo e ambientalmente correto. Levando isso em consideração, o presente trabalho traz o conceito do tripé da sustentabilidade como essência do desenvolvimento sustentável dentro do contexto da mineração.

A História do Brasil tem íntima relação com a busca e o aproveitamento dos seus recursos minerais, remontando ao período colonial com a busca pelo ouro no interior do país. Os recursos minerais brasileiros sempre contribuíram com importantes insumos para a economia nacional. Ao longo da nossa história, novas descobertas de depósitos minerais metálicos ocorreram e substâncias como o manganês e o ferro ganharam maior importância. Tais mudanças tiveram impacto relevante na economia nacional e foram fundamentais para fomentar o processo de industrialização brasileiro.

Hoje, o Brasil é um grande produtor mineral, rico em diversos minérios. Segundo dados do Anuário Mineral Brasileiro de 2020, produzido pela Agência Nacional de

Mineração (ANM), há, no país, a produção de cerca de 37 substâncias metálicas. Essas substâncias da classe dos metálicos responderam por cerca de 80% do valor total da produção mineral brasileira em 2019. Apenas no ano de 2019, o valor da produção combinado do alumínio, cobre, cromo, estanho, ferro, manganês, nióbio, níquel, ouro, vanádio e zinco totalizou 129 bilhões de reais. Dados da Agência Nacional de Mineração apontam que, apesar do cenário econômico negativo que o mundo enfrenta com a pandemia, a indústria brasileira de mineração cresceu em 2020 e 2021. Isso pode ser verificado pela Figura 1.1 que representa o informe mineral do 1º trimestre de 2021.

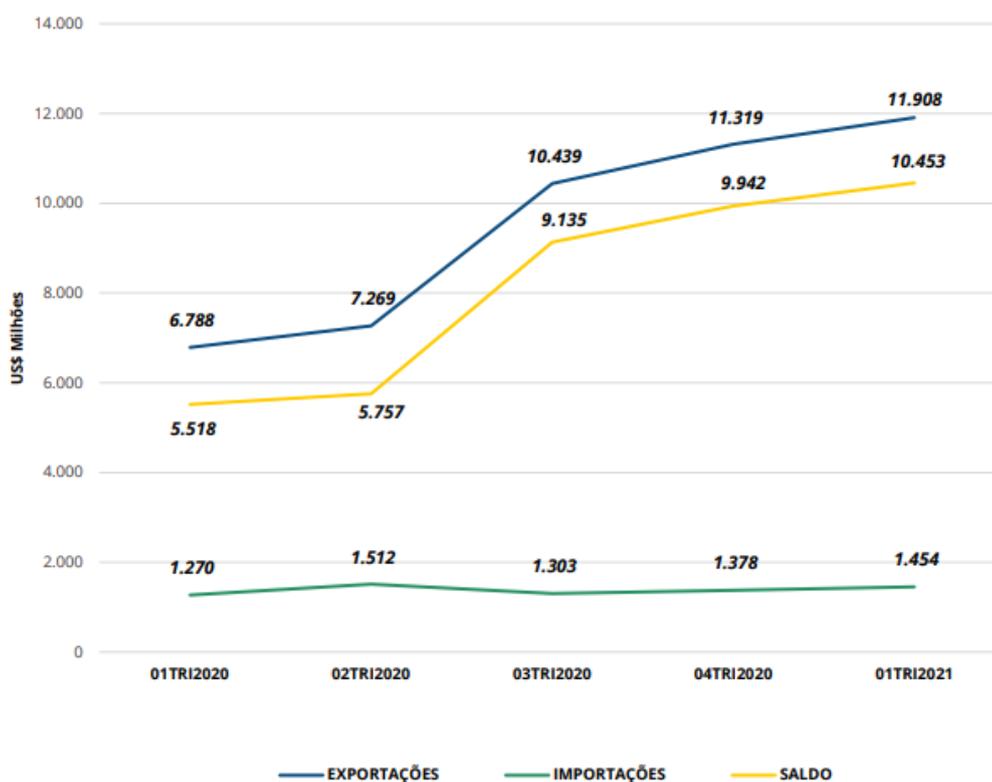


Figura 1.1 -Informe Mineral do 1º trimestre de 2021. (ANM, 2021)

Com o desenvolvimento da utilização de recursos minerais, a produção e deposição de rejeitos tornou-se um fator importante no desenvolvimento sustentável da indústria de mineração. Essa disposição deve ocorrer sem colocar em perigo a atividade de mineração adjacente ou a ecologia da área próxima às minas.

Em 2021, segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (Ibram), o saldo mineral correspondeu a 80% do saldo comercial brasileiro em 2021, que foi de US\$ 61 bilhões. A atividade de mineração no Brasil é essencial para o crescimento econômico e justifica, então, a busca por soluções para garantir a segurança dos processos de mineração sob o olhar do desenvolvimento sustentável. Diante desse cenário surge a problemática: Onde e

como realizar a deposição dos rejeitos de mineração de forma eficiente e sustentável? O presente trabalho busca responder essa pergunta sob o foco da solução apresentada pelas pilhas de rejeito e a estabilidade dessas estruturas a longo prazo considerando variáveis climatológicas.

1.2 OBJETIVOS

Avaliar os comportamentos hidráulicos e mecânicos de uma pilha de rejeito fictícia considerando a interação atmosfera-rejeito no longo prazo.

Além deste, os objetivos específicos são:

- a) Obter dados climatológicos de regiões onde pilhas de rejeitos estão sendo implementadas, mais especificamente série pluviométrica no quadrilátero ferrífero.
- b) Avaliar potenciais de ferramentas para as análises desejadas, ou seja, análises de fluxo considerando a atmosfera como condição de contorno;
- c) Avaliar a estabilidade de uma pilha de rejeito ao longo de dez anos considerando as variações no campo de poropressões advindas das análises de fluxo.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O Capítulo 1 desse trabalho apresenta uma breve introdução à organização do mesmo. No Capítulo 2 será apresentada a revisão bibliográfica do presente trabalho, onde serão apresentadas informações a respeito dos impactos ambientais na mineração e um breve histórico da legislação ambiental no país e de como ela se relaciona com desastres ambientais. Nesse Capítulo há, também, os temas de sustentabilidade na mineração (2.2), gestão de resíduos da mineração, segurança de barragens de rejeito e descomissionamento (2.3). A revisão bibliográfica acerca de pilhas de rejeito e o embasamento teórico das análises de estabilidade de uma pilha fictícia se encontram ainda no Capítulo 2, no segmento 2.4 e 2.5, respectivamente. No Capítulo 3 há a descrição da metodologia, incluindo as ferramentas utilizadas. O Capítulo 4 trata dos resultados e o Capítulo 5 traz as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 IMPACTOS AMBIENTAIS NA MINERAÇÃO

Ao passo que a indústria de mineração é essencial para o desenvolvimento econômico global e para suprir as necessidades da sociedade contemporânea, apresenta grande potencial de impactos ambientais negativos quando realizada de maneira incorreta, seja na falta de planejamento ou na ausência de fiscalização. Desde a época colonial há históricos da degradação da paisagem, do desmatamento, da poluição e contaminação dos recursos hídricos, da contaminação e compactação do solo, redução da biodiversidade, entre outros fatores que afetam diretamente o meio ambiente. A mineração carrega consigo o potencial de deixar um legado de poluição ambiental que pode durar milhares de anos. Isso pode ser verificado no caso do estuário do Rio Tinto, na região de Huelva na Espanha, retratado na Figura 2.1. Verifica-se pelo trabalho intitulado *4500-year-old mining pollution in Southwestern Spain: Long-Term implications for modern mining pollution* (Leblanc, 2000) que ainda hoje nesse rio está presente a contaminação das águas superficiais por mineração datada de até 4500 anos atrás.



Figura 2.1 -Registro do Rio Tinto em Huelva (Souza, 2016).

Os impactos ambientais que podem ser deixados pela mineração não se restringem à qualidade da água. Um caso notório de desmatamento é o causado pela mineração praticada na Flona Carajás, no Pará. Carajás é conhecida como a maior mina de minério de

ferro a céu aberto do mundo e se localiza dentro da Amazônia Legal. As figuras 2.2 e 2.3 capturadas pelo satélite LandSat 5 de 1984 e 2012, revelam a intensa atividade antrópica na área do entorno ao projeto Carajás, que, em menos de três décadas, praticamente eliminou toda a floresta nativa existente.

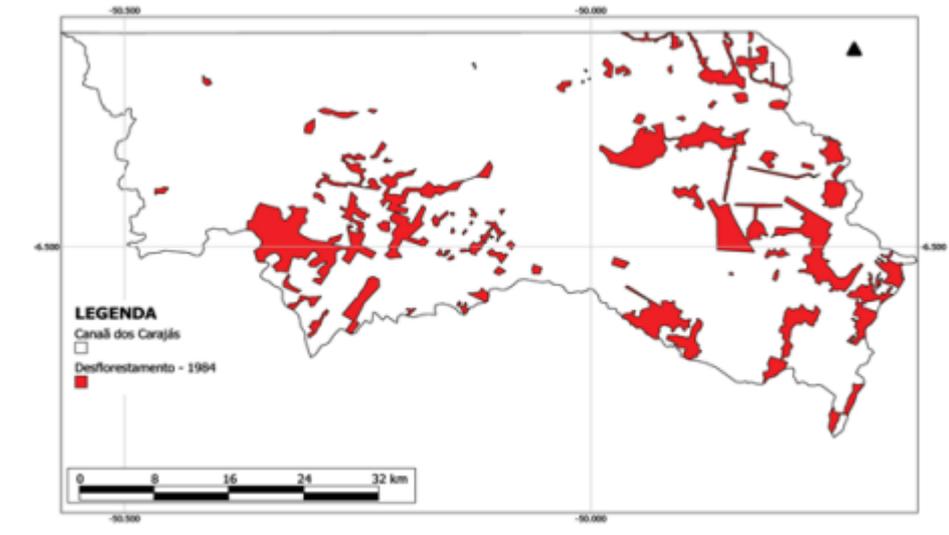


Figura 2.2 -Caracterização cartográfica da área desflorestada em 1984 - Canaã dos Carajás no Pará (Cortez et al.,2020).

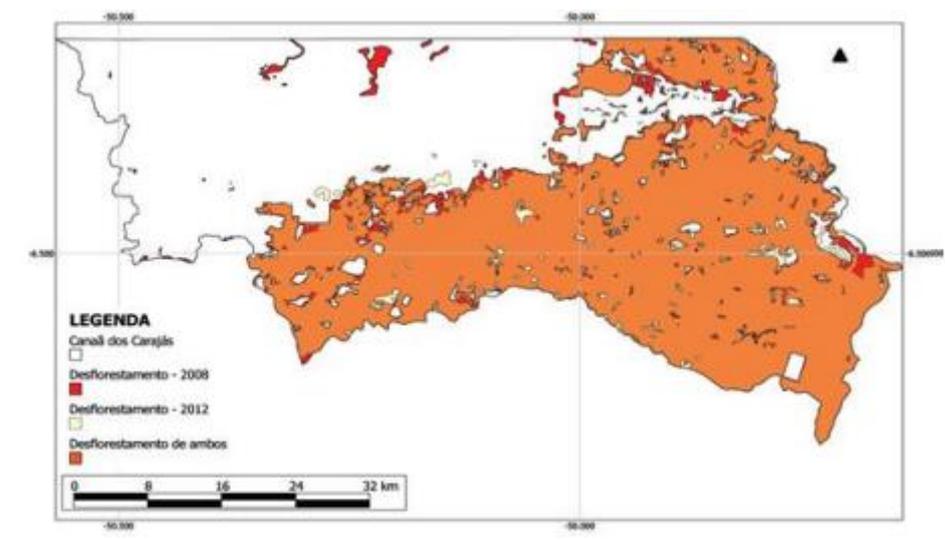


Figura 2.3 -Caracterização cartográfica da área desflorestada entre 2008 a 2012 - Canaã dos Carajás no Pará (Cortez et al.,2020).

A Serra dos Carajás encontra-se na região do arco do desmatamento amazônico no Brasil e ocupa um dos limites leste das grandes porções contínuas de floresta no estado do Pará. Atualmente, restam as áreas protegidas por unidades de conservação que estão no entorno da mina de ferro, cercadas por pastagens degradadas. Segundo dados da Vale, as

unidades de Carajás integram área com mais de 1 milhão de hectares da floresta. Nota-se ainda que a mineradora é responsável pela proteção das unidades de conservação da região, mas não somente. Dentre as metas recentes da empresa destaca-se a proteção e recuperação de 500 mil hectares de florestas nativas em 10 anos. (Vale, 2020)

A produção de ouro no Brasil também deixou um grande passivo ambiental, devendo ser destacados os passivos ambientais dos garimpos de Tapajós, Poconé, Rio Madeira, Gurupí, Alta Floresta, Peixoto de Azevedo e Serra Pelada. O Centro de Gestão e Estudos Estratégicos defende, em seu trabalho intitulado Mineração e Meio Ambiente no Brasil (Farias, 2002) que dentre os principais impactos ambientais decorrentes da produção de ouro, tem-se:

- desmatamentos e queimadas;
- alteração nos aspectos qualitativos e no regime hidrológico dos cursos de água;
- queima de mercúrio metálico ao ar livre;
- desencadeamento dos processos erosivos;
- mortalidade da ictiofauna (populações de peixes);
- fuga de animais silvestres;
- poluição química provocada pelo mercúrio metálico na hidrosfera, biosfera e na atmosfera.

O emblemático caso de Serra Pelada, no Pará, associado à febre do ouro, exemplifica a transformação da paisagem e conflitos sociais que a mineração predatória pode gerar como consequências. O nome Serra Pelada originou-se diante do desmatamento da colina localizada ao lado de um curso d'água no começo de 1980 na região. Essa região se caracterizou como um depósito de ouro cuja exploração foi eternizada pelo trabalho fotográfico de Sebastião Salgado, como representada na Figura 2.4. Hoje, a colina que deu nome à região é uma cratera de cerca de 200 metros de profundidade ocupada por um lago (Da Costa, 2015). Esse lago apresenta risco potencial de contaminação por metais pesados como o chumbo. A contaminação do solo por metais pesados na região também é um aspecto preocupante dessa situação. Uma das maiores minas a céu aberto na história do nosso país também acompanha uma série de violações aos direitos humanos, conflitos e degradação ambiental originários da exploração predatória do ouro.



Figura 2.4 -Vista geral da mina de Serra Pelada por Sebastião Salgado (El País, 2021).

Em um contexto geral, as externalidades negativas provenientes da mineração podem ser enquadradas em problemáticas de cunho social e de cunho ambiental. Segundo Costa & Melo (1987), entre os impactos ambientais que podem ser causados pela mineração quando não perfeitamente controlada tem-se:

- dispersão de rejeitos e estéreis em extensas áreas (ocupação física desordenada);
- aumento da acidez do solo;
- inibição do crescimento de diversas espécies vegetais;
- favorecimento da aridez do solo;
- poluição das águas superficiais e/ou subterrâneas;
- acidentes ecológicos decorrentes de rupturas do sistema de barragens, de construção precária e sem estudos geológicos-geotécnicos;
- acidentes ecológicos decorrentes do escorregamento de pilhas de produtos, de estéril ou de rejeito, construídas empiricamente, sem controle.

Para além desses impactos ambientais destaca-se a preocupação quanto à deposição do rejeito de mineração, uma preocupação muito atual.

2.1.1 FALHAS NA LEGISLAÇÃO AMBIENTAL E RELAÇÃO COM DESASTRES AMBIENTAIS

A história da mineração brasileira apresenta vários fatos marcantes, com destaque para mudanças na regulação e planejamento do setor e alterações nas instituições de

governo, sempre repercutindo o momento econômico brasileiro. Essas mudanças na regulação trouxeram impactos significativos no desenvolvimento das atividades do setor mineral. O caso da Serra Pelada, citado anteriormente, que ocorreu na primeira metade da década de 1980, se deu cerca de 30 anos antes do lançamento do Plano Nacional de Mineração em 2011, planejamento estratégico de longo prazo para o setor. Apesar de a Política Nacional do Meio Ambiente datar de 1981, inovadora para a época, foi apenas em 1988 que se iniciou algo concreto na legislação brasileira sobre o meio ambiente e a mineração (Antonino, 2019).

A evolução da legislação ambiental no país transformou esse cenário, também no que tange a deposição de rejeitos de mineração. Toma-se como exemplo a Lei Estadual de Minas Gerais 23.291/2019, aprovada um mês após o desastre de Brumadinho, que torna obrigatório o descomissionamento de barragens que utilizam o método de alteamento a montante. Posteriormente, foi atualizada a Lei 12.334/2010 para a Lei 14.066/2020. Ela estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinada à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Segurança de Barragens, define categorias de dano potencial e risco, entre outras.

Deve-se observar a forte relação entre falhas na regulação e legislação ambiental e a presença de desastres ambientais na história do nosso país. Com a atual regulação e legislação ambiental, verifica-se um cenário em que o controle ambiental é mais presente, assim como a responsabilização do agente poluidor. Como exemplo tem-se a Portaria nº 70.389 de 2017 que criou o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, estabelecendo o nível de detalhamento do Plano de Segurança de Barragem, inspeções de segurança e muito mais. Nota-se também que grande parte do passivo ambiental existente hoje é resultado da ausência de legislação prévia, anterior a década de 1990. Atualmente, no Brasil, há casos de barragens antigas cujas responsabilizações ambientais não são atribuídas a alguma empresa específica, ou seja, há barragens sem “donos”.

2.2 SUSTENTABILIDADE NA MINERAÇÃO

Enquanto uma má gestão de rejeitos pode levar a passivos ambientais consideráveis para a população, ela também pode impor custos à mineração e às companhias de processamento de minérios. Isso acontece pela diminuição do valor de ações, aumento dos

riscos de parada temporária ou permanente, exposição à compensação ambiental, multas e custos de litígio, oportunidades futuras perdidas e aumento de custos de remediação e monitoramento. Apesar desses riscos, segundo o artigo *Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes* (Franks, 2010), não há consenso global entre empresas, órgãos da indústria, investidores, instituições financeiras internacionais, organizações da sociedade civil e governos sobre como as práticas de gestão de resíduos de mineração podem se alinhar ao desenvolvimento sustentável.

Como parte da Iniciativa Global de Mineração (Global Mining Initiative, hoje conhecida como International Council of Mining & Metals - ICMM), o Conselho Mundial de Negócios para o Desenvolvimento Sustentável (World Business Council for Sustainable Development) e o Instituto Internacional para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (International Institute for Environment and Development) realizaram uma revisão da sustentabilidade da indústria de minerais chamada Mineração, Minerais e Desenvolvimento Sustentável (MMSD). O relatório final, *Breaking New Ground* foi publicado em 2002 e propôs uma série de princípios de desenvolvimento sustentável para o setor de minerais. Dentre eles promover o manejo responsável dos recursos naturais, remediar danos passados e minimizar resíduos e impactos ambientais ao longo da cadeia de abastecimento. O relatório urgiu que a mineração e o processamento de minerais não devem deixar legados inaceitáveis e danos de longo prazo, devem arcar com os custos de remediação e devem ser prudentes onde os impactos potenciais não são conhecidos. Com relação à gestão de resíduos, o relatório enfatizou a necessidade de garantir a estabilidade química dos resíduos descartados, de evitar a liberação de metais pesados e produtos químicos residuais no meio ambiente e de minimizar o consumo de água.

No contexto brasileiro, também há movimentos das empresas e de organizações privadas em busca de maior sustentabilidade na mineração. Em 2008 ocorreu a segunda conferência de responsabilidade socioambiental da Amazônia – Mineração Sustentável, realizada em Belém, pelo IBRAM (Instituto Brasileiro de Mineração). Essa conferência serviu de estratégia do IBRAM mesmo para a região norte promovendo um debate sobre temas para a indústria de mineração e para o futuro da Amazônia tratando do desenvolvimento sustentável, saúde e segurança do trabalho, dentre outros. Já em 2021, o IBRAM se uniu à Associação de Mineração do Canadá (MAC) para a elaboração da versão brasileira do programa Rumo à Mineração Sustentável (*Towards Sustainable Mining - TSM*). O TSM é um programa de origem canadense que está em uso em oito países. Esse programa orienta e apoia empresas de mineração no gerenciamento de riscos

ambientais e sociais.

Outra ferramenta é a aplicação das práticas de governança corporativa, ambiental e social ou ESG (sigla em inglês para ações relacionadas ao meio ambiente, à responsabilidade social e à governança). Para além de compreender as questões envolvendo ESG como uma forma de basear suas estratégias e investimentos, elas podem ser entendidas como práticas que agregam valor às empresas de mineração.

Um exemplo de sustentabilidade na mineração é a busca pela resolução da problemática dos passivos ambientais da mineração nos dias de hoje. Para além do histórico de degradação ambiental relacionado à mineração, há preocupações muito atuais quanto à deposição dos rejeitos dessa atividade. Nas últimas décadas, o uso de barragens de rejeito tem se mostrado uma solução pouco segura, fato que será aprofundado mais adiante.

2.3 GESTÃO DE RESÍDUOS E BARRAGENS DE REJEITO

Acidentes associados à má prática de gestão de resíduos estão entre as características mais evidentes da indústria global de minerais. No ano de 2015, houve o rompimento da barragem do Fundão, na cidade de Mariana, o que provocou um dos maiores impactos ambientais do país. Em 2019, um novo rompimento de barragem, deixou a cidade de Brumadinho em Minas Gerais sob lama de rejeitos, causando destruição da cidade, centenas de mortes, perda de biodiversidade, poluição e contaminação dos recursos hídricos e do solo.

Nos próximos itens, faz-se a conceituação de alguns termos utilizados no decorrer desse trabalho relacionados a geotecnia, mineração e clima.

2.3.1 CONCEITUAÇÃO BÁSICA

Alguns termos comumente utilizados no contexto de mineração são definidos a seguir:

- **Granulometria:** Estudo das dimensões das partículas do agregado de solo. Também é conhecida por análise granulométrica e pode ser realizada por diferentes ensaios laboratoriais como peneiramento ou sedimentação, como indicado na NBR 7181.
- **Lavra:** Segundo o código brasileiro de mineração “Entende-se por lavra o conjunto de

operações coordenadas objetivando o aproveitamento industrial da jazida, desde a extração das substâncias minerais úteis que contiver, até o beneficiamento das mesmas.”;

- Beneficiamento mineral: O tratamento ou beneficiamento de minérios consiste em operações aplicadas aos bens minerais visando modificar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presentes ou a forma, sem, contudo, modificar a identidade química ou física dos minerais. Por meio de diferentes métodos, os minerais utilizáveis são separados dos minerais inutilizáveis;
- Rejeitos de mineração: Composto de estéreis e minérios, os rejeitos são oriundos do processo de beneficiamento do minério. São os minerais inutilizáveis e rejeitados economicamente;
- Estéreis de mineração: Podem ser definidos como um agregado natural composto por um ou mais minerais que se apresenta na lavra do minério e não possui valor econômico;
- Pilhas de rejeitos: São sistemas de disposição de rejeitos em que a fração sólida é armazenada em pilhas estáveis e secas;
- Barragens de rejeitos: As barragens de rejeitos são construções formadas por barramentos maciços impermeáveis e com dispositivos de drenagem, destinadas ao depósito de resíduos gerados pelo beneficiamento dos minérios;

Faz-se necessária também a compreensão dos conceitos climatológicos a seguir:

- Precipitação: A precipitação ocorre quando as parcelas de ar se tornam supersaturadas com vapor de água, ocorre condensação e formação de gotículas na atmosfera que caem de volta para a Terra. Ela pode ocorrer de variadas formas como chuva, granizo e neve. No presente trabalho, quando surgir o termo precipitação, será apenas precipitação no sentido de chuva;
- Infiltração: é o processo de passagem da água pela superfície do solo.
- Evaporação: Evaporação é a remoção da água da superfície para o ar com a mudança da água de fase líquida para a fase gasosa;
- Evaporação Potencial: é considerada a máxima taxa de evaporação que ocorreria em uma superfície livre de água sob dadas condições climáticas
- Evaporação Real: a taxa real de evaporação que ocorre.
- Percolação: é o avanço descendente da água, ou movimento da água no solo.

- Temperatura do ar: É a mensuração do calor presente no ar;
- Umidade atmosférica: Também conhecida como umidade absoluta, é a quantidade total de vapor de água presente na atmosfera;
- Umidade relativa: É a quantidade de vapor de água existente até o seu ponto de saturação ou a quantidade máxima possível de presença de água no ar antes que ela precipite;
- Velocidade do vento: O vento pode ser definido como o ar em movimento. Esse movimento pode ser medido de acordo com sua velocidade ou intensidade e receber variadas classificações como calmaria ou tempestade;
- Radiação solar: É a energia emitida pelo Sol em forma de ondas eletromagnéticas;
- Albedo: É uma medida de proporção da radiação solar recebida pela Terra que é refletida de volta à atmosfera e ao espaço, ou seja, uma medida de quão reflexiva é uma superfície.

2.3.2 SEGURANÇA DE BARRAGENS DE REJEITO

Além do histórico de degradação ambiental relacionado à mineração, há preocupações muito atuais quanto à deposição do rejeito. Segundo Islam e Murakami (2021), um total de 366 incidentes de ruptura de barragem ocorreram globalmente entre os anos de 1915 e 2020. Nota-se ainda que esse número é uma sub-representação do número total de casos, dado que a maioria de casos de ruptura de barragem não foram reportados, principalmente aqueles ocorridos em períodos anteriores a 2010. Além disso, percebe-se que a maior parte dos casos se concentrou no período anterior aos anos 2000 em países como Estados Unidos, Austrália e alguns países da América do Sul. A Figura 2.3 representa a distribuição espacial de incidentes de ruptura de barragens de acordo com o mineral primário de cada uma em uma escala global.

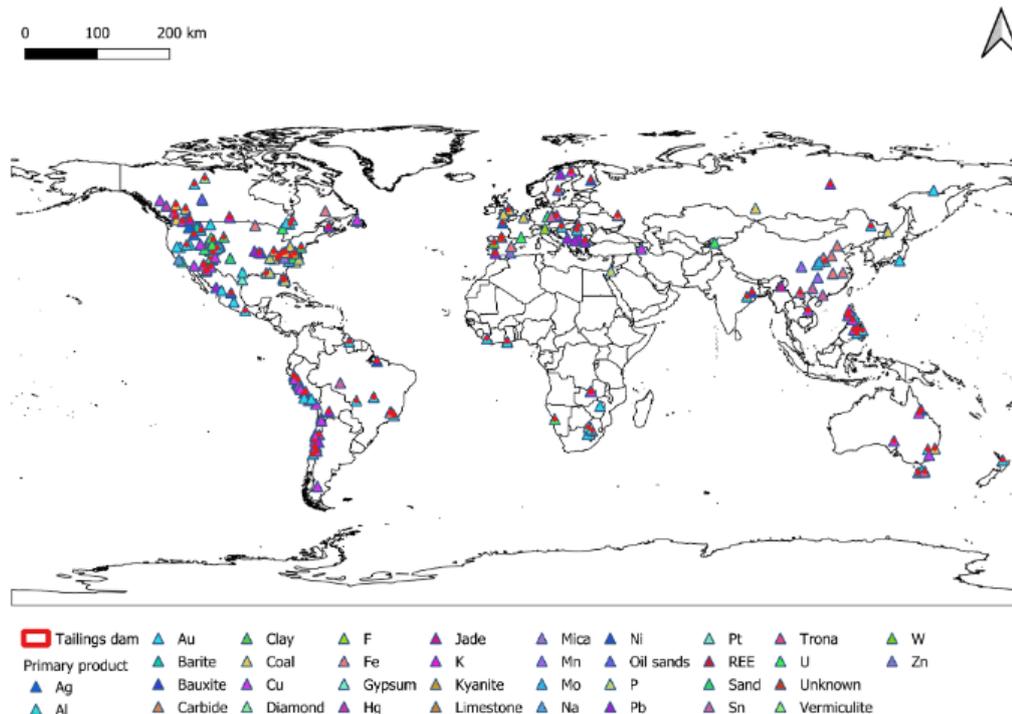


Figura 2.5 -Distribuição espacial de incidentes de ruptura de barragens de acordo com o mineral primário de cada uma em uma escala global (Islam e Murakami, 2020)

No contexto atual, o Sistema Nacional de Segurança de Barragens (SNSB) conta com mais de 23.000 barragens registradas, dessas, as barragens de rejeito de mineração são 913 segundo a Agência Nacional de Mineração na Política Nacional de Segurança de Barragens. Segundo o SNSB, atualmente há cerca de 2507 barragens de risco alto atualmente no país, como é possível verificar na Figura 2.6, que representa dados de barragens por categoria de risco.

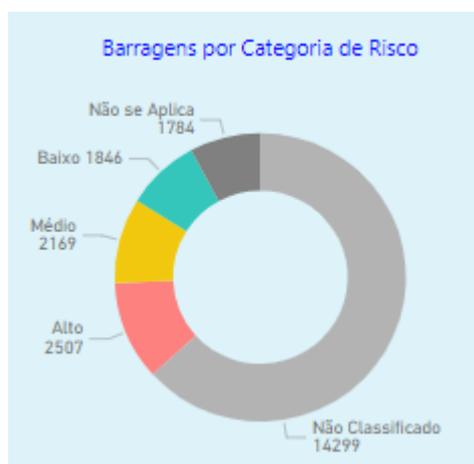


Figura 2.6 - Dados atuais de barragens por categoria de risco (SNSB, 2022).

2.3.3 CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITO

Pode-se classificar as barragens de rejeito de acordo com a categoria de risco (baixo, médio ou alto), pelo dano potencial associado a elas (baixo, médio ou alto) e pelo método de construção. O foco aqui se dará no método de construção dessas barragens associado à segurança delas.

As barragens de rejeito se dividem em três tipos: barragens de rejeito com alteamento a montante, barragens com alteamento a jusante, barragens de rejeito com alteamento de linha de centro.

a) Barragens de rejeito com alteamento a montante

Ainda é o método mais comum. Esse tipo de barragem tem os seus rejeitos depositados nela mesmo, formando uma “praia” de resíduos da mineração. Com o passar do tempo esses resíduos são adensados, para fazer novos alteamentos na barragem. Nesse caso, os degraus vão sendo elevados exatamente acima do anterior, o que a torna menos segura. Esse tipo de estrutura é considerada mais barata porque usa menos material e ocupa uma área menor, conseqüentemente desmata menos, entretanto está associado à maioria dos casos de ruptura de barragens de rejeitos por todo o mundo. A Figura 2.7 representa essa espécie de barragem.

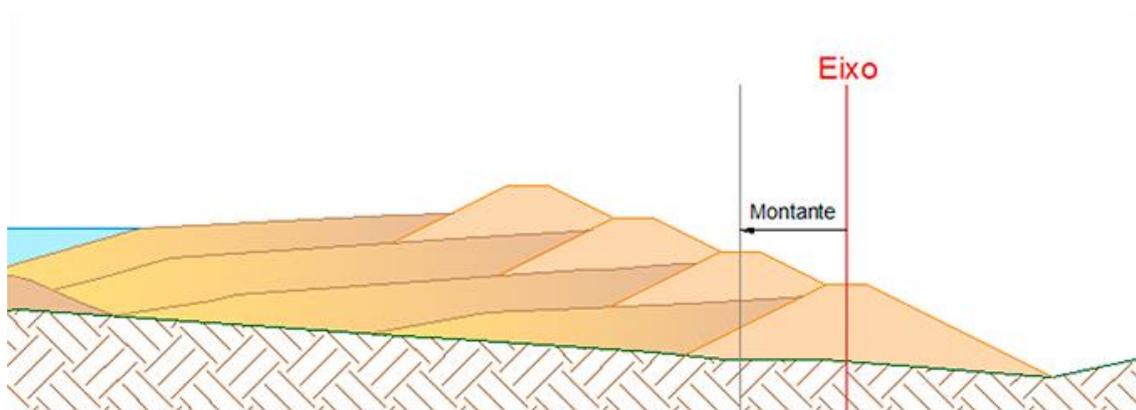


Figura 2.7 - Barragem de rejeito com alteamento a montante (Vale, 2021).

b) Barragens de rejeito com alteamento a jusante:

Esse tipo de barragem é considerado a mais cara, no entanto a mais segura. É um tipo de barragem que ocupa muito espaço, já na sua construção. Já que não se trabalha com degraus e sim com uma espécie de pirâmide. As desvantagens são o alto custo dos

alteamentos e o impacto ambiental maior. Uma barragem com rejeito com alteamento a jusante é representada na Figura 2.8.

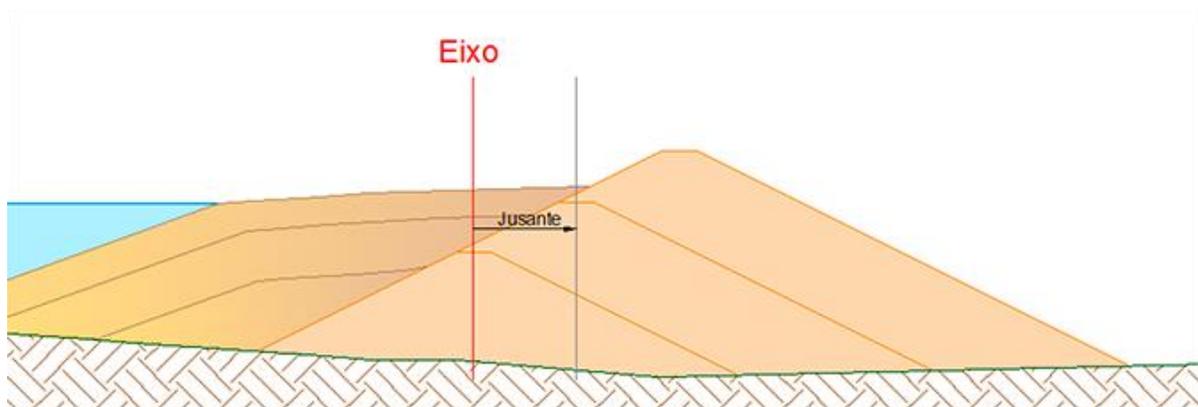


Figura 2.8 - Barragem de rejeito com alteamento a jusante (Vale, 2021).

Barragens de rejeito com alteamento de linha de centro: É considerada uma solução de segurança intermediária entre o método de alteamento a montante e a jusante (inclusive em termos de custo). A disposição é semelhante ao método a montante. Entretanto as barragens que são desse tipo têm tanto os degraus quanto o caimento para fora. Este caimento torna a estrutura mais segura que a de montante mas ainda menos segura que o modelo à jusante. Uma barragem com rejeito com alteamento de linha de centro é representada na Figura 2.9.

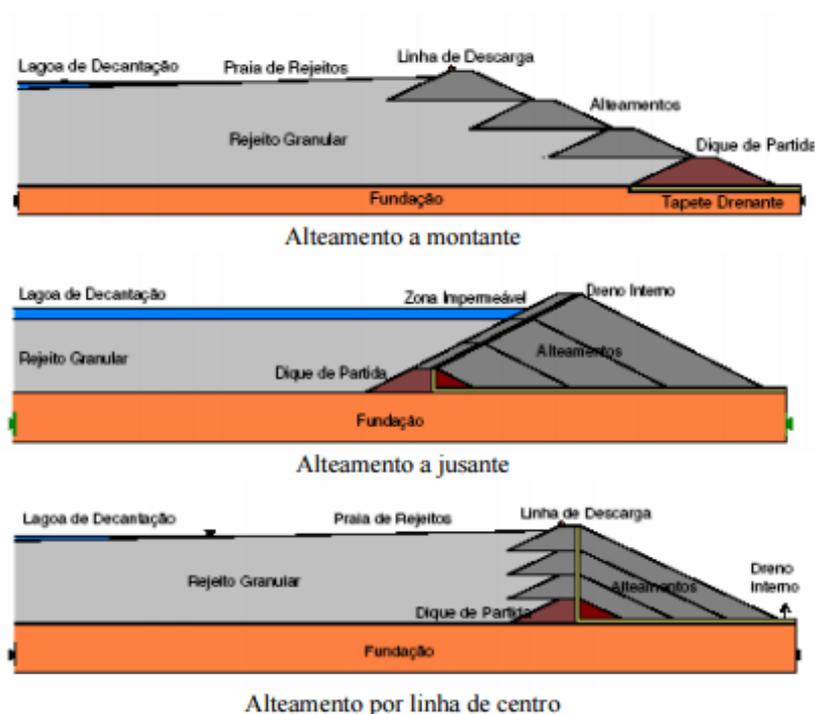


Figura 2.9 - Barragem de rejeito com alteamento de linha de centro (Minera Jr, 2021).

Sob anuência técnica e da legislação ambiental, por décadas a solução mais comumente utilizada para a deposição dos rejeitos de mineração foi a das barragens de rejeito com alteamento a montante.

2.3.4 DESCOMISSIONAMENTO E DESCARACTERIZAÇÃO

O art. 225, § 2º da Constituição de 1988, sob o princípio do poluidor-pagador, impõe àquele que explorar recursos minerais a responsabilidade de recuperar os danos ambientais causados pela atividade de mineração, consistente na obrigação de recuperar o meio ambiente degradado, de acordo com a solução técnica exigida pelo órgão público competente, na forma de lei.

Apesar de serem utilizados como sinônimos, os termos descaracterizar e descomissionar conceituam processos distintos para a desativação de uma barragem. Mesmo legalmente há um conflito entre o significado dos termos. A descaracterização pode ser entendida como o fechamento de uma mina. O processo de descaracterização consiste na drenagem da barragem seguida do plantio de vegetação no local. Enquanto o descomissionamento consiste no desmanche total da estrutura, nesse processo é realizada a drenagem da estrutura e os rejeitos são retirados do local. Portanto, a barragem deixa de existir por completo.

A Lei 23.291/2019 foi aprovada um mês após o desastre de Brumadinho e tornou obrigatória no país a descaracterização de barragens que utilizam o método de alteamento a montante, além de ter proibido a utilização de barragens à montante. Há a previsão de que várias barragens serão descomissionadas em pilha de rejeito nos próximos anos. Diante desse cenário surge uma nova problemática: Onde e como realizar a deposição dos rejeitos de mineração de forma eficiente? O presente trabalho busca responder essa pergunta sob o olhar da solução das pilhas de rejeito.

2.3.5 TECNOLOGIAS ALTERNATIVAS DE DEPOSIÇÃO DE REJEITOS

Há variadas formas alternativas de deposição de rejeitos de mineração. Essa deposição pode ser feita a céu aberto, de forma subterrânea ou subaquática. A deposição subaquática não é muito utilizada pelos problemas ambientais que gera, dado que os impactos negativos aos ambientes aquáticos podem ser irreversíveis. A deposição subterrânea é feita em câmaras que restam após a extração dos minérios. Na técnica de

back-fill, os rejeitos de beneficiamento são usados para preenchimentos de minas, visando à restauração das áreas mineradas. Há ainda a reciclagem dos rejeitos, utilizando-os para produzir materiais essenciais para a engenharia civil como o concreto e argamassa. O método de deposição adequado deve ser escolhido de acordo com o tipo de rejeito disponível.

O método mais comum de deposição é a céu aberto, seja em estruturas de contenção como barragens ou em pilhas controladas.

Métodos de deposição “a seco”, ou seja, em meio não saturado têm crescido no país e no mundo. Ao contrário dos outros métodos, que depositam a água juntamente com os rejeitos, no método em que o rejeito é filtrado, ele é acumulado e armazenado na bacia de disposição, normalmente em áreas inclinadas para facilitar o escoamento. Eles são drenados e depositados em pilhas, que ficam expostas à secagem ao sol. Esse método garante maior segurança e estabilidade quando comparado com métodos tradicionais. (RIBEIRO, 2016)

2.4 PILHAS DE REJEITO

Pilhas de rejeito são uma solução de deposição de rejeitos de mineração a seco e são alvo de estudo do presente trabalho. Elas podem ser consideradas como uma solução promissora dado que, ao contrário das barragens, encontram-se na condição não saturada, e isso minimiza o risco de liquefação presente nos métodos saturados ou úmidos. Como citado anteriormente, os métodos não saturados garantem maior segurança e estabilidade quando comparados com métodos tradicionais. O presente trabalho busca, também, estabelecer a relação de importância da condição não saturada com a estabilidade da pilha, ou seja, a compreensão de como os fenômenos climáticos, principalmente a chuva e a evaporação do rejeito, alteram a estabilidade da pilha de rejeito ao longo do tempo.

Não se pode deixar de citar que a mineração é uma indústria na qual a água se faz muito necessária. “As atividades de exploração e beneficiamento de minerais são reconhecidamente responsáveis por severas pressões sobre os ecossistemas em que estão inseridas, sendo assim necessário mensurar esses impactos através do uso de indicadores. Nos últimos anos, a Pegada Hídrica (PH) tem ganhado espaço como indicador de sustentabilidade, principalmente por medir a apropriação dos recursos hídricos por atividades antrópicas. O uso da PH para esse segmento produtivo representa um importante mecanismo para quantificar a pressão antrópica sob os recursos hídricos locais.” (Santos et al., 2020).

Enquanto a grande maioria dos locais de deposição de rejeitos de mineração inclui barragens com lagos, que necessitam da gestão de imensas quantidades de água, a pegada hídrica de pilhas de rejeito é consideravelmente menor do que de barragens. Um dos fatores que motiva a escolha de projetos de pilha de rejeito se dá pela necessidade de recuperação de água pelo processo de filtragem dos rejeitos de mineração.

A concepção e execução de projetos de construção de pilhas de rejeito não é feita sem desafios, porém. Alguns dos desafios na fase de concepção de pilhas incluem: Carreamento de materiais; Manutenção da drenagem a longo prazo; Controle das condições de drenagem; Métodos de análise e modelos constitutivos; Comportamento do solo a altas tensões; Limitação das alturas das pilhas; Controle dos níveis freáticos; Controle de compactação; Compatibilidade do projeto da pilha com a forma com que a pilha será construída e outros.

Além disso, um dos desafios mais consistentes de quem trabalha com pilhas de rejeito são os elementos de variabilidade do rejeito em si, as características do rejeito são heterogêneas e isso influencia nos parâmetros de projetos. Segundo Davies (2011) a melhor solução para lidar com essas questões é o zoneamento de pilhas. Para a criação do projeto da pilha e a operação da mesma, dividir a pilha em zonas, como na Figura 2.10 que divide a pilha em zona não estruturante e zona estruturante, adensada, pode facilitar as análises e segurança da pilha. Além disso, em regiões de elevada pluviosidade ocorre grande dificuldade operacional e conseqüentemente o estabelecimento da freática no interior das pilhas.

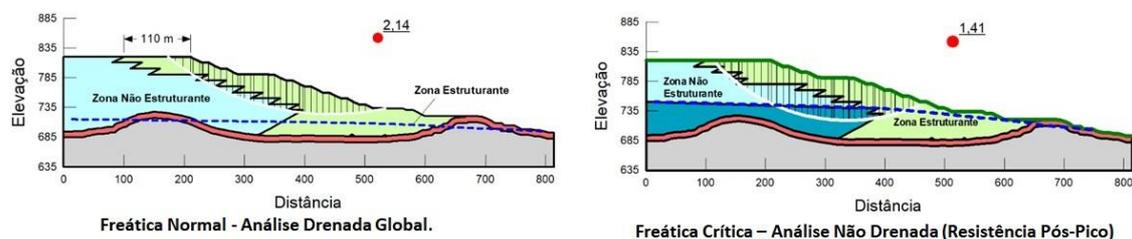


Figura 2.10: Exemplo de análise de estabilidade para subsidiar a definição da zona estruturante na pilha de rejeito filtrados (Instituto Minere, 2021).

As análises de fluxo realizadas na pilha definida tiveram como foco a interação pilha de rejeito com a atmosfera, como será descrito ao longo do presente trabalho. Apesar de o zoneamento de pilhas de rejeito se apresentar como uma boa prática na indústria de mineração, como as análises serão desenvolvidas em uma pilha de rejeitos fictícia, simplificações serão feitas para possibilitar as análises, dentre elas, a ausência de zoneamento da pilha.

2.5 Embasamento teórico das análises

As análises realizadas no presente trabalho se baseiam em um arcabouço de conhecimento que variado. Esse conjunto de conhecimentos é composto desde climatologia e geotecnia até métodos matemáticos utilizados nas análises de fluxo, e na estabilidade de taludes e que explicam as análises realizadas no software do GeoStudio. As próximas páginas contam com o embasamento teórico por trás das análises.

2.5.1 Método dos elementos finitos

Dentre os métodos numéricos, o Método dos Elementos Finitos permite realizar análises de diversos problemas de contorno por meio de programas computacionais, isso acontece dado que é possível transformar a formulação do problema em algoritmos por meio de uma solução aproximada. Uma solução obtida por esse método não se enquadra em solução geral para os problemas, mas sim uma solução específica. O programa SEEP/W, descrito na Seção 4.2 de Ferramentas Utilizadas se baseia no método dos elementos finitos para a solução do problema de fluxo. E o programa SIGMA/W se baseia no método dos elementos finitos para a solução dos problemas de tensão-deformação.

Este método consiste em dividir o domínio em elementos, que são sub-regiões, e a solução é calculada em cada elemento de maneira local, levando em consideração a interação com os elementos adjacentes. Dessa forma, faz-se a discretização de um meio contínuo em pequenos elementos que mantém as propriedades do meio original. (Lotti et al, 2006)

Juntamente com a discretização, há outros dois aspectos fundamentais da modelagem por meio do método de elementos finitos, são eles: definição das propriedades do material e definição de condições de contorno.

2.5.2 Método do equilíbrio limite

Utilizado nos cálculos de estabilidade de taludes, o método do equilíbrio limite se baseia em princípios da estática, ou seja, soma de momentos, forças verticais e horizontais. A estabilidade das pilhas de rejeito pode ser analisada basicamente usando o método de equilíbrio limite, que não considera o tempo de construção e nem os movimentos progressivos da mudança das características do material ao longo do tempo. Além disso há a variação das tensões e poropressões da massa de solo durante a construção da pilha.

No presente trabalho, buscar-se-á compreender, por meio do uso dos softwares do

GeoStudio: SIGMA/W e SLOPE/W associados, como o fator de segurança da pilha (baseado no método do equilíbrio limite) se altera ao longo de dez anos de construção da pilha de rejeitos sob efeitos climáticos.

2.5.3 Variáveis climáticas como condições de contorno

A compreensão de como as variáveis climáticas afetam a estabilidade de pilhas de rejeito de mineração é parte essencial do presente trabalho. As principais condições de contorno relacionadas com fenômenos atmosféricos utilizadas nas análises incluem a chuva, ou precipitação, e evaporação. Por mais que o termo evapotranspiração seja mais comumente utilizado ao se tratar do ciclo hidrológico, por definição, evapotranspiração é a transferência de água da superfície para o ar por meio da mudança de estado da água de líquida para gasosa, ou vapor d'água. (Hartmann, 1994)

A evapotranspiração é composta das parcelas de evaporação e de transpiração. Enquanto a transpiração se refere à passagem de água de plantas para a atmosfera – majoritariamente – pelos poros das plantas chamados estômatos, a evaporação se constitui da evaporação direta de água proveniente da superfície em si. Ao analisar o contexto de uma pilha de rejeito de mineração, pela ausência de flora nos rejeitos, apenas a parcela de água referente à evaporação deve ser levada em consideração.

2.5.3.1 Evaporação

A evaporação é o processo atmosférico que mais influência na ocorrência do ressecamento do solo. Na natureza, a fonte de energia responsável por este processo é o sol. Além da radiação solar, outras variáveis exercem influência no processo da evaporação, destacando-se as temperaturas da água e do ar, a pressão de vapor e o vento. A ação do vento e a convecção térmica geram a turbulência que afasta o vapor das camadas em contato com a superfície da água. Assim, o vento atua no fenômeno da evaporação renovando o ar em contato com a superfície da água, da vegetação ou, como nesse caso, do rejeito, afastando do local as massas de ar que já tenham grau de umidade elevado.

2.5.3.2 Precipitação e série histórica pluviométrica

Para melhor compreensão da relevância da precipitação no contexto da análise de estabilidade de pilhas de rejeito, faz-se necessário apresentar o conceito de série pluviométrica e as estratégias para mensuração de precipitação. Uma série pluviométrica é um conjunto de dados de série histórica, em um período e local definidos, que auxilia na

compreensão do comportamento da chuva naquela situação específica. Séries pluviométricas são essenciais para a concepção de diversos projetos como captação de águas de chuva em ambientes domésticos, análise de mudanças climáticas além de muitos outros.

A compreensão de séries pluviométricas se faz muito útil em diversos contextos. A crescente preocupação relativa às mudanças climáticas levou, na contemporaneidade, a um maior interesse pela compreensão desses conjuntos de dados, mas esse interesse não é novo na ciência. Por exemplo, com poucas exceções, o registro mecânico de séries pluviométricas pode ser datado inicialmente ainda na primeira metade do século XX com registro mecânico em rolos de papel. Há uma variedade de equipamentos de meteorologia utilizados para coleta de dados climatológicos, dentro deles, o pluviômetro é o mais amplamente utilizado para coleta de dados de chuva. Pluviômetros podem ser convencionais ou automáticos, com sensores eletrônicos. Os pluviômetros automáticos possuem sensores eletrônicos e são mais robustos diante de erros humanos do que os convencionais, eles são parte importante do monitoramento, coleta, transmissão e armazenamento de dados em tempo real. (Morbidelli, 2020)

É importante ressaltar que, no contexto de uso de uma série pluviométrica com falhas ou ausência de dados, não há metodologia universal para o preenchimento de dados de séries pluviométricas. Há diversas técnicas para resolução do mesmo problema. Essas técnicas variam da utilização de séries de estações próximas àquela que se busca conhecer e realizar o ajuste dos dados por meio de uma regressão linear simples até soluções mais complexas. Para análises de dados pluviométricos diários em casos de muitos dias de falha seguidos pode-se definir um modelo autorregressivo. Esse tipo de modelo é muito utilizado em análises estatísticas de série temporal e descrevem uma série temporal que muda de comportamento a partir de um valor observado, podendo também auxiliar na previsão de valores futuros da mesma série.

Para o contexto das análises em questão, pela sua simplicidade, faz-se efetivamente necessária apenas a média pluviométrica anual ao longo de dez anos. As poucas falhas identificadas na série pluviométrica não representaram grande relevância estatística para o presente caso. A série pluviométrica utilizada e o método de preenchimento de falhas utilizado está detalhada na Seção 3.2 de Ferramentas Utilizadas.

2.5.4 Propriedades do Rejeito

Para o adequado manejo de rejeitos de mineração, faz-se necessária a compreensão

dos processos físicos, químicos e microbiológicos que ocorrem em seus depósitos, assim como o entendimento de como esses processos interagem entre si. Nota-se que as características físicas e químicas dos rejeitos de mineração fazem com que os processos associados a construção de pilhas possam ser muito diferentes daqueles que ocorrem com barragens tradicionais (Souza, 2020). O presente trabalho não se propõe a se aprofundar nesses processos, mas sim compreender alguns dos processos físicos associados, principalmente, ao movimento de água no rejeito e na interface com a atmosfera. Dessa forma, busca-se uma aproximação do tipo de material que compõe o rejeito para, com base na literatura presente, definir um coeficiente de permeabilidade a ser utilizado nas análises do software.

Os rejeitos de mineração, como materiais remanescentes do processo de beneficiamento, possuem composição química heterogênea e variada, assim como suas características granulométricas e dependem do minério bruto a ser extraído. Sabe-se que as características físicas desses rejeitos são variadas e que eles podem abranger uma ampla faixa de materiais, desde grosseiros solos até solos de granulometria muito fina. Nota-se que o rejeito de mineração pode estar na forma de fragmentos ou partículas secas, ou em via aquosa sendo isto dependente do tipo de beneficiamento do minério. (Ibama 1990, Abrahão & Mello 1998),

Maidment (1993) aponta que as propriedades do solo que afetam o movimento da água são a condutividade hidráulica e características de retenção de água do solo, essas características relativas à água no solo se relacionam fortemente com as características físicas do solo. A granulometria é uma das mais relevantes características físicas dos solos.

De acordo com os estudos laboratoriais em Silva (2006), o rejeito da mineração de minério de ferro, apesar de ser muito arenoso, apresenta condutividade hidráulica relativamente baixa, provavelmente em razão da presença de muita areia fina. Enquanto isso é uma relevante qualidade num processo de revegetação de áreas, pois pode significar a manutenção da umidade por um maior período de tempo, pelo mesmo motivo, pode apresentar problemas no que tange a estabilidade de pilhas. O mesmo estudo também indicou que o rejeito estudado apresentou baixa condutividade hidráulica, em razão da sua elevada quantidade de areia fina, que teria reduzido a macroporosidade, dificultando a percolação da água. Outros ensaios laboratoriais realizados com rejeitos de minério de ferro mostraram que esses rejeitos, em geral, são extremamente finos, caracterizados por conter basicamente frações granulométricas correspondentes a silte e argila (Gomes, 2011). Os ensaios laboratoriais realizados por Capelli (2016) contaram com três diferentes

tipos de rejeito de mineração: bauxita, ouro e ferro. Concluindo que, com o mesmo método de análise, enquanto uma amostra de rejeito de bauxita resultou na classificação do material como uma areia argilosa e pouco siltosa, outra amostra do mesmo rejeito foi enquadrada como areia siltosa. O trabalho também enquadrou o rejeito de ferro em areia siltosa e o rejeito de ouro em silte argiloso.

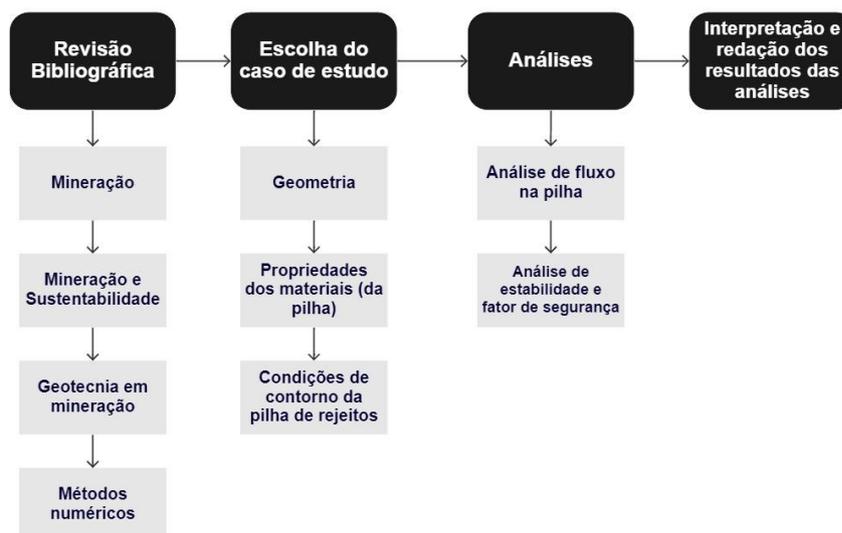
O fluxo de água nos solos e processos químicos e de transporte de calor nos rejeitos de mineração é fortemente controlado pela permeabilidade dos rejeitos da pilha (Amos, 2015). De acordo com os parâmetros indicados pela bibliografia citada e para o presente trabalho, considerou-se que o rejeito de mineração analisado é majoritariamente composto por areia fina. Dessa forma, aproxima-se do comportamento do rejeito ao de um solo homogêneo de areia fina com coeficiente de permeabilidade de $10^{-5}m/s$. Vizcarra (2021) observou que há uma forte dependência do coeficiente de permeabilidade dos solos de fundação no tempo de dissipação de poropressões.

3. METODOLOGIA

Nessa seção será apresentada a metodologia de trabalho desse projeto final. Incluindo a apresentação das ferramentas utilizadas e a sequência de passos em um mapa de processos.

3.1 ATIVIDADES

O mapa de processos representado na Figura 3.1 foi construído para melhor visualização da sequência de atividades realizadas no presente trabalho.



miro

Figura 3.1 - Mapa de processos das atividades.

Nota-se que as análises de fluxo e de estabilidade associadas ao fator de segurança da pilha foram feitas no período de 10 anos de construção dela.

3.2 FERRAMENTAS UTILIZADAS

Antes das análises das pilhas de rejeitos, é necessário realizar a coleta e o tratamento de dados relacionadas as condições de contorno associadas à atmosfera. Esses dados foram obtidos a partir de bases dados meteorológicas do INMET. Aos dados originais foi aplicado um tratamento de dados de forma a obter informações como média e desvio padrão de cada ano da série pluviométrica, como será mais detalhado a seguir.

A Figura 4.2 apresenta algumas das informações requeridas para a análises em questão. No presente trabalho, a título de simplificação, apenas as informações de precipitação foram utilizadas. Conforme citado anteriormente, foi necessário um tratamento dos dados para que estes sejam aplicados como condições de contorno do problema de fluxo, como será detalhado ao decorrer do trabalho.

As análises foram realizadas por meio do programa SIGMA/W e SLOPE/W, que fazem parte do pacote GeoStudio.

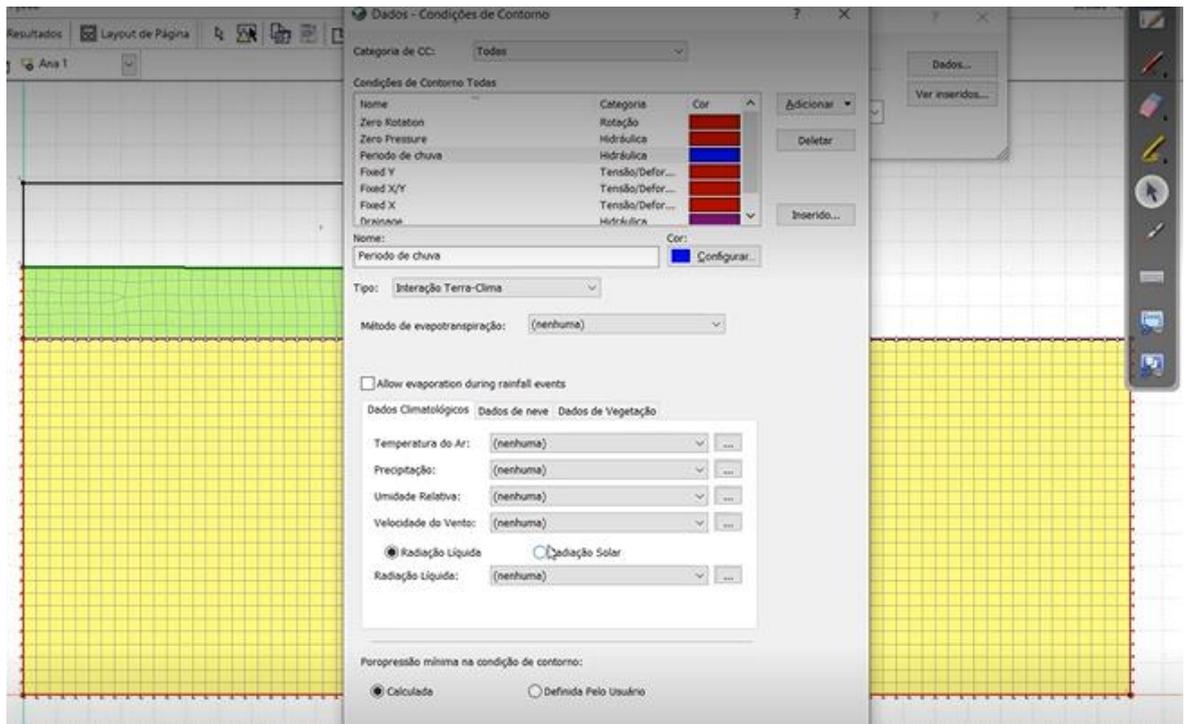


Figura 3.2 – Condições de contorno na relação solo-atmosfera.

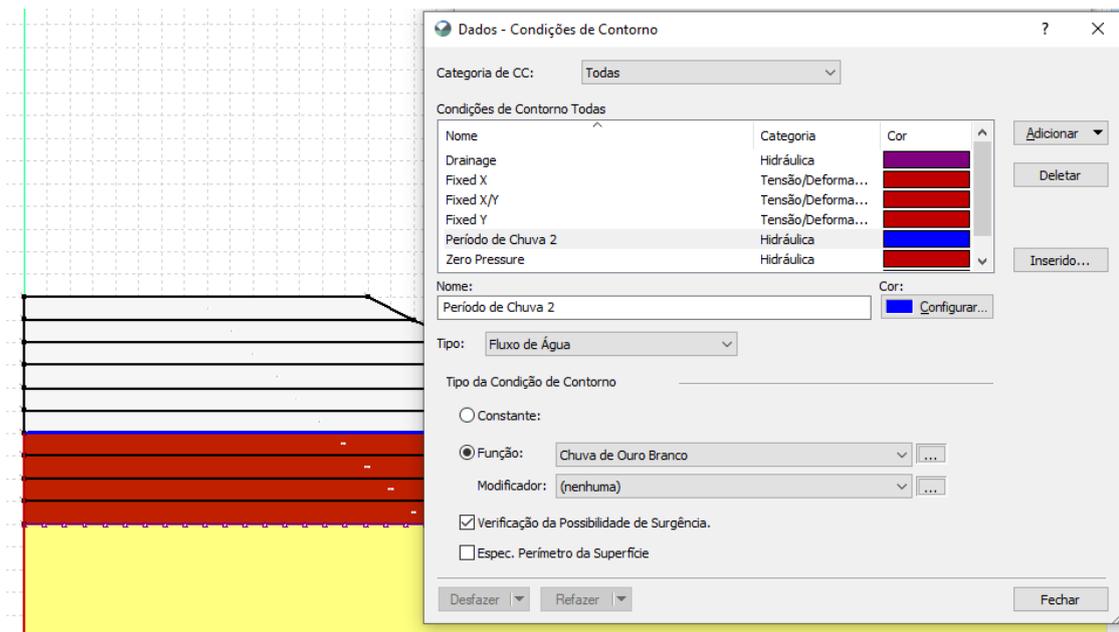


Figura 3.3 – Condições de contorno referentes à precipitação.

3.2.1 SEEP/W

A análise de fluxo de água nos solos é considerada como um dos processos mais fundamentais da engenharia geotécnica. Em particular, a análise de poro pressão associada a esse fluxo de água nos lençóis freáticos é importante na geotecnia. A pressão da água nos poros do solo pode ser positiva ou negativa e é um importante componente do estado de

tensões dentro do solo.

Pode-se compreender uma modelagem numérica como uma simulação matemática de um processo físico real. SEEP/W é um modelo numérico que visa simular o processo real de fluxo de água em um meio particulado. A problemática dessa análise de fluxo de água nos solos saturados e não saturados é não-linear e exige a aplicação de métodos numéricos para a obtenção da solução.

O programa SEEP/W utiliza o método dos elementos finitos para a solução do problema de fluxo. Este método consiste em dividir o domínio em elementos, e a solução é calculada em cada elemento de maneira local, levando em consideração a interação com os elementos adjacentes.

As condições de contorno de um problema são componente chave de uma análise numérica, dado que as soluções dadas por problemas numéricos são uma resposta direta das condições de contorno. Há um particular interesse no uso das condições de contorno que representem os fenômenos atmosféricos (chuva, radiação solar, vento etc.) e da presença da vegetação (evapotranspiração).

No contexto de produção e deposição de resíduos de mineração, há questões preocupantes de uma perspectiva de análise como: estabilidade de depósitos de resíduos, aterros, estéril e barragens de rejeitos; infiltração de água, gás e contaminantes por meio dessas instalações; projeto de sistemas de cobertura ou tampa para evitar infiltração de água ou liberação de gases e água; assentamento e consolidação de resíduos; desempenho de longo prazo; e heterogeneidade de resíduos e a caracterização associada das propriedades dos materiais.

No site do Geoslope (Geostudio, 2021) encontram-se diversos exemplos de aplicação do SEEP/W e suas ferramentas para soluções de proteção ambiental. Nas figuras subsequentes ilustram-se, respectivamente, a interface do software para os dados de entrada das condições de contorno de massa da interação solo-atmosfera e um exemplo da interface de um balanço de água superficial. Na Figura 3.4 é apresentada a interface em que as condições de contorno relacionadas a atmosfera são introduzidas.

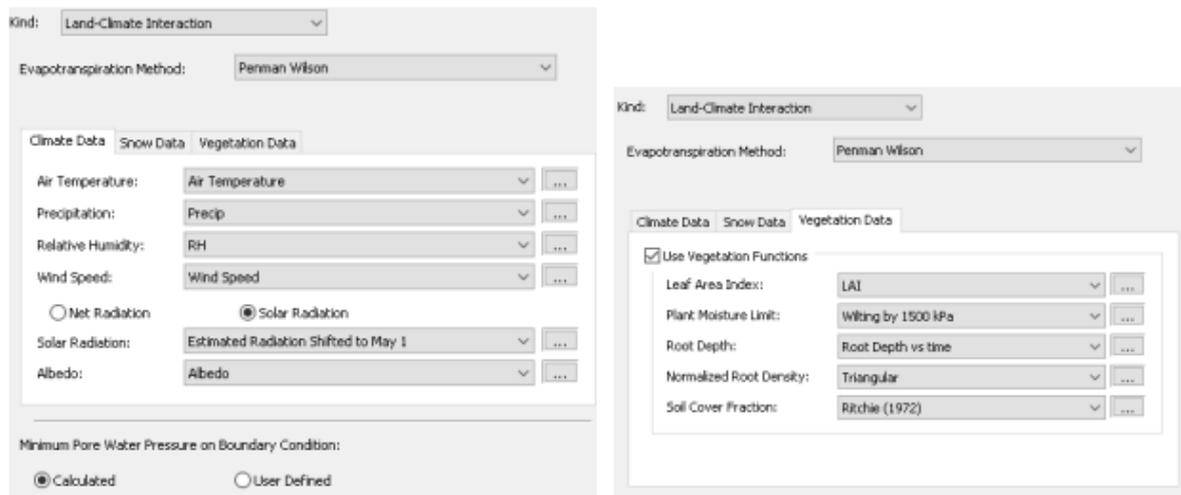


Figura 3.4 - Dados de entrada das condições de contorno de massa da interação solo-atmosfera (Geostudio, 2021).

Mais detalhes como os elementos chave da formulação do SEEP/W podem ser encontrados no manual *Seepage Modeling with SEEP/W* (Geostudio, 2021).

3.2.2 SIGMA/WO software SIGMA/W é um produto que se baseia no método do equilíbrio limite (MEL) para modelar tensões e deformações no solo, rochas e estruturas. Nesse software faz-se a junção das análises de fluxo com as análises mecânicas. SIGMA/W também conta com ferramentas para análise de estabilidade por Redução de Resistência (SRS). Esse produto auxilia a estabelecer as tensões e deformações, calculando-as dentro de um domínio específico.

No caso representado pela Figura 3.3, o SIGMA/W é usado para resolver a análise de tensão-deformação no eixo vertical, in situ, de uma barragem. Durante a construção da barragem, os estados de tensão mudam.

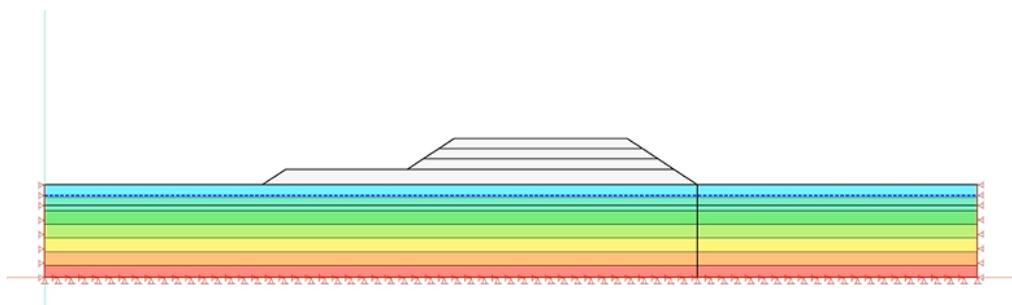


Figura 3.5 – Análise de tensão-deformação in situ de uma barragem pelo SIGMA/W (Geostudio, 2021).

Nas análises da pilha de rejeitos, faz-se necessário o uso de análises de mudanças de poropressões para melhor compreensão do comportamento da pilha.

3.2.3 SLOPE/W

A análise de estabilidade do sistema de pilha de rejeito será feita utilizando a ferramenta SLOPE/W, que também utiliza MEL para resolver o problema de equilíbrio. Esse software é utilizado na análise de estabilidade de taludes para taludes de solo e rocha. Nele, pode-se efetivamente analisar problemas com uma variedade de formatos de superfície de deslizamento, condições de poro pressão, propriedades do solo e condições de carregamento. No presente trabalho as poropressões tiveram sua origem nas análise de fluxo, enquanto as tensões vêm das análises mecânicas. Nas Figuras 3.6 e 3.7 são apresentados algumas das configurações necessárias para a realização das análises propostas neste trabalho. Ademais, a Figura 3.8 representa o cálculo de fator de segurança no SLOPE/W.

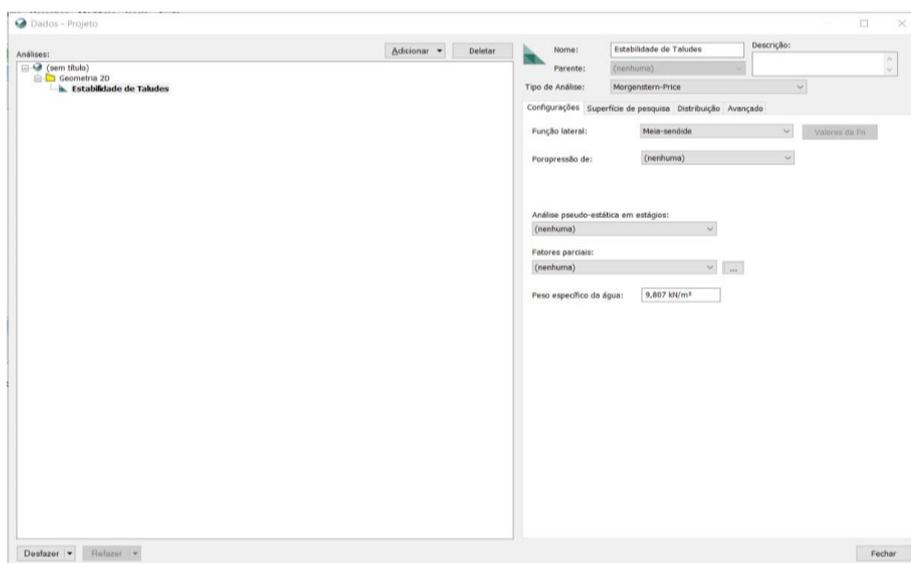


Figura 3.6 - Dados de entrada com tipo de análise Morgenstren-Price (Geoslope, 2021).

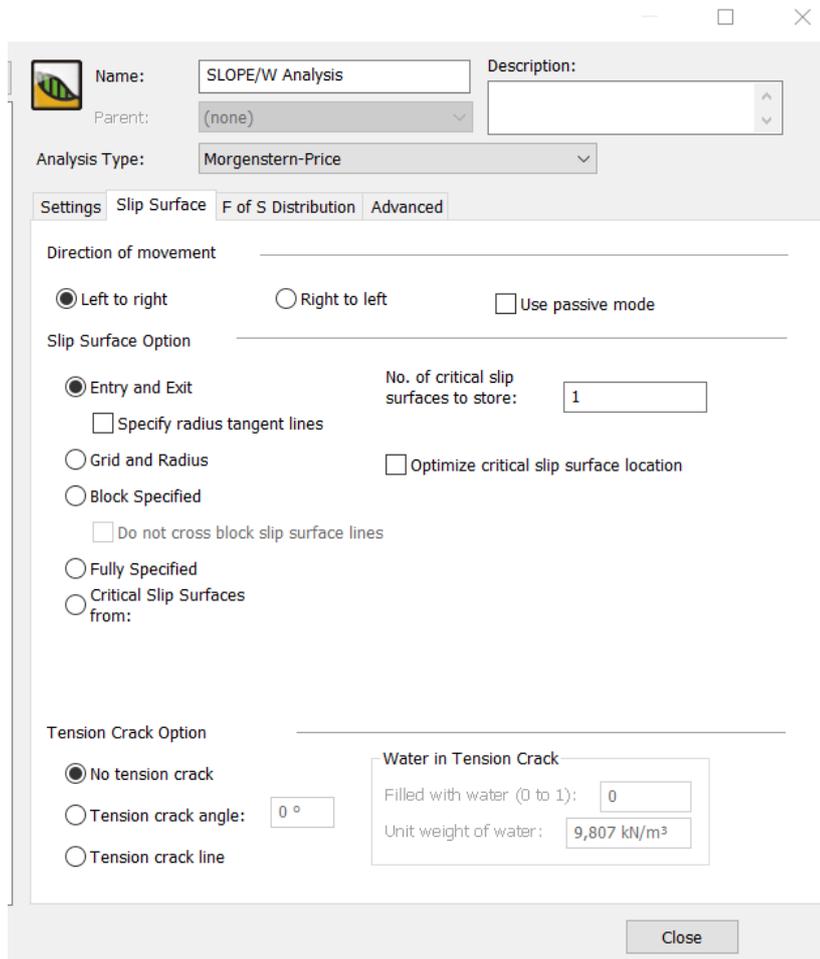


Figura 3.7 - Definição de dados do tipo de superfície (Geoslope, 2021).

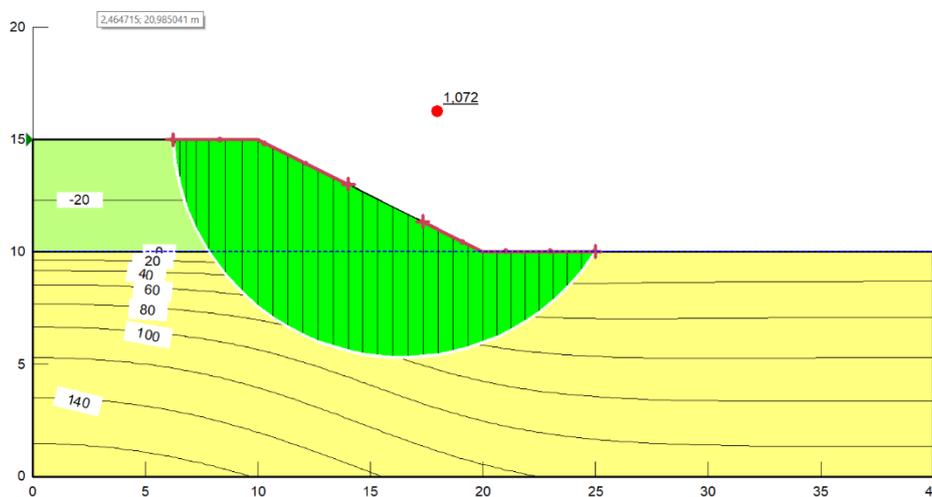


Figura 3.8 - Cálculo do fator de segurança (Geoslope, 2021).

3.2.3 INMET

A base de dados escolhida para a obtenção dos dados de série pluviométrica foi o histórico de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), parte do Ministério de

Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Desses dados anuais de pluviômetro em estação automática tirou-se dados de 2011 a 2021 para uma série histórica pluviométrica da região. Calculando-se, posteriormente, as médias anuais para utilização no software. Por meio do Excel a média e o desvio padrão de valores de precipitação foram calculados.

É importante citar que apesar de a série pluviométrica obtida pelo histórico do INMET possuir dados de relevância estatística, o ano de 2016 possuía falhas consideráveis. As falhas fizeram parte, por vezes, de meses seguidos – no período de chuva – sem dado algum. Por esse motivo, fez-se o preenchimento de dados da média pluviométrica de 2016 com base nos valores médios de pluviosidade de 2015 e 2017, descartando os valores obtidos no ano de 2016 pela estação pluviométrica.

A área escolhida para a seleção da série pluviométrica foi o município de Ouro Branco, que conta com estação meteorológica operante, instalada em 2006 e identificada pelo código A513 na base de dados do INMET.

3.2.4 Climate-Data.org

Em termos de dados de temperaturas médias da região, optou-se pela fonte Climate-Data.org, dado que o trabalho intitulado Validação estatística dos dados climáticos disponíveis na plataforma Climate-Data.Org para o Estado do Ceará (Vieira, 2021) aponta forte correlação entre os dados das estações meteorológicas e aqueles estimados pelo Climate-Data.

Pela sua confiabilidade, o produto do Climate Data foi escolhido como fonte para a obtenção do dado de temperatura média para a região de Ouro Branco, em MG, essa região se caracteriza por clima subtropical de altitude (Cwb na classificação de Koppen-Geiger) e tem temperatura média de 18.6°C.

A título de simplificação, os dados de temperatura obtidos não foram utilizados na análise da estabilidade da pilha fictícia, mas contam como sugestão de uso para futuros trabalhos.

4. RESULTADOS

Os resultados esperados nesse trabalho envolvem a análise da interação pilha-rejeito-atmosfera e a análise de estabilidade da pilha de rejeitos ao longo de 10 anos e sob influência de fatores climáticos.

- a) Revisão bibliográfica sobre os temas: mineração sustentável, geotecnia e mineração, pilhas de rejeito, métodos de análise;

- b) Avaliação do comportamento hidromecânico de um caso de estudo ao longo de dez anos.
- c) Variação do campo de poropressão de uma pilha ao longo de dez anos.
- d) Variação do fator de segurança de uma pilha ao longo de dez anos.

4.1 Caracterização da pilha de rejeitos fictícia

A localização escolhida para a pilha fictícia foi a do quadrilátero ferrífero, pela grande presença da indústria de mineração nessa região mineira. Para garantir dados climatológicos de qualidade fez-se necessário especificar uma região dentro do quadrilátero ferrífero. Ouro Branco é um município dentro do quadrilátero ferrífero que abarca o bioma de Mata Atlântica, possui boa arborização e foi escolhido também pela disponibilidade de dados pluviométricos de qualidade nas bases de dados utilizadas. A estação meteorológica de onde foram escolhidos os dados para a série pluviométrica é automática e segue pela identificação do INMET pelo código A513 em sua base de dados históricos. A temperatura média da região teve como fonte o Data-Climate.Org que descreve o clima da região como clima subtropical de altitude (Cwb na classificação de Koppen-Geiger) com temperatura média de 18.6°C.

Com base na revisão bibliográfica disposta em no item 2.5.4 Permeabilidade do rejeito como condição de contorno, definiu-se a permeabilidade do rejeito como uma curva representada na Figura 4.1.

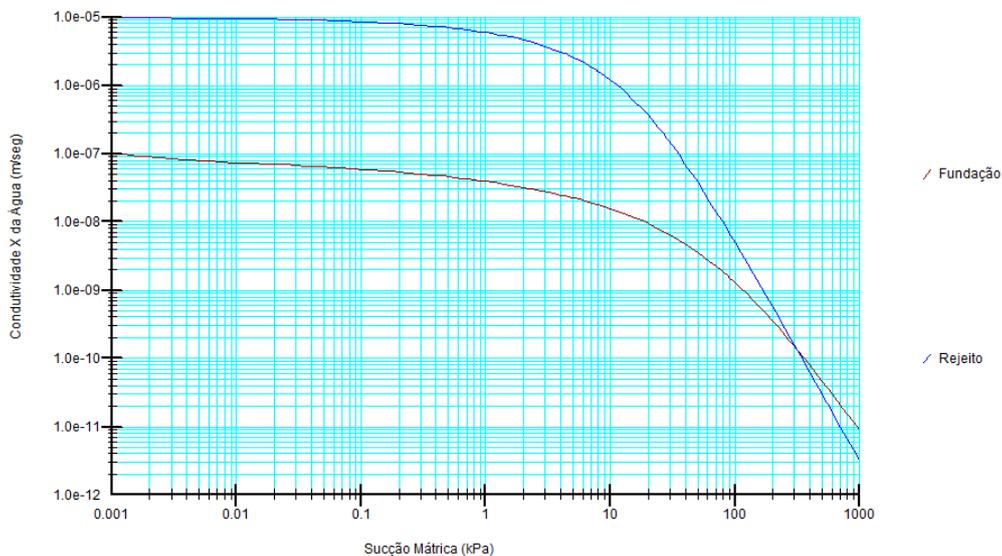


Figura 4.1: Função curva de permeabilidade dos materiais.

Faz-se necessário definir as condições de contorno no software. Dentre essas

condições de contorno, os dados hidráulicos e de tensão dos materiais são essenciais para garantir uma solução adequada e específica. Na Figura 5.2, abaixo, é representada a entrada de dados de tensão para a fundação.

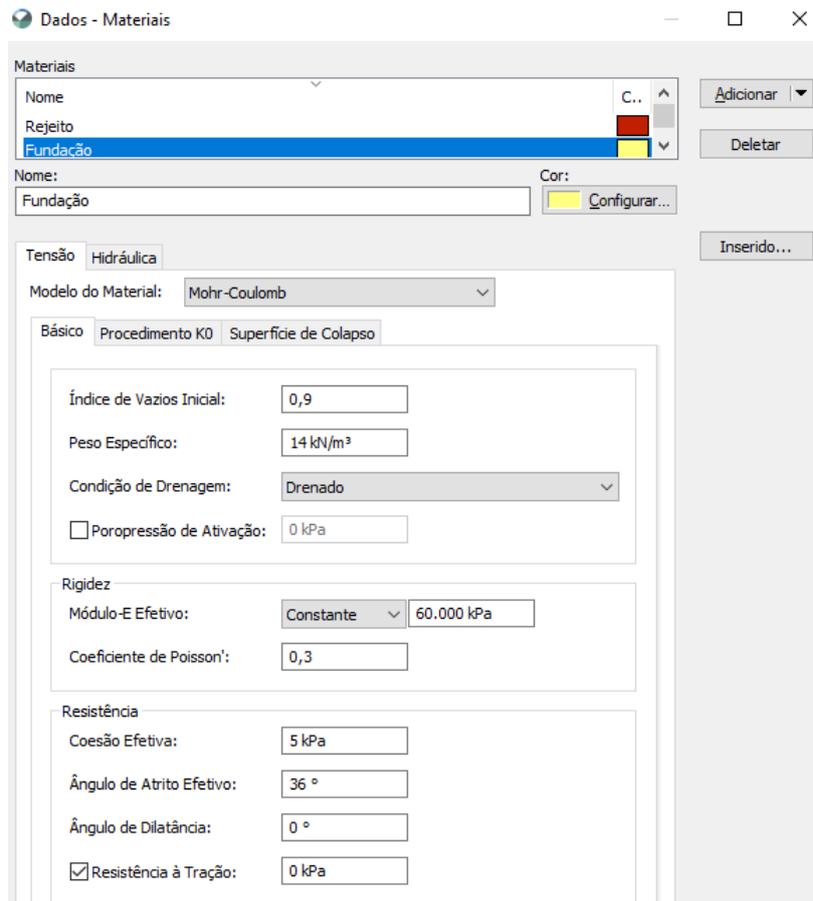


Figura 4.2: Entrada de dados de tensão da fundação da pilha de rejeitos.

A caracterização do rejeito e da fundação no que tange as propriedades dos materiais que os compõem, representadas nas Tabelas 1 e 2, foram retiradas do trabalho de Vizcarra (2021) e de comunicação pessoal (Cordão Neto, 2022). As propriedades se referem a um solo médio e para pilha de rejeito filtrado.

Propriedades dos materiais		
Parâmetro	Fundação	Pilha de Rejeitos
Índice de vazios	0,9	1
Módulo de elasticidade (E)	60.000 kPa	30.000 kPa
Coefficiente de Poisson	0,3	0,45

Ângulo de atrito efetivo	36°	30°
Ângulo de dilatância	0°	0°

Tabela 1: Propriedades de tensão dos materiais.

Propriedades dos materiais		
Parâmetro	Fundação	Pilha de Rejeitos
A	100 kPa	20 kPa
N	1,2	1,5
Compressibilidade	1e-06	1e-06
TUV Saturado	0,4	0,5
TUV Res	0,04	0,05

Tabela 2: Propriedades hidráulicas dos materiais.

Obteve-se as curvas de teor volumétrico de água para a fundação e o rejeito, como representada na Figura 4.3.

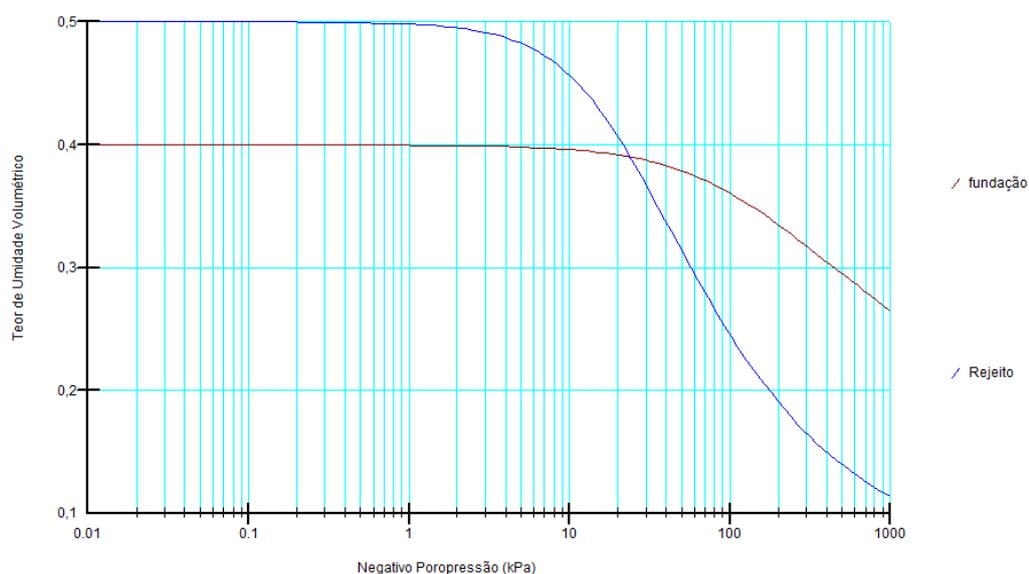


Figura 4.3: Curva de teor volumétrico de água.

O cenário modelado foi o da construção da pilha de rejeitos com deposição de rejeitos na taxa de 10 m de altura de rejeito por ano ao longo de uma década. Totalizando em uma pilha de 100 m de altura de rejeito acima de 50 m de fundação.

4.2 Análise acoplada

As análises acopladas são simuladas ao longo de dez anos de construção da pilha considerando a distribuição de tensões e deformações na fundação e a dissipação de poropressões. No GeoStudio, a análise acoplada contou inicialmente com as análises de fluxo no SEEP associadas ao SIGMA/W seguidas de análise de estabilidade no SLOPE/W. Os resultados mostram a evolução do fator de segurança sob efeito da construção da pilha associada às condições de contorno de pluviometria.

Não foi realizado um teste de convergência de malha devido ao alto custo computacional, porém acredita-se que a malha apresentada é adequada para a análise.

A ordem de realização das atividades no software para resultar nas análises foi de:

1. Definição da geometria da pilha de rejeito;

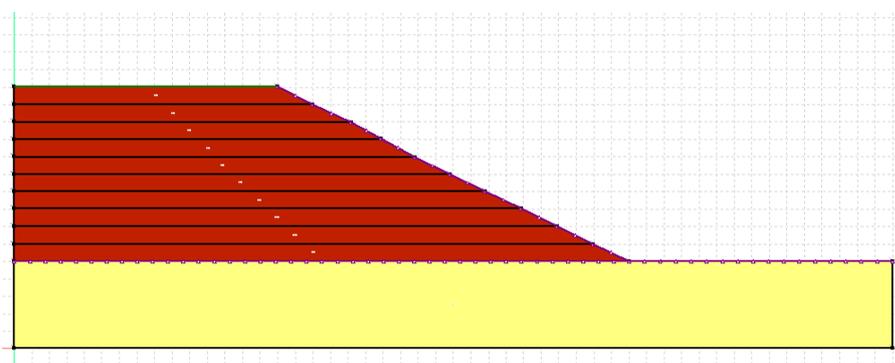


Figura 4.4: Geometria da pilha de rejeitos.

2. Divisão das camadas da pilha por ano;

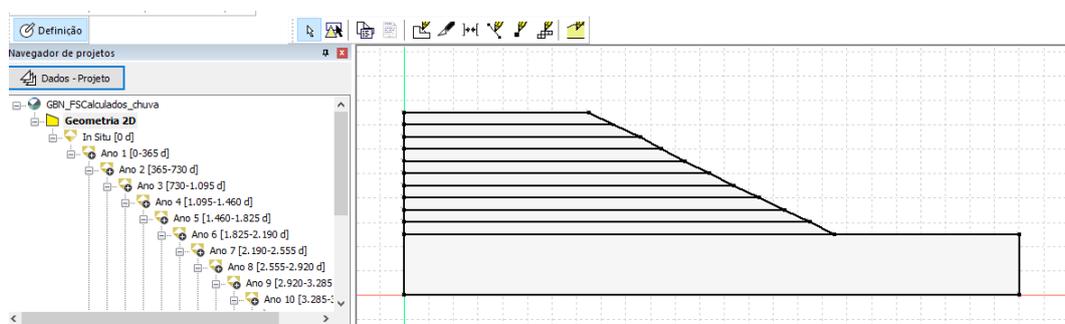


Figura 4.5: Divisão das camadas da pilha por ano.

3. Aplicação das condições de limite de deslocamento fixo;

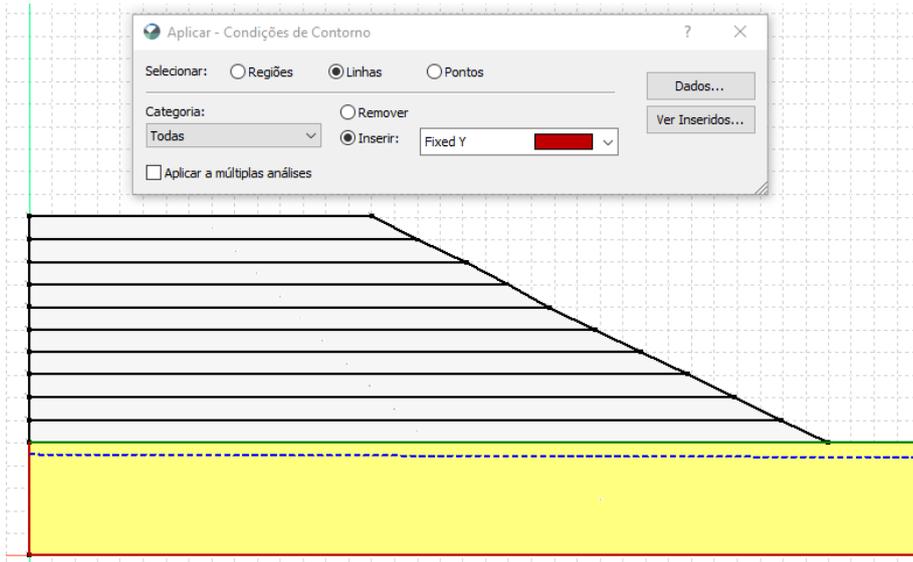


Figura 4.6: Aplicação das condições de limite de deslocamento fixo.

4. Inserção das propriedades hidráulicas e mecânicas dos materiais da fundação e da pilha;

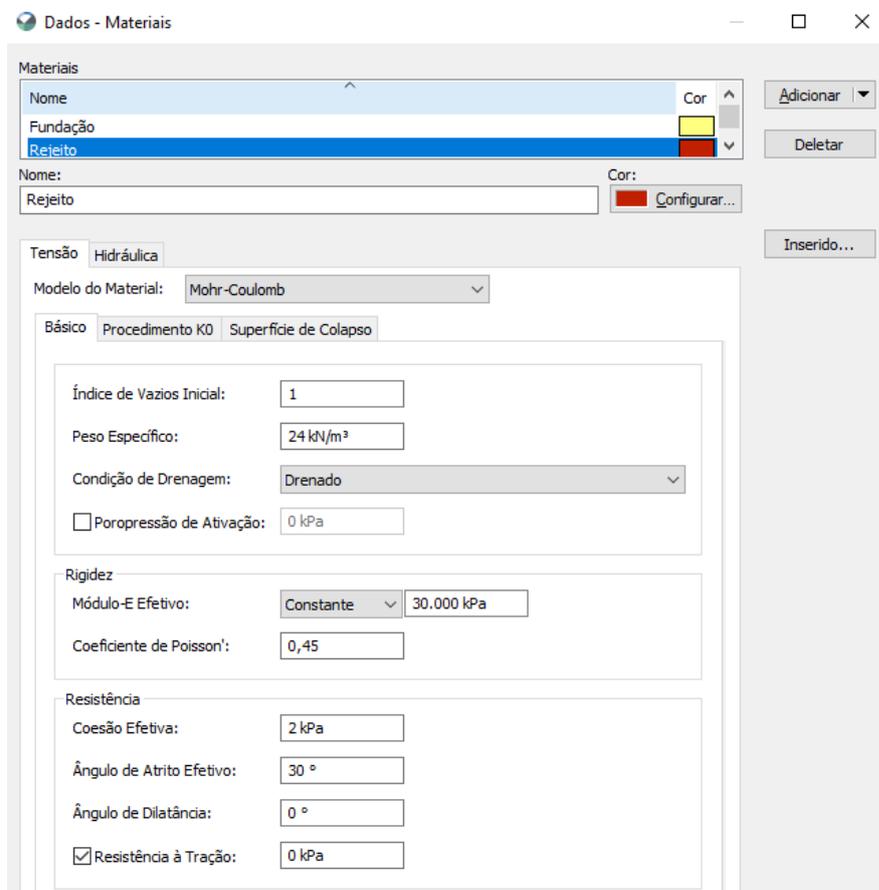


Figura 4.7: Definição de propriedades mecânicas do rejeito.

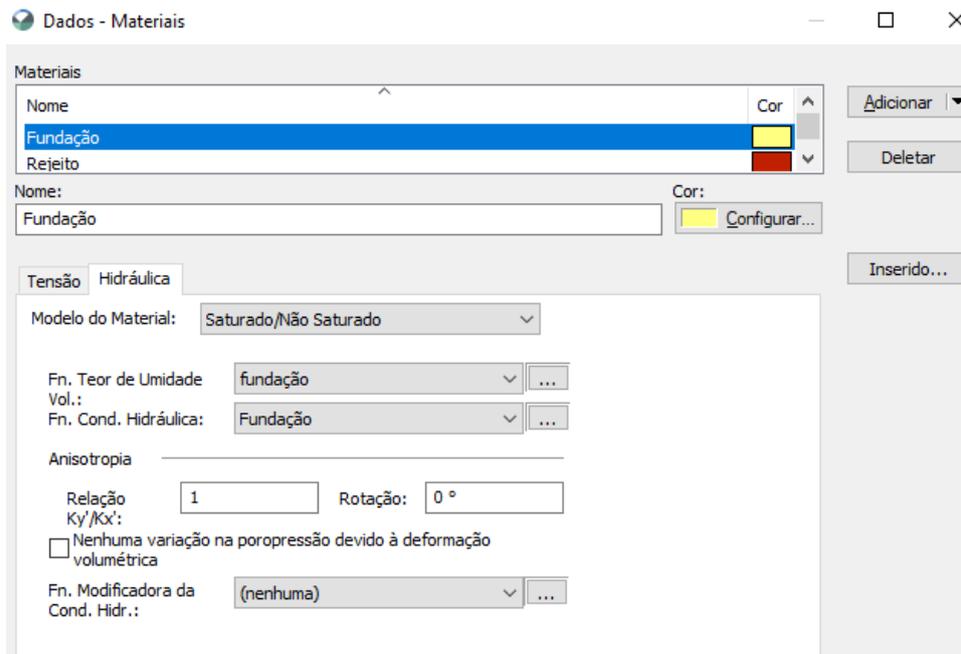


Figura 4.8: Definição de propriedades hidráulicas do rejeito.

5. Aplicação dos materiais nas regiões adequadas;

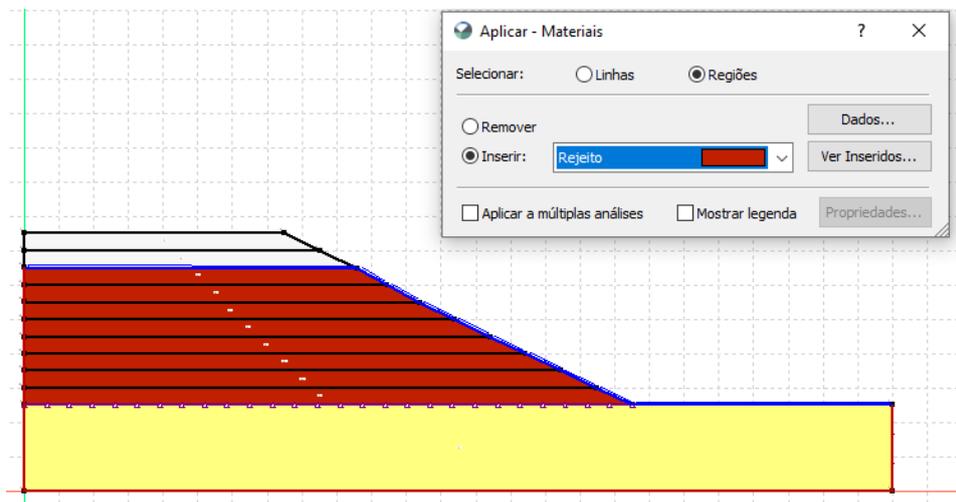


Figura 4.9: Aplicação dos materiais nas regiões.

6. Aplicação da malha e definição do tamanho da mesma;

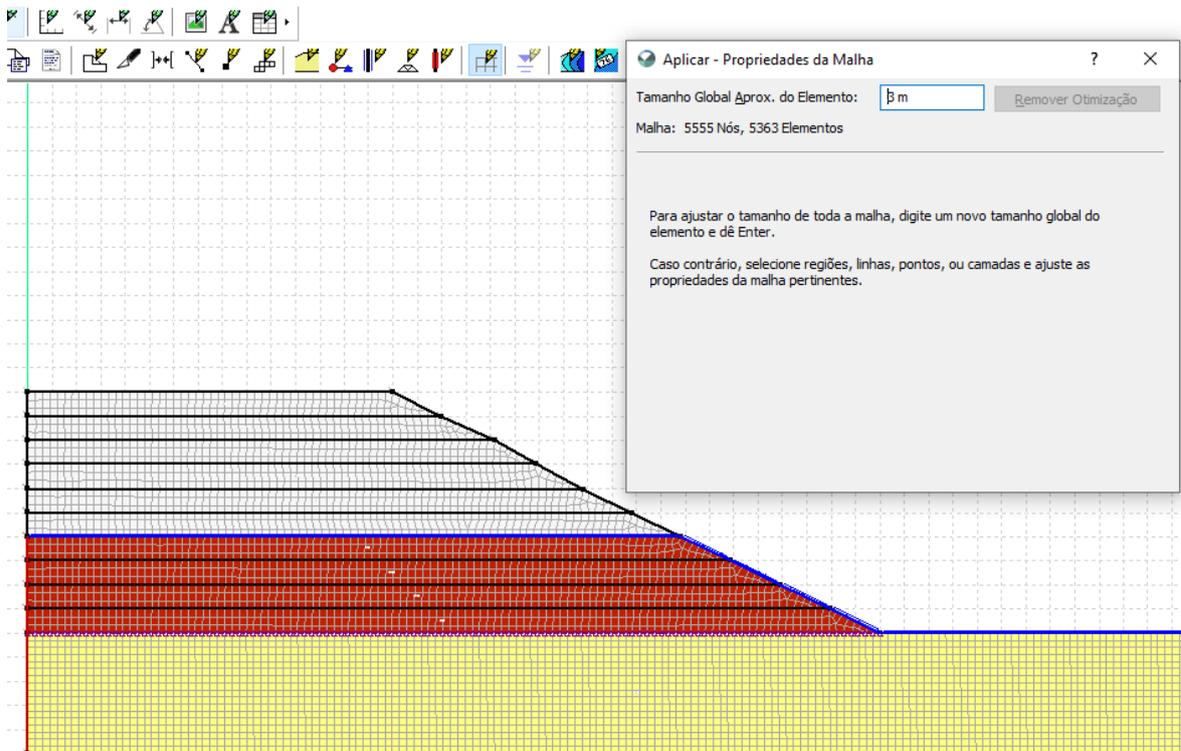


Figura 4.10: Definição de malha.

7. Análise SIGMA/W para tensões na pilha sem influência de precipitação;
8. Análise SIGMA/W para tensões na pilha com influência de precipitação;
9. Análise SLOPE/W para o cálculo do fator de segurança da pilha sem influência de precipitação;
10. Análise SLOPE/W para o cálculo do fator de segurança da pilha com influência de precipitação;

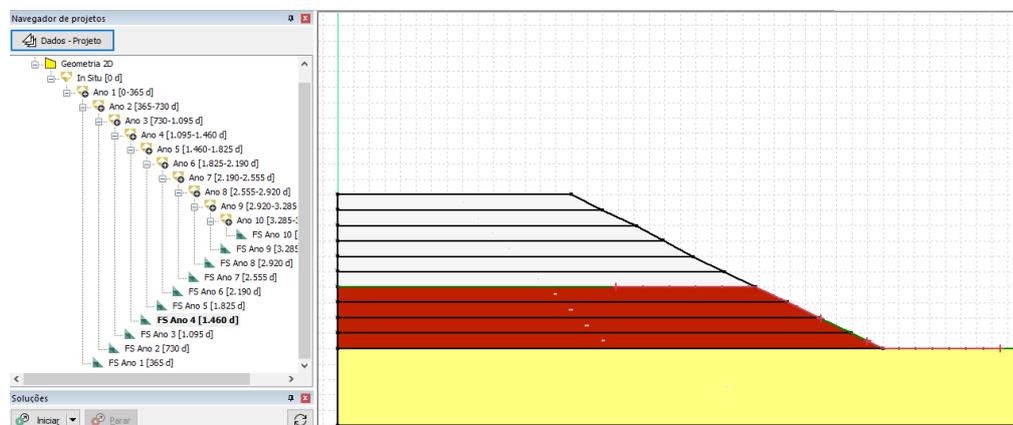


Figura 4.11: Análise SLOPE/W para o cálculo do fator de segurança.

Fez-se, então, a análise de estabilidade de uma pilha de rejeitos de mineração com taxa de alteamento de 10 m de rejeito por ano. Cada camada foi construída com o lançamento de rejeitos e adicionou-se condições de contorno climáticas referentes à chuva. O trabalho contou com uma separação fictícia de período seco e chuvoso sobre os quais

fez-se análises de dois cenários para a pilha criada:

Cenário 1: Análise em que não há influência de precipitação na estabilidade da pilha;

Cenário 2: Análise que contou com a influência da precipitação no período de 2011 a 2021, durante a construção da pilha, mais acurada;

Nos dois cenários, para cada camada, foi calculado o fator de segurança ao final do ano.

A estabilidade da pilha de rejeitos fictícia foi analisada ao longo de sua construção, de dez anos e considerou-se as variações no campo de poropressões advindas das análises de fluxo. Observou-se, durante o alteamento da pilha, uma diminuição do fator de segurança (FS) mesmo para o Cenário 1, em que não há infiltração ou efeito da precipitação na estabilidade da pilha. É mais acentuada a redução do FS no Cenário 2 diante da infiltração da água nas camadas da pilha. Essa alteração no fator de segurança era esperada.

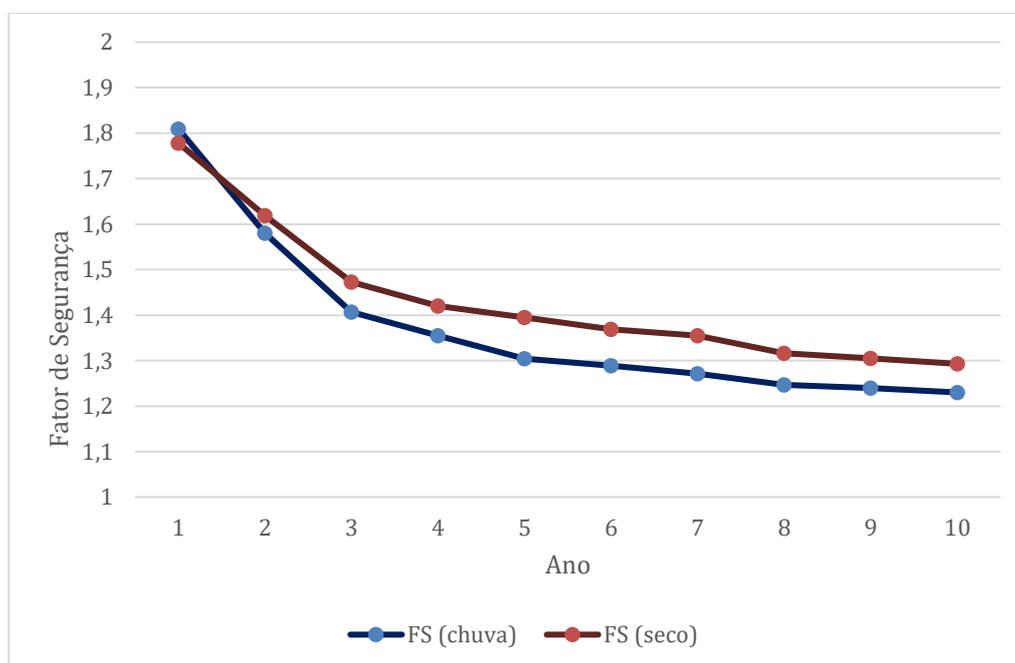


Figura 4.12: Gráfico com fatores de segurança do Cenário 1 e 2.

Os fatores de segurança em ambos os cenários se encontram dentro do esperado para a análise.

Com base nas Figuras 5.2 e 5.3, vê-se que o estado de tensões também está dentro do esperado, assim como as variações nas poropressões.

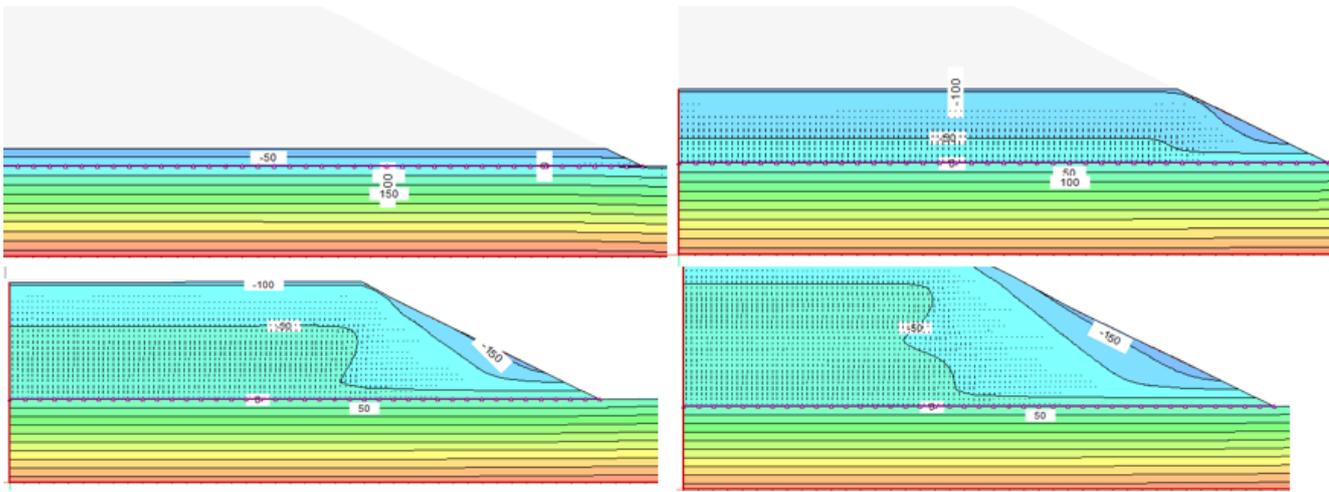


Figura 4.13: Cenário 1 - Mosaico de propressões dos anos 1,4, 7 e 10.

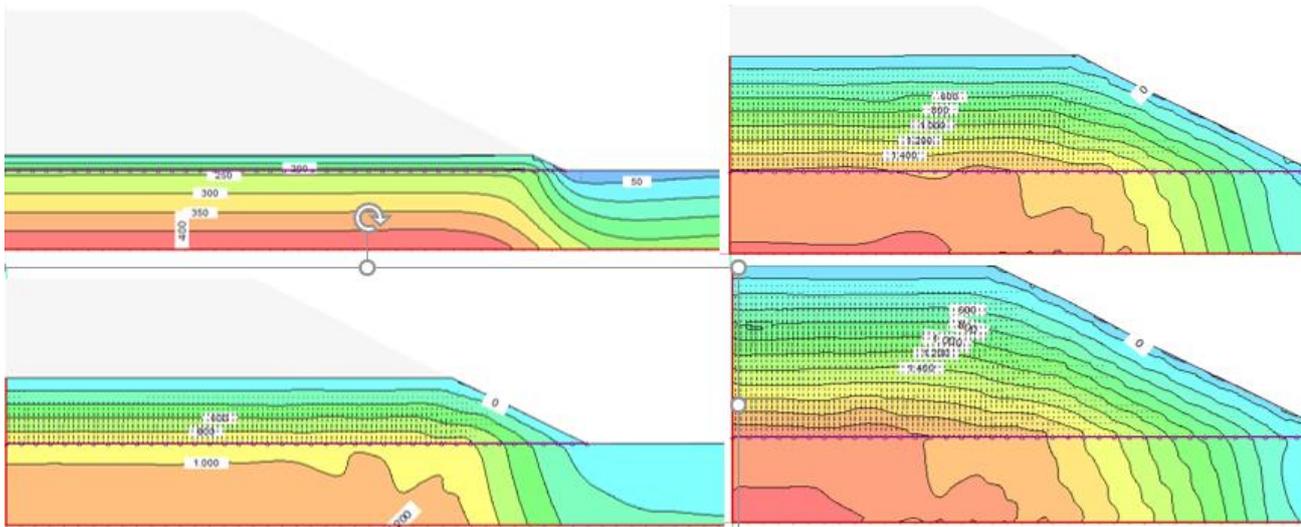


Figura 4.14: Cenário 1 - Mosaico de tensões verticais efetivas dos anos 1,4, 7 e 10.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

A obtenção dos dados climatológicos na região de Ouro Branco, no quadrilátero ferrífero, foi satisfatória diante do contexto apresentado. Nota-se ainda que os dados de evaporação dependem não somente da precipitação, mas também da temperatura e velocidade do vento. Apesar de os dados obtidos pela série pluviométrica e a temperatura terem sido obtidos, tratados e analisados, os dados de velocidade do vento não foram utilizados na análise em prol de simplificação do presente projeto final de graduação. Constatou-se, porém, que a simplificação desses dados não diminuiu a qualidade dos resultados obtidos, dado que o método de análise constituiu-se como a parte essencial do presente trabalho.

Dentro da avaliação de potenciais ferramentas para as análises de fluxo considerando dados climatológicos como condição de contorno, percebeu-se que o GeoStudio permitiu a realização das análises sem que os resultados fossem prejudicados. Ademais, os próprios produtos do GeoStudio são capazes de realizar análises mais robustas e complexas incluindo, também, mais dados climatológicos do que aqueles usados no presente trabalho.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

No que tange as sugestões para trabalhos futuros, há três pontos relevantes a serem considerados:

- Realizar a análise de estabilidade de uma pilha de rejeitos de mineração com base em valores de temperatura, velocidade do vento e evaporação, dado que as duas primeiras variáveis influenciam na evaporação.

Pois uma análise que incorpore todas essas variáveis climáticas além da precipitação consiste em uma simulação mais próxima da realidade.

- Utilizar modelos constitutivos mais adequados para o comportamento do rejeito. Dado que o modelo constitutivo escolhido, o Elasto-plástico Mohr-Coulomb não é o mais adequado para uma simulação real do comportamento de rejeito de mineração.

- Realização de teste de convergência de malha.

Apesar de a malha escolhida ter sido adequada para as análises aqui aplicadas, um teste de convergência de malha pode enriquecer ainda mais análises desse gênero no futuro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Disponível em: <https://anmlegis.datalegis.inf.br/action/ActionDatalegis.php?acao=apresentacao&cod_menu=7269&cod_modulo=431>. Acesso em 28 de outubro de 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Anuário Mineral Brasileiro - Principais Substâncias Metálicas - 2020** Disponível em: <>. Acesso em 28 de outubro de 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Informe Mineral 1º de 2021.** Disponível em: <>. Acesso em 28 de outubro de 2021.

AMOS, Richard et al. (2015). **Waste-rock hydrogeology and geochemistry. Applied Geochemistry**, Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0883292714001474> > Acesso em 12 de abril de 2022.

ANTONINI, Lucas Zenha. **Um breve histórico da questão jurídica e as injustiças promovidas nos territórios extrativo-mineral no Brasil.** Disponível em: <<https://revista.fct.unesp.br/index.php/nera/article/view/8743>>. Acesso em 11 de abril de 2022.

CAPELLI, Renata. **Comparação de métodos na análise granulométrica de rejeitos de mineração.** Disponível em <https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/506/1/MONOGRAFIA_Compara%C3%A7%C3%A3oM%C3%A9todosAn%C3%A1lise.pdf > Acesso em 13 de abril de 2022.

CARVALHO, François F., CARVALHO, Patrícia O., JÚNIOR, Alcemir A., ABRAHIM, Gisele S. **Mineração Sustentável: Os Desafios de Conciliar a Exploração de Recursos Não-Renováveis a Uma Prática Sustentável Geradora de Desenvolvimento Econômico** Disponível em: <>. Acesso em 28 de outubro de 2021.

CGEE: **Mineração e Meio Ambiente no Brasil.** Disponível em: <https://www.cgge.org.br/documents/10195/734063/mineracao_e_meio_ambiente_no_brasil_1022.pdf/e86e431e-1a03-48d0-9a6e-98655ea257b6?version=1.0 >. Acesso em 10 de abril de 2022.

CLIMATE DATA: **Dados para a região de Ouro Branco em MG**, disponível em <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/minas-gerais/ouro-branco-24977/>> acesso em 14 de abril de 2022.

DA COSTA, Hercília Samara Cardoso, DE SOUZA, Edna Santos, TEIXEIRA, Renato Alves, FERNANDES, Antonio Rodrigues. **Teores de Pb em água e solo na área do garimpo de Serra Pelada no estado do Pará**. Disponível em: <>. Acesso em 28 de outubro de 2021.

DA LUZ, Adão Benvindo, LINS, Fernando A. Freitas. **Introdução ao Tratamento de Minérios**. Disponível em: <>. Acesso em 28 de outubro de 2021.

DONG, Longjun, DENG, Sijia, WANG, Feiyue. **Some developments and new insights for environmental sustainability and disaster control of tailings dam**. Disponível em: <>. Acesso em 28 de outubro de 2021.

FIGUEIREDO, B. R. **Minérios e meio ambiente**. 1ª Edição. Editora UNICAMP, 2020.

FRANKS, Daniel M., BOGER, David V., CÔTE, Claire M., MULLIGAN, David R. **Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes**. Disponível em: <>. Acesso em 28 de outubro de 2021.

GHOSTUDIO. Disponível em: <>. Acesso em 28 de outubro de 2021.

GEO-SLOPE International Ltd. (2012). **Stability Modeling with SLOPE/W**.

GEO-SLOPE International Ltd. (2015). **Seepage Modeling with SEEP/W**.

GC VIZCARRA **Numerical modelling of dry stacking tailings heaps**. Disponível em < https://papers.acg.uwa.edu.au/p/2115_19_Vizcarra/ > Acesso em 29 de abril de 2022.

GOMES, Marcos Antônio et al. **Caracterização tecnológica de rejeito de minério de ferro**. Disponível em < <https://www.scielo.br/j/rem/a/dMJ6XKYz4NWz4t4tqhxVGgP/?lang=pt> > Acesso em 13 de abril de 2022.

HARTMANN, Dennis L., **Global Physical Climatology**. 2ª Edição. São Paulo: Editora Elsevier Science, 2015.

IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente. 1990. **Manual de recuperação de áreas degradadas pela mineração: técnicas de revegetação**. Ibama, Brasília.

IBRAM. **ESG: conceito indispensável para pavimentar o caminho da mineração do futuro**. Disponível em: <<https://ibram.org.br/noticia/esg-pavimentar-mineracao-do-futuro/>>. Acesso em 28 de outubro de 2021.

IBRAM. **Sustentabilidade: e-Mineração abre espaço para cases de implantação do TSM no Brasil**. Disponível em: <>. Acesso em 28 de outubro de 2021.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **O Setor Mineral e a Pandemia de Covid19: Um retrato no final de 2020**. Disponível em: <>. Acesso em 28 de outubro de 2021.

ISLAM, Kamrul, MURAKAMI, Shinsuke. **Global-scale impact analysis of mine tailings dam failures: 1915–2020**. Disponível em: <>. Acesso em 28 de outubro de 2021.

INMET. **Normais Climatológicas**. Disponível em <<https://portal.inmet.gov.br/servicos/normais-climatol%C3%B3gicas>>. Acesso em 10 de abril de 2022.

INTERNATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Mining, Minerals and Sustainable Development**. Disponível em: <<https://www.iied.org/mining-minerals-sustainable-development-mmsd>>. Acesso em 28 de outubro de 2021.

JÚNIOR, Antônio Pereira. **As múltiplas visões do meio ambiente e os impactos ambientais** volume 2. 1ª Edição. São Paulo: Editora Simplíssimo, 2020.

LAWSON, Erich. **Understanding Mining Waste Management and Disposal Methods**. Disponível em: <>. Acesso em 28 de outubro de 2021.

LEBLANC, M., MORALES, Juan Antonio, BORREGO, José, ELBAZ-POULICHET, Françoise. **4500-year-old mining pollution in Southwestern Spain: Long-Term implications for modern mining pollution.** Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/270457097_4500-year-old_mining_pollution_in_Southwestern_Spain_Long-Term_implications_for_modern_mining_pollution>. Acesso em 28 de outubro de 2021.

LIMA, Mirelle, OLIVEIRA, Carlos. **Validação estatística dos dados climáticos disponíveis na plataforma Climate-Data.Org para o Estado do Ceará.** Disponível em < <http://www.journals.ufrpe.br/index.php/geama/article/view/3583> > Acesso em 14 de abril de 2022

LOTTI, Raquel et al. **Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos.** Disponível em< <https://www.scielo.br/j/dpress/a/6WCw3yW7WhXWnRYJRGtYzPq/?lang=pt#:~:text=O%20M%C3%A9todo%20dos%20Elementos%20Finitos,mesmas%20propriedades%20do%20meio%20original>> Acesso em 3 de maio de 2022.

MARTINS, S. V. **Recuperação de áreas degradadas: ações em áreas de preservação permanente, voçorocas, taludes rodoviários e de mineração.** 5ª Edição. São Paulo: Aprenda Fácil, 2021.

MILANESI, Marcos Alexandre, et al. **Comparativo entre instrumentos pluviométricos experimentais e automáticos.** Disponível em < <https://ocs.ige.unicamp.br/ojs/sbgfa/article/view/2453> >. Acesso em 10 de abril de 2022.

MORBIDELLI, Renato, GARCÍA-MARÍN, Amanda et al. **The history of rainfall data time-resolution in a wide variety of geographical areas.** Disponível em < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169420307186> >. Acesso em 11 de abril de 2022.

OMMASI, L. R. **A degradação do meio ambiente.** 4. ed., Nobel, 169 p. 1979.

POLÍTICA NACIONAL DE SEGURANÇA DE BARRAGENS. Disponível em: <>. Acesso em 28 de outubro de 2021. INSTITUTO DE PESQUISA

ECONÔMICA APLICADA. **Política Nacional de Segurança de Barragens.** <>. Acesso em 28 de outubro de 2021.

QUEIROZ, Rudney C. **Geologia e geotecnia básica para engenharia civil.** 1º Edição. São Paulo: Editora Blucher, 2016.

RIBEIRO, Luis Fernando Martins, PIRES, Ana Carolina Gonzaga, ALELVAN, Giovanna Monique. **Análise das possibilidades de depósito de estéreis e rejeitos de mineração: as vantagens da codisposição e da disposição compartilhada.** Disponível em: <http://www.abes-rs.uni5.net/centraldeeventos/_arqTrabalhos/trab_20160827175016000000909.pdf>. Acesso em 28 de outubro de 2021.

SÁNCHEZ, Luis Enrique. **Manejo de Resíduos Sólidos em Mineria.** Disponível em: <>. Acesso em 28 de outubro de 2021.

SILVA, Gilson et al.: **CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, FÍSICA E MINERALÓGICA DE ESTÉREIS E REJEITO DA MINERAÇÃO DE FERRO DA MINA DE ALEGRIA, MARIANA-MG.** Disponível em <<https://www.revistas.ufg.br/pat/article/view/2171/2119>> Acesso em 13 de abril de 2022

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SEGURANÇA DE BARRAGENS. Disponível em: <<https://www.snisb.gov.br/>>. Acesso em 28 de outubro de 2021.

SOUZA, Paulo. **Le Nuove Topografie Dell’Inferno Da Dante a Blade Runner.** Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/316171220_LE_NUOVE_TOPOGRAFIE_DELL'INFERNO_DA_DANTE_A_BLADE_RUNNER> Acesso em 29 de Abril de 2022.

VALE. **Carajás: Proteção da Floresta Amazônica ajuda no combate ao aquecimento global.** Disponível em <http://www.vale.com/brasil/pt/aboutvale/news/paginas/carajas-protECAo-da-floresta-amazonica-ajuda-no-combate-ao-aquecimento-global.aspx> Acesso em 3 de maio de 2022.

TAYEBI-KHORAMI, Maedeh, EDRAKI, Mansour, CORDER, Glen, GOLEV, Artem. **Re-Thinking Mining Waste through an Integrative Approach Led by**

Circular Economy Aspirations. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2075-163X/9/5/286>>. Acesso em 28 de outubro de 2021.