

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Avaliação da estabilidade de pilhas de rejeitados mineiros sob diferentes condições de fluxo em modelos numéricos

Leandro Rodriguez de Carvalho



Mestrado em Engenharia Civil - Estruturas e Geotecnia

Orientadora: Dr^a Sara Rios da Rocha e Silva

Coorientador: Dr. António Joaquim Pereira Viana da Fonseca

9 de abril de 2022

Avaliação da estabilidade de pilhas de rejeitados mineiros sob diferentes condições de fluxo em modelos numéricos

Leandro Rodriguez de Carvalho

Mestrado em Engenharia Civil - Estruturas e Geotecnia

Aprovado em provas públicas pelo Júri:

Presidente: Prof. Dr. João Paulo Miranda Guedes

Arguente: Prof. Dr. Manuel de Matos Fernandes

Vogal Orientador: Prof. Dr^a Sara Rios da Rocha e Silva

9 de abril de 2022

Abstract

Mining industry extracts as much mining products quantities as well as produces waste to ensure raw material supplies to economy. Mining waste or tailings can be toxic and cause grievous damages to nature if not treated and stored properly. Tailings disposal in specific embankment dams has been commonly used. In order to avoid accidents, several alternatives had been studied, like the deposition in dry stack tailings filtered and compressed.

This work presents and demonstrates a critical historic review that correlates dams accidents with technological incorporation in tailing disposition on extractive mining industry. Starting from the mining tailings problem until justify the construction of dry stacking tailings considering economical, environmental and regulation arguments to justify their existence.

Reporting expressive works that objectify to resolve differential equations by near numerical solutions, with main focus on Finite Elements Method. The *Plaxis* arises as an example of a program that calculates solutions by the mentioned method with geotechnical applications. Afterwards the equations that mould hydrodynamic phenoms are justify as well as deformations. By these equations the physic phenoms behaviour materials are introduce and slightly demonstrate how is applied the method to those equations and which are the equivalent equations.

Techniques of how to proceed according to engineer in order to learn to use a calculation program are demonstrate. Adopting *Plaxis2D*, presenting how to do to accomplish a set of elementary tests. Procedures are described to represent actions, rebuilding the problem until arrive to the real case and respective stability analyses. Thereby has been studied half of a physic model in real and reduced scale as well as a real dry stack from the Casa de Pedra Mine. In this study percolated flow rate was calculated, the safety factor and the maximum displacement.

From Calculations made to the reduced scale dry stack was obtained the maximum volume flow rate of $56,7 \times 10^{-9}$ [m³/day], while real scale dry stack that has been evaluated have a security factor 2. It was verify that when the gradient increases the safety factor decreases and approximates to one value.

Keywords: dry stack, test program, tailings, dams, accidents, Plaxis, Differential Equations, Finite Element Method, Biot, Song.

Resumo

A indústria mineira extrai tanta quantidade de minérios quanto produz de resíduos para garantir o fornecimento de matérias primas para a economia. Estes resíduos ou rejeitos podem ser tóxicos e causar danos severos à natureza se não forem contidos e tratados. A deposição dos rejeitos em barragens de aterro foi tradicionalmente a forma mais usual de armazenamento. No sentido de evitar acidentes, várias alternativas têm sido estudadas, como a deposição em pilhas de rejeitos filtrados e compactados.

Neste trabalho apresenta-se e demonstra-se uma revisão histórica crítica correlacionando os acidentes de barragens com a incorporação tecnológica para a disposição de rejeitos na indústria mineral extrativista. Parte-se do problema dos rejeitos de mineração até justificar a construção das camadas de pilhas, onde se tem em conta argumentos regulamentares, econômicos e ambientais que justifiquem a existência das mesmas.

Relatam-se trabalhos expressivos que objetivaram resolver equações diferenciais por meio de soluções numéricas aproximadas, com foco principal no Método dos Elementos Finitos. O *Plaxis* surge como um exemplo de programa que calcula soluções aproximadas pelo referido método com aplicações geotécnicas. Depois justificam-se as equações que modelam os fenômenos hidrodinâmicos e as deformações. Por estas equações são introduzidos os fenômenos físicos materiais comportamentais e demonstra-se superficialmente como o método é aplicado àquelas equações e quais são as equações equivalentes.

Demonstram-se técnicas de como proceder conforme um engenheiro para aprender a utilizar um programa de cálculo. Para isto adotando o *Plaxis2D*, apresentando como proceder para efetuar uma série de testes elementares. Descrevem-se procedimentos para fazer representações de ações, vai-se reconstruindo o problema até chegar no caso real e respectiva análise de estabilidade. Para esse efeito, foi estudada metade de um modelo físico em escala reduzida e real, bem como uma pilha real, da mina Casa de Pedra. No estudo foi calculado o caudal percolado, o fator de segurança e os deslocamentos máximos da pilha.

Dos cálculos realizados para a pilha em escala reduzida obteve-se o caudal máximo de $56,7 \times 10^{-9}$ [m³/dia], enquanto as pilhas em escala real que foram avaliadas têm um fator 2 de segurança. Verificou-se que, quando o gradiente aumenta, o fator de segurança diminui aproximando-se da unidade.

Palavras-chave: pilhas, testar programa, rejeitos, barragens, acidentes, Plaxis, Equações Diferenciais, Método dos Elementos Finitos, Biot, Song.

Agradecimentos

A minha família, aos amigos de verdade e a quem mais tenha realmente ajudado e contribuído comigo ou para este trabalho.

Autor

*“While eu estiver aprendendo:
Leio conclusões
Entendo conclusões
Escrevo conclusões
Publico conclusões
conclusões++
”*

Autor desconhecido

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	2
1.2	Objetivos técnicos propostos	3
1.3	Organização: conteúdo, estrutura e funcionamento do texto	4
1.4	Observações regulamentares	5
2	Rejeitos de Mineração	7
2.1	Introdução	7
2.2	Disposição em barragens, acidentes, filtração	8
2.3	Rejeito filtrado e pilhas	12
2.4	Outros processos e soluções	15
2.5	Conclusões	17
3	Método numérico em cenários estruturais geotécnicos	19
3.1	Introdução	19
3.2	Retrospectiva	20
3.3	Formulações	21
3.3.1	Física-Matemática aplicada à Geotecnia	21
3.3.2	A aplicação do MEF	24
3.4	Conclusões	29
4	Conceitos de Mecânica dos Solos aplicados às modelagens de pilhas	31
4.1	Introdução	31
4.2	Rejeitados mineiros	32
4.2.1	O solo rejeitado	33
4.2.2	O material rejeitado	34
4.3	Conclusões	43
5	Utilização do Plaxis2D para análise de estabilidade de pilhas com caso real	45
5.1	Enquadramento	46
5.2	Testes prévios e tarefas no Plaxis	48
5.2.1	O projeto em Plaxis	48
5.2.2	A geometria da estratigrafia	50
5.2.3	Fronteira <i>Head</i> com nível freático	50
5.2.4	Precipitação	52
5.2.5	Variação do nível freático em regime transiente	54
5.2.6	Regime de escoamento no cálculo plástico	55
5.3	Os casos de pilhas modeladas	56

5.3.1	Modelo para a pilha da Casa de Pedra	56
5.3.2	Modelo para centrífuga em escala reduzida	59
5.3.3	Modelo para centrífuga em escala real	60
5.4	Avaliação da estabilidade e do regime de escoamento	61
5.4.1	Modelos e resultados: centrífuga em escala reduzida	61
5.4.2	Modelos e resultados: centrífuga em escala real	63
5.4.3	Modelos e resultados: Casa de Pedra	65
5.5	Conclusões	67
6	Conclusões e trabalho futuro	69
6.1	Resultados	69
6.2	Trabalhos futuros	70
	Referências	73

Lista de Figuras

1.1	Pilha de rejeitos da AngloGold em Santa Bárbara/MG (2022). Fonte: correiobraziliense.com.br. Foto: Mateus Parreira	3
2.1	Diagrama de processamento mineral. Retirado de Mamede (2016) [50]	8
2.2	Secção transversal típica segundo o métodos de alteamento. Retirado de Figueroa (2017) [34]	9
2.3	Acidentes/década x Tratamento acumulado/ano. Adaptado de Davies (2011) [23], Lyu (2019) [49]	10
2.4	Esboço do modelo de filtro-prensa. Retirado de Gupta et al (2016) [40]	13
2.5	Esboço do modelo de filtro a vácuo. Retirado de Gupta et al (2016) [40]	13
2.6	Causas de acidentes. Retirado de Angelino (2020) [4]	14
2.7	Custos em função da configuração do rejeito. Retirado de Sahi et al (2019) [64]	16
2.8	Comparação entre as 3 tecnologias de desidratação mais utilizadas. Retirado de Klug e Schwarz (2020) [43]	17
4.1	Curva granulométrica dos rejeitados por minérios. Retirado de Bhanbhro (2014) [9]	34
4.2	Trajectoria de tensões para um empilhamento com consolidação, adaptado de M.Fernandes (2012) [33]	41
5.1	Mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero. Adaptado de Bizzi et al (2003) [11].	46
5.2	Guia explorador de fases do programa em três situações	49
5.3	Representação das três posições do nível freático	51
5.4	Geometria da pilha da Casa de Pedra	57
5.5	Distribuição do volume precipitado em Congonhas ao longo de 2021 e também para o mês de Dezembro. Fonte: WeatherSpark.com	58
5.6	Geometria da pilha em escala reduzida	59
5.7	Geometria da pilha em escala real	60
5.8	Geometria da pilha em escala reduzida em regime transiente	62
5.9	Coefficiente de segurança em função do deslocamento total para o nó 11415 ou ponto cartesiano A (17,5; 35,0) do gráfico abaixo	64
5.10	Modelo com superfície de rotura global	64
5.11	Nós escolhidos para o cálculo do coeficiente de segurança em cada fase de alteamento	66
5.12	Fator de segurança para os diferentes nós escolhidos	66

Lista de Tabelas

5.1	Assentamentos para os 3 diferentes casos	49
5.2	Caudais unitários nas diferentes fases descritas	51
5.3	Resultados para as hipóteses levantadas	53
5.4	Assentamentos para os 4 diferentes casos	55
5.5	Parâmetros mecânicos para o solo de fundação e as camadas de pilhas em profundidade. Adaptado de Amaral (2021) [3]	57
5.6	Resultados nas diferentes fases descritas - escala reduzida	62
6.1	Resultados numéricos relevantes	70

Capítulo 1

Introdução

O engenheiro tem a responsabilidade de assumir o trabalho que lhe é designado dentro da sua área de atuação, estudar o problema, estudar as tecnologias pertinentes, aplicar os conceitos prévios que foram adquiridos durante formações, modelar o problema, interpretar as soluções e emitir um parecer técnico. Este trabalho foi-me atribuído, comprometi-me com os professores orientadores, bem como com a tarefa de cumpri-lo com seriedade, a mesma responsabilidade descrita. Assim como um engenheiro, matemático, físico ou economista procedem: desmontando os problemas em partes elementares e remontando-os.

Fui orientado a estudar o *Plaxis* e a executar tarefas designadas pela orientadora durante três meses antes de começar a escrever. Em nenhum momento fui instruído passo a passo como devia utilizar o programa, mas fui questionado muitas vezes e desenvolvi processos de aprendizagem independentes. O título da dissertação ressalta um trabalho de quem faz exclusivamente simulações numéricas computacionais. Como estudante, penso que um especialista em Estrutura e Geotecnia na função de modelador seja capaz de entender o problema segundo alguns aspectos. Em primeiro momento, do ponto de vista social e da Mineração. Em segundo momento, os processos construtivos envolvidos na execução das camadas de pilhas, o funcionamento teórico e computacional dos programas utilizados, associar superficialmente alguns conceitos científicos e técnicos específicos que se relacionam com a construção das pilhas e outros que estão também implementados nos programas.

Para esta finalidade, procurei cumprir o plano acordado e os objetivos técnicos que serão apresentados, desenvolvendo um texto de acordo com o título que designa especificamente a tarefa técnica mínima executada por mim neste trabalho. Simultaneamente procurei dar resposta a todas as questões levantadas, clarificar as tarefas desempenhadas, um pouco do processo do aprendizado e fazer o conteúdo alcançar fronteiras além das Engenharias. Todos os capítulos têm motivações técnicas mais detalhadas que foram surgindo enquanto escrevia outras partes para cumprir os propósitos acima definidos. Estas motivações introduzem cada capítulo, onde está compreendido

porque o conteúdo do capítulo é aquele que está escrito e também porque está organizado e apresentado da forma como está.

1.1 Enquadramento

O trabalho, além das motivações pessoais do ponto de vista acadêmico e profissional de Estruturas e Geotecnia, tem justificativas maiores que vão de encontro aos interesses sociais, de políticas de gestão de recursos naturais, das mineradoras e outros relevantes em carácter mundial. Nesta perspectiva o problema é apresentado a seguir.

Conforme Oliveira Reis et al (2020) [27], a mineração é um dos mais importantes setores da economia mundial, exercendo grande impacto na evolução tecnológica da humanidade. Durante o século XX a atividade mineradora extrativista cresceu muito em escala global. A deposição em barragens de rejeitos foi o método mais adotado e o número destas estruturas também cresceu proporcionalmente. Paralelamente, houve também um aumento do número de acidentes com barragens de rejeitos minerais no mundo, com destaque negativo na última década para o Brasil.

Ainda conforme Oliveira Reis et al (2020) [27], entre os anos de 1910 e 2019, o panorama sobre eventos de rompimentos de barragens de rejeitos aponta a predominância de casos de rompimento ao longo das décadas de 1960, 1970 e 1980. Este panorama também indica uma transição da concentração dos eventos da Europa para a América do Sul e para a Ásia. Segundo os mesmos autores, existem quatro eventos muito catastróficos: Aznalcóllar (Espanha, 1998), Mount Polley (Canadá, 2014), Fundão (Brasil, 2015) e Brumadinho (Brasil, 2019). Aznalcóllar e Mount Polley foram rompimentos sem perda de vidas humanas, mas grandes desastres ambientais com contaminação de áreas extensas por metais pesados, tais como arsênio, cobalto, chumbo e zinco. Os autores também evidenciam adaptações nas normas legislativas ambientais e minerárias nesses países, motivadas pelos eventos citados.

Os acidentes com barragens podem ter feito com as pilhas de rejeitados mineiros que são estruturas de aterros viessem a ser adotadas como alternativa à deposição dos rejeitados. Estas estruturas apresentaram-se muito mais estáveis que a tradicional barragem, mas tendo sido registrado alguns casos de colapso em: Aberfan (País de Gales, 1966), Califórnia (EUA, 1990/2000), Macedônia Ocidental (Grécia, 2007) e Montana (EUA, 2011).

Devido aos acidentes, também à dimensão cada vez maior das pilhas, a problemas de erosão como os evidenciados na foto da figura 1.1 da página seguinte, há a necessidade de avaliar a integridade destas estruturas procedendo a estudos com base em análises tensão-deformação, que sejam bastante precisos no que se refere em considerar a maior quantidade de fenômenos físicos que podem ocorrer em cenários ambientais com estas estruturas. Recentemente a tecnologia disponível que permite modelar os fenômenos que ocorrem nestes cenários estruturais, são os programas que resolvem equações diferenciais por aproximações numéricas.



Figura 1.1: Pilha de rejeitos da AngloGold em Santa Bárbara/MG (2022). Fonte: correiobraziliense.com.br. Foto: Mateus Parreira

1.2 Objetivos técnicos propostos

Neste trabalho utiliza-se o *Plaxis2D* para modelar principalmente diferentes hipóteses de condições de contorno no regime de escoamento através destas estruturas. As condições de contorno de fluxo trabalhadas são as que impõe valor de potencial e caudal aos segmentos de fronteira. Com estas condições simula-se a mudança instantânea de posição do nível freático dentro da pilha e a saturação temporal do solo em profundidade para simulações da precipitação e infiltrações.

Nesse sentido, são analisadas duas estruturas: um modelo simples idealizado de uma pilha e de uma pilha existente. Na primeira estrutura e como primeira hipótese avalia-se a estabilidade da pilha pelo cálculo automático do coeficiente de segurança. Como segunda hipótese, estuda-se a influência incremental do potencial imposto em conjunto com a posição do nível freático na estabilidade da estrutura até atingir o cenário limite nodal de plastificação. Nesta hipótese compara-se a influência do cálculo das pressões em condições hidrostáticas e hidrodinâmicas. Na segunda estrutura é analisada a estabilidade sob o efeito da precipitação no arrasto de partículas finas em deformações acopladas. Finalmente, pretende-se analisar a influência do modelo constitutivo nos resultados obtidos para a segunda estrutura, comparando-se o modelo de Mohr-Coulomb em condições drenadas com o modelo Norsand.

1.3 Organização: conteúdo, estrutura e funcionamento do texto

Na apresentação a um momento de avaliação existe sempre um empenho e trabalho elaborado em *backoffice* que não é avaliado. Demonstrar o domínio da técnica consiste pelo menos, em descrever, em demonstrar todos os passos de execução, o produto, a utilização através de uma aplicação e discutir resultados se houver necessidade. É permitido descrever procedimentos, identificar e corrigir falhas, agregar aprimoramento sem desperdiçar o que já se conhece e replicar com mais eficiência.

O texto é uma síntese do desenvolvimento do trabalho, do trabalho desenvolvido na implementação das ideias em texto. Como o conteúdo apresentado poderia ter muito conteúdo implícito, legitima-se, também desta forma, demonstrar isto que o estudante não pode apresentar nas outras disciplinas da FEUP pelo método de avaliação por exames. Os professores ensinam que o problema deve ser desmontado e remontado. Eu fiz isto orientado maioritariamente por código de cores, por tópicos, unindo os tópicos também escrevendo código fonte, principalmente com o Excel utilizando as condicionantes básicas porque a lógica de programação não muda na reprogramação de problemas, independentemente do tipo de linguagem de código apresentada. Isto originou uma metodologia de aprendizagem e organizacional. Neste trabalho de final de curso acabei por aplicá-la porque são os meus atributos. Pelo que, também desta forma, legitima-se introduzi-la mais detalhadamente.

Para manter-se o conteúdo apresentado restrito ao título, o estudante poderia apresentar em apêndice os processos específicos que foram desenvolvidos para este trabalho: a aplicação de índices nos arquivos, documentos de referência, nos projetos do *Plaxis*, a utilização do Excel, conceitos da Eletrônica e das Ciências da Computação aplicados ao entendimento do *Plaxis*. Estes últimos que foram também aplicados na forma como a dissertação está escrita. Além da reestruturação de código em *Latex* que foi fundamental na implementação textual do conteúdo selecionado. Mas decidi omitir este conteúdo e tentar descrever um pouco como é possível percebê-lo no texto tratando-se apenas dos capítulos.

Desde que seja nomeado um referencial, os conceitos são sempre válidos. Um especialista tende a associar os conceitos frequentemente no que se refere a sua área de atuação. Mas como este trabalho é multidisciplinar, distinguiram-se muitos conceitos e os referenciais são muito importantes. A ferramenta chave das ideias implementadas é a distinção da palavra rejeito e rejeitado e as definições conforme a área de aplicação. Neste trabalho pretendeu-se utiliza-las da seguinte forma:

- rejeito é o volume desperdiçado, descartado durante os processos de mineração até a deposição.
- rejeitado se refere ao conteúdo, volume armazenado no destino final: na estrutura ou não.

A dissertação está composta por três capítulos numerados: 2; 3; 4. Estes podem ser interpretados como o estado atual do conhecimento nas áreas neles designadas numa perspectiva global dos

problemas descritos. Todos os três capítulos aproximam-se de revisões de conteúdo aplicadas às pilhas que ajudam na execução do trabalho abstrato apresentado no capítulo 5.

O capítulo 2 é de Mineração e contextualiza o problema das pilhas dentro da atividade mineradora, também como um problema genérico. Portanto prevalecem as definições das palavras empregues dentro da Mineração, relacionadas às tecnologias empregadas naquele contexto.

O capítulo 3 é de Estruturas e trata dos fenômenos físicos que ocorrem em partículas das estruturas geotécnicas. Apresentam-se os passos que ocorrem na aplicação do Método dos Elementos Finitos para quantificar aqueles fenômenos. Este capítulo também é multidisciplinar e por isto tem muitos referenciais.

O capítulo 4 é de Geotecnia e contextualiza as pilhas dentro da Mecânica dos Solos. Portanto prevalecem as definições das palavras empregues nesta abordagem. Quando neste contexto ainda é utilizado a definição mineral dos rejeitos, remete-se à Mineração.

O capítulo 5 é maioritariamente exclusivo e de experiência acumulada em trabalhar também com o *Plaxis* e com suporte dos manuais do programa.

Todos os capítulos, exceto este e o conclusivo, estão escritos no formato artigo: resumo, introdução, desenvolvimento e conclusões. Isto vai permitir alcançar conclusões mais avançadas. Se conectam em primeiro instante através das introduções e pela descrição dos rejeitos em escala compatível. As conclusões de cada capítulo são compatíveis com o conteúdo apresentado e suficientemente técnicas. Enquanto que o capítulo 6 apresenta-se uma abordagem mais geral do trabalho, outras conclusões que surgiram com o fim do trabalho, incluído o aprendizado que o trabalho proporcionou. Cada capítulo inicia-se com uma descrição bastante detalhada do conteúdo apresentado em cada parágrafo.

1.4 Observações regulamentares

Este trabalho é apresentado num formato não muito habitual, mas considera-se uma boa opção, assim como o método de escrita, até mesmo inovadores. Pelo que é conveniente expor algumas justificativas. Embora seja um *layout* e método já padronizados na FEUP para as Engenharias: Eletrotécnica e de Computadores; Informática e Computação; Mecânica; Software e também aceite pelo menos na Faculdade de Medicina da Universidade do Porto.

Segundo a Norma Portuguesa de documentação e informação NP 405 (1 a 4) a citação em texto pode assumir as formas de autor data, numérica e nota de rodapé, sendo da responsabilidade do utilizador a seleção e aplicação.

Neste trabalho utiliza-se o nome do autor quando há a possibilidade do conteúdo ser encontrado quase que na íntegra na referência de onde foi retirado. Enquanto que se utiliza somente o formato numérico para indicar as referências estudadas para escrever o conteúdo relacionado.

Conforme M. Matos (1993) [54], as figuras e tabelas devem ser incluídas perto da primeira referência que lhes é feita no texto. Esta convenção observa normas portuguesas e internacionais.

Pela Língua Portuguesa, as unidades são escritas por extenso (mais apropriadamente). Dentro de parênteses fazem-se observações acessórias para o entendimento do texto. Os colchetes funcionam igualmente como parênteses. Pela Análise Dimensional, os colchetes denotam a dimensão de uma grandeza não associada a um sistema de medidas. Pela Física, é corrente expressar símbolos de unidades de medida em texto entre parênteses. A todo rigor físico, poder-se-ia escrever os valores das grandezas acompanhados das suas respectivas dimensões e indicar que estão no Sistema Internacional de Unidades - SI, por exemplo. Para ficar mais evidente e de fácil visualização no texto, substituíram-se as dimensões pelas unidades de medida e, em vez dos parênteses, mantiveram-se os colchetes. Já que aqueles foram utilizados noutros casos, não se trata de um texto de Análise Dimensional e o SI recomenda a utilização de colchetes para evitar ambiguidades. No *Plaxis* ainda podem aparecer as unidades entre colchetes.

Capítulo 2

Rejeitos de Mineração

O capítulo parte da definição de rejeito dentro da Mineração. A seguir, define o beneficiamento de minérios através do diagrama processual e descreve a técnica mais recorrente para depois justificar a deposição em barragem de rejeitados. Na sequência, é apresentada uma revisão histórica crítica focada nos acidentes destas estruturas desde 1910, procurando estabelecer uma correlação entre estes eventos e as inovações incorporadas, mais especificamente as tecnologias que podem levar à deposição em forma de camadas de aterro. Neste ponto, refere-se à etapa de beneficiamento e redefini-se mais detalhadamente o espessamento, a filtração e as formas de deposição correlatas dentre estas, as pilhas de rejeitados. Apresentam-se características de tecnologias de empilhamento, identificando na sequência, os parâmetros mais condicionantes para o estudo de comportamento dos materiais do solo. Acaba por estabelecer uma ligação entre a avaliação da estabilidade das estruturas geotécnicas e as modelagens computacionais. Por fim, indica uma revisão bibliográfica bastante compacta acerca de outras soluções.

2.1 Introdução

Partindo do referencial técnico, o trabalho concentra-se na avaliação da integridade da estrutura geotécnica originada pela disposição de rejeitados de mineração insaturados em camadas compactadas e sobrepostas. Isto é possível utilizando-se as tecnologias existentes, mais especificamente os programas de cálculo automático com aplicações geotécnicas. Sabe-se que nestes programas estão implementados métodos de cálculo de soluções numéricas, mais especificamente o Método dos Elementos Finitos. Entende-se que isto foi possível, pelo menos, devido aos avanços no campo da Física, Matemática Aplicada e Computacional, Estruturas e Geotecnia.

Antes de entrar neste cenário apresentado, é conhecido o problema global do rompimento de barragens na atualidade. Entende-se que existe uma distribuição estatística destes eventos no tempo e um encadeamento de acontecimentos dentro da Mineração que levaram a isto ocorrer e à construção das pilhas como uma solução mais segura. Para o trabalho técnico não ser tanto

abstrato, é coerente começar os estudos com uma contextualização genérica do problema e ir reduzindo a escala convergindo para a vertente pretendida. Trabalhar este cenário vai permitir entender melhor como o problema aconteceu do lado dos rejeitos.

Desta forma, o capítulo pretende contextualizar as pilhas de uma maneira concisa, mas o suficientemente bem para oferecer um panorama global bastante alargado estabelecendo um paralelo entre o percurso traçado pelos rejeitos a partir da origem na mina e os eventos que o transformaram num problema bastante grave, até o momento de intersecção com os referidos métodos numéricos.

2.2 Disposição em barragens, acidentes, filtração

Grandes quantidades de rocha são extraídas, trituradas, pulverizadas e processadas para recuperar metais e outros valores minerais necessários para os processos industriais, fertilizantes, casas, carros e outros produtos de consumo. Para isto, a atividade mineradora (figura 2.1) consequentemente gera volumes de resíduos tanto quanto produz de minérios, senão em ordem de grandeza ainda maior que aqueles extraídos. Muitas vezes é necessária uma moagem fina para liberar os minérios acabando por descartar minerais que prevaleceram até recentemente sem aproveitamento e economicamente irrelevantes que são denominados *rejeitos de mineração* [12, 46, 48].

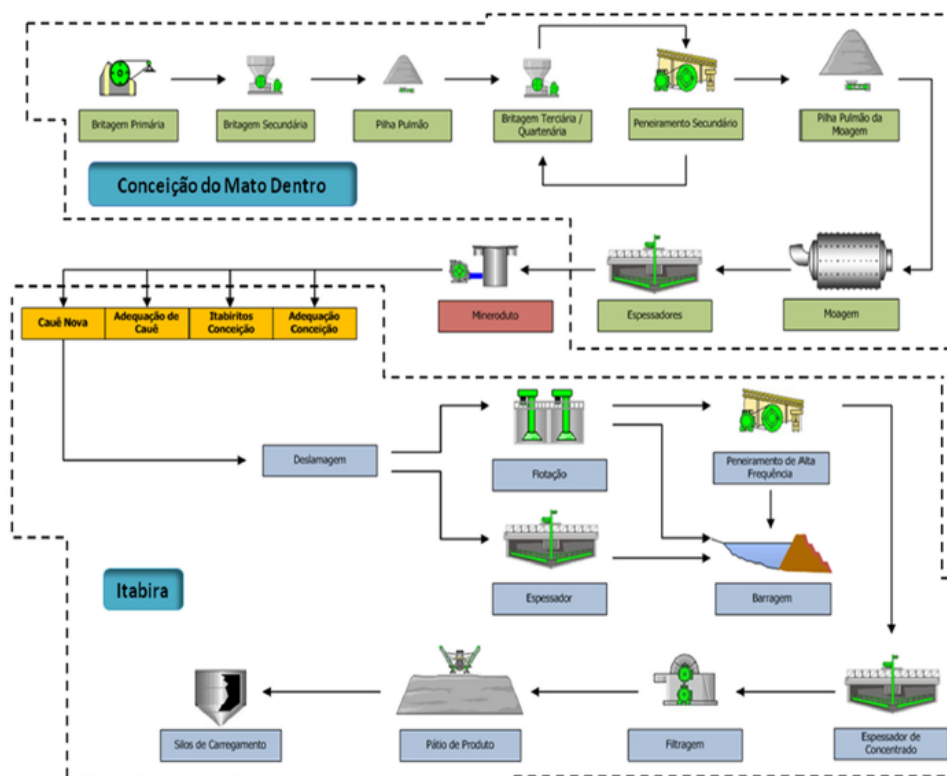


Figura 2.1: Diagrama de processamento mineral. Retirado de Mamede (2016) [50]

Todos os tipos de explorações de minerais metálicos têm em comum, além da extração obviamente, a etapa de beneficiamento de minérios na qual são empregados processos para atingir a granulometria e a concentração ou pureza mineral adequadas à metalurgia. Dentre os processos, a britagem e moagem são praticamente obrigatórias para liberação do minério. A moagem pode representar até metade do custo operacional de uma planta de processamento mineral e no que se refere à concentração, a flotação é a técnica mais difundida no Brasil [8, 48, 66].

A flotação é a tecnologia que separa as partículas minerais e tem mecanismo baseado na propriedade de bolhas de ar aderirem às superfícies minerais específicas numa mistura água/minério denominada de polpa mineral. As partículas hidrofóbicas aderidas às bolhas de ar formam uma espuma pela qual são transportadas para fora da polpa e coletadas no topo dos equipamentos de flotação, deixando na fase polpa as demais partículas hidrofílicas [66, 57].

Tanto a moagem tradicional em moinhos de bola como a flotação envolvem a utilização de muita água, mas parte dela geralmente é tratada e reincorporada novamente no processo. Contudo, o restante dos fluídos após a deslamagem e também o rejeito em polpa, foram correntemente ao longo do tempo destinados ao armazenamento em barragens de rejeitos, ver figura 2.1.

A estrutura de contenção surge com um dique inicial e os rejeitos lançados na forma de polpa depositam-se por gravidade de maneira a formar uma praia junto do dique. Conforme a exploração da jazida mineral progride, é necessário aumentar a capacidade de armazenamento da albufeira. Para este efeito, são distinguidas três técnicas de alteamento: a montante, em linha de centro, a jusante. As três esquematizadas, respectivamente da esquerda para a direita, na figura 2.2.

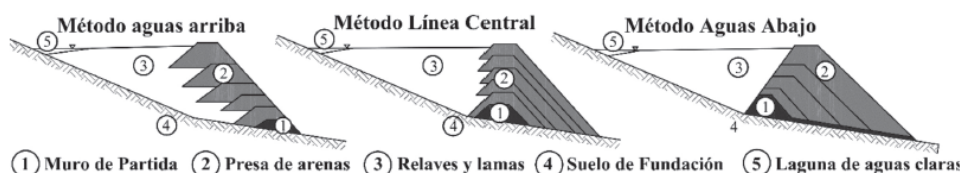


Figura 2.2: Secção transversal típica segundo o métodos de alteamento. Retirado de Figueroa (2017) [34]

Segundo Rodríguez et al (2018) [8], o método a montante consiste em elevar gradualmente a barragem, construindo bermas baixas acima e atrás do dique existente. Ao contrário do método a montante, o método a jusante consiste em esvaziar e remodelar a fração arenosa dos rejeitos, geralmente ciclone, na encosta a jusante da parede, enquanto os rejeitos finos são depositados a montante. Necessariamente, o método a jusante aumenta gradualmente a pegada da estrutura. Finalmente, o método da linha central busca depositar a fração de areia para o lado a jusante e os finos para o lado a montante, de forma que a nova crista siga o mesmo eixo da barragem inicial. Todas as formas que estão representadas na figura 2.2 também foram estudadas, com muito mais riqueza de detalhes e descritas por Vick (1990) [81].

A história da mineração é marcada por alguns episódios trágicos, não foi incomum acontecerem explosões, um cenário marcante é descrito por Robert (1990) [76]. A indústria de exploração

mineral na década de 1950 experimentou avanços no sentido de coibir acidentes como aqueles. Na década seguinte, o foco concentrou-se para agregar soluções acerca de problemas de suporte terrestre, disposição de resíduos e desmonte de maciços em minas profundas [74].

A partir de 1960 começaram a ser desenvolvidos os grandes empreendimentos minerários na Austrália e multiplicaram-se ao redor do mundo, alguns concomitantemente e em outros países, uns anos mais tarde. Fazia vinte anos quando haviam introduzido os ciclones no circuito de moagem e classificação, a incorporação deste equipamento representou o primeiro passo em direção à desidratação de rejeitos que foi impulsionada pelo interesse em recuperar a fração grosseira nos processos para a construção de barragens de aterro fora do cenário da mineração [13, 71, 23].

A partir das tecnologias de desidratação é possível classificar os rejeitos em espessado, filtrado e outros. As diferenças entre as duas principais diferentes configurações são descritas mais adiante. Mas comparar as três tecnologias alternativas para deposição de rejeito com os acidentes ocorridos em barragens nos últimos 100 anos, pode ser feito pela análise do gráfico da figura 2.3. Assumindo ainda que a filtração é a principal representante dos avanços tecnológicos incorporados nos processos de beneficiamento, o foco da análise poderia concentrar-se nesta tecnologia (menor teor em água). É um caminho para tentar saber se o motivo de incorporação de tecnologias foram os acidentes. Portanto, se existiu trabalho neste sentido.

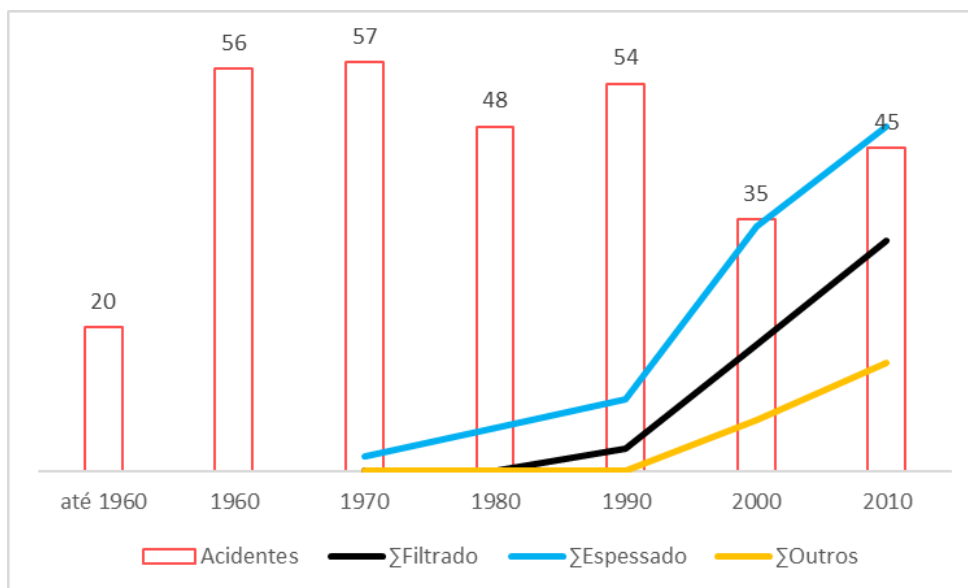


Figura 2.3: Acidentes/década x Tratamento acumulado/ano. Adaptado de Davies (2011) [23], Lyu (2019) [49]

Segundo Davies (2011) [23], este gráfico teria escala vertical em unidades. O eixo das ordenadas para os dados em distribuição linear teria valores superficialmente estimados. O eixo das abscissas representa o valor acumulado das tecnologias existentes. Era um gráfico com valores estimados e pouco rigoroso. Os valores foram estimados antes de terem os gráficos sobrepostos. Por também o tipo de análise que se pretende fazer ser de tendências, o eixo das ordenadas é irre-

levante para os tipos de tratamento dado ao rejeito. No caso dos acidentes, o valor absoluto está bem representado sobre as colunas. Mesmo assim, trata-se mais de uma figura que um gráfico.

Pela figura 2.3, percebe-se que os acidentes com barragens de rejeitos totalizavam 20 eventos durante o século XX, quando naquela primeira década representada saltaram para 56, vale frisar que isto ocorreu apenas de 1960 a 1970, e ainda se mantiveram entorno dos 50 até 1999 inclusive. De 2000 a 2010 foram registradas 35 ocorrências.

A partir 1970, a tecnologia de desidratação começou a ser incorporada como alternativa nas instalações e poderia ser justificada em razão do número de acidentes anteriores. Existe também a hipótese de passarem a minerar mais as zonas com limitações operacionais efetivas. Na década de 1990 nota-se um esforço crescente em consolidar este tipo de tecnologias nas instalações.

Concernente à redução dos acidentes durante a década de 2000 estar associada aqueles mesmos esforços, durante os 20 anos precedentes, seria plausível. Contudo, os acidentes voltaram a subir mais próximo dos 50 casos na década seguinte depois de ter passado meio século.

Pela premissa assumida inicialmente. Só pelo fato das barragens de rejeitados existirem, da forma como foram concebidas e geridas, desde que o número tenha crescido linearmente, têm se mostrado propícias às falhas, a uma taxa constante e mais do que hoje espera-se para esse tipo de estrutura.

Comparando também o desempenho das estruturas de represamento de água com as barragens de mineração, leva a confirmar as discussões e evidencia ainda mais a fragilidade das estruturas de contenção de rejeitos [62]. Uma vez que seria plausível esperar que estes rompimentos ocorressem em eventos milenares [5].

Vale acrescentar que, a ideia de correlação é mais coerente caso o aumento das unidades que filtram, além das novas, sejam as que concomitantemente operem barragem. Desta forma, aquela tendência pelo rejeito filtrado que desponta em 1990, pode ser indício da substituição das estruturas de contenção que tendem a ser desativadas a longo prazo quando alcançam a sua capacidade máxima de armazenamento, por limitações e/ou responsabilidade operacional e os novos projetos migrem para as pilhas, por exemplo.

Se observar ainda o comportamento a partir da década em que ocorreu o pico de acidentes, 1970. Talvez exista já uma certa tendência dos eventos irem subindo até um patamar sensivelmente menor que o máximo alcançado anteriormente e, na sequência, baixarem até um patamar mínimo que seja menor que o mínimo alcançado anteriormente. Desta forma, podem estabilizarem no futuro, em números mais próximos do que era antes de 1960 ou mesmo deixarem de ocorrer. Depende muito de como irão gerir os rejeitos, dos fenômenos naturais e como a sociedade vai reagir no caso de acidentes em barragens de mineração.

Em suma, os esforços reunidos no sentido de coibir os acidentes em barragens de rejeitos tenham surtido algum efeito positivo. Contudo, também pelos estudos consultados até o momento, pode-se inferir que a consolidação das tecnologias de desidratação foi, desde o princípio, na perspectiva da viabilidade econômica dos projetos, uma vez que, em função do retorno de investimento que se justifica a exploração mineral. A deposição em barragens é descartada onde há limitações geomorfológicas, geológicas ou geofísicas e economicamente, em zonas áridas, frias ou de uso

controlado da água. O Chile é um exemplo típico em que barragens de rejeitos, ao menos pelo método a montante, são totalmente contra-indicadas porque a localização combina a sismicidade com o uso controlado da água [23, 34].

2.3 Rejeito filtrado e pilhas

As restrições normativas mais rígidas, a exploração de jazidas de baixo teor e o claro objetivo em reduzir o consumo de água nos processos, restringem muito a construção de novas barragens. A indústria para continuar competitiva tem de melhorar a eficiência operacional, incorporar inovações tecnológicas para adensar mais rejeito que anteriormente, adaptar e/ou adotar outras formas de armazenamento e no limite, convergir para empilhamentos de materiais rejeitados em razão de conceber estruturas aceitavelmente seguras, todavia os lucros serem menores [23, 52]. Antes de entrar no mérito das pilhas propriamente dito, faz sentido conhecer mais detalhadamente as técnicas de espessamento e filtração que são processos aplicados a montante da execução do empilhamento, figura 2.1, mas podem configurar um rejeito adequado para tipos um pouco diferentes de deposição.

O espessamento é normalmente aplicado em polpas muito diluídas e, assim como a decantação, faz sedimentar as partículas sólidas por gravidade. É a etapa principal na recuperação da água para recirculação *overflow* e, conseqüentemente, origina uma polpa *underflow* mais densa. O rejeito espessado pode ser transferido para a área de disposição por bombeamento ou, em função da topografia, por gravidade através de canaletas. Pelo método Robinsky o depósito não requer dique, apenas um pequeno terrapleno que faz surgir uma lagoa na extremidade oposta onde a água tende a evaporar [39, 8, 85].

Na última década, o espessamento é aplicado também após a flotação com o objetivo de eliminar espumas, aumentar a densidade da polpa atribuindo-lhe melhores características de bombeamento para a barragem ou melhor concentração de sólidos adequada à filtragem antes do empilhamento [39].

A filtragem permite reduzir as perdas de água que são fundamentais para garantir a viabilidade de projetos em zonas áridas, assim como ocorre no deserto do Atacama. O processo permite separar sólido-líquido e, a princípio foi predominantemente empregado na mistura com minérios após a flotação. Na maioria das vezes requer uma etapa anterior de adensamento da polpa (ciclonagem ou espessamento) que vai garantir a concentração mínima de sólidos na alimentação dos filtros de onde sai a torta que é classificada como material insaturado [39, 23].

A tecnologia disponível nos filtros opera por meio de pressão ou de vácuo. Placas empilhadas dispostas na horizontal ou vertical, correias, pistão, tambores e discos compõem as configurações recorrentes nos filtros. O equipamento à pressão é alimentado por rejeitos bombeados através de tubagem e trabalha numa gama de materiais bastante ampla, ainda que o modelo de correia a vácuo, alimentado por esteira rolante, seja provavelmente o mais coerente para operações em grande escala [24]. Nas figuras 2.4 e 2.5 estão representadas as secções típicas do filtro a pressão e a vácuo.

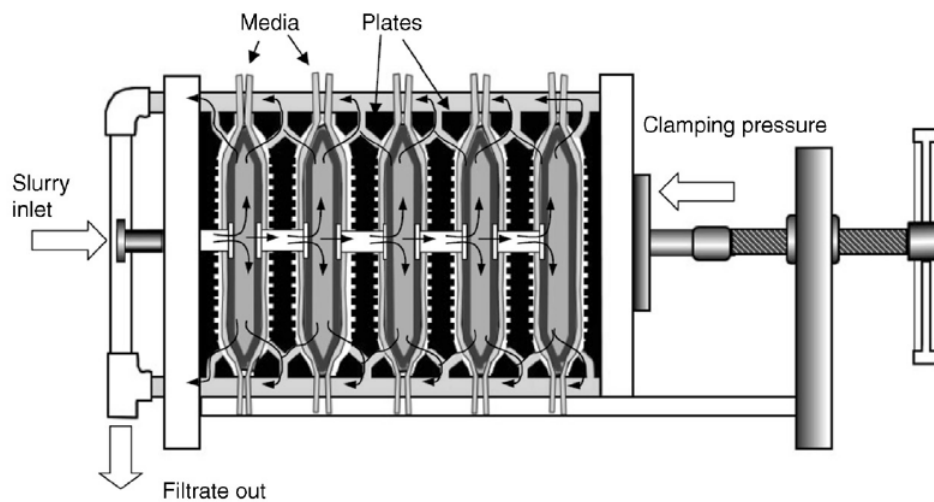


Figura 2.4: Esboço do modelo de filtro-prensa. Retirado de Gupta et al (2016) [40]

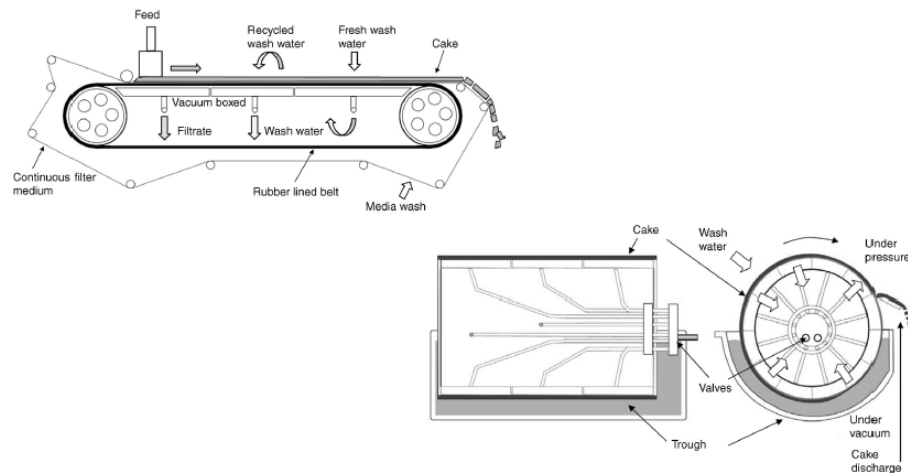


Figura 2.5: Esboço do modelo de filtro a vácuo. Retirado de Gupta et al (2016) [40]

Os rejeitos filtrados são bem menos saturados que os espessados, mesmo assim o depósito é similar, as características comportamentais do material in situ vai distingui-los melhor. O transporte até o depósito é efetuado com transportadores de correia, com equipamentos de movimentações de terras ou caminhões. No primeiro caso, o material forma uma pilha de geometria cônica muito similar ao que também ocorre com os espessados. Nos outros casos, o material é despejado em módulos. Ambos também costumam ser realizados em conjunto. Na sequência, é espalhado e compactado de maneira a formar um substrato consistente e suficientemente resistente para suportar a sobreposição de camadas [8, 39, 24, 85, 2].

Quadro técnico após empilhamentos

Em Rosemont Copper Company (2008) [20] existe uma listagem das situações mais recomendáveis para adotar o empilhamento de rejeitos filtrados e obter bom desempenho. No relatório do projeto de exploração de cobre tem um capítulo que avalia a experiência global de soluções em pilhas da mesma indústria que explora aquele projeto. Os dados empíricos veem mostrando que reunir uma ou mais condições das seguintes, foi suficientemente satisfatório para lograr sucesso.

- Regiões áridas em que a conservação da água é crucial
- Avaliar a recuperação econômica com base na filtração de rejeitos
- Clima frio com limitações do manuseio da água no inverno
- Topografia que inviabilize outras soluções
- Esgotamento da capacidade incremental da albufeira
- Responsabilidade operacional que leva a encerrar a operação do represamento

Considerando estas características, exige-se também uma fundação consistente com critérios de deformabilidade aceitáveis, mesmo assim a gama de terrenos em que o empilhamento seco funcionará é substancialmente mais ampla do que para as barragens. Desde que não haja outras restrições técnicas ou impedimentos regulamentares, a solução é válida. Entretanto, é trivial a necessidade de avaliar o comportamento geotécnico dos rejeitos para proceder à implementação do projeto [48, 24].

Entre requisitos de execução estão identificadas na figura 2.6 as causas naturais que levam ao rompimento de barragens e podem provocar os acidentes de pilhas.

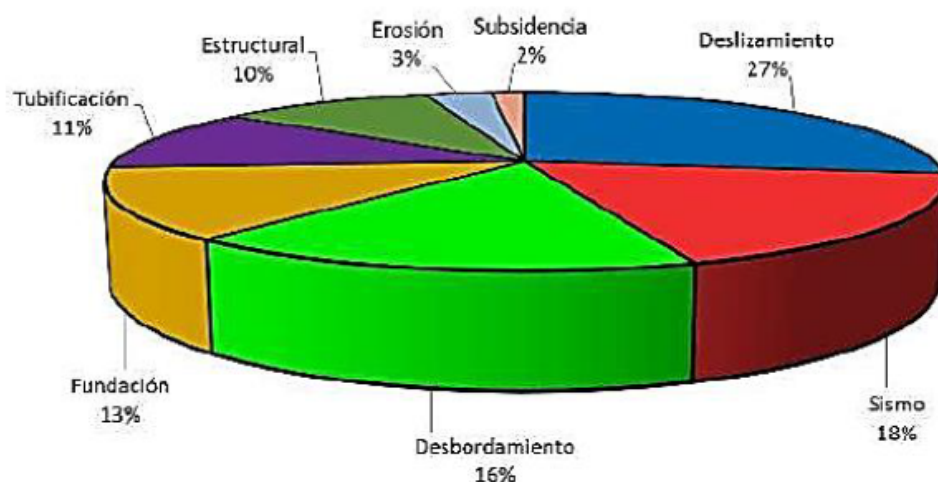


Figura 2.6: Causas de acidentes. Retirado de Angelino (2020) [4]

Em qualquer tipo de trabalho que tenha por objetivo estudar estas causas, previamente à compactação o rejeito deve já estar caracterizado em termos dos parâmetros da Mecânica dos Solos: índice de vazios, grau de saturação, teor em água, peso volúmico, composição granulométrica, limites de consistência, índice de plasticidade. Particularmente no projeto de pilhas, o grau de saturação desenvolve um papel fundamental para maximizar a expulsão de ar de dentro dos poros, pelo motivo que recomenda-se vivamente que o grau de saturação do material filtrado tenda ao ótimo do ensaio Proctor [46, 33, 24].

É imprescindível que no projeto de desenvolvimento de uma pilha de rejeito exista um sistema eficiente de drenagens de águas superficiais e subterrâneas, uma vez que a estabilidade da estrutura depende muito do escoamento de água através dos poros [24].

A integridade da estrutura ao longo de seu tempo de vida útil é avaliada pelo efeito combinado da estratigrafia, do nível freático, do método e soluções construtivas e de fenômenos naturais. Para representar o comportamento das camadas de rejeito quanto à deformação, é por vezes coerente recorrer a modelos constitutivos sofisticados que não considerem linear a relação entre tensões e deformações e, em função de cada modelo existem parâmetros dos quais a deformação depende. O escoamento da água através dos poros e consequentemente a variação do nível freático no tempo tem como parâmetro intrínseco a permeabilidade do meio.

Há equações que regem aqueles efeitos em conjunto. Mas geralmente, as soluções limitam-se a permitir a resolução apenas de 1 ponto do domínio por vez e unidimensional. Para obter também resultados na escala da estrutura que possibilitem um panorama global em 2D/3D dos fenômenos físicos em tempo hábil, é necessário recorrer às soluções implementadas computacionalmente.

Os fenômenos físicos frequentemente são representados por equações diferenciais, por vezes pela equação de Laplace ou a de Poisson. Também existem técnicas que conduzem às primitivas delas com simplificações. Assim como existem métodos que permitem o equacionamento de modelos com soluções numéricas aproximadas.

2.4 Outros processos e soluções

Traçando um paralelo entre os acidentes. A disposição de rejeito em pilhas ainda é uma técnica pouco compreendida. Davies (2010) [24] relata que quando notou a falta de estudos acerca do tema e publicou o artigo, ele possuía experiência em pouco mais de 10 pilhas. Os custos para gerir rejeitos filtrados causam desinteresse pela solução que faz sentido se, e somente se, os critérios que condicionam as outras soluções não sejam satisfeitos. A figura 2.7 é suficientemente auto-explicativa para ter ideia do como produzir rejeito na forma de torta incrementa o custo operacional e de transporte na gestão daqueles resíduos. Para saber mais detalhes do que representa cada custo, consulte a referência.

Tendo em vista o cenário descrito, reduzir o passivo ambiental é uma tarefa obrigatória. Com esse objetivo, paralelamente novas tecnologias estiveram em desenvolvimento para conceber soluções alternativas ou incorporativas àquelas em vigor.

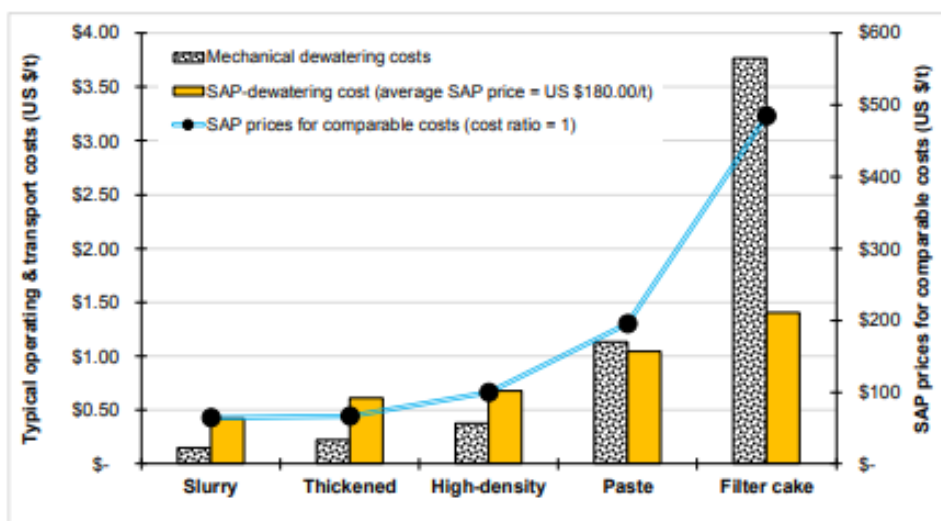


Figura 2.7: Custos em função da configuração do rejeito. Retirado de Sahi et al (2019) [64]

Outros locais de deposição foram alvos das mineradoras, como túneis de minas subterrâneas parcial ou totalmente desativadas, como também sobre o assoalho oceânico. Esta forma, um pouco controversa, consiste em enviar o rejeito por uma tubagem até o destino e foi justificado para zonas sísmicas, escassez de terreno, em jazida com minerais sulfetados devido o fenômeno de drenagem ácida de mina [30].

Numa perspectiva mais sustentável, de reaproveitamento dos rejeitos minerais, eles foram incorporados na fabricação de cerâmicas vermelhas, de tijolos maciços, na infraestrutura do pavimento rodoviário, na composição do cimento Portland, na produção de concreto de ultra alto desempenho, em argamassas, entre outros. Lage et al (2020) [45] apresenta um panorama bastante alargado do que foi desenvolvido e anda a ser.

Noutra perspectiva mais operacional, os filtros sempre incorporaram tecnologia e funcionaram na concentração de finos e ultrafinos por aplicação de magnetismo, acústica, combinadas e por fim, tornarem-se bastante eficientes na desidratação de solos argilosos. Contudo, foi para desidratar material com aquela característica dentro das estações de tratamento de efluentes, na indústria química e de papel e celulose que os filtros foram aprimorados. Hoje o modelo tipo prensa¹ de parafuso roscado (figura 2.4) é dos mais avançados e recebe polpa sem necessidade prévia de espessamento. Características mais específicas referentes ao emprego do equipamento no beneficiamento mineral são abordadas por Absolon e Nieuwkerk (2014) [1].

Nas estações de tratamento de efluentes os filtros têm cedido lugar às centrífugas e, assim como ocorreu com o modelo de prensa, elas migraram também para as plantas de processamento mineral. O tipo decantadora está representada na cor cinza na figura 2.8 e esta tecnologia leva vantagem em 17/24 dos critérios estabelecidos para comparar com os outros dois equipamentos: filtro à pressão, espessador. Existem quatro critérios em que a centrífuga tem menor desempenho,

¹a prensa de rosca tem origem no império romano

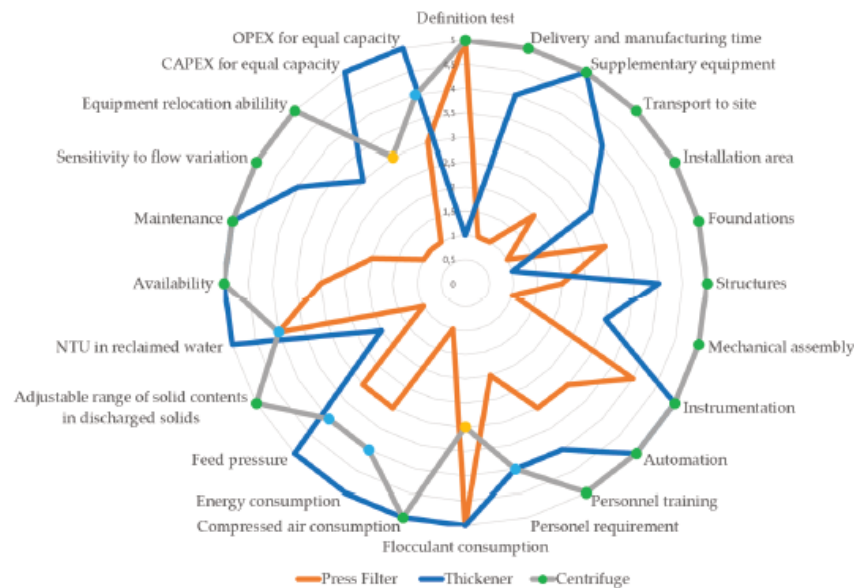


Figura 2.8: Comparação entre as 3 tecnologias de desidratação mais utilizadas. Retirado de Klug e Schwarz (2020) [43]

OPEX, CAPEX, Feed pressure, Energy consumption, i.e., basicamente o consumo de polímeros e de energia [43].

A versatilidade das centrífugas decantadoras é tão abrangente que permite operarem também na concentração de minérios, podem ser combinadas com outros equipamentos ou são auto-suficientes o bastante para a mineração em pequena escala [83, 43].

No que concerne aos avanços tecnológicos mais recentes na indústria mineral extrativista supõe-se que seja possível extrapolar para uma tendência global aquilo que acontece em escala local. Desta forma, conforme Ottavio (2021) [15], foram identificados 152 pedidos de patentes em 2019 junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial-INPI para as mineradoras que exploram jazidas no Quadrilátero Ferrífero-MG. A Vale é a maior depositante com 68 pedidos. Em segundo lugar, está a Samarco com 44 pedidos. Em terceiro lugar, a Votorantim, atual Nexa que fez 32 pedidos.

2.5 Conclusões

Foi possível identificar etapas do beneficiamento. Ter ideia de como os rejeitos surgem na planta de processamento mineral e dos tipos de barragens existentes e que estas estruturas apresentam mal desempenho. Mesmo assim, constatou-se que não há correlação entre os acidentes e a incorporação de tecnologia na indústria mineral extrativista. Mas parece ser um consenso comum os rompimentos de barragens serem catastróficos.

A deposição em pilhas é a maneira de conciliar interesses. Mesmo o rejeito filtrado sendo muito mais caro que o convencional. Relatos empíricos têm demonstrado que as pilhas funcionam

bem. Mas o conhecimento técnico é muito carente. A migração de tecnologia é uma aposta viável e as centrífugas têm ótimo desempenho.

Capítulo 3

Método numérico em cenários estruturais geotécnicos

O capítulo começa por referir os trabalhos mais expressivos relacionados com técnicas de solução numérica aplicadas às Engenharias até chegar aquele que deu o nome ao Métodos dos Elementos Finitos *MEF*. Nesta sequência, o capítulo faz uma breve descrição de duas linhas de pesquisa que seguiram desenvolvendo o método até atualmente. Aparecem então, aplicações à Geotecnia através do programa *Plaxis*. O que na sequência se apresenta, embora seja de conhecimento geral, concentra-se em explorar o documento de Vahid (2016) [35] e sintetizar parte de seu conteúdo com base noutras referências relacionadas com as deformações de estruturas geotécnicas e transporte de fluídos em meios porosos.

3.1 Introdução

Os avanços que ocorreram no campo da Matemática Aplicada e Computacional permitiram modelar numericamente estruturas geotécnicas, como pilhas de rejeitados mineiros. Entre eles destaca-se a implementação computacional do Método dos Elementos Finitos, que permite resolver problemas complexos regidos por equações diferenciais por meio de equivalentes regidos por equações algébricas.

Recorrer a uma contextualização temporal é uma forma imediata de procurar definir técnicas, teoremas e métodos matemáticos utilizados indiretamente através de programas, sem demonstrar como realmente são aplicados e, mesmo assim, adquirir alguma afinidade.

Quando se trabalha com programas de modelação numérica, recorrer a manuais é a forma mais acessível de aprender. No entanto, decisões suportadas única e exclusivamente nesses documentos podem causar muitas incertezas, particularmente quando são bastante extensos e se o conteúdo for composto maioritariamente de conclusões sem uma exposição prévia, clara, detalhada e justificada.

Existe uma metodologia complementar de aprender dentro de ciências exatas. Pode ser aplicada à compreensão de um programa de cálculo e para aprender a trabalhar com ele. Ainda assim

pode gerar incertezas e há dificuldades de execução. Mas é crucial conhecer as equações implementadas num programa deste tipo pois torna-o menos abstrato. Conhecer as equações requer ir um pouco mais além para perceber os fenômenos modelados. Por isso, permite-se também ter ideia do estado atual do conhecimento.

Uma maneira de executá-la é estudar o documento que originou as equações que têm implementadas no programa. Concomitantemente elabora-se outro documento equivalente que aponte as equações de forma mais imediata, mas sem desconsiderar o raciocínio que foi desenvolvido algebricamente no original. Pretende-se que desta forma, para efeitos práticos, o documento propicie uma boa compreensão do programa e sirva de consulta rápida para o autor enquanto aprende a utilizar o *Plaxis*. Além de oferecer uma rápida compreensão de todos os fenômenos físicos modelados.

3.2 Retrospectiva

Remota aos meados do sec. XIX, segundo Cook (1989) [19], a primeira vez que um meio contínuo foi discretizado com a finalidade de resolver a equação diferencial que o representava, e assim, permitir aproximar as derivadas através de uma expressão em diferenças finitas. A técnica empregue permaneceu inerte, apesar de no início do século seguinte, os pesquisadores terem identificado que o comportamento elástico de estruturas reticuladas poderia ser representado pelo das barras que as constituem.

Mesmo assim, somente cerca de 40 anos mais tarde surgiram aplicações neste campo. Ao mesmo tempo o método das diferenças finitas foi resgatado para dar resposta numérica a problemas de contorno [47] e, ainda, o método dos elementos finitos como hoje é conhecido, emergiu concebido em 1941 no trabalho apresentado por Courant numa palestra citada em Cook (1989) [19] e publicado em R.Courant (1943) [21].

Desde então, conforme Zienkiewicz (2005) [86], distinguiram-se duas vertentes que abordavam a discretização como etapa de soluções de problemas de domínio contínuo. Por um lado, numa abordagem sustentada em técnicas matemáticas a partir das equações diferenciais e assim, por vezes aproximando as soluções por meio de diferenças finitas, resíduos ponderados, etc. Por outro lado, numa abordagem mais intuitiva, fazendo analogia entre elementos discretos irreais e pequenas porções do domínio contínuo. Por esta última via, quase duas décadas depois de R.Courant, o Método dos Elementos Finitos foi denominado no trabalho de Clough (1961) [17] [86, 47, 19].

As aproximações por diferenças finitas consideram os elementos sempre com ângulos retos. Deste modo quando se pretende representar domínios com fronteiras curvas, estas são menos rigorosas e existe maior erro associado. O melhor ajuste da malha de elementos finitos que pode assumir diferentes geometrias, muito provavelmente, contribuiu para a difusão do método até que ocorresse a fusão das duas vertentes citadas [86]. Esta fusão está incorporada nos programas atuais de modelação numérica e disponível no programa *Plaxis* para aplicações à Geotecnia.

3.3 Formulações

No *Plaxis* estão implementados três tipos de cálculos para deformação: plástico, consolidação e dinâmico. Existem outras 2 abordagens para cálculo da poro-pressão. A hidrostática e a hidrodinâmica que subdivide-se em regime transiente e permanente. Além destas, há uma abordagem bastante completa que unifica todos os fenômenos que causam deformações sob carregamento estático. Em outras palavras, acopla a consolidação no cálculo das deformações sob efeitos de carregamento estático e dinâmico dos fluidos.

Por qualquer via, sempre que se façam cálculos hidrodinâmicos ou cálculos de deformação unificada, é permitido obter parâmetros do regime de escoamento. Dependem somente de variáveis de equações que governam os fenômenos físicos. Qualquer tipo de cálculo hidrodinâmico pode ser derivado da expressão mais geral que governa a consolidação e que vai ser demonstrado a seguir. Na sequência procede-se à formulação do acoplamento. Demonstra-se como o Método dos Elementos Finitos é aplicado para resolver estas equações.

3.3.1 Física-Matemática aplicada à Geotecnia

O comportamento de um corpo contínuo perante determinado fenômeno físico pode ser estudado assumindo que o menor elemento deste corpo possui as mesmas propriedades físicas. Recorrendo à classe dos números surreais, assume-se que o corpo pode ser decomposto em elementos infinitamente pequenos. O elemento pode ser compreendido individualmente. Matematicamente os elementos são reagrupados de maneira que o corpo seja reconstruído e o fenômeno esteja representado [55, 86].

Segundo Collins (1961) [18] e Quintela (1981) [61], para um elemento infinitesimal de um fluido incompressível e homogêneo, em regime permanente, deve existir equilíbrio entre três vetores de forças de naturezas distintas que atuam sobre ele. A força de viscosidade $\underline{\varphi}$ que representa o atrito interno entre diferentes níveis de velocidades em escoamento laminar. A força peso do fluido $\underline{\rho}_w \underline{g}$. Por último, as forças externas atuantes na forma de pressão $\vec{\nabla} p_w$ nas extremidades do elemento em meio poroso. Para representar o equilíbrio em 3 dimensões, chega-se em [18, 35, 72]:

$$\vec{\nabla} p_w + \underline{\rho}_w \underline{g} + \underline{\varphi} = 0 \quad (3.1)$$

Onde $\underline{g}$ é o vetor de aceleração gravitacional, mas pode ocorrer de ser representado somente pela componente acompanhada do respectivo versor.

Fluidos newtonianos têm a viscosidade $\underline{\varphi}$ linearmente dependente da velocidade de escoamento $\underline{q}$ atuante no sentido contrário [61]. Além de depender também, obviamente, da viscosidade dinâmica do meio μ e, da permeabilidade intrínseca K_i , as quais compõem a matriz anisotrópica $\underline{m}^{int}$ na relação $\underline{\varphi} = -\underline{m}^{int} \underline{q}$ e, se assim for substituída na equação 3.1, é possível chegar na lei de Darcy [35]:

$$\underline{q} = \begin{bmatrix} \frac{K_x}{\mu} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_y}{\mu} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_z}{\mu} \end{bmatrix} (\vec{\nabla} p_w + \rho_w \underline{g}) \quad (3.2)$$

$$\underline{q} = \underline{k}^{int} (\vec{\nabla} p_w + \rho_w \underline{g}) \quad (3.3)$$

Por outro lado, a lei de Lavoisier ou de conservação de massa é aplicada a qualquer sistema em que a grandeza escalar mantenha-se constante no tempo. Para expressar isso matematicamente conforme Vahid (2016) [35], assume-se a expressão $\frac{\partial}{\partial t} \rho_w n S$ para representar a quantidade de água que varia com o tempo num elemento infinitesimal em meio poroso. Enquanto a quantidade de água que escoar para fora do elemento, de maneira que a velocidade seja a mesma da Lei de Darcy 3.3, assume-se $\vec{\nabla} \cdot \rho_w \underline{q}$. Como deve existir equilíbrio, conforme Song (1992) [72] pelo mesmo autor, define-se a equação da continuidade para poro-pressão:

$$\vec{\nabla} \cdot \left[\rho_w \frac{k_{rel}}{\rho_w g} \underline{k}^{sat} (\vec{\nabla} p_w + \rho_w \underline{g}) \right] = - \frac{\partial}{\partial t} \rho_w n S \quad (3.4)$$

Depois é questão de ir substituindo as variáveis do termo do lado direito por outras expressões equivalentes até chegar à equação para consolidação [72]:

$$\rho_w S \underline{m}^T \frac{\partial \underline{\varepsilon}}{\partial t} - \rho_w S \left(\frac{n}{K_w} + \frac{1-n}{K_s} \right) \frac{\partial p_w}{\partial t} + n \rho_w \frac{\partial S}{\partial p_w} \frac{\partial p_w}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \left[\rho_w \frac{k_{rel}}{\rho_w g} \underline{k}^{sat} (\vec{\nabla} p_w + \rho_w \underline{g}) \right] = 0 \quad (3.5)$$

Segundo Vahid (2016) [35], os três primeiros termos representam respectivamente as contribuições que alteram a porosidade: em termos de tensões totais (deformações, deslocamentos no volume total); em termos de excessos de pressões neutras; em termos de variações da saturação.

As variáveis da equação 3.5 têm tanto significado matemático como físico associados. Pode ser uma grandeza escalar, vetorial e combinações destas numa função, num vetor, numa matriz, etc. Mas a listagem a seguir dá maior relevância ao significado físico de cada variável.

- ρ_w : densidade da água;
- g : aceleração da gravidade,
- p_w : pressão da água nos poros, pressão neutra,
- n : porosidade, volume de vazios sobre volume total
- $\underline{\varepsilon}$: deformação volumétrica,
- S : grau de saturação,
- $\underline{m}$: vetor em que os termos correspondentes à tensão normal são unitários e os demais, nulos Song (1992) [72].

- K : coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica
- K_i : coeficiente de permeabilidade intrínseca dado pelo grau de saturação
- K^{sat} : coeficiente de permeabilidade saturado
- K_{rel} : permeabilidade relativa que é a razão entre as duas anteriores
- K_s : módulo de compressibilidade do esqueleto sólido do solo: intrinsecamente ligado às tensões efetivas Song (1992) [72]
- K_w : módulo de compressibilidade da mistura ar-água

Para cálculo apenas de fluxo, basta excluir a densidade da água e o termo relacionado com a deformação das partículas sólidas, que é o mesmo com K_s :

$$S \underline{m}^T \frac{\partial \underline{\varepsilon}}{\partial t} - n \left(\frac{S}{K_w} \frac{\partial p_w}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial p_w} \right) \frac{\partial p_w}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \left[\frac{k_{rel}}{\rho_w g} \underline{k}^{sat} (\vec{\nabla} p_w + \rho_w \underline{g}) \right] = 0 \quad (3.6)$$

A partir desta equação, para obter outra que represente o regime transiente, anulam-se os deslocamentos $\frac{\partial \underline{\varepsilon}}{\partial t}$ das partículas sólidas:

$$-n \left(\frac{S}{K_w} \frac{\partial p_w}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial p_w} \right) \frac{\partial p_w}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \left[\frac{k_{rel}}{\rho_w g} \underline{k}^{sat} (\vec{\nabla} p_w + \rho_w \underline{g}) \right] = 0 \quad (3.7)$$

Para escoamento em regime permanente, o tempo tende a infinito e as derivadas do tempo são anuladas. Neste formato, a equação da continuidade é bem conhecida e representa que a soma dos caudais de entradas, deve corresponder à soma dos caudais que percolam para fora do elemento infinitesimal.

$$\vec{\nabla} \cdot \left[\frac{k_{rel}}{\rho_w g} \underline{k}^{sat} (\vec{\nabla} p_w + \rho_w \underline{g}) \right] = 0 \quad (3.8)$$

Até aqui, estão equacionados os problemas que envolvem o cálculo de escoamento com ou sem consolidação. Falta a expressão para o cálculo de deformações elásto-plásticas. Em Vahid (2016) [35] a partir da equação de balanço, de uma maneira mais imediata que no caso do fluxo, a relação constitutiva é vinculada com recurso ao princípio das tensões efetivas que incorpora também os efeitos da poro-pressão. Logo, a equação que governa o cálculo de deformações plásticas é apresentada:

$$\underline{L}^T [\underline{M} (\underline{L} \underline{du}) + S_e dp_w \underline{m}] + d(\rho \underline{g}) = \underline{0} \quad (3.9)$$

Onde, $\underline{L}^T$ é o operador diferencial correspondente à tensão, ρ é a densidade combinada solo-água, g é a gravidade, p_w é a pressão neutra, $\underline{M}^T$ é a matriz tensão-deformação do material que está na relação constitutiva, $\underline{du}$ são os deslocamentos. S_e é a saturação efetiva dada em função da sucção capilar.

Independentemente das manipulações que ocorram ao aplicar um método para resolver as equações, já são conhecidas as variáveis que foram relacionadas através de leis da Física para

representar os seguintes fenômenos: escoamento de água através dos poros do solo; de consolidação; os outros que causam exclusivamente deformações. Todavia as variáveis conhecidas dependam do comportamento do material, ou seja, dos parâmetros do modelo constitutivo adotado para cada solo e do modelo hidráulico adotado. Estes serão abordados no capítulo seguinte.

Sabe-se que a Matemática tem modelos bem estudados, como muitos tipos de funções, equações e outros. As equações governantes dos fenômenos foram escritas na forma diferencial. Estas podem ser resolvidas pelos modelos matemáticos de equações diferenciais *EDs*. Para isto há critérios de aplicação, entre eles estabelecer condições de contorno. Quando o problema é de valor inicial implica também estabelecer condições iniciais [38, 60, 84].

As condições de contorno podem ser classificadas pelas que impõem valores para as funções incógnitas da equação e aquelas que impõe valores para as derivadas das funções incógnitas. A primeira forma recebe o nome de condições de contorno de *Dirichlet*. A segunda forma são denominadas condições de contorno de *Neumann* [38].

As *EDs* são válidas em domínio contínuo e caso fossem solucionadas, seriam obtidas como resposta as funções que satisfazem a equação. A resolução limitar-se-ia a um ponto do domínio por vez e dependeria das coordenadas espaciais deste [38].

O cálculo numérico por meio de métodos permite, sem conhecer as funções soluções, determinar um valor numérico aproximado daquele que seria obtido, caso uma função solução da *EDs* fosse conhecida e resolvida na sequência. O erro representa o quanto o valor calculado desvia-se do valor que seria obtido resolvendo a função [25].

Com objetivo final de calcular resultados mais rapidamente e obter a distribuição de uma grandeza física aproximada por todo o domínio do problema. O primeiro passo é remodelar o equacionamento. Os outros passos são de objetivo da implementação computacional e não serão abordados.

3.3.2 A aplicação do MEF

Aplicar o Método dos Elementos Finitos para encontrar soluções numéricas aproximadas para as equações diferenciais consiste em ter o problema remodelado matricialmente com equações algébricas válidas no domínio discreto de cálculo para soluções equivalentes.

Malha

Assumir que uma equação teria soluções aproximadas pode ser feito com a substituição do zero da igualdade por uma incógnita R que represente o resíduo. Em métodos de resíduos ponderados, R é ponderada por uma função de peso W . Integra-se WR no domínio da equação e iguala-se a zero. Existem técnicas para levar este equacionamento do domínio contínuo para o de cálculo. Isto significa que o somatório dos resíduos seria nulo [29, 47].

No método de Galerkin, as funções de peso são as de forma e, geralmente na implementação computacional, as funções de forma substituem as funções de interpolação para obter os valores internos nos elementos do domínio discretizado. Por isso as funções de forma também são chamadas de interpolação [28, 86].

Uma função de forma é unitária para o nó ao qual está associada. Assume zero nos outros nós e vai depender de parâmetros que definem a malha de elementos finitos. No *Plaxis* estas funções foram adotadas para cálculos de deslocamentos, consolidação e poro-pressão [78].

Os nós da malha de elementos finitos constituem o domínio do modelo com equações algébricas. Estas têm soluções numéricas aproximadas dos resultados que poderiam vir diretamente da resolução das *EDs*. O resíduo, neste caso, representa a diferença entre 2 valores localizados com as mesmas coordenadas espaciais. O valor da função solução da *EDs* para um ponto do domínio contínuo. O valor numérico calculado para um nó da malha. A diferença, portanto, é o erro entre o modelo numérico e algébrico na mesma posição do domínio. O somatório dos resíduos não é o erro de ajuste da malha. Este é um erro geométrico porque a localização também tem erro, i.e., ao representar um domínio contínuo por uma malha geometricamente formada por triângulos, por exemplo, pode não resultar numa representação totalmente equivalente à geometria do domínio original [25, 86, 28, 47].

Equações Algébricas

O problema de deformação é abordado, assim como no caso do domínio contínuo, a partir da equação de balanço de momentos:

$$\underline{L}^T (\underline{\sigma}' + S_e p_w \underline{m}) + p \underline{g} = 0 \quad (3.10)$$

É possível chegar à expressão do Princípio dos Trabalhos Virtuais *PVT* a partir de equação diferencial. Recorrendo a este princípio, Vahid (2016) [35] obtém uma expressão para domínio discreto com força residual incorporada. Na sequência recorre também ao princípio das tensões efetivas, para obter a formulação matricial deste problema:

$$\underline{K} \Delta \underline{v} + \underline{Q} \Delta p_w = \Delta \underline{f}_u + \underline{r}_v^i \quad (3.11)$$

Para o problema da consolidação, Vahid (2016) [35] parte da equação 3.5 mais geral. Nesta equação a função da pressão neutra deve ser derivável duas vezes para satisfazer a igualdade. O autor após recorrer ao método de Galerkin, aplica a identidade de Green e reduz a ordem da equação diferencial que modela o fenômeno físico. Por fim, chega à formulação matricial deste problema [38]:

$$-\underline{H} p_w - \underline{S} \frac{dp_w}{dt} - \underline{C} \frac{d\underline{v}}{dt} = \underline{G} + \underline{q}_p \quad (3.12)$$

Segundo Esch (2010) [78], a teoria da consolidação de Biot (1941) [10] acopla a equação de equilíbrio para o esqueleto sólido à equação do balanço de massa. Por diferenciação com respeito

ao tempo, Vahid (2016) [35] reescreve a equação de Biot para uma forma simétrica que por integração resulta noutra mais concisa. A partir desta, por diferenças finitas no domínio do tempo Vahid (2016) [35] obtém a equação que unifica os fenômenos:

$$\begin{bmatrix} \underline{\underline{K}} & \underline{\underline{Q}} \\ \underline{\underline{C}} & -\underline{\underline{S}}^* \end{bmatrix}^{i+\alpha} \begin{bmatrix} \Delta \underline{\underline{v}} \\ \Delta \underline{\underline{p}}_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \Delta t \underline{\underline{H}} \end{bmatrix}^{i+\alpha} \begin{bmatrix} \underline{\underline{v}}^i \\ \underline{\underline{p}}_w^i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \underline{\underline{f}}_u \\ \Delta t \underline{\underline{G}} + \Delta t (\underline{\underline{q}}_p^i + \alpha \Delta \underline{\underline{q}}_p) \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Esta equação é equivalente à implementada no *Plaxis* com o significado de deformação e fluxo acoplados totalmente.

O significado das variáveis da equação 3.13: $\underline{\underline{K}}$ é matriz de rigidez que é intrínseca ao material e depende do módulo de deformabilidade. $\underline{\underline{Q}}$ e $\underline{\underline{C}}$ são matrizes de acoplamento que dependem da malha. $\underline{\underline{S}}^*$ depende da compressibilidade e permeabilidade. Estas 3 são dependentes da sucção. $\underline{\underline{H}}$ é a matriz de permeabilidade. $\underline{\underline{G}}$ é um vetor de efeitos da gravidade no movimento vertical do fluido. $\Delta \underline{\underline{f}}_u$ é o vetor incremental de forças desequilibradas. $\underline{\underline{v}}$ é o vetor de deslocamentos nodais. $\underline{\underline{p}}_w$ é o vetor de pressões neutras. $\underline{\underline{q}}_p$ é o vetor de fluxo no contorno dos domínios. Δt é o intervalo de tempo. α um parâmetro que varia entre 0 e 1 que assume 1 no *Plaxis* [35, 22].

Os elementos das matrizes na equação 3.13 estão expressos na sequências e dependem de outras variáveis de significado: $\underline{\underline{N}}$ é matrizes das funções de forma ensambladas; $\underline{\underline{B}}$ é a matriz que contém as derivadas das funções de forma; $\underline{\underline{M}}$ é a matriz de tensão-deformação e aparece na relação constitutiva; $\underline{\underline{S}}$ é a matriz de compressibilidade; $\underline{\underline{L}}$ é o operador diferencial; $\underline{\underline{m}}$ é o vetor dos termos correspondentes à tensão normal unitário; $\Delta \underline{\underline{b}}$ forças de superfície sólida; $\Delta \underline{\underline{t}}$ tração no contorno sólido; $\hat{\underline{\underline{q}}}_w$ é o versor no contorno do fluxo

$$\underline{\underline{K}} = \int_V \underline{\underline{B}}^T \underline{\underline{M}} \underline{\underline{B}} dV \quad (3.14)$$

$$\underline{\underline{Q}} = \int_V \underline{\underline{S}} \underline{\underline{B}}^T \underline{\underline{m}} \underline{\underline{N}} dV \quad (3.15)$$

$$\underline{\underline{S}} = \int_V \underline{\underline{N}}^T \left(\frac{nS}{K_w} - n \frac{dS}{dp_w} \right) \underline{\underline{N}} dV \quad (3.16)$$

$$\underline{\underline{H}} = \int_V (\nabla \underline{\underline{N}})^T \frac{k_{rel}}{\gamma_w} k^{sat} (\nabla \underline{\underline{N}}) dV \quad (3.17)$$

$$\underline{\underline{S}}^* = (S + \alpha \Delta t \underline{\underline{H}}) \quad (3.18)$$

$$\underline{\underline{G}} = \int_V (\nabla \underline{\underline{N}})^T \frac{k_{rel}}{\gamma_w} k^{sat} \rho_w \underline{\underline{g}} dV \quad (3.19)$$

$$\underline{\underline{C}} = \int_V \underline{\underline{N}} \underline{\underline{S}} \underline{\underline{L}} \underline{\underline{N}} dV \quad (3.20)$$

$$\Delta \underline{f}_u = \int_V \underline{N}^T \Delta \underline{b} dV + \int_{\Gamma} \underline{N}^T \Delta \underline{t} dS \quad (3.21)$$

$$\underline{q}_p = \int_{\Gamma} \underline{N}^T \hat{\underline{q}}_w dV \quad (3.22)$$

Os elementos destas equações ainda dependem de outras expressões, condicionantes e variáveis mais básicas que estão relacionadas a fenômenos físicos e modelos de comportamento do solo como material. Isto é um pouco mais clarificado no capítulo seguinte.

Condições de Contorno

Por mais que o problema tenha sido convertido para um sistema linear, o cálculo numérico das incógnitas vai ainda depender de condições de contorno e de condições iniciais. O significado das condições mais relevantes para o trabalho vigente é explorado adiante.

Vale salientar que os elementos do *MEF* não precisam ter características idênticas, o que permite a representação de subdomínios dentro do domínio global. Os solos têm subdomínios com fronteiras correspondentes aos limites estratigráficos. No faseamento construtivo de aterros têm correspondentes aos limites geométricos de cada camada.

Antes de avançar, vale esclarecer que o valor prescrito está diretamente relacionado com os valores inseridos manualmente no programa. Representam os valores inseridos manualmente propriamente ditos. Mas também podem representar um valor que foi pré-processado após digitado. Para ser mais didático, no primeiro caso será adotado o sufixo *digitado*. No segundo caso será adotado o sufixo *programa*. Para a cota geométrica em vez de *digitado* será adotado *geom* [78].

As condições de contorno de *Neumann* aplicadas ao problema têm por efeito à atribuição do valor da velocidade aparente de Darcy $\underline{q}$ como função do valor de entrada no programa $q_{digitado}$ para cada fronteira do (sub)domínio. O produto escalar da velocidade com o versor normal à fronteira deve respeitar a relação [35, 78, 77]:

$$\underline{q} \cdot \underline{n} = q_x n_x + q_y n_y + q_z n_z = q_{presc} \quad (3.23)$$

Onde n_i são as componentes do versor normal à fronteira e q_{presc} é o caudal unitário prescrito para a fronteira.

Para o *Plaxis*, o valor previamente conhecido pode ser definido de três formas: caudal nulo; caudal armazenado; caudal descarregado. A cada significado é associada uma condição de fronteira. A atribuição de valores é realizada pela seleção das condições de fronteira e imposição do respectivo valor: *Closed* : $q_{presc} = 0$; *Inflow* : $q_{presc} = -|q_{digitado}|$; *Outflow* : $q_{presc} = |q_{digitado}|$.

As três condições de contorno a seguir têm por efeito atribuição do valor à pressão neutra. Estas condições estão relacionadas com a energia potencial. A pressão neutra é um campo conservativo. Por isto, sendo o movimento da água no solo devido à diferença de potencial. É permitido

assim definir a função potencial ou a cota piezométrica ou carga hidráulica ϕ por [35]:

$$\phi = z - \frac{P_w}{\gamma_w} = z + \phi_p \quad (3.24)$$

Onde z é cota geométrica, ϕ_p altura piezométrica ou carga piezométrica. A relação vai estabelecer um vínculo direto de dependência das condições de contorno com a geometria real do problema imediatamente no momento em que se definem as condições de contorno.

Para o *Plaxis*, o valor previamente conhecido pode ser definido de três formas: carga hidráulica; infiltração; superfície de percolação. A cada significado é associada uma condição de fronteira. Respectivamente *Head*, *Infiltration* e *Seepage*. Para cada uma, o valor é atribuído de uma forma um pouco diferente.

A carga hidráulica $\phi_{digitado}$ é inserida pelo usuário manualmente e deve respeitar a relação:

$$\phi_{digitado} = z_{geom} - \frac{P_w}{\gamma_w} \quad (3.25)$$

Onde z_{geom} é a cota geométrica inserida manualmente.

A infiltração é uma condição de fronteira híbrida. Corresponde ao caso do caudal armazenado com dependência do tempo e da capacidade de armazenamento do solo. Se o solo saturar ocorre alagamento e a condição de fronteira muda. As condições de fronteira são impostas, pelo menos, segundo os critérios:

$$\begin{cases} \phi = z_{geom} + \phi_{max, programa} & \text{Se saturado: } p_w = 0, \\ \underline{q \cdot n} = q_x n_x + q_y n_y + q_z n_z = -|q_{programa}| & \text{Se parcialmente saturado,} \\ \phi = z_{geom} + \phi_{min, programa} & \text{Se tende a insaturar} \end{cases} \quad (3.26)$$

Onde $\phi_{max, programa}$ limita a infiltração, $\phi_{min, programa}$ limita a evaporação.

A Superfície livre de percolação é um limite aberto pelo qual é permitido o escoamento livre de água. Para este efeito basta selecionar *Seepage* no *Plaxis*. Que é justamente a condição de contorno gerada automaticamente pelo programa.

Existem 3 observações úteis para concluir que um contorno *Seepage* deve manter-se:

- *Closed* representa melhor fronteiras seguramente não percoladas. Nestes casos podem estar compreendidos: limites de maciços impermeáveis, a linha de simetria do modelo, a superfície física da Terra.
- ocorre seguramente quando a linha de água livre tangência o limite do solo.
- admissível para todas as fronteiras livres com a carga hidráulica desconhecida.

A atribuição de *Seepage* por si só não prescreve valores, usa o nível freático para impor os valores e deve pelo menos respeitar a relação:

$$\begin{cases} \phi = \phi_{programa} & \text{Se } z_{geom} \leq H, \\ \phi = z_{geom} & \text{Se } z_{geom} > H : p_w = 0 \end{cases} \quad (3.27)$$

Onde $\phi_{programa}$ é a carga hidráulica aplicada que depende da altura do nível freático. H é a altura do nível freático.

Bardet e Tobita (2002) [7] propiciam uma boa compreensão a acerca da condição de contorno superfície livre de percolação.

As condições de contorno para deformações plásticas são mais simples. Existem 2 hipóteses: deslocamentos conhecidos ou cargas conhecidas. Uma fronteira livre tem força prescrita nula e livre de ocorrerem deslocamentos. Para evitar que ocorram deslocamentos indeterminados, alguns pontos têm de assumir deslocamentos conhecidos. A maneira mais simples é fixar o ponto atribuindo-lhe deslocamentos nulos, mas também admite-se assentamentos.

A resolução do sistema linear é efetuada no *Plaxis2D* com aplicações às pilhas de rejeitados. As informações necessárias para as modelagens e os respectivos resultados encontram-se no capítulo 5.

3.4 Conclusões

Desta maneira foi possível perceber que a metodologia empregue permite o acesso ao conhecimento mais intacto, de desenvolvimento linear e fundamentado na Física e na Matemática. Portanto possibilita uma compreensão bem razoável acerca dos fenômenos modelados. Mesmo assim, existem lacunas, parâmetros que necessitam melhor compreensão, também devido à organização do material *Plaxis* que não permite um acesso imediato.

Para efeitos práticos, conclui-se que as deformações plásticas são independentes da consolidação. Os cálculos apenas do fluxo são derivados do cálculo de consolidação. A abordagem de cálculo totalmente acoplado tem por finalidade a maior precisão das deformações reais. Ficou também um pouco mais claro como o programa considera algumas condições de fronteira.

Os manuais podem funcionar bem dentro do rol de tarefas que são desenvolvidas. Mas é fundamental dominar bem todas as tarefas antes fazer alterações ou combinações delas. Quando se pretende fazer modelagens mais arrojadas, é preciso ter cautela, conhecer mais profundamente a ferramenta que se anda utilizando. Porque como ficou demonstrado, ao selecionar um tipo de cálculo, está a selecionar equações não muito triviais e pode haver muitos parâmetros que não estejam a ser controlados.

Acima de tudo foi possível conhecer a tecnologia que se anda a manipular e o estado atual do conhecimento nas áreas de física-matemática, matemática aplicada e computacional com aplicações geotécnicas. As leis da Física descrevem os fenômenos que ocorrem nas partículas das estruturas geotécnicas através de equações diferenciais. O *MEF* é um dos métodos que permite

resolver estas equações. Este método gera um problema equivalente de mais fácil implementação computacional. Então o cálculo numérico de soluções é bastante rápido. É permitido ter uma distribuição dos valores por todo domínio do problema original. De maneira a representar uma grandeza física associada em mapas com escala de cores e em mapas com representação de vetores.

Foi também constatado: se nos manuais de programas de código fechado não tiverem realmente descritos como ocorre a conexão entre os dados manualmente inseridos no programa e as equações e condicionantes, o máximo que se pode fazer acerca disto são hipóteses não validadas.

A física na representação dos fenômenos da natureza seguramente não muda de programa para programa de métodos numéricos, a matemática na representação da física também não. Pode mudar a forma de resolver os modelos matemáticos. Portanto, estudar os manuais e trabalhar com outros programas, se possível de código aberto, possibilita também perceber todos os programas que resolvem o mesmo problema físico.

Capítulo 4

Conceitos de Mecânica dos Solos aplicados às modelagens de pilhas

O capítulo faz uma revisão aplicada da Mecânica dos Solos e procura dar bases para as modelagens de pilhas. Começa pela amostragem de rejeitos de mineração e depois procura definir o tipo de solo das pilhas e como isto condiciona a construção das camadas. Na sequência, a partir de amostras e ensaios estabelece um sentido possível para obter parâmetros de entrada no programa. Depois explica por meio de trajetória de tensões os tipos de simulações que serão feitas em elementos finitos. Aquilo também é feito transmitindo um pouco como o modelo hidráulico e a relação constitutiva entram nas equações do capítulo precedente.

Na parte do comportamento mecânico foi estabelecida a ligação entre a amostragem representada pelos parâmetros do ponto material no meio físico e a trajetória de tensões teórica. De maneira que, para isto, é possível associar um critério de rotura teórico a partir dos parâmetros mais básicos que podem ser medidos em ensaios triaxiais convencionais. Paralelamente, foi definido o estado de tensão inicial nas pilhas que origina a trajetória de tensões de um ponto no maciço em repouso.

O critério de rotura na trajetória de tensões está associado a um modelo e relação constitutiva incorporada nas formulações. Na sequência, a trajetória foi avaliada para os diferentes casos modelados. Por fim, de uma maneira alternativa e bastante básica é introduzido o modelo Norsand.

4.1 Introdução

A atividade mineradora extrativista constrói a pilha de materiais rejeitados e gera o problema real. A Física descreve os fenômenos que ocorrem em função da construção: deformação elástico-plásticas, deformações por consolidação e deformações hidrodinâmicas e transporte de fluidos em meios porosos. A Matemática Aplicada e Computacional modela o problema, fornecendo a ferramenta para a resolução e interpretação dos fenômenos físicos em escala global da estrutura.

Portanto, o trabalho tem um capítulo de Mineração que origina as pilhas naturalmente, outro que descreve o comportamento das partículas dos rejeitos e apresenta as equações principais e os modelos de pilhas. Falta um capítulo que conecte os dois para recompletar o problema. Um capítulo que leve as partículas minerais de rejeitados até as pilhas modeladas.

Neste contexto, exclusivamente a Mecânica dos Solos faz a interface entre o problema maior do meio físico e as modelagens por elementos finitos. Analisa o material coletado no campo em ensaios de laboratório e quantifica os parâmetros com significado físico que são as variáveis implícitas nas equações principais. É responsável por gerar o estado de tensão de repouso que é um problema um pouco isolado, mas do qual as modelagens dependem.

O conteúdo da Mecânica dos Solos é muito vasto. Vai desde perceber o comportamento em escala mineralógica e granulométrica. Bem como o que interfere na rigidez e na resistência dos solos, como materiais que suportam carga e/ou compõem a própria estrutura geotécnica. O solo e/ou a rocha condicionam muito o dimensionamento de qualquer estrutura de Engenharia Civil e garantem a estabilidade destas obras. As pilhas, obviamente, são estruturas construídas também segundo critérios geotécnicos.

Porém o foco deste capítulo é um entendimento suplementar de como conceitos da Mecânica dos Solos se conectam no *Plaxis* para resolver os sistemas lineares. Tentar estabelecer um sentido para os dados de entrada no programa até chegarem à mão do utilizador do *Plaxis*. Está implícito entender qual o tipo de solo, o tipo de material, o comportamento hidráulico e mecânico, quais os procedimentos que podem ocorrer até os dados chegarem ao modelador. Este capítulo pretende, pelo menos, expor alguns conceitos de Mecânica dos Solos aplicado às modelagens de pilhas no *Plaxis* na ótica do utilizador.

4.2 Rejeitados mineiros

À luz da Mecânica dos Solos os estudos técnicos das pilhas de rejeitados podem começar por 2 tipo de problema: execução das camadas em construção; avaliação da estabilidade da estrutura construída. O primeiro problema, converte-se naturalmente no segundo. Logo, o objetivo final é entender o comportamento resistente dos materiais que constituem as pilhas. Os estudos de base começam pela classificação granulométrica e aferição do teor em água ótimo com objetivo construtivo das pilhas. A análise de estabilidade depende da caracterização do material do solo com a quantificação dos parâmetros físico associados [33].

Amostragem

A mineração é uma atividade desempenhada dentro de um fluxograma e objetiva extrair a quantidade de minério necessário para maximizar o lucro. Em contrapartida, por ser uma operação bastante controlada, é de fácil acesso aos minerais rejeitados nos processos para determinação da sua composição química, mineralógica e da classificação granulométrica. Guimarães (2011) [39] descreve uma série de ensaios laboratoriais de rejeitos coletados nos diferentes processos do beneficiamento (ver figura 2.1).

A amostragem pode ser com o rejeito em movimento ou estática, neste caso também pode ser coletada amostra no corpo da pilha e a partir de um aterro experimental. Salvo no corpo da pilha, onde obter amostras indeformadas é mais difícil, não há dificuldade em aceder aos rejeitos para ensaios. Mas a amostragem é uma tarefa laboratorial desenvolvida em campo e os procedimentos estabelecidos devem ser executados com rigor [70].

Segundo Goes et al (1991) [36] principalmente na amostragem estática podem ocorrer perda de partículas, contaminação e alteração da umidade da amostra e outros erros. Estes, obviamente, alteram o resultado final das modelagens. Para evitar estes erros, os autores descrevem uma série de procedimentos amostrais.

As amostras devem ser representativas para todo o conjunto de onde foram retiradas. Durante os ensaios laboratoriais estão sujeitas às incertezas experimentais. Estas são propagadas nos resultados dos ensaios que são as variáveis de base para o *Plaxis*. Acrescidas dos erros numéricos das modelagens [82].

Reduzir erros de amostragem e experimentais envolve custos monetários. Assim como, tratar as incertezas pode agregar maior tempo nos ensaios. Propagar as incertezas envolve as derivadas parciais das equações utilizadas e é um problema talvez mais complexo que os implementados no *Plaxis*. Mas quantificar os erros e propagar as incertezas significa entender o funcionamento de quaisquer instrumentos de medida. Há que entender quais os tipos de erros essenciais a serem controlados, de maneira que a estrutura esteja bem representada na realidade [36, 82].

4.2.1 O solo rejeitado

No laboratório de análises de solos, o método convencional para determinar a composição granulométrica das partículas grossas é a peneiração. Enquanto que para as partículas finas é a sedimentação [33]. A análise mecânica tem vindo a destacar-se na determinação da fração grossa do solo e o granulômetro a laser, no caso das partículas finas [14].

Os solos das pilhas têm granulometria bastante extensa, devido à mineralogia e aos processos de moagem na extração mineral. Estes solos estão maioritariamente compreendidos entre partículas de argilas até areias [9]. As curvas típicas de rejeitados por minério objetivo estão representadas na figura 4.1.

Durante o desenvolvimento construtivo das pilhas a granulometria e o teor em água condicionam o processo de compactação. Este processo mecânico consiste em aplicar sucessivos ciclos de carregamento para induzir a expulsão ou comprimir o ar de dentro dos poros [53]. A granulometria também influencia a permeabilidade do solo que limita assentamentos e, a longo prazo, a consolidação das camadas de aterro [33].

O espaço físico nos poros é partilhado entre ar e água. Segundo Massad (2010) [53] existe um teor de água ideal para conseguir expulsar o máximo de ar dos poros. Porque estes conectam-se formando percursos que têm comunicação direta com a atmosfera. Ao comprimir o solo, a água vai comprimir e empurrar ar pelos canais até ser libertado. Diminuindo assim o volume espacial: *volume de vazios*. O teor em água ideal é denominado ótimo proctor. O parâmetro físico associado

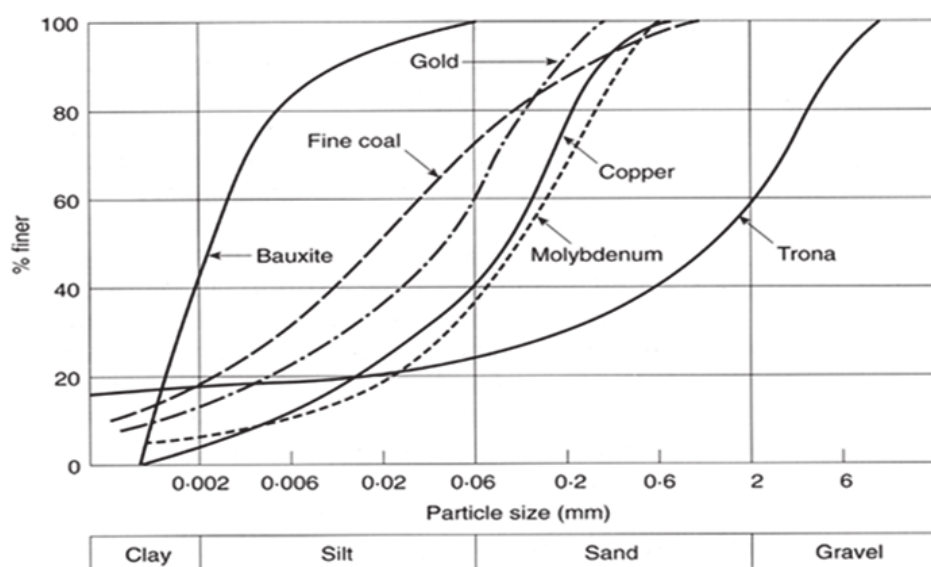


Figura 4.1: Curva granulométrica dos rejeitados por minérios. Retirado de Bhanbhro (2014) [9]

ao fenômeno é o índice de vazios, mas pode ser escrito em função do peso volúmico seco que é usado para medir a intensidade da compactação.

Conforme Massad (2010) [53], o ensaio proctor consiste em compactar algumas amostras do mesmo solo em laboratório, com uma determinada energia de compactação variando a umidade em cada amostra. A curva do peso volúmico seco em função da umidade atinge um ponto de ordenada máxima que indica a umidade ótima na abscissa.

Vale recordar que conforme Davies (2010) [24], as camadas das pilhas devem ser compactadas com o teor de umidade ótimo proctor. No entanto, este trabalho não irá estender-se mais nos detalhes construtivos das camadas de aterros. Embora seja adotado o faseamento construtivo em camadas nas modelagens, o trabalho não controla a execução da obra. Para saber mais acerca, Massad (2010) [53] faz uma abordagem bastante didática.

Sobre outras grandezas físicas básicas na caracterização de qualquer solo, Fernandes (2012) [33] detalha uma série de ensaios de laboratório para quantificar estas grandezas com significado físico a partir de amostras. Dentre as quais está o peso volúmico γ que é uma variável inserida diretamente no programa $\gamma_{digitado}$ associada ao peso próprio da estrutura e essencial para as modelagens no *Plaxis* sem a qual não é possível fazer modelagens de deformação.

4.2.2 O material rejeitado

A Resistência dos Materiais estuda a capacidade resistente dos materiais de suportarem tensões distribuídas ao longo dos eixos coordenados de peças compostas de materiais. De maneira análoga, esta seção refere-se ao comportamento resistente e hidráulico do material rejeitado. Porque já é sabido que a percolação, o peso próprio e solicitações externas causam distribuições de

tensões nas pilhas. Mais especificamente, pretende-se conhecer os modelos hidráulico e constitutivo e como entram nas formulações do capítulo precedente.

4.2.2.1 Comportamento hidráulico

A permeabilidade é o parâmetro intrínseco para descrever o comportamento hidráulico do material. É fundamental para os cálculos de consolidação e hidrodinâmicos. Na natureza, a permeabilidade presente nos materiais dos diferentes solos varia dentro de algumas ordens de grandeza. Os rejeitos podem ter valores compreendidos de 1.0×10^{-9} a 1.0×10^{-4} [m/s] [33, 31].

Conforme Eloi (2021) [31] o parâmetro pode ser determinado em laboratório através de ensaios de adensamento e ensaios triaxiais. Em alguns consolidômetros com possibilidade de fluxo induzido pela base e topo, tais como os edométricos hidráulicos. Em ensaios de campo de sondagem de simples reconhecimento, piezômetros, poços ou cavas, ensaios de infiltração e o de bombeamento.

A permeabilidade é bastante sensível à variação na composição mineralógica do substrato, pelo que horizontes estratificados fazem com que os resultados de campo sejam apresentados com dispersões. Por isso os ensaios de campo podem ter menor precisão que os de laboratório na determinação desta propriedade dos solos [33, 31, 37].

Segundo Esch (2010) [78] para condições saturadas, a permeabilidade do meio poroso é expressa pelo tensor de permeabilidade intrínseca.

O modelo hidráulico

Segundo Gonçalves (2012) [37], é mais adequado utilizar o termo condutividade hidráulica para se referir à permeabilidade de solos não saturados. Nestas condições, a condutividade hidráulica é uma função do volume de água nos poros saturados considerando também a sucção capilar. Nesta abordagem a permeabilidade é um caso particular da função de condutividade que depende apenas da granulometria.

Ainda conforme Gonçalves (2012) [37], a capilaridade e adsorção são os fenômenos que causam a retenção de água nos poros. Este efeito é representado pelas curvas de retenção que é o gráfico do grau de saturação pela sucção.

Existem alguns modelos para descrever as curvas de retenção dos materiais. Segundo Vahid (2012) [35] o mais comumente empregue para modelar a retenção de água nos poros do solo é o de Van Genuchten (1980) [79]. A função de Van Genuchten no *Plaxis* relaciona a saturação com a pressão neutra de sucção $-p_w$ através da carga piezométrica ϕ_p :

$$S(\phi_p) = S_{residu} + (S_{residu} - S_{sat})[1 + |g_a \phi_p|^{g_n}]^{g_c} \quad (4.1)$$

Onde, $\phi_p = -p_w/\gamma_w$; S_{residu} é a saturação residual que representa a água retida no solo mesmo sob efeito de sucção elevada. $S_{sat} = 1$ é a saturação quando os poros estão totalmente preenchidos com água. Mas mesmo assim, podem partilhar espaço com bolhas de ar $S_{sat} < 1$. Parâmetros

empíricos: g_a , g_n , g_c . Se adotar $g_c = (1 - g_n)/g_n$ converte a relação para função de Muelen. A permeabilidade relativa é dada em função da saturação efetiva.

$$k_{rel}(S) = \frac{S - S_{residu}}{S_{sat} - S_{residu}}^{g_l} \left[1 - \left(1 - S_e^{\left(\frac{g_n}{g_n - 1} \right)} \right)^{\left(\frac{g_n - 1}{g_n} \right)} \right]^2 \quad (4.2)$$

$$k_{rel}(S) = S_e^{g_l} \left[1 - \left(1 - S_e^{\left(\frac{g_n}{g_n - 1} \right)} \right)^{\left(\frac{g_n - 1}{g_n} \right)} \right]^2 \quad (4.3)$$

Onde g_l é um parâmetro empírico. g_a , g_l e g_n devem ser medidos. No *Plaxis* os parâmetros podem ser especificados diretamente ou podem ser escolhidos usando um banco de dados com propriedades de solos.

A derivada da saturação com respeito à poropressão:

$$\frac{\partial S(p_w)}{\partial p_w} = \begin{cases} 0 & \text{Para: } p_w \leq 0, \\ (S_{sat} - S_{residu}) \left(\frac{1 - g_n}{g_n} \right) \left[\left(\frac{g_a}{\gamma_w} \right)^{g_n} p_w^{g_n - 1} \right] \left[1 + \left(g_a \frac{p_w}{\gamma_w} \right)^{g_n} \right]^{\frac{1 - 2g_n}{g_n}} & \text{Para: } p_w > 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

A equação 4.3 está contida nas equações algébricas com cálculo de escoamento. A equação 4.4 é utilizada sempre em cálculo de regime transiente. Ainda Vahid (2016) [35] demonstra como, alternativamente, é possível linearizar a curva de retenção e usá-la no programa.

4.2.2.2 Comportamento mecânico

Podem, pelo menos, haver quatro parâmetros básicos que limitam as deformações elásticas das pilhas, combinados com o peso volúmico e os efeitos da posição do nível freático. Os significados físicos são módulo de Young, coeficiente de Poisson ν , o ângulo de resistência ao corte, o ângulo de dilatância e a resistência ao corte para tensão normal nula. São comumente designados módulo de deformabilidade E , o ângulo de atrito ϕ , a dilatância ψ . A resistência ao corte é a coesão c nos solos de comportamento drenado [51].

Segundo M. Fernandes (2012) [33], realizando ensaios triaxiais em que o valor da tensão efetiva de confinamento é diferente. Durante o ensaio esta tensão é mantida constante até que ocorra a rotura da amostra. Os valores para o ângulo de atrito e coesão são determinados de duas formas. Pela circunferência de Mohr na rotura. Pela trajetória de tensões durante os ensaios. O módulo de deformabilidade é estimado pelas tensões de desvio contra extensão axial. A dilatância é determinada através dos resultados dos mesmos ensaios, pela variação do volume em função das tensões de corte.

Para Eloi (2012) [31] segundo Sarby (2006) [65], os rejeitos de mineração podem ser não coesivos ou de baixa coesão. Em contrapartida, exibem ângulo de resistência ao corte maior que de

solos naturais com densidade e estado de tensão equivalentes ao que ocorre nas pilhas. Ele justifica as observações devido aos processos de britagem que configuram as partículas com geometria e consistência muito diferentes do que ocorre na pedogêneses.

Liming Hu et al (2017) [41] fizeram um estudo de quatro tipos de rejeitos. Dois deles de mineração de ferro e outros dois de mineração de cobre. O material grosso de cobre apresentou coesão maior de 32 [kPa]. Os outros tiveram coesão abaixo dos 10 [kPa]. Portanto, a menos que seja um parâmetro que possa variar em ordem de grandezas, a complexidade dos solos pode não possibilitar a generalização de parâmetros característicos.

Contudo, justifique-se para fins didáticos e de estudo prévio a estimativa de parâmetros em falta. Com mais confiança dentro da mesma formação geológica, minério explorado e tipo de operação. Mesmo assim já ficou claro a quantidade de erros envolvidos nas modelagens de pilhas. Antes de formulações, é sempre mais ponderado começar a reduzir os erros primários que estão na quantificação dos parâmetros para cada solo em estudo.

Os solos argilosos são bastante porosos, mas pouco permeáveis. O que justifica realizar ensaios triaxiais não drenados com o intuito de determinar também a resistência ao corte S_u . Nestas condições Carlos Pinto (2006) [58] admite que esta resistência, determinada em compressão, é representativa de pontos de aterros sobre argila mole.

É possível realizar ensaios deste mesmo tipo sujeito a carregamentos cíclicos para adicionar ao valor experimental de S_u efeitos dinâmicos. Este tipo de ensaio é representativo das variações abruptas de pressão neutras nos poros das pilhas [33].

Em suma, os ensaios triaxiais são bastante completos na caracterização dos parâmetros mencionados. Embora, na caracterização de parâmetros de resistência se façam $CPT's$. Os triaxiais têm também limitações quanto à resistência ao corte. Neste último caso o ensaio endométrico é a opção corrente.

O Estado de Repouso

Conforme M. Fernandes (2012) [33], um maciço natural antes de qualquer intervenção humana está sujeito a um estado de tensão de repouso devido somente ao peso próprio. Existe um procedimento de cálculo em Mecânica dos Solos para determinar este estado de tensão inicial. Vai depender do coeficiente de impulso em repouso que pode ser determinado nos ensaios triaxiais ou por fórmulas empíricas.

A pilha de rejeitados é um maciço artificial e pressupõe-se que esteja em equilíbrio sob um estado de tensão não perturbado (constante) devido somente ao peso próprio. Cada ponto do maciço começa a sua trajetória de deslocamento a partir do repouso com velocidade e deslocamento iniciais nulos. Qualquer mudança no estado de tensão pontual, seja a subida do nível freático, carregamento estático e cíclico ou outras, vai fazer variar a posição do ponto que estava em repouso e inicia as trajetórias de tensões e de deslocamento.

Por isso é legítimo denominar a primeira fase de cálculo de deformações no *Plaxis* como O Estado de Repouso. Até porque as equações diferenciais não são representativas na fase inicial

deste tipo de cálculo. Além disso, o Estado de Repouso tem significado computacional, que é a etapa de inicialização das variáveis que podem ser incrementadas a partir das fases subseqüentes.

De uma maneira muito similar a M. Fernandes (2012) [33], é feito o cálculo das tensões iniciais no *Plaxis*. Supondo um elemento infinitesimal tridimensional cúbico que tem um ponto central correspondente ao ponto do maciço. As tensões de repouso são tensões principais que correspondem às faces do cubo assim também designadas, para as quais a tensão tangencial é nula, ou seja, puramente normais.

Num maciço homogêneo, a tensão principal total nas faces verticais é calculada como função do peso próprio $\sigma_{v0} = \gamma_{cte} (h_{total} - h_{pto})$. As tensões na faces verticais não têm natureza puramente gravítica e relacionam-se com o outro valor pelo coeficiente de impulso em repouso K_0 .

Para o *Plaxis* o coeficiente de impulso em repouso pode ser considerado automaticamente de duas maneiras. A primeira, a razão da tensão efetiva horizontal pela tensão efetiva vertical pontuais. A segunda forma, conforme Jergling e Oberg (2016) [42], para carregamento compressivo unidimensional K_0 é tomado em função do coeficiente de Poisson. A tensão efetiva para o j -ésimo ponto do maciço estratificado é dado por:

$$\sigma'_{vo,j} = \sum_i \gamma_i t_i - \gamma_w h_{w,j} \quad (4.5)$$

Onde γ_i é o peso volúmico de i -ésima (sub)camada estratigráfica sobrejacente ao ponto e inclusive a que contém o ponto. t_i é a espessura de cada material diferente acima do ponto. $h_{w,j}$ é a altura da água para o ponto. O termo $\gamma_w h_{w,j}$ é a pressão neutra em repouso u_0 . Se mudar o referencial da equação, fizer o eixo z crescer em profundidade e converter a espessura como função da profundidade da base da i -ésima camada, chega-se a uma expressão válida para geometria como função das coordenadas: do ponto, das bases de cada camada e do nível freático.

$$\sigma'_{vo,j} = \sum_{i=1} \gamma_i [(z_i \leq z_j)(z_i - z_{i-1}) + (z_i > z_j)(z_j - z_{i-1})] - \gamma_w (z_{w,j} - z_i) \quad (4.6)$$

Onde a operação que ocorre dentro '[]' é booleana em que '+' significa 'OU' e as desigualdades retornam 1 ou 0 quando verdadeira ou falsa, respectivamente. Tem como efeito a condição se $z_i > z_j$ então substitui z_i por z_j . Esta mesma operação tem significado de '[espessura]' e para valores negativos deve ser nula. A constante $z_{w,j}$ é a coordenada da profundidade do nível freático para o j -ésimo ponto do maciço. Se o nível freático estiver acima da superfície física da Terra tem profundidade negativa $-z_{w,i}$. Quando $i = 1$: $z_0 = z_{terreno} = 0$.

Nestas condições, para um perfil de furo de sondagem, a expressão 4.6 passou em três testes: maciço homogêneo, maciço homogêneo dividido em três camadas e maciço heterogêneo com três camadas.

Está, portanto, apresentada uma equação programável pontual em função das coordenadas pela qual é possível fazer uma analogia da maneira como todos os programas de cálculo podem

gerar o estado de repouso.

Relação Constitutiva

A lei de Hooke relaciona as tensões com as deformações em regime elástico pelo módulo de elasticidade. Os modelos constitutivos mais básicos podem levar em consideração esta lei respeitando também a compatibilidade de deformações. Outros modelos podem considerar também a lei de endurecimento. Os modelos mais avançados podem considerar a lei de fluxo que pode ser escrita na forma diferencial. Em função das leis físicas que regem o modelo existem parâmetros associados [63].

Pontos em distribuição linear são modelados por uma função linear. Mas ter modelos que representem pontos em distribuição não linear, a exemplo do que ocorre com as parábolas, é necessário terem mais parâmetros. Para aplicar todos os modelos é conveniente os parâmetros terem uma simbologia e nomenclatura adequados à área de aplicação. Alguns desses modelos têm origem dentro da Matemática e outros na própria área de aplicação.

O modelo constitutivo é uma forma de equacionar a relação tensão-deformação real que ocorre no material do solo. Além disso, estabelece critérios de rotura para o material em regime plástico. A lei de Hooke é linear e a forma mais simplificada de fazer isso.

Conforme Sfriso (2015) [67], a relação constitutiva é um conjunto de equações utilizadas para atualizar o estado de tensão do material após ocorrerem mudanças no seu comportamento. Tem como entrada dados que quantificam as causas que afetam o comportamento do material: o tensor das tensões, valores atuais de variáveis de estado, incremento de deformação. A saída são todos os mesmos parâmetros atualizados. O valor da variável de estado indica o estado físico que o ponto material estaria a cada momento em que é atualizada.

A lei de Hooke generalizada pode ser escrita como $\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{C}} \underline{\underline{\varepsilon}}$ e $\underline{\underline{\varepsilon}} = \underline{\underline{C}}^{-1} \underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{D}} \underline{\underline{\sigma}}$. Portanto na notação de Voigt:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu)}{E} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu)}{E} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu)}{E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Para David (2001) [59], Naylor (1981) [56] e outros autores $\underline{\underline{D}}$ é a matriz elasto-plástica constitutiva. Se for escrever em termos de tensões efetivas com a correção de Biot resulta:

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \underline{\underline{D}} \underline{\underline{\sigma'}} = \underline{\underline{D}} (\underline{\underline{S}} - \alpha p_w \underline{\underline{I}}) \quad (4.8)$$

Onde $\underline{S}$ corresponde às tensões pontual para o esqueleto sólido. O termo $p_w \underline{I}$ é a distribuição hidrostática em torno do ponto. A constante α é o coeficiente de Biot. $\underline{D}$ sempre depende do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson.

Vahid (2016) [35] incorporou a relação constitutiva nas formulações através do princípio das tensões efetivas $d\underline{\sigma}' = \underline{M} d\underline{\varepsilon}$. Esta matriz $\underline{M}$ é designada matriz de tensão-deformação e comparticipa como variável implícita no sistema linear resolvido pelo programa nos cálculos de deformações.

Tudo indica que quando se elege um modelo constitutivo no *Plaxis*, tem de se modificar a forma como Vahid (2016) [35] a elaborou. É muito provável que seja $\underline{M}$ a ser modificada. Para comportamento linear os termos da matriz são constantes. Enquanto que para não linear os termos são funções da tensão.

Modelo Mohr-Coulomb

O material terroso com comportamento plástico perfeitamente elástico é frequentemente representado pelo modelo de Mohr-Coulomb. Também é comum adotá-lo para qualquer tipo de solo ou rocha como uma aproximação inicial. Este modelo constitutivo é o mais difundido porque modela uma reta no plano de tensões em que os parâmetros são a coesão e ângulo de atrito [33, 44, 75].

O modelo tem uma faixa elástica definida pelo módulo de Young E e coeficiente de Poisson ν . Mohr-Coulomb é o modelo padrão e não altera as formulações do capítulo precedente que estão baseadas no princípio das tensões efetivas. Logo, o critério de falha é definido pelo ângulo de atrito efetivo ϕ' e pela coesão efetiva c' . A dilatância ψ contribui com o ângulo de atrito de pico e descreve a regra de fluxo usada para modelar uma mudança irreversível realista no volume devido ao cisalhamento [33].

Em Resistência dos Materiais o estado de tensão de um ponto material pode ser representado pela circunferência de Mohr. Em Mecânica dos Solos, conforme M.Fernandes (2012) [33], é mais cômodo representar o estado de tensão de um ponto do maciço através de pontos num diagrama s, s', t como o da figura 4.2.

Antes de explicar as trajetórias de tensões é conveniente nomear referenciais através de siglas e índices. O j -ésimo ponto físico na pilha é denominado de $p_{fis,j}$. O k -ésimo ponto do gráfico que representa $p_{fis,j}$ é denominado de p_{jk} com dois índices.

A linha K_0 representa pontos físicos na pilha em diferentes profundidades sob tensões gravíticas. Portanto é representativa do estado de repouso. A trajetória de tensões efetivas TTE em repouso de $p_{fis,1}$ inicia em p_{11} . A trajetória de tensões totais TTT deste mesmo ponto $p_{fis,1}$ inicia em p_{12} . A pressão neutra u_0 em repouso é distância entre p_{11} e p_{12} .

A linha K_f representa o critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Se a TTE intersectar a linha K_f , significa que o ponto $p_{fis,j}$ estará plastificado.

A construção de uma nova camada da pilha ou ocorrência de precipitação têm por efeito a subida do nível freático ou gera excesso de pressão neutra. Devido a isto, a distância entre p_{13} e p_{14} é maior que u_0 . O processo de consolidação faz TTE ir para a direita. Logo, a estabilidade

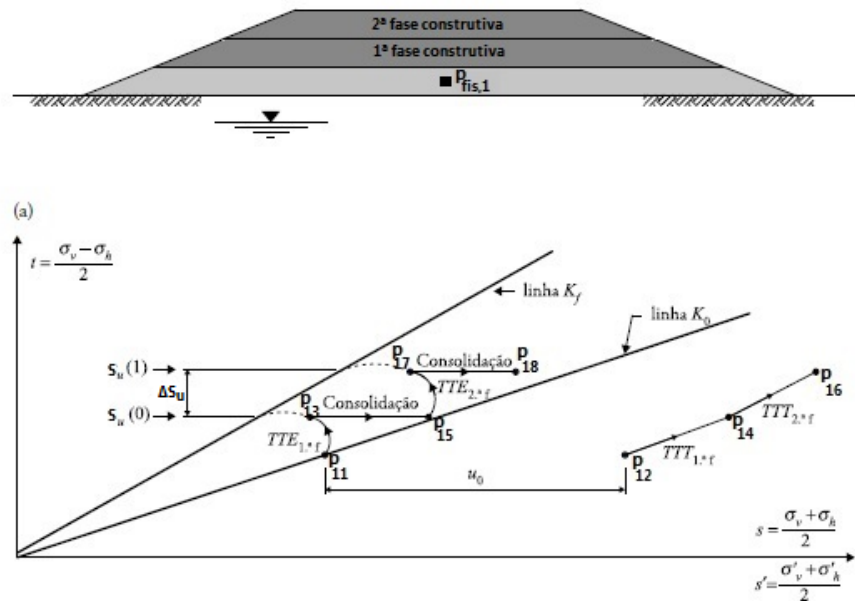


Figura 4.2: Trajetória de tensões para um empilhamento com consolidação, adaptado de M.Fernandes (2012) [33]

das pilhas esta comprometida, pelo menos, durante o faseamento construtivo e na ocorrência de tempestades.

Vale ainda observar, segundo M. Fernandes (2012) [33] a resistência não drenada depende das tensões efetivas instaladas. Logo o faseamento construtivo das pilhas faz aumentar a resistência não drenada S_u .

Modelo Norsand

Os ensaios triaxiais não são eficientes ao fornecem todos os parâmetros para todos os modelos constitutivos. Principalmente quando estes são avançados podem requerer ensaios triaxiais específicos ou avançados e/ou outros tipos de levantamentos de campo [80, 31]. A partir disso, existem duas maneiras de determinar a relação constitutiva adotada nas simulações computacionais. O modelo adotado condiciona os ensaios ou estes condicionam o modelo.

O primeiro caso é possível se souber o tipo de fenômeno a que o solo está sujeito em função do tipo de solos, o tipo de obra geotécnica e outras características semelhantes. O segundo caso é possível quando um ensaio já foi realizado e tem de avançar com os parâmetros que existem. Desta última forma, como foi pressuposto quando afirmado que havia quatro parâmetros básicos que limitam as deformações.

Um terceiro caso é eventualmente adotar uns valores estimados. Mas fazer modelagens com

falta de parâmetros ou parâmetros estimados é bastante arriscado e, pode ser a causa da divergência do algoritmo. Os dados têm de ser de boa qualidade e pertinentes aos tipos de modelagens requisitadas.

Quando se pretende utilizar modelos mais avançados nas simulações, é coerente que isto seja decidido previamente, como em projeto de caracterização de solo e material. De maneira que seja pressuposto um modelo mais preciso, para dados precisos.

O Norsand é o modelo que melhor representa o fenômeno da liquefação. Este fenômeno ocorre quando um evento externo faz anular as tensões efetivas, causa a perda de rigidez e resistência do material que liquefaz. As causas de liquefação são classificadas em carregamento cíclico ou estático. Os cíclicos são todos os que geram ondas de superfície: sismos, explosões, impacto de equipamentos de compactação, tráfego rodoviário no entorno. Os estáticos podem ser o peso próprio da estrutura ou o peso de novas camadas de pilhas [80, 16].

Se o cenário é propício ou não à liquefação, ainda assim a caracterização do solo pela curva granulométrica e os limites de consistência de Atterberg podem corroborar a susceptibilidade à liquefação ou excluir o cenário previamente à quantificação dos parâmetros do modelo constitutivo [80].

Se até então a liquefação não é pertinente, a dilatância tem de ser negativa. Do contrário, o Norsand é o modelo ideal. Esta premissa vem das teorias da Mecânica dos Solos dos Estados Críticos que estuda o fenômeno em detalhes, inclusive em escala mineralógica e granulométrica.

Geralmente os trabalhos apresentam a liquefação fora do escopo da Mecânica dos Solos tradicional. Mas neste trabalho, a relação constitutiva foi apresentada no capítulo precedente, na perspectiva dos fenômenos globais. Não foram realizados ensaios e utilizam-se os valores determinados em trabalhos anteriores, no quais o fenômeno já foi abordado na outra perspectiva mais bem fundamentada.

Para atingir os objetivos deste trabalho e introduzir superficialmente o estudo dos fenômenos materiais, assim como M.Fernandes (2012) [33] apresenta a liquefação dentro da Mecânica dos Solos, foi feito este trabalho na perspectiva do modelador em *Plaxis* para quem lhe foi designada a tarefa de modelar os dados daqueles trabalhos anteriores.

Ainda assim para entender mais acerca do fenômeno da liquefação Viana (2013) [80] fez uma análise bastante minuciosa do fenômeno da liquefação através da interpretação de resultados para uma série de ensaios. Também ressalta a modalidade de ensaios CPT terem elevada precisão, não serem economicamente dispendiosos e serem bastante completos na determinação dos parâmetros do modelo. Além disso, a sísmica é o método recomendável para determinar os parâmetros de elasticidade.

O modelo Norsand tem até 15 parâmetros. Dois deles não são quantificáveis e referem-se ao grau de sobreconsolidação inicial, o endurecimento plástico do material. Os outros são utilizados para caracterizar o estado físico atual em repouso, o regime elástico, o amolecimento, o estado crítico, a dilatação limite, a resistência do material.

O grau de sobreconsolidação é R e o amolecimento é representado por S . O parâmetro de estado inicial é Ψ_0 . Os elásticos são $(G_{100}; \eta_G; \nu)$. A combinação $(\Gamma; \lambda_e)$ ou $(C_a; C_b; C_c)$ são

as hipóteses de parâmetros para o estado crítico. O χ_{tc} é calculado como função do parâmetro de estado e limita o ângulo de dilatância mínimo. O par $(M_{tc}; N)$ são parâmetros de resistência em estado crítico. $(H_0; H_\psi)$ são módulos de endurecimento [68].

Segundo Bacco (2020) [6], é recomendável determinar os parâmetros quantificáveis da seguinte forma: Ψ_0 pelo índice de vazios. O par $(\Gamma; \lambda_e)$ pelos resultados de ensaios triaxiais drenados plotados em escala monolog $(p' \times e)$ e a reta que melhor se ajusta aos pontos corresponde à linha de estado crítico, a partir da qual se determinam estes valores. $(M_{tc}; N)$ e χ_{tc} também são determinados a partir dos mesmos ensaios triaxiais e reta de ajuste. $(M_{tc}; N)$ e χ_{tc} . $(H_0; H_\psi)$ pela inclinação inicial tensão-deformação em ensaio isotrópico. O $(G_{100}; \eta_G; \nu)$ através de sísmica.

4.3 Conclusões

Identifica-se o comportamento material de um ponto de pilhas na trajetória de tensões. Completa-se um pouco mais o raciocínio desenvolvido no entendimento dos fenômenos físicos.

Ficou entendido que o *Plaxis* utiliza vários tipos de modelos, numéricos ou não, são uma aproximação da realidade e uma maneira de poder simular o comportamento real por meio de hipóteses e manipular uma realidade fictícia.

O modelo constitutivo para cada solo é elegido, desde que a determinação dos parâmetros não seja condicionante, conforme o tipo de comportamento expectável para o material em função da localização geográfica da mina, do tipo de operação, do tipo de solo. De maneira a supor um comportamento drenado, não drenado, dependente de efeitos dinâmicos ou se ocorre liquefação.

A interpretação de resultados de laboratório e de campo vai corroborar ou não as hipóteses iniciais. Mesmo assim um comportamento padrão para o solo é difícil de determinar. Este depende de muita pesquisa e surgem modelos constitutivos mais complexos para estabelecer uma melhor realidade fictícia.

A relação constitutiva é um problema dentro do problema global. Enquanto que supor que a água se comporta como um fluido newtoniano é suficiente e não existem mais variações de águas newtonianas. Não é possível enquadrar todos os materiais dos solos dentro de um limite restrito. É preciso informações em escala granulométrica, às vezes mineralógica e combiná-las a efeitos externos para conseguir descrever o comportamento de um grupo de solos.

Para efeitos práticos, ficou percebido o tipo de solos das pilhas dentro de um espectro bastante amplo. A forma como o modelo hidráulico e constitutivo entram nas modelagens. O estado de tensão de repouso é único e não é alterado em função do modelo constitutivo adotado. A trajetória de tensões típica dos problemas modelados é sempre para a esquerda da linha K_0 , aproximando da mesma linha com a consolidação. Isto denota a importância de avaliar a estabilidade da estrutura durante o faseamento construtivo ou em cada fase executada no programa. O modelo Norsand melhora a precisão na representação do fenômeno da liquefação. Os dados de entrada no programa foram razoavelmente justificados.

As equações diferenciais expressam as leis da natureza. Os erros são modelados por derivadas parciais. Portanto, naturais. Os modelos constitutivos mais inovadores são formulados também

com este tipo especial de equações. O problema global foi formulado com equações diferenciais. Portanto, é evidente que a natureza é única e as modelagens estão cada vez mais perto de simular bem a natureza e convergirem para soluções bastante satisfatórias.

Capítulo 5

Utilização do Plaxis2D para análise de estabilidade de pilhas com caso real

Nos capítulos precedentes foi dado um panorama global de pilhas de rejeitados e da teoria aplicada em que o programa se suporta. Este capítulo apresenta uma compilação prática dos conceitos teóricos que foram descritos. Mas antes a região de interesse é enquadrada a partir dos acontecimentos geológicos mais expressivos para a metalogêneses que explica também parte da composição dos rejeitos minerais. Justificam-se então a origem dos dados que foram utilizados nestas modelagens e aborda-se o *Plaxis* mais na perspectiva do utilizador que se orienta pelos manuais do programa.

No enquadramento é localizada a região de estudo. É descrito porque a região é especialmente importante num contexto global e brasileiro. Para estudos do âmbito das Geociências e da Mineração. Ressaltam-se algumas características da paisagem, da hidrografia, populacionais, culturais, econômicas. Depois localiza-se a mina da CSN que tem a pilha modelada neste trabalho.

Na seção seguinte apresentam-se testes e procedimentos de tarefas para serem aplicados na utilização do *Plaxis*. Deste momento em diante, procurou-se sempre detalhar as ações executadas para obter as configurações do programa ou mesmo o caminho das configurações necessárias nos casos estudados. Mas não é tutorial porque não se demonstra como executam-se as configurações. Sendo necessário ser um utilizador do programa. A exposição detalhada também é útil caso haja interesse em replicar os passos do trabalho desenvolvido a título de verificação, detectar falhas e aprimorar as soluções ou mesmo aprender a avaliar programas de maneira similar.

Finalmente, chega-se aos modelos atribuídos a este trabalho, para os quais são aplicados os conceitos teóricos dos capítulos 3 e 4 e os testes que serão apresentados neste capítulo. Na seção seguinte apresenta-se a avaliação da estabilidade estrutural através da quantificação do coeficiente de segurança e das deformações.

5.1 Enquadramento

No Brasil, na região-centro sul do Estado de Minas Gerais está localizada a província mineral do Quadrilátero Ferrífero QF_e . Esta demarcação não é uma divisão política, engloba sim áreas de algumas cidades. Foi nomeada desta forma pelo geólogo Gonzaga de Campos na década de 50 devido aos maiores volumes de minerais de ferro da região estarem distribuídos dentro de um limite geométrico sugestivo em planta [69].

A gênese dos depósitos minerais ali existentes está associada a eventos do Éon Pré-Cambriano. Durante o Arqueano existia uma bacia vulcano-sedimentar e depois também ocorreram vários episódios de formação de bacias sedimentares que originaram o Cráton São Francisco-Congo. O evento mais expressivo é a deposição dos itabiritos com o aumento do oxigênio na atmosfera. O cráton foi separado pelo mecanismo da tectônica de placas litosféricas com a abertura do oceano Atlântico na Era Mesozoica. Pela sua idade os crátons são bastante relevantes para os estudos que objetivam entender a história da Terra [11]. É a região geológica mais estudada do Brasil.

Os crátons são estruturas geológicas tectonicamente estáveis, pelo que é difícil a ocorrência de sismos locais de grande magnitude. Está representada na figura 5.1 a província do QF_e na porção sul do Cráton São Francisco com a geologia local simplificada. De onde foram explorados principalmente minerais de ouro, ferro e manganês em 39 minas e garimpos com denominação e localização numerada no mapa [11].

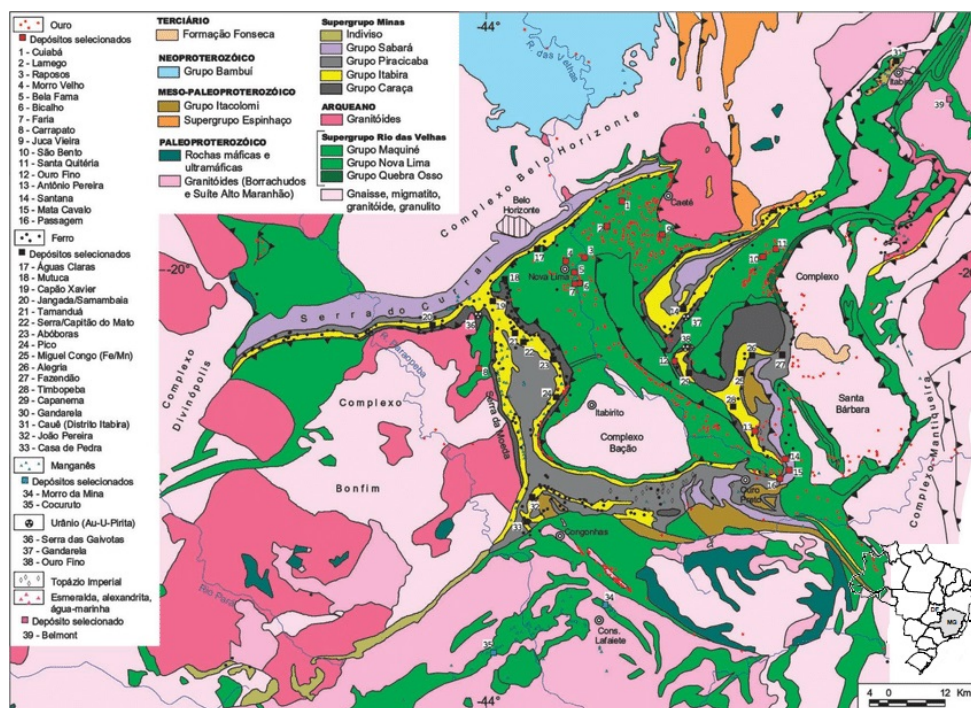


Figura 5.1: Mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero. Adaptado de Bizzi et al (2003) [11].

Segundo Castro et al (2020) [32], a geomorfologia do QF_e é caracterizada por relevo bem acidentado composto por cadeias de montanhas, platôs elevados, cânions profundos e vales suaves abertos. A região, de clima tipicamente tropical, sofre forte intemperismo e a lixiviação é o processo predominante no transporte de sedimentos. No entanto, há poucas zonas expressivas de acumulação de solos aluvionares, com raras ocorrências de horizontes com 30 metros de profundidade.

Ainda segundo Castro et al (2020) [32], a hidrografia aponta as nascentes de duas das principais bacias brasileiras, a do rio Doce e a do rio das Velhas que é o maior afluente do rio São Francisco, pauta frequente para o combate à seca do nordeste brasileiro. Muitas cidades ao longo de 2700 quilômetros, por onde passa o rio, têm o sistema de abastecimento de água vinculado àquela hidrografia. Somente a cidade de Itabirito tem identificada mais de trezentos pontos de interesse na bacia afluente para o sistema de abastecimento de águas municipais.

O perímetro também abriga diversos biomas. Onde estão demarcadas unidades de conservação que constituem o Mosaico de Unidades de Conservação da Serra do Espinhaço do Quadrilátero Ferrífero. Entre estas unidades estão compreendidos florestas, parques, áreas de proteção ambiental, estações ecológicas e monumentos naturais [26].

A região centro-sul do Estado é o conglomerado mais povoado e populoso. A concentração urbana populacional começou no Brasil colonial, com a exploração dos garimpos de ouro. A cidade de Ouro Preto foi a capital das Minas Gerais de 1721 até 1897. Portanto, foi o centro econômico no ciclo do ouro e consolidou-se como centro urbano em 1765. As atividades mineradoras impulsionaram o desenvolvimento, com destaque para a fundação da Escola de Minas de Ouro Preto ainda no período monárquico em 1876. O escoamento do ouro explorado era feito pela Estrada Real até Paraty no litoral do Rio de Janeiro. Neste percurso muitas cidades evidenciam a história luso-brasileira, têm áreas tomadas como patrimônio mundial onde conservam-se fachadas de arquitetura típica da época.

O aço é a matéria prima base para o desenvolvimento. O Brasil economicamente é o segundo maior produtor de minério de ferro do mundo, atrás da China que importa grande parte do minério brasileiro. A Vale é a segunda maior mineradora do mundo e foi fundada em Itabira em 1942. A produção de minério de ferro no QF_e corresponde a mais da metade da produção nacional. A Companhia Siderúrgica Nacional CSN é outra grande mineradora instalada na região que explora a mina local com mais alta concentração de ferro, é também a segunda maior exportadora do Brasil e sexta mundial.

Neste contexto, é obrigatório garantir a segurança das estruturas de armazenamento de rejeitados para preservar a vida, proteger a envolvente urbana, mitigar o potencial dano ambiental, cultural, econômico e outros associados.

O Quadrilátero atualmente tem mais de 30 minas em operação. Na mina Casa de Pedra, com número 33 na figura 5.1, a CSN extrai hematita. Faz mais de 105 anos que esta mina é explorada. O volume rejeitado deixou de ser armazenado em barragem em 2020. O processo de empilhamento foi adotado anteriormente e hoje a estrutura tem um desenvolvimento bastante avançado. A CSN filtra a totalidade dos rejeitos gerados na exploração desta mina.

5.2 Testes prévios e tarefas no *Plaxis*

Começar a estudar o *Plaxis* através dos manuais nas versões mais recentes, particularmente a partir do manual tutorial composto por 18 lições (devido ao título sugestivo de cada uma delas e não só) é uma via que facilmente induz o utilizador a pensar que cada lição é uma tarefa isolada ou o conjugado de tarefas que só podem ser executadas no caso específico ressaltado no título da lição que ocorrem. Mas depois de adquirir alguma destreza na manipulação do programa e dos tutoriais, percebe-se que há muitas tarefas duplicadas.

As lições que compartilham o mesmo cenário inicial podem ser executadas dentro de uma única lição do mesmo arquivo ou projeto do *Plaxis*. Também existem tarefas que são comuns a muitas situações modeladas, pelo que independentemente da aplicação a que se dá, existem tutoriais fundamentais para o trabalho em vigor.

A interpretação do manual tutorial e das tarefas possíveis no *Plaxis* pelo funcionamento teórico do programa é fundamental para afirmar a linha de raciocínio na qual se suportam as simulações feitas neste trabalho. Isto, pelo menos, requer demonstrar a singularidade do estado de repouso através da utilização do programa; testar e comparar condições de fronteira para regimes de escoamento e apresentar listas de procedimentos para execução de configurações de cálculo no programa. Testes e procedimentos como os que serão descritos melhoram a eficiência na utilização de programas.

5.2.1 O projeto em *Plaxis*

O primeiro tutorial do *Plaxis* separa o problema da sapata rígida e flexível sobre o mesmo maciço arenoso em dois problemas distintos. Uma vez que quando se passa ao segundo problema, o manual indica que o usuário deve apagar a representação da sapata rígida, antes de representar a sapata flexível.

No primeiro caso, a sapata rígida é representada por assentamentos de apoio no canto superior esquerdo do modelo. A simulação tem duas fases. Na primeira gera-se o estado de repouso com os assentamentos de apoios desativados, ou seja, como se não existissem. Na segunda os assentamentos são ativados e as deformações para os nós da malha são calculadas.

No segundo caso, os assentamentos de apoios são apagados e a sapata flexível é representada por uma placa de rigidez elástica submetida ao carregamento distribuído na mesma parte superior esquerda do modelo. A simulação também tem duas fases. Na primeira gera-se o estado de repouso com a placa e o carregamento desativados. Na segunda a estrutura e o carregamento são ativados, na sequência as deformações são calculadas.

Modelar os dois casos anteriores no mesmo projeto é questão de gerar aquela fase inicial comum que representa o estado de repouso e, ligadas exclusivamente a ela, adicionar duas fases que são independentes entre elas. Significa que a partir da fase inicial existem duas hipóteses de deformações, nas condições de: sapata rígida ou sapata flexível.

Nesta abordagem combinada, na fase inicial os dois tipos de sapatas estão sobrepostos na parte correspondente à borda do modelo de maciço e totalmente desativadas. Quando se executa

o cálculo da sapata rígida, os assentamentos de apoios são ativados e a representação da sapata flexível mantém-se desativada e vice-versa. Não é necessário reinicializar as variáveis porque ambas fases de cálculo partem do repouso.

Na figura 5.2 está representado o explorador de fases do programa com o respectivo diagrama em árvore para os três casos que foram descritos. Fases dependentes são conectadas a partir do ramal que sai do ícone circular da fase em nível superior e vai até o ícone da fase em nível inferior. Desta forma, o programa representa automaticamente um encadeamento dos cálculos realizados e faz também uma indentação. Nunca é possível desvincular os cálculos da fase inicial, todas as simulações precedentes a esta fase estão de alguma forma encadeadas a partir dela.

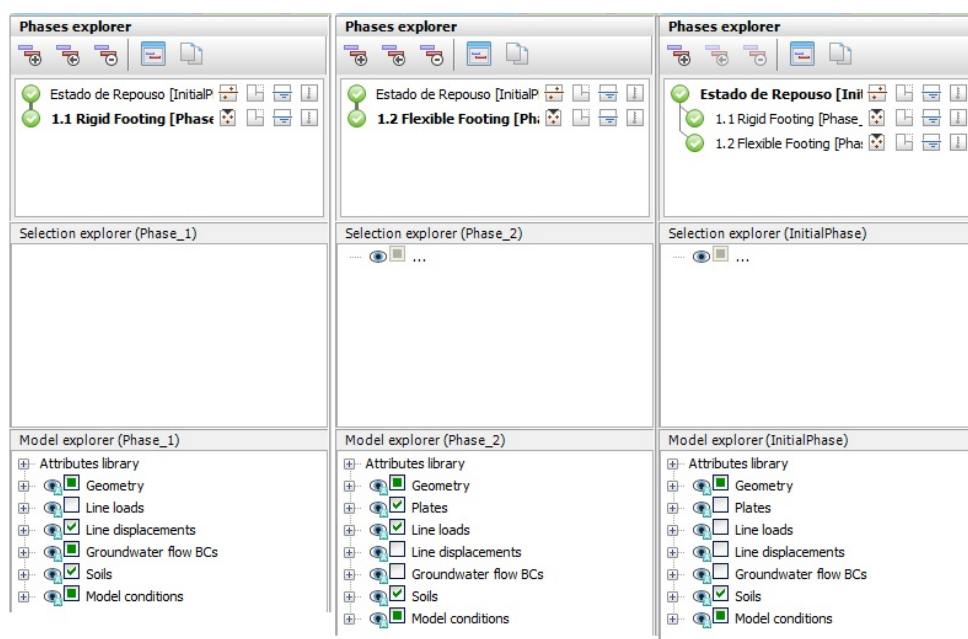


Figura 5.2: Guia explorador de fases do programa em três situações

A primeira lição tutorial objetiva determinar assentamentos causados no maciço arenoso para as duas condições de sapatas descritas. A tabela 5.1 apresenta os valores obtidos para o assentamento máximo em função do tipo de caso modelado. Como era expectável, os valores para os dois tipos de sapatas calculados em projetos separados são totalmente coincidentes aos respectivos obtidos no projeto em que se combina as duas situações.

Tabela 5.1: Assentamentos para os 3 diferentes casos

Assentamento máximo [mm]		
Sapata	1.1 Rígida	1.2 Flexível
Caso 1	50	-
Caso 2	-	50
Combo 12	50	50

Este primeiro teste afirmou que quaisquer simulações que tenham o mesmo cenário geotécnico inicial ou o estado de repouso podem ser modeladas no mesmo projeto. Esta forma de agrupar as simulações reforça as afirmações da independência com relação à outras fases e da singularidade ou unicidade do estado de repouso. Não existem dois deste para o mesmo cenário geotécnico e nesta fase as deformações são nulas.

Evitar duplicar o estado de repouso em diferentes projetos e organizar as fases por tópicos também facilita a comparação das diferentes hipóteses simuladas. Particularmente é vantajoso durante as modelagens, quando se quer comparar resultados, fazer uma avaliação prévia e efetuar alterações nas fases do programa sem ter de exportar imagens.

Desta forma, as simulações apresentadas neste trabalho foram organizadas por tópicos e dentro de um único projeto sempre que a fase inicial de cálculo de deformações não seja alterada.

5.2.2 A geometria da estratigrafia

A geometria e estratigrafia da fase inicial no programa é geralmente definida na aba *Soil* através de uma representação de furos de sondagens. Para definir unidades estratigráficas com interfaces inclinadas são necessários informações de furos de sondagens nas secções em que a interface da camada muda de inclinação. Este procedimento pode torna-se bastante ineficiente quando são necessários muitos perfis de sondagens.

Alternativamente é possível definir todas as unidades estratigráficas na aba *Structures*. Assim a geometria pode ser desenhada com o cursor do gráfico e/ou inserindo as coordenadas dos vértices manualmente e demais ferramentas do programa. No processo de representar o faseamento construtivo de aterro, na aba *Soil* pode-se definir a estratigrafia de fundação quando tem interfaces horizontais e a geometria de cada camada na aba *Structures*.

5.2.3 Fronteira *Head* com nível freático

Todos os segmentos de reta limites dos (sub)domínios estratigráficos do modelo devem ter as condições de fronteira de fluxo atribuídas a aqueles em modelagens que objetivam determinar grandezas físicas relacionadas com regimes de escoamento. Portanto, para este efeito, pode-se combinar segmentos de potencial conhecido com outros definidos por *Seepage*. Isto envolve, conforme descrito no capítulo 3, atribuir valores àquelas que se definem como *Head* e utilizar o nível freático para as outras.

Existe uma situação em que se deve tomar em atenção, no caso da fronteira definida como *Head* ter o nível freático apto a lhe transmitir um valor prescrito automaticamente além daquele potencial prescrito manualmente. O programa será testado em algumas situações para verificar se a fronteira definida como *Head* no *Plaxis* pode também considerar o nível freático. Este teste é relevante para definir a forma como se vai proceder nestes casos para não ter efeitos sobrepostos indesejáveis.

Um procedimento usual para testar um programa de cálculo é isolar um atributo a ser testado, proceder aos cálculos e verificar o resultado numérico de uma grandeza que esteja associada. Também existe a hipótese da combinação de atributos.

Para o teste é adotada a geometria do aterro da décima primeira lição tutorial que é um cálculo de escoamento. Para esta geometria é possível definir o nível freático em quatro hipóteses, cada uma delas correspondentes a uma fase, *11Emerso* e outras três representadas por global na figura 5.3: *12NF_{acima}*, *13NF_{nível}*, *14NF_{abaixo}*. Durante estas fases todas as fronteiras mantêm-se *Seepage*.

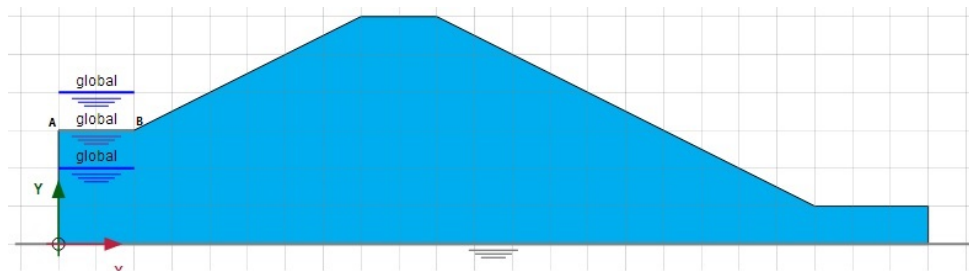


Figura 5.3: Representação das três posições do nível freático

Passar somente a característica *Head*, sem atribuir o valor do potencial, ao segmento *AB* é feito adicionando uma nova fase *2AB_{Head=0}*, mantendo-se o nível freático global na cota zero e atribuindo a condição de fronteira *Head* ao segmento, mas com valor prescrito nulo. É um procedimento que pode não fazer sentido físico, mas é totalmente aceitável do ponto de vista matemático e computacional.

Mantendo-se o segmento de fronteira *AB* definido como *Head* foram feitas três hipóteses de combinações, uma para cada fase. Na combinação *COMBO122* o nível freático é aquele acima do segmento *AB*. Na combinação *COMBO132* o nível freático está à mesma cota do segmento. Na combinação *COMBO142* o nível está abaixo do segmento.

Tabela 5.2: Caudais unitários nas diferentes fases descritas

Fase	q_{min} [m/dia]	q_{max} [m/dia]
<i>11Emerso</i>	-	$6,47 \times 10^{-18}$
<i>12NF_{acima}</i>	$0,46 \times 10^{-6}$	0,23
<i>13NF_{nível}</i>	$1,87 \times 10^{-6}$	0,03
<i>14NF_{abaixo}</i>	$0,16 \times 10^{-6}$	0,02
<i>2AB_{Head=0}</i>	-	$6,50 \times 10^{-18}$
<i>COMBO122</i>	$2,44 \times 10^{-6}$	0,14
<i>COMBO132</i>	$1,57 \times 10^{-6}$	0,12
<i>COMBO142</i>	$0,26 \times 10^{-6}$	0,02

Na tabela 5.2 tem a relação dos valores para os caudais unitários em função da fase. Nota-se que definir a fronteira como *Head* e prescrever zero praticamente não altera o caudal calculado

para o maciço emerso. Quando o nível freático está em qualquer uma das posições indicadas por global na figura 5.3, ocorre escoamento e o caudal salta, pelo menos, 12 ordens de grandeza. Nas fases combinadas os valores dos caudais variaram em porcentagens significativas: até 3 vezes para o valor máximo e até 4,3 vezes para o valor mínimo. Isto somente por ter a fronteira definida como *Head*.

A análise dos resultados da tabela 5.2, portanto, indica que quando se definir uma fronteira como *Head* não pode haver o nível freático paralelamente aquele segmento, senão o programa vai sobrepor os efeitos e repercutir nos resultados finais da modelagem.

Neste momento vale ainda salientar o caudal estar associado a um significado físico [LT^{-1}], mas neste tipo de análise adimensional [-] que levou em consideração apenas os valores numéricos, estes têm significados compreendidos entre a teoria e o funcionamento do programa. Enquanto que, a exemplo, do tópico 5.2.1 foi promovida uma análise dimensional. Neste outro tipo de análise, parte-se de um problema com soluções (reais) conhecidas, o valor de uma grandeza física e naquele caso, o deslocamento [L]. Esta grandeza, num próximo passo, é determinada em outra situação e comparada com outro(s) deslocamento(s) previamente conhecidos que podem facilmente terem interpretações próximas de fenômenos da natureza (recalque/assentamento). Embora isto não tenha sido feito naquele tópico.

5.2.4 Precipitação

A precipitação é simulada como uma condição de fronteira para um problema de cálculo de regime de escoamento que pode variar no tempo. Existem, pelo menos, três maneiras de definir os dados de precipitação no programa. A primeira delas requer definir uma função de vazão e pode ser no formato de tabela. Alternativamente, pode-se calcular a média dos valores desta mesma tabela. Nos dois casos tem de ativar a precipitação no caminho *Model conditions/Precipitation*. Neste instante é permitido inserir o valor médio e isto é o segundo modo, que prevalece em detrimento da tabela. Esta forma é equivalente a definir a precipitação como a infiltração média para o período de tempo total. Então, o terceiro modo é definir a precipitação como infiltração.

Em quaisquer um dos casos corresponde nada mais que, matematicamente, definir vetores de fluxo nas fronteiras superiores do modelo. As três formas foram verificadas em termos de saturação dos poros do solo e caudais unitários para a geometria, materiais e dados de precipitação multiplicados por -10 do tutorial 12 que é um problema de saturação por precipitação num solo de cultivo de batatas. A princípio a modificação foi introduzida para gerar resultados mais expressivos e porque entende-se que os vetores de fluxo prescritos devem convergir para dentro do domínio.

Foi gerada uma fase inicial de solo *Emerso* em regime permanente e outras independentes, uma para elevar o nível freático e outras duas com cálculo em regime transiente em 15 dias. Uma para a função de precipitação com dados tabelados e outra para a infiltração. Ambas com potencial mínimo nulo e potencial máximo 5 metros que corresponde à cota máxima do maciço. A fase de infiltração tem caudal médio definido como 0,4 [m/dia].

Os resultados estão apresentados na tabela 5.3. A fase com solo emerso apresenta saturação máxima de 100 % na base e mínima 21,2 % na parte superior. Os casos modelados de precipitação

Tabela 5.3: Resultados para as hipóteses levantadas

Fase	S_{min} [%]	q_{min} [m/dia]	q_{max} [m/dia]
<i>Emerso</i>	21,2	-	$1,00 \times 10^{-16}$
<i>INF=4,5</i>	92,3	-	$2,76 \times 10^{-15}$
<i>2Precipitação</i>	26,0	$5,54 \times 10^{-6}$	$78,04 \times 10^{-3}$
<i>3Infiltração</i>	26,0	$5,54 \times 10^{-6}$	$78,04 \times 10^{-3}$
<i>COMBO12</i>	27,5	$5,20 \times 10^{-6}$	$51,69 \times 10^{-3}$
<i>COMBO13</i>	26,0	$5,54 \times 10^{-6}$	$78,04 \times 10^{-3}$

apontaram 100 % de saturação na parte superior/inferior e 26,0 % na zona intermédia do modelo que indica que o fluxo de precipitação vindo de cima não atingiu a base no período simulado.

No caso dos dados tabelados e o nível freático à cota de 4,5 metros, existe uma discrepância dos valores das outras situações que são coincidentes entre elas. Isto deve-se à existência de uma distribuição de pressões na fronteira submersa do maciço. Mas esta hipótese causa caudais inferiores às outras. Se existe um erro em simular a precipitação como infiltração, este leva a caudais mais elevados quando maioritariamente houverem fronteiras infiltrantes acima do nível freático. Nestas condições, portanto, este erro pode ser assumido para simular a precipitação através da média sem a necessidade de conhecer todos os dados de hidrogramas de cheias.

Mais adiante será apresentado o procedimento adotado no programa para atribuir a condição de fronteira que simula a precipitação neste trabalho. Este procedimento não vem nos manuais e é diferente daquele adotado na lição tutorial 12. Mas antes explicam-se os motivos para o procedimento ser diferente.

Naquele tutorial foi atribuída a condição de fronteira *Head* com valor de 3 [m] à base do modelo e tem as condições de fronteira sobrepostas. Atribuir uma condição de fronteira é uma característica muito particular de um determinado tipo de problema e, como a precipitação ou a infiltração são condições de fronteiras aplicadas na parte superior do modelo, entende-se não fazer sentido físico ou matemático ter de prescrever carga hidráulica à base do modelo para poder simular condições de fronteira que ocorrem na extremidade oposta.

Entende-se também que os dados de vazão são muito pequenos naquele problema (não na natureza) com média de -0,04 [m/dia] aplicado num período de 15 dias e limites potenciais mínimo de -1,00 [m] e máximo 0,10 [m]. Pelo conjunto destes parâmetros associados, os resultados podem estar mais condicionados aos valores impostos intemporais que aos dados de precipitação. Se for verificado, em duas fases, com e sem precipitação o solo está quase totalmente saturado, a saturação mínima entorno de 80 %. O caudal máximo é de $26,18 \times 10^{-3}$ [m/dia] para as cargas impostas e $1,50 \times 10^{-3}$ [m/dia] para os dados de precipitação.

Desta forma, a seguir apresenta-se o referido procedimento para simular a precipitação:

- adicionar uma fase de cálculo em que seja permitido selecionar o cálculo de escoamento em regime transiente e atribuir o tempo total em que ocorre a precipitação.
- impedir o escoamento através de algumas fronteiras cartesianas do modelo.

- se o método adotado é a infiltração, a borda do modelo que representa a superfície do terreno onde as gotas de chuva incidiriam define-se por *Infiltration*. Inserir o valor médio $q_{digitado}$ e avançar para o item definição dos limites potenciais.
- se o método adotado é precipitação, a superfície física do terreno pode ser definida por *Seepage* e é necessário cumprir os próximos passos.
- definir a função de vazão no caminho *Model explorer/Attributes library*.
- ativar precipitação em *Model explorer/Model conditions*.
- definir os limites potenciais. O mínimo sugerido é zero e o máximo é a cota máxima do terreno. Adotar o limite máximo sugerido automaticamente pelo programa pode fazer o solo não saturar.
- no caso de infiltração já é possível calcular.
- definir a precipitação como dependente do tempo e atribuir a função de vazão que foi definida e pode-se calcular a fase.

5.2.5 Variação do nível freático em regime transiente

Quando se eleva a carga hidráulica através da infiltração é similar a subir a linha de água horizontalmente. Se a geometria tem taludes, é muito difícil posicionar o efeito da infiltração perpendicular à linha do talude. Mas se todos os pontos da linha de água são conhecidos para o momento final de uma simulação e para fazer o cálculo de regime transiente, poder comparar com os outros tipos de cálculos que simulam a subida no nível freático, será apresentado um procedimento a seguir.

A lição 13 do manual tutorial apresenta um procedimento aplicado ao problema de variação temporal do nível de água de uma albufeira. Tem por objetivo variar a posição temporal apenas de 1 segmento do nível freático inicial e tem por efeito reposicionar também os segmentos conectados àquele. A seguir é descrito o procedimento utilizado neste trabalho de uma forma similar e mais genérica que ocorre naquele problema.

- adicionar uma fase de cálculo em que seja permitido selecionar o cálculo de escoamento em regime transiente e atribuir o tempo total em que ocorre a variação do nível.
- reinicializar as variáveis incrementais se o interesse for avaliar a segurança da estrutura durante apenas o evento que se quer representar nesta fase.
- definir a posição inicial do nível freático através da sua geometria, geralmente adota-se a mesma da fase anterior. Mesmo assim, pode-se definir uma duplicada e nomeá-la diferente porque passa a ser dependente do tempo, por exemplo: *nivelinicialtemp*.
- pode ser necessário representar alguns segmentos na posição final porque o programa só permite um segmento depender do tempo e não pode estar inclinado.

- seleccionar e atribuir a classificação global para o nível freático inicial.
- definir a função de queda de potencial temporal.
- fazer o segmento do nível freático depender do tempo no caminho seleccionando em *Model explorer/waterlevels/User water levels/nivelinicialtemp/WaterSegment*.
- associar a função de queda definida. É possível prosseguir com os cálculos. O procedimento é confirmado se a zona em que o nível varia estiver sombreada.

5.2.6 Regime de escoamento no cálculo plástico

Foi explicado no capítulo 3 como o cálculo plástico é independente do cálculo de regime de escoamento. Porém, aquele é realizado em tensões efetivas abordado também no capítulo 4. Então a forma como os valores da pressão neutra são calculados pode alterar as deformações se, mudando a forma de cálculo, alterar as pressões. Mas em regime permanente (equação 3.8) que é a hipótese permitida, não ocorre arrasto de partículas por efeitos hidrodinâmicos. Incorporar este efeito nas deformações requer fazer cálculo unificado.

Se o programa funciona conforme a hipótese teórica levantada, trocar hidrostático por hidrodinâmico, não interfere nas deformações se a pressão neutra permanecer inalterada. Para verificar isto, tem de escolher uma estrutura com deformações plásticas conhecidas. Para este efeito o projeto das sapatas foi readaptado. As fases foram renomeadas indicando agora 4 hipóteses do cálculo de deformações. Duas delas são as mesmas que foram identificadas por hidrostático e as outras duas por permanente conforme o tipo de cálculo de poropressões. Foi adotado uma permeabilidade de 6×10^{-6} [m/s].

Os resultados dos assentamentos estão apresentados na tabela 5.4. Conclui-se que o cálculo de escoamento numa fase plástica altera as deformações de maneira indireta através do princípio das tensões efetivas. Há interesse em fazer este tipo de cálculo se for mesmo necessário obter valores de grandezas físicas associadas ao regime de fluxo. Dependendo do tipo de estrutura, também é válido modelar as situações mais ou menos críticas e estudar características do regime de escoamento nas deformações sem precisar recorrer ao cálculo acoplado que é de maior complexidade.

Tabela 5.4: Assentamentos para os 4 diferentes casos

Fase	lul [mm]
1.1 Rígida Hidrostático	50
1.2 Rígida Permanente	50
2.1 Flexível Hidrostático	50
2.2 Flexível Permanente	36

5.3 Os casos de pilhas modeladas

Além das pilhas existentes com geometria que pode ser bem determinada em campo, existem modelos para ensaios em centrífugadora que são muito úteis permitindo aferir parâmetros que depois podem ser usados para simular outras situações mais complexas. Assim, no sentido de preparar a realização de futuros ensaios previstos foram simulados os dois modelos hipotéticos.

No total foram modelados 3 casos de geometria: geometria real da pilha da Casa de Pedra, geometria de pilha em escada reduzida equivalente às dimensões para um modelo de centrífuga, este modelo em dimensões equivalentes as de uma pilha real.

Os materiais do primeiro caso são os realmente armazenados na pilha da mina da Casa de Pedra que foi apresentada dentro da geologia descrita na seção 5.1. Os ensaios de caracterização foram realizados em parceria com o Laboratório de Geotecnia da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e o Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Viçosa. Amaral (2021) [3] descreve os procedimentos experimentais, as discussões dos resultados e dos fenômenos físicos associados ao comportamento dos solos.

Nos outros dois casos os materiais são provenientes de uma mina aleatória inserida no Quadrilátero Ferrífero. Os ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório de Geotecnia da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Os três casos, seja pela geometria inicial ou pelos materiais diferentes na fase inicial do programa, originam um estado de repouso diferente. Portanto, como foi discutido nos testes prévios no tópico 5.2.1, é obrigatoriamente necessário que as simulações sejam feitas em projetos separados: em arquivos diferentes do *Plaxis*. Ainda assim, as simulações em que se pretende determinar apenas parâmetros de escoamento foram também modeladas em projetos únicos.

Todos os modelos de pilhas neste trabalho têm comportamento bem representado em estado plano de deformação 2D, considerando apenas a secção transversal mais crítica. Isto é vantajoso no processamento de dados porque utiliza menos capacidade computacional e realizam-se cálculos mais rapidamente que em casos 3D.

5.3.1 Modelo para a pilha da Casa de Pedra

A geometria tem o comprimento longitudinal de 750 [m] em sua base e 87 [m] no topo. A cota máxima é 68 [m] acima da interface com o solo de fundação. A primeira camada que está em contato com o terreno natural tem uma irregularidade na superfície que foi preservada a fim de avaliar se este fator seria um agravante. As banquetas dos taludes de alteamento têm uma inclinação média de 20 graus e a altura dos alteamentos é de 10 [m], enquanto que a distância da crista dos taludes da camada anterior ao pé do próximo talude a ser construído também é de 10 [m] [3].

Conforme o manual do programa, para evitar um sistema indeterminado quando se pretende calcular deformações, alguns pontos podem ter as condições de fronteira atribuídas ou valores de assentamentos de apoio conhecidos previamente atribuídos. Estes assentamentos podem ser nulos quando se restringem os graus de liberdade fixando-se apoios nos pontos limites do modelo. Neste

caso os limites podem estar suficientemente afastados da zona de carregamento para garantir que nos pontos apoiados os deslocamentos restringidos são realmente nulos.

Desta forma, o solo de fundação da pilha foi definido com dimensões ou limites extensos, de 1740 [m] na longitudinal e 100 [m] de profundidade. A secção da estrutura e da fundação foram inseridas no programa por um conjunto de pontos e linhas que limitam o contorno das geometrias, dos limites dos materiais e das camadas de pilhas. A figura 5.4 representa a geometria do cenário geotécnico modelado para a pilha da Casa de Pedra em sua última fase de alteamento simulada.

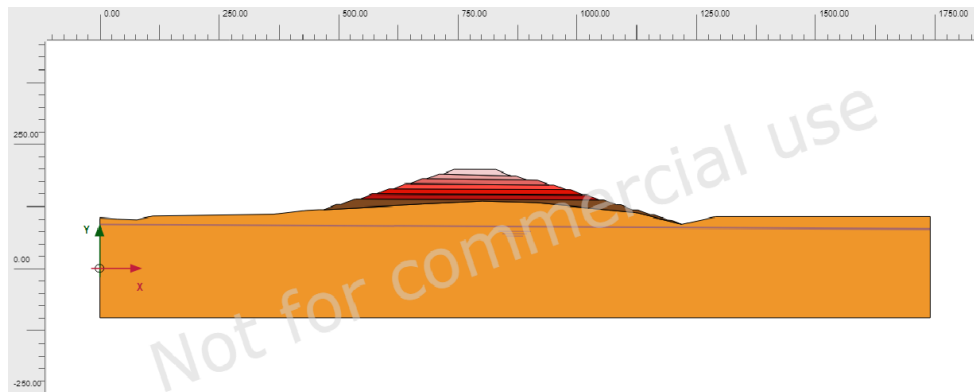


Figura 5.4: Geometria da pilha da Casa de Pedra

5.3.1.1 Materiais dos solos modelados

Segundo Amaral (2021) [3] o solo de fundação foi considerado homogêneo e, a partir de ensaios in situ foram determinados os parâmetros apresentados na tabela 5.5. No que diz respeito ao Módulo de Deformabilidade E' , o valor considerado pretende garantir um solo competente sem pontos de plastificação quando submetido ao carregamento das camadas de rejeitados. O nível freático está a 12 [m] de profundidade no maciço em repouso.

Tabela 5.5: Parâmetros mecânicos para o solo de fundação e as camadas de pilhas em profundidade. Adaptado de Amaral (2021) [3]

Camada	ϕ' [°]	E' [MPa]	$k_x=k_y$ [m/dia]	γ [kN/m ³]	ν	c' [kPa]	e_{init}
Fundação	30,0	1000	$4,82 \times 10^{-12}$	20,0	0,35	300	0,50
5 m	35,7	14	$4,06 \times 10^{-7}$	23,2	0,25		0,59
10 m	35,3	25	$4,06 \times 10^{-7}$	23,2	0,25		0,59
20 m	34,9	55	$4,06 \times 10^{-7}$	23,2	0,25		0,59
30 m	34,3	55	$4,06 \times 10^{-7}$	23,2	0,25		0,59
40 m	33,7	105	$4,06 \times 10^{-7}$	23,2	0,25		0,59
50 m	32,2	105	$4,06 \times 10^{-7}$	23,2	0,25		0,59
68 m	32,9	105	$4,06 \times 10^{-7}$	23,2	0,25		0,59

Amaral (2021) [3] também ressalta que as propriedades das camadas de rejeitados variam para cada camada ou fase de alteamento conforme a pilha é construída. Nesse trabalho apresentaram-se,

como estão na tabela 5.5, os valores dos parâmetros utilizados nas simulações com o comportamento drenado dos solos em função da fase de alteamento. O mesmo autor também justifica, em vez da coesão nula que é o resultado para o material, adotar um valor de 5 [kPa] em todas as camadas com o objetivo de evitar que ocorra a divergência dos cálculos.

5.3.1.2 O cálculo do estado de repouso nestas simulações

O manual do Plaxis recomenda gerar a estado de repouso sempre pelo procedimento K_0 . Mas pode ser recomendável adotar o procedimento *Gravity* se existem interfaces estratigráficas inclinadas e se a superfície freática for inclinada. Desde que isto faça as interfaces ou limites e/ou nível freático não serem paralelos à superfície do terreno. Justifica-se que pendentes elevadas podem causar a divergência do algoritmo implementado no programa.

Amaral (2021) [3] apresentou os resultados das modelagens da pilha da Casa de Pedra calculando a fase inicial pelo procedimento K_0 . Embora, neste caso fosse recomendável o procedimento *Gravity*, o procedimento padrão não acusou a divergência do algoritmo. Levando também em consideração as informações acerca do Estado de Repouso no capítulo precedente, para manter a compatibilidade com o que foi explicado, será mantido o procedimento K_0 também nestas simulações.

5.3.1.3 Dados de precipitação local

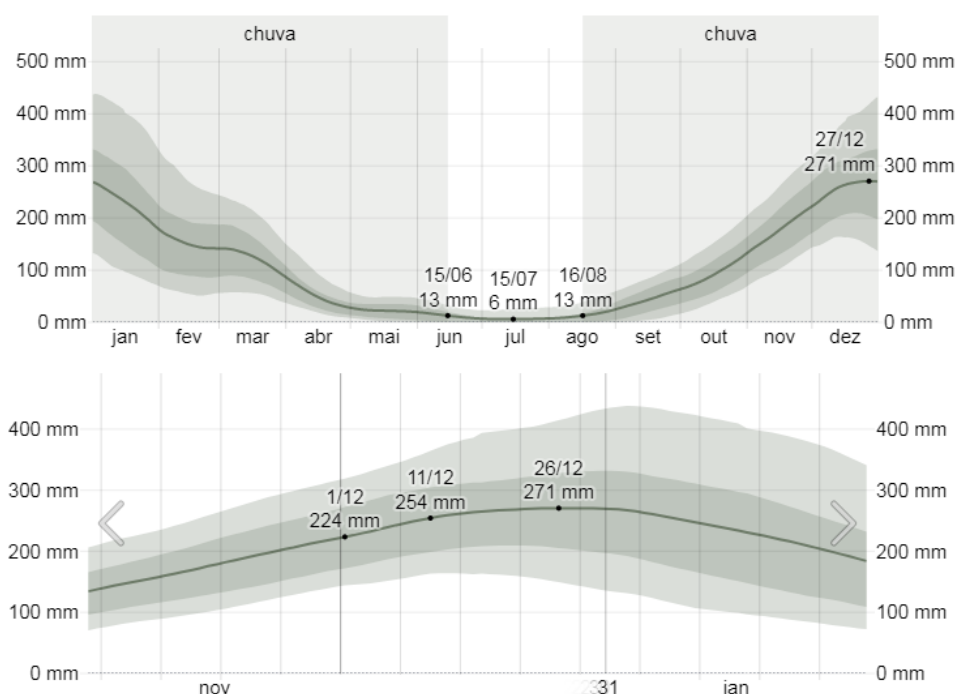


Figura 5.5: Distribuição do volume precipitado em Congonhas ao longo de 2021 e também para o mês de Dezembro. Fonte: WeatherSpark.com

Na figura 5.5 apresentou-se o gráfico de distribuição do volume precipitado em Congonhas em Minas Gerais ao longo de 2021 e também para o mês de Dezembro deste ano. Os dados correspondem ao volume da precipitação de chuva acumulada durante um período contínuo de 31 dias ao redor de cada dia do ano para o município.

Segundo a mesma fonte do gráfico, as condições meteorológicas características de Congonhas são calculadas com base numa análise estatística de relatórios horários históricos e reconstruções de modelo de 1 de janeiro de 1980 a 31 de Dezembro de 2016. O acesso é restrito no site aos dados históricos. Mas os gráficos são de acesso livre.

O período de seca em Congonhas dura dois meses, as chuvas ocorrem de 16 de agosto a 15 de junho, com precipitação mínima de 13 milímetros. O mês mais chuvoso em Congonhas é Dezembro em que a média diária é de 264 milímetros e este valor pode ser adotado para simular os dias de chuva no mês mais crítico como infiltração no *Plaxis* nos tipo de cálculos elaborados.

5.3.2 Modelo para centrífuga em escala reduzida

A geometria deste modelo tem altura máxima de 30 [cm] e altura mínima de 8 [cm]. O patamar superior esquerdo tem 15 [cm] e o patamar direito tem 5 [cm]. A base do modelo tem 80 [cm]. A figura 5.6 representa a geometria do cenário hidrodinâmico modelado para esta pilha.

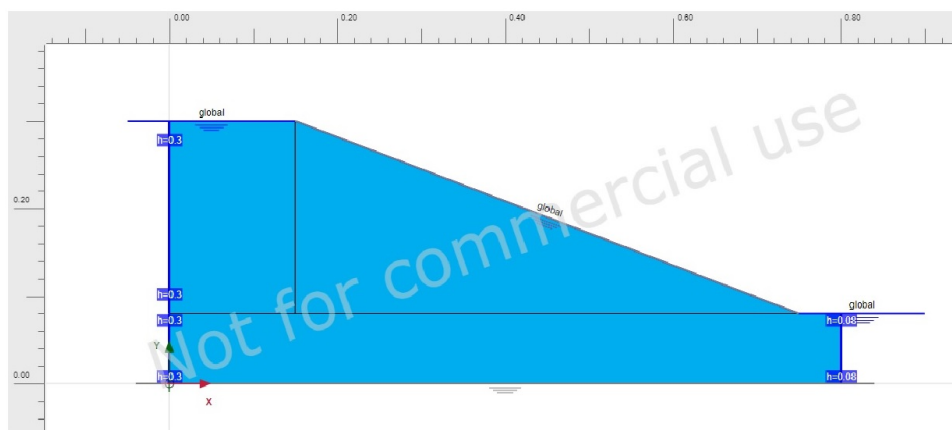


Figura 5.6: Geometria da pilha em escala reduzida

Este modelo de pilha tem material único e homogêneo. Neste caso é adotado o modelo linear elástico e comportamento drenado. O peso volúmico saturado e o peso volúmico seco têm valor de 20 [kN/m³]. No entanto, como foi demonstrado no capítulo 3, pode-se trocar o modelo elástico para Mohr-Coulomb ou outros que não alteram os resultados de cálculo apenas de fluxo. Os cálculos apenas de regime de escoamento levam em consideração os parâmetros que estão na aba *Groundwater*, mas o único parâmetro inserido foi a condutividade hidráulica isotrópica com valor de 6×10^{-6} [m/s].

A malha de elementos finitos foi gerada com os parâmetros pré-definidos pelo programa. O modelo, como representado na figura 5.6, é constituído por subdomínios que poderiam indicar

faseamento construtivo. Mas estas divisões não foram levadas em consideração nos cálculos de escoamento realizados. O subdomínio retangular inferior foi inserido na aba de solos e os demais na aba de estruturas. Porém durante a fase inicial todos eles foram ativados. Na sequência, foram adicionadas fases e nelas realizadas as mesmas verificações que estão explicadas na parte de teste deste capítulo no tópico 5.2.3 com conclusões idênticas e pelo que não serão discutidas.

5.3.3 Modelo para centrífuga em escala real

A geometria deste modelo tem altura máxima de 35,0 [m] e altura mínima de 8,0 [m]. O patamar superior esquerdo tem 17,5 [m] e o patamar direito tem 12,0 [m]. A base do modelo tem 87,0 [m]. A figura 5.7 representa a geometria do cenário de deformação modelado para esta pilha.

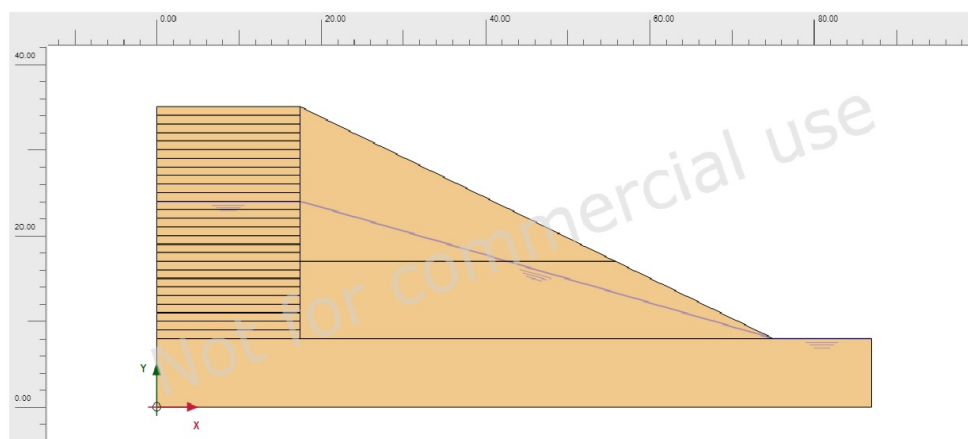


Figura 5.7: Geometria da pilha em escala real

Este modelo de pilha tem material único e homogêneo. Neste caso é adotado o modelo de Mohr-Coulomb e comportamento drenado. O peso volúmico saturado e o peso volúmico seco têm valores de 20,0 [kN/m³]. Os parâmetros de rigidez elástica são o módulo de deformabilidade E' com valor de $40,0 \times 10^3$ [kN/m²] e coeficiente de Poisson 0,3. Os parâmetros de resistência são o ângulo de resistência ao corte ϕ' 33,0 [°], a coesão c' 1,0 [kN/m²] e o ângulo de dilatância ψ 10,0 [°] e os outros parâmetros são os valores sugeridos automaticamente pelo programa. Na aba *Groundwater*, o único parâmetro inserido foi a condutividade hidráulica isotrópica com valor de 6×10^{-6} [m/s].

A malha de elementos finitos foi gerada com os parâmetros pré-definidos pelo programa. O modelo, como representado na figura 5.7, é constituído por subdomínios que poderiam indicar faseamento construtivo. Mas apenas as divisões mais largas, que seccionam a geometria ao longo de todo o comprimento longitudinal, constituem o faseamento construtivo. O subdomínio retangular inferior foi inserido na aba solos e os demais na aba de estruturas. Durante o Estado de Repouso, apenas este domínio inferior é representado.

5.4 Avaliação da estabilidade e do regime de escoamento

A partir de todos os modelos apresentados na seção anterior, em função do tipo de cálculo do capítulo 3, obtiveram-se valores aproximados numericamente para grandezas físicas associadas à pressão neutra ou relacionados com as deformações das estruturas modeladas. Também procedeu-se ao cálculo do coeficiente de segurança.

A seguir detalham-se os tipos de cálculos mais importantes efetuados e a configurações das fases. Discutem-se também algumas dificuldades encontradas durante as modelações. A comparação dos valores obtidos. Conclusões acerca da estabilidade das estruturas modeladas.

Os resultados estão apresentados segundo a ordem de complexidade dos cálculos e diferente daquela apresentada anteriormente porque entende-se que a modelagem da estrutura real depende de observações feitas nos modelos mais simples.

5.4.1 Modelos e resultados: centrífuga em escala reduzida

Foi explicado no capítulo 3 que além dos parâmetros na aba *Groundwater*, as condições de fronteira são bastante determinantes para definir o regime de escoamento. Nestas simulações é avaliado o valor do caudal em regime permanente com imposição da carga hidráulica, a variação do nível freático instantaneamente sob condição de fronteira livre para percolação, variação do nível freático com o tempo. Além de levar em consideração as demais condições de fronteira estudadas no capítulo precedente.

A fase inicial *EMERSO* têm o nível freático na cota zero, as fronteiras esquerda e inferior do modelo tem caudal imposto nulo, as outras X_{max} e Y_{max} foram definidas como abertas. As demais fronteiras tem percolação livre. Depois, a cada objetivo descrito, está associada uma fase de cálculo de escoamento.

A partir desta fase, foram adicionadas outras três fases de cálculo de escoamento. As duas primeiras destas diferenciam-se da fase inicial pela alteração das condições de fronteira que atribuem valores à carga hidráulica nas fronteiras verticais de montante e jusante. Estes valores de 0,30 [m] e 0,08 [m] estão também indicados na figura 5.6 e na figura 5.8. Na segunda fase *14LECCwH* o nível freático global é mantido na cota nula. Enquanto na terceira *COMBO1421* o maciço é todo saturado. Portanto, a figura 5.6 representava a configuração do modelo nesta última simulação. Sobre o contorno do talude na figura 5.6 há níveis freáticos sobrepostos, por isto parece estar desativado, mas mesmo assim o programa adota o segmento definido como global.

A terceira e última fase adicionada *COMBO1421TEMP* tem a mesma configuração da fase anterior a esta. Mas obedece ao procedimento do tópico 5.2.5, tem por efeito o nível freático assumir a mesma posição da figura 5.6 no período de 5 segundos em incrementos de carga hidráulica lineares. A figura 5.8 representa esta estrutura antes de iniciar a contagem de tempo e a área sombreada indica a variação que ocorre nos 5 segundos. Constitui somente um exemplo de como aplicar a subida no nível freático em regime transiente para este tipo de estrutura. Como foi descrito no procedimento adotado, o programa somente permite fazer um único segmento do nível

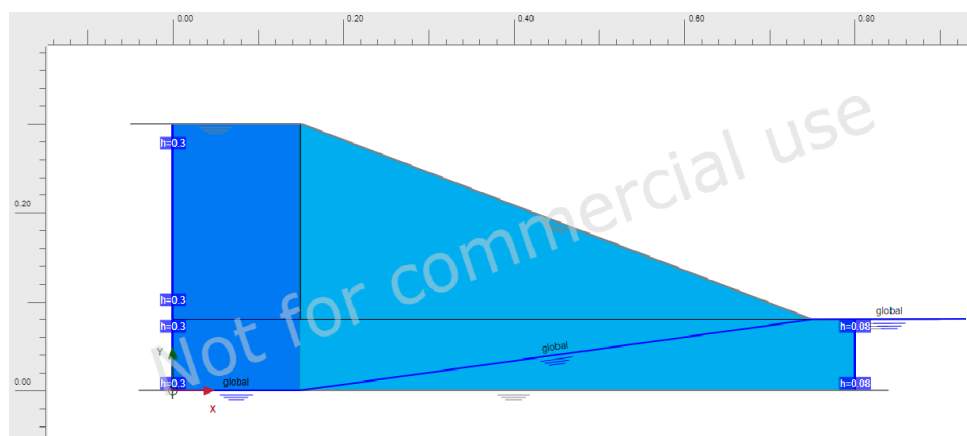


Figura 5.8: Geometria da pilha em escala reduzida em regime transiente

freático variar com o tempo, se o nível freático inicial estivesse posicionado horizontalmente não seria possível obter a posição final pretendida.

A tabela 5.6 tem a relação de fases e valores de saturação, caudais unitários e Caudal na secção direita do modelo. As duas primeiras fases têm valores iguais. Quando se passa ao cálculo transiente, o valor é praticamente o mesmo e provavelmente seria também, se fosse possível posicionar o nível freático horizontalmente para simular a mesma situação.

Suspeita-se que a imposição de carga hidráulica seja predominante neste caso. Para investigar esta hipótese, as cargas impostas nas fronteiras dos modelos foram desativadas e têm os novos valores devido apenas ao nível freático apresentados nas últimas duas linhas da tabela 5.6.

Os valores confirmam a hipótese e evidenciam melhor que TEMP em regime transiente é muito mais crítico que em regime permanente 21CCwNF. Nas duas situações atinge-se o mesmo grau de saturação. Pelo que pode ser vantajoso fazer cálculo transiente nas modelagens das outras estruturas para impor condições mais desfavoráveis às pilhas e poder avaliar a segurança em situações limites.

Tabela 5.6: Resultados nas diferentes fases descritas - escala reduzida

Fase	H	NF	S_{min} [%]	q_{max} [m/s]	q_{min} [m/s]	Q [m ³ /s]
EMERSON	-	-	81,67	$0,02 \times 10^{-18}$	$0,02 \times 10^{-18}$	-
14LECCwH	x	-	98,86	$3,84 \times 10^{-6}$	$6,35 \times 10^{-9}$	$56,9 \times 10^{-9}$
COMBO1421	x	x	98,86	$3,84 \times 10^{-6}$	$6,35 \times 10^{-9}$	$56,9 \times 10^{-9}$
COMBO1421TEMP	x	x	98,86	$3,85 \times 10^{-6}$	$92,38 \times 10^{-9}$	$57,6 \times 10^{-9}$
21CCwNF	-	x	86,17	$1,18 \times 10^{-12}$	-	-
TEMP	-	x	86,17	$25,20 \times 10^{-9}$	-	-

5.4.2 Modelos e resultados: centrífuga em escala real

Nesta seção é cumprido o propósito de avaliar exclusivamente a estabilidade desta estrutura. Estão incorporados todos os conceitos estudados na seção 5.2. É também levado em consideração o estudo desenvolvido para a pilha em escala reduzida. Assim foram simuladas situações de deformações bastante críticas em função destes estudos prévios.

A partir do Estado de Repouso foram adicionadas duas fases de etapas de faseamento construtivo com deformações plástica e hidrostática. Depois há duas formas de avaliar a estabilidade: pelo cálculo automático do coeficiente de segurança e pelo cálculo de deformações até a situação limite. No segundo caso o programa interrompe os cálculos e indica o cenário ou fase de colapso.

A partir de então, as duas hipóteses têm uma fase para submergir o solo de fundação. O nível freático é redefinido dentro da aba *FlowConditions* horizontalmente na cota 8 [m]. A segunda hipótese tem o nível freático reposicionado da mesma forma, alteração para regime permanente e imposição da condição de fronteira *Head* com valor prescrito igual ao da cota na fronteira esquerda e direita do modelo. Definição de superfície impermeável na fronteira inferior do modelo e percolação livre nas superiores.

Depois, ambos os casos seguem procedimentos equivalentes em incrementos de 1 metro. No primeiro caso, o incremento é aplicado reposicionando o segmento horizontal de montante do nível freático sobre a fronteira horizontal do subdomínio incremental (ver figura 5.7). Isto ocorre até que o fator de segurança seja unitário. No segundo caso o incremento é aplicado ao valor da carga hidráulica de montante atribuída ao segmento esquerdo do subdomínio incremental, tem também atualizados os valores atribuídos às fronteiras de menor cota nas fases anteriores. Isto ocorre até que se verifique nós plastificados.

Na primeira hipótese foram também adicionadas fases de cálculo de segurança para cada fase de subida do nível freático porque, como estudado no capítulo 4 pela trajetória de tensões, é preciso garantir a estabilidade durante momentos em que se aumenta a pressão da água nos poros instantaneamente. Situações em que é provável a ocorrência de pontos plastificados.

Em aterros, barragens de aterros, pilhas que já foi completado o faseamento construtivo e pretende-se avaliar as deformações como consequência da variação do nível freático é útil e, às vezes, necessário previamente saber os pontos de maior relevância para o cálculo de deslocamento. A interpretação dos tutoriais do programa permite perceber que podem existir 2 nós de deslocamento máximo que são os extremos do segmento de talude. Por isto, foi escolhido o *Node:11415* na parte superior, nomeado de ponto A e de coordenadas A (17,5; 35,0). Depois é possível verificar se o nó escolhido é também aquele que experimenta maior deslocamento. Isto pode ser feito pelo gráfico em escala de cores de deslocamentos da segunda hipótese de cálculo.

Para o estudo realizado em primeira hipótese, foi gerado automaticamente o gráfico do fator de segurança apresentado na figura 5.9. Este para aquele nó escolhido em função das diferentes fases indicadas na legenda. Os pontos a verde no gráfico são da segunda fase de alteamento. Os pontos amarelos são de outras hipóteses, uma delas em que se submergia o solo de fundação em

condições hidrodinâmicas. Mas de qualquer forma, não foram levadas adiante e o mais importante no gráfico apresentado é o comportamento dos pontos em vermelho.

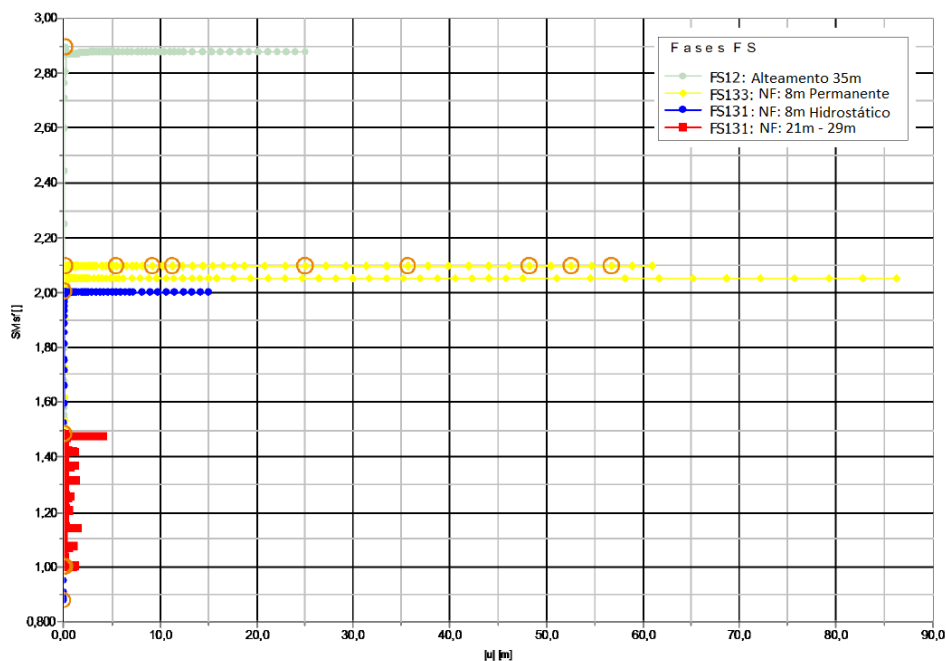


Figura 5.9: Coeficiente de segurança em função do deslocamento total para o nó 11415 ou ponto cartesiano A (17,5; 35,0) do gráfico abaixo

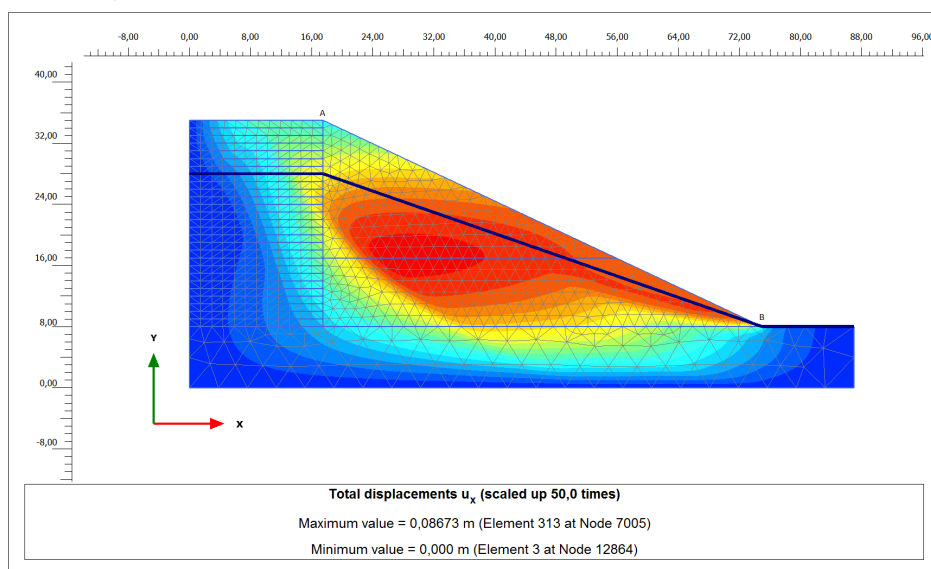


Figura 5.10: Modelo com superfície de rotura global

Os pontos em azul são da fase inicial e as fases subsequentes não mudavam muito até chegar nos primeiros pontos em vermelho com nível freático em 21 [m]. A partir destes, o deslocamento

total começou a diminuir e os dados indicam que a estrutura é segura até o momento em que o nível freático é elevado a 29 [m] quando os valores das ordenadas são unitários.

Em segunda hipótese a fase em que ocorrem plastificações de pontos é com a carga hidráulica atribuída de 26 [m]. Na sequência verificou-se que os pontos de deslocamentos máximos ocorreriam um pouco mais à esquerda do nó escolhido para o gráfico do fator de segurança, mas não altera as discussões. Na figura 5.10 tem o modelo com a representação da superfície de rotura global para a estrutura.

Até então, em segunda hipótese (*Head*), foi feito cálculo plástico permanente. Na expectativa de verificar o comportamento estrutural sob efeito de todos os fenômenos possíveis de serem modelados, procedeu-se ao cálculo acoplado. De maneira a impor condição de fronteira mais ou menos equivalente, dividiu-se o incremento de potencial de 1000 [mm] pelos 264 [mm] do tópico 5.3.1.3 e adotou-se o tempo igual de 4 dias nestas fases. Com 29 [m] o programa ainda não aponta nós plastificados que significa que a consolidação com o solo em comportamento drenado incrementa a segurança, conforme demonstrado na trajetória de tensões do capítulo precedente. Nem sempre cálculos mais precisos têm resultados menos favoráveis, mas demoram muito mais tempo de processamento.

Ficou demonstrado que o regime de escoamento com imposição de condição de contorno foi mais crítico que o equivalente em cálculo do coeficiente de segurança para o caso modelado. É seguro adotar a altura limite segura 26 [m] e cumpre as duas outras análises de estabilidade.

5.4.3 Modelos e resultados: Casa de Pedra

Amaral (2021) [3] apresentou e discutiu uma série de resultados de modelos numéricos para este problema. Estas discussões têm também relação com os fenômenos em escala granulométrica. Para este objetivo, recomenda-se a consulta daquele trabalho.

Nesta seção é cumprido o propósito de avaliar exclusivamente a estabilidade desta estrutura. Estão incorporados todos os conceitos estudados até ao momento. Assim foram simuladas situações de deformações bastante críticas em função destes estudos prévios.

Estas análises de estabilidade são efetuadas pela determinação do fator de segurança, pretende-se modelar o cenário de colapso em duas hipóteses. Cálculo plástico e hidrostático, cálculo acoplado com efeito de precipitação.

Cálculo plástico e hidrostático

Avaliando os resultados de deslocamentos apresentados por Amaral (2021) [3], selecionaram-se os nós localizados próximos à fronteira esquerda de cada camada e apresentados na figura 5.11. Depois os deslocamentos incrementais foram reinicializados. Por enquanto, não houve outras configurações. Procedeu-se desta forma ao cálculo do coeficiente de segurança para as diferentes etapas de faseamento construtivo das camadas de pilhas.

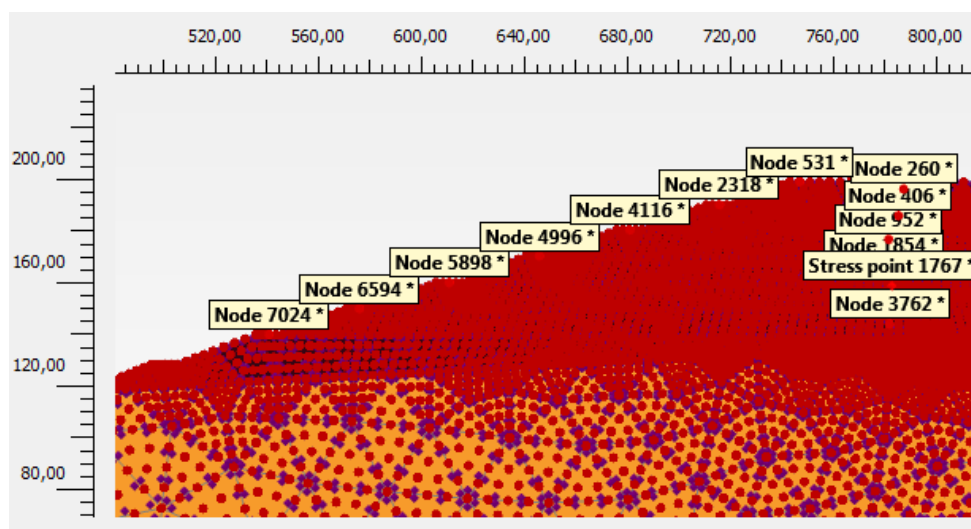


Figura 5.11: Nódulos escolhidos para o cálculo do coeficiente de segurança em cada fase de alteamento

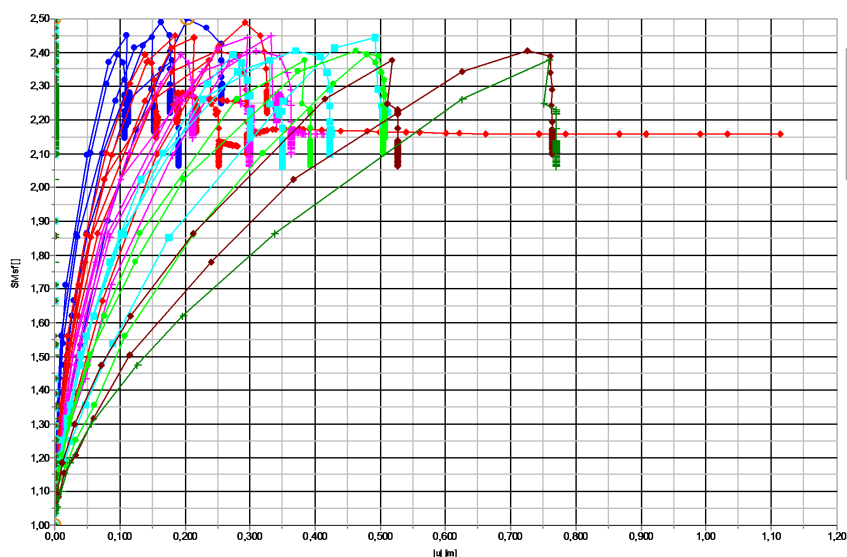


Figura 5.12: Fator de segurança para os diferentes nós escolhidos

Foi gerado automaticamente o gráfico do fator de segurança da figura 5.12. Para os nós selecionados em função das diferentes fases. Na sequência, as fases construtivas tiveram os deslocamentos reinicializados, assim como para o cálculo do fator de segurança e verificou-se o máximo deslocamento de 36 [mm] que ocorre durante a fase que eleva a pilha em 30 [m]. Não foi possível associar este valor com o gráfico apresentado. Mas em Amaral (2021) [3] é possível identificar a última fase de alteamento como a menos segura. Portanto, nem sempre o máximo deslocamento corresponde à fase com o menor fator de segurança.

A análise do gráfico permite adotar o valor de 2,0 para o fator de segurança. Conforme Amaral (2021) [3], valores acima de 1,5 demonstram o comportamento estável da estrutura. Este tipo de

cálculo mostrou-se praticamente igual ao apresentado pelo mesmo autor com valor mínimo de 2,1. Mesmo assim Amaral (2021) [3] ainda apresenta outro tipo de análise em função dos níveis de tensão em relação à rotura. Todavia, para o propósito deste trabalho e pelo cenário de erro descrito nele, o valor 2,0 é suficiente e sem a necessidade de avançar em outras análises.

Cálculo acoplado com efeito de precipitação

Pretende-se simular a precipitação para a pilha no final da fase de alteamento. Gera-se um novo problema em que o estado de repouso corresponde à estrutura final da modelagem anterior. É o mesmo modelo representado na figura 5.4.

Simular bem a realidade de distribuição de chuvas durante um período requereria intercalar fases com infiltração nulas nos dias sem precipitação. Mas, a princípio, o tempo de processamento é muito elevado e foi escolhido representar os 5 dias críticos de Dezembro. A partir do estado de repouso executou-se o procedimento indicado na seção 5.2.4 para infiltração. O valor do caudal atribuído é 0,264 [m/dia]. Este valor foi estimado diretamente a partir da precipitação, poderia ser melhor representativo se fosse convertido em vazão pelo método racional, por exemplo.

Os deslocamentos foram muito elevados, uma vez que foi prescrito um valor também bastante alto e durante 5 dias ininterruptamente. Recorrendo ao mesmo processo de tornar os problemas elementares, optou-se na sequência por uma via ponderada que é prosseguir com a análise para o dia médio do mês de Dezembro. A segurança nodal não é garantida. Em termos de deformação ocorre máximo deslocamento de 16 [mm].

Uma chuva forte causa erosão superficial dos solos. O valor de 16 [mm] para quantificar as deformações com efeito totalmente acoplado é naturalmente justificável. Não foi possível criar o efeito de alagamento no programa e avaliar a segurança global da estrutura em várias fases de cálculo para este fenómeno.

Constatou-se que, pelo menos, neste tipo de problema o programa pode ainda estar longe de representar a realidade. Por isto também as estruturas deste tipo experimentam monitoramento através de outros métodos, assim como os geofísicos e geodésicos que possibilitam obter informações das condições dos materiais em subsuperfície e de deslocamentos em tempo real [73]. Paralelamente as estruturas também são objetivo de reparos contínuos como o preenchimento de ravinas e voçorocas com o plantio de vegetação para combater o desenvolvimento da erosão superficial com efeito favorável na estabilidade dos pontos mais rasos e isto não pode ser modelado.

5.5 Conclusões

Neste capítulo foram aplicados os conceitos estudados nos capítulos precedentes. Foi demonstrado uma sucessão de modelagens que dependem uma das outras, independentemente da aplicação que se deu às modelagens prévias. As tarefas também são sugestivas. Para as quais associaram-se os fenómenos-funcionamento modelados no programa. Foi demonstrado a eficiência de elaborar procedimentos nas tarefas mais elementares, esta ação também é um ato pedagógico

para o entendimento de quaisquer programas e mesmo que seja mantida a nomeação aplicada, a exemplo do que foi feito com a precipitação.

Ficou um pouco melhor demonstrada a relevância do capítulo 3. Comprovou-se também a conclusão do capítulo 2 que as pilhas podem ser uma aposta segura. Foi demonstrado que estas estruturas podem suportar bem algumas situações limites da subida do nível freático que é uma fragilidade das barragens de rejeitos. Os resultados em cada hipótese serão apresentados nas conclusões do trabalho.

O cálculo plástico em regime transiente que não arrasta partículas finas por consolidação, mas causa deformações pelo princípio das tensões efetivas, saturação e alterações na poro-pressão é uma aposta eficiente na representação dos fenômenos hidrodinâmicos que incidem na superfície do terreno.

Mais importante que executar o passo a passo das modelagens, é perceber a ideia de como desmonta-se e monta-se as modelagens a partir das anteriores. Isto porque tem uma infinidade de hipóteses possíveis que podem ser feitas de maneira mais ou menos similares.

Este capítulo possibilitou classificar três formas de trabalhar com um programa em escala de domínio da tecnologia: utilizar o programa, aprender a utilizar o programa, desenvolver código para utilizar-se no programa.

Capítulo 6

Conclusões e trabalho futuro

O trabalho consistiu em assumir hipóteses, investigá-las quando necessário, eleger e distinguir referenciais; executar o mesmo processo para diferentes modelos: dividir o problema em partes cada vez menores até atingir a menor unidade de compreensão; e remontar o problema de maneira bem organizada. Neste caso foi requerida muita abstração, foi executada a tarefa de avaliação da estabilidade de pilhas de rejeitados mineiros sob diferentes condições de fluxo em modelos numéricos.

Do capítulo 2, salienta-se que até atualmente os acidentes com barragens não tinham correlação com a incorporação de tecnologias na Mineração da forma que foi avaliada neste trabalho. Recentemente os estudos estão preocupados em entender mais tecnicamente as pilhas e não somente por uma avaliação empírica. Contudo, ainda muito pouco se estudou as estruturas, mas já é entendido que a substituição das barragens por pilhas pode ser uma boa opção construtiva. Para verificar esta opção devem eleger-se casos reais e executar tarefas similares às demonstradas no capítulo 5.

Do capítulo 3, ressalta-se que a maioria dos trabalhos acerca de métodos numéricos colocam o foco no método, omitem a divisão dos conceitos e muitos partem de uma formulação integral (áreas ou volumes). Isto dificulta o entendimento de como os métodos numéricos atuam dentro dos programas para resolver os problemas. Porque também quando se chega nos resultados de problemas reais através de um programa comercial pretende-se ter uma interpretação física dos resultados o mais próximo dos fenômenos naturais. Aquela divisão foi bem distinguida neste trabalho a partir das partículas do rejeito (pontos de áreas ou volumes).

6.1 Resultados

No capítulo 5, dá-se importância à metodologia adotada na estruturação das modelagens, levanta-se uma hipótese, investiga-se para comprová-la, discutem-se os resultados e conclui-se se é válida para a hipótese inicial. Depois a mesma hipótese pode ser aplicada, comprovada noutros casos ou reprovada. Este método originou maioritariamente resultados em que a comparação

dos valores é relevante e a discussão foi apresentada naquele capítulo. Já por efeito da combinação daquilo que foi estudado, os três modelos objetivos deste trabalho apresentam resultados com significado físico mais relevantes que são apresentados a seguir na tabela 6.1.

Tabela 6.1: Resultados numéricos relevantes

Caso	NF _{max} [-]	Q [m ³ /dia]	u[mm]	FS
Escala Reduzida	30/30	$56,7 \times 10^{-9}$	-	-
Escala Real	26/35	$1789,0 \times 10^{-9}$	87	2,0
Casa de Pedra		-	16	2,0

Neste trabalho procurou-se perceber como é que no programa *Plaxis2D* se podia simular diferentes condições de fluxo para compreender o comportamento de uma pilha de rejeitados mineiros quando sujeita a forte chuva e/ou deficiência do sistema de drenagem. Para esse efeito começou-se por analisar um modelo físico de metade de uma pilha. Neste modelo de escala reduzida foi induzido um regime permanente de água da zona mais alta para a zona mais baixa, obtendo-se um caudal de $56,7 \times 10^{-9}$ [m³/dia].

O modelo hipotético com as dimensões em metros foi analisado em termos de estabilidade, nomeadamente através do coeficiente de segurança. Verificou-se que, quando o gradiente aumenta o fator de segurança diminui aproximando-se da unidade. Finalmente, foi ainda estudada a pilha da mina Casa da Pedra começando-se por fazer um cálculo plástico e hidrostático com o modelo de Mohr Coulomb drenado para reproduzir resultados obtidos por Amaral (2021) [3]. De seguida, fez-se um cálculo acoplado de fluxo e deformação para analisar o efeito da precipitação na estabilidade da pilha, simulando-se um valor de 264 [mm/dia] de infiltração. Para essas condições verificou-se um deslocamento máximo de 16 milímetros.

Uma das maiores conclusões deste estudo foi:

Tudo o que se faz em pequena escala é replicável em grande escala e pode ser representativo de todo um conjunto de elementos, se e somente se, for mantida a compatibilidade comportamental perante o mesmo tipo de estímulo ou solicitações externas.

Todo este trabalho permitiu-me concluir que foi desempenhado um esforço de demonstração de características de formação de um estudante de Engenharia Civil, em particular de Estruturas e Geotecnia, esperando ter demonstrado como abordar problemas técnicos de engenharia. Aplicando para isto, os conhecimentos específicos necessários, outros adquiridos durante toda a minha formação ao longo da vida, acabando por aplicar a maneira como organizo o conhecimento orientado.

6.2 Trabalhos futuros

Numa perspetiva futura de investigação, salienta-se a importância de analisar o comportamento das pilhas com outros modelos constitutivos mais avançados, como por exemplo o Norsand, desde que o material seja o mesmo entre os modelos comparados. Uma vez que neste trabalho só houve oportunidade de utilizar o modelo Mohr-Coulomb.

Outra proposta de investigação poderá ser a segmentação de conceitos para formas mais elementares, com o objetivo de esclarecer mais os parâmetros envolvidos nos cálculos. E depois reconectá-los com um entendimento detalhado dos fenômenos da natureza.

Para o modelo da centrifugadora, seria interessante perceber qual a inclinação do talude necessária para que a pilha entre em rotura quando o nível freático de montante atinge metade da altura da pilha.

Por fim, um estudo paramétrico sobre o efeito dos vários parâmetros de resistência na estabilidade da pilha poderia demonstrar quais os parâmetros em que é necessário ter mais confiança durante a caracterização do material.

Do ponto de vista pedagógico, seria benéfico criar-se um construtor automático de tutoriais, listando as hipóteses conhecidas encadeadas por listas de seleção. Com essa possibilidade, seria ainda obrigatório executar os procedimentos manualmente no programa. Mas numa perspetiva mais elaborada e de desenvolvimento tecnológico, o *Plaxis* também permite automatizar algumas tarefas. Mais ambicioso seria automatizar este construtor de tutorial reformulando o programa e tornando-o mais didático e facilmente acessível para um maior número de pessoas.

Referências

- [1] V Absolon e D Nieuwkerk. Innovative use of screw press filtration in tailings dewatering plant design. Em *Proceedings 12th AusIMM Mill Operators' Conference*, páginas 449–456, 2014.
- [2] Pedro Ivo Amaro Alves. Empilhamento de rejeitado filtrado: A expansão de uma alternativa para substituição de barragens. Available at <https://bit.ly/3sEmuer>, Accessed last time in May 2021, 2020.
- [3] José Carlos Mendes Amaral. Análise da estabilidade de um grande empilhamento de rejeitos de ferro: simulações numéricas em tensão-deformação considerando a evolução de estado, 2021.
- [4] Whitney Leia Angelino Calderón. Reducción de parámetros de resistencia al corte para la evaluación de estabilidad de talud de una presa de relave. *N/A*, 2020.
- [5] Muhammad Auchar, Hans Mattsson, e Sven Knutsson. Numerical modelling for stability of tailings dams. Em *Grundläggningdagen 2013: 07/03/2013*, 2013.
- [6] Ana Paula de Bacco. Caracterização física, química, mineralógica e mecânica de um rejeito de mineração, 2020.
- [7] Jean-Pierre Bardet e Tetsuo Tobita. A practical method for solving free-surface seepage problems. *Computers and Geotechnics*, 29(6):451–475, 2002.
- [8] Lorena N Beltrán-Rodríguez, Joan M Larrahondo, e Diego Cobos. Emerging technologies for tailings disposal: opportunities for colombian practice. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 1(44):5–20, 2018.
- [9] Riaz Bhanbhro. *Mechanical Properties of Tailings: Basic Description of a Tailings Material from Sweden*. Tese de doutoramento, Luleå tekniska universitet, 2014.
- [10] Maurice A Biot. General theory of three-dimensional consolidation. *Journal of applied physics*, 12(2):155–164, 1941.
- [11] Luiz Augusto Bizzi, Carlos SCHOBENHAUS, João Henrique GONÇALVES, Franciscus Jacobus BAARS, Inácio de Medeiros DELGADO, Maísa Bastos ABRAM, Reginaldo LEÃO NETO, Gerson Manoel Muniz de MATOS, e João Orestes Schneider SANTOS. *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: texto, mapas e SIG*. CPRM, 2003.
- [12] Special Waste Branch. Design and evaluation of tailings dams. *Report*, 1994.
- [13] Kate Butler. The 1960s–1970s mining boom in australia: A missed opportunity for socio-economic gain. *ANU Undergraduate Research Journal*, 11(1):65–77, 2021.

- [14] Renata Brazzarella Capelli. Comparação de métodos na análise granulométrica de rejeitos de mineração. *N/A*, 2017.
- [15] Ottavio Raul Domenico Riberti Carmignano et al. Inovação no setor de mineração de ferro em minas gerais com foco na destinação de rejeitos. Available at <http://hdl.handle.net/1843/38069>, Accessed last time in Nov 2021, 2021.
- [16] B de M CASTILHO. Análise dos gatilhos de liquefação dinâmica e modelagem numérica da barragem do germano. 2017. 116p, 2017.
- [17] Ray W Clough. The finite element method in plane stress analysis. Em *Proceedings of 2nd ASCE Conference on Electronic Computation, Pittsburgh Pa., Sept. 8 and 9, 1960*, 1960.
- [18] RE Collins. *Flow of fluids through porous materials*. Reinhold Publishing Co., 1961.
- [19] Robert D Cook et al. *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. John wiley & sons, Fourth edição, 2002.
- [20] RO EMONT COPPER. Rosemont copper company filtered tailings dry stacks current state of practice. Em *Rosemont Copper Company Filtered Tailings Dry Stacks Current State of Practice Final Report*, 2008.
- [21] R. Courant. Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations. Em *[N/A]*, 1943.
- [22] Rui Francisco PML Cruz e Paulo da Venda Oliveira. *Implementação do fenômeno de consolidação num programa de elementos finitos 3D*. Tese de doutoramento, Edição do autor, 2008.
- [23] Michael Davies, John Lupo, Todd Martin, Ed Mcroberts, Marcelo Musse, e David Ritchie. Dewatered tailings practice - trends and observations. *Tailings and Mine Waste'10 - Proceedings of the 14th International Conference on Tailings and Mine Waste*, páginas 133–142, 01 2011.
- [24] MP Davies, John Lupo, Todd Martin, Ed McRoberts, Marcelo Musse, e David Ritchie. Dewatered tailings practice—trends and observations. Em *proceedings of Tailings and Mine Waste*, volume 10, 2010.
- [25] Ana Flora P de Castro Humes, Inês S Homem de Melo, Luzia Kazuko Yoshida, e Wagner Tunis Martins. *Noções de cálculo numérico*. *N/A*, 1984.
- [26] LUIZ ROBERTO UNGARETTI DE GODOY et al. Portaria nº 1, de 1 de março de 2018. *Diário Oficial da União, Seção 1, p. 42-43*, 2018.
- [27] Matheus de Oliveira Reis, Ana Carolina Mayrinck Braga de Moura, Guilherme Eduardo Macedo Cota, e Antônio Pereira Magalhães Junior. Panorama dos rompimentos de barragens de rejeitos de minério no mundo. *N/A*, 2020.
- [28] Gouri Dhatt, Emmanuel Lefrançois, e Gilbert Touzot. *Finite element method*. John Wiley & Sons, 2012.
- [29] Gouri Dhatt, Gilbert Touzot, e Emmanuel Lefrançois. *Méthode des éléments finis*. Lavoisier, 2005.

- [30] Bernhard Dold. Submarine tailings disposal (std)—a review. *Minerals*, 4(3):642–666, 2014.
- [31] Danilo Manata Eloi. Ensaios triaxiais com procedimentos convencionais e avançados para avaliação de estados críticos em rejeitos de ferro, 2021.
- [32] Castro et al. *Quadrilátero Ferrífero: avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. 3ª Editora, 1ª edição, 2020.
- [33] Manuel de Matos Fernandes. *Mecânica dos solos*. Volume I, FEUP, Porto, 3ª edição, 2012.
- [34] Abraham Figueroa, David Solans, Christian Gonzalez, e José Campaña. Comportamiento sísmico de presas de relaves construídas aguas abajo y línea central. *Obras y proyectos*, N/A(21):30–37, 06 2017.
- [35] Vahid Galavi. Groundwater flow, fully coupled flow deformation and undrained analyses in plaxis 2d and 3d. *Plaxis Report*, 2016.
- [36] Maria Alice Cabral de Goes, Mario Valente Possa, e Adão Benvindo da Luz. Amostragem de minérios. *N/A*, 1991.
- [37] Fernanda Vescovi Gonçalves. Estudo das curvas de retenção e condutividade hidráulica estimadas pela equação de van genuchten (1980) para diferentes tipos de solos, 2012.
- [38] HL GUIDORIZZI. *Um curso de cálculo, vol. 3 e 4*. LTC Editora, Rio de Janeiro, RJ, 2002.
- [39] Nilton Caixeta Guimaraes. Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas, 2011.
- [40] Ashok Gupta e Dennis S Yan. *Mineral processing design and operations: an introduction*. Elsevier, 2016.
- [41] Liming Hu, Hui Wu, Lin Zhang, Pengwei Zhang, e Qingbo Wen. Geotechnical properties of mine tailings. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(2):04016220, 2017.
- [42] Daniel Jergling e Mikael Öberg. Stabilizing loose soil on a mountainous hillside: A solution to soil stability problems near roads, 2016.
- [43] N Klug, Rand Schwarz. Centrifuges: The alternative technology. Em H Quelopana, organizador, *Paste 2020: 23rd International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings*. Gecamin Publications, 2020.
- [44] Joseph F Labuz e Arno Zang. Mohr–coulomb failure criterion. Em *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014*, páginas 227–231. Springer, 2012.
- [45] Fabiana Lopes Lage, Kelly de Moura Gonçalves, Juni Silveira Cordeiro, e Maria Auxiliadora Lage. Utilização dos rejeitos de minério de ferro na construção civil: uma análise cienciométrica. *Research, Society and Development*, 9(4):e94942871–e94942871, 2020.
- [46] Lindolfo. Rejeitos mineradoras já trabalham com empilhamento seco. *Revista de minerais e minérios*, 11(1):256–262, 2019.
- [47] Daryl L Logan. *The Finite Element Method*. Cengage Learning, Third edição, 2017.

- [48] Adão Benvindo da Luz, João Alves Sampaio, e Silvia Cristina Alves França. Tratamento de minérios, 2010.
- [49] Zongjie Lyu, Junrui Chai, Zengguang Xu, Yuan Qin, e Jing Cao. A comprehensive review on reasons for tailings dam failures based on case history. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 2019.
- [50] Carlos Roberto S Mamede, Roberto Galery, e Antônio Eduardo Clark Peres. Flotação catiônica reversa de minério de ferro na presença de cátions Ca^{2+} . *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, 13(2):181–187, 2016.
- [51] E Maranha das Neves. *Mecânica dos solos dos estados críticos*. IST Press, 2013.
- [52] Amora. J.P. Marques.M.S., Lara J.L.M. Disposição de rejeitos - um desafio para a indústria mineira. Em *Encontro Nacional de Tratamento*. Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2015.
- [53] Faïçal Massad. *Obras de terra: curso básico de geotecnia*. Oficina de textos, 2 edição, 2010.
- [54] Manuel A Matos. Normas para apresentação de dissertações. Relatório técnico, bases essenciais. Technical report, Faculdade de Engenharia da Universidade . . . , 1993.
- [55] Vivianne Moreira. Continuidade na lógica de leibniz. *Analytica (Rio)*, 14(1), 2010.
- [56] DJ Naylor e GN Pande. *Finite Element Method in Geotechnical Engineering*. Pineridge Press, 245p, 1981.
- [57] Antônio Eduardo Clark Peres, Arthur Pinto Chaves, Fernando Antonio Freitas Lins, e Maurício Leonardo Torem. Cap2:extração do ouro. Em *Beneficiamento de minério de ouro*, volume 10. CETEM/MCT, 2002.
- [58] Carlos de Souza Pinto. *Curso básico de mecânica dos solos*. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- [59] David M Potts, Lidija Zdravković, Trevor I Addenbrooke, Kelvin G Higgins, e Nebojša Kovačević. *Finite element analysis in geotechnical engineering: application*, volume 2. Thomas Telford London, 2001.
- [60] Wenya Qi, Padmanabhan Seshaiyer, e Junping Wang. Finite element method with the total stress variable for biot's consolidation model. *Numerical Methods for Partial Differential Equations*, 37(3):2409–2428, 2021.
- [61] António de Carvalho Quintela. *Hidráulica, Fundação Calouste Gulbenkian*. Lisboa, 1981.
- [62] Mayte Rico, Gerardo Benito, AR Salgueiro, Andrés Díez-Herrero, e HG Pereira. Reported tailings dam failures: a review of the european incidents in the worldwide context. *Journal of hazardous materials*, 152(2):846–852, 2008.
- [63] Celso Romanel. *Modelagem constitutiva para solos com ênfase em solos não saturados*. Tese de doutoramento, PUC-Rio, 2003.
- [64] Amal Sahi, Khadija El Mahboub, Tikou Belem, Abdelkabar Maqsoud, e Mamert Mbonimpa. Dewatering of mine tailings slurries using superabsorbent polymers (saps) reclaimed from industrial reject of baby diapers: A preliminary study. *Minerals*, 9(12):785, 2019.

- [65] Robert W Sarsby. *Environmental geotechnics*. Thomas Telford, 2006.
- [66] Claudio L Schneider, Elves Matiolo, Reiner Neumann, e Otávio FM Gomes. Beneficiamento de minérios. *Melfi AJ, Misi A, Campos DdA, Cordani UG, org. Recursos Minerais no Brasil: problemas e desafios*. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, páginas 256–262, 2016.
- [67] AO Sfriso. Selecting advanced constitutive models: An overview. Em *13th ISRM International Congress of Rock Mechanics*. OnePetro, 2015.
- [68] Dawn Shuttle e Michael Jefferies. Determining silt state from cptu. *Geotechnical Research*, 3(3):90–118, 2016.
- [69] Haroldo Zeferino Silva. Comentário sobre: The iron ores of brazil. *Rem: Revista Escola de Minas*, 63:481–482, 2010.
- [70] Silva.L. Diretrizes de projeto de sistema de empilhamento re rejeitode minério de ferro filtrado e compactado - caso estudo: Minerita minérios itaúna. Available at <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/10447>, Accessed last time in Feb 2022, 2018.
- [71] OLÍVIO JOSÉ Soccol. *Construção e avaliação de hidrociclone para pré-filtragem da água de irrigação*. Tese de doutoramento, Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.
- [72] E Song. Elastoplastic consolidation under steady and cyclic loads. *N/A*, 1992.
- [73] William Murray Telford, WM Telford, LP Geldart, e Robert E Sheriff. *Applied geophysics*. Cambridge university press, 1990.
- [74] NIOSH The National Institute for Occupational Safety and Health. NIOSH — History of the Mining Program. Available at <https://www.cdc.gov/niosh/mining/content/history.html>, abril 201.
- [75] Kok Sien Ti, Bujang BK Huat, Jamaloddin Noorzaie, Mohd Saleh Jaafar, e Gue See Sew. A review of basic soil constitutive models for geotechnical application. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 14:1–18, 2009.
- [76] Robert J Tuchman e Ruth Frank Brinkley. A history of the bureau of mines pittsburgh research center. *N/A*, 1990.
- [77] JM Van Esch, JAM Teunissen, e D Stolle. Modeling transient groundwater flow under dikes and dams for stability assessment. *Computational Geomechanics (ComGeo III)*. Taylor & Francis Group, 2013.
- [78] Johannes Maria Van Esch. Adaptive multiscale finite element method for subsurface flow simulation. *N/A*, 2010.
- [79] M Th Van Genuchten. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5):892–898, 1980.
- [80] A Viana da Fonseca. Liquefação de solos à luz da mecânica aplicada. *Revista Geotécnica*, 128:3–35, 2013.

- [81] Steven G Vick. Planning, design, and analysis of tailings dams. *N/A*, 1990.
- [82] José Henrique Vuolo. *Fundamentos da teoria de erros*. Editora Blucher, 1996.
- [83] Chen Wang, David Harbottle, Qingxia Liu, e Zhenghe Xu. Current state of fine mineral tailings treatment: A critical review on theory and practice. *Minerals Engineering*, 58:113–131, 2014.
- [84] Son-Young Yi. Convergence analysis of a new mixed finite element method for biot’s consolidation model. *Numerical Methods for Partial Differential Equations*, 30(4):1189–1210, 2014.
- [85] Zhu Zhongming, Lu Linong, Zhang Wangqiang, Liu Wei, et al. Mining association of canada. *N/A*, 1900.
- [86] Olgierd Cecil Zienkiewicz, Robert Leroy Taylor, e Jian Z Zhu. *The finite element method: its basis and fundamentals*. Elsevier, Sixth edição, 2005.